



# THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

de

L'UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEM

Spécialité: Génie Mécanique, option : Energétique

Soutenue le 02/07/2018 par

**BENSEDDIK ABDELLOUAHAB**

**Thème :**

**Amélioration de la qualité et de la performance du séchage solaire des produits agro-alimentaires par insertion d'un traitement de détente instantanée contrôlée (DIC) ; analyse expérimentale, modélisation empirique et phénoménologique.**

Directeurs de thèse : Prof. A. AZZI & Prof. A. K. ALLAF

JURY :

<b>SAIM Rachid</b>	Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaïd - Tlemcen	Président
<b>AZZI Ahmed</b>	Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaïd - Tlemcen	Directeur
<b>ALLAF Abdul Karim</b>	Professeur à l'Université de La Rochelle - France	Co-Directeur
<b>BOUBEKRI Abdelghani</b>	Professeur à l'Université Kasdi Merbah - Ouargla	Examineur
<b>SELADJI Chakib</b>	Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaïd - Tlemcen	Examineur
<b>ZIDOUNE Mohammed Nesreddine</b>	Professeur à l'Université Frères Mentouri-Constantine 1	Invité

## REMERCIEMENT

*Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.*

*Je voudrais tout d'abord remercier le Professeur Karim ALLAF pour avoir accepté de m'accueillir au sein de son laboratoire en vue d'y accomplir mes travaux de thèse.*

*Je tiens à remercier très sincèrement Messieurs les Professeurs Karim ALLAF et Ahmed AZZI pour avoir accepté de diriger cette thèse. Je leurs exprime ma profonde gratitude pour leurs conseils, leurs soutien et leurs aide scientifique et technologique qui m'ont permis de mener à bien ce travail.*

*Je tiens à remercier avec plus grande gratitude Monsieur, SAÏM Rachid Professeur à l'université de Tlemcen qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de cette thèse.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Monsieur BOUBEKRI Abdelghani, Professeur à l'Université Kasdi Merbah - Ouargla, Monsieur SELADJI Chakib, Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaid - Tlemcen qui m'ont fait l'honneur d'avoir accepté d'être les examinateurs de mon mémoire de thèse. Je tiens également à remercier Monsieur ZIDOÛNE Mohammed Nesreddine, Professeur à l'Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaires (INATAA) pour avoir accepté de faire partie du jury de ma thèse.*

*Je tiens à remercier également le Professeur Mohammed Nesreddine ZIDOÛNE qui m'a accompagné durant toute la période de la formation résidentielle à l'étranger. J'ai eu la chance de profiter de son expérience, de ses grandes qualités humaines, pédagogiques et professionnelles.*

*Je tiens aussi à remercier le Docteur BENAÏMED DJILALI Adiba, d'avoir m'accueillir au Laboratoire de Recherche de Technologie Alimentaire de l'Université M'Hamed Bougara de Boumerdès (L.R.T.A) pour l'analyse et le contrôle de la qualité des produits séchés et m'a diriger pour bien développer ce présent travail.*

*Je m'adresse également mes vifs remerciements à la société ABCAR-DIC Process, spécialement à Mme Vicenta BLASCO- ALLAF et Dr Tamara ALLAF pour leur soutien, leur gentillesse et pour m'avoir fourni les produits de ce travail.*

*Je remercie les techniciens et les assistants ingénieurs du laboratoire, tout particulièrement Antony et Armelle, ainsi que le personnel administratif et les secrétaires du Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE), Université de La Rochelle.*

*Je remercie également le ministère de l'enseignement supérieur du gouvernement Algérien de m'avoir octroyé une bourse d'étude dans le cadre du Programme National Exceptionnel qui m'a permis de mener à bien ce travail.*

*Enfin, j'adresse mes remerciements à tous les collègues de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

**ملخص :** يعتبر التجفيف من أهم معالجات ما بعد الحصاد التي تم تبنيها في جميع أنحاء العالم للحد من تدهور تخزين المنتجات الزراعية، وكذلك يمكن أن يحدد جودة المنتج النهائي و مدة صلاحيته. إلا أنه يستهلك الكثير من الطاقة ويستغرق الكثير من الوقت. ولذلك لابد من تحسين عملية التجفيف لتحقيق منتجات ذات نوعية جيدة.

وبناءً على ما سبق قمنا في هذه الأطروحة بالتحقيق في تحسين وإتقان عملية التجفيف الشمسي للمنتجات الزراعية مركزين في ذلك على جانبين أساسيين: (1) استخدام الطاقة الشمسية في عملية التجفيف و (2) تحسين جودة المنتج النهائي، بادئين بتقديم عرض بليوغرافي للأبحاث السابقة التي تناولت مفاهيم مختلفة تتعلق بهذه الأطروحة، وبعد ذلك درسنا في ثلاث فصول تكميلية استغلال مصادر الطاقة المتجددة التي توفرها الشمس لأغراض التجفيف.

أولاً، إنشاء خرائط كنتورية ( isopleths charts ) لتسهيل تحليل متغيرات الأرصاد الجوية التي تؤثر على عملية التجفيف الشمسي في الجزائر.

ثانياً ، تقييم الطاقة الشمسية التي تم استردادها من قبل المجفف الشمسي المجهز بزعانف (OSF) لتجفيف المنتجات الزراعية في مختلف الأقاليم المناخية في الجزائر.

ثالثاً ، محاكاة عددية لتشغيل هذا المجفف الشمسي في ظل مناخ مدينة غرداية (مناخ شبه جاف).

وأخيراً ، قمنا بالتحقيق في خمس فصول تكميلية لدراسة الخصائص الفيزيائية للمادة المجففة و تأثير مختلف طرق التجفيف عليها.

أولاً، دراسة و نمذجة عملية اشترا ب متساوي الحرارة ، والمعرفة الدقيقة لتأثير درجة الحرارة على عملية الاشترا ب، والتنبؤ بالسلوك الاسترطابي خلال تجفيف شرائح اليقطين من ناحية، ومن ناحية أخرى استغلال النتائج التجريبية لتحديد تغير الطاقة الحرارية اللازمة لإخراج الماء مع تغير المحتوى المائي عند التوازن.

ثانياً، النمذجة الرياضية التجريبية لحركية التجفيف في طبقات رقيقة لشرائح اليقطين باستخدام مجفف الهواء الساخن.

ثالثاً، تحسين ظروف التشغيل لتجفيف شرائح اليقطين باستخدام مجفف الهواء الساخن.

رابعاً، نمذجة انتقال الكتلة بالحمل أثناء إعادة الإماهة لشرائح اليقطين المجففة باستخدام مختلف الطرق بما في ذلك التجفيف بواسطة مجفف الهواء الساخن AFD ، التجفيف بالتجميد FD، التجفيف باللفراغ متعدد الفلاش VMFD و التجفيف بالانتفاش SD.

خامساً، دراسة تأثير طرق التجفيف على الخواص الفيزيائية، المحتوى الكلي للفينولات والنشاط المضاد للبكتريا من مسحوق اليقطين.

ولهاذا ستكون نتائج هذه الرسالة مساهمة في تطوير القدرات التقنية لتصميم عمليات التجفيف الشمسي ذات الأداء العالي مما يعطي منتج نهائي جيد، وقد تم كذلك تحديد عدة وجهات نظر التي تفتح العديد من السبل للبحث.

**RÉSUMÉ :** Le séchage / déshydratation est l'un des traitements post-récolte les plus importants adoptés dans le monde entier pour réduire la détérioration et augmenter la durée de conservation ou la durabilité du stockage des produits agricoles. Il peut déterminer la qualité du produit final et établir sa durée de conservation. Il consomme également énormément d'énergie et prend beaucoup de temps. Il faut donc veiller à optimiser l'étape de séchage afin de rendre le processus complet plus compétitif. Dans cette thèse, nous avons travaillé sur la maîtrise et l'optimisation du procédé de séchage solaire des produits agro-alimentaires aux deux plans : (i) l'utilisation de l'énergie solaire dans le procédé proposé et (ii) la qualité du produit fini. Nous avons commencé par présentation d'une synthèse bibliographique des recherches, traitant les différents concepts liés à la présente thèse. Ensuite, nous avons étudié trois volets complémentaires pour l'exploitation du gisement solaire à des fins de séchage : Le premier est l'élaboration des cartes isoplèthes qui permettent de faciliter l'analyse des variables météorologiques agissant sur le processus de séchage solaire. Le deuxième est l'évaluation d'énergie solaire récupérée par l'insolateur plan à air muni d'ailettes OSF (Offset Strip Fins) destiné au séchage des produits agricoles sous différents climats d'Algérie. Et le troisième, c'est la simulation numérique du fonctionnement de cet insolateur sous le climat de Ghardaïa. En fin, nous avons étudié Cinque volets complémentaires pour diverses caractérisations et influence sur la qualité du produit. Le premier s'intéresse d'une part de la modélisation de l'isotherme de désorption, la connaissance fine de l'influence de la température sur le processus de désorption, et la prédiction du comportement hygroscopique lors du séchage de la citrouille, et d'autre part, l'exploitation des résultats expérimentaux pour déterminer leur chaleur isostérique de désorption. Le deuxième s'intéresse à la modélisation mathématique empirique de la cinétique de séchage en couche mince de la citrouille. Le troisième s'intéresse à l'optimisation des conditions opératoires du séchage de la citrouille par sécheur à air chaud, en utilisant la méthode des surfaces de réponse. Le quatrième s'intéresse à la modélisation du transfert de masse au cours du processus de réhydratation des tranches de citrouille séchées par différents procédés de séchage, à savoir : le séchage par air chaud (Air Flow Drying AFD), le séchage par lyophilisation (Freeze-Drying FD), le séchage sous vide multi-flash (Vacuum Multi Flash Drying VMFD) et le séchage par (Swell-Drying SD) couplant air chaud et Détente Instantanée Contrôlée (DIC). Le cinquième s'intéresse à l'effet des méthodes de séchage sur les propriétés physico-chimiques, les composés phénoliques totaux, la teneur en flavonoïdes et l'activité antibactérienne de la poudre de citrouille. Les résultats de cette thèse seraient de contribuer au développement des capacités techniques pour la conception des procédés de séchage solaire de meilleures qualités des produits séchés. Plusieurs perspectives ont été identifiées et offrent ainsi de nombreuses pistes de recherche.

**ABSTRACT :** The drying / dehydration are among most important postharvest treatments being adopted world wide to reduce deterioration and lengthen the storage durability of agricultural products whilst achieving good quality products. Based on the above one must optimize drying process steps to obtain a refined process such as the final outcome is to obtain a products with high quality value. In the current theses we investigated the optimization and mastering of solar drying process of agro-alimentary products on the following two axes: (i) The use of solar energy in the proposed process and (ii) The quality of final product. We started with presenting a bibliographical overview of previous researches which dealt with different concepts related to the present theses. Subsequently, we have studied in three complementary stages the exploiting of solar energy resources for solar drying applications. Firstly, elaboration of isopleths charts which facilitate the analysis of different meteorological parameters influencing the solar drying process in Algeria. Secondly, consists in evaluation of harvested energy by solar air collector equipped with offset strip fin absorber plate under different climate conditions of Algeria. Thirdly, Simulation Study of solar air collector with offset strip fin absorber plate for drying agricultural products in a semi-arid climate. Finally, we investigated in five complementary steps for diverse characterisation and influences on product quality. The first step is interested from one hand in modelling of isotherm of desorption and the precise knowledge of influence of temperature on desorption process and prediction of hygroscopical behavior of pumpkin drying. On the other hand the exploiting of experimental results in order to determine the isosteric heat. The second step is interested in Mathematical empirical models of thin-layer airflow drying kinetics of pumpkin slice. The third step is interested in optimizing drying operation conditions or drying with hot air using Response Surface Methodology. The fourth step is interested in modelling mass transfer during rehydration of pumpkin slices dried by different dehydration processes including drying by Air Flow Drying AFD, Freeze-Drying FD, Vacuum Multi Flash Drying VMFD and swell drying (SD), which is a coupling of hot air drying to instant controlled pressure drop (DIC). The fifth step is interested in studying effect of drying methods on physicochemical properties, total phenolics, flavonoids content and antibacterial activity of pumpkin powder. The results found in this thesis may be used to develop technical capacity for designing high performances solar drying processes giving a good quality final product. Several, perspective have been identified and offered new field for research.

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>PARTIE I. ETAT DE L'ART</b> .....	5
<b>CHAPITRE I.1. UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE POUR LE SECHAGE DES FRUITS ET DES LEGUMES</b> .....	6
I.1.1. INTRODUCTION .....	6
I.1.2. LE SECHAGE SOLAIRE .....	7
I.1.3. CONCLUSION .....	17
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	17
<b>CHAPITRE I.2. MODELISATION DU SECHAGE EN COUCHES MINCES DE FRUITS ET LEGUMES</b> ..	21
I.2.1. INTRODUCTION .....	21
I.2.2. FACTEURS AFFECTANT LE PROCESSUS DE SECHAGE .....	22
I.2.3. THEORIES ET MODELISATION DE SECHAGE EN COUCHE MINCE .....	23
I.2.4. MODELES DE SECHAGE EN COUCHE MINCE .....	28
I.2.5. CONCLUSION .....	37
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	38
<b>PARTIE II. EXPLOITATION DU GISEMENT SOLAIRE À DES FINS DE SÉCHAGE. SOURCE D'ÉNERGIE (GISEMENT SOLAIRE EN ALGERIE) ; UNITE DE CHAUFFAGE (INSOLATEUR PLAN A AIR MUNI D'AILETTES DESTINE AU SECHAGE SOLAIRE DES PRODUITS AGRICOLES)</b> .....	45
<b>CHAPITRE II.1. ANALYSE DES VARIABLES METEOROLOGIQUES AGISSANT SUR LE PROCESSUS DE SECHAGE SOLAIRE EN ALGERIE EN UTILISANT LA TECHNIQUE DES CARTES ISOPLETHES</b> .....	46
II.1.1. INTRODUCTION .....	46
II.1.2. MATERIELS ET METHODES .....	47
II.1.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	55
II.1.4. CONCLUSION .....	61
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	61
<b>CHAPITRE II.2. EVALUATION D'ÉNERGIE SOLAIRE RECUPEREE PAR UN INSOLATEUR PLAN A AIR MUNI D'AILETTE DESTINE AU SECHAGE DES PRODUITS AGRICOLES SOUS DIFFERENTS CLIMATS D'ALGERIE</b> .....	63
II.2.1. INTRODUCTION .....	63
II.2.2. MATERIELS ET METHODES .....	64
II.2.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	69
II.2.4. CONCLUSION .....	73

BIBLIOGRAPHIE .....	73
<b>CHAPITRE II.3. SIMULATION NUMERIQUE DU FONCTIONNEMENT DE L'INSOLATEUR PLAN A AIR MUNI D'AILETTES OSF (OFFSET STRIP FINS) DESTINE AU SECHAGE SOLAIRE DES PRODUITS AGRICOLES DANS LA REGION DE GHARDAÏA.....</b>	<b>75</b>
II.3.1.    INTRODUCTION .....	75
II.3.2.    MATERIELS ET METHODES.....	76
II.3.3.    RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	80
II.3.4.    CONCLUSION.....	87
BIBLIOGRAPHIE .....	88
<b>PARTIE III.    MODELISATION EMPIRIQUE ET PHENOMENOLOGIQUE, CARACTÉRISATIONS DIVERSES ET INFLUENCE SUR LA QUALITÉ DU PRODUIT FINI.....</b>	<b>91</b>
<b>CHAPITRE III.1. MODELISATION MATHEMATIQUE EMPIRIQUE DE LA CINETIQUE DE SECHAGE EN COUCHE MINCE DE LA CITROUILLE.....</b>	<b>92</b>
III.1.1.    INTRODUCTION .....	92
III.1.2.    MATERIELS ET METHODES.....	94
III.1.3.    RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	99
III.1.4.    CONCLUSION.....	112
BIBLIOGRAPHIE .....	112
<b>CHAPITRE III.2. OPTIMISATION DES CONDITIONS OPERATOIRES DU SECHAGE DE LA CITROUILLE PAR SECHEUR A AIR CHAUD EN UTILISANT LA METHODE DES SURFACES DE REPONSE (MSR) .....</b>	<b>115</b>
III.2.1.    INTRODUCTION.....	115
III.2.2.    MATERIELS ET METHODES.....	116
III.2.3.    RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	117
III.2.4.    CONCLUSION.....	121
BIBLIOGRAPHIE .....	121
<b>CHAPITRE III.3. MODELISATION DU TRANSFERT DE MASSE AU COURS DU PROCESSUS DE REHYDRATATION DES TRANCHES DE CITROUILLE SECHES PAR DIFFERENTES METHODES.....</b>	<b>122</b>
III.3.1.    INTRODUCTION .....	122
III.3.2.    MATERIELS ET METHODES.....	125
III.3.3.    Expérience de réhydratation .....	127
III.3.4.    RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	131
III.3.5.    CONCLUSION.....	139
BIBLIOGRAPHIE .....	140

<b>CHAPITRE III.4. EFFET DES METHODES DE SECHAGE SUR LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES, LES COMPOSES PHENOLIQUES TOTAUX, LA TENEUR EN FLAVONOÏDES ET L'ACTIVITE ANTIBACTERIENNE DE LA POUDRE DE CITROUILLE.</b> .....	145
III.4.1. INTRODUCTION .....	145
III.4.2. MATERIELS ET METHODES .....	146
III.4.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	149
III.4.4. CONCLUSION .....	153
BIBLIOGRAPHIE .....	153
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE</b> .....	157

# TABLE DES FIGURES

Figure 1. Aperçu schématique du plan de la thèse .....	4
Figure I.1-1. Différents types de séchoirs solaires de base .....	8
Figure I.1-2. Classification des séchoirs solaires assistés par l'énergie solaire.....	9
Figure I.1-3. Séchoirs solaires à convection naturelle .....	11
Figure I.2-1. Diagramme schématique d'une chambre de séchage et les couches de produit le long du plateau de séchage. ....	24
Figure I.2-2. Courbes de séchage caractéristique des produits agricoles montrant des phases de séchage à vitesse constante et des phases de séchage à vitesse décroissante [Onwude et al., 2016]. .....	25
Figure II.1-1. (a) Localisation des grandes villes représentatives de l'ensemble du climat Algérien, (b) zones climatiques en Algérie. ....	47
Figure II.1-2 Histogramme et estimation non paramétrique par la méthode du noyau de la distribution des données horaires d'intensité du rayonnement solaire annuelle, de la température annuelle et de l'humidité relative annuelle à Ghardaia .....	50
Figure II.1-3. Histogrammes et estimations non paramétriques par la méthode du noyau de la distribution des données horaires de l'intensité d'irradiation solaire annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens.....	52
Figure II.1-4. Histogrammes et estimations non paramétriques par la méthode du noyau de la distribution des données horaires de la température annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens. ....	53
Figure II.1-5. Histogrammes et estimations non paramétriques par la méthode du noyau de la distribution des données horaires de l'humidité relative annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens. ....	54
Figure II.1-6. Cartes isoplèthes de l'intensité du rayonnement solaire des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens.....	56
Figure II.1-7. Estimation non paramétrique par la méthode du noyau de la distribution des données horaires de l'intensité du rayonnement solaire annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens. ....	57
Figure II.1-8. Cartes isoplèthes de la température ambiante des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens. ....	58
Figure II.1-9. Cartes isoplèthes de l'humidité relative d'air ambiant annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens.....	58
Figure II.1-10. Estimation non paramétrique par la méthode du noyau de la distribution des données horaire de la température annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens. ....	59
Figure II.1-11. Estimation non paramétrique par la méthode du noyau de la distribution des données horaire de l'humidité relative d'air ambiant annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens. ....	60

Figure II.2-1. Schéma de l'insolateur muni d'ailettes OSF (Offset Strip Fins).....	64
Figure II.2-2. Diagramme schématique d'ailettes OSF (Offset Strip Fins). .....	65
Figure II.2-3. Représentation Schématique des transferts thermiques dans l'insolateur .....	66
Figure II.2-4. Organigramme simplifié du code de calcul élaboré sous l'environnement Matlab .....	70
Figure II.2-5. Cartes isoplèthes des températures de l'air à la sortie de l'insolateur pour les grandes villes représentatives de l'ensemble des climats en Algérie .....	71
Figure II.2-6. Estimation de la moyenne quotidienne de l'énergie solaire récupérée par l'insolateur pour les grandes villes représentatives de l'ensemble des climats en Algérie .....	72
Figure II.3-1 Variation du flux solaire et de la température ambiante : a) le 11/06/2008, journée à ciel claire, b) le 14/01/2008, journée à ciel partiellement nuageux et c) le 17/05/2008, journée avec nombreux passages de nuageux.....	81
Figure II.3-2. Observation des isothermes du 6h00 au 19h00 le 11/06/2008 jusqu'à un débit de 300 kg/h, journée à ciel claire.....	82
Figure II.3-3. Observation des isothermes du 6h00 au 19h00 le 14/01/2008 jusqu'à un débit de 300 kg/h, journée à ciel partiellement nuageux.....	82
Figure II.3-4. Observation des isothermes du 6h00 au 19h00 le 15/07/2008 jusqu'à un débit de 350 kg/h, journée avec nombreux passages de nuageux.....	83
Figure II.3-5. Évolution du rendement et de la température de sortie, à midi solaire: a) le 11/06/2008, journée à ciel claire, b) le 14/01/2008, journée à ciel partiellement nuageux et c) le 17/05/2008, journée avec nombreux passages de nuageux.....	83
Figure II.3-6. Variation du débit d'air nécessaire pour atteindre la température souhaitée: le 11/06/2008, journée à ciel claire.....	85
Figure II.3-7. Variation du débit d'air nécessaire pour atteindre la température souhaitée: le 14/01/2008, journée à ciel partiellement nuageux.....	85
Figure II.3-6. Variation du débit d'air nécessaire pour atteindre la température souhaitée: le 17/05/2008, journée avec nombreux passages de nuageux.....	85
Figure III.1-1. Pilote de séchage (1. Entrée d'air, 2. Vanne de débit, 3. Chauffage, 4. Distributeur d'air, 5. Plateau de séchage, 6. Balance, 7. Interface homme-machine et 8. Boitier d'automate programmable) .....	94
Figure III.1-2. Variation de la teneur en eau versus la durée de séchage .....	100
Figure III.1-3. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les réponses calculées en termes de l'humidité relative MR dans diverses conditions opératoires et divers modèles : Diffusion (a), Midilli-Kucuk (b) et Page (c) pour des tranches de courge.....	104
Figure III.1-4. Teneur en eau réduite (MR) versus le temps de séchage, on compare les valeurs expérimentales avec les courbes d'ajustement à travers les modèles de Page, Midilli-Kucuk et Diffusion Approach, equations (Eq. (III.1.6, III.1.7 et III.1.8)) pour les tranches de citrouille. ....	109
Figure III.1-5. Teneur en eau réduite prédite (MR) pour le modèle de Midilli-Kucuk versus expérimentale MR pour tout processus de séchage des tranches de citrouille. ....	109

Figure III.1-6. Tracé tridimensionnel de taux de la teneur en eau pour le processus de séchage des tranches de citrouille obtenu par l'équation (III.2.7) à 10 min time. ....	110
Figure III.1-7. Iso-réponses montrant l'effet de la teneur relative en eau (MR) en fonction de la température et de la vitesse du flux d'air pour des tranches à 10 min (A) et 50 min (C). ....	111
Figure III.2-1. Corrélation linéaire entre le rapport de déshydratation calculé et observé .....	119
Figure III.2-2. surfaces de réponses (a-c) et courbes isoplèthes (d-f) montrant l'effet de la température de l'air (X1), la vitesse d'air (X2) et épaisseur de l'échantillon (X3) sur le rapport de déshydratation (Y).....	120
Figure III.3-1. Schéma des méthodes de traitement et d'évaluation adopté pour les tranches de citrouille séchées.. ....	125
Figure III.3-2. Schéma de cycle DIC (Détente Instantanée Contrôlée) ; 1-2 : vide initial 5 kPa ; 2-3 : injection de vapeur ; 3-4 : Maintien de la pression de vapeur à la pression de vapeur saturée de traitement ; 4-5 : Chute de pression instantanée vers le vide ; 5-6 : Relâchement vers la pression atmosphérique.....	126
Figure III.3-3. Schéma de cycle de séchage sous vide multi-flash MFD ; Nombreux cycles de haute pression d'air P + pendant un temps de haute pression t + suivi d'une chute de pression instantanée vers une pression de vide P - retenue pendant un temps de faible pression t -.....	127
Figure III.3-4. Courbes de réhydratation du séchage par flux d'air chaud (AFD), du séchage sous vide multi-flash (VMFD), du séchage par gonflement (SD) et de la lyophilisation (FD) à : (a) 30, (b) 45 et (c) 60 °C. ....	133
Figure III.3-5. Détermination graphique des coefficients de diffusion effective ( $Deff1$ , $Deff2$ et $Deff3$ ) de la réhydratation des tranches de citrouille pour : a) séchage par flux d'air chaud (AFD), b) séchage sous vide multi-flash (VMFD), c) séchage par swell-drying (SD) et d) séchage par lyophilisation (FD) à : 30, 45 et 60 ° C.....	135
Figure III.3-6. Détermination expérimentale des courbes d'évolution de la réhydratation des tranches de citrouille pour : a) séchage par flux d'air chaud (AFD), b) séchage sous vide multi-flash (VMFD), c) séchage par swell-drying (SD) et d) séchage par lyophilisation (FD) à : 30, 45 et 60 ° C.	136
Figure III.4-1. Distribution granulométrique des différentes poudres. ....	146
Figure III.4-2. Courbe de calibration Standard de a) Acide Gallique et b) Quercetine.....	148
Figure III.4-3. Microscopie électronique à balayage MEB de poudres de citrouille séchées par différentes méthodes: A) séchage par flux d'air (AFD); B) Séchage multi-flash sous vide (VMFD); C) séchage swell-drying (SD); D) Lyophilisation (FD). ....	152
Figure III.4-4. Spectre de FT-IR de poudre de citrouille issue de diverses méthodes de séchage ....	153

# TABLE DES TABLEAUX

Tableau I.1-1. Avantages et limites des différents types de séchoirs solaires .....	9
Tableau I.1-2. Séchage solaire des fruits et légumes.....	16
Tableau II.1-1. Coordonnées géographiques et caractéristiques climatiques des régions étudiées...	48
Tableau II.3-1. Tests statistiques de la spline de lissage utilisée pour ajuster les courbes de débit massique d'air afin d'atteindre la température désirée à différents types de ciel.....	87
Tableau III.1-1. Modèles de séchage en couche mince .....	96
Tableau III.1-2. Facteurs retenus et domaine d'étude pour le plan composite centré.....	97
Tableau III.1-3. Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince.....	101
Tableau III.1-4. Résultats du plan d'expériences pour Approximation du modèle Diffusionnel. ....	105
Tableau III.1-5. Résultats du plan d'expériences pour Approximation du modèle Midilli-Kucuk. ....	105
Tableau III.1-6. Résultats du plan d'expériences pour Approximation du modèle Page. ....	106
Tableau III.1-7. Influences de la température de l'air de séchage, de la vitesse de l'air et de l'épaisseur des tranches sur les constantes des trois meilleurs modèles .....	107
Tableau III.1-8. Résultats pour les meilleurs modèles créés (les relations entre les conditions de séchage, l'épaisseur des tranches, le temps et les paramètres (k, n, a et b)).....	109
Tableau III.2-1. Conditions et les résultats de la conception expérimentale, pour le séchage de la citrouille basée sur le plan d'expériences composite centré à cinq niveaux .....	117
Tableau III.2-2. Niveaux des variables utilisées pour la construction du plan composite centré .....	118
Tableau III.2-3. Analyse de variance (ANOVA), termes linéaires, d'interaction et quadratiques pour chaque variable de réponse et les coefficients de modèle de prévision .....	118
Tableau III.3-1. Modèles empiriques fréquemment utilisés pour la cinétique de réhydratation.....	130
Tableau III.3-2. Tests statistiques des modèles sélectionnés utilisés pour simuler les courbes de réhydratation des tranches de citrouille pour le séchage par flux d'air chaud (AFD).....	131
Tableau III.3-3. Tests statistiques des modèles sélectionnés utilisés pour simuler les courbes de réhydratation des tranches de citrouille pour le séchage sous vide Multi-Flash (VMFD) .....	132
Tableau III.3-4. Tests statistiques des modèles sélectionnés utilisés pour simuler les courbes de réhydratation des tranches de citrouille pour le séchage par swell-drying (SD) .....	132
Tableau III.3-5. Tests statistiques des modèles sélectionnés utilisés pour simuler les courbes de réhydratation des tranches de citrouille pour le séchage par lyophilisation (FD) .....	132
Tableau III.3-6 Effet de la température de l'eau sur les coefficients de diffusion effective ( $Deff1$ et $Deff2$ ) pour la réhydratation des tranches de citrouille séchées par flux d'air chaud (AFD).....	134
Tableau III.3-7. Effet de la température de l'eau sur les coefficients de diffusion effective ( $Deff1$ et $Deff2$ ) pour la réhydratation des tranches de citrouille séché par vide Multi-Flash (VMFD).....	134
Tableau III.3-8. Effet de la température de l'eau sur les coefficients de diffusion effective ( $Deff1$ et $Deff2$ ) pour la réhydratation des tranches de citrouille séchées par swell-drying (SD) .....	135

Tableau III.3-9. Effet de la température de l'eau sur les coefficients de diffusion effective ( <i>Def</i> 1 et <i>Def</i> 2) pour la réhydratation des tranches de citrouille séchées par lyophilisation (FD) .....	135
Tableau III.3-10. Estimation des paramètres de l'équation d'Arrhenius pour (AFD) .....	137
Tableau III.3-11. Estimation des paramètres de l'équation d'Arrhenius pour (VMFD) .....	137
Tableau III.3-12. Estimation des paramètres de l'équation d'Arrhenius pour (SD).....	137
Tableau III.3-13. Estimation des paramètres de l'équation d'Arrhenius pour (FD).....	137
Tableau III.4-1. Teneur totale en composés phénoliques et flavonoïdes par extractions aqueuse et par éthanol des tranches de citrouille obtenus après différentes méthodes de séchage. ....	150
Tableau III.4-2. Activité antimicrobienne des poudres de citrouille obtenues à partir des différentes méthodes de séchage .....	151

# NOMENCLATURE

$A_c$	: surface de captation de l'insolateur plan à air	$m^2$
$A_f$	: surface d'ailette	$m^2$
$a_w$	: activité en eau	-
$Cp_f$	: chaleur massique de l'air, voir l'annexe 2	$J/kg.K$
$D_{eff}$	: diffusivité effective	$m^2/s$
$D_H$	: diamètre hydraulique	$m$
$D_h$	: rayonnement diffus sur une surface horizontal	$W/m^2$
$e$	: épaisseur de la veine d'air mobile	$m$
$e_b$	: épaisseur du bois	$m$
$e_{is}$	: épaisseur de l'isolant	$m$
$E$	: épaisseur de la tranche de citrouille	
$E_a$	: énergie d'activation	$J/mol$
$F'$	: coefficient d'efficacité local de transfert air-absorbeur	-
$F_R$	: coefficient global de transfert air-absorbeur	-
$G_h$	: rayonnement global parvenant sur une surface horizontale	$W/m^2$
$G_t$	: rayonnement solaire global sur le plan incliné	$W/m^2$
$h_c$	: coefficient de transfert de chaleur par convection	$W/m^2K$
$h_f$	: coefficient d'échange entre l'absorbeur et le fluide	$W/m^2K$
$h_r$	: coefficient de transfert de chaleur entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium placée sur l'isolant	$W/m^2K$
$h_{vv}$	: coefficient d'échange convectif du au vent, entre la face inférieure de l'insolateur et l'air extérieur	$W/m^2K$
$j$	: facteur de Colburn	-
$L$	: demi d'épaisseur de la tranche de citrouille	$m$
$l_C$	: largeur du capteur plan à air	$m$
$L_C$	: longueur du capteur plan à air	$m$
$M_0$	: teneur en eau du produit initiale à base sèche	$kg\ eau/kg\ MS$
$M_t$	: teneur en eau du produit à l'instant $t$ à base sèche	$kg\ eau/kg\ MS$
$MR$	: teneur en eau réduite du produit à l'instant $t$ à base sèche	$kg\ eau/kg\ MS$
$\dot{m}$	: débit massique d'air	$kg/s$
$\dot{m}_{opt}$	: débit d'air nécessaire pour obtenir une température optimale	$kg\ eau/s$
$N$	: nombre de vitrage	-
$P_u$	: puissance utile	$W$
$q_0$	: chaleur nette de désorption isostérique des premières molécules d'eau dans le produit	$J/mol$
$Q_u$	: énergie utile emportée par le fluide caloporteur	$W/m^2$
$r$	: Coefficient de corrélation	-
$RR$	: taux de réhydratation	-
$S_h$	: rayonnement direct sur une surface horizontale	$W/m^2$
$t$	: temps	$t$
$T_1$	: température moyen de l'absorbeur	$K$
$T_2$	: température de la plaque d'aluminium	$K$
$T_a$	: température ambiant	$K$
$\hat{T}_a$	: température équivalente extérieure	$K$
$T_c$	: température équivalente de la voute céleste	$K$

$T_f$	: température moyen de l'air dans la veine d'air mobile de l'insolateur	$K$
$T_{fe}$	: température de l'air à l'entrée de l'insolateur	$K$
$T_{fs}$	: température de l'air asséchant à la sortie de l'insolateur	$K$
$U_b$	: coefficient de perte thermique à l'arrière de l'insolateur	$W/m^2K$
$U_L$	: coefficient global de pertes thermique entre l'absorbeur et l'air extérieur	$W/m^2K$
$U_t$	: coefficient de perte thermique à l'avant de l'absorbeur	$W/m^2K$
$V$	: vitesse débitante de l'air asséchant dans le séchoir	$m/s$
$v_V$	: vitesse du vent	$m/s$
$W$	: humidité absolue du produit à l'instant $t$ à base humide	$kg\ eau/kg\ MS$
$X$	: humidité absolue du produit à l'instant $t$ à base sèche	$kg\ eau/kg\ MS$
$X_m$	: la première couche d'eau couvre la surface du sorbant	$kg\ eau/kg\ MS$
$X_0$	: humidité absolue du produit initiale à base sèche	$kg\ eau/kg\ MS$
$X_{eq}$	: humidité absolue du produit à l'équilibre à base sèche	$kg\ eau/kg\ MS$
$XR$	: humidité absolue réduite du produit à l'instant $t$ à base sèche	$kg\ eau/kg\ MS$

### Nombres adimensionnels

$NU$	: nombre de Nusselt
$Pr$	: nombre de Prandtl
$Re$	: nombre de Reynolds
$S_c$	: nombre de Schmidt
$Sh$	: nombre de Sherwood

### Lettre grecques

$\alpha_n$	: coefficient d'absorptivité	-
$\tau_v$	: coefficient de transmittivité du vitrage	-
$\beta$	: angle d'inclinaison du capteur	-
$\varepsilon_{pr}$	: Porosité du produit	-
$\varepsilon_n$	: émissivité de l'absorbeur	-
$\varepsilon_v$	: émissivité de la vitre	-
$\Phi$	: quantité sans dimensions	-
$\Phi_g$	: flux global reçus par l'isolateur	$W/m^2$
$\varphi_{fs}$	: humidité relative de l'air asséchant	%
$\eta$	: rendement thermique de l'insolateur	%
$\eta_f$	: l'efficacité d'une seule ailette	%
$\eta_s$	: l'efficacité de la surface global d'ailette	%
$\eta_t$	: rendement thermique du séchoir solaire	%
$\rho_f$	: masse volumique de l'air	$kg/m^3$
$\lambda_f$	: conductibilité de l'air à l'instant $t$	$W/m.K$
$\lambda_{is}$	: conductivités thermiques de l'isolant	$W/m.K$
$\mu_f$	: viscosité dynamique de l'air à l'instant $t$	$kg/m.s$
$\nu_f$	: viscosité cinématique de l'air à l'instant $t$	$m^2/s$

## Liste des abréviations

AE	: Extraits aqueux
AFD	: séchage par air chaud
DDS	: Déshydratation par Détentes Successives
DIC	: Détente Instantanée Contrôlée, « Instant - controlled pressure drop »
EE	: Extrait Ethanolique
FD	: séchage par lyophilisation (Freeze-Drying FD)
FT-IR	: Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
GAE	: Equivalent Acide Gallique
MEB	: Microscopie Électronique à Balayage
OSF	: Offset Strip Fins
PDF	: Fonction de Densité de Probabilité
QE	: Equivalent Quercetine
R	: Resistant
RSM	: Méthodologie de la Surface de Réponse
SD	: séchage par Swell-Drying
TFC	: La teneur totale en flavonoïdes
TPC	: La teneur totale en phénols
VMFD	: séchage sous vide multi-flash

# INTRODUCTION GENERALE

La production mondiale en fruits et légumes souffre d'un manque de maîtrise et d'optimisation des procédés de préservation aux deux plans de la qualité du produit fini (nutritionnelle, sensorielle, et de praticité) et de la performance des opérations industrielles adoptées (coût énergétique, difficultés de transport et de stockage...). Ces produits très riches en diverses vitamines, molécules antioxydantes et sels minéraux, constituent une source importante de ces nutriments pour l'alimentation humaine. Cependant, une partie importante de ces produits (estimés à 30-40% de la production dans les pays en développement [Karim et al., 2006]) est généralement perdue et dégradée en raison d'une humidité trop élevée. Le procédé de séchage a ici un intérêt particulier. Par comparaison aux autres procédés de préservation (congélation, appertisation, ...), il a l'avantage d'une plus grande facilité de stockage et de transport.

Cependant, le procédé de séchage exige, habituellement, un apport en énergie de chauffage élevé et onéreux, nécessaire pour l'évaporation de l'eau à soustraire du végétal ou de la denrée alimentaire à préserver. Cet élément est d'autant plus critique que le coût de l'énergie fossile ne cesse d'augmenter ou d'être perturbé. Le niveau de température que nécessite le séchage fait que le recours à l'énergie solaire est d'une pertinence évidente. Ainsi, de nombreux types de sècheurs solaires ont été proposés et utilisés à travers le monde. Ils avaient en plus l'avantage d'une transformation de la production de fruits et légumes au juste voisinage de leur récolte. Plusieurs pays en développement se sont lancés dans la réalisation de projets nationaux, souvent encouragés en ce sens par l'Organisation Mondiale de l'Agriculture et de l'Alimentation (Food and Agriculture Organisation ou F. A. O.) : Étendre le rôle de l'énergie solaire gratuite de la production des produits agricoles proprement dites vers leur préservation semble d'un intérêt évident considérable. Les pays africains semblaient être les plus concernés. Toutefois, on constate qu'en plus de la dégradation de la qualité fonctionnelle, sensorielle et nutritionnelle du produit séché fini, la contamination microbologique et la présence probable de larves d'insectes, souvent plus importantes dans le cas des sècheurs solaires, réduisent systématiquement et considérablement le temps de vie de ces produits. Les produits séchés par voie solaire voire par voie industrielle d'air chaud sont périssables dans un délai de moins de trois à six mois en raison des contaminations diverses (moisissures, microbes, etc.) ; ils doivent donc être vendus/consommés dans un très court délai. A défaut, ils se détériorent et deviennent impropres à la consommation. Par ailleurs, dans les campagnes, les producteurs de fruits et légumes qui vivent de leurs petites parcelles de terrain, sont sujets aux fluctuations du marché, notamment lors des saisons de production où les prix baissent jusqu'à rendre la production déficitaire. Une opération couplée de séchage/décontamination permet à ces entrepreneurs ruraux d'allonger la durabilité des produits séchés, de diminuer les pertes, et d'améliorer ainsi leur situation économique et sociale.

Parmi les solutions pouvant permettre à ces entrepreneurs ruraux d'allonger la durabilité des produits séchés et de diminuer les pertes, il serait intéressant d'envisager un couplage d'opérations complémentaires de préservation avec optimisation des conditions d'application selon la nature du matériau biologique visé. L'idée de décontaminer le matériau tout en le séchant, peut être assurée

par le procédé dit de « Détente Instantanée Contrôlée » ou DIC qui présente aussi divers avantages en matière de réduction des préjudices à la qualité et en matière de gain en performances de la soustraction de l'eau, car le procédé peut à la fois être texturant et contribuer fortement à la préservation du plus grand nombre de molécules actives.

L'utilisation de la Détente Instantanée Contrôlée DIC en tant qu'opération de décontamination couplée à une soustraction du solvant et accompagnée d'une texturation capable de préserver la qualité nutritionnelle et de contrôler et orienter les effets de retraits ou d'expansion est un moyen très efficace et bénéfique permettant d'ajouter de la valeur aux produits finis. La réduction du poids et du volume des denrées, le report de l'utilisation dans le temps en préservant les propriétés fonctionnelles et la facilité de manipulation, de transport et de stockage, constituent des arguments forts ayant un grand impact économique, voire stratégique.

Le procédé de séchage conventionnel à air chaud étant énergétiquement coûteux, l'utilisation de l'énergie solaire dans les pays à fort ensoleillement, présente une opportunité économique de grande importance. L'Algérie dispose d'un potentiel solaire considérable et suffisamment important, en particulier pour les applications à température relativement basse. L'ensoleillement annuel moyen est évalué à 2000 heures, avec un ensoleillement moyen de 6,57 kWh/m<sup>2</sup>/jour. Avec sa position géographique et un territoire d'une superficie de 2 381 741 km<sup>2</sup> composé de 86% de désert saharien, l'Algérie dispose d'un gisement solaire des plus importants dans le monde [Capderou, 1987]. Ainsi, le couplage d'un séchage solaire bien optimisé et adapté et d'une technologie appropriée de préparation des matériaux devrait être un moyen hautement pertinent pour améliorer, tant sur le plan économique que sur le plan qualitatif, la préservation de la production agricole.

En dépit de l'importance du séchage comme opération unitaire et les progrès récents dans la recherche sur la préservation par élimination de l'eau, les principes physiques des phénomènes complexes qui se produisent au cours de la déshydratation et de la réhydratation ne sont pas entièrement élucidés et compris. La modélisation du séchage est désespérément difficile dans le cas des produits biologiques et alimentaires. Un modèle de cinétique de séchage, tout à fait satisfaisant et applicable à des produits alimentaires donnés, n'est pas disponible à l'heure actuelle. Pourtant, l'analyse et le traitement du processus de séchage, la maîtrise et l'exploitation des lois de transfert, l'identification des réactions chimiques et enzymatiques pouvant être impliquées et la modélisation phénoménologique qui en découle devraient permettre une intensification de l'opération unitaire proprement dite tout en respectant et considérant la dépendance matière première périssable et produit fini recherché. Il convient de rappeler que ces modèles phénoménologiques, bien qu'impliquant souvent des paramètres d'approximation (coefficient effectif de convection, conductivité effective, diffusivité effective, perméabilité, etc.) permettent, s'ils sont bien adaptés, une bonne utilisation en tant qu'outil d'intensification, de développement de processus ou de la conception de l'équipement. Leur couplage avec l'« Ingénierie de séchage des aliments » qui repose encore largement sur l'expérience et l'expérimentation, est un outil de grande pertinence.

Ce travail de thèse a été envisagé dans le but d'aborder certaines des questions soulignées précédemment. L'intérêt de développer des modèles prédictifs de cinétiques de séchage est plus qu'évident. La possibilité d'élaborer et/ou de déduire des modèles se rapprochant le plus possible de la réalité avec distinction des influences des facteurs intrinsèques et/ou extrinsèques au matériau à sécher sur le procédé de séchage est, dans le présent travail, tentée en étudiant le comportement de la citrouille comme exemple de légume. Par ailleurs, les aspects indispensables de coût énergétique de l'opération et de source d'énergie, imposent la recherche de meilleurs compromis visant à optimiser et mieux rentabiliser et adapter ces opérations de préservations aux besoins et possibilités de notre pays. Il s'en suit, alors que la recherche entreprise aspire à approcher les divers volets évoqués en abordant les questions relatives, à :

- Accomplir l'analyse phénoménologique de l'opération de séchage proprement dite ;
- Intégrer des technologies innovantes et d'intensification en vue d'améliorer la qualité du produit fini ;
- Viser la valorisation et l'utilisation rationnelle du gisement solaire en Algérie ;
- Détermination des valeurs instantanées du débit d'air nécessaires pour atteindre une température de séchage constante à une valeur donnée tout au long de la journée quelle que soit la fluctuation des conditions météorologiques ;

La présente thèse tente d'étudier les aspects suivants : 1/ le gisement solaire en Algérie ; 2/ la modélisation d'un insolateur plan à air destiné au séchage ; 3/ les cinétiques de séchage et leur exploitation en vue d'une optimisation et enfin 4/ l'aspect qualitatif du produit à préserver comme impact dépendant de la méthode de séchage choisie.

Les objectifs fixés se retrouvent, par conséquent, structurés et exprimés au niveau des cinq paquets suivants :

1. L'analyse des variables météorologiques sous différents climats d'Algérie pouvant influencer les performances du processus de séchage solaire à travers la technique des cartes isopleths ;
2. La simulation numérique du fonctionnement d'un insolateur plan à air muni d'ailettes destiné au séchage solaire des produits agricoles sous un climat semi-aride avec une évaluation de l'énergie récupérée estimée sous différents climats d'Algérie ;
3. La modélisation mathématique empirique de la cinétique de séchage en couche mince de la citrouille avec recherche d'optimisation en utilisant la Méthode des Surfaces de Réponse (MSR) des conditions opératoires en séchage par air chaud de la citrouille ;
4. L'estimation de l'effet du séchage sur les propriétés physico-chimiques de la citrouille avec essai de modélisation du transfert de masse au cours du processus de réhydratation.

L'aspect qualitatif a bénéficié de l'opportunité d'évaluer les contenus en composés phénoliques totaux, en flavonoïdes et l'activité antibactérienne de la poudre de citrouille.

Le schéma ci-dessous (Figure 1) explique l'organisation générale du programme de thèse.

# LES GRANDES LIGNES DE LA THESE

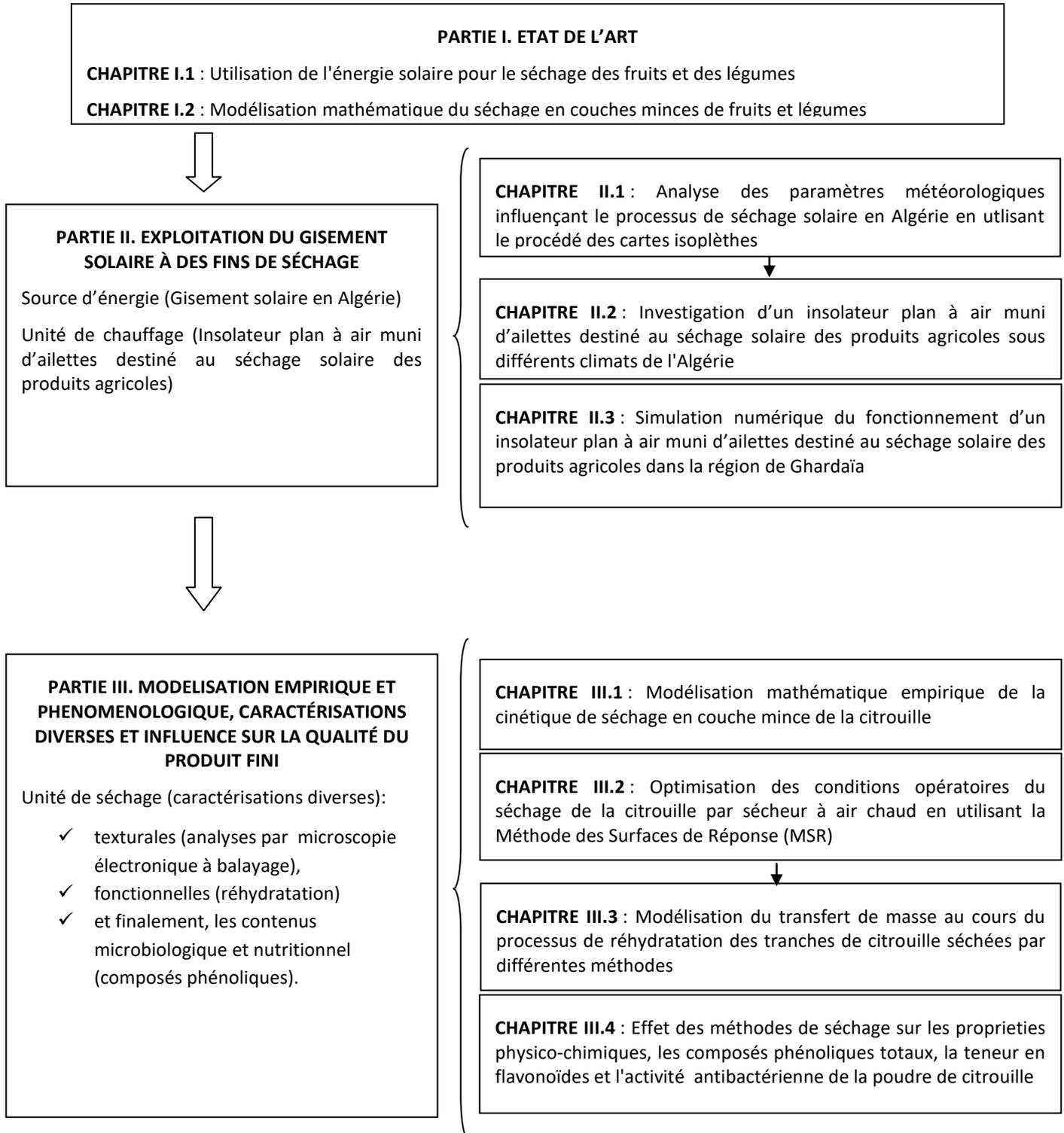


Figure 1. Aperçu schématique du plan de la thèse

# **PARTIE I. ETAT DE L'ART**

# **CHAPITRE I.1.**

## **UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE POUR LE SECHAGE DES FRUITS ET DES LEGUMES**

### **I.1.1. INTRODUCTION**

La population mondiale atteindrait 7,9 milliards en 2025, d'après le Fonds des Nations unies pour la population (UNFPA). En ce qui concerne cette croissance de la population au cours des 25 prochaines années, environ 50% de plus de nourriture sera produite. Par conséquent, la production agricole doit être augmentée pour garantir la demande alimentaire de la population à croissance rapide. Le déséquilibre population-alimentation peut être résolu en augmentant la production alimentaire ou en limitant la population. Une autre solution la plus viable à ce problème alimentaire consiste à réduire les pertes alimentaires, qui surviennent pendant la production alimentaire et après récolte [Brown, 1995]. Les pertes après récolte sont considérées comme étant de 30% à 40% [El-Sebaili et al., 2012]. Le séchage (processus d'élimination de l'humidité) des produits agricoles est l'un des processus post-récolte importants pour économiser les produits contre les pertes, car l'activité microbienne est considérablement réduite.

Le mode de vie changeant a également entraîné une demande de nourriture plus saine, comme les aliments fonctionnels, qui nécessitent un séchage comme étape importante pendant le traitement. Les agriculteurs se sont également rendu compte de l'importance d'augmenter la durée de conservation de leurs produits afin d'obtenir plus de retours pour leurs efforts. Autre fait connu, le séchage réduit également le coût global du transport en plus augmenter la durée de conservation. En général, le séchage est devenu une partie intégrante de la transformation des aliments [Mujumdar, 2006 ; Mujumdar, 2008, Jangam et al., 2010]. On sait que le séchage thermique est une opération d'unité à forte intensité énergétique et concourt à la distillation en ce qui concerne la consommation d'énergie. Ceci est dû à une très forte chaleur latente de vaporisation de l'eau, qui est le solvant le plus courant, doit être retiré des produits alimentaires. En particulier, les produits alimentaires sont très sensibles à la chaleur et ne peuvent être exposés à des températures très élevées pour accélérer le processus de séchage, ce qui entraîne une qualité inattendue des produits séchés (en termes de couleur, de propriétés de réhydratation, de texture, de perte de nutriments, etc.). Cette contrainte ajoute au coût de séchage global car les produits doivent être exposés à l'air chauffé pendant plus longtemps - bien qu'à une température plus basse [Jangam et al., 2011]. La mauvaise conception du séchoir est une autre raison d'une consommation d'énergie plus élevée que nécessaire. Dans la plupart des séchoirs convectifs, l'air de séchage sortant de séchoir est jeté directement dans l'atmosphère, ce qui entraîne une perte de la chaleur sensible et latente de l'humidité présente dans l'air sortant. Tous ces faits donnent lieu à une mauvaise efficacité énergétique du système de séchage et, en fin de compte, à un coût plus élevé des produits séchés [Mujumdar, 2008, Law et al., 2010]. Il y a eu de nombreux efforts pour minimiser la consommation d'énergie par divers moyens. Parmi les moyens simples mais efficaces, il est possible d'améliorer le contrôle des sécheurs, une isolation correcte du sécheur, l'utilisation d'un chauffage indirectement si possible (plus efficace que le séchage convectif), la récupération et le recyclage de l'énergie

thermique provenant de l'échappement du sécheur [Kudra et al., 2009]. Bien que ces différentes voies puissent réduire la consommation d'énergie, le système ne peut pas fonctionner sans consommation d'énergie externe et entraîne toujours d'autres formes d'énergie (principalement l'électricité). Pour la plupart des sécheurs, la source de chaleur est soit du combustible fossile, soit de l'énergie électrique directe. La hausse des coûts énergétiques rend la situation plus difficile et oblige les utilisateurs sélecteurs à utiliser d'autres options énergétiques telles que les sources d'énergie renouvelables. Les problèmes liés à la durabilité - principalement la réduction de la consommation d'énergie, de la gravité du carbone et de l'émission de gaz dangereux - ont été très attentifs ces dernières années à la suite du réchauffement climatique. Cela a permis d'utiliser des sources d'énergie durables pour préserver les combustibles fossiles restants afin de les rendre disponibles pendant plus longtemps. Cela a été pratiqué dans toutes les industries pour presque tous les processus thermiques - le séchage, pas une exception nécessitant une énergie intensive.

Bien qu'il existe diverses formes d'énergie renouvelable disponibles, les sources de séchage les plus applicables ou viables sont le solaire, le vent, la biomasse et éventuellement l'énergie géothermique. L'énergie solaire est traditionnellement utilisée pour le séchage en tant que séchage au soleil ouvert utilisé pour divers produits agricoles et marins depuis des décennies. Cependant, la demande pour une meilleure qualité du produit déshydraté au coût de production minimale pour soutenir les demandes croissantes du marché a entraîné d'énormes améliorations en ce qui concerne la méthode d'utilisation de l'énergie solaire, les moyens d'améliorer l'efficacité de collecte de l'énergie solaire, le stockage d'énergie thermique pendant le temps d'arrêt et un meilleur transfert de chaleur vers le milieu de séchage.

### **I.1.2. LE SECHAGE SOLAIRE**

Le séchage solaire est l'application la plus attractive et prometteuse de l'énergie solaire dans les régions tropicales et sous-tropicales. L'utilisation de l'énergie solaire a été pratiquée au fil des années pour accroître la durée de conservation de divers produits agricoles et marins pour la consommation locale. Afin de bénéficier d'une source d'énergie gratuite et renouvelable fournie par le soleil, plusieurs tentatives ont été faites ces dernières années. Cependant, pour la production à grande échelle, les limitations du séchage en plein air sont bien connues. Parmi ceux-ci, il y a des coûts de main-d'œuvre élevés, des besoins importants en zone, et le manque de capacité à contrôler le processus de séchage, une dégradation possible due à des réactions biochimiques ou microbiologiques, des infestations d'insectes, etc. En outre, le temps de séchage requis pour un produit donné peut être assez long (parfois plus d'un mois) et entraîner des pertes après récolte. Le séchage solaire des produits agricoles dans les structures fermées par convection forcée est un moyen attrayant de réduire les pertes post-récolte et la faible qualité des produits séchés associés aux méthodes traditionnelles de séchage instantané au soleil. En raison du manque de méthodes de conservation adéquates, le séchage direct à l'air libre est encore un moyen largement utilisé de préservation des aliments dans de nombreuses régions du monde en développement. Les autres inconvénients remarquables du séchage au soleil ouvert sont :

- **Dégradation due à une exposition directe au rayonnement solaire**

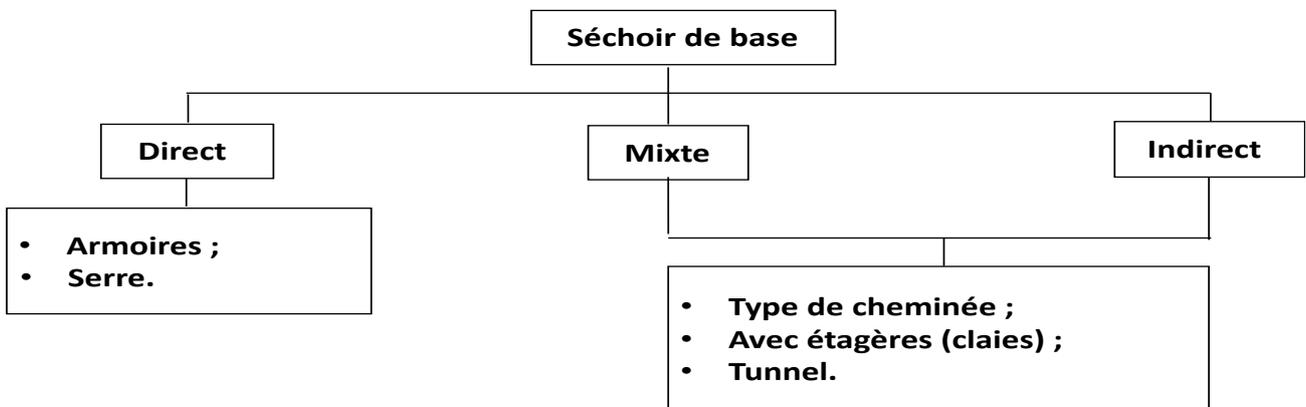
- **Contamination par saleté, poussière, insectes et contaminants environnementaux**
- **Sur séchage et séchage parfois non uniforme**
- **Croissance des microorganismes,**

Comme indiqué précédemment, au cours des dernières décennies, Plusieurs pays en développement ont commencé à changer leurs politiques énergétiques vers une nouvelle réduction des consommations de combustibles et de modifier leur consommation d'énergie à l'utilisation des énergies renouvelables.

Dans le cadre des recherches portant sur des techniques de séchage améliorées, le séchage solaire a été testé comme alternative au séchage traditionnel au soleil. Les séchoirs solaires captent ou concentrent le rayonnement solaire, ce qui permet d'obtenir des températures plus élevées et, partant, des humidités relatives plus faibles. En utilisant des séchoirs solaires, la vitesse de séchage peut être accélérée. On obtient ainsi des produits de meilleure qualité. Les séchoirs solaires sont moins sensibles aux variations climatiques bien que le séchage soit forcément plus lent par mauvais temps. Ils assurent également une protection contre la pluie. Les températures très élevées qui règnent à l'intérieur repoussent les insectes et détruisent ceux qui ont réussi à y pénétrer.

### **I.1.2.1. Classification des séchoirs solaires**

Les séchoirs solaires peuvent être classés en fonction de la conception des composants du système et du mode de collecte de l'énergie solaire (Figure I.1-1 et Figure I.1-2) :



*Figure I.1-1. Différents types de séchoirs solaires de base*

Les séchoirs solaires à convection naturelle qui utilisent simplement le gradient de température pour provoquer une convection libre dans la chambre de séchage sont bon-marchés mais inefficaces et adaptés à des opérations à très petite échelle. Les séchoirs à convection forcée sont plus efficaces mais nécessitent une soufflante pour entraîner le flux d'air de séchage à travers le collecteur solaire et le séchoir. La puissance du ventilateur peut être obtenue par l'utilisation d'un appareil photovoltaïque mais le coût est élevé. [Fudholi et al., 2010] ont fourni un aperçu complet de la multitude des séchoirs solaires pour les produits agricoles et marins. Tout type de collecteur solaire - plaque plate simple à des types de concentration peut être utilisé pour collecter l'énergie solaire pour le séchage. Un grand assemblage de séchoirs à convection (directe) peut être utilisé

pour contacter l'air de séchage avec le produit humide. [Imre, 2006] a donné une excellente discussion sur les divers types de séchoirs et les considérations de conception impliquées.

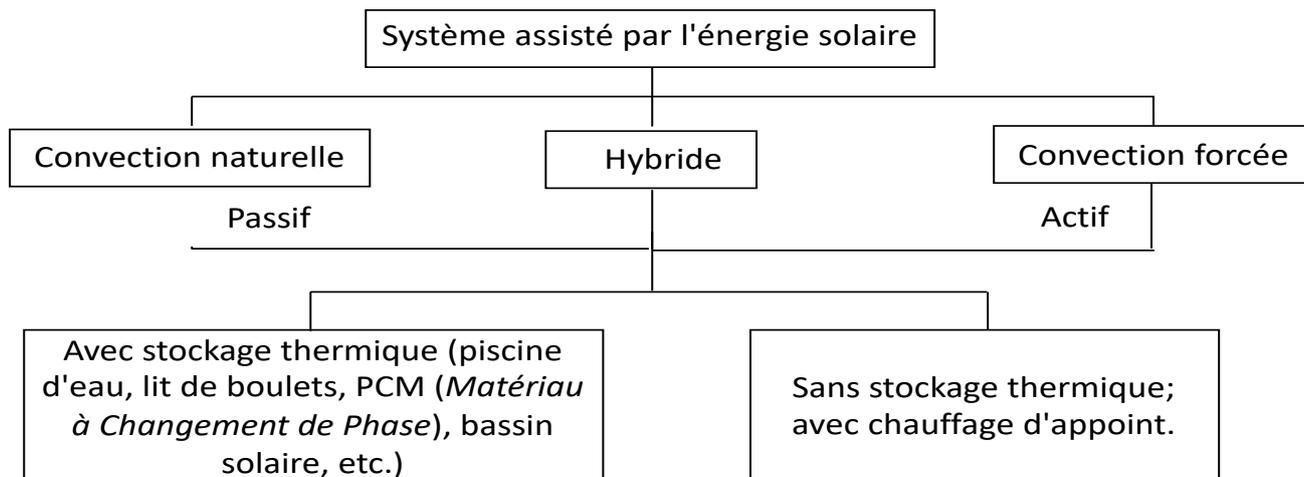


Figure I.1-2. Classification des séchoirs solaires assistés par l'énergie solaire

Cependant, la classification basée sur les sources d'énergie utilisées [Mujumdar, 2006] se fait comme étant :

- Séchoirs solaires naturels utilisant uniquement des sources d'énergie ambiante ;
- Séchoirs solaires semi-artificiels avec un ventilateur entraîné par un moteur électrique pour maintenir un flux d'air continu dans l'espace de séchage ;
- Séchoirs solaires à assistance artificiels capables de fonctionner à l'aide d'une source d'énergie conventionnelle (auxiliaire) si nécessaire.

Les séchoirs solaires naturels présentent des inconvénients inhérents à un processus très incontrôlé alors que les séchoirs artificiels assistés par l'énergie solaire s'avèrent être une option coûteuse, mais ils sont très contrôlés. De ces deux, les séchoirs solaires semi-artificiels se révèlent être une option meilleure et économique pour l'application rurale. Le Tableau I.1-1 résume certains avantages et limites des types de séchoirs solaires mentionnés ci-dessus.

Tableau I.1-1. Avantages et limites des différents types de séchoirs solaires

Type de séchoirs	Avantages	Limites
Séchoirs solaires à convection naturelle (Séchoirs passifs)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simple à concevoir</li> <li>- Faible coût d'installation et d'exploitation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La capacité par unité de surface de séchoir est limitée</li> </ul>
Séchoirs solaires à convection forcée (séchoirs actifs)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taux de séchage plus élevés par rapport aux séchoirs passifs</li> <li>- Peut être utilisé pour des taux de production élevés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus complexe et coûteux que les séchoirs passifs</li> </ul>
Séchoirs solaires hybrides	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meilleur contrôle du séchage</li> <li>- Cela peut être utilisé même en l'absence d'énergie solaire, ce qui réduit les risques d'endommagement du produit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Système plus complexe</li> <li>- Plus chers que les séchoirs passifs et actifs</li> </ul>

### I.1.2.2. Examen des types de séchoirs solaires

Cette section traite de certains types de séchoirs solaires en détail, y compris leur principe de fonctionnement, leurs avantages et leurs possibilités d'amélioration.

#### *i. Séchoirs solaires à convection naturelle (séchoirs passifs)*

Le fonctionnement des séchoirs solaires à convection naturelle dépend uniquement de l'énergie solaire. Ces sécheurs sont appelés séchoirs passifs pour les distinguer avec d'autres sécheurs (appelés séchoirs actifs) qui utilisent des moyens mécaniques de circulation d'air. Dans ces types de séchoirs, l'air est chauffé à l'aide d'énergie solaire et s'écoule et / ou à travers le produit à sécher par une force de flottabilité ou par suite de la pression du vent agissant séparément ou en combinaison. Ceux-ci sont les plus attrayants dans les zones rurales. Ces séchoirs sont supérieurs et offrent une qualité de séchage beaucoup améliorée par rapport au séchage au soleil ouvert. Voici quelques-uns des avantages des séchoirs solaires à convection naturelle par rapport au séchage au soleil ouvert.

- zone plus petite pour sécher le même volume de produits
- meilleure qualité des produits secs (car le produit n'est pas exposé directement aux rayonnements solaires, aux insectes et aux champignons)
- taux de séchage plus élevés et donc production plus élevée.
- produit de valeur commerciale par rapport aux produits de séchage au soleil ouvert pour la consommation locale.

La Figure I.1-3 montre certains types de séchoirs à convection naturelles. La Figure I.1-3 (a) est le séchoir solaire à convection naturelle le plus simple. Bien qu'il existe un certain nombre de variations, mais le fonctionnement de base est presque le même. La chaleur requise pour le séchage est donnée par l'exposition directe du produit à l'irradiation solaire à travers une paroi transparente et l'air vient du bas du plateau et s'écoule vers le haut à travers le produit par convection naturelle. Les parois de séchoir sont bien isolées afin de conserver la majeure partie de la chaleur avec le produit à sécher. La conception est très simple et implique un coût minimal, mais elle n'est utile que pour le séchage d'une petite quantité de matière. L'application de ce type de séchoir est principalement destinée aux produits agricoles pour la petite consommation. La Figure I.1-3 (b), est un autre type de séchoir à convection naturel. Contrairement au séchoir solaire à convection naturel du type armoire dans la Figure I.1-3 (a), où la contrainte principale est la quantité de produit qui peut être utilisée, ce type de séchoir est conçu pour accueillir plus de quantité de produit, en plaçant le produit dans des couches séparées indépendantes. Comme le montre la Figure I.1-3 (b), les parois de l'armoire de séchage orientées vers le sud sont maintenues transparentes afin d'exposer les couches de produit aux rayonnements solaires. L'air est chauffé à une certaine température dans un collecteur solaire séparé avant de parcourir les couches du produit à sécher (Figure I.1-3 (b)). L'efficacité ainsi que la quantité de matière à sécher peuvent être considérablement augmentées.

## ii. Séchoirs solaires à convection forcée (séchoirs actifs)

Un séchoir solaire actif typique dépend uniquement de l'énergie solaire en tant que source de chaleur, mais utilise des ventilateurs motorisés et / ou des pompes pour la circulation forcée de l'air de séchage. L'énergie solaire est utilisée uniquement ou avec des énergies électriques et fossiles pour chauffer l'air de séchage et les ventilateurs électriques sont utilisés pour la circulation de l'air. D'où le transfert de chaleur est principalement par convection forcée dans ces types de séchoirs.

Dans les séchoirs à convection forcée, le choix de plusieurs systèmes de chauffage d'air rend ces systèmes plus souples même lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible. Si l'énergie solaire est disponible en abondance, elle peut être utilisée seule pour la déshydratation, ou bien peut être utilisée la chaleur d'appoint soit en utilisant des radiateurs électriques, ou en utilisant des combustibles fossiles, évitant ainsi les effets de la production d'énergie fluctuante des collecteurs solaires qui peuvent parfois entraîner une croissance microbienne lorsque la chaleur solaire n'est pas disponible. Les systèmes qui incorporent ce chauffage d'appoint sont appelés séchoirs solaires hybrides. Il existe un grand nombre de séchoir solaire à convection forcée classés généralement en mode intégral, distribué et mixte. Dans les séchoirs actifs de type intégral, le collecteur solaire fait partie intégrante du toit et / ou de la paroi de la chambre de séchage / stockage. Un séchoir solaire actif de type distribué est celui dans lequel le collecteur solaire et la chambre de séchage sont des unités séparées. Les séchoirs de type mixte sont des conceptions plutôt rares et combinent certaines caractéristiques du type intégral et distribué.

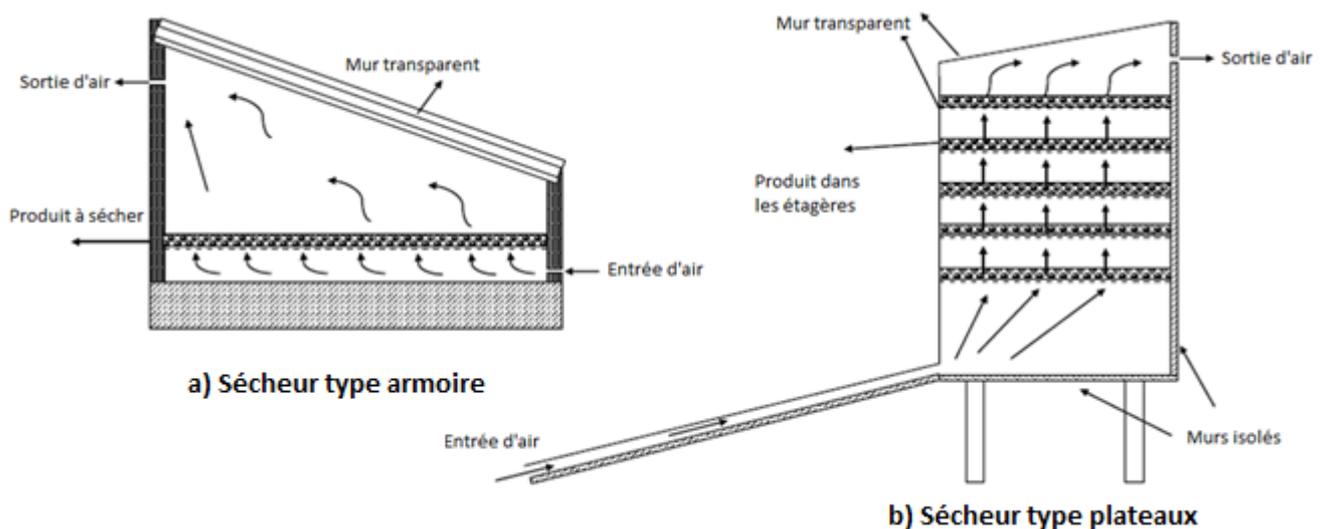


Figure I.1-3. Séchoirs solaires à convection naturelle

### I.1.2.3. Applications du séchage solaire

Comme discuté jusqu'à présent, l'énergie solaire est efficacement utilisée pour le séchage de divers produits afin de minimiser le coût et de rendre le système durable. Les séchoirs solaires sont largement utilisés pour les produits agricoles. Dans ce chapitre, on accordera une attention particulière aux produits agricoles qui sont habituellement commercialisés sous une forme sèche comme :

#### *i. Pomme*

[Elicin et al., 2005] ont développé un séchoir solaire tunnel capable à la déshydratation des pommes. La teneur en eau a été réduite de 82 à 11% en 32 h pour le séchage au soleil ouvert, alors que le séchoir solaire a duré seulement 28 h. Sur les conditions météorologiques de base, le séchage solaire tunnel a entraîné une réduction du temps de séchage dans une mesure d'environ 14% par rapport au séchage solaire ouvert. La pomme séchée dans le séchoir solaire tunnel était complètement protégée contre la pluie, les insectes, la poussière, l'oiseau et la pomme séchée était de haute qualité en termes de couleur et d'hygiène.

#### *ii. Banane*

[Smitabhindu et al., 2008] ont réalisé une simulation et une optimisation du système de séchage assisté par énergie solaire pour le séchage des bananes. Le modèle de simulation a été validé en comparant les résultats de simulation avec les résultats expérimentaux. [Schirmer et al., 1996] ont développé un séchoir solaire polyvalent pour sécher les bananes en Thaïlande. Ils ont signalé que «ce séchoir pourrait être utilisé pour sécher jusqu'à 300 kg de bananes mûres. Ils ont constaté que la température de l'air de séchage du collecteur variait entre 40 et 65 ° C pendant le séchage et les bananes peuvent être séchées dans un délai de 3 à 5 jours, par rapport aux 5-7 jours nécessaires au séchage à l'air libre.

#### *iii. Noix de cajou aux coquilles*

[Mursalim et al., 2002] ont modifiés un séchoir armoire à convection naturel pour sécher la noix de cajou dans les coquillages (SNC) en Indonésie. Ils ont déclaré que «l'unité de séchage solaire pourrait chauffer l'air sec jusqu'à 78,7 ° C maximum à la température ambiante de 27,2 8 ° C en moyenne.

#### *iv. Manioc*

[Forson et al., 2007] ont conçu un séchoir solaire à convection naturelle en mode mixte et le testé expérimentalement en séchant du manioc. Les expériences révèlent que 49,1, 65,9 et 162 kg de manioc peuvent être déshydratés en 30 à 36 h avec des irradiations solaire moyenne prévue de 400 W / m<sup>2</sup>, des conditions ambiantes de 25,8°C et 77,8% d'humidité relative.

#### *v. Chou-fleur*

[Kadam et al., 2006] ont développé et testé un séchoir solaire à convection forcée utilisant un collecteur solaire V-groove pour sécher le chou-fleur. L'étude a été menée pour déterminer l'efficacité thermique du collecteur solaire convectif forcé pour sécher le chou-fleur afin d'obtenir un produit déshydraté de bonne qualité. Ils ont découvert que l'efficacité thermique du collecteur de solaire dépend directement du rayonnement solaire et de l'humidité dans l'air.

#### *vi. Piments*

[Hossain et al., 2007] ont développé un séchoir solaire tunnel polyvalent. Il peut être utilisé jusqu'à 80 kg de piments frais. Ils ont conclu que « dans tous les cas, l'utilisation de ce séchoir a entraîné

une réduction considérable du temps de séchage par rapport à celui du séchage solaire conventionnel, et les produits séchés à l'aide de ce séchoir étaient de meilleure qualité par rapport à leurs homologues conventionnels séchés au soleil. L'élévation moyenne de la température de l'air dans le séchoir était d'environ 22 °C au-dessus de la température ambiante et il était presque constant dans le séchoir. Les piments séchés dans le séchoir solaire tunnel étaient complètement protégés contre la pluie, la poussière, les oiseaux, les rongeurs, la saleté et les microorganismes.

#### *vii. Copra (coprah)*

Un séchoir solaire à convection forcée conçu, fabriqué et testé par [Mohanraj et al., 2008] pour sécher le coprah. Ils ont signalé que ce séchage est plus adapté pour les petits possesseurs. Environ 75% de coprah de haute qualité pourraient être produits. Le séchage du coprah dans le séchoir a réduit sa teneur en eau d'environ 52% à 8% et 10% en 82 h pour les plateaux en bas et en haut, respectivement. La température maximale de l'air de séchage enregistrée pendant les heures de pointe du soleil était de 63 °C. La température moyenne a été réduite à 31 °C en dehors des heures de soleil et pendant la nuit.

#### *viii. Tomates*

Un séchage solaire sous un séchoir de type tunnel à convection naturelle et un séchage solaire conventionnel ont été effectués par [Demir et al., 2010] ; Le séchoir solaire de type tunnel a été jugé plus efficace par rapport au séchage solaire conventionnel et a permis d'économiser jusqu'à 17,4% du temps de séchage.

#### *ix. Cacao*

[Hii et al., 2006] ont étudié la qualité des graines de cacao séchées à l'aide d'un séchoir solaire direct à différentes charges (20, 30 et 60 kg). Ils ont déclaré que «l'évaluation globale de la qualité a montré que le traitement de 20 kg était capable de produire des haricots raisonnablement de bonne qualité par rapport à d'autres charges et, par conséquent, il est recommandé pour un séchoir solaire direct».

#### *x. Figs*

[El-Sebali et al. 2002] ont constaté que la teneur en eau présentait une diminution de la valeur initiale d'environ 70% à la valeur finale de 20% après 32 h et 12 h lorsque les figes sont séchées en taille réelle dans un séchoir sans stockage et avec stockage (sable). [Gallali et al., 2000] ont étudié l'analyse chimique et la qualité sensorielle (couleur, texture et saveur) pour les fruits et légumes secs en utilisant le soleil ouvert et le séchage solaire (mode mixte et indirect). Ils ont rapporté que «la teneur en eau des figes a été réduite à 23,5% en mode mixte et 46,9% en cas de soleil ouvert pendant la même période ».

#### *xi. Les raisins*

[Pangavhane et al., 2002a] ont examiné les séchoirs solaires pour le séchage des raisins. [Pangavhane et al., 2002b] ont développé un séchoir solaire à convection naturelle multifonction.

Ils ont signalé que "le débit d'air de séchage a augmenté avec l'augmentation de la température ambiante. L'efficacité du collecteur de ce séchoir solaire à convection naturelle était comprise entre 0,26 pour un débit de 0,0126 kg/s et 0,65 pour un débit de 0,0246 kg/s. Dans cette étude, l'analyse qualitative a montré que le séchage traditionnel du raisin, c'est-à-dire le séchage à l'ombre et le séchage au soleil ouvert, nécessitait 15 et 7 jours, respectivement, tandis que le séchoir solaire à convection naturelle prenait seulement 4 jours et produisait des raisins secs de meilleure qualité. Le temps de séchage des raisins est également réduit de 43% par rapport au séchage au soleil ouvert. Le séchoir solaire à convection naturelle développé pourrait produire la température moyenne entre 50 et 55 ° C, ce qui était optimal pour la déshydratation des raisins ainsi que pour la plupart des fruits et légumes". [Gallali et al., 2002] ont signalé que les modes mixtes et indirects de séchage étaient plus efficaces que le soleil ouvert, puisque les teneurs en eau finale pour les raisins étaient d'environ 13, 20 et 68%, respectivement.

#### *xii. Pois verts*

[El-Sebali et al., 2002] ont rapporté que 1 kg de pois verts peut être séché à 45,5-50,5 °C pendant 8-10 h jusqu'à une teneur en eau finale de 5% dans un séchoir solaire à convection naturelle de type indirect.

#### *xiii. Mangue*

[Madhlopa et al., 2002] ont rapporté que les mangues fraîches en tranches ayant une teneur en eau initiale de 85 % peuvent être séchées à 31,7-40,1 °C jusqu'à une teneur en eau finale de 13% pendant 20 h dans un séchoir solaire à convection naturelle de type indirect. [Toure et al., 2004] ont signalé que la mangue ayant une teneur en eau initiale de 84 % peut être séchée jusqu'à une teneur en eau finale de 27,6% à une température maximale de 40 °C pendant 15 h dans un séchoir solaire à convection naturelle.

#### *xiv. Oignons*

[Sarsavadia, 2007] a indiqué que des tranches d'oignons sont séchées à partir d'une teneur en eau initiale d'environ 86% jusqu'à une teneur en eau finale d'environ 7% par un séchoir solaire hybride. Des économies maximales d'énergie totale peuvent être obtenues jusqu'à 70,7% avec le recyclage de l'air d'échappement chaud.

#### *xv. Paddy*

Un séchoir solaire à convection forcée a été construit et testé sur de riz sec dans la maison d'un fermier en Thaïlande tel que rapporté par [Soponronnarit, 1995]. Le système a une capacité de 12 tonnes de riz, les tests de séchage indiquaient qu'une seule tonne de riz pouvait être séchée d'une teneur en eau d'environ 17% à 14% en 1 à 4 jours selon les conditions météorologiques. La consommation moyenne d'énergie électrique pour un ventilateur a été estimée à 7 kWh par lot de séchage.

*xvi. Ananas*

[Bala et al., 2005] ont conçu, construit et évalué un séchoir solaire hybride pour sécher 150 kg d'ananas frais. Ils ont signalé que ce séchoir était complètement protégé contre les insectes, la pluie et la poussière et que le produit était de haute qualité. Ils ont constaté que la température maximale de l'air de séchage à la sortie du collecteur solaire était de 64 °C.

*xvii. Fraise*

[El-Beltagy et al., 2007] ont indiqué que le séchoir solaire indirect a été testé avec succès dans les conditions météorologiques de Minufiya, en Égypte, où la fraise séchée a été obtenue de haute qualité. La performance du capteur solaire est supposée satisfaisante ; il pourrait augmenter la température ambiante à environ 47 °C en conditions de pointe, ce qui est considéré comme suffisant pour le séchage des fraises.

*xviii. Thé*

Un séchoir solaire hybride conçu, fabriqué et testé pour sécher le thé en Malaisie par [Ruslan et al., 2003]. Ils ont signalé que l'énergie totale requise pour maintenir la température de la chambre de séchage à 50 °C est de 60,2 kWh. La contribution d'énergie auxiliaire est de 17,6 kWh. Par conséquent, l'énergie solaire contribue est de 42,6 kWh au cours de la procédure et contribue environ 70,2% de l'énergie nécessaire.

#### **I.1.2.4. Qualité des produits agricoles séchés grâce à l'énergie solaire**

La qualité du produit est le seul attribut qui évalue l'acceptation d'un produit pour une consommation ou une utilisation sécurisée par des êtres humains en dehors des opportunités commercialisables. Cet attribut est également important dans les produits frais, semi-séchés et entièrement séchés dans les catégories comestibles et non comestibles. Traditionnellement, la plupart des produits agricoles sont séchés sous la lumière directe du soleil pour atteindre le degré de séchage requis. Cela a été fait depuis que l'humanité se rend compte de l'importance au séchage. Avec l'introduction d'une technique de séchage avancée, de nombreux produits agricoles sont séchés à l'aide de séchoirs mécaniques. Néanmoins, dans de nombreuses régions du monde, le séchage au soleil ouvert est encore une pratique habituelle, en particulier dans les pays en développement [Esper et al., 1998 ; Garg, 2001 ; Benali, 2004 ; Mercer, 2008 ; Murthy, 2009].

Le Tableau I.1-2 montre le résumé des résultats de recherche dans diverses études de séchage solaire des fruits et légumes. Le résumé couvre autant que possible les produits qui sont couramment séchés à l'aide de l'énergie solaire, en particulier les produits alimentaires. D'autres détails des études peuvent être obtenus à partir des documents cités, comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

*Tableau I.1-2. Séchage solaire des fruits et légumes*

<b>Produits</b>	<b>Type de séchoir solaire</b>	<b>Constatations majeures</b>
Carottes [Prakash et al., 2004]	séchoir solaire cabinet	<p>Une perte élevée de <math>\beta</math>-carotène a été observée dans les carottes séchées à l'armoire solaire en raison d'un temps de séchage plus long et de l'exposition à la lumière conduisant à une oxydation.</p> <p>Un faible taux de réhydratation a été observé en raison d'un rétrécissement plus important des échantillons séchés par séchoir solaire.</p>
Patate douce [Bechoff et al., 2009]	séchoir solaire	<p>L'échantillon séché par serre solaire n'a montré aucune perte significative dans les caroténoïdes totaux par rapport aux échantillons séchés au soleil ouvert et à l'air chaud.</p> <p>Le séchage au soleil ouvert a montré la valeur de rétention la plus basse.</p>
Feuilles vertes [Negi et al., 2001]	Séchoir solaire indirect	<p>Des pertes plus élevées de <math>\beta</math>-carotène et d'acide ascorbique ont été observées dans le séchage solaire par rapport à l'armoire de séchage à air chaud lors du stockage.</p> <p>La perte de chlorophylle était également plus élevée dans l'échantillon séché par voie solaire.</p> <p>La rétention des paramètres de qualité des légumes verts à feuilles était meilleure dans des conditions de séchage plus rapide.</p>
Épinards, le niébé, la patate douce et les feuilles de manioc [Maeda et al., 1981]	Séchoir solaire Enfermé	<p>La rétention maximale de l'acide ascorbique et du carotène total a été observée dans un séchoir solaire fermé avec une nuance par rapport au séchage au soleil ouvert.</p> <p>- Le séchage au soleil ouvert a montré une rétention minimale de ces nutriments.</p>
Tranches de citrons [Chen et al., 2005]	Séchoir solaire associé au module photovoltaïque	<p>Des échantillons de citron séchés avec une couleur vivante ont été observés dans un séchage solaire complémentaire à l'aide d'une augmentation graduelle de la température (gamme 36 - 52 °C).</p> <p>Un faible brunissement a été observé par rapport au séchage à 60 °C.</p>
Raisins et figues [Gallali et al., 2000]	Séchoirs solaires directs et indirects	<p>La teneur en vitamine C des fruits secs était faible en raison de l'oxydation pendant le séchage solaire, en particulier lorsque les échantillons étaient scalés ou sulfurés.</p> <p>La couleur des raisins séchés à l'aide d'un séchoir solaire indirect a montré une forte acceptation par rapport à l'échantillon séché au soleil ouvert (acceptation moyenne).</p> <p>La texture et la couleur des figues séchées à l'aide de séchoirs solaires mixtes ont montré une meilleure acceptation que les échantillons séchés au soleil ouvert.</p>
Prunes [Tarhan, 2007]	Séchoir solaire de type serre	<p>Le séchage solaire et le séchage au soleil ouvert des prunes prétraités par une combinaison de 1% d'hydroxyde de potassium et d'une température de trempage à 60 °C ou par une combinaison d'hydroxyde de sodium à 1% et d'une température de trempage de 60 °C a donné des valeurs relativement élevées de rougeurs et de jaunes comparées au séchage artificiel.</p> <p>L'effet combiné du rayonnement solaire et ces combinaisons de prétraitement ont réduit la couleur sombre des prunes pendant le séchage solaire et le séchage au soleil ouvert.</p>
Latex de la papaye [Narinesingh et al., 1989]	Séchoir solaire indirect de lit de Rock	<p>Le latex séché au soleil ouvert a eu une activité protéolytique légèrement supérieure à celle de l'échantillon frais en raison de l'effet du rayonnement ultraviolet sur le résidu histidine qui est essentiel à l'activité protéolytique.</p> <p>Cela a été attribué à l'utilisation de séchoir indirecte puisque le latex n'a pas été exposé à des rayonnements directs.</p>
Les fèves de cacao [Hii et al., 2006]	Séchoir solaire direct	<p>L'évaluation globale de la qualité (saveur, acidité, indice de fermentation, apparence et odeur) indique que le chargement de 20 kg de fèves de cacao est recommandé.</p> <p>À cette quantité, la durée de séchage a été plus courte et cela réduit le risque de développement putréfactif dans les haricots en raison de conditions météorologiques défavorables.</p>

Riz [Mehdizadeh et al., 2009]	Séchoir solaire passif à mode mixte	Le riz solaire séché a entraîné un degré de blancheur plus élevé que le riz séché au soleil ouvert. Les échantillons séchés dans un séchoir solaire ont une saveur similaire à celles séchées sous le soleil ouvert.
Pistaches [Ghazanfari et al., 2003]	Séchoir solaire direct	Les échantillons séchés au séchoir solaire et au soleil ouvert ont montré un excellent goût par rapport aux échantillons séchés à l'air chaud. Aucune aflatoxine n'a été trouvée dans les pistaches séchées au séchoir solaire et au soleil ouvert.

### I.1.3. CONCLUSION

L'utilisation des énergies renouvelables est nécessaire pour rendre le système de déshydratation des aliments accessible aux agriculteurs à un coût relativement inférieur. Bien que la technique soit utilisée depuis des décennies pour une utilisation locale, les récentes exigences commerciales (qualité et quantité) ont entraîné des développements dans le séchage solaire, comme le montrent les dernières techniques disponibles et discutées dans ce chapitre.

Le séchage solaire est largement appliqué dans divers produits agricoles tels que les fruits, les légumes, les céréales, les graines, etc. Généralement, les principales variables de traitement qui déterminent la qualité finale des produits séchés grâce à l'énergie solaire sont le temps de séchage ainsi que la période d'exposition à la lumière du soleil. La période de séchage prolongée et le contact avec la lumière ultraviolette (UV) pourraient dégrader certains produits phytochimiques et vitamines précieux dans des produits secs tels que la chlorophylle, l'huile essentielle, le  $\beta$ -carotène et l'acide ascorbique. Néanmoins, l'utilisation des séchoirs solaires indirects et le prétraitement de matières premières pourrait surmonter ces problèmes. Le taux de séchage du produit est important car il influence les changements physiques et chimiques et affecte à la fois les attributs de qualité et le niveau d'acceptation du produit par les consommateurs. En fin l'utilisation du sécheur solaire entraîne une réduction considérable du temps de séchage par rapport au séchage au soleil couvert et la qualité du produit séché par des séchoirs solaire est comparable ou supérieure aux produits séchés au soleil couvert. Des méthodes appropriées devraient être utilisées pour surveiller et évaluer ces attributs de qualité.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bala, B.K., Mondol, M.R.A., Biswas, B.K., Das Chowdary, B.L. (2003). Solar drying of pineapple using solar tunnel drier. *Renewable Energy* 28: 183–90.
- Bechoff, A., Dufour, D., Dhuique-Mayer, C., Marouzi, C., Reynes, M., Westby, A. (2009). Effect of Hot Air, Solar and Sun Drying Treatments on Provitamin A Retention in Orange-Fleshed Sweetpotato. *Journal of Food Engineering*. 92: 164-171.
- Brown, L. (1995). Who will feed China? The World watch Environment Alert Series, New York-London.
- Capderou, M. Atlas Solaire de l'Algérie, Tomes 1, 2 et 3, Office des Publications Universitaires (OPU), AlgerseAlgeria, 1987.
- Chen, H.H., Hernandez, C.E., Huang, T.C. (2005). A Study of the Drying Effect on Lemon Slices Using a Closed-Type Solar Dryer. *Solar Energy*. 78 97-103.

- Demir, K., Sacilik, K. (2010). Solar drying of Ayaş tomato using a natural convection solar tunnel dryer. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 8: 7-12.
- El-Beltagi, A, Gamea, G.R., Essa, A.H.A. (2007). Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*. 78: 456–64.
- El-Sebaei, A.A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M.R.I., El-Gohary, H.G. (2002). Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. *Energy Conversion & Management*. 43: 2251–66.
- El-Sebaei, A.A., and Shalaby, S.M. (2012). Solar drying of agricultural products: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 37-43.
- Elicin, A.K., Sacilik, K. (2005). An experimental study for solar tunnel drying of apple. *Tarim Bilimleri*. 11: 207–11.
- Esper, A., Mühlbauer, W. (1998). Solar Drying – An Effective Means of Food Preservation. *Renewable Energy*. 15: 95-100.
- Forson, F.K., Nazha, M.A.A., Akuffo, F.O., Rajakaruna, H. (2007). Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: application of principles and rules of thumb. *Renewable Energy*; 32: 2306–19.
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M.H., Alghoul, M.A., Sulaiman, M.Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14: 1-30.
- Gallali, Y.M., Abujnah, Y.S., Bannani, F.K., (2000). Preservation of Fruits and Vegetables Using Solar Drier: A Comparative Study of Natural and Solar Drying, III ; Chemical Analysis and Sensory Evaluation Data of the Dried Samples (Grapes, Figs, Tomatoes and Onions), *Renewable Energy*, 19: 203-212.
- Garg, H.P. (2001) Developments in Solar Drying, In Proceedings of the 2nd Asian-Oceania Drying Conference. 297-321.
- Ghazanfari, A., Tabil J.r., L., Sokhansaj, S. (2003). Evaluating a Solar Dryer for In-Shell Drying of Split Pistachio Nuts. *Drying Technology*. 21: 1357-1368.
- Hii, C.L., Abdul Rahman, R., Jinap, S., Che Man, Y.B. (2006). Quality of Cocoa Beans Dried Using a Direct Solar Dryer at Different Loadings. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 86: 1237-1243.
- Hossain, M.A., Bala, B.K. (2007). Drying of hot chilli using solar tunnel drier. *Solar Energy*. 81: 85–92.
- Imre, L. (2006). Solar drying. In Handbook of Industrial Drying, 3rd Ed ; Mujumdar, A.S., Ed. ; Taylor & Francis : Philadelphia, pp. 307-361.
- Jangam, S.V., Mujumdar, S.V. (2010) Basic concepts and definitions. In : Drying of Foods Vegetables and Fruits – Volume 1, Ed. Jangam, S.V., Law, C.L., Mujumdar, S.V., ISBN- 978-981-08-6759-1, Published in Singapore, Accessed May 2011, pp. 1-30.
- Jangam, S.V., Visavale, G.L., Mujumdar, A.S. Use of renewable source of energy for drying of FVF, In Drying of Foods, Vegetables and Fruits - Volume 3, Ed. Jangam, S.V., Law, C.L. and Mujumdar, A.S., 2011, ISBN - 978-981-08-9426-9, Published in Singapore, pp. 103-126.
- Kadam, D.M., Samuel, D.V.K. (2006) Convective flat-plate solar heat collector for cauliflower drying. *Biosystems Engineering*. 93 (2): 189–98.

- Kudra, T., Mujumdar, A. S., 2009, Advanced drying technologies. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Law, C.L., Mujumdar, A.S., 2010, Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing. *Food and Bioprocess Technology*. 3 (6): 843-852.
- Madhlopa, A., Jones, S.A., Saka, J.D.K. (2002). A solar air heater with composite-absorber systems for food dehydration. *Renewable Energy*. 27: 27–37.
- Maeda, E.E., Salunkhe, D.K., (1981), Retention of Ascorbic Acid and Total Carotene in Solar Dried Vegetables. *Journal of Food Science*. 46: 1288-1290.
- Mehdizadeh, Z., Zomorodian, A. (2009). A Study of the Effect of Solar Drying System on Rice Quality. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 11, 527-534.
- Mercer, D.G., (2008). Solar Drying in Developing Countries : Possibilities and Pitfalls, In Using Food Science and Technology to Improve Nutrition and Promote National Development, Robertson, G.L., Lupien, J.R. (Eds.), Chapter 4.
- Mohanraj, M., Chandrasekar, P. (2008). Drying of copra in forced convection solar drier. *Biosystems Engineering*. 99 : 604–7.
- Mujumdar, A. S., (2006). Handbook of industrial drying. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Mujumdar, A.S., (2008). Guide to Industrial Drying, Ed. Mujumdar, A.S., Three S Colors Publication, Mumbai, India.
- Mursalim, Supratomo, Dewi, Y.S. (2002). Drying of cashew nut in shell using solar dryer. *Science & Technology*. 3 (2): 25–33.
- Murthy, M.V.R. (2009). A Review of New Technologies, Models and Experimental Investigations of Solar Driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13: 835-844.
- Narinesingh, D., Mohammed-Maraj, R. (1989). Solar Drying Characteristics of Papaya (*Carica papaya*) Latex. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 46 (2): 175–186.
- Negi, P.S., Roy, S.K. (2001). Effect of Drying Conditions on Quality of Green Leaves During Long Term Storage. *Food Research International*. 34 (4): 283-287.
- Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L. (2002a). Review of research and development work on solar dryers for grape drying. *Energy Conversion and Management*. 43: 45–61.
- Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L., Sarsavadia, P.N. (2002b). Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy*. 27: 579–90.
- Prakash, S., Jha, S.K., Datta, N. (2004). Performance Evaluation of Blanched Carrots Dried by Three Different Driers. *Journal of Food Engineering*. 62(3): 305-313.
- Ruslan, M.H., Othman, M.Y., Yatim, B., Sopian, K., Ali, M.I., Ibrahim, Z. (2003). Photovoltaic assisted solar drying system. In : *Proceeding of the International Symposium on Renewable Energy*. 681–7.
- Sarsavadia, P.N. (2007). Development of solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion. *Renewable Energy*. 32: 2529–47.
- Schirmer, P., Janjai, S., Esper, A., Smitabhindu, R., Muhlbauer, W. (1996). Experimental investigation of the performance of the solar tunnel dryer for drying bananas. *Renewable Energy*. 7 (2): 119–29.

Smitabhindu, R., Janjai, S., Chankong, V. (2008). Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas. *Renewable Energy* 33: 1523–31.

Soponronnarit, S. (1995). Solar drying in Thailand. *Energy for Sustainable Development*. 2 (2): 19–25.

Tarhan, S. (2007). Selection of Chemical and Thermal Pretreatment Combination for Plum Drying at Low and Moderate Drying Air Temperatures. *Journal of Food Engineering*. 79 (1): 255-260.

Toure, S., Kibangu-Nkembo, S. (2004). Comparative study of natural solar drying of cassava, banana and mango. *Renewable Energy*. 29: 975–90.

## **CHAPITRE I.2.**

### **MODELISATION DU SECHAGE EN COUCHES MINCES DE FRUITS ET LEGUMES**

#### **I.2.1. INTRODUCTION**

Le séchage est l'une des opérations unitaires les plus anciennes et les plus importantes, c'est un processus compliqué qui implique des phénomènes simultanés de transfert de masse et de chaleur, accompagnée de transformations physico-chimiques. C'est une opération fréquemment rencontrée dans plusieurs secteurs industriels (matériaux de construction, agro-alimentaire, textile, produits pharmaceutiques, etc...). Selon [Klemes et al., 2008], il existe plus de 200 types de séchoirs qui peuvent être utilisés à des fins différentes. Le séchage qui est une opération unitaire à énergie-intense a un impact environnemental négatif dû au fait que la grande partie de l'énergie est obtenue à partir des combustibles fossiles. 12 à 25 % de la consommation énergétique industrielle est attribué à la déshydratation dans les nations industrielles. Comme les économies globales prospèrent, la demande en énergie pour le séchage va augmenter. Ainsi, il faut bien comprendre cette opération et s'assurer qu'elle est conduite avec efficacité en tenant compte des contraintes du marché. Il est aussi important de se tenir au courant des technologies de séchage courantes aussi bien que celles émergentes [Devahastin, 2000]. Selon [Kudra et al., 2002], les technologies conventionnelles sont encore largement préférées industriellement par rapport aux nouvelles technologies. C'est pour de multiples raisons, qui comprennent la simplicité de la construction du séchoir, la facilité d'utilisation, ainsi que le statut de la familiarité [Araya-Farias et al., 2009].

Au fil du temps, les modèles de séchage en couche mince développés ont été utilisés dans les calculs impliquant la conception et la construction de nouveaux systèmes de séchage, l'optimisation du processus de séchage et la description complète du comportement de séchage, y compris l'approche macroscopique et microscopique de transfert de chaleur et de masse combinés. Ainsi, il est important de comprendre l'idée de base de la modélisation de la cinétique de séchage des fruits et légumes. Les conditions de séchage, le type de séchoir et les caractéristiques du matériau à sécher ont tous une influence sur la cinétique de séchage. Les modèles de cinétique de séchage sont donc importants pour fixer des conditions de séchage idéales, qui sont des paramètres importants en termes de conception d'équipement, d'optimisation et d'amélioration de la qualité des produits [Giri et al., 2007]. Ainsi, pour analyser le comportement de séchage des fruits et légumes, il est important d'étudier le modèle de cinétique de chaque produit particulier.

Le séchage en couche mince est une méthode largement utilisée pour déterminer la cinétique de séchage des fruits et légumes [Alves-Filho et al., 1997 ; Chau et al., 1997 ; Kiranoudis et al., 1997 ; Kadam et al., 2011]. Cela implique des opérations simultanées de transfert de chaleur et de masse. Au cours de ces opérations, le matériau est entièrement exposé aux conditions de séchage de la température et de l'air chaud, ce qui améliore le processus de séchage. Les aspects les plus importants de la technique de séchage en couche mince sont la modélisation mathématique du processus de séchage et la conception de l'équipement qui permettent de sélectionner les conditions de fonctionnement les plus appropriées. Ainsi, il est nécessaire d'explorer l'approche de

la modélisation en couche mince comme un outil essentiel pour estimer la cinétique de séchage à partir des données expérimentales, décrivant le comportement de séchage, l'amélioration du processus de séchage et éventuellement la réduction des besoins en énergie totale.

Les fruits et les légumes sont des produits hautement périssables nécessitant une technique de préservation pour augmenter la durée de conservation. Le processus de séchage peut être prédit en utilisant des modèles en couches minces appropriés. Plusieurs chercheurs ont étudié le séchage des fruits et légumes en utilisant des modèles de séchage en couches minces pour estimer le temps de séchage d'un produit [Meisamiasl et al., 2009 ; Gupta et al., 2014 ; Tzempelikos et al., 2015]. La preuve suggère que ces modèles peuvent encore être utilisés pour estimer la courbe de séchage et prévoir également le comportement de séchage, la consommation d'énergie et le transfert de chaleur et de masse du processus de séchage [Murthy et al., 2012]. Cependant, dans la pratique, il n'existe pas de modèle de couche mince unique qui puisse être utilisé pour généraliser efficacement la cinétique de séchage de plusieurs fruits et légumes. Ceci est dû à un certain nombre de facteurs, notamment la méthode de séchage, les conditions de séchage et le produit à sécher. L'application de modèles de séchage en couche mince pour prédire le comportement de séchage des fruits et légumes implique souvent la mesure de la teneur en eau du matériau. Cela se fait après avoir été soumis à des conditions de séchages différents (température, vitesse de l'air et humidité relative) et une corrélation subséquente avec la condition de séchage dominante pour estimer les paramètres du modèle. La collecte incorrecte de données expérimentales provenant des expériences de séchage en couches minces affectera le processus de séchage et, par la suite, la sélection des modèles en couches minces appropriés. Ainsi, la sélection du modèle de séchage en couche mince le plus approprié est également un outil très important pour décrire le comportement au séchage des fruits et des légumes. De nombreuses recherches ont été menées au cours des dernières années concernant la modélisation en couches minces de fruits et légumes. Cependant, au mieux de notre connaissance, il n'y a pas eu de critique publiée sur les théories, les applications et les comparaisons des connaissances existantes au cours des 10 dernières années [Onwude et al., 2016]. Ce chapitre vise à fournir une revue littéraire des mécanismes de séchage, des théories, des applications et des comparaisons de modèles de séchage en couches minces pour des fruits et légumes.

### **I.2.2. FACTEURS AFFECTANT LE PROCESSUS DE SECHAGE**

Les différentes conditions affectant le processus de séchage des fruits et légumes comprennent la vitesse de l'air, la température de séchage, la taille et la forme du matériau et l'humidité relative. Parmi ces conditions, la température de séchage et l'épaisseur du matériau [Meisami-asl et al., 2010 ; Pandey et al., 2010 ; Kumar et al., 2012a] sont les plus influentes sur le processus de séchage des fruits et légumes. On a soutenu que le taux de vitesse de l'air affecte de manière significative le processus de séchage des produits alimentaires et agricoles [Yaldiz, et al. 2001 ; Krokida et al., 2003]. Cependant, cela est surtout observé pour les cultures comme le riz, le maïs, les pommes de terre, etc. Des études indiquent que la vitesse de l'air a peu d'influence sur la cinétique de séchage de la plupart des fruits et légumes [Tzempelikos et al., 2014 ; Darıcı et al., 2015]. Des résultats similaires ont été enregistrés par [Yaldiz et al., 2001 ; Akpinar et al., 2003 ; Krokida et al., 2003 ;

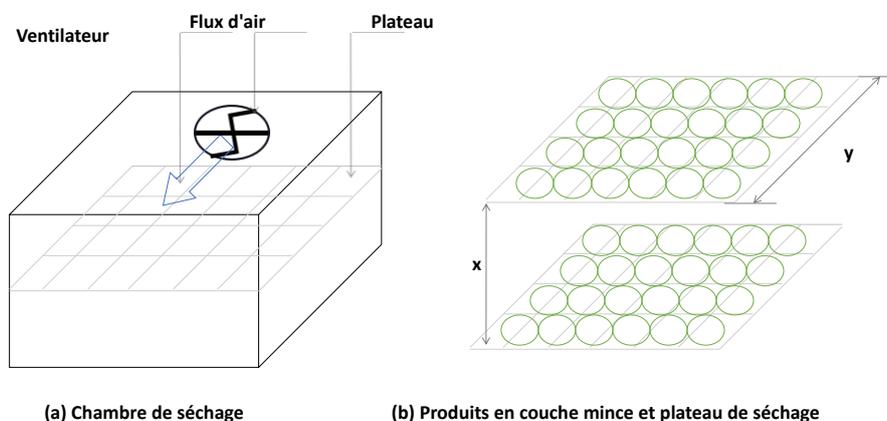
Menges et al., 2006 ; Sacilik, 2007 ; Meisami-asl et al., 2010]. Ces auteurs ont souligné que l'effet de la vitesse de l'air pourrait dépendre du transfert simultané de chaleur et de masse, ce qui pourrait avoir une résistance interne ou externe. Une plus grande résistance interne existe à une vitesse d'air inférieure ( $\leq 1,5$  m/s) qu'à un débit plus élevé. Généralement, ce paramètre ne peut avoir qu'une grande influence à la vitesse de l'air au-dessus de 2,5 m/s [El-Beltagy et al., 2007 ; Reyes et al., 2007 ; Perez et al., 2009 ; Guan et al., 2013]. Pour le séchage industriel, des taux de séchage plus élevés peuvent être obtenus avec un temps de séchage minimum lors du séchage à des vitesses et températures plus élevées [Erbay et al., 2010]. Cependant, le séchage à une température très élevée (supérieure à 80 °C) [Shi et al., 2008 ; Chen et al., 2013] et une vitesse très élevée (supérieure à 2,5 m/s) pourrait avoir une incidence défavorable sur la qualité finale du matériau et augmenter la demande totale d'énergie [Sturm et al., 2012]. La forte vitesse d'air augmente le transfert de chaleur et l'énergie totale requise pendant la période de séchage constante. Par conséquent, il n'est pas conseillé de sécher à des températures et vitesses de l'air extrêmement élevées. La taille et la forme sont également des paramètres importants dans le séchage des fruits et légumes. Il est également important de noter que la plupart des fruits et légumes sont séchés en utilisant le concept de couche mince, ce qui signifie que la taille du matériau est réduite à des dimensions qui permettront une distribution uniforme de l'air de séchage et de la température sur le matériau. Le facteur de forme est intégré dans les modèles de cinétique de séchage pour réduire l'effet de la forme du produit sur le processus de séchage [Pandey et al., 2010]. En outre, pendant le séchage des fruits et légumes, l'humidité relative de la chambre de séchage fluctue souvent en raison des conditions de la température ambiante et de l'humidité relative de l'environnement, donc cela a moins d'influence sur l'ensemble du processus de séchage [Aghbashlo et al., 2009 ; Sturm et al., 2012 ; Misha et al., 2013]. En résumé, pendant le processus de séchage, la vitesse de l'air et l'humidité relative sont les facteurs les moins significatifs qui affectent la cinétique de séchage des fruits et des légumes.

### **I.2.3. THEORIES ET MODELISATION DE SECHAGE EN COUCHE MINCE**

#### **I.2.3.1. Mécanisme de séchage**

Selon l'American National Standards Institute (ANSI, Institut national de normalisation américain) et l'American Society of Association Executives (Société américaine des dirigeants d'association), une couche mince est une couche de matériau complètement exposée à un courant d'air pendant le séchage. La Figure I.2-1 montre le schéma d'une chambre de séchage et des couches de produit le long du plateau de séchage. L'épaisseur de la couche doit être uniforme et ne doit pas dépasser 3 couches de particules. On suppose que la répartition de la température d'un matériau en couche mince est uniforme. Ceci est dû aux caractéristiques de la couche mince, ce qui permet d'utiliser des modèles de paramètres groupés appropriés pour le séchage en couche mince. Il est impératif de noter que ce concept peut être appliqué à (i) un matériau unique librement exposé à l'air de séchage ou à une couche du matériau et (ii) une multicouche d'épaisseurs de tranche différentes, à condition que la température de séchage et l'humidité relative de l'air de séchage sont dans le même état thermodynamique à tout moment du processus de séchage, ce qui peut être appliqué

aux estimations mathématiques de la cinétique de séchage. Cependant, [Kucuk et al., 2014] ont indiqué que l'épaisseur d'une couche mince peut être augmentée à condition qu'il y ait une augmentation de la vitesse d'air de séchage et aussi si les transferts simultanés de chaleur et de masse du matériau sont en équilibre avec l'état thermodynamique de l'air de séchage.



*Figure 1.2-1. Diagramme schématique d'une chambre de séchage et les couches de produit le long du plateau de séchage.*

[Erbay et al., 2010] ont signalé que les mécanismes de séchage de toutes sortes d'aliments incluent la diffusion de liquide/vapeur, diffusion de surface, et transport capillaire dans la région poreuse des aliments. Cependant, il a été largement rapporté que le mécanisme dominant de l'élimination d'eau des fruits et des légumes est la diffusion [Akpınar, 2006a ; Doymaz, 2007 ; Duc et al., 2011 ; Hashim et al., 2014]. En outre, le taux de diffusion dépend de la teneur en eau et de la nature du matériau. La diffusion détermine le taux de séchage, qui peut être exprimé en fonction de la teneur en eau (g d'eau / g de solide). Cependant, lors du séchage, le mécanisme dominant peut changer en raison d'une modification de la structure physique du solide après une longue période de temps de séchage [Jangam et al., 2010]. Ainsi, la détermination du mécanisme dominant peut être une information très utile en ce qui concerne la modélisation du processus de séchage des fruits et légumes.

La Figure 1.2-2 décrit le taux de séchage et la température en fonction du temps. Cette courbe peut également être utilisée pour identifier le mécanisme dominant d'un produit pendant le séchage. Dans la période de séchage initiale, la température de l'air à l'équilibre ( $T_{wb}$ ) est habituellement supérieure à la température du produit ( $T$ ) [Carrin et al., 2008]. Par conséquent, le taux de séchage entre A et B augmente avec l'augmentation de la température du produit ( $T$ ) jusqu'à ce que la température de surface atteigne l'équilibre (Correspondant à la ligne B à C). Dans des conditions constantes, le processus de séchage des produits agricoles et biologiques a été décrit comme un certain nombre d'étapes consistant également en une période initiale de vitesse constante (B à C) pendant laquelle le séchage se produit comme si de l'eau pure était évaporée et une ou plusieurs périodes de chutes lorsque le mouvement de l'eau est contrôlé par des résistances internes et externes combinées ou par une résistance externe ou interne de transfert de chaleur et de masse [Araya-Farias et al., 2009]. La plupart du temps, de nombreux fruits et légumes séchés pendant la période de séchage à vitesse décroissante (longue période de temps), car le processus de séchage est contrôlé par un mécanisme de diffusion. Le séchage s'arrête habituellement lorsque l'équilibre

est atteint [Erbay et al., 2010]. Au cours de la période de séchage à vitesse constante, la forme physique du produit est affectée, en particulier la surface du produit. Cette période est largement contrôlée par des forces capillaires et gravitationnelles. Les conditions du processus de séchage, comme la température, la vitesse d'air de séchage et l'humidité relative, affectent également le produit au cours de cette étape. La première période de séchage à vitesse décroissante (C à D) commence lorsque le film de surface du produit semble être sèche et que la teneur en humidité a diminué jusqu'à sa teneur en humidité critique ( $MR_c$ ). À mesure que le séchage se poursuit, le matériau connaîtra un changement de la première période de séchage à vitesse décroissante à un phénomène connu sous le nom de la deuxième période de séchage à vitesse décroissante (D à E).

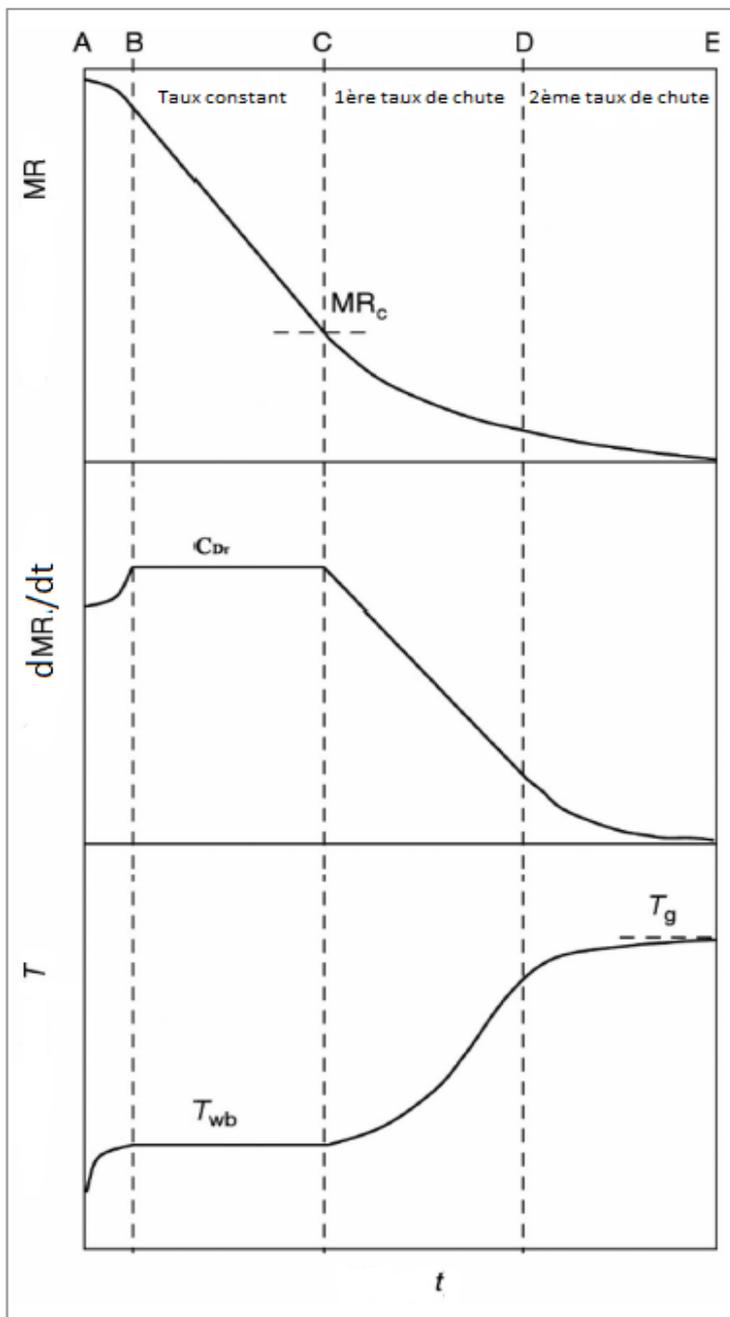


Figure 1.2-2. Courbes de séchage caractéristique des produits agricoles montrant des phases de séchage à vitesse constante et des phases de séchage à vitesse décroissante [Onwude et al., 2016].

[Tzempelikos et al., 2015] ont signalé que la courbe de séchage des coings ne montre que la présence de la période de séchage à vitesse décroissante. [Darıcı et al., 2015] ont signalé que le processus de séchage du kiwi prend à la fois la période de séchage à vitesse constante et décroissante, indiquant que la résistance à la diffusion de l'humidité au sein du kiwi est faiblement négligeable sinon une période de séchage à vitesse constante raisonnablement longue serait prévue. [Darvishi et al., 2014] ont signalé que tout le processus de séchage du citron se produit au cours de la période de séchage à vitesse décroissante, indiquant que la diffusion était le mécanisme physique dominant pour le mouvement de l'eau. En outre, pour les légumes, [Saeed et al., 2008] ont signalé que le mécanisme de diffusion contrôlait également le mouvement de l'humidité du processus de séchage de Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). [Ayadi et al., 2014] ont constaté que le séchage des feuilles de menthe verte se produit pendant la période de séchage à vitesse décroissante qui est énormément influencée par la température de séchage. Des résultats similaires concernant le mécanisme de diffusion comme mécanisme de contrôle dominant du processus de séchage des fruits et légumes ont été largement rapportés dans la littérature. Ce mécanisme dominant, qui aboutit à la période de séchage à vitesse décroissante, est encore illustré dans les études sur le séchage en couche mince de la mangue [Akoy, 2014], de la citrouille (*C. moschata*) [Hashim et al., 2014], La carambole [Dash et al., 2013], La carotte [Aghbashlo et al., 2009], l'ail de kastamonu [Sacilik et al., 2005] et la betterave [Kaur et al., 2014]. Cependant, [Seremet (Ceclu) et al., 2015] ont signalé une première période initiale de séchage à vitesse constante légère (5 à 10 min) et une période de séchage à vitesse décroissante subséquente pendant le séchage de la citrouille à une température de séchage de 50 à 70 ° C. Ils ont affirmé que, en raison de la teneur en eau initiale élevée du produit, afin d'éliminer l'eau non liée de la surface, on a observé une période initiale de séchage à vitesse constante. En résumé, un profil de séchage complet pour les fruits et les légumes peut consister en 3 étapes de séchage : une première période légère de séchage à vitesse constante (produits à forte teneur en humidité), une première période de séchage à vitesse décroissante et une deuxième période de séchage à vitesse décroissante. Dans la pratique, des preuves récentes suggèrent que le séchage des fruits et des légumes ne se produit que pendant la période de séchage à vitesse décroissante, la première période de séchage à vitesse constante étant dite négligeable.

### **1.2.3.2. Modélisation mathématique de séchage des aliments**

Les processus de séchage sont modélisés avec deux modèles principaux :

#### *i. Modèles distribués*

Les modèles distribués considèrent le transfert simultané de chaleur et de masse. Ils prennent en compte à la fois la chaleur interne et externe et le transfert de masse, et prédisent mieux la température et le gradient de la teneur en eau dans le produit. Généralement, ces modèles dépendent des équations de Luikov qui proviennent de la deuxième loi de diffusion de Fick comme Eq. 1.2-1 ou leurs formes modifiées [Luikov, 1975].

$$\begin{aligned}\frac{\partial M}{\partial t} &= \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T + \nabla^2 K_{13}P \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T + \nabla^2 K_{23}P \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= \nabla^2 K_{31}M + \nabla^2 K_{32}T + \nabla^2 K_{33}P\end{aligned}\quad (\text{Eq. 1.2-2.})$$

avec :  $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$  Sont les coefficients phénoménologiques, alors que  $K_{12}$ ,  $K_{13}$ ,  $K_{21}$ ,  $K_{23}$ ,  $K_{31}$ ,  $K_{32}$  Sont les coefficients de couplage [Brooker et al., 1974].

Pour la plupart des processus, l'effet de pression peut être négligé par rapport à la température et à l'effet de la teneur en eau, de sorte que les équations de Luikov deviennent comparables à celles de [Brooker et al., 1974] :

$$\begin{aligned}\frac{\partial M}{\partial t} &= \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T\end{aligned}\quad (\text{Eq. 1.2-3.})$$

Néanmoins, la forme modifiée des équations de Luikov (Eq. 1.2-2) ne peut pas être résolue avec des méthodes analytiques, en raison des difficultés et des complexités des mécanismes de séchage réels. D'autre part, cette forme modifiée peut être résolue avec des méthodes numériques comme la méthode des éléments finis [Özilgen et al., 2001].

#### ii. Modèles de type "lumped parameters"

Les modèles de type "lumped parameters" ne font pas attention au gradient de température du produit et ils assument une distribution de température uniforme égale à la température de l'air de séchage autour du produit. Avec cette hypothèse, les équations de Luikov deviennent comme :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M \quad (\text{Eq. 1.2-3.})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{22}T \quad (\text{Eq. 1.2-4.})$$

Le coefficient phénoménologique  $K_{11}$  est connu comme la diffusivité effective de la teneur en eau ( $D_{eff}$ ) et  $K_{22}$  est connue sous le nom de diffusivité thermique ( $\alpha$ ). Pour les valeurs constantes de  $D_{eff}$  et  $\alpha$ , les équations (Eq. 1.2-3) et (Eq. 1.2-4) peuvent être réarrangées comme suit :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{a_1}{x} \frac{\partial M}{\partial x} \right] \quad (\text{Eq. 1.2-5.})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{a_1}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (\text{Eq. 1.2-6.})$$

Où, le paramètre  $a_1 = 0$  pour les géométries planes,  $a_1 = 1$  pour les formes cylindriques et  $a_1 = 2$  pour les formes sphériques [Ekechukwu, 1999].

Les hypothèses ressemblant à la répartition uniforme de la température et à la température équivalente de l'air ambiant et aux erreurs causées par le produit. Cette erreur se produit uniquement au début du processus et elle peut être réduite à des valeurs acceptables en réduisant l'épaisseur du produit [Henderson et al., 1961]. Avec cette nécessité, le séchage en couches minces devient important et les équations en couches minces sont dérivées.

#### I.2.4. MODELES DE SECHAGE EN COUCHE MINCE

Les chercheurs ont développé de nombreux modèles en couches minces présentés ci-dessous pour divers produits agricoles en fonction du type de produit, du prétraitement du produit, des paramètres de séchage et des méthodes de séchage. Ces modèles sont souvent utilisés pour décrire le séchage des fruits et légumes et peuvent être classés en 3 groupes en fonction de leurs comparatifs avantages et inconvénients ainsi que leur dérivation. Ce sont des modèles théoriques, semi-théoriques et empiriques.

Newton (Lewis, Exponential, Single exponential) Model [Lewis, 1921]

$$MR = \exp(-kt) \quad (\text{Eq. I.2-7.})$$

Page Model [Xanthopoulos et al., 2007]

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (\text{Eq. I.2-8.})$$

Modified Page (Modified Page-I, Overhults et al.) Model [Midilli et al., 2002]

$$MR = \exp(-(kt)^n) \quad (\text{Eq. I.2-9.})$$

Modified Page-II Model [Toğrul, 2005]

$$MR = \exp\left(-c \left(\frac{t}{L^2}\right)^n\right) \quad (\text{Eq. I.2-40.})$$

Henderson and Pabis (Single term, Generalized exponential) Model [Zhang et al., 1991]

$$MR = a \exp(-kt) \quad (\text{Eq. I.2-51.})$$

Logarithmic (Asymptotic, Yagcioglu et al.) Model [Yaldiz et al., 2002]

$$MR = a \exp(-kt) + b \quad (\text{Eq. I.2-62.})$$

Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model [Midilli et al., 2002]

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad (\text{Eq. I.2-73.})$$

Modified Midilli et al. (Ghazanfari et al.) Model [Ghazanfari et al., 2006]

$$MR = \exp(-kt^n) + bt \quad (\text{Eq. I.2-84.})$$

Abbasi et al. (Modified Midilli-Kucuk) Model [Abbasi et al., 2009]

$$MR = a \exp(-kt^n) + b \quad (\text{Eq. I.2-95.})$$

Demir et al. Model [Kaleta et al., 2013]

$$MR = a \exp(-kt)^n + b \quad (\text{Eq. I.2-106.})$$

Modified Henderson and Perry (Agrawal and Singh) Model [Phoungchandang et al., 2012]

$$MR = a \exp(-kt^n) \quad (\text{Eq. I.2-117.})$$

Three Parameter Model [Phoungchandang et al., 2012]

$$MR = a \exp(-(kt)^n) \quad (\text{Eq. I.2-128.})$$

Two-Term Model [Akpinar et al., 2004]

$$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t) \quad (\text{Eq. I.2-19.})$$

Two-Term Exponential Model [Corzo et al., 2011]

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat) \quad (\text{Eq. I.2-130.})$$

Verma et al. (Modified Two-Term Exponential) Model [Ruiz et al., 2013]

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt) \quad (\text{Eq. I.2-141.})$$

Approximation of Diffusion (Diffusion Approach) Model [Balbay et al., 2012]

$$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt) \quad (\text{Eq. I.2-15.})$$

Modified Henderson and Pabis (Three Term Exponential) Model [McMinn et al., 2007]

$$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht) \quad (\text{Eq. I.2-163.})$$

Thompson Model [Evin, 2012]

$$t = a \ln(MR) + b(\ln(MR))^2 \quad (\text{Eq. I.2-174.})$$

Wang and Singh Model [Yurtsever, 2005]

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (\text{Eq. I.2-185.})$$

Kaleemullah Model [Erbay, 2010]

$$MR = \exp(cT) + bt^{(pT+n)} \quad (\text{Eq. I.2-196.})$$

Diamante et al. Model [Diamante, 2010]

$$\ln(-\ln(MR)) = a + b(\ln(t)) + c(\ln(t))^2 \quad (\text{Eq. I.2-207.})$$

Hii et al. Model [Kaleta, 2013]

$$MR = a \exp(-kt^n) + c \exp(-gt^n) \quad (\text{Eq. I.2-218.})$$

Simplified Fick's diffusion (SFFD) Model [Tog'urul, 2005]

$$MR = a \exp\left(-c\left(\frac{t}{L^2}\right)\right) \quad (\text{Eq. I.2-29.})$$

Weibull Model [Aghbashlo, 2009]

$$MR = \exp\left(-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right) \quad (\text{Eq. I.2-220.})$$

Modified Drying Model [Hemis et al., 2011]

$$MR = a + \exp(-kt^n) \quad (\text{Eq. I.2-231.})$$

Aghbashlo et al. Model [Aghbashlo, 2009]

$$MR = \exp\left(-\frac{k_1 t}{1 + k_2 t}\right) \quad (\text{Eq. I.2-242.})$$

Seiiedlou and Aghbashlo Model [Rasouli et al., 2011]

$$MR = \exp\left(-\frac{k_1 t}{1 - k_2 t}\right) \quad (\text{Eq. I.2-253.})$$

Decay Model [Montazer-Rahmati et al., 2005]

$$MR = \exp\left(\frac{k_1 \tau}{1 + k_2 \tau}\right) \quad (\text{Eq. I.2-264.})$$

Chavez-Mendez et al. Model [McMinn et al., 2007]

$$MR = [1 - (1 - L_2)L_1 t]^{\left(\frac{1}{1-L_2}\right)} \quad (\text{Eq. I.2-275.})$$

Geometric Model [Cihan et al., 2007]

$$MR = at^{-n} \quad (\text{Eq. I.2-286.})$$

Parabolic (Polynomial, Quadratic) Model [Abano et al., 2013]

$$MR = a + bt + ct^2 \quad (\text{Eq. I.2-297.})$$

Logistic Model (Yurtsever, 2005)

$$MR = \frac{b}{(1 + a \exp(kt))} \quad (\text{Eq. I.2-308.})$$

Multiple Multiplicative Factor (MMF) Model [Amira et al., 2010]

$$MR = \frac{a \times b + c \times t^d}{b + t^d} \quad (\text{Eq. I.2-39.})$$

Noomhorn and Verma (Ranjbaran and Zare, Modified Two Term) Model [Kaleta et al., 2013]

$$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) + c \quad (\text{Eq. I.2-310.})$$

Akbulut and Durmus, Model [Akbulut et al., 2009]

$$MR = a \left[ \frac{(T_{di} - T_{do})}{(T_{co} - T_{ci})} \right] \exp(-kt^n) \left[ \frac{V_c}{(L_i - L_{i-1})/\Delta t} \right]^{m-1} \left[ \frac{(b_w + b_d)/2}{(L_w + L_d)/2} \right]^{s-1} \quad (\text{Eq. I.2-321.})$$

Simplified Fick's Second Law of Diffusion Model [Wiktor et al., 2013]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} \tau}{4L^2}\right) \quad (\text{Eq. I.2-332.})$$

Exponential-hyperbolic Decay (Montazer-Rahmati and Amini-Horri) Model [Montazer-Rahmati et al., 2005]

$$MR = \exp\left(-\frac{k_1(t/t_0)}{1 + k_2(t/t_0)}\right) \quad (\text{Eq. I.2-343.})$$

Third-degree Polynomial (Cubic) Model [Liu et al., 2011]

$$MR = a + bt + ct^2 + kt^3 \quad (\text{Eq. I.2-354.})$$

Das et al. (Jena-Das) Model [Ashraf et al., 2012]

$$MR = a \exp(-kt + b\sqrt{t}) + c \quad (\text{Eq. I.2-365.})$$

Linear Model (Sharifian et al., 2012)

$$MR = at + b \quad (\text{Eq. I.2-376.})$$

Quasi-stationary Model [Khanali et al., 2012]

$$MR = \frac{1}{(1 + (t/x)^y)} \quad (\text{Eq. I.2-387.})$$

Balbay and S<sub>ahin</sub> Model [Balbay, 2012]

$$MR = (1 - a) \exp(-kt^n) + b \quad (\text{Eq. I.2-398.})$$

Alibas (Modified Midilli-Kucuk) Model [Alibas, 2012]

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt + g \quad (\text{Eq. I.2-49.})$$

Polynomial (Meda et al.) Model [Meda et al., 2008]

$$MR = (a + bt)^2 \quad (\text{Eq. I.2-40.})$$

Exponential (Meda et al.) Model [Meda et al., 2008]

$$MR = \exp(m + nt^{1.5}) \quad (\text{Eq. I.2-411.})$$

Jittanit (Modified Page) Model [Zhang, 1991]

$$MR = \exp\left(\left(-kt^N\right)\exp\left(-\frac{A}{T_k}\right)\right) \quad (\text{Eq. I.2-422.})$$

Jittanit (Modified two-term) Model [Zhang, 1991]

$$MR = A_1 \exp\left(\left(-k_1 t\right)\exp\left(-\frac{B}{T_k}\right)\right) + A_2 \exp\left(\left(-k_2 t\right)\exp\left(-\frac{B}{T_k}\right)\right) \quad (\text{Eq. I.2-433.})$$

Regression Model [Costa et al., 2013]

$$MR = \exp(-(at^2 + bt)) \quad (\text{Eq. I.2-444.})$$

Yun et al. Model [Tee et al., 2013]

$$MR = \frac{a \times bt + ct^2}{1 + dt + ft^2} \quad (\text{Eq. I.2-455.})$$

Kaleta et al. (Modified Verma et al.) Model [Kaleta et al., 2013]

$$MR = a \exp(-kt^n) + (1 - a) \exp(-gt^n) \quad (\text{Eq. I.2-466.})$$

Ademiluyi Model [Kaleta et al., 2013]

$$MR = a \exp(-(kt)^n) \quad (\text{Eq. I.2-477.})$$

Kaleta et al. (Modified two-term) Model [Kaleta et al., 2013]

$$MR = a \exp(-kt)^n + b \exp(-gt)^n \quad (\text{Eq. I.2-58.})$$

Jaros and Pabis-I Model [Kaleta et al., 2013]

$$M = M_0 \left( \frac{1}{1-b} \left( 1 - \frac{1-b}{NM_0} kt \right)^N - \frac{b}{1-b} \right), b = \frac{0.85}{1+M_0} \quad (\text{Eq. I.2-59.})$$

Jaros and Pabis-II Model [Kaleta et al., 2013]

$$M = M_e + (M_c - M_e) \exp \left( \frac{-k(t - t_c)}{M_c - M_e} \left( 1 - \frac{1-b}{NM_0} kt_c \right)^{N-1} \right) \quad (\text{Eq. I.2-480.})$$

Henderson et al. Model [Kucuk et al., 2014]

$$M_r = c \left( \exp(-kt) + \left( \frac{1}{9} \right) \exp(-9Kt) \right) \quad (\text{Eq. I.2-1.})$$

Law et al. (New Variable Diffusion Drying) Model [Xanthopoulos et al., 2007]

$$M = M_{cr2} - \frac{M_{cr2} - M_{eq}}{c} \ln \left( 1 - \frac{\exp(c)bc(dM/dt)_{cr2}}{M_{cr2} - M_{eq}} t \right) \quad (\text{Eq. I.2-492.})$$

Zero Model [Phoungchandang et al., 2012]

$$M = M_0 \exp(-kt) \quad (\text{Eq. I.2-503.})$$

Motta Lima et al.-I Model [Kucuk et al., 2014]

$$M_r = (a + bT)^{-2} \quad (\text{Eq. I.2-514.})$$

Motta Lima et al.-II Model [Kucuk et al., 2014]

$$M_r = a + (at + ct^2 + dt^3) \exp \left( -\frac{e}{T} \right) \quad (\text{Eq. I.2-525.})$$

Pillai [Pillai, 2013]

$$MR = a \exp \left( -a(IMC)^b (MWP)^c (SA)^d (DT) \right) \quad (\text{Eq. I.2-536.})$$

Les catégories de couches minces les plus largement utilisées sont les modèles semi-théoriques et empiriques [Ozdemir et al., 2000 ; Panchariya et al., 2002 ; Akpinar, 2006a ; Doymaz, 2007 ; Raquel et al., 2011]. Ces catégories de modèles tiennent compte de la résistance extérieure au processus de transport de l'humidité entre le matériau et l'air atmosphérique, fournissent une plus grande mesure de résultats précis, donnent une meilleure prédiction des comportements de séchage et font moins d'hypothèses en raison de leur dépendance aux données expérimentales. Ainsi, ces modèles se sont révélés les plus utiles pour les ingénieurs et concepteurs de sècheurs [Brooker et

al., 1992]. Cependant, ils ne sont valables que dans les conditions de séchage appliquées. D'autre part, les modèles théoriques font trop d'hypothèses conduisant à un nombre considérable d'erreurs [Henderson, 1974 ; Bruce, 1985], limitant ainsi leur utilisation dans la conception des séchoirs.

Les modèles semi-théoriques sont généralement obtenus à partir des solutions de la deuxième loi de Fick et des variations de ses formes simplifiées. Les modèles semi-théoriques et certains modèles empiriques permettent de comprendre les processus de transport et de démontrer un meilleur ajustement aux données expérimentales [Janjai et al., 2011]. Les modèles empiriques et semi-théoriques ont des caractéristiques similaires. Les principaux défis rencontrés par les modèles empiriques sont qu'ils dépendent en grande partie de données expérimentales et fournissent des informations limitées sur le transfert de chaleur et de masse pendant le processus de séchage [Erbay et al., 2010]. En raison des caractéristiques des modèles semi-théoriques et empiriques et de la forte propriété de teneur en eau de nombreux fruits et légumes, ces modèles sont largement utilisés dans l'estimation de la cinétique de séchage.

#### **1.2.4.1. Modèles théoriques**

Les modèles théoriques considèrent à la fois la résistance externe et la résistance interne au transfert d'humidité. Les modèles théoriques tiennent compte à la fois la résistance interne et externe tandis que les modèles semi-empiriques et empiriques ne tiennent compte que de la résistance externe au transfert de chaleur et d'humidité entre le matériau poreux et l'air qui l'entoure (la résistance interne est négligeable) [Barbosa de Lima et al., 2016]. Ils impliquent la géométrie du matériau, son coefficient de diffusion et la conductivité du matériau [Cihan et al., 2001]. Ainsi, les résistances peuvent être estimées à partir des équations (Eq. 1.2-5) et (Eq. 1.2-6) parce que ces équations décrivent le transfert de masse [Erbay et al., 2010]. Par la suite, la solution de la deuxième loi de diffusion de Fick est largement utilisée comme modèle théorique dans le séchage en couches minces de produits alimentaires [Kucuk et al., 2014].

#### **1.2.4.2. Modèles semi-théoriques**

Les modèles semi-théoriques sont dérivés du modèle théorique (deuxième loi de diffusion de Fick) ou de sa variation simplifiée (loi de refroidissement de Newton). Les modèles semi-théoriques de Lewis, Page et Modified Page sont dérivés de la loi de refroidissement de Newton. Le (i) modèle exponentiel et la forme simplifiée, (ii) le modèle exponentiel à 2 termes et la forme modifiée, et (iii) le modèle exponentiel à 3 termes et la forme simplifiée sont tous dérivés de la deuxième loi de diffusion de Fick [Erbay et al., 2010]. Les facteurs qui pourraient déterminer l'application de ces modèles comprennent la température de séchage, la vitesse d'air de séchage, l'épaisseur du matériau, la teneur initiale en humidité et l'humidité relative [Panchariya et al., 2002 ; Erbay et al., 2010]. En outre, dans ces conditions, on peut noter que la complexité des modèles peut être attribuée au nombre de constantes. En ce qui concerne la littérature, le nombre de constantes varie entre 1 (modèle de Newton), 5 (modèle Hii et al.) et 6 (Modifié Henderson et modèle Pabis) (voir les modèles en couches minces présentés ci-dessus). Compte tenu du nombre de constantes, les modèles « Hii et al. ainsi que le modèle de Modified Henderson et Pabis » peuvent être considérés

comme complexes, tandis que le modèle Newton est le plus simple. Cependant, la sélection du modèle le plus approprié pour décrire le comportement au séchage des fruits et légumes ne dépend pas du nombre de constantes. Au contraire, cela dépend de divers indicateurs statistiques. Les indicateurs statistiques qui ont souvent été utilisés pour sélectionner avec succès les modèles de séchage les plus appropriés tels que rapportés dans la littérature ont été données ci-dessous.

Le coefficient de corrélation [Chin et al., 2009]

$$R = \frac{N \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i}) (MR_{exp,i}) - (\sum_{i=1}^N MR_{pre,i})(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i})}{\sqrt{(N \sum_{i=1}^N MR_{pre,i}^2 - (\sum_{i=1}^N MR_{pre,i})^2)(N \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}^2 - (\sum_{i=1}^N MR_{exp,i})^2)}} \quad (\text{Eq. I.2-54.})$$

La somme des carrés des résidus (The regression sum of squares [Jazini et al., 2010])

$$SSR = \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR_{exp}})^2 \quad (\text{Eq. I.2-55.})$$

la somme totale des carrés (The total sum of squares [Jazini et al., 2010])

$$SST = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})^2 \quad (\text{Eq. I.2-56.})$$

La somme des carrés due aux erreurs (résiduelle) (The error (residual) sum of squares [Jazini et al., 2010])

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \quad (\text{Eq. I.2-57.})$$

Le coefficient de détermination (Coefficient of determination [Jazini et al., 2010])

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (\text{Eq. I.2-58.})$$

Le  $R^2$  ajusté (The adjusted [Menges et al., 2006])

$$\overline{R^2} = 1 - (1 - R^2) \frac{N - 1}{N - k - 1} \quad (\text{Eq. I.2-59.})$$

le test du chi carré (The reduced chi-square [Diamante et al., 2010])

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (\text{Eq. I.2-60.})$$

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (The root mean square error [Cihan et al., 2007])

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (\text{Eq. I.2-61.})$$

Le résidus (Residuals [Ruiz et al., 2013])

$$residuals = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i}) \quad (\text{Eq. I.2-62.})$$

L'efficacité de la modélisation (Modeling efficiency [Tog̃rul, 2005])

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})^2 - \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})^2} \quad (\text{Eq. I.2-63.})$$

L'erreur type d'estimation (SEE) (The standard error of estimate (SEE) [Saeed et al., 2010])

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n_p}} \quad (\text{Eq. I.2-64.})$$

La variance (Variance (s2) (Standard error ( $\sigma^2$ )) [Özbek et al., 2007])

$$\sigma^2 \approx s^2 = \frac{(\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2)_{min}}{N - n} \quad (\text{Eq. I.2-65.})$$

La racine de la somme des carrés due aux erreurs (résiduelle) (The reduced sum square error [Saeed et al., 2010])

$$RSSE = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N} \quad (\text{Eq. I.2-66.})$$

L'erreur de justesse moyenne (The mean bias error [Goyal et al., 2007])

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})}{N} \quad (\text{Eq. I.2-67.})$$

L'erreur absolue moyenne en pourcentage (Mean relative percentage error [Sacilik et al., 2006])

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|MR_{exp,i} - MR_{pre,i}|}{MR_{exp,i}} \quad (\text{Eq. I.2-68.})$$

L'erreur absolue moyenne (Mean absolute error [Nazghelichi et al., 2011])

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |MR_{exp,i} - MR_{pre,i}| \quad (\text{Eq. I.2-69.})$$

L'indicateur t-statistic [Hayaloglu et al., 2007]

$$t - \text{statistic} = \sqrt{\frac{(n - 1)(MBE)^2}{(RMSE)^2 - (MBE)^2}} \quad (\text{Eq. 1.2-70.})$$

### 1.2.4.3. Modèles empiriques

Les modèles empiriques donnent une relation directe entre la teneur en humidité moyenne et le temps de séchage. La limitation majeure à l'application des modèles empiriques dans le séchage en couche mince est qu'ils ne suivent pas les bases théoriques des processus de séchage. Plus encore, ces modèles n'ont pas d'interprétation physique et sont entièrement dérivés de données expérimentales. Les 3 modèles empiriques les plus largement appliqués pour la cinétique de séchage des fruits et légumes, tels que rapportés dans la littérature, sont (i) le modèle Weibull ((Eq. 1.2-30.), (ii) Wang et Singh ((Eq. 1.2-25.), et (iii) le modèle Thompson ((Eq. 1.2-24.).

### 1.2.5. CONCLUSION

La modélisation de la cinétique de séchage et la détermination du temps de séchage des fruits et légumes sont deux domaines très importants de séchage. Cependant, la plupart des pertes de production dans l'industrie se produisent au cours du séchage. Afin de minimiser ces pertes, il est nécessaire d'optimiser les conditions de séchage, la conception de procédé et la qualité du produit. Il est nécessaire d'identifier et d'évaluer les mécanismes de séchage, les théories, les applications et la comparaison des modèles de séchage en couches minces de fruits et légumes disponibles dans la littérature. Dans ce chapitre, une recherche bibliographique a été faite pour décrire un aperçu général des équations de séchage en couches minces de fruits et légumes, des théories et des applications. Au cours du processus de séchage, la vitesse de l'air et l'humidité relative ont été les facteurs les moins significatifs qui affectent la cinétique de séchage des fruits et des légumes, alors que la température et l'épaisseur étaient les facteurs les plus importants qui affectaient la cinétique de séchage en couches minces des fruits et légumes. Plus encore, les preuves de la littérature suggèrent que le séchage des fruits et des légumes ne se produit que pendant la période de séchage à vitesse décroissante.

En outre, environ 60 modèles de couches minces ont été jugés utiles pour décrire le comportement de séchage des fruits et légumes. Sur la base de la littérature examinée, les modèles semi-théoriques de la nouvelle loi du refroidissement et de la deuxième loi de diffusion de Fick, tels que Midilli et al., page, logarithmique, page modifiée et Approximation de Diffusion (approche de diffusion), étaient les modèles les plus appropriés pour décrire le comportement de séchage de divers fruits et légumes, respectivement. Généralement, les modèles de la solution de la loi de diffusion de Fick, se sont révélés les plus adaptés pour décrire le comportement de séchage des fruits et légumes.

En outre, certains modèles empiriques, tels que Weibull, Wang et Singh, Thompson et Diamante et al., ainsi que d'autres ont offert de bons résultats pour les critères et les applications considérés et les produits sélectionnés, respectivement. Cependant, les modèles empiriques ont été dérivés de

données expérimentales et n'ont pas de fondement théorique ou de sens physique, donc sont limitées dans la description efficace du comportement au cours séchage et du transfert de chaleur et de masse au cours du processus de séchage des fruits et légumes. Les indicateurs statistiques qui ont été souvent utilisés pour sélectionner les modèles de séchage les plus appropriés, tels que décrits dans la littérature, sont présentés.

Ainsi, on peut en outre conclure que la modélisation de la cinétique de séchage en couches minces de fruits et légumes fournira des informations concernant les conditions de stockage, le temps de séchage idéal, la température, la vitesse de l'air et l'humidité relative. Avec toutes ces informations, un séchoir plus efficace peut être conçu et son processus optimisé, réduisant ainsi les pertes post-récolte.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abano, E.E, Haile, M.A., Owusu, J., Engmann, F.N. (2013). Microwave-vacuum drying effect on drying kinetics, lycopene and ascorbic acid content of tomato slices. *J Stored Prod Postharvest Res* 4 (1): 11–22.
- Abbasi, S., Mousavi, S.M., Mohebbi, M. (2009). Propose suitable model for modeling of moisture ratio and estimation of effective moisture diffusivity of onion slices by hot air dryer. *In : The 6th international chemical engineering congress and exhibition, Kish Island.*
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Khani, S., Ghasemi, M. (2009). Mathematical modelling of thin-layer drying of carrot. *Int Agrophys* 23(4): 313–317.
- Akbulut, A., Durmus, A. (2009). Thin layer solar drying and mathematical modeling of mulberry. *Int J Energy Res* 33(7): 687–695.
- Akoy, E.O. 2014. Experimental characterization and modeling of thin-layer drying of mango slices. *Intl Food Res J* 21(5): 1911–7.
- Akpınar, E.K. (2006a). Determination of suitable thin-layer drying curve model for some vegetables and fruits. *J Food Engr* 73:75–84. doi :10.1016/j.jfoodeng.2005.01.007
- Akpınar, E.K., Sarsilmaz, C., Yildiz, C. (2004). Mathematical modelling of a thin layer drying of apricots in a solar energized rotary dryer. *Int J Energy Res* 28 (8): 739–752.
- Akpınar, E.K., Bicer, Y., Yildiz, C. (2003). Thin-layer drying of red pepper. *J Food Engr* 59(1): 99–104. doi :10.1016/S0260-8774(02)00425-9.
- Alibas, I. (2012). Selection of a the best suitable thin-layer drying mathematical model for vacuum dried red chilli pepper. *J Biol Environ Sci* 6(17): 161–170.
- Alves-Filho, O., Strommen, I., Thorbergsen, E. (1997). A simulation model for heat pump dryer plants for fruits and roots. *Drying Technol* 15 (5): 1369–98.
- Amira T, Saber C, Fethi Z (2010) Modelling of the drying kinetics of opuntia ficus indica fruits and cladodes. *Int J Food Eng* 6(2): 1–17.
- Araya-Farias, M., Ratti, C. (2009). Dehydration of foods : general concepts. In : Ratti, C., editor. *Advances in food dehydration*. Boca Raton, FL : CRC Press. 1–36. doi :10.1201/9781420052534.ch1.

- Ashraf, Z., Hamidi-Esfahani, Z., Sahari, M.A. (2012). Evaluation and characterization of vacuum drying of date paste. *J Agric Sci Technol* 14: 565–575
- Ayadi, M., Ben Mabrouk, S., Zouari, I., Bellagi, A. (2014). Kinetic study of the convective drying of spearmint. *J Saudi Soc Agric Sci* 13 (1): 1–7. doi :10.1016/j.jssas.2013.04.004
- Balbay, A., Sahin, Ö. (2012). Microwave drying kinetics of a thin-layer liquorice root. *Drying Technol* 30(8): 859–864.
- Barbosa de Lima, A.G., Barbosa da Silva, J., Almeida, G.S., Nascimento, J.J.S., Tavares, F.V.S., Silva, V.S. (2016). Clay Products Convective Drying : Foundations, Modeling and Applications. *Drying and Energy Technologies* pp 43-70.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C.W. (1974). *Drying cereal grains*. Westport, Conn., U.S.A.: AVI Publishing Co.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C.W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. Westport, Conn., U.S.A.: AVI Publishing Co.
- Bruce, D.M., (1985). Exposed layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 °C. *J Agric Engr Res*. 32: 337–47.
- Carrin, M.E., Crapiste, G.H. (2008). Convective drying of foods. In : Ratti C, editor. *Advances in food dehydration*. Boca Raton, FL : CRC Press. p 123–152.
- Chau, K.J., Mujumdar, A.S., Hawlader, M.N.A., Chou, S.K., Ho, J.C. (1997). Convective drying of agricultural products: effect of continuous and stepwise change in drying air temperature. *Drying Technol* 19(8): 1949–60. doi :10.1081/DRT-100107282
- Chin, S.K., Law, C.L., Supramaniam, C.V., Cheng, P.G. (2009). Thin-layer drying characteristics and quality evaluation of air-dried *Ganoderma tsugae* Murrill. *Drying Technol* 27(9): 975–984.
- Cihan, A., Ece, M.C. (2001). Liquid diffusion model for intermittent drying of rough rice. *J Food Engr* 49: 327–31.
- Cihan, A., Kahveci, K., Hacıhafızoğlu, O. (2007). Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. *J Food Eng* 78(1): 293–298.
- Corzo, O., Bracho, N., Alvarez, C. (2011) Determination of suitable thin layer model for air drying of mango slices (*Mangifera indica* L.) at different air temperatures and velocities. *J Food Process Eng* 34(2): 332–350.
- Costa, A., Pereira, H. (2013) Drying kinetics of cork planks in a cork pile in the field. *Food Bioprod Process* 91(1) :14–22.
- Darıcı, S., Şen, S. (2015). Experimental investigation of convective drying kinetics of kiwi under different conditions. *Heat Mass Transfer* 51(8): 1167–76. doi :10.1007/s00231-014-1487-x
- Darvishi, H., Asl, A.R., Asghari, A., Azadbakht, M., Najafi, G., Khodaei, J. (2014). Study of the drying kinetics of pepper. *J Saudi Soc Agric Sci* 13 (2): 130–8. doi :10.1016/j.jssas.2013.03.002
- Dash, K.K., Gope, S., Sethi, A., Doloi, M. (2013). Star fruit slices. *Intl J Agric Food Sci Technol* 4 (7) :679–86.
- Devahastin, S., (2000). *Guide pratique au sechage industriel de mujumdar : Principes, Equipements et Nouveaux développements*. ISBN in Thailand By Thananuch Business Ltd. Part

- Diamante, L.M., Ihns, R., Savage, G.P., Vanhanen, L. (2010). A new mathematical model for thin layer drying of fruits. *Int J Food Sci Technol* 45(9): 1956–1962
- Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *J Food Eng* 79: 243–8. doi :10.1016/j.jfoodeng.2006.01.049
- Duc, L.A., Woong, H.J., Hyuk, K.D. (2011). Thin-layer drying characteristics of rapeseed. *J Stored Products Res.* 47: 32–8.
- Ekechukwu, O.V. (1999). Review of solar-energy drying systems I : an overview of drying principles and theory. *Energy Conversion & Management.* 40 :593–613.
- El-Beltagy, A., Gamea, G.R., Essa, A.H.A. (2007). Solar drying characteristics of strawberry. *J Food Eng* 78: 456–64. doi :10.1016/j.jfoodeng.2005.10.015
- Erbay, Z., Icier, F. (2010). A review of thin-layer drying of foods : theory, modeling, and experimental results. *Crit Rev Food Sci Nutr* 50 (5) :441–64. doi :10.1080/10408390802437063
- Erbay, Z., Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods : theory, modeling, and experimental results. *Crit Rev Food Sci Nutr* 50(5): 441–464.
- Evin, D. (2012). Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L. *Food Bioprod Process* 90(2): 323–332
- Ghazanfari, A., Emami, S., Tabil, L.G., Panigrahi, S. (2006). Thin-layer drying of flax fiber: II. Modeling drying process using semi-theoretical and empirical models. *Drying Technol* 24(12): 1637–1642
- Giri, S.K., Prasad, S. (2007). Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave vacuum and convective-hot air-dried mushrooms. *J Food Eng* 78: 512–21.
- Goyal, R.K., Kingsly, A.R.P., Manikantan, M.R., and Ilyas, S.M. (2007). Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering* 79: 176–180.
- Guan, Z., Wang, X., Li, M., Jiang, X. (2013). Mathematical modeling on hot air drying of thin-layer fresh tilapia fillets. *Polish J Food Nutr Sci* 63(1): 25–34. doi :10.2478/v10222.
- Gupta, K., Alam, S. (2014). Modeling of thin-layer drying kinetics of grape juice concentrate and quality assessment of developed grape leather. *Agric Engr Intl: CIGR J* 16(2): 196–207.
- Hashim, N., Onwude, D., Rahaman, E. (2014). A preliminary study : kinetic model of drying process of pumpkins (*Cucurbita moschata*) in a convective hot air dryer. *Agric Agric Sci Procedia* 2(2): 345–52. doi :10.1016/j.aaspro.2014.11.048
- Hayaloglu, A.A., Karabulut, I., Alpaslan, M., Kelbaliyev, G. (2007). Mathematical modeling of drying characteristics of strained yoghurt in a convective type tray-dryer. *J Food Eng* 78(1) :109–117
- Hemis, M., Singh, C.B., Jayas, D.S. (2011). Microwave-assisted thin layer drying of wheat. *Drying Technol* 29(10): 1240–1247.
- Henderson, S.M., and Pabis, S. (1961). Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 6: 169–174.
- Henderson, S.M. (1974). Progress in developing the thin-layer drying equation. *Transact ASAE* 17: 1167–72.
- Jangam, S.V., Mujumdar, A.S. (2010). Basic concepts and definition. In : Jangam, S.V., Law, C.L., Mujumdar, A.S., editors. *Drying of foods, vegetables and fruits*, Vol. 1. Singapore NUS. p 1–30. ISBN : 978-981-08-7985-3.

- Janjai, S., Lamler, N., Mahayothee, B., Bala, B.K., Precoppe, M., Muller, J. (2011). Thin-layer drying of peeled longan. *Food Sci Technol* 17(4): 279–88. doi :10.3136/fstr.17.279
- Jazini, M.H., Hatamipour, M.S. (2010). A new physical pretreatment of plum for drying. *Food Bioprod Process* 88(2–3): 133–137
- Kadam, D.M., Goyal, R.K., Gupta, M.K. (2011). Mathematical modeling of convective thin-layer drying of basil leaves. *J Med Plants Res* 5(19): 4721–30.
- Kaleta, A., Gornicki, K., Winiczenko, R., Chojnacka, A. (2013). Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer. *Energy Convers Manag* 67:179–185
- Kaur, K., Singh, A.K. (2014). Drying kinetics and quality characteristics of beetroot slices under hot air followed by microwave finish drying. *Afr J Agric Res* 9(12): 1036–44. doi :10.5897/AJAR2013.
- Khanali, M., Rafiee, S., Jafari, A., Hashemabadi, S.H., Banisharif, A. (2012). Mathematical modeling of fluidized bed drying of rough rice (*Oryza sativa* L.) grain. *J Agric Technol* 8(3): 795–810
- Kiranoudis, C.T., Tsami, E., Maroulis, Z.B., Marinos-Kouris, D. (1997). Drying kinetics of some fruits. *Drying Technol* 15(5): 1399–418.
- Klemes, J., Smith, R., Kim, J.K. (2008). Handbook of water and energy management in food processing. Boca Raton : *Woodhead Publishing and CRC Press*. p 449–629.
- Krokida MK, Karathanos VT, Maroulis ZB, Marinos-Kouris D. 2003. Drying kinetics of some vegetables. *J Food Eng* 59(4): 391–403. doi :10.1016/S0260-8774(02)00498-3
- Kucuk, H., Kilic, A., Midilli, A. Common Applications of Thin Layer Drying Curve Equations and Their Evaluation Criteria. I. Dincer et al. (eds.), *Progress in Exergy, Energy, and the Environment*, DOI 10.1007/978-3-319-04681-5\_63, # Springer International Publishing Switzerland 2014 (page 669–680)
- Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A., Dincer, I. (2014). A review on thin-layer drying-curve equations. *Drying Technol* 32(7): 757–73. doi :10.1080/07373937.2013.873047
- Kudra, T., Mujumdar, A.S. (2002). Part I. General discussion : conventional and novel drying concepts. In : Kudra, T., Mujumdar, A.S., editors. *Advanced drying technologies*. New York : Marcel Dekker Inc. p 1–26.
- Kumar, C., Karim, A., Joardder, M.U.H., Miller, G.J. (2012a). Modeling heat and mass transfer process during convection drying of fruit. *The 4th International Conference on Computational Methods (ICCM2012)*, Gold Coast, Australia, p 25–27, November 2012.
- Lewis, W.K. (1921). The rate of drying of solid materials. *J Ind Eng Chem* 13: 427–432.
- Liu, W., Zheng, Y., Huang, L.X., Zhang, C.H., Xie, P.J. (2011). Low-temperature vacuum drying of natural gardenia yellow pigment. *Drying Technol* 29(10): 1132–1139
- Luikov, A.V. (1975). Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *Intl J Heat Mass Transfer* 18: 1–14.
- McMinn, W.A.M., Farrell, G., Magee, T.R.A. (2007). Prediction of microwave drying behavior of pharmaceutical powders using thin-layer models. *Drying Technol* 25 (9): 1551–1569.
- Meda, V., Gupta, M., Opoku, A. (2008). Drying kinetics and quality characteristics of microwave-vacuum dried saskatoon berries. *J Microw Power Electromagn Energy* 42(4): 4–12.

- Meisami-asl, E., Rafiee, S. (2009). Mathematical modeling of kinetics of thin layer drying of Apples (Golab). *Agric Engr Intl : CIGR J* 6 :1–10.
- Meisami-asl, E., Rafiee, S., Keyhani, A., Tabatabaeefar, A. (2010). Determination of suitable thin-layer drying curve model for apple slices (Golab). *Plant OMICS* 3(3): 103–8.
- Menges, H.O., Ertekin, C. (2006). Modelling of air drying of Hac{haliloglu-type apricots. *J Sci Food Agric* 86: 279–291.
- Menges, H.O., Ertekin, C. (2006). Mathematical modeling of thin-layer drying of golden apples. *J Food Engr* 77(1): 119–25. doi :10.1016/j.jfoodeng.2005.06.049
- Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technol* 20: 1503-1513.
- Misha, S., Mat, A.S., Ruslan, M.H., Sopian, K., Salleh, E. (2013). The effect of drying air temperature and humidity on the drying kinetic of kenaf core. *Appl Mech Mater* 315:710–4. doi :10.4028/www.scientific.net/AMM.315.710
- Montazer-Rahmati, M.M., Amini-Horri, B. (2005). From laboratory experiments to design of a conveyor-belt Dryer via mathematical modeling. *Drying Technol* 23 (12): 2389–2420.
- Murthy, T.P.K., Manohar, B. (2012). Microwave-drying of mango ginger (*Curcuma amada* Roxb) : prediction of drying kinetics by mathematical modeling and artificial neural network. *Intl J Food Sci Technol* 47(6): 1229–36. doi :10.1111/j.1365-2621.2012.02963.x
- Nazghelichi, T., Kianmehr, M.H., Aghbashlo, M. (2011). Prediction of carrot cubes drying kinetics during fluidized bed drying by artificial neural network. *J Food Sci Technol* 48(5): 542–550.
- Onwude, D.I., Hashim, N., Janius, R.B., Nawj, N., Abdan, K. (2016). Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables : A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. doi : 10.1111/1541-4337.12196.
- Özbek, B., Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *J Food Eng* 83(4): 541–549.
- Ozdemir, M., Devres, Y.O. (2000). The thin-layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *J Food Engr* 42: 225–33.
- Özilgen, M., Özdemir, M. (2001). A review on grain and nut deterioration and design of the dryers for safe storage with special reference to Turkish hazelnuts. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 41: 95–132.
- Pandey, H., Sharma, H.K., Chauhan, R.C., Sarkar, B.C., Bera, M.B. (2010). Experiments in food process engineering. New Delhi : CBS Publisher and Distributors PVT. p 139–45.
- Panchariya, P.C., Popovic, D., Sharma, A.L. (2002). Thin-layer modeling of black tea drying process. *J Food Engr* 52: 349–57.
- Perez, N.E., Schmalko, M.E. (2009). Convective drying of pumpkin : influence of pretreatment and drying temperature. *J Food Process Engr* 32(1): 88–103. doi :10.1111/j.1745-4530.2007.00200.x
- Phoungchandang, S., Kongpim, P. (2012). Modeling using a new thin-layer drying model and drying characteristics of sweet basil (*Ocimum Basilicum* Linn.) using tray and heat pump-assisted dehumidified drying. *J Food Process Eng* 35(6): 851–862.

- Pillai, M.G. (2013). Thin layer drying kinetics, characteristics and modeling of plaster of Paris. *Chem Eng Res Des*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2013.01.005>
- Raquel, P.F., Susana, P., Maria, J.B. (2011). Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*). *Food Bioprod Process* 89: 422–8.
- Rasouli, M., Seiedlou, S., Ghasemzadeh, H.R., Nalbandi, H. (2011). Convective drying of garlic (*Allium sativum* L.) : part I : drying kinetics, mathematical modeling and change in color. *Aust J Crop Sci* 5(13): 1707–1714.
- Reyes, A., Alvarez, P.I., Marquardt, F.H. (2007). Drying of carrots in a fluidized bed. I. Effects of drying conditions and modeling. *Drying Technol* 20(7): 1463–83. doi :10.1081/DRT-120005862
- Ruiz, C.A., Francisco, C., Fernand, L-R, Aida, R. (2013) Thin layer drying behavior of industrial tomato by-products in a convective dryer at low temperatures. *Res J Biotechnol* 8(2): 50–60.
- Sacilik, K. (2007). Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *J Food Engr* 79(1): 23–30. doi :10.1016/j.jfoodeng.2006.01.023
- Sacilik, K., Elicin, A.K. (2006). The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *J Food Eng* 73(3): 281–289.
- Sacilik, K., Unal, G. (2005). Dehydration characteristics of kastamonu garlic slices. *Biosyst Engr* 92(2): 207–15. doi :10.1016/j.biosystemseng.2005.06. 006
- Saeed, I.E., Sopian, K., Abidin, Z.Z. (2008). Drying characteristics of roselle (1) : mathematical modeling and drying experiments. *Agric Engr Intl : CIGR J X*(1): 1–25.
- Saeed, I.E. (2010). Solar drying of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) Part I : mathematical modelling, drying experiments, effects of the drying conditions. *Agric Eng Int CIGR J* 12(3) :1–13.
- Seremet (Ceclu), L., Botez, E., Nistor, O.V., Andronoiu, D.G., Mocanu, G.D. (2015). Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food Chem* 195: 104–9. doi :10.1016/j.foodchem.2015.03.125
- Sharifian, F., Motlagh, A.M., Nikbakht, A.M. (2012). Pulsed microwave drying kinetics of fig fruit (*Ficus carica* L.). *Aust J Crop Sci* 6(10): 1441– 1447.
- Shi, J., Pan, Z., McHugh, T.H., Wood, D., Hirschberg, E., Olson, D. (2008). Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *LWT—Food Sci Technol* 41(10): 1962–72. doi :10.1016/j.lwt.2008.01.003
- Sturm, B., Hofacker, W.C., Hensel, O. (2012). Optimizing the drying parameters for hot-air-dried apples. *Drying Technol* 30(14): 1570–82. doi :10.1080/07373937.2012.698439
- Tee, Y.M., Ifa, P., Siti, T.M., Meor, T.M.Z., Wan, DWR., Zahira, Y. (2013). Drying of oil palm frond particles in a fluidized bed dryer with inert medium. *Chem Ind Chem Eng Q* 19: 593.
- Tog˘rul, H. (2005). Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *J Food Eng* 71(3): 311–323
- Tzempelikos, D.A., Vouros, A.P., Bardakas, A.V., Filios, A.E., Margaris, D.P. (2015). Experimental study on convective drying of quince slices and evaluation of thin-layer drying models. *Engr Agric Environ Food* 8(3): 169–77. doi :10.1016/j.eaef.2014.12.002

- Tzempelikos, D.A., Vouros, A.P., Bardakas, A.V., Filios, A.E., Margaris, D.P. (2014). Case studies on the effect of the air drying conditions on the convective drying of quinces. *Case Stud Thermal Engr* 3: 79–85. doi :10.1016/j.csite.2014.05.001
- Wiktor, A., Iwaniuk, M., Śledź, M., Nowacka, M., Chudoba, T., Witrowa-Rajchert, D. (2013). Drying kinetics of apple tissue treated by pulsed electric field. *Drying Technol* 31(1): 112–119.
- Xanthopoulos, G., Lambrinos, G.r., Manolopoulou, H. (2007). Evaluation of Thin-Layer Models for Mushroom (*Agaricus bisporus*) Drying. *Drying Technol* 25: 1471–1481.
- Yaldiz, O., Ertekin, C., Uzun, H.I. (2001). Mathematical modeling of thin-layer solar drying of sultana grapes. *Energy* 26(5): 457–65.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. (2002). Thin-layer solar drying of some vegetables. *Drying Technol* 19: 583–596.
- Yurtsever, S. (2005). Mathematical modeling and evaluation of microwave drying kinetics of mint (*Menthaspicatta* L.). *J Applied Sci* 5(7): 1266–1274.
- Zhang, Q., Litchfield, J.B. (1991). An optimisation of intermittent corn drying in a laboratory scale thin-layer dryer. *Drying Technol* 9: 383–395.

**PARTIE II. EXPLOITATION DU GISEMENT SOLAIRE À DES  
FINS DE SÉCHAGE.**

**SOURCE D'ENERGIE (GISEMENT SOLAIRE EN ALGERIE) ;  
UNITE DE CHAUFFAGE (INSOLATEUR PLAN A AIR MUNI  
D'AILETTES DESTINE AU SECHAGE SOLAIRE DES  
PRODUITS AGRICOLES).**

## **CHAPITRE II.1.**

### **ANALYSE DES VARIABLES METEOROLOGIQUES AGISSANT SUR LE PROCESSUS DE SECHAGE SOLAIRE EN ALGERIE EN UTILISANT LA TECHNIQUE DES CARTES ISOPLETHES**

#### **II.1.1. INTRODUCTION**

L'Algérie dispose d'un potentiel solaire considérable et suffisamment important pour les applications à basses températures. Effectivement, l'ensoleillement annuel moyen est évalué à 2000 heures, avec une moyenne d'ensoleillement de 6,57 kWh/m<sup>2</sup>/jour. Avec un territoire composé de 86% de désert saharien et de par son positionnement géographique, l'Algérie possède le champ solaire le plus important au monde [Capderou, 1987]. Cependant, L'exploitation et la transformation de cette énergie inépuisable passe impérativement par la combinaison des efforts pour la connaissance, la compréhension, la maîtrise et la création des banques de données accessibles à l'exploitation par les différents secteurs concernés. La connaissance des variables météorologiques influençant sur le processus de séchage solaire en Algérie aide beaucoup au bon choix du lieu d'implantation de procédé de séchage solaire et peut contribuer à diminuer sensiblement la consommation d'énergie.

En effet, le potentiel d'énergie renouvelable en Algérie a fait l'objet de nombreuses études, dont celles de [Himri et al., 2009 ; Himri et al., 2012] qui ont évalués et analysés le potentiel éolien en Algérie, ont donnés des indications utiles pour les spécialistes d'énergie éolienne, [Chellali et al. 2011] ont actualisés la carte des vents de l'Algérie. En général ces travaux aident aux exploiters de l'énergie éolienne et ne permettront pas à tout exploitateur d'avoir des informations préalables avant d'entamer d'autre projet d'énergie renouvelable en Algérie sauf l'éolien. Néanmoins, les variables météorologiques, autres que la vitesse du vent, tel que le rayonnement solaire, la température et l'humidité relative de l'air influencent les systèmes d'énergie renouvelable, en particulier le procédé de séchage solaire, ne sont pas présentées d'une façon claire et simple à analyser pour un explorateur sauf le premier volume au gisement solaire algérien [Yaiche et al, 2013] développer par le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) qui présente uniquement l'irradiation solaire validée scientifiquement [Yaiche et al, 2014], d'autre travaux [Mefti et al., 1999 ; Youcef Ettoumi et al., 2002 ; Mefti et al., 2003 ; Mefti et al., 2008] s'intéressent particulièrement à la modélisation de cette variable météorologique. Pour la température et l'humidité relative de l'air, à notre connaissance, pas des travaux disponibles.

Dans ce travail nous avons élaboré des cartes isoplèthes des variables météorologiques influences sur le processus de séchage solaire en Algérie. Ces cartes permettent d'identifier clairement les forts contrastes entre les différents sites étudiés représentant le climat algérien et de donner des informations préalables sur la variation instantanée des variables météorologiques influents le processus de séchage solaire avant d'entamer un projet de séchage solaire. Nous avons suivi la construction de ces cartes par des tracés de densité de probabilité pour faciliter l'analyse parce que elle a un net avantage sur le plan visuel, elle permet d'avoir un aperçu très rapide des principales

caractéristiques de la distribution (pics, asymétries, ...). Nous avons décidé d'utiliser la méthode de noyau, car l'estimateur à noyau d'une densité est l'un des estimateurs les plus étudiés et les plus performants [Youndjé, 2011].

## II.1.2. MATERIELS ET METHODES

### II.1.2.1. Données

Les données utilisées dans cette étude sont issues du logiciel Météonorm® que nous utilisons, sont 8760 enregistrements de données horaires pour chaque année tels que l'intensité du rayonnement solaire global sur le plan horizontal, la température et l'humidité relative de l'air pour une période d'enregistrement de 10 ans de 1990 à 2000, pour chaque ville.

### II.1.2.2. Zones climatiques

L'étude a été faite pour les différentes zones climatiques de l'Algérie et pour traiter tout le territoire national, une classification climatique majeure a été faite car le pays a une très grande superficie : le nord possède un climat méditerranéen, le sud saharien un climat désertique. Dans ce travail nous avons utilisé le zonage climatique établi par Borel J. (1962) cité dans [Sami et al., 2000] (Figure II.1-1). Ce dernier définit les différentes zones climatiques comme suite : (i) 4 zones climatiques et une sous zone au Nord ; (ii) 3 zones climatiques au Sud. Pour garder l'analyse gérable, une grande ville dans chaque zone climatique a été choisie pour cette étude. Il s'agit de : Alger, Tlemcen, Chlef, Batna, Ghardaïa, Adrar et Tamarrasset. Le Tableau II.1-1 présente également une brève description du climat dans chaque zone. Cette description du climat est utile pour comprendre l'influence des différents climats en Algérie sur le processus de séchage solaire.

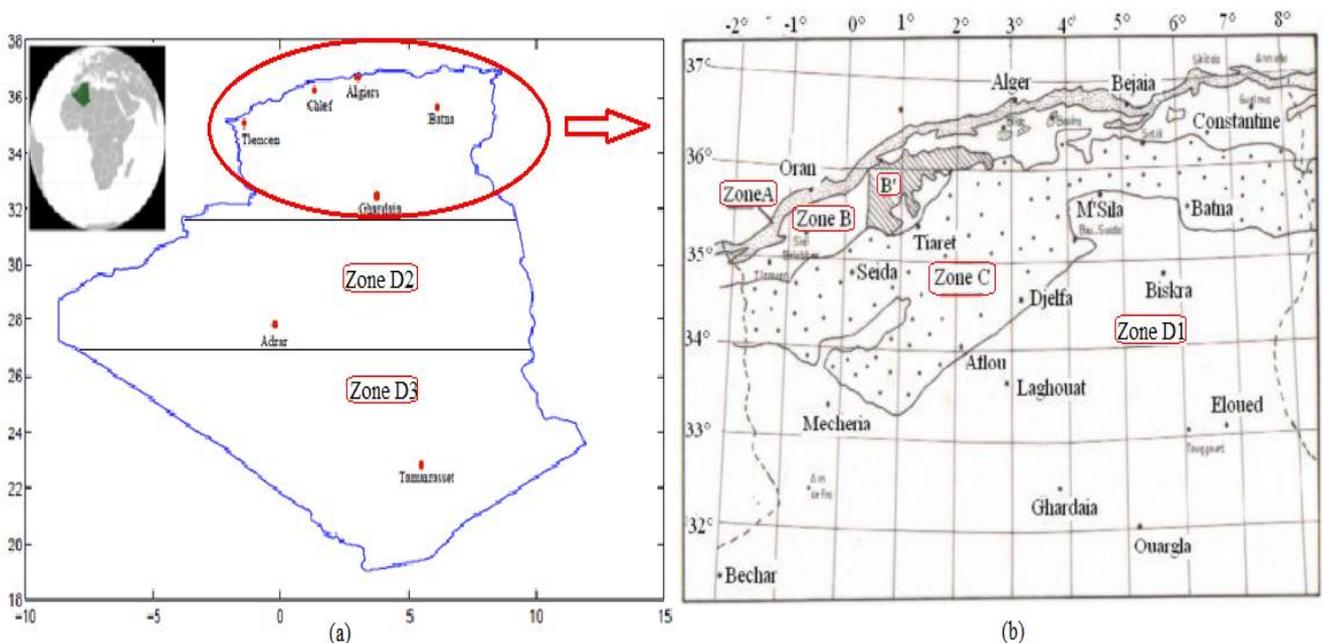


Figure II.1-1. (a) Localisation des grandes villes représentatives de l'ensemble du climat Algérien, (b) zones climatiques en Algérie.

**Tableau II.1-1. Coordonnées géographiques et caractéristiques climatiques des régions étudiées.**

Zone	Site	Coordonnées Géographiques	Caractéristique de la zone
A	Alger	(36.64°N, 3°E), 116m	Climat méditerranéen maritime Cette région comprend le littoral et une partie du versant nord des chaînes côtières
B	Tlemcen	(35 °N, 1.46°W), 247m	Climat méditerranéen continental. Cette région comprend la plaine et les vallées comprises entre les chaînes côtières et l'Atlas Tellien, autre que celle de Chlef
B'	Chlef	(36.21 °N, 1.33°E), 114m	C'est une sous-zone de la zone B ; Cette région comprend la vallée de Chlef, comprise entre la chaîne de l'Ouarsenis et les montagnes du Dahra et des Braz.
C	Batna	(35.57 °N, 6.17°E), 1148m	Climat méditerranéen de montagne ; Cette région comprend les hauts plateaux entre l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien, avec des altitudes supérieures à 500 m
D1	Ghardaïa	(32.4 °N, 3.8°E), 468m	Climat désertique saharien ; Cette région comprend le Sahara au-delà de l'Atlas Saharien jusqu'à la latitude 31°
D2	Adrar	(27.8 °N, 0.18°W), 279m	Climat désertique saharien ; Cette région comprend le Sahara au-delà de la latitude 31° jusqu'à la latitude 26°.
D3	Tamanrasset	(22.8 °N, 5.48°E), 1377m	Climat désertique saharien ; Cette région comprend le Sahara au-delà de la latitude 26° jusqu'aux frontières Sud.

### II.1.2.3. Méthodologie du traitement des données

Pour caractériser un phénomène aléatoire à un ensemble fini d'observations, il est souvent pertinent d'estimer la fonction de densité (densité de probabilité).

Soit  $X$  une variable aléatoire qui possède une fonction de densité  $f$ . Le fait d'attribuer à  $X$  la fonction  $f$ , nous permet d'obtenir une description de la distribution de  $X$  et ainsi de calculer une densité de probabilité (PDF, Probability density function) associées à  $X$  par la relation :

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x)dx$$

Supposons maintenant que nous ayons  $N$  observations  $X_1, X_2, \dots, X_n$  provenant d'une fonction de densité inconnue. Il est intéressant de construire une estimation de la densité, à partir de ces observations. Il existe deux approches très complémentaires pour réaliser ces estimations : l'approche d'estimation paramétrique et l'approche d'estimation non-paramétrique. L'approche d'estimation paramétrique suppose que les données sont issues d'une loi de probabilité de forme connue dont seuls les paramètres sont inconnus. Dans ce cas, l'estimation de densité se résume à l'estimation des paramètres de la distribution. Si la loi de probabilité est inconnue, ou s'il s'agit justement de trouver la forme de cette loi sans à priori pour ensuite en réaliser une estimation paramétrique, on doit se tourner vers une méthode non-paramétrique dans laquelle les données parlent d'elles-mêmes. L'utilisation des méthodes paramétriques pour analyser les données

météorologiques, tels que la vitesse de vent ont été rapportés, dans certaines études comme dans [Jamil et al., 1995 ; Celik, 2004; Xiao et al., 2006 ; Chellali et al., 2013]. Cependant, cette approche de PDF estimation peut apporter quelques défauts comme suit [Sajjad et al., 2013]:

Les méthodes paramétriques peuvent montrer des écarts significatifs à la distribution réelle des données, principalement en raison de la répartition réelle ne caractérise pas la symétrie sous-jacente dans les densités de probabilités standard. A titre d'exemple, la Figure II.1-2 montre la fonction de distribution des données horaire de l'échantillon de l'irradiation solaire annuelle, de la température annuelle et de l'humidité relative annuelle dans la région de Ghardaïa, on considère les horaires entre le lever et le coucher de soleil. Comme on le voit sur la Figure II.1-2, l'accord de distributions paramétriques n'est pas capable de modéliser l'asymétrie de droite dans la distribution réelle, qui va révéler des erreurs considérables dans les échantillons sortants.

Certaines variables aléatoires en général et en particulier l'irradiation d'énergie solaire, la température et l'humidité relative de l'air sont très dépendantes du temps dans le comportement. En d'autres termes, leurs habitudes changent avec différents périodes de temps, des mois et des saisons. Ainsi, l'approche non paramétrique est avantageuse en termes de période de temps d'adaptation, car il ne tient pas un type spécifique de la distribution.

L'approche non paramétrique prend son sens lorsqu'on ne possède aucune information précise sur la forme et la classe de la vraie densité. Dans cette approche, ce sont les observations qui vont nous permettre de déterminer l'estimation de la densité  $f$ . Cette approche sera utilisée puisque l'on ne peut supposer aucune forme de fonction pré-spécifiée pour  $f$ .

#### II.1.2.4. Estimation de la densité de probabilité

##### *i. Estimation par histogramme :*

L'estimateur non paramétrique de la densité le plus populaire est l'histogramme. Ce dernier est une fonction étagée où les hauteurs correspondent à la proportion de l'échantillon contenue dans l'intervalle divisé par la largeur de celui-ci. Alors l'estimation de la densité par l'histogramme au point  $x$  est donnée par :

$$\hat{f}(x) = \frac{(X_i \text{ dans le même intervalle que } x)}{nh}$$

où  $h$  est le paramètre de lissage ; il correspond à la largeur des intervalles alors que  $n$  correspond à la taille de l'échantillon.

Cet estimateur de la densité est une fonction discontinue dont l'application en termes d'opérations sur l'estimé, comme par exemple la dérivée ou l'intégration, devient impossible ou très difficile à effectuer. Ces difficultés peuvent être évitées si l'on utilise la méthode d'estimation de la densité par le noyau. C'est la raison pour laquelle dans ce travail, nous avons utilisé cet estimateur plutôt que l'histogramme.

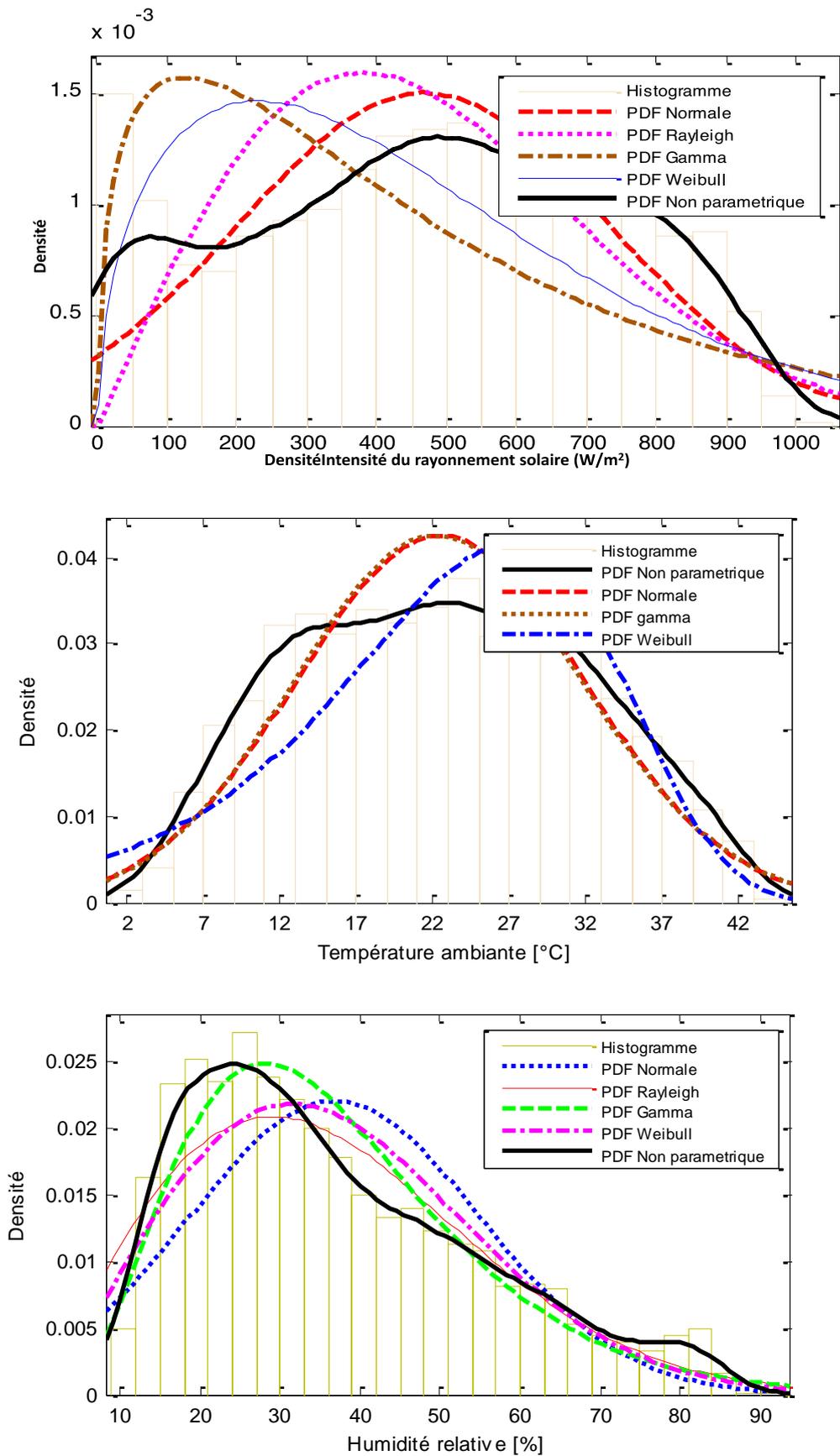


Figure II.1-2 Histogramme et estimation non paramétrique par la méthode du noyau de la distribution des données horaires d'intensité du rayonnement solaire annuelle, de la température annuelle et de l'humidité relative annuelle à Ghardaia

ii. Estimation par la méthode du noyau :

Le concept de noyau a d'abord été introduit par Rosenblatt (1956), mais c'est Cacoollos (1966) qui a été le premier à utiliser le terme « noyau » pour désigner la fonction que l'on utilise dans les méthodes non paramétriques [Faucher et al., 2002].

Si  $X$  est une variable aléatoire de densité  $f$ , alors [Silverman, 1986] :

$$f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{2h} P(x - h < X < x + h)$$

Donc un estimateur naturel  $\hat{f}$  de la densité est donné par :

$$\hat{f}(x) = \frac{(X_1, X_2, \dots, X_n \text{ tombant dans } (x - h, x + h))}{2hn}$$

Posons  $w(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{si } |x| < 1 \\ 0 & \text{si non.} \end{cases}$

On peut représenter  $\hat{f}(x)$  par :

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h} w\left(\frac{x - X_i}{h}\right)$$

Ce dernier estimateur, tout comme l'histogramme, est discontinu. On peut facilement généraliser cet estimateur en remplaçant la fonction  $w$  par une fonction noyau  $K$  (Kernel en anglais) qui satisfasse deux conditions :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} K(x) dx = 1$$

$$K(x) = K(x), \forall x \in \mathbb{R}^d$$

La première assure que la méthode d'estimation par noyau calcule bien une PDF, tandis que la seconde garantit que la moyenne de la distribution calculée est égale à celle de l'échantillon utilisé.

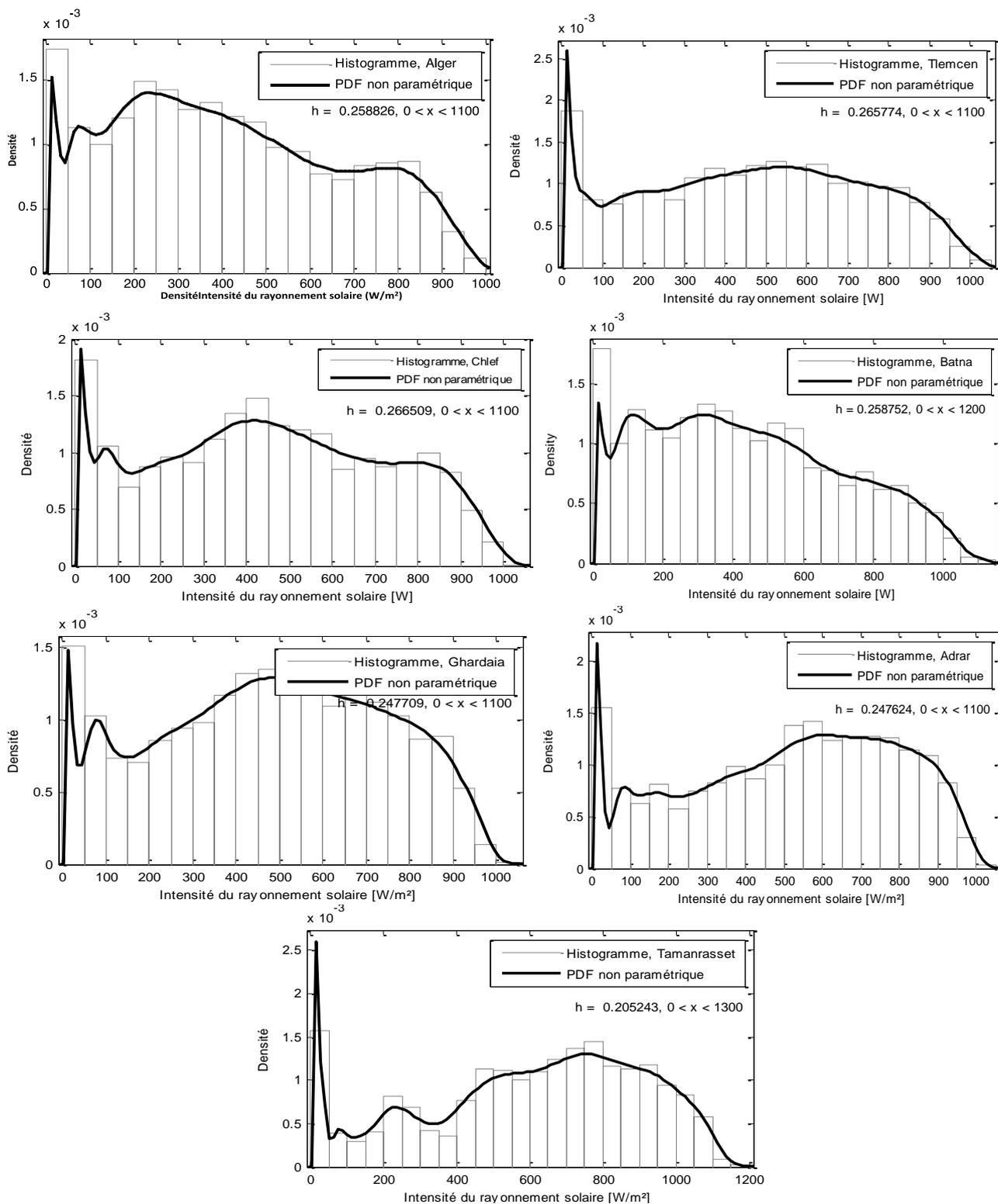
Habituellement,  $K$  est une fonction de densité symétrique et la formule de l'estimateur de la densité par la méthode du noyau est donnée par :

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right)$$

Le fait que  $K$  soit une densité de probabilité, nous assure que l'estimateur  $\hat{f}(x)$  est aussi une densité de probabilité. À part l'histogramme, l'estimateur à noyau est probablement l'estimateur le plus utilisé et certainement le plus étudié mathématiquement. Il possède des propriétés qui le rendent fort intéressant : (a) si le noyau  $K$  est une fonction de densité alors l'estimateur à noyau  $\hat{f}(x)$  est lui aussi une fonction de densité, (b) de plus, si le noyau  $K$  est continue et différentiable,  $\hat{f}(x)$  l'est également.

Figure II.1-3, Figure II.1-4 et Figure II.1-5 montrent que les histogrammes des données annuelles en résolution horaire de l'intensité du rayonnement solaire, de la température et de l'humidité relative

de l'air dans les différents sites étudiés correspondent à l'estimateur par noyau, puisqu'il est plus approprié pour nos données concernant l'estimation de la distribution comme nous avons démontré dans la Figure II.1-2.



**Figure II.1-3. Histogrammes et estimations non paramétriques par la méthode du noyau de la distribution des données horaires de l'intensité d'irradiation solaire annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens**

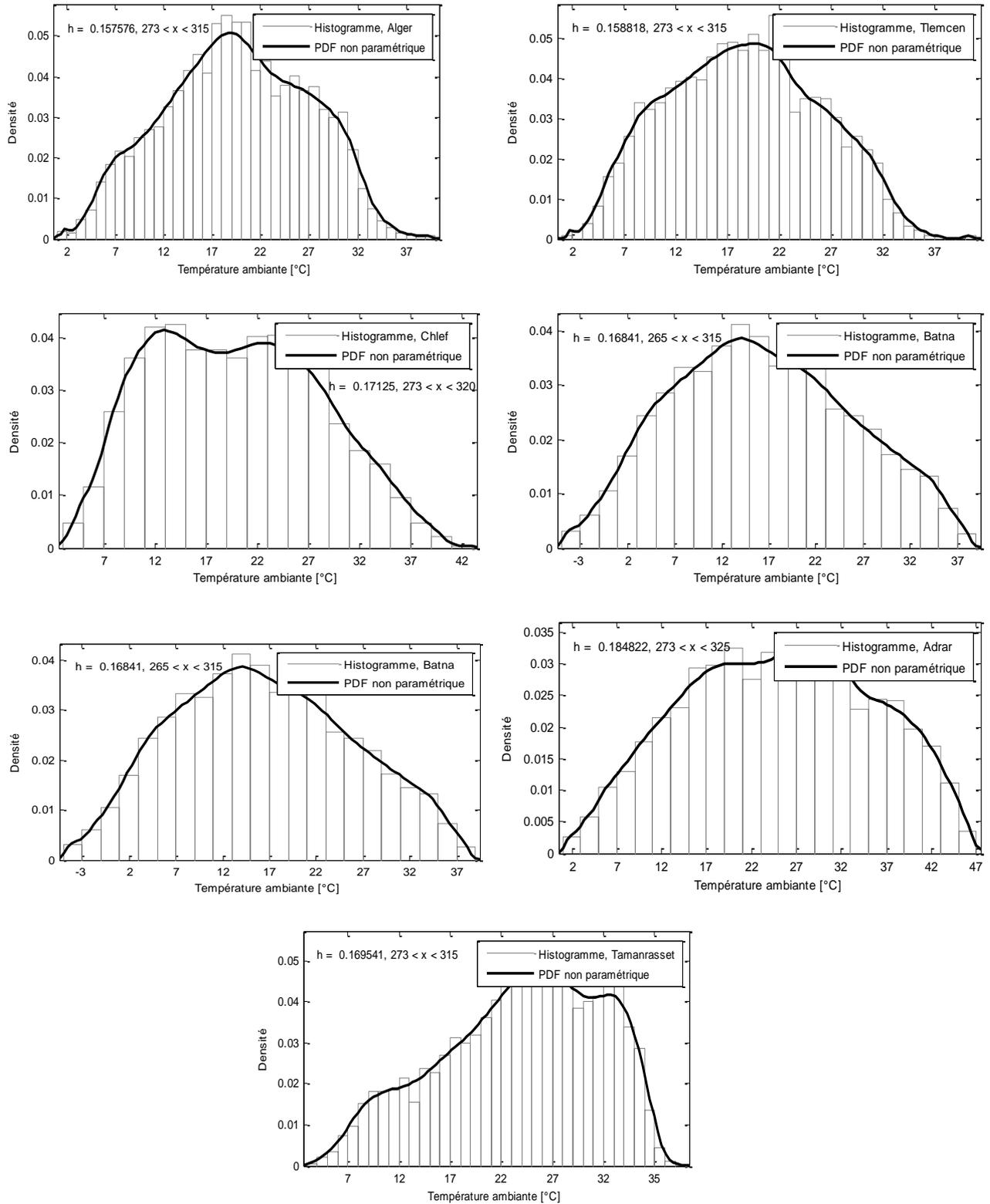
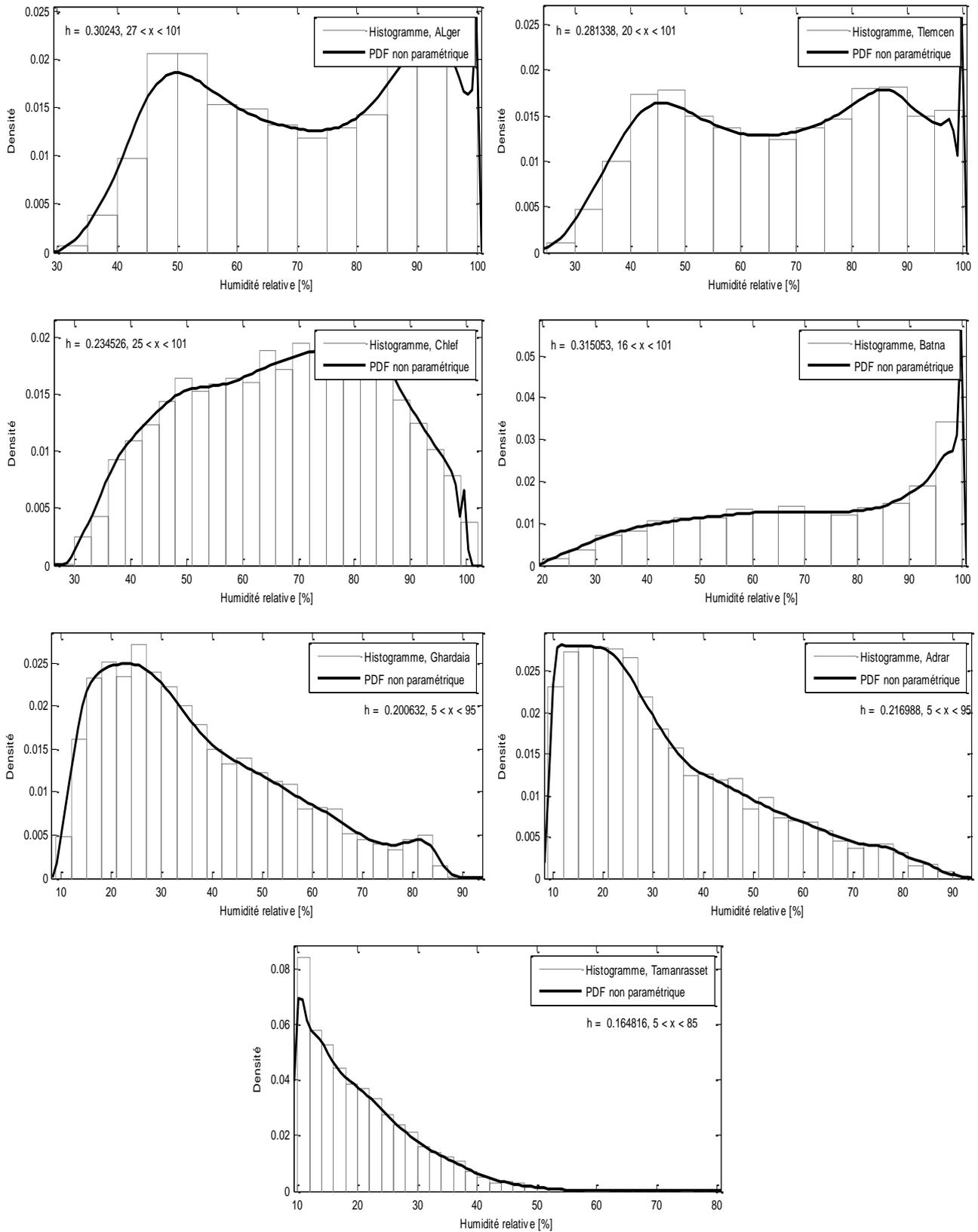


Figure II.1-4. Histogrammes et estimations non paramétriques par la méthode du noyau de la distribution des données horaires de la température annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens.



**Figure II.1-5. Histogrammes et estimations non paramétriques par la méthode du noyau de la distribution des données horaires de l'humidité relative annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens.**

### II.1.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Sur les Figure II.1-6, Figure II.1-8 et Figure II.1-10, on montre les cartes isoplèthes de l'intensité du rayonnement solaire, de la température ambiante et de l'humidité relative de l'air ambiant des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens. Elles donnent de façon très explicite toutes les valeurs que peut y prendre la variable météorologique selon les heures et les mois de l'année type.

Les tracés de densité de probabilité (Figure II.1 7, Figure II.1 9 et Figure II.1 11) ont un net avantage dans le suivi sur le plan visuel ce qui permet de faciliter l'analyse et d'avoir un aperçu très rapide des principales caractéristiques de la distribution (pics, asymétries, ...). Ces figures montrent que la distribution des données annuelles en résolution horaire d'intensité du rayonnement solaire, de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant durant la période du lever au coucher du soleil, dans les différents sites étudiés, correspond à l'estimateur par noyau. Ce mode de représentation permet de déterminer aisément le dépassement d'un seuil par une certain variable, tout comme il est possible de fournir le nombre d'heure de l'année pour lequel les variables sont inférieures ou supérieures à un certain seuil donné. Les figures concernées ont été obtenues à partir de ce mode de représentation des principaux résultats ainsi regroupés.

L'intensité du rayonnement solaire varie considérablement selon la ville sélectionnée. Sa valeur fluctue également différemment au cours de l'année, elle est faible au voisinage du lever et du coucher du soleil et elle atteint le maximum au milieu de la journée si le ciel garde le même état. Des fluctuations importantes se produisent lorsque le ciel passe d'un état à l'autre. Ces fluctuations sont essentiellement dues à la présence des nuages. Ceci est clairement indiqué sur la Figure II.1-6 pour les sept villes considérées. Il est clairement démontré que Tamanrasset est la ville dans laquelle l'intensité du rayonnement solaire la plus élevée est atteinte pour la majorité de toute l'année-type. Dans la Figure II.1-7, la courbe de distribution des données relative à Tamanrasset présente un grand volume horaire de forte intensité de rayonnement solaire (700 – 1200 W/m<sup>2</sup>). Une très bonne performance du système de séchage solaire des produits agricoles est également prévue à Adrar où l'intensité de rayonnement solaire est plus stable et élevée au cours de la saison estivale, de juin à septembre, soit pratiquement la période de récolte. Là, la dégradation des fruits est rapide et le séchage devient indispensable.

En effet, le rayonnement solaire à Tlemcen et Ghardaïa est souvent plus élevé que celui observé à Chlef. De même, l'intensité du rayonnement solaire à Batna est souvent faible bien qu'il dépasse parfois le niveau de 1100 W/m<sup>2</sup> (Figure II.1-7). Enfin dans la ville d'Alger, l'intensité du rayonnement solaire est relativement plus faible que les autres villes étudiées. En ce qui concerne la température, la comparaison entre les villes considérées est complètement différente de celle mentionnée ci-dessus dans le cas de rayonnement solaire. En particulier, la température ambiante influe directement sur la température d'air asséchant à la sortie de l'insolature. La Figure II.1-8 présente les isothermes des températures ambiantes des sept villes considérées pendant toute l'année-type. Adrar apparaît comme étant la ville la plus chaude toute l'année, avec une température ambiante de 45° pendant presque toute la période de récolte.

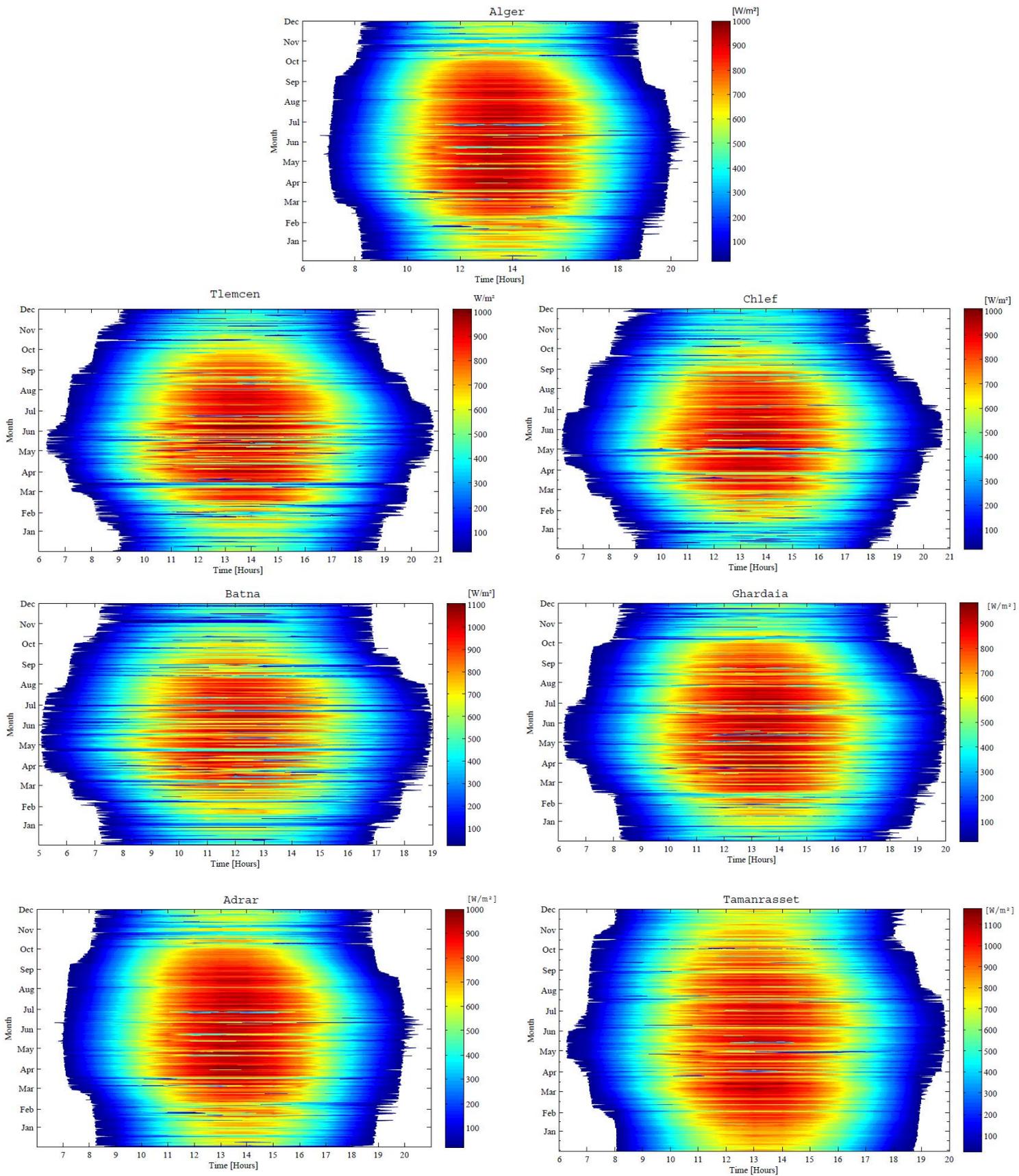


Figure II.1-6. Cartes isoplètes de l'intensité du rayonnement solaire des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens.

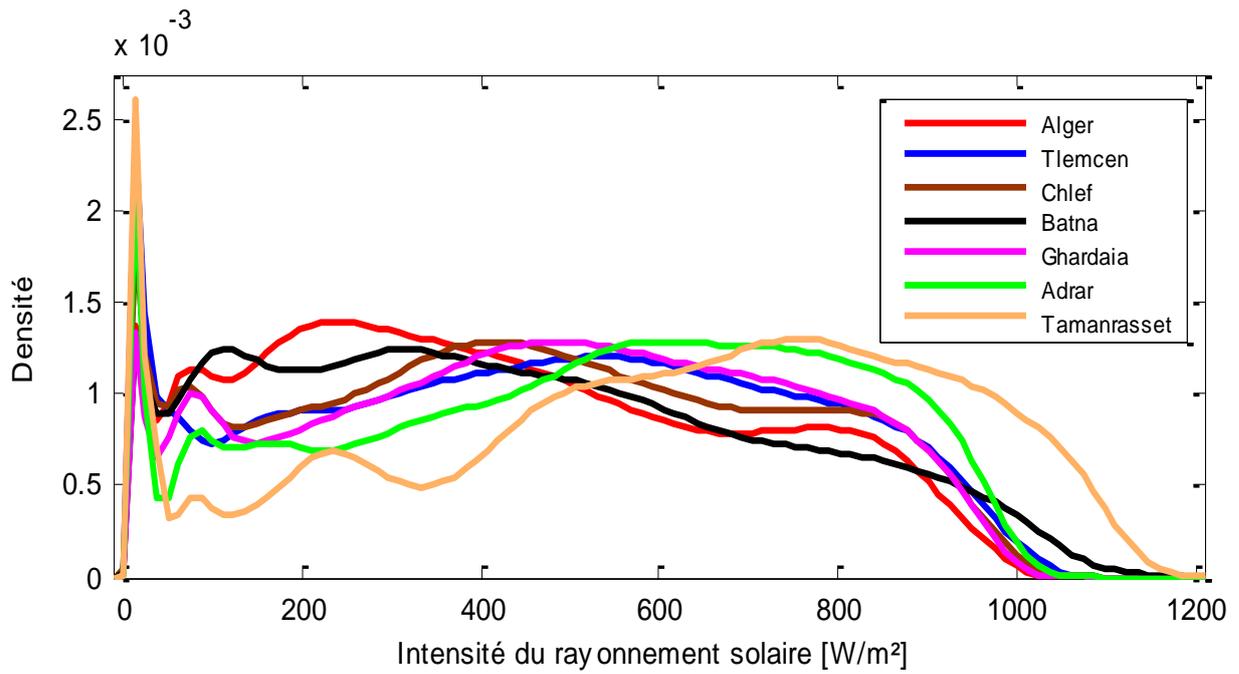
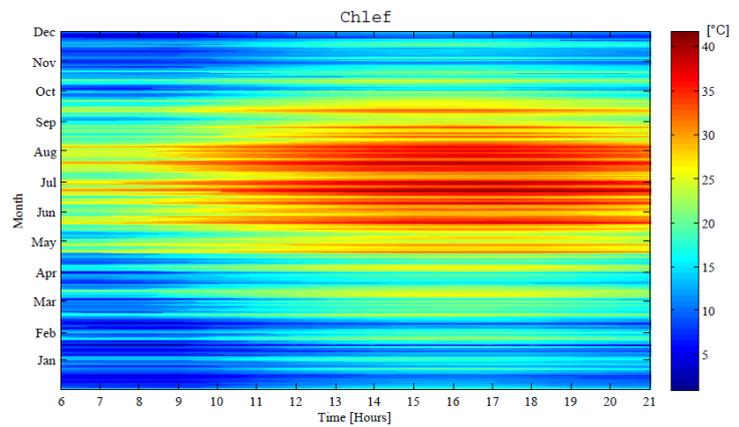
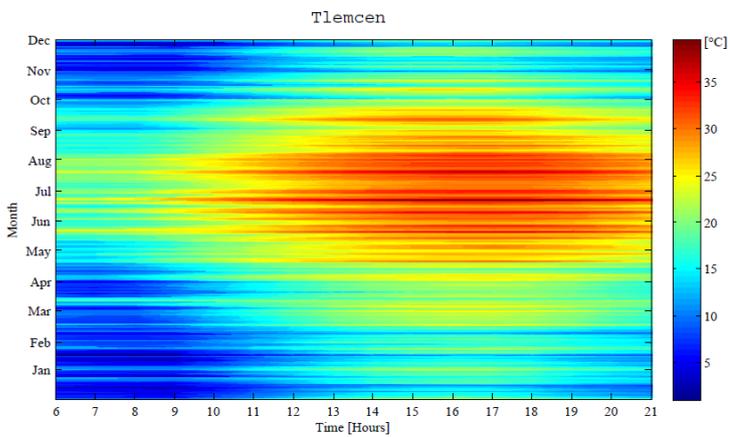
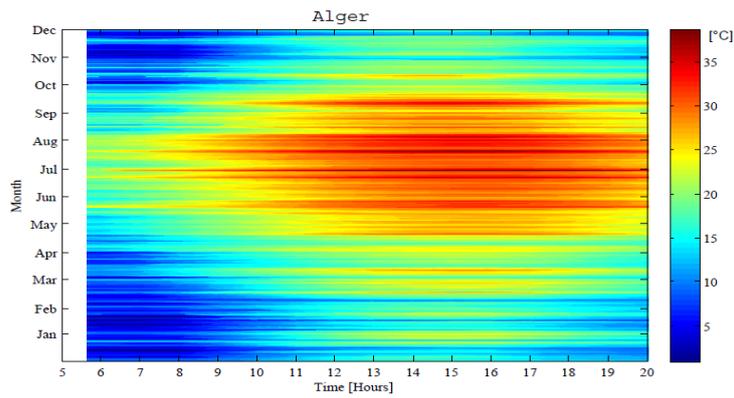


Figure II.1-7. Estimation non paramétrique par la méthode du noyau de la distribution des données horaires de l'intensité du rayonnement solaire annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens.



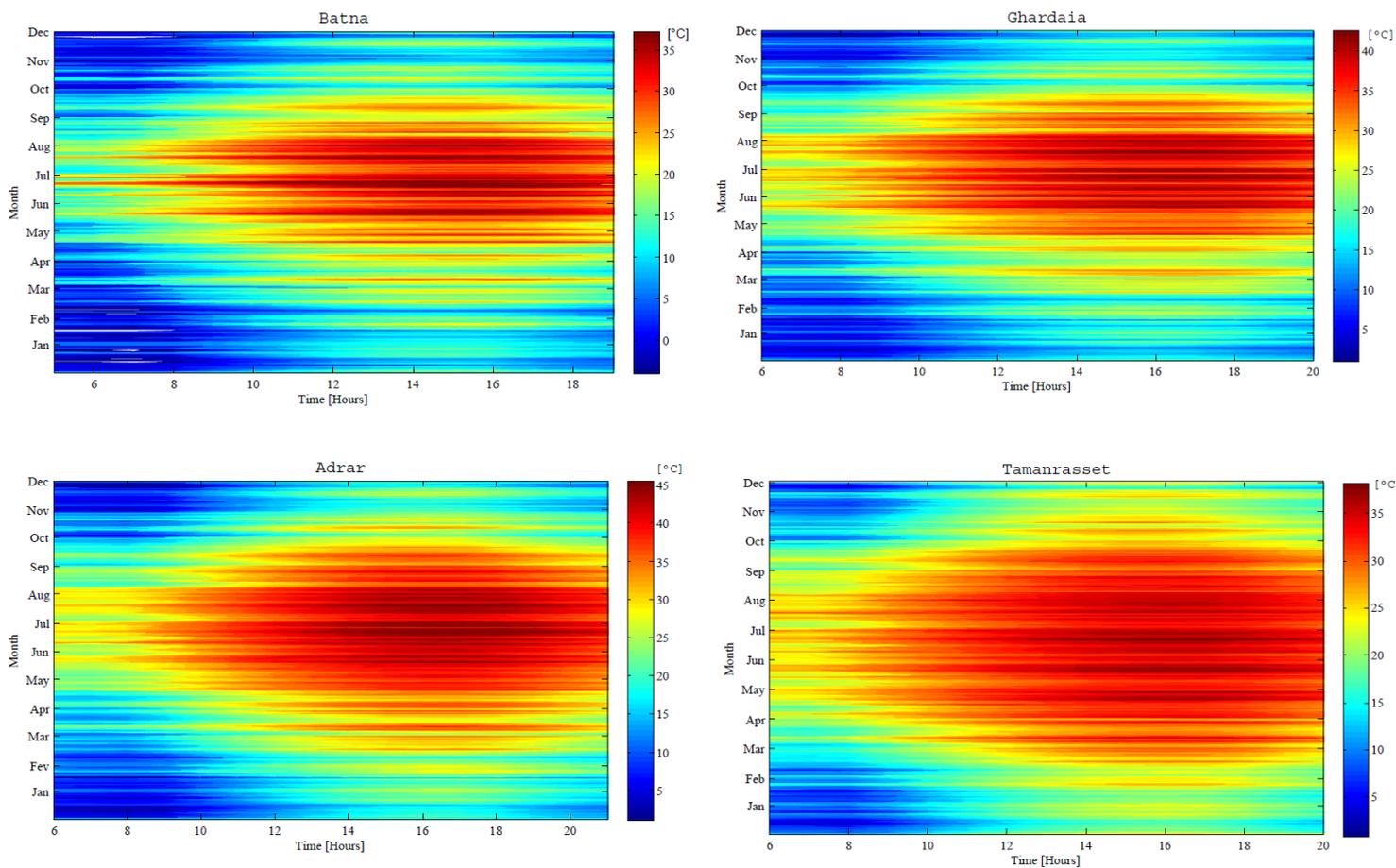


Figure II.1-8. Cartes isoplèthes de la température ambiante des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens.

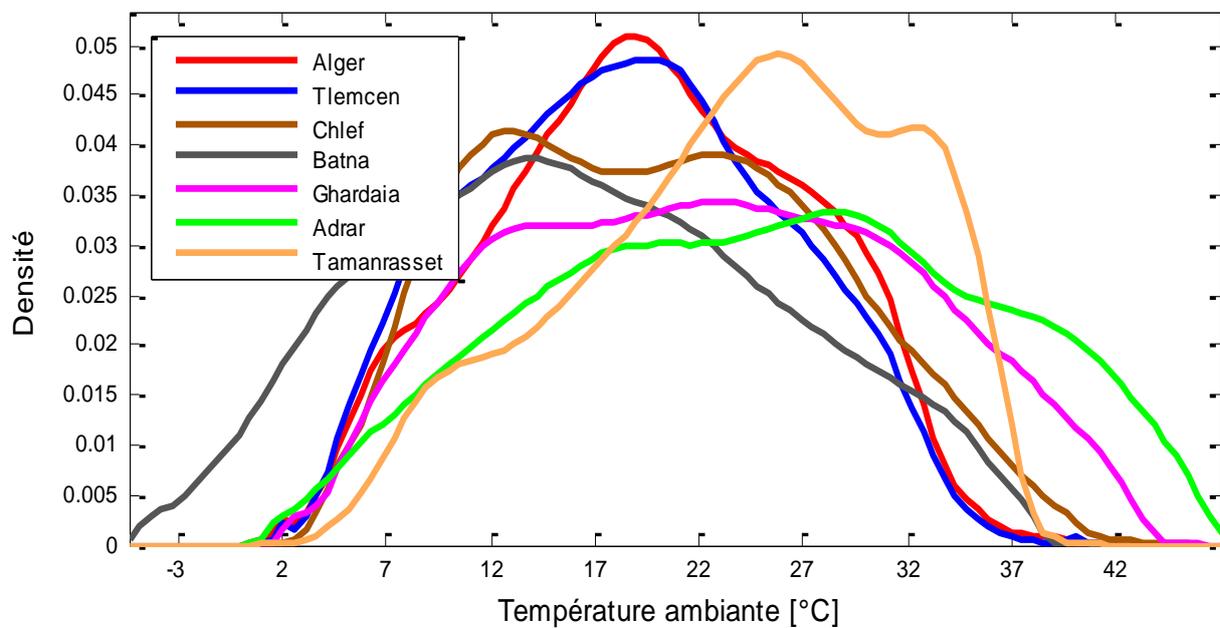


Figure II.1-9. Estimation non paramétrique par la méthode du noyau de la distribution des données horaires de la température ambiante annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens.

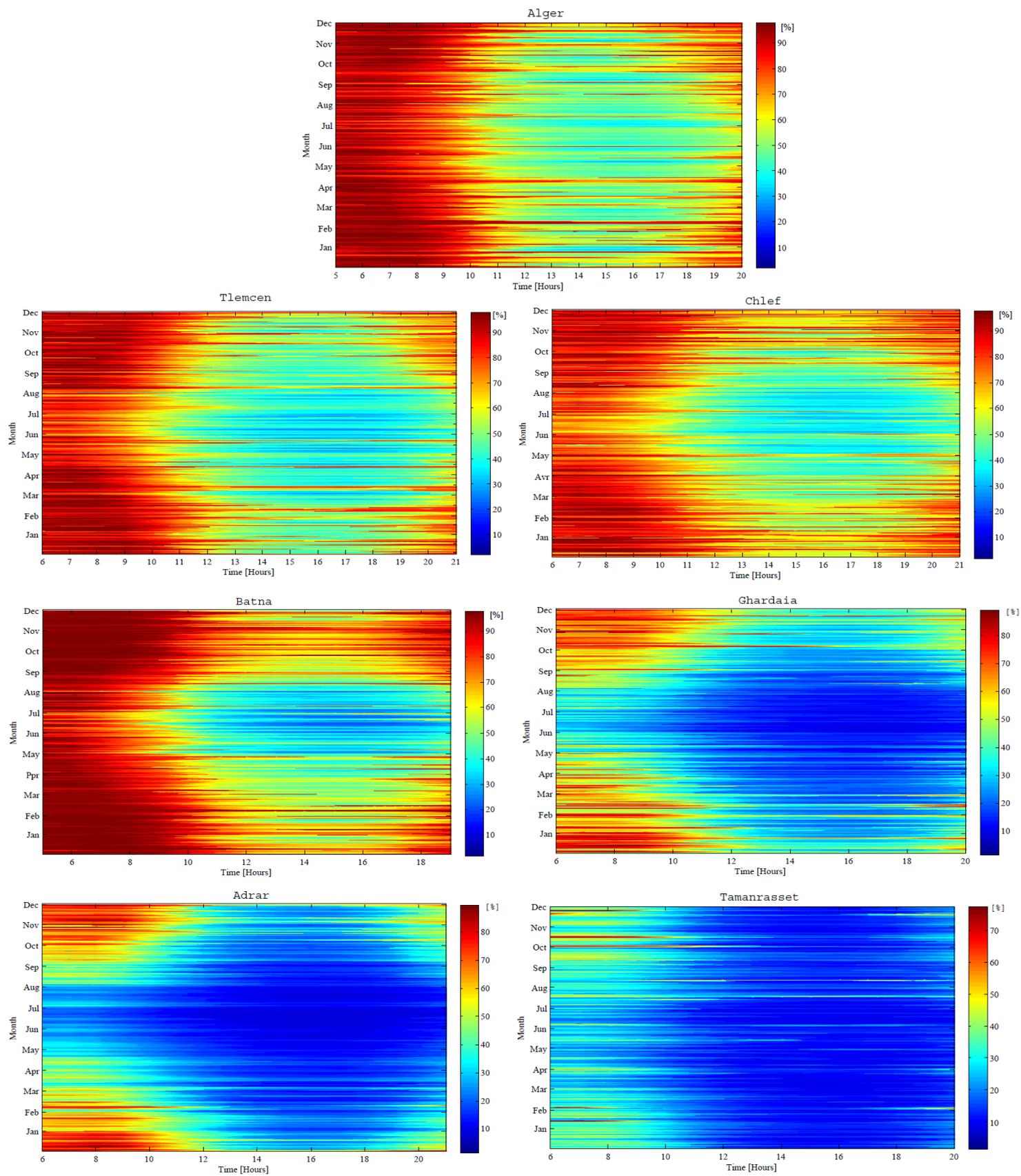


Figure II.1-10. Cartes isoplèthes de l'humidité relative d'air ambiant des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens.

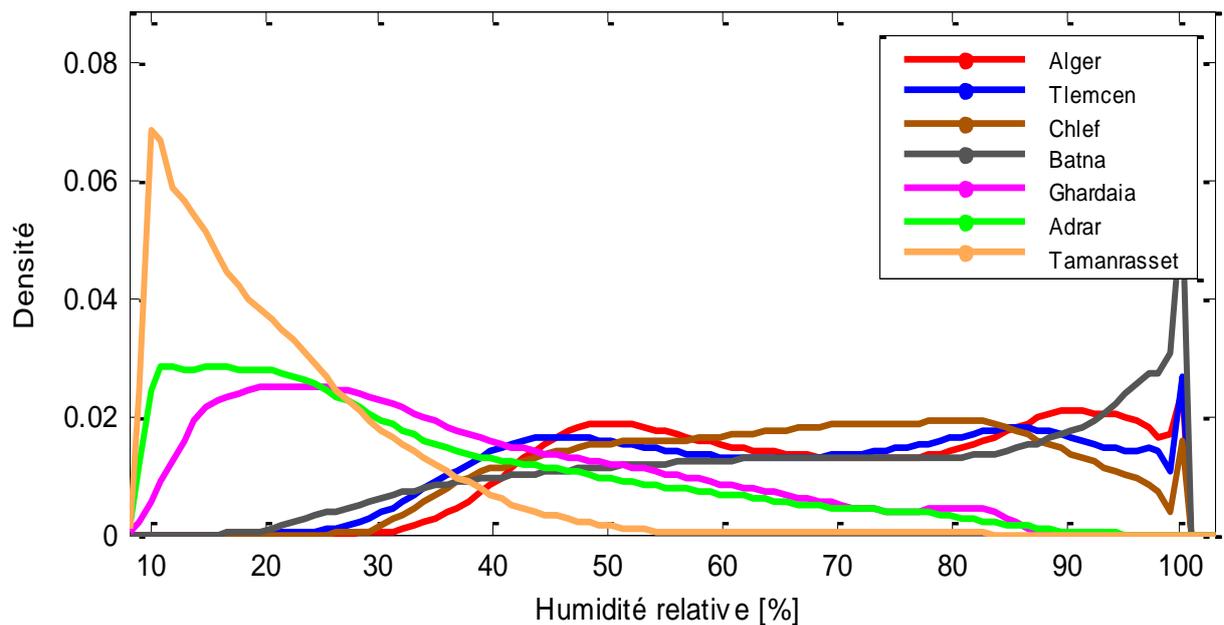


Figure II.1-10. Estimation non paramétrique par la méthode du noyau de la distribution des données horaire de l'humidité relative d'air ambiant annuelle des grandes villes représentatives de l'ensemble des climats algériens.

Ghardaïa est particulièrement chaude pendant les journées des périodes estivales. Par contre, à Tamanrasset, la température ambiante est nettement plus faible que les autres zones désertiques sahariennes (Adrar et Ghardaïa), vraisemblablement en raison de son altitude exceptionnelle de 1377m.

La Figure II.1-9 montre qu'après Adrar et Ghardaïa, Chlef est la ville la plus chaude et ses températures ambiantes sont légèrement supérieures à celles observées à Batna. Elle exhibe également des profils très semblables de la température ambiante de Tlemcen et d'Alger avec, cependant, la température d'Alger légèrement supérieure à celle observée à Tlemcen toute l'année type. Parallèlement à la température ambiante, l'humidité relative de l'air est une grandeur de processus très importante. Sa variation dépend en partie de la température de l'air et des caractéristiques hygrométriques des masses d'air. Elle a une influence considérable sur le processus de séchage solaire. La Figure II.1-10 rassemble les cartes isoplèthes de l'humidité relative de l'air des sept villes considérées pendant toute l'année type. Ces cartes indiquent que la ville la plus sèche toute l'année est Tamanrasset. Ainsi, une humidité de 10 à 20 % est observée en milieu de journée sur une large plage des mois d'été à Ghardaïa, du printemps au début de l'automne à Adrar et pratiquement toute l'année à Tamanrasset. Durant les mois d'été, les plus faibles valeurs de l'humidité relative vont atteindre des valeurs inférieures à 10 % l'après-midi à Adrar. Les cartes isoplèthes de la Figure II.1-10 indiquent bien que les valeurs de l'humidité relative des zones désertiques sahariennes (Ghardaïa, Adrar et Tamanrasset) varient fortement au cours de la journée : elle est plus faible au milieu de la journée, alors que dans les premières heures de la matinée, cette variation diurne n'est pas aussi accentuée en été qu'aux autres saisons. Ainsi, par exemple, dans la ville d'Adrar, l'humidité relative aux premières heures de la matinée en janvier a des valeurs entre 70 et 80% alors qu'en milieu de la journée du mois de juillet elle n'est que de 5 à 15%. C'est-à-

dire huit fois plus élevée qu'un matin d'hiver qu'en milieu de journée en été. Ces variations diurnes sont faibles à Tamanrasset par rapport à Adrar et Ghardaïa. Notons l'importance extraordinaire de cet aspect pour une application de séchage solaire au moment de récolte (saison estival). En effet, on peut sécher des premières heures de la matinée jusqu'à la fin de la journée. La Figure II.1-10 montre que les valeurs de l'humidité relative sont plus élevées en hiver qu'en été. Ce qui est dû à l'effet des températures plus élevées en été qu'en hiver. La Figure II.1-11 montre que les valeurs d'humidité relative à Alger (zone littorale) sont supérieures à celles de Tlemcen, Chlef et Batna, grâce à l'apport d'humidité en provenance de la mer méditerranéenne. Sur la Figure II.1-10, la variation d'humidité relative est très forte au cours de la journée à Batna en été, par rapport à Tlemcen, Alger et Chlef. Ceci est probablement dû à l'influence de la méditerranée en termes de température : la température est plus basse en hivers à Batna que à Tlemcen, Alger et Chlef, ce qui implique une augmentation importante de l'humidité relative aperçue dans la Figure II.1-11.

#### **II.1.4. CONCLUSION**

En conclusion, les cartes isoplèthes élaborées dans cette étude améliorent la description et la compréhension des facteurs météorologiques agissant sur le processus de séchage solaire. Elles en facilitent l'analyse et contribue ainsi à la valorisation du gisement solaire, tout en permettant de distinguer les forts contrastes entre les zones étudiées. Le périmètre de l'étude présentée ci-dessus a été élargi de manière à englober toutes les villes représentatives des divers climats algériens. L'ajustement de la distribution empirique estimée par la méthode de noyau aux données se révèle être une bonne approximation dans tous les cas.

L'utilisation du potentiel énergétique comme source d'énergie pour le séchage solaire des produits agricoles dans les sept zones climatiques de l'Algérie a été largement appréciée. L'analyse montre qu'au cours de la saison estivale, période de récolte, une très bonne performance de système de séchage solaire est également prévue à Tamanrasset, Ghardaïa et beaucoup plus à Adrar avec une intensité de rayonnement solaire plus stable et plus élevée, la température ambiante atteint un niveau de 45° alors que l'humidité relative peut ne pas dépasser 10% l'après-midi. Après Adrar, Tamanrasset et Ghardaïa, Chlef est la ville la plus chaude par rapport à Batna, Tlemcen et Alger. Elle dispose d'un climat très favorable au séchage solaire. Néanmoins, une fois les zones favorisant le séchage solaire identifiées, il est nécessaire de procéder, par la suite au sein du présent travail, à des simulations plus détaillées, telles que la simulation de fonctionnement instantané de système de séchage solaire dans ces zones. Effectivement, les cartes isoplèthes peuvent être favorablement utilisées pour diverses applications d'énergie solaire en Algérie.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Berdja, M., Benhabiel, A., Abbad, B., Noui, A., Chikh, S., Daoud, K., Oufar, L. (2007). Climatation solaire en Algérie. *ICRE'07 University of Bejaia*.

Capderou, M., 'Atlas Solaire de l'Algérie', Tomes 1, 2 et 3. Office des Publications Universitaires, 1987.

- Celik, A.N. (2004). On the distributional parameters used in assessment of the suitability of wind speed probability density functions. *Energy Conversion and Management* 45: 1735–1747.
- Chellali, F., Khellaf, A., Belouchrani, A., Reoui, A. (2011). A contribution in the actualization of wind map of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 993–1002.
- Chellali, F., Khellaf, A., Belouchrani, A. (2013). Identification and analysis of wind speed patterns extracted from multi-sensors measurements. *Stoch Environ Res Risk Assess* 27: 1–9.
- Faucher, D., Rasmussen, P.F., Bobée, B. (2002). Estimation non paramétrique des quantiles de crue par la Méthode des noyaux. *Revue des sciences de l'eau* 15 : 515-541.
- Himri, Y., Himri, S., Boudghene Stambouli, A. (2009). Assessing the wind energy potential projects in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 2187–2191.
- Himri, Y., Rehman, S., Agus Setiawan, A., Himri, S. (2012). Wind energy for rural areas of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2381– 2385.
- Jamil, M., Parsa, S., Majidi, M. (1995). Wind power statistics and an evaluation of wind energy density. *Renewable Energy* 6 : 623- 628.
- Mefti, A., Bouroubi, M.Y. (1999). Estimation et Cartographie de la Composante Globale du Rayonnement Solaire. *Rev. Energ. Ren. : Valorisation* 219-224
- Mefti, A., Bouroubi, M.Y., Adane, A. (2003). Generation of hourly solar radiation for inclined surfaces using monthly mean sunshine duration in Algeria. *Energy Conversion and Management* 44: 3125–3141.
- Mellit, A., Kalogirou, S.A., Shaari, S., Salhi, H., Hadj Arab, A. (2008). Methodology for predicting sequences of mean monthly clearness index and daily solar radiation data in remote areas : Application for sizing a stand-alone PV system. *Renewable Energy* 33: 1570–1590.
- Sajjad, A., Riahy, G.H., Hosseinian, S.H., Farhadkhani, M. (2013). "Improved Stochastic Modeling : An Essential Tool for Power System Scheduling in the Presence of Uncertain Renewable", chapitre 05, book edited by Hasan Arman and Ibrahim Yuksel, ISBN 978-953-51-1040-8, Published : March 13, 2013.
- Sami, S., Hamid, A., Lafri, D., Semmar, D., Kharchi, R. (2000). Optimisation des Surfaces de Captation des Installations Solaires de Chauffage d'Eau Collectif. *Rev. Energ. Ren. : Chemss* 25-31
- Silverman, B. (1986). Density estimation for statistics and data analysis. Chapman and Hall, London
- Xiao, Y.Q., Li, Q.S., Li, Z.N., Chow, Y.W., Li, G.Q. (2006) Probability distributions of extreme wind speed and its occurrence interval. *Engineering Structures* 28: 1173–1181.
- Yaiche, M.R., Bouhanik, A. (2013). Atlas Solaire Algérien. Centre de Développement des Energies Renouvelables. [http://www.cder.dz/IMG/pdf/Atlas\\_solaire\\_Algerien\\_CDER.pdf](http://www.cder.dz/IMG/pdf/Atlas_solaire_Algerien_CDER.pdf)
- Yaiche, M.R., Bouhanik, A., Bekkouche, S.M.A., Malek, A., Benouaz, T. (2014). Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration. *Energy Conversion and Management* 82: 114–123.
- Youcef Ettoumi, F., Mefti, A., Adane, A., Bouroubi, M.Y. (2002). Statistical analysis of solar measurements in Algeria using beta distributions. *Renewable Energy* 26: 47–67.
- Youndjé, É. (2011). Contribution à l'estimation non-paramétrique par la méthode du noyau. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Universités de Rouen et du Havre, INSA de Rouen.

## **CHAPITRE II.2.**

# **EVALUATION D'ENERGIE SOLAIRE RECUPEREE PAR UN INSOLATEUR PLAN A AIR MUNI D'AILETTE DESTINE AU SECHAGE DES PRODUITS AGRICOLES SOUS DIFFERENTS CLIMATS D'ALGERIE**

### **II.2.1. INTRODUCTION**

Il y a une préoccupation croissante concernant la consommation d'énergie et ses implications pour l'environnement. Les rapports du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) ont sensibilisé le public à l'utilisation de l'énergie et aux répercussions sur le changement climatique. Ils ont contribué à inciter un grand intérêt en vue de mieux comprendre la consommation d'énergie et ses corrélations avec les conditions météorologiques dominantes [Li et al., 2012]. Ce sont des questions que les chercheurs dans le domaine de l'énergie par tout dans le monde doivent faire face. La plupart des fruits et légumes contiennent plus de 80% d'eau et ils sont hautement périssables. Les pertes de fruits et légumes dans les pays en développement sont estimés à 30-40% de la production [Karim et al., 2006]. La nécessité de réduire les pertes après récolte est d'une importance capitale pour ces pays. Les pertes post-récolte des produits agricoles dans les zones rurales des pays en développement peuvent être réduits de façon rigoureuse en utilisant des systèmes de séchage solaire bien conçues. Étant donné que l'insolateur à air est l'élément le plus important d'un système de séchage solaire et l'amélioration de la conception des insolateurs à air conduirait à une meilleure performance du système. L'insolateur à air muni d'ailettes étudié dans ce chapitre fait l'objet des travaux menés dans le cadre d'amélioration des performances thermiques des insolateurs plan à air [Youcef-Ali, 2005 ; Youcef-Ali et al., 2006].

Des économies d'énergie important peuvent être réalisées, si nous considérons les conditions météorologiques locales dans la conception des insolateurs plans à air destiné au séchage des produits alimentaires. En effet, la mise en place d'un insolateurs pour satisfaire un besoin bien déterminé dans un site donné doit être fait seulement après avoir d'abord une connaissance exacte de l'évolution des paramètres climatiques du site, puis d'avoir estimé l'énergie solaire récupérée, par l'insolateur par rapport au gisement solaire réellement disponible. Le dimensionnement de ces insolateurs nécessite des tests sous plusieurs conditions météorologiques réelles. Cependant, pour des raisons d'ordre économique, il ne sera pas aisé d'effectuer dans chaque zone des tests spécifiques d'application du séchage solaire. Aussi, il serait nettement plus simple et plus pratique d'utiliser un modèle mathématique de l'insolateur en vue de simuler son fonctionnement annuel à partir des données météorologiques réelles. D'où la nécessité et l'avantage d'exploiter les données d'une année météorologique type pour l'évaluation des performances d'insolateur à long terme. Une année type est un fichier de données climatiques relatives à une année, parfois réelles mais le plus souvent artificielles, constituée de mois réels, représentatives du climat moyen d'un site [Ouedraogo et al., 2012]. Les variables météorologiques sont très aléatoires quand il s'agit de courtes périodes de temps mais hautement déterministes pour de longues durées. En conséquence, cette étude est basée sur une période d'enregistrement de 10 ans de 1990 à 2000. Le but de ce travail est de :

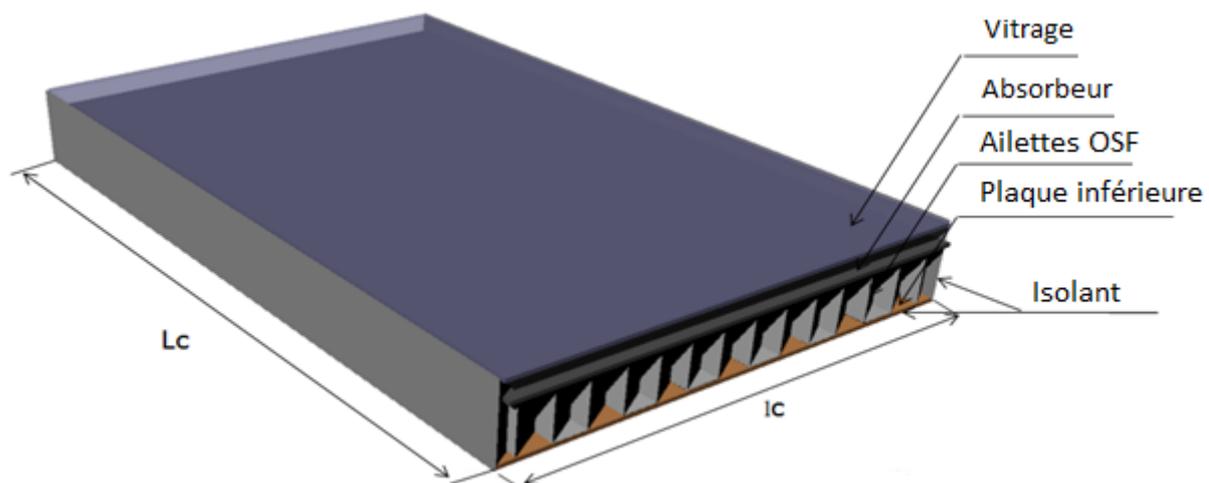
- Simuler numériquement le fonctionnement annuel de l'insolateur sous différents climats d'Algérie ;
- élaborer un code de calcul sous environnement MATLAB capable de résoudre le modèle mathématique de l'insolateur et de déterminer les cartes isoplèthes afin d'identifier clairement les forts contrastes entre les différents sites étudiés ;
- Evaluer l'énergie récupérée par l'insolateur sous différents climats considérés.

## II.2.2. MATERIELS ET METHODES

### II.2.2.1. Données utilisées pour chaque zone climatique (voir II.1.2.1, Données et II.1.2.2, Zones climatiques)

### II.2.2.2. Modèle mathématique

Le procédé à énergie solaire thermique qu'on a étudié est un séchoir indirect sans stockage d'énergie, ce qui nous conduit à considérer un insolateur plan à air à simple passe entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium placée sur l'isolant, dans le but d'obtenir des températures moyennes suffisantes pour une application au séchage solaire des produits agro-alimentaires (Figure II.2-1). L'adjonction d'ailettes OSF (Offset Strip Fins) dans la veine d'air mobile a pour objectif d'augmenter les performances thermiques de l'insolateur (Figure II.2-2). Dans la présente étude, les paramètres sans dimension ont été choisis comme suit: le pas des ailettes ( $s = 0,016$  m), la longueur des ailettes ( $l = 0,1$  m), l'épaisseur des ailettes ( $t = 0,004$ ) et la hauteur des ailettes ( $h = 0,021$  m). La dimension globale de l'insolateur est choisie ( $L_c = 1,6$  m) en longueur et ( $l_c = 0,8$  m) en largeur.



*Figure II.2-1. Schéma de l'insolateur muni d'ailettes OSF (Offset Strip Fins)*

La méthode que nous avons adoptée dans la modélisation de l'insolateur est celle de Hottel, Whillier et Bliss [Daguenet, 1985]. Cette méthode fait appel à un régime permanent, avec une température moyenne constante et une inertie thermique négligeable des éléments de l'insolateur. Notre choix a été inspiré par la faible variation de température à l'entrée du capteur et des performances instantanées à déterminer. L'équation de la chaleur dans le fluide caloporteur s'écrit :

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} + V_f \overrightarrow{\text{grad}} T_f \right) = \text{div}(\vec{q}) + \sigma_T \quad (\text{Eq. II.2-1.})$$

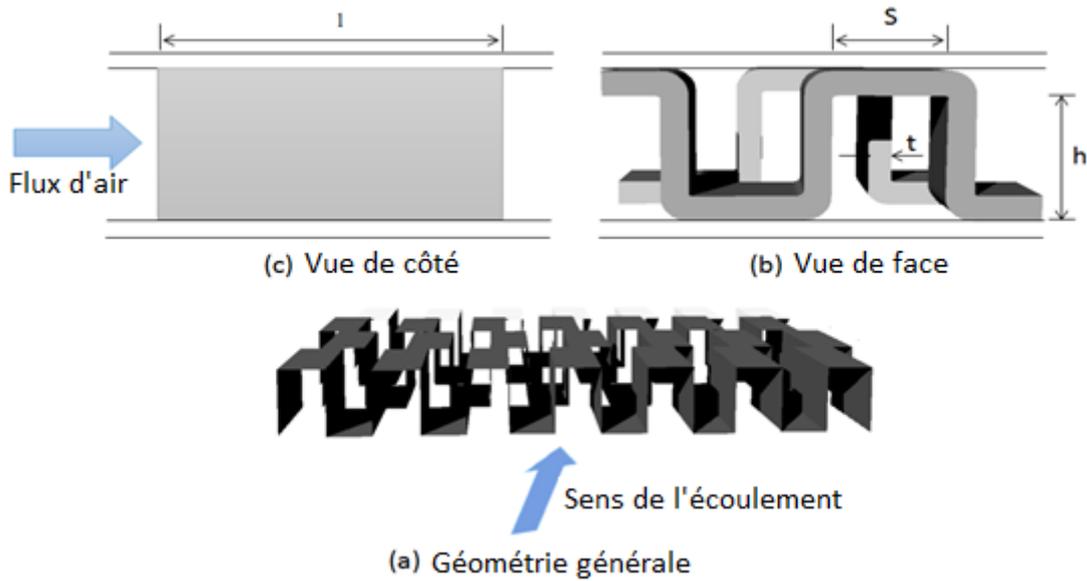


Figure II.2-2. Diagramme schématique d'ailettes OSF (Offset Strip Fins).

En régime permanent et en négligeant la conduction dans le fluide, il vient :

$$\rho C_p V_f \overrightarrow{\text{grad}} T_f = \sigma_T \quad (\text{Eq. II.2-2.})$$

Si l'écoulement s'effectue suivant la coordonnée  $x$ , cette équation s'écrit :

$$\rho C_p V_f \frac{dT}{dx} = \sigma_T \quad (\text{Eq. II.2-3.})$$

où

$$\sigma_T = \frac{Pu}{e} \quad (\text{Eq. II.2-4.})$$

En introduisant le coefficient global  $U_L$  des pertes thermiques entre l'absorbeur et l'air extérieur comme indiqué dans la Figure II.2-3, la puissance utile portée par l'air sortant de l'insolateur s'écrit [Duffie et al., 1980] :

$$Pu = A_c F' \left( (\tau_v \alpha_n) G_I - U_L (T_{fe} - T_a) \right) \quad (\text{Eq. II.2-5.})$$

En introduisant le débit massique  $\dot{m}$ , l'équation de la chaleur dans le fluide caloporteur s'écrit :

$$\dot{m} C_p \frac{\partial T_f}{\partial x} = l_c \cdot F' \left( (\tau_v \alpha_n) G_I - U_L (T_f - T_a) \right) \quad (\text{Eq. II.2-6.})$$

En supposant que  $F'$  et  $U_L$  ne dépendent pas de  $x$  et avec la condition aux limites :  $T_f(x = 0) = T_{fe}$ . La solution de l'équation différentielle du premier ordre (Eq. II.2-7) est de la forme :

$$\frac{T_f - T_a - (\tau_v \alpha_n) G_I / U_L}{T_{fe} - T_a - (\tau_v \alpha_n) G_I / U_L} = \exp\left(-\frac{U_L F' l_c x}{\dot{m} C_p}\right) \quad (\text{Eq. II.2-8.})$$

Si l'insolateur a une longueur  $L$  dans le sens de l'écoulement, la température  $T_{fs}$  de l'air à la sortie doit correspondre à la valeur  $L$  de  $x$  dans l'Eq. II.2-9, et puisque  $l_c L$  représente la surface  $A_c$  de l'insolateur, nous aurons :

$$\frac{T_{fs} - T_a - (\tau_v \alpha_n) G_I / U_L}{T_{fe} - T_a - (\tau_v \alpha_n) G_I / U_L} = \exp\left(-\frac{U_L F' A_c}{\dot{m} C_p}\right) \quad (\text{Eq. II.2-10.})$$

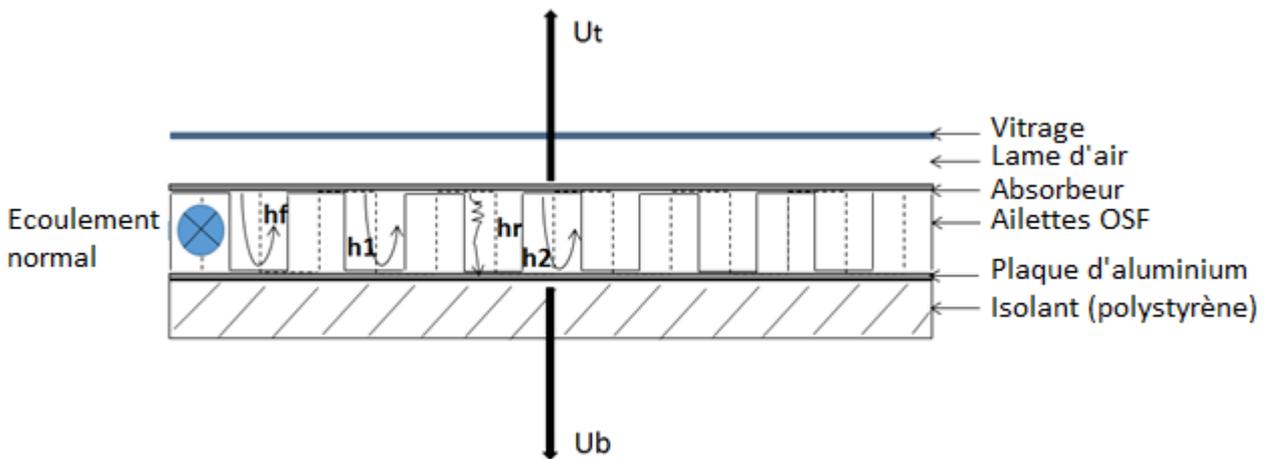


Figure II.2-3. Représentation Schématique des transferts thermiques dans l'insolateur

Le coefficient local d'efficacité de transfert air-absorbeur noté  $F'$  et le coefficient global de perte de l'insolateur  $U_L$  pour l'ailette OSF (Offset Strip Fins) illustrée à la Figure II.2-3 sont obtenus à partir des bilans énergétiques sur la plaque d'absorbeur, le fluide et la plaque arrière.

$$F' = \frac{h_r h_2 \eta_s + h_r h_1 + U_b h_1 + h_1 h_2 \eta_s}{(U_t + h_1 + h_r)(U_b + h_2 \eta_s + h_r) - h_r^2} \quad (\text{Eq. II.2-11.})$$

$$U_L = \frac{(U_b + U_t)(h_r h_2 \eta_s + h_r h_1 + h_1 h_2 \eta_s) + U_b U_t (h_1 + h_2 \eta_s)}{h_r h_2 \eta_s + h_r h_1 + U_b h_1 + h_1 h_2 \eta_s} \quad (\text{Eq. II.2-12.})$$

### II.2.2.3. Corrélation empirique des ailettes OSF (Offset Strip Fins)

Cette surface présente l'une des performances de transfert de chaleur les plus élevées par rapport au facteur de frottement. De vastes recherches analytiques, numériques et expérimentales ont été effectuées au cours des 50 dernières années [Ramesh et al., 2003]. Pour le dispositif de chauffage d'air conventionnel (sans ailette dans le passage d'air), les coefficients de transfert de chaleur dans les équations peuvent être déterminés par des équations empiriques [Swinbank, 1963 ; Buchberg et al., 1976 ; Gnielinski et al., 1976 ; Sparrow et al., 1979 ; Lienhard et al., 2006]. Bien que l'ajout

d'ailettes OSF (Offset Strip Fins) sur la surface permet à la fois d'accroître la surface d'échange et de promouvoir la turbulence, ce qui contribue à accroître le transfert de chaleur. De nombreuses corrélations différentes pour le transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur à ailettes OSF (Offset Strip Fins) (Figure II.2-2) ont été rapportées dans la littérature.

Le facteur de Colburn  $j$ , pour les ailettes OSF (Offset Strip Fins) défini par Manglik et Bergles [Manglik et al., 1995]:

$$j = 0.6522Re^{-0.5403} \alpha^{-0.1541} \delta^{0.1499} \gamma^{-0.0678} [1 + 5.269 \cdot 10^{-5} \alpha^{0.504} \delta^{0.456} \gamma^{-1.055}]^{0.1} \quad (\text{Eq. II.2-13.})$$

où les paramètres sans dimension  $\alpha = s/h$ ,  $\delta = t/l$ ,  $\gamma = t/s$  décrivent la géométrie d'ailettes OSF (Offset Strip Fins). Cette corrélation prédit les données expérimentales de 18 essais à  $\pm 20\%$  pour  $120 < Re < 10^4$  et pour des rapports  $0.134 < \alpha < 0.997$ ,  $0.012 < \delta < 0.048$  et  $0.041 < \gamma < 0.121$ . Bien que toutes les données expérimentales pour ces corrélations soient obtenues pour l'air, le facteur  $j$  tient compte des variations mineures du nombre de Prandtl, et les corrélations ci-dessus devraient être valables pour  $0.5 < Pr < 15$ .

Le facteur de Colburn est défini comme [Ramesh et al., 2003] :

$$j = St \cdot Pr^{1/3} = N_u / Re Pr^{1/3} \quad (\text{Eq. II.2-14.})$$

où  $St$  est le nombre de Stanton et  $N_u$  est le nombre de Nusselt.

En ce qui concerne la convection forcée, le coefficient de transfert de chaleur moyen est indiqué comme suit :

$$h_1 = h_2 = h_f = \frac{N_u \lambda_f}{D_H} \quad (\text{Eq. II.2-15.})$$

Le nombre de Reynolds est donné par [Manglik et al., 1995] :

$$Re = V_f \frac{D_H}{\nu_f} \quad (\text{Eq. II.2-16.})$$

La vitesse moyenne est :

$$V_f = \frac{\dot{m}}{\rho_f A_d} \quad (\text{Eq. II.2-17.})$$

La section de passage de l'air  $A_d$  dans la veine d'air mobile du collecteur est définie comme suit :

$$A_d = l_c D - \frac{l_c}{s+t} t(s+h+t) \quad (\text{Eq. II.2-18.})$$

Le diamètre hydraulique  $D_H$  est défini par [Ramesh et al., 2003] comme suit :

$$D_H = \frac{4shl}{2(sl + hl + th) + ts} \quad (\text{Eq. II.2-19.})$$

Ainsi  $\eta_s$  dans l'Eqs. (II. 2.9) et (II. 2.10) est l'efficacité de la surface global, définie comme [Hu et al., 1995] :

$$\eta_s = 1 - \frac{A_f}{A_c} (1 - \eta_f) \quad (\text{Eq. II.2-20.})$$

avec  $A_f$  est la surface d'ailette [Ramesh et al., 2003] :

$$A_f = 2hl_s + 2h\delta + s\delta \quad (\text{Eq. II.2-21.})$$

$\eta_f$  est l'efficacité d'une seule ailette :

$$\eta_f = \frac{\tanh(ml)}{ml} \quad (\text{Eq. II.2-22.})$$

avec :

$$ml = \left[ \frac{2h}{k_f \delta} \left( 1 + \frac{\delta}{l_s} \right) \right]^{1/2} \left( \frac{b_1}{2} - \delta \right) \quad (\text{Eq. II.2-23.})$$

avec :  $k_f$  est la conductivité fine du métal.

#### II.2.2.4. Expression des coefficients de transfert de chaleur

Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium placée sur l'isolant [Aoues et al., 2011] :

$$h_r = \frac{\sigma(T_n + T_2)(T_n^2 + T_2^2)}{\left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (\text{Eq. II.2-24.})$$

Une équation empirique pour le coefficient de perte en arrière du collecteur  $U_t$  a été développée par Klein après le procédé de base de Hottel et Woertz (1942) et Klein (1975) [Duffie et al., 1980] :

$$U_t = \left\{ \frac{N}{C/T_n \left( \frac{T_n - T_a}{(N+f)} \right)^e} + \frac{1}{h_{vv}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_n + T_a)(T_n^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_n + 0.00591Nh_{vv})^{-1} + \frac{(2N+f-1+0.133\varepsilon_n)}{\varepsilon_v} - N} \quad (\text{Eq. II.2-25.})$$

Où N est le nombre de couvertures en verre (N=2),

$$f = (1 + 0.089h_{vv} - 0.1166h_{vv}\varepsilon_n)(1 + 0.07866N)$$

$C = 520(1 - 0.000051\beta^2)$  Pour  $0^\circ < \beta < 70^\circ$ ;  $e = 0.430(1 - 100/T_n)$ ; pour  $70^\circ < \beta < 90^\circ$ , on prend  $\beta = 70^\circ$

Le coefficient de perte à travers le fond du collecteur :

$$U_b = \left[ \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{e_b}{\lambda_b} + \frac{1}{h_{vv}} \right]^{-1} \quad (\text{Eq. II.2-26.})$$

Les différentes étapes de l'algorithme de calcul de la température  $T_{fs}$  de l'air à la sortie de l'insolateur et de la moyenne quotidienne de l'énergie solaire récupérée par cet insolateur sont présentées sur la Figure II.2-4.

### II.2.2.5. Mesures expérimentales

Le rayonnement solaire global et diffus sur le plan horizontal est mesuré à l'aide d'une station radiométrique installée à (URAER), qui est constituée d'un pyranomètre de type EKO, muni d'une boule pare soleil. La température est mesurée à l'aide d'une sonde thermo-hygrométrique « Techoel sonde thermo-igrometrique » avec un étalonnage de précision égale  $\pm 1.5 \%$ , sensibilité à la température ambiante égale  $0.1 (^\circ C/mV)$  et une gamme de mesure s'étend de 0 à 100% HR, -40 à 60 °C. Les différents transducteurs sont reliés à une acquisition de données CAMPBELL SCIENTIFIC CR10x dont le pas d'enregistrement est fixé à 5 minutes.

## II.2.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Des données météorologiques de l'ensemble des villes considérées sont introduites dans les corrélations du modèle mathématique, le même insolateur représenté sur la Figure II.2-1 a été adopté. La simulation de fonctionnement a été faite heure par heure pendant une année. Les résultats de la simulation illustrent l'évolution de l'énergie solaire récupérée par l'insolateur, cette dernière est un paramètre important pour les applications de séchage solaire. Compte-tenu de son importance dans le processus de séchage, nous avons montré les cartes isopèthes pour les différentes zones climatiques de l'Algérie pendant toute l'année type dans la Figure II.2-5.

L'énergie solaire récupérée par l'insolateur varie considérablement entre les villes sélectionnées, sa valeur fluctue également différemment au cours de l'année, elle est faible au voisinage du lever et du coucher du soleil et elle atteint le maximum au milieu de la journée si le ciel garde le même état. Des fluctuations importantes se produisent lorsque le ciel passe d'un état à un autre. Ces fluctuations sont dues essentiellement à la présence des nuages. Ceci est clairement indiqué dans la Figure II.2-6 pour les sept villes considérées. Il est clairement démontré qu'Adrar est la ville dans laquelle l'énergie solaire récupérée par l'insolateur est la plus élevée, et est atteinte pour la majorité de toute l'année type. Une très bonne performance de système de séchage solaire des produits agricoles est également prévue à Adrar ou l'énergie solaire récupérée par l'insolateur est la plus stable et la plus élevée au cours de la saison estivale, entre Juin et Septembre, c'est pratiquement la période de récolte, c'est la période de dégradation rapide de nos fruits dont la nécessité du séchage devient indispensable. La même chose pour Tamanrasset Sauf qu'il y a des

fluctuations moins importante. En fait, l'énergie solaire récupérée par l'insolateur à Ghardaïa est souvent plus élevée que ceux observées à Batna, Chlef, Alger et à Tlemcen.

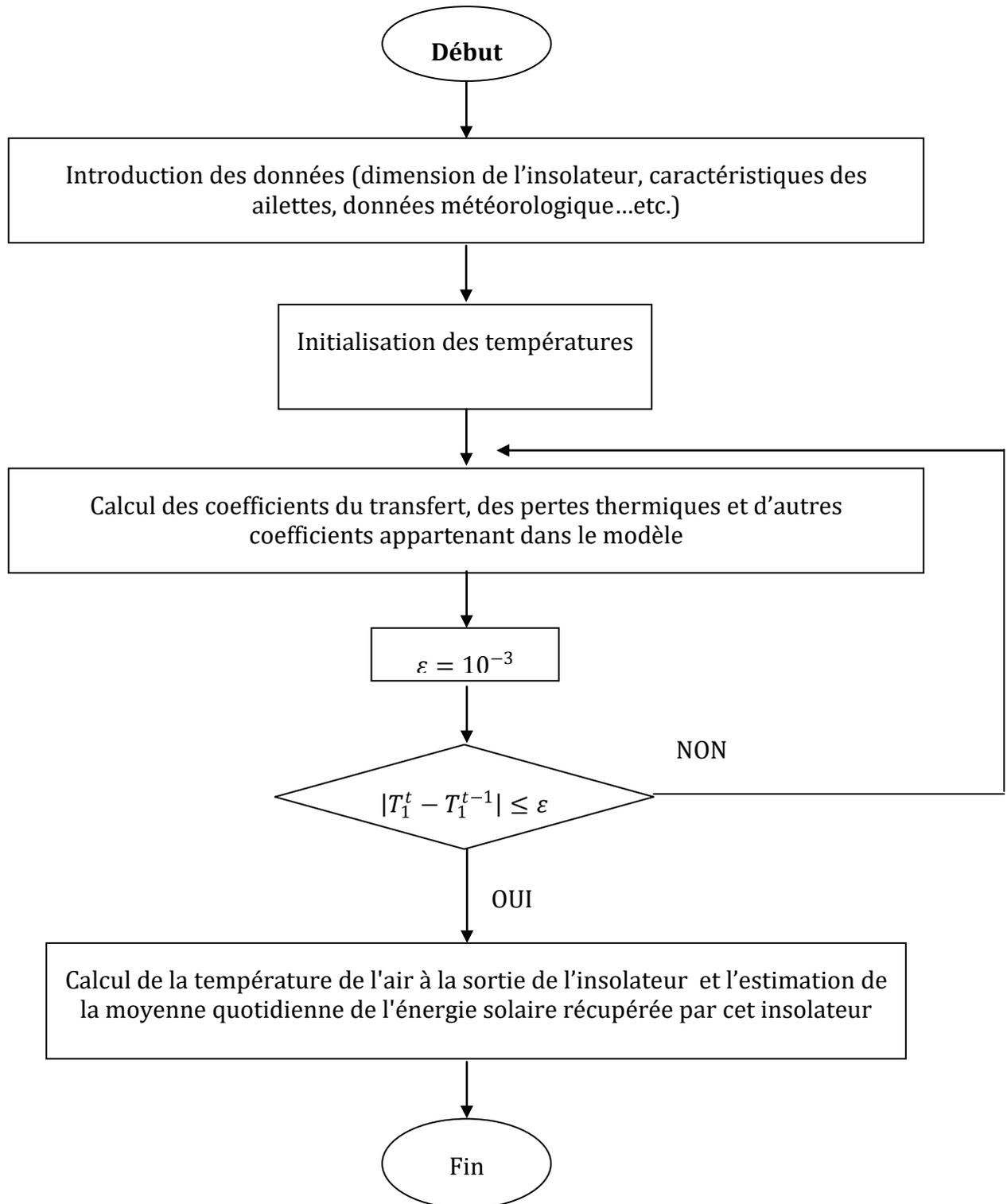
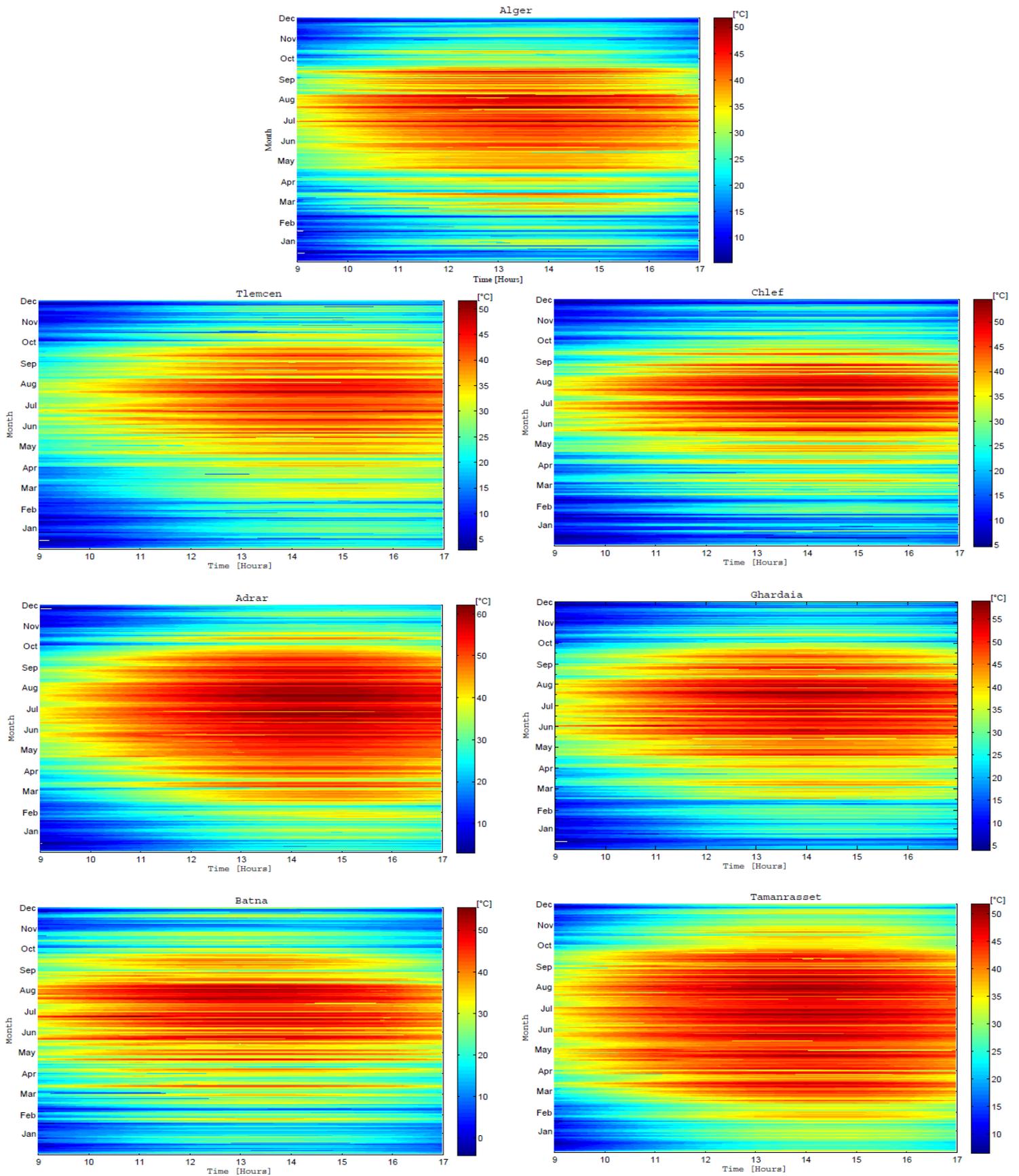
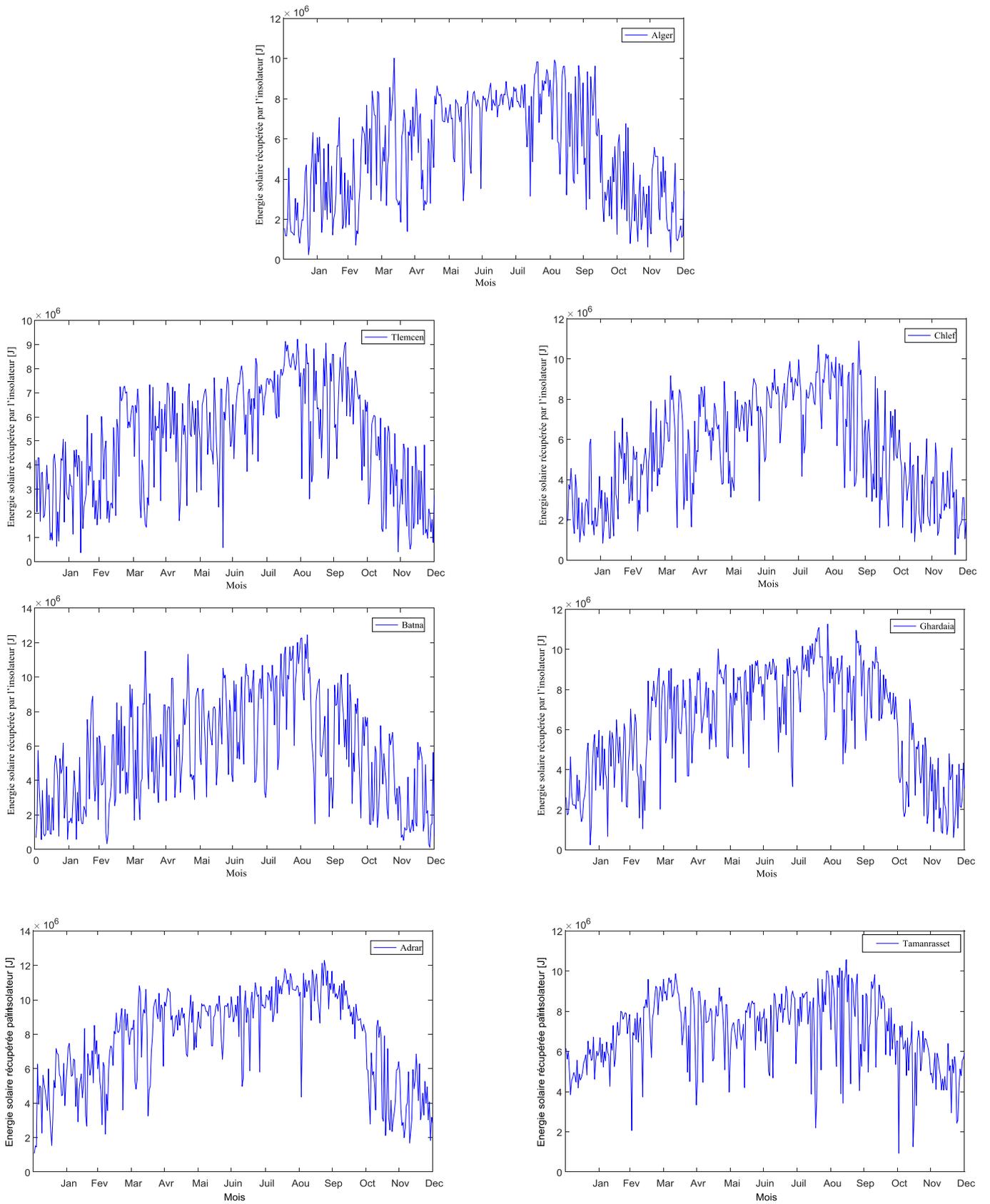


Figure II.2-4. Organigramme simplifié du code de calcul élaboré sous l'environnement MATLAB



*Figure II.2-5. Cartes isoplèthes des températures de l'air à la sortie de l'insolateur pour les grandes villes représentatives de l'ensemble des climats en Algérie.*



**Figure II.2-6. Estimation de la moyenne quotidienne de l'énergie solaire récupérée par l'insolateur pour les grandes villes représentatives de l'ensemble des climats en Algérie.**

De même l'énergie solaire récupérée par l'insolateur à Batna est souvent faible malgré qu'elle dépasse parfois les  $12 \times 10^6$  J/jour, comme il est indiqué sur la Figure II.2-6. Enfin, dans la ville de Tlemcen l'énergie solaire récupérée par l'insolateur est un peu faible par rapport à d'autres villes étudiées. Dans la Figure II.2-6, nous avons estimé l'énergie solaire moyenne journalière récupérée par l'insolateur dans les villes représentant les différentes conditions climatiques d'Algérie.

#### II.2.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, un modèle mathématique complet d'insolateur solaire à air a été présenté, comprenant l'influence de rayonnement solaire et la température ambiante sur le fonctionnement annuel du système étudié. La simulation numérique de l'insolateur basée sur ce modèle a été faite sous l'environnement MATLAB. L'étude a été étendue à plusieurs villes de l'Algérie et les résultats ont montré que l'insolateur plan à air muni d'ailettes est généralement considéré rentable, surtout dans le climat désertique (Adrar, Ghardaïa et Tamanrasset). On peut, ainsi, conclure que l'insolateur plan à air muni d'ailettes peut être considéré comme l'un des systèmes d'énergie solaire les plus rentables en Algérie. L'élaboration des cartes des isothermes ont permis de visualiser clairement la réponse instantanée de l'insolateur dans les conditions météorologiques les plus importantes sur tout le territoire national ce qui facilite l'analyse et la valorisation de l'énergie solaire récupérée et, en plus, permet de voir les forts contrastes entre les différents sites étudiés. Les cartes isopèthes élaborées sont très importantes ; ils peuvent obtenir un degré élevé de certitude sur le fonctionnement de l'insolateur à n'importe quel moment d'année sur le territoire national quelles que soient les variations météorologiques observées.

## BIBLIOGRAPHIE

- Aoues, K., Moummi, N., Zellouf, M., Benchabane, A. (2011). Thermal performance improvement of solar air flat plate collector: a theoretical analysis and an experimental study in Biskra, Algeria. *International Journal of Ambient Energy* 32(2): 95-102.
- Borel, J. (1962). 'Application du règlement de la construction en Algérie. Définition des zones climatiques', Cahier du CSTB N° 57, Paris 1962.
- Daguenet, M. (1985). Les Séchoirs solaires : théorie et pratique. UNESCO.
- Buchberg, H., Catton, I., Edwards, D.K. (1976). Natural convection in enclosed spaces – a review of application to solar energy collector. *J Heat transfer* 98(2): 182–8.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (1980). Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons, New York, 1980.
- Gnielinski, V. (1976). New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. *Int Chem Eng* 16: 161–73.
- Hu, S., Herold, K.E. (1995). Prandtl number effect on offset fin heat exchanger performance : experimental results. *International journal of heat and mass transfer* 38(6): 1053-1061.
- Karim, M.A., Hawlader, M.N.A. (2006). Performance evaluation of a v-groove solar air collector for drying applications. *Applied Thermal Engineering* 26: 121–130.

- Li, D.H.W., Yang, L., Lam, J.C. (2012). Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones - A review. *Energy* 42 103-112.
- Lienhard, J. H., IV and J. H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook, 3rd Edition, Phlogiston Press, Cambridge, MA (2005).
- Manglik, R.M., Bergles, A.E. (1995). Heat transfer and pressure drop correlations for the rectangular offset-strip-fin compact heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science* 10: 171-180.
- Ouedraogo, E., Coulibaly, O., Ouedraogo, A. (2012). Elaboration d'une année météorologique type de la ville de Ouagadougou pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments. *Revue des Energies Renouvelables* 15: 77 – 90.
- Ramesh, K.S., Dusan, P.S. (2003). Fundamentals of Heat Exchanger Design, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003.
- Sparrow, E.M., Ramsey, J.W., Mass, E.A. (1979). Effect of finite width on heat transfer and fluid flow about an inclined rectangular plate. *J Heat Transfer* 101(2): 199–204.
- Swinbank, W.C. (1963). Long-wave radiation from clear skies. *Quart J Roy Meteorol Soc* 89(381): 339–48.
- Yeh, H.M. (1992). Theory of baffled solar air heaters. *Energy* 17(7) 697-702.
- Youcef-Ali, S. (2005). Study and optimization of the thermal performances of the offset rectangular plate fin absorber plates, with various glazing. *Renewable Energy* 30: 271–280.
- Youcef-Ali, S., Desmons, J.Y. (2006). Numerical and experimental study of a solar equipped with offset rectangular plate fin absorber plate. *Renewable Energy* 31: 2063–2075.

## **CHAPITRE II.3.**

# **SIMULATION NUMERIQUE DU FONCTIONNEMENT DE L'INSOLATEUR PLAN A AIR MUNI D'AILETTES OSF (OFFSET STRIP FINS), DESTINE AU SECHAGE SOLAIRE DES PRODUITS AGRICOLES DANS LA REGION DE GHARDAÏA**

### **II.3.1. INTRODUCTION**

L'énergie solaire a un grand potentiel pour les applications à basses températures, en particulier pour le séchage des produits agricoles. Dans le séchage et le chauffage, l'énergie solaire est un choix idéal parce que l'air chaud peut être utilisé directement, éliminant ainsi tout besoin d'un échangeur de chaleur supplémentaire dans les systèmes thermiques. La majorité des séchoirs solaires sont équipés par des capteurs solaires plats. Le principal inconvénient de ces capteurs réside dans les faibles échanges thermiques avec l'air dans la veine d'écoulement de l'insolateur. Le taux de transfert de chaleur par convection d'air dans la veine d'air d'écoulement peut être amélioré en augmentant la surface d'échange thermique et la turbulence [El-Sawi et al., 2010]. Différentes adaptations sont proposées et appliquées pour améliorer le coefficient de transfert de chaleur entre la plaque absorbante et l'air mobile. Absorbant ondulé [Hollands, 1963 ; Choudhury, 1988 ; Karim et al., 2006 ; Gao et al., 2007], absorbant en canettes d'aluminium recyclables (RAC) [Alvarez et al., 2004] et absorbant muni de chicanes [Moumni et al., 2004]. [Yeh et al., 1996] ont étudié l'effet d'emplacement des barrières parallèles sur le rendement du capteur solaire. [Abene et al., 2004] ont examiné plusieurs types d'obstacles disposés en rangées dans la veine d'air d'écoulement. [Singh, 2006] a étudié l'effet des ailettes longitudinales sur la puissance obtenue et en particulier l'influence de l'espacement entre les ailettes. Il a prouvé qu'en diminuant ce dernier l'efficacité se trouve sensiblement accrue. [Giovanni, 2011] a étudié expérimentalement des canaux rendus rugueux avec différentes configurations de nervures. Ces modifications de conception donnent une meilleure performance thermique par rapport aux insolateurs plans. En général, la littérature montre que l'insolateur avec absorbant ondulé ou ailettes a une plus grande efficacité qu'un simple insolateur à plaques planes sans aucune augmentation significative de la chute de pression. Enfin, l'introduction de chicanes dans la veine d'air mobile entre l'isolant et l'absorbant augmente la surface d'échange et permet d'obtenir un écoulement turbulent qui favorise l'échange thermique convectif entre l'air et l'absorbant. Cependant, si la température du séchage est trop élevée, des pertes d'éléments nutritifs sont engendrées comme la dégradation des vitamines, la couleur peut être altérée (brunissement excessif), et surtout, une croûte sèche se forme en surface des aliments tandis que le cœur du produit reste relativement humide. Cela peut entraîner une dégradation globale du produit à grande échelle. Ainsi, [Lim et al., 2007], cités par [Omolola et al., 2017], a rapporté que la plupart des fruits contiennent divers antioxydants dont les bénéfiques sont essentiels pour la santé humaine. Ils agissent ainsi dans l'abaissement de l'incidence de maladies dégénératives, à savoir le cancer, le processus de vieillissement, l'artériosclérose, les maladies cardiaques, l'inflammation, l'arthrite, le dysfonctionnement du cerveau, etc. Cette affirmation est à nouveau prouvée par de nombreux travaux. [Vega-Galvez et al., 2009; Icier, 2010; Kaya et al., 2010 ;

Korus, 2011; Pendre et al., 2012; Oliveira et al., 2015] ont déclaré que la vitamine C et les composés phénoliques totaux ont diminué avec l'augmentation de la température d'air de séchage. Jusqu'à présent, l'influence du débit sur la température de l'air à la sortie de l'insolateur est bien rapportée dans la littérature [Youcef-Ali et al., 2007 ; Sopian et al., 2009 ; Fudholi et al., 2013 ; Agbossou et al., 2016] mais leur influence instantanée durant toute la journée ensoleillée n'a pas été étudiée en détail [Sopian et al., 2009 ; A. El Khadraoui et al., 2016].

Dans la contribution actuelle, une fonction spline reliant le débit d'air en fonction du temps a été élaborée en fonction du résultat de la simulation. Cette fonction donne la variation du débit d'air en fonction du temps de telle sorte que la température de séchage est maintenue constante sur l'ensemble du processus de séchage quelle que soit la variation des conditions météorologiques, y compris l'irradiation solaire et la température ambiante. Dans le présent chapitre, on a considéré les données météorologiques prises sur le site de Ghardaïa (une région naturelle de Sahara algérien). Ces données englobent des mesures de la température ambiante et du rayonnement solaire global pris à intervalles réguliers.

Ces données comprennent la fluctuation des conditions météorologiques, y compris les variations du rayonnement solaire et la température ambiante dans les différents types de ciel. Cette étude conduit à l'analyse de différents types de ciel qui sont utilisés pour la planification et l'analyse des systèmes d'énergie solaire [Harrouni, 2008]. Ce sont: ciel clair, ciel partiellement nuageux et ciel nuageux.

Dans le but de trouver un scénario de fonctionnement optimum, on s'est contenté d'analyser le comportement thermique instantané de l'insolateur en tant que générateur d'air chaud. Nous avons élaboré un code de calcul qui permet la détermination de la température instantanée à la sortie de l'insolateur sur une large gamme de débits d'air dans des conditions météorologiques variables.

## **II.3.2. MATRIELS ET METHODES**

### **II.3.2.1. Mesures expérimentales (voir II.2.2.5, Mesures expérimentales)**

### **II.3.2.2. Modélisation mathématique**

#### *i. Modélisation mathématique du rayonnement solaire*

La conception, la simulation et l'évaluation de la performance des systèmes d'énergie solaire nécessitent l'évaluation de la ressource du rayonnement solaire incident sur des surfaces inclinées. L'estimation de l'éclairement solaire sur des plans inclinés peut être effectuée par l'application des modèles de transposition qui convertissent le rayonnement solaire incident sur le plan horizontal au plan incliné. L'approche classique de ces modèles est de traiter séparément les composantes du rayonnement solaire incident, ainsi leur utilisation requiert la connaissance du rayonnement solaire diffus et globale sur le plan horizontal qui est mesurée expérimentalement. La simulation des capteurs solaires dans des conditions météorologiques variables nécessite la connaissance du rayonnement solaire incident à chaque instant, c'est-à-dire en fonction de la position du soleil par

rapport à la terre. Le rayonnement solaire incident sur une surface avec une orientation et une inclinaison optimale peut être nettement plus élevé que celui sur le plan horizontal presque tout le long de l'année. L'insolateur se trouve à la latitude  $\phi$ , il fait un angle  $\beta$  avec le plan horizontal et orienté d'un angle  $\gamma$  par rapport au sud. Dans la station radiométrique installée à l'Unité de Recherches Appliquées en Energies Renouvelables de Ghardaïa (URAER), on a la possibilité de collecter les données radiométriques suivantes :

- Rayonnement global  $G_h$  parvenant sur une surface horizontale.
- Rayonnement diffus  $D_h$  sur une surface horizontale.

Où le rayonnement direct  $S_h$  sur une surface horizontale est calculé comme suite :

$$S_h = G_h - D_h \quad (\text{Eq. II.3-1.})$$

Le rayonnement solaire incident sur le plan incliné est modélisé comme étant composé de trois parties : le rayonnement solaire direct, le rayonnement diffus du ciel et le rayonnement réfléchi par le sol. Le rayonnement solaire global sur le plan incliné  $G_I$  est calculé comme une fonction des données d'éclairement incident sur le plan horizontal, il suffit de remplacer les valeurs données par le pyranomètre dans l'équation rapportée par [Duffie et al., 1980], comme suit :

$$G_I = R_b S_h + R_d D_h + R_r \rho G_h \quad (\text{Eq. II.3-2.})$$

Où :  $R_b$  est le rapport entre le rayonnement direct sur le plan incliné et le rayonnement direct sur le plan horizontal,  $R_d$  est le rapport entre le rayonnement diffus sur le plan incliné et le rayonnement diffus sur le plan horizontal, le produit  $R_r \rho$  représente le rayonnement incident sur la surface inclinée reflété par le sol et le coefficient  $\rho$  est l'albédo de sol.

Le terme  $R_b$  est calculé comme suit :

$$R_b = \frac{S_n \cos \theta_\beta}{S_n \cos \theta} \quad (\text{Eq. II.3-3.})$$

Où :  $S_n$  est le rayonnement direct normal incident, tandis que  $\theta$  et  $\theta_\beta$  sont les angles d'incidence du rayonnement solaire sur les plans horizontal et incliné, respectivement. Le terme  $\cos \theta$  est obtenu par [Duffie et al., 1980] :

$$\begin{aligned} \cos \theta_\beta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (\text{Eq. II.3-4.})$$

où  $\delta$  est la déclinaison du soleil,  $\phi$  est la latitude,  $\beta$  est l'angle d'inclinaison,  $\gamma$  est l'azimut local de la surface et  $\omega$  est l'angle horaire. Ces paramètres sont calculés comme [Duffie et al., 1980] :

$$\delta = 23,45. \sin[0,98. (j + 284)] \quad (\text{Eq. II.3-5.})$$

$$\omega = 15. (TS - 12) \quad (\text{Eq. II.3-6.})$$

$$TS = TL(L_{réf} - L_{lieu}) + \frac{ET}{60} + C \quad (\text{Eq. II.3-7.})$$

$$ET = [0,0002 - 0,4797 \cdot \cos(\omega' j) + 3,2265 \cdot \cos(2 \cdot \omega' j) + 0,0903 \cos(3 \cdot \omega' j) + 7,3509 \cdot \sin(\omega' j) + 9,3912 \cdot \sin(2 \cdot \omega' j) + 0,3361 \cdot \sin(3 \cdot \omega' j)] \quad (\text{Eq. II.3-8.})$$

Où :  $C$  est la Correction sur le temps légal ; pour l'Algérie  $C = -1$  donc : pour le cas de l'Algérie, l'équation (II. 3.7) rapporté dans [Azzi, 2008] sera comme suit :

$$TS = TL + (1/15) \cdot L_{lieu} + \frac{ET}{60} - 1 \quad (\text{Eq. II.3-9.})$$

L'expression de terme  $\cos \theta$  peut être obtenue par Eq. (II. 3.4) lorsque l'angle d'inclinaison  $\beta$  est mis égal à zéro. L'angle d'incidence est calculé comme valeur moyenne dans l'intervalle de temps à chaque heure.

L'angle d'azimut local de la surface optimum, pour les insolateurs plans, est généralement  $\gamma = 0^\circ$  et le terme  $R_b$  s'écrit comme suite :

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (\text{Eq. II.3-10.})$$

Le rayonnement réfléchi du sol est considéré comme étant isotrope de sorte que le terme  $R_r$  est calculé comme [Duffie et al., 1980] :

$$R_r \cong \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (\text{Eq. II.3-11.})$$

L'équation pour calculer le facteur de transposition de rayonnement diffus  $R_d$ , avec le modèle isotrope donné par Liu et Jordan (1963) est [Padovan et al., 2010] :

$$R_d \cong \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \quad (\text{Eq. II.3-12.})$$

ii. *Modélisation mathématique de l'insolateur (voir II.2.2.2, Modèle mathématique ; II.2.2.3, Corrélation empirique des ailettes OSF (Offset Strip Fins) et II.2.2.4, Expression des coefficients de transfert de chaleur)*

iii. *Estimation à partir des résultats des simulations*

La détermination de la fonction qui décrit la variation du débit d'air en fonction du temps sous des scénarios d'irradiance solaire communs est essentielle. Ceci est réalisé en simulant le fonctionnement de système en utilisant le code de calcul sous l'environnement Matlab élaboré dans cette étude. Les résultats de simulation sont des valeurs de débit qui donnent une température de séchage constante égale à  $50 \pm 1^\circ \text{C}$  pendant tout le processus de séchage, quelles

que soient les conditions météorologiques. L'ensemble des valeurs de débit obtenu qui donnent une température de séchage constante est ajusté en utilisant la méthode spline de lissage. Autrement dit, la méthode des splines de lissage permet de déterminer la courbe d'ajustement en utilisant un nombre adéquat de polynômes cubiques par morceaux qui se rapprochent harmonieusement des points de données [Boor, 1978 ; Shahrarayand et al., 1989 ; Fox, 2000 ]. En fait, la spline de lissage peut être informatisée en stockant les coefficients polynomiaux dans un tableau.

*iv. Méthode de régression non paramétrique : splines de lissage*

Les splines de lissage sont une autre façon d'utiliser les fonctions splines pour estimer la fonction de régression du modèle de régression non paramétrique univariée. Contrairement aux splines de régression qui utilisent souvent des méthodes plutôt intuitives ou d'essais et erreurs pour déterminer l'ensemble des noeuds et par conséquent l'estimateur, les splines de lissage déterminent la valeur de ce dernier en minimisant un critère bien précis. Celui-ci combine la mesure classique de la qualité de l'ajustement, la somme des résidus au carré, et une mesure de la quantité de lissage, ce qui donne :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \dot{m}_{opt\ i} - f(t_i) \right)^2 + P \int_{t_1}^{t_n} (f^{(k)})^2 du \quad (\text{Eq. II.3-13.})$$

où  $P$  est le paramètre de lissage,  $f^{(k)}$  est le  $k^{\text{ème}}$  dérivatif de  $f$ . Si  $k = 2$ , alors  $f$  est une spline cubique de lissage.

Pour les valeurs instantanées de débit d'air nécessaires afin d'atteindre une température optimale  $(t_i, \dot{m}_{opt\ i})$ ,  $i = 1, \dots, n$ , la fonction de lissage  $f(t)$  est la solution du problème de minimisation.

Le premier terme de l'équation (Eq. II.3-13) est la somme résiduelle des carrés, un indicateur de la qualité de l'ajustement de la courbe spline aux données. En d'autres termes, il mesure le degré de fidélité de la fonction spline de lissage aux données. Le deuxième terme mesure la rugosité de la courbe spline de lissage résultante. La rugosité d'une fonction peut être caractérisée par sa courbure. La valeur du paramètre  $P$  permet de déterminer la flexibilité de l'estimateur. Plus la valeur de  $P$  est près de 0, plus l'estimateur est flexible, car on diminue l'apport de la quantité de lissage dans l'équation (Eq. II.3-13). Par contre, lorsque l'on augmente la valeur de  $P$ , on donne plus d'importance à la deuxième partie de l'équation (Eq. II.3-13), ce qui oblige l'intégrale à être plus petite et donc l'estimateur à être plus lisse.

*v. Intégration de la courbe splines de lissage*

Dans la courbe spline de lissage, la fonction n'est connue que pour un ensemble fini de points,  $(t_i, \dot{m}_{opt\ i})$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Supposons que les  $t$  sont triés par ordre croissant, avec  $a = t_1 < t_2 < \dots < t_n = b$

Pour l'approximation de l'intégrale  $\int_a^b \dot{m}_{opt}(t)dt$ , l'approche la plus évidente consiste à intégrer la fonction linéaire par morceaux qui interpole les données. Cela conduit à la formule composite du trapèze :

$$T = \sum_{i=1}^{n-1} h_i \frac{\dot{m}_{opt_{i+1}} + \dot{m}_{opt_i}}{2} \quad (\text{Eq. II.3-14})$$

avec  $h_i = t_{i+1} - t_i$ .

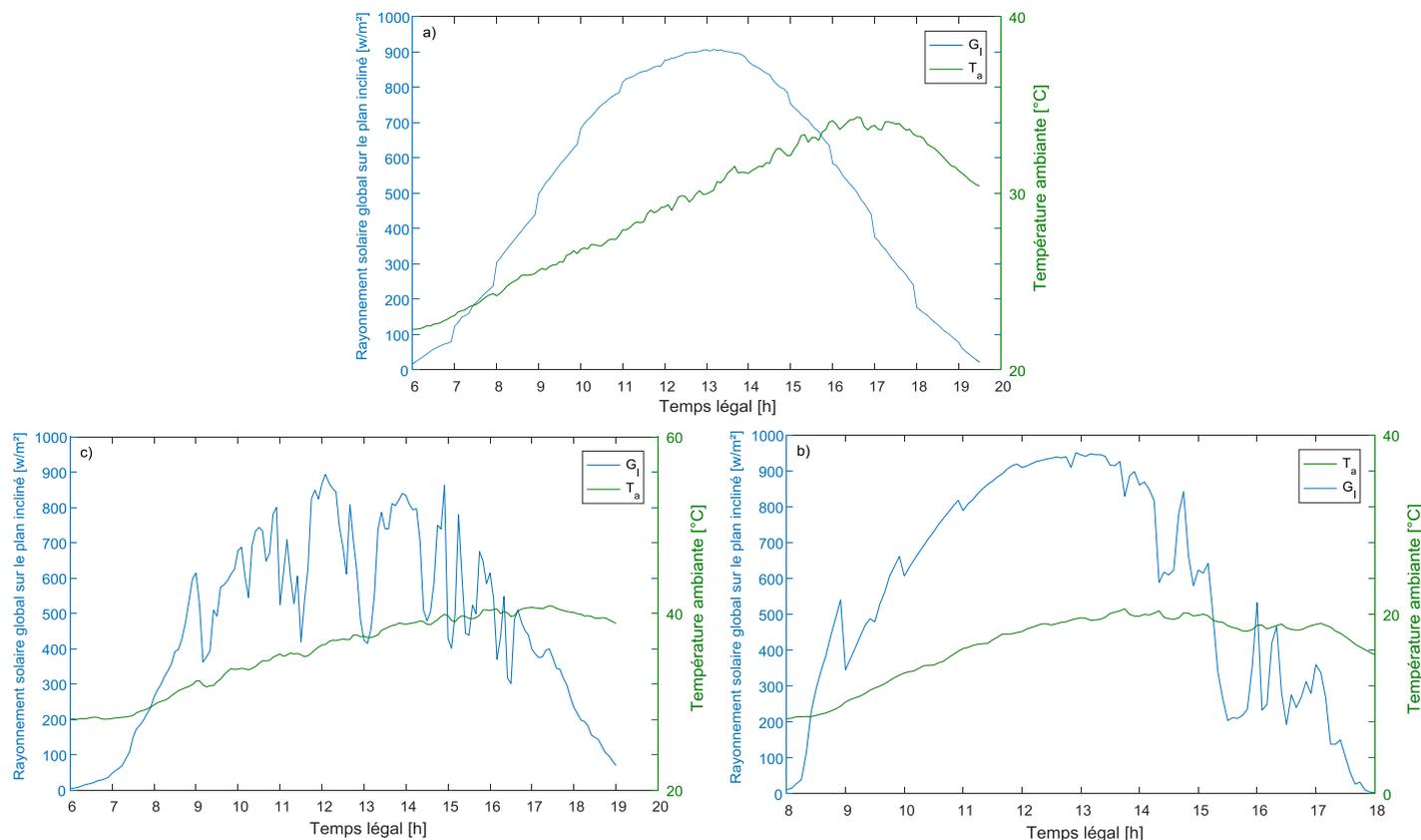
### II.3.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Des données météorologiques de la région de Ghardaïa sont introduites dans les corrélations donnant les flux solaires, direct et diffus et la température ambiante. Le rayonnement solaire global  $G_I$  sur le plan incliné (Figure II.3-1) est calculé en tant que fonction des données d'éclairement incident sur le plan horizontal en utilisant le modèle de Lui et Jordan décrit ci-dessus. Dans ce travail, différentes conditions de ciel sont considérées: (i) un jour de ciel dégagé (Figure II.3-1 a)), (ii) un jour partiellement nuageux (Figure II.3-1 b)) et (iii) un jour nuageux (Figure II.3-1 c)). Le choix d'une journée nuageuse en plein été et d'un ciel clair en début d'été représente respectivement les pires scénarios de bilan radiatif inhabituel et typique et correspond à la saison de récolte. Ainsi, ce choix offre une solution pour maintenir les déchets après récolte au minimum. Dans le cas du troisième choix (jour d'hiver partiellement nuageux), il est démontré qu'il est possible d'utiliser le séchage solaire à une température optimale à des valeurs d'irradiance faibles.

La simulation a été réalisée pour des éclaircissements variables le long de la journée ensoleillée. Les résultats de simulation illustrent l'évolution de la température d'air à la sortie de l'insolateur sous la forme d'isothermes. La température d'air à la sortie de l'insolateur est un paramètre essentiel pour l'application du séchage solaire. Tenant compte de ce fait lors de nos travaux, des efforts ont été accomplis pour montrer les contours isothermes de la température d'air à la sortie de l'insolateur pour une large gamme de débit pouvant pénétrer l'insolateur dans différents scénarios d'irradiance. Pour être plus précis, la première stratégie du code de simulation est de maintenir le débit constant pendant toute la durée de la simulation, puis d'enregistrer la température aux sorties. Cette stratégie est répétée pour toute la gamme du débit. Ce débit varie entre des valeurs minimales et maximales déterminées par le nombre de Reynolds. Ces résultats sont ensuite utilisés pour tracer les contours isothermes, c'est-à-dire la variation du débit en fonction du temps pour obtenir une température donnée (Figure II.3-2, Figure II.3-3 et Figure II.3-4). Nous remarquons que le passage nuageux constaté sur la variation du rayonnement global incident sur l'insolateur (Figure II.3-1) a un impact immédiat et direct sur les isothermes.

Dans la Figure II.3-4, les isothermes subissent de nombreuses fluctuations dues aux passages nuageux ainsi qu'aux fluctuations de la température ambiante. Comme prévu, le pic de la température à la sortie de l'insolateur augmente avec la diminution du débit d'air. Ces résultats nous permettent d'optimiser le fonctionnement de l'insolateur durant toute la journée ensoleillée de séchage par la régulation du débit d'air afin de maintenir la température optimum de séchage

malgré les perturbations météorologiques indésirables en suivant les isothermes des Figure II.3-2, Figure II.3-3 et Figure II.3-4. Ce code de calcul sera utile dans l'optimisation du fonctionnement de l'insolateur pour n'importe quel jour de l'année à l'aide des données météorologique du lieu considéré.



**Figure II.3-1** Variation du flux solaire et de la température ambiante : a) le 11/06/2008, journée à ciel claire, b) le 14/01/2008, journée à ciel partiellement nuageux et c) le 17/05/2008, journée avec nombreux passages de nuageux.

Figure II.3-5 montrent que à un instant donné, la température d'air à la sortie du l'insolateur diminue de façon continue avec l'augmentation du débit et comme la température de fluide baisse avec l'augmentation du débit, le rendement est accru en conséquence. Ceci s'explique par le fait que lorsque le débit d'air croit, la puissance solaire incidente étant maintenue constante, la quantité d'air à chauffer augmente, entraînant une diminution de la température de sortie.

Figure II.3-5 montre également la relation entre le rendement et la température de sortie avec le débit. Les résultats obtenus par [Abene et al., 2004 ; El-Sawi et al., 2010] montrent la même tendance. Ces résultats démontrent que le débit joue un rôle important sur les performances des insolateurs à air. Pour sélectionner une valeur appropriée de débit, nous devons considérer non seulement la température d'air à la sortie requise mais aussi le rendement de l'insolateur.

Pour maintenir la température d'air à la sortie de l'insolateur constante, le débit est augmenté en cas de valeurs d'irradiance élevées. Inversement, à des valeurs basses niveau d'éclairement le débit devrait être diminué.

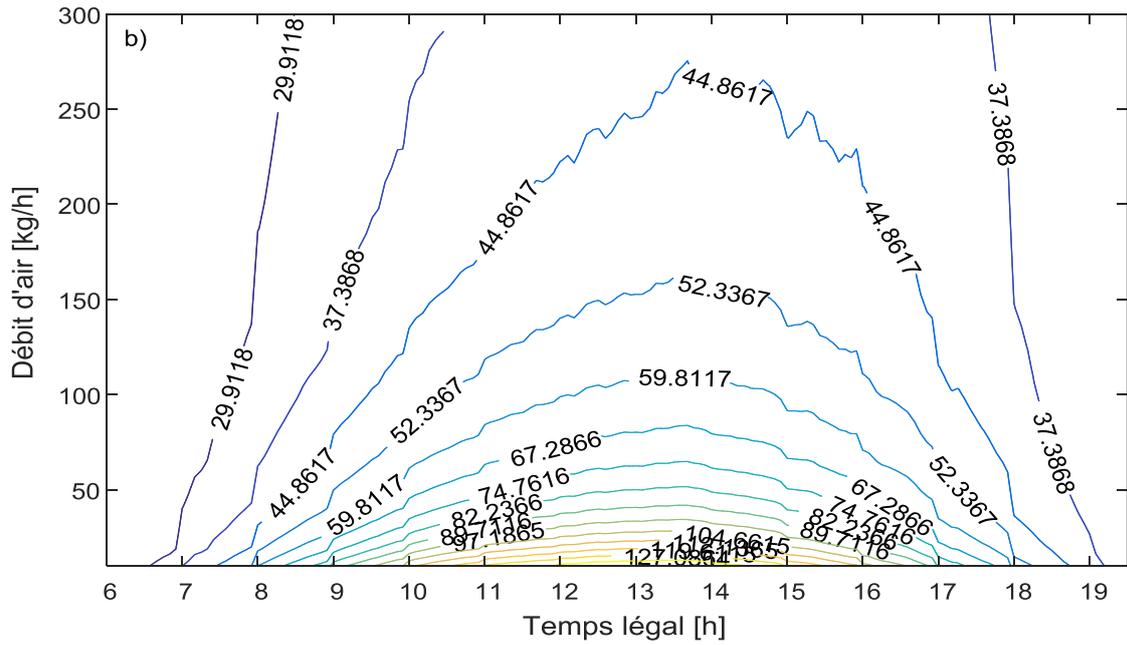


Figure II.3-2. Observation des isothermes du 6h00 au 19h00 le 11/06/2008 jusqu'à un débit de 300 kg/h, journée à ciel claire.

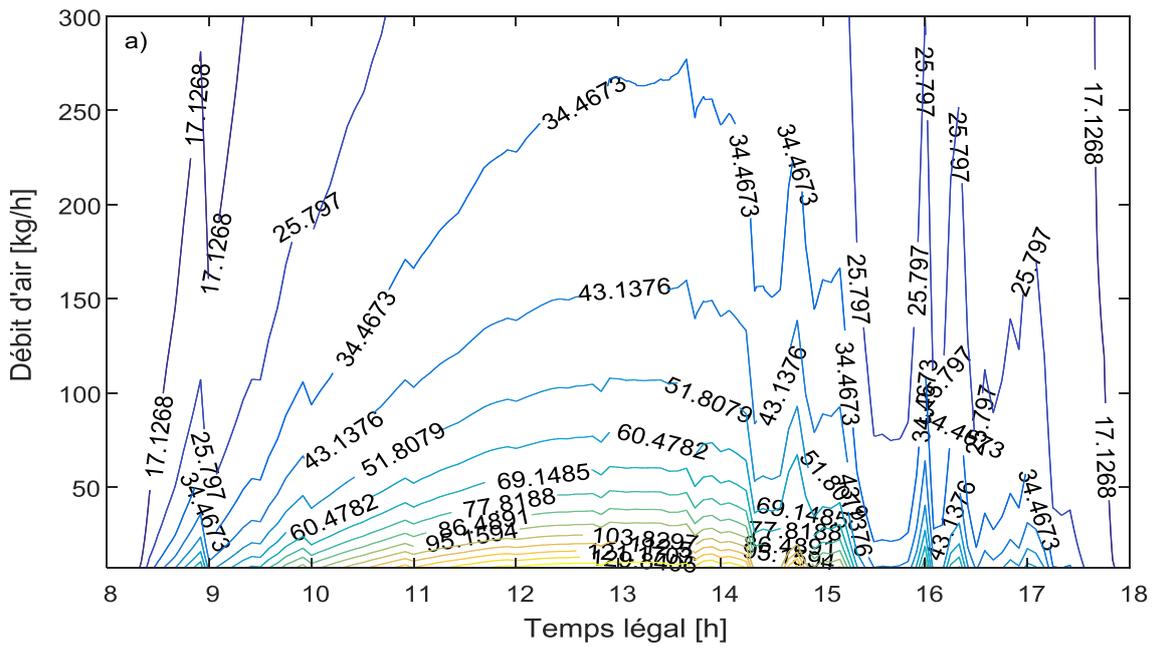


Figure II.3-3. Observation des isothermes du 6h00 au 19h00 le 14/01/2008 jusqu'à un débit de 300 kg/h, journée à ciel partiellement nuageux.

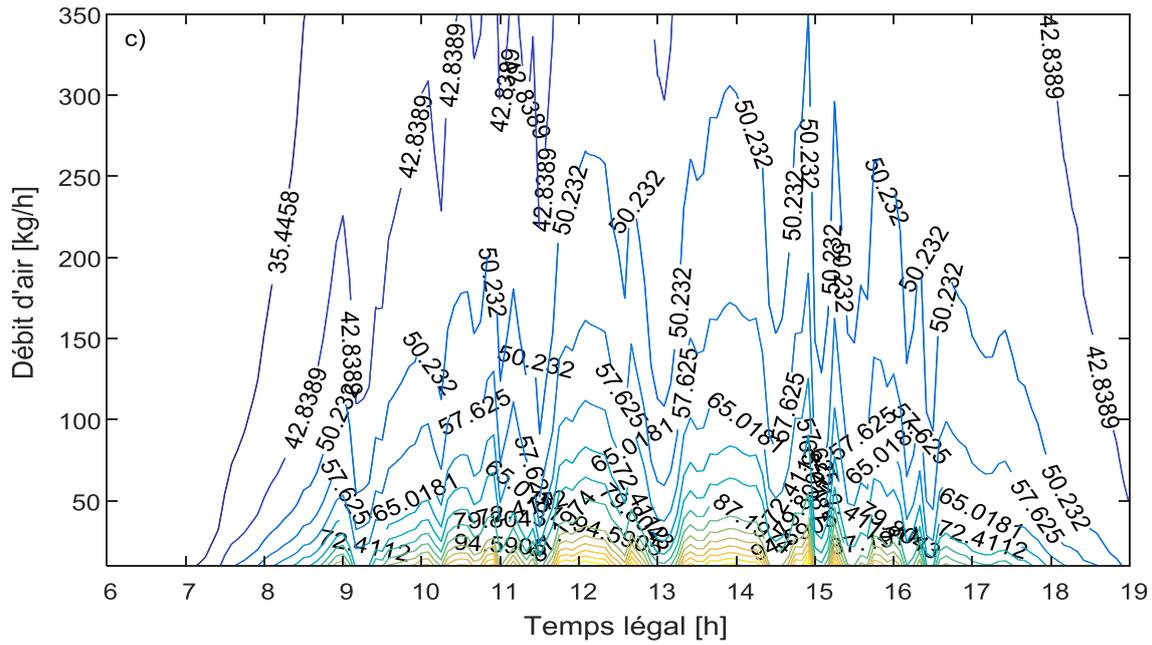


Figure II.3-4. Observation des isothermes du 6h00 au 19h00 le 15/07/2008 jusqu'à un débit de 350 kg/h, journée avec nombreux passages de nuageux.

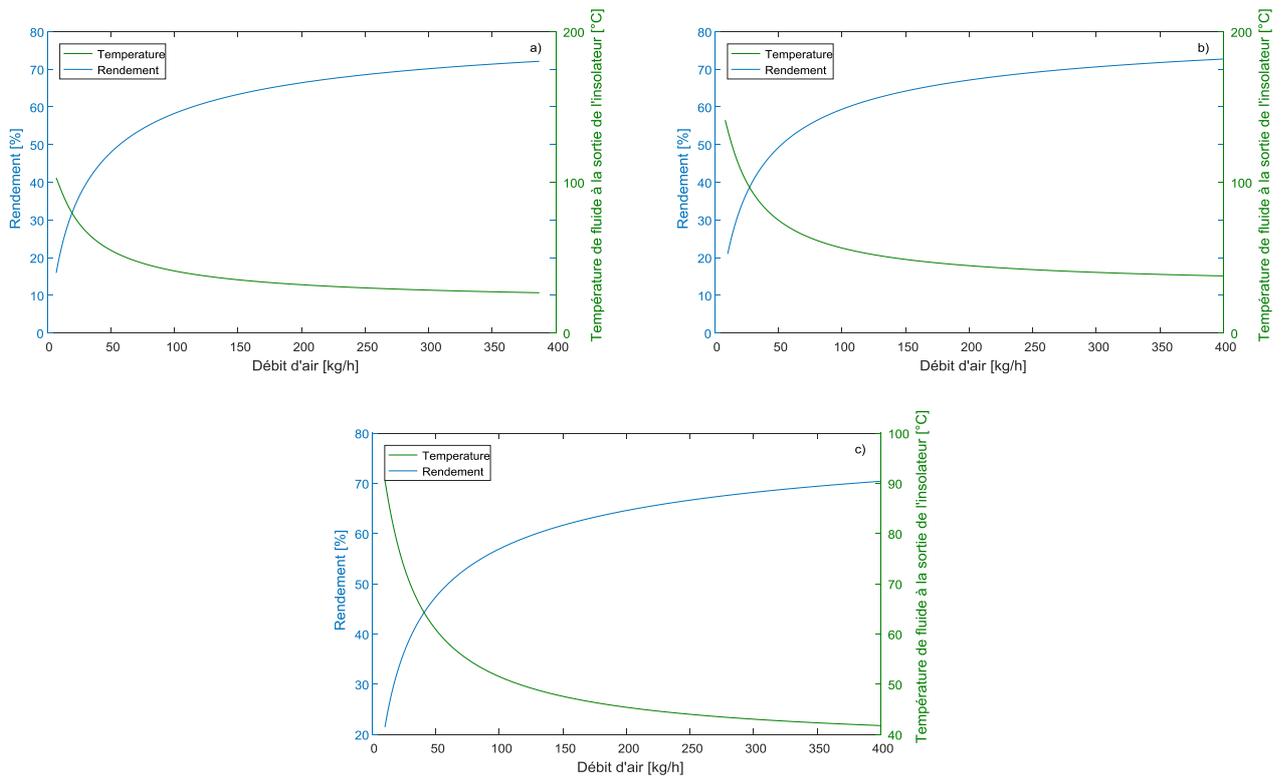


Figure II.3-5. Évolution du rendement et de la température de sortie, à midi solaire: a) le 11/06/2008, journée à ciel clair, b) le 14/01/2008, journée à ciel partiellement nuageux et c) le 17/05/2008, journée avec nombreux passages de nuageux.

La sélection de la température de séchage est critique, car elle a des conséquences graves sur la qualité finale des produits séchés. Le choix d'une basse température engendre la croissance de microorganismes, ce qui altère la qualité du produit séché. D'autre part, opter pour des températures élevées aura également des effets importants sur la qualité du produit fini (détérioration du produit) [Naz, 2012]. Selon des travaux publiés [Abdullahi, 2013 ; Papade et al., 2014 ; Gupta et al., 2017 ], la température de séchage la plus appropriée se situe entre 35 et 65°C. De ce fait, nous avons choisie une température de séchage de l'ordre de 50 °C. Cependant, en raison des fluctuations engendrées par des conditions météorologiques nous avons maintenu une température optimale de  $50 \pm 1$  °C.

En plus de la sélection de la température de séchage appropriée, la détermination de la fonction qui décrit la variation du débit d'air en fonction du temps est essentielle. A partir des résultats ci-dessus, une base de données du débit d'air en fonction du temps et de la température d'air à la sortie de l'insolateur est établie. Ainsi, le débit d'air en fonction du temps est élaboré pour maintenir la température d'air à la sortie de l'insolateur égale à la valeur prescrite tout au long du processus de séchage ( $50 \pm 1$  °C). Ces résultats permettent d'optimiser le bon fonctionnement du collecteur d'air solaire pendant les jours bien éclairés en régulant le débit d'air afin de maintenir la température optimale de séchage ( $50 \pm 1$  °C) sur toute la journée même en cas de fluctuation indésirable des conditions météorologiques.

Figure II.3-6, Figure II.3-7 et Figure II.3-8 montrent les variations du débit d'air nécessaire pour obtenir une température optimale constante. Nous avons utilisé la fonction spline de lissage sous l'environnement Matlab pour estimer toutes les splines de lissage. Sur la base des données d'entrée obtenues par simulation, l'algorithme qui calcule le paramètre de lissage optimal P tel que la somme des carrés de l'erreur résiduelle soit inférieure à une valeur de tolérance  $\epsilon > 0$ . Dans tous les cas, nous avons utilisé la valeur par défaut de  $k = 2$  et  $\epsilon = 0,0001$ . Une analyse statistique appliquée aux fonctions proposées pour simuler les valeurs instantanées du débit d'air nécessaire pour atteindre la température désirée est présentée dans le Tableau II.1-1. En général, toutes les fonctions se sont bien adaptées aux données.

Les valeurs instantanées du débit d'air nécessaires pour atteindre une température optimale sont ajustées par un nombre suffisant de polynômes cubiques par morceaux qui se rapproche le plus des données du graphique. En fait, les splines sont des fonctions polynomiales par morceaux qui se mélangent facilement et peuvent être stockées efficacement (comme des tableaux de coefficients) et manipulées sur des ordinateurs. Les résultats pourraient également être bénéfiques pour le concepteur de système de contrôle. Ils peuvent être utilisés comme base pour le contrôle en boucle ouverte de l'insolateur dans lequel la température d'air à la sortie est maintenue constante quelle que soit la fluctuation des conditions météorologiques.

Comme le montre la Figure II.3-6 a) dans laquelle le débit d'air est représenté en fonction du temps, le débit augmente avec le temps jusqu'à une valeur maximale qui correspond à la plus grande valeur d'irradiance et diminue ensuite lorsque la valeur d'éclairement diminue. C'est un scénario typique de conditions de ciel dégagé. En cas de ciel partiellement nuageux, on peut voir sur la Figure II.3-7 a) une fluctuation nette du débit correspondant à des valeurs d'éclairement

faibles résultant du passage occasionnel de nuages. Les fluctuations du débit sont plus prononcées en cas de journée nuageuse comme le montre la Figure II.3-8 a). C'est un scénario courant de journée nuageuse typique dans laquelle la fréquence de passage des nuages est élevée.

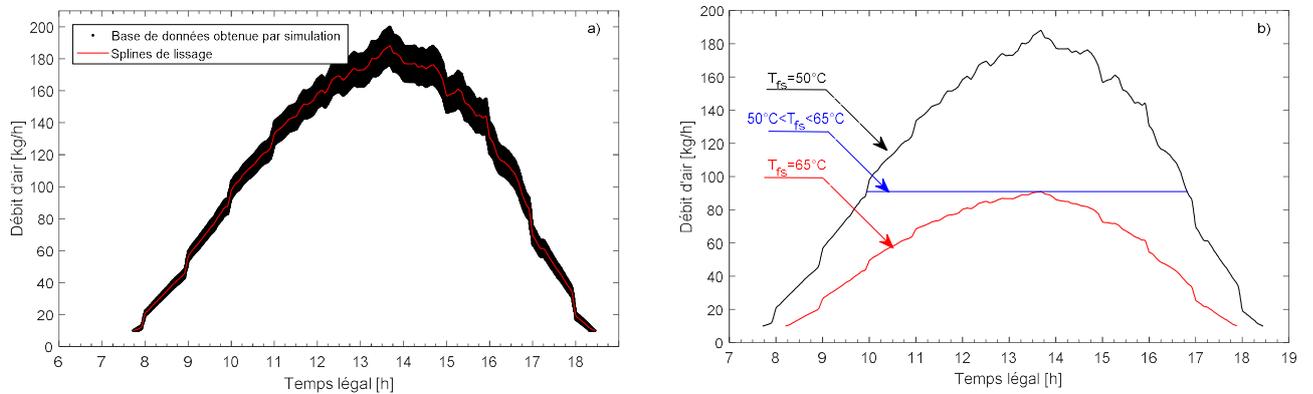


Figure II.3-6. Variation du débit d'air nécessaire pour atteindre la température souhaitée: le 11/06/2008, journée à ciel clair.

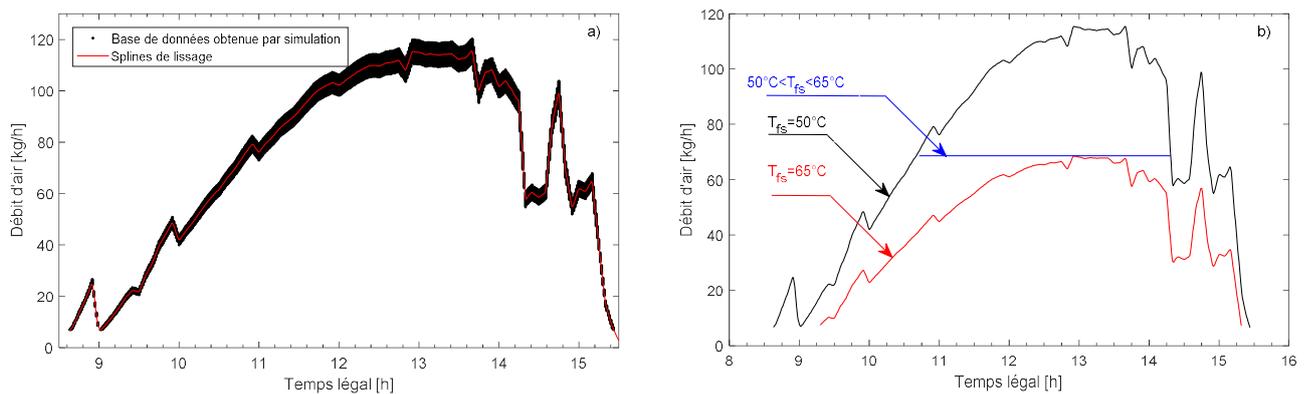


Figure II.3-7. Variation du débit d'air nécessaire pour atteindre la température souhaitée: le 14/01/2008, journée à ciel partiellement nuageux.

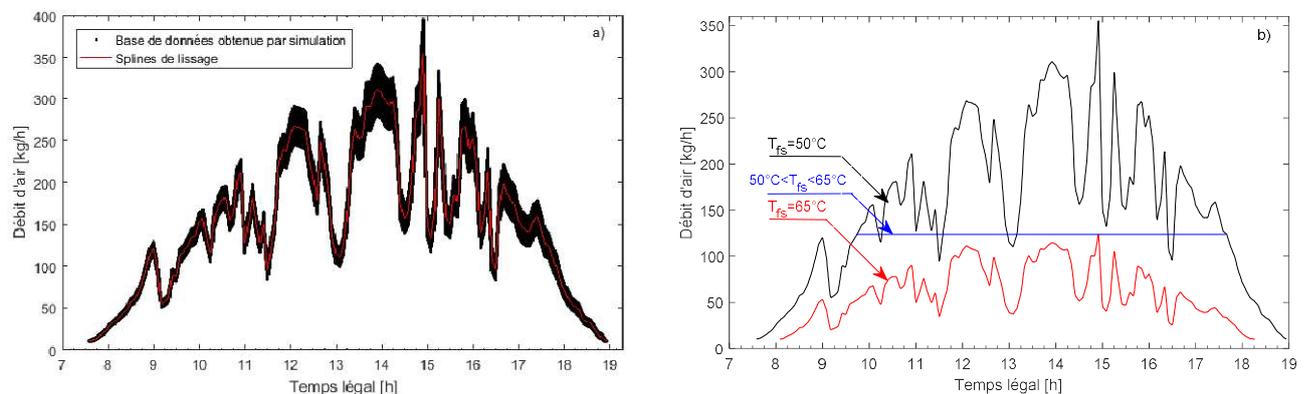


Figure II.3-8. Variation du débit d'air nécessaire pour atteindre la température souhaitée: le 17/05/2008, journée avec nombreux passages de nuages

Figure II.3-6 b) montre la variation du débit en fonction du temps pour que la température d'air à la sortie de l'insolateur maintenue constante à  $50 \pm 1$  et à  $65 \pm 1$  °C. On peut déduire de cette figure que le débit d'air maximal est égal à 188,1 kg / h dans le premier cas, soit  $50 \pm 1$  °C alors que dans le cas de  $65 \pm 1$  °C, le maximum est de 90,92 kg/h. Par ailleurs, pour maintenir la température à un seuil inférieur à  $65 \pm 1$  °C est supérieur à  $50 \pm 1$  °C sans pour autant fixer cette dernière, le débit d'air maximum atteint ne doit pas être inférieur à 90,92 kg/h.

Pour l'application du séchage solaire à une température située entre  $50 \pm 1$  et  $65 \pm 1$  °C, le débit doit être compris entre 188,1 et 90,92 kg / h. Sur la Figure II.3-6 b), il est également représenté le débit constant qui permet un temps de séchage élevé sans compromettre la qualité du produit. En séchant avec un débit variable à une température égale à  $50 \pm 1$  °C, on peut poursuivre le processus de séchage de 07h43 à 18h: 27, c'est-à-dire 10 heures et 44 minutes avec une aspiration de 1207,8 kg d'air. En revanche, pour un séchage à débit constant le temps réservé pour le processus de séchage est réduit à 6 heures et 53 minutes avec une faible aspiration d'air de l'ordre de 625,5 kg d'air. Ainsi, le fonctionnement de l'insolateur à débit variable permet un gain du taux d'air aspiré de l'ordre de 93%.

Figure II.3-7 b) montre la variation du débit en fonction du temps pour que la température d'air à la sortie de l'insolateur maintenue constante à  $50 \pm 1$  et à  $65 \pm 1$  °C. On peut déduire de cette figure que le débit d'air maximal est égal à 115,3 kg / h dans le premier cas, soit  $50 \pm 1$  °C alors que dans le cas de  $65 \pm 1$  °C, le maximum est de 68,58 kg/h. Pour l'application du séchage solaire à une température située entre  $50 \pm 1$  et  $65 \pm 1$  °C, le débit doit être compris entre 115,3 et 68,58 kg / h. Sur la Figure II.3-7 b), il est également représenté le débit qui permet un temps de séchage élevé sans compromettre la qualité du produit. En séchant avec un débit variable à une température égale à  $50 \pm 1$  °C, on peut poursuivre le processus de séchage de 08h: 38 à 15h: 26, c'est-à-dire 6 heures et 49 minutes avec une aspiration de 502,3 kg d'air. En revanche, en séchant à débit constant, le temps réservé pour le processus de séchage est réduit à 3 heures et 35 minutes avec une aspiration de 246,2 kg d'air. Ainsi, le fonctionnement de l'insolateur à débit variable permet un gain du taux d'air aspiré de l'ordre de 104%.

On peut déduire de la Figure II.3-8 b) que la variation du débit en fonction du temps est tracée pour  $50 \pm 1$  et  $65 \pm 1$  °C que le débit maximal est égal à 355,1 kg / h dans le premier cas, soit  $50 \pm 1$  °C alors que dans le cas de  $65 \pm 1$  °C, le maximum est de 123,7 kg / h. Pour le séchage solaire à une température comprise entre  $50 \pm 1$  et  $65 \pm 1$  °C, le débit doit être compris entre 350 et 120 kg / h. Sur la Figure II.3-8 b), il est également représenté le débit qui permet un temps de séchage élevé sans nuire à la qualité des produits. En séchant avec un débit variable à une température égale à  $50 \pm 1$  °C, on peut poursuivre le séchage de 07h: 35 à 18h: 56, c'est-à-dire 11 heures et 22 minutes avec une aspiration de 1748,2 kg d'air. En revanche, en séchant à débit constant, le temps réservé pour le processus de séchage est réduit à 7 heures et 56 minutes avec une aspiration de 981,03 kg d'air. Ainsi, le fonctionnement de l'insolateur à débit variable permet un gain du taux d'air aspiré de l'ordre de 78%.

En effet, le code de calcul élaboré permet d'optimiser le fonctionnement de l'insolateur dans des conditions météorologiques variables sur toute l'année. La variation du débit d'air n'a pas besoin

d'être rapide suite à une fluctuation soudaine des conditions météorologiques car la température de sortie ne suit pas cette fluctuation.

*Tableau II.3-1. Tests statistiques de la spline de lissage utilisée pour ajuster les courbes de débit massique d'air afin d'atteindre la température désirée à différents types de ciel.*

Tests statistiques	Température souhaitée [°C]					
	Ciel dégagé 11/06/2008		Ciel partiellement nuageux 14/01/2008		Ciel nuageux 15/07/2008	
	50 ± 1	65 ± 1	50 ± 1	65 ± 1	50 ± 1	65 ± 1
R <sup>2</sup>	0.9856	0.9945	0.9943	0.9957	0.972	0.9937
RMSE	5.327	1.617	2.164	1.000	12.3029	2.202
SSE	1.306e+06	3.507e+04	5.851e+04	5160	1.554e+07	8.922e+04

#### II.3.4. CONCLUSION

Les opérations de séchage solaire à des valeurs d'éclairement élevées engendrent une augmentation de la température de séchage, ce qui nuit à la qualité du produit séché, y compris la valeur nutritive. Pour surmonter cet inconvénient, une fonction reliant le débit d'air, la température optimale de séchage, la température ambiante et l'irradiation solaire incidente a été élaborée. Ceci est réalisé en effectuant un travail de simulation en faisant varier le débit en fonction du temps et en enregistrant les températures à la sortie de l'insolateur correspondantes dans différents scénarios d'irradiance solaire courants du site. Ensuite, le tracé des contours d'isothermes en fonction du temps et du débit est réalisé. A partir de ce tracé, on déduit la fonction souhaitée de la variation du débit avec le temps pour avoir une température à la sortie de l'insolateur constante. Le travail de simulation a été effectué sous des ressources météorologiques qui imitent celles du site où le processus de séchage doit être effectué. Pour être plus clair, le code de calcul que nous avons développé concernant l'étude de la source de chaleur produite par l'insolateur muni d'ailettes OSF (Offset Strip Fins), nous a permis d'étudier les performances thermiques instantanées de l'insolateur et l'influence des paramètres aérothermique de l'air sur la température de séchage à la sortie de l'insolateur d'une façon détaillée.

Le fait que ces paramètres dépendent des variables non déterminées à leur tour, nous a obligés de concevoir un algorithme de calcul sous forme itérative. Le rayonnement solaire incident sur l'insolateur subit de nombreuses fluctuations dues aux passages nuageux ainsi qu'aux fluctuations de la température ambiante, alors que le pic de la température à la sortie de l'insolateur dépend du débit d'air. Le résultat global de la simulation a été satisfaisant car le débit d'air instantané a été contrôlé pour maintenir la température de séchage constante pendant la période de séchage. Ce

faisant, la qualité et la valeur nutritive des produits séchés sont maintenues à un niveau standard acceptable.

On a également constaté que le séchage à débit variable à une température optimale égale à  $50 \pm 1$  °C, la quantité d'air aspiré à l'entrée était de 1207,8 kg. En revanche, un séchage à débit constant d'un total de 625,5 kg d'air a été souhaité et il peut en résulter une fluctuation de la température de séchage qui affecte la qualité du produit séché. Ainsi, le débit variable permet un taux de gain de l'air aspiré de 93% et une meilleure qualité du produit. Ceci est valable pour une journée à ciel clair. En cas d'une journée à ciel partiellement nuageux, le taux de gain était respectivement de 104% et 78%.

Les résultats obtenus dans le présent chapitre pourraient également être bénéfiques pour le concepteur de contrôle de système. Ils peuvent être utilisés comme base pour le contrôle en boucle ouverte de l'insolateur dans lesquels la température d'air à la sortie est maintenue constante quelle que soit la fluctuation des conditions météorologiques. Donc, on peut considérer le procédé de séchage solaire comme un sécheur à air chaud (AFD), où nous allons le comparer avec les autres procédés de séchage présentés dans les chapitres suivants, en matière de qualité des produits finis.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abdullahi, Y., Momoh, M., Garba, M.M., Musa, M. (2013). Design and construction of an adjustable and collapsible natural convection solar food dryer. *Int J. Comput Eng Res* 3(1).
- Abene, A., Dubois, V., Le Ray, M., Ouagued, A. (2004). Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles and application for the drying of grape. *Journal of Food Engineering* 65: 15–22.
- Agbossou, K., Tetang, F.A., Boroze, T.E., N'wutchi, K., Napo, K., Zeghmati, B. (2016). Theoretical and Experimental Study of Thermal Performance of Flat Plate Air Heating Collector. *Int. J. Sci. Technol* 5: 473.
- Alvarez, G., Arce, J., Lira, L. Heras, M.R. (2004). Thermal performance of an air solar collector with an absorber plate made of recyclable aluminum cans. *Solar Energy* 77: 107–113.
- Azzi, A. (2008). Cours "Energie Solaire". Université Abou-bekr Belkaid-Tlemcen Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département de Génie Mécanique.
- Choudhury, C. (1988). Solar air heater for low temperature applications. *Solar Energy* 40: 335–344.
- De Boor, C.A (1978). practical guide to splines, in: F. John et al, ed., Springer-Verlag, New York.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., Solar engineering of thermal processes. John Wiley and Sons, New York, 1980.
- El Khadraoui, A., Bouadila, S., Kooli, S., Guizani, A., Farhat, A. (2016). Solar air heater with phase change material: An energy analysis and a comparative study. *Appl Therm Eng* 107: 1057.
- El-Sawi, A.M., A.S. Wifi, M.Y. Younan, E.A. Elsayed and B.B. Basily (2010). Application of folded sheet metal in flat bed solar air collectors. *Applied Thermal Engineering* 30: 864–871.
- Fox, J., Nonparametric Simple Regression: Smoothing Scatterplots. Newbury Park, CA: Sage, Thousand Oaks, 2000.

- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M.H., Othman, M.Y. (2013). Performance and cost benefits analysis of double-pass solar collector with and without fins. *Energy Convers Manage* 76 8.
- Gao, W., Lin, W., Liu, T., Xia, C. (2007). Analytical and experimental studies on the thermal performances of cross-corrugated and flat-plate solar air collectors. *Appl. Energy* 84: 425–441.
- Giovanni, T. (2011). Performance of solar air heater ducts with different types of ribs on the absorber plate. *Energy* 36: 6651 – 6660.
- Gupta, P.M., Das, A.S., Barai, R.C., Pusadkar, S.C., Pawar, V.G. (2017). Design and Construction of Solar Dryer for Drying Agricultural Products. *Int Res. J. Eng. Technol* 4: 1946.
- Harrouni, S. Fractal classification of typical meteorological days from global solar irradiance: Application to five sites of different climates. In: Badescu, V. (ed.) *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*, pp. 29-54. Springer, Berlin (2008)
- Hollands, K.G.T. (1963). Direction selectivity; emittance and absorption properties of three corrugated specular surfaces. *Solar Energy* 7 108–116.
- Icier, F. (2010). Ohmic blanching effects on drying of vegetable byproduct. *J Food Process Eng* 33, 661.
- Karim, M.A., Hawlader, M.N.A. (2006). Performance evaluation of a v-groove solar air collector for drying applications. *Applied Thermal Engineering* 26: 121–130.
- Kaya, A., Aydina, O., Kolaylı, S. (2010). Effect of different drying conditions on the vitamin C (ascorbic acid) content of Hayward kiwifruits (*Actinidia deliciosa* Planch). *Food Bioprod Process* 88: 165.
- Korus, A. (2011). Effect of preliminary processing, method of drying and storage temperature on the level of antioxidants in kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) leaves. *LWT – Food Sci Technol* 44: 1711.
- Lim, Y.Y., Lim, T.T., Tee, J.J. (2007). Antioxidant properties of several tropical fruits: A comparative study. *Food Chem* 103: 1003.
- Moumami, N., Youcef-Ali, S., Moumami, A., Desmons, J.Y. (2004). Energy analysis of a solar air collector with rows of fins. *Renewable Energy* 29: 2053–2064.
- Naz, R. (2012). Physical properties, sensory attributes and consumer preference of fruit leather. *Pak J Food Sci* 22: 188.
- Oliveira, M.S., Ramos, I.N., Brandão, T.R.S., Silva, C.L.M. (2015). Effect of Air-Drying Temperature on the Quality and Bioactive Characteristics of Dried Galega Kale (*Brassica oleracea* L. var. *Acephala*). *J Food Process Preserv* 39: 2485.
- Omolola, A.O., Jideani, A.I., Kapila, P.F. (2017). Quality properties of fruits as affected by drying operation. *Crit Rev Food Sci Nutr* 57: 95.
- Padovan, A., Col, D.D. (2010). Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes. *Solar Energy* 84: 2068–2084.
- Papade, C.V., Boda, M.A. (2014). Design and development of indirect type solar dryer with energy storing material. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering* 1: 109.

- Pendre, N.K., Nema, P.K., Sharma, H.P., Rathore, S.S., Kushwah, S.S. (2012). Effect of drying temperature and slice size on quality of dried okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). *J Food Sci Technol* 49: 378.
- Shahrarayand, B., Anderson, D.J. (1989). "Optimal estimation of contour properties by cross-validated regularization," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 11(6): 600–610.
- Singh, S.N. (2006). Performance studies on continuous longitudinal fins solar air heater. *Advances in Energy Research* 205-210.
- Sopian, K., Alghoul, M.A., Ebrahim, Alfegi, M., Sulaiman, M.Y., Mus, E.A. (2009). Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous–nonporous media. *Renew Energy* 34: 640.
- Vega-Galvez, A., Scala, K.D., Rodriguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J., Perez-Won, M. (2009). Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum*, L. var. Hungarian). *Food Chem* 117, 647–653.
- Yeh, H.M., Lin, T.T. (1996). Efficiency improvement of flat-plate solar air heaters. *Energy* 21: 435–443.
- Youcef-Ali, S., Desmons, J.Y. (2007). Influence of the aerothermic parameters and the product quantity on the production capacity of an indirect solar dryer. *Renew Energy* 32: 496.

**PARTIE III. MODELISATION EMPIRIQUE ET  
PHENOMENOLOGIQUE, CARACTÉRISATIONS DIVERSES  
ET INFLUENCE SUR LA QUALITÉ DU PRODUIT FINI**

## **CHAPITRE III.1.**

### **MODELISATION MATHEMATIQUE EMPIRIQUE DE LA CINETIQUE DE SECHAGE EN COUCHE MINCE DE LA CITROUILLE**

#### **III.1.1. INTRODUCTION**

La citrouille est l'une des plantes fréquemment utilisées comme aliment végétal et/ou fonctionnel, ainsi en tant que médicament aux États-Unis et en Europe [Ang-Lee et al., 2001], en Chine, en Yougoslavie, en Argentine, en Inde, au Mexique, au Brésil et en Amérique du sud [Popovic, 1971 ; Jia et al., 2003 ; Adolfo et al., 2005 ; Caili et al., 2006]. Dans ces cas, le processus de séchage est particulièrement important pour la conservation et la transformation du produit. Le séchage réduit la taille et la masse du produit alimentaire et agricole tout en aidant à en prolonger la durée de conservation en réduisant sa teneur en eau. Ainsi, étant donné que le stockage et le transport de ces produits ne nécessitent aucun refroidissement, les coûts connexes diminuent largement [Kocabiyik, 2010]. Cependant, les principaux désavantages du séchage industriel sont i/ un coût d'énergie élevé, aux deux niveaux thermique et électrique [Dincer, 2000 ; Dincer, 2001 ; Dincer, 2004 ; Carsky, 2008 ; Shi et al., 2008], ii/ des risques sanitaires et hygiéniques ; en effet, des sources de contamination microbiologique et la présence de larves d'insectes, etc. risquent de réduire considérablement la durée de préservation réelle du produit séché, et iii/ la possibilité de perte des contenus nutritionnels. Le séchage conventionnel du flux d'air est l'opération de déshydratation la plus utilisée dans l'industrie alimentaire et chimique [Nicoletti et al., 2001 ; Singh et al., 2008]. Cependant, cette opération nécessite un parfait contrôle des conditions opératoires [Lertworasirikul et al., 2008], une identification de sa dépendance vis-à-vis de la composition, de la forme et des tailles des matériaux. Ainsi, il est très important de définir les paramètres de séchage optimum afin de préserver et de contrôler les caractéristiques de la commodité des produits pour leur stockage et leur réutilisation [Velić et al., 2004].

La Modélisation et l'identification du comportement du produit lors du séchage sont très importantes pour la meilleure définition des systèmes considérés, l'optimisation des conditions de traitement, la bonne mise à l'échelle industrielle et la définition de la viabilité commerciale [Corrêa et al., 2007]. Plusieurs méthodes ont été proposées pour analyser et simuler le processus de séchage de divers produits hygroscopiques. Les modèles proposés peuvent être placés sous deux catégories principales (a) ceux basés sur la physique fondamentale des processus de séchage, et (b) ceux de type empirique. La première catégorie repose principalement sur les lois fondamentales de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Ces modèles phénoménologiques couplant les équations de transport aux flux thermodynamiquement interactifs et aux expressions d'équilibre de phase [Bakalis et al., 2015] nécessitent de discerner les éléments de transport des caractéristiques spécifiques du produit telles que l'activité de l'eau, la transition vitreuse, la diffusivité de l'eau liquide, la conductivité thermique dynamique, la densité, les chaleurs sensibles et latentes et les coefficients de transfert de masse, ainsi que leur évolution par rapport à la teneur en eau, à la modification de la structure (retrait) et à la température. Parfois, au lieu de ces caractéristiques, les chercheurs utilisent des constantes de séchage spécifiques. Cela devrait être

considéré comme des paramètres groupés des propriétés physiques réelles [Saeed et al., 2008]. Alors que la deuxième catégorie des modèles mathématiques de la cinétique de séchage des produits agricoles nécessite souvent des méthodes statistiques destinées à quantifier et tester les corrélations entre les diverses variables quantitatives [Waewsak et al., 2006 ; Saeed et al., 2008]. En outre, la plupart des problèmes de recherche ont consisté au séchage en couche mince [Sarsavadia et al., 1999], en raison de la nature non isotrope et non homogène de ces produits, ainsi que de leur forme irrégulière et leurs changements structurels pendant le séchage. Les données expérimentales du taux de séchage et/ou de la teneur en eau par rapport au temps obtenues à partir d'un séchage en couche mince sont utilisées pour déterminer les paramètres d'équation permettant aux modèles empiriques d'étendre l'application vers des domaines plus larges et aboutir à des résultats très satisfaisants par comparaison aux simples résultats expérimentaux primaires. Ces paramètres dépendent évidemment de la nature du produit, des conditions de processus (température, pression, vitesse, et humidité relative du débit d'air etc.). Ils pourraient éventuellement prédire les processus de transfert de chaleur et de teneur en eau. Dans le cas de modèles semi-théoriques et empiriques, la priorité est intégralement allouée à l'évaluation de la résistance externe du transfert de l'eau du produit vers l'air extérieur. Selon [Kucuk et al., 2014], le nombre de constantes pour les modèles publiés dans la littérature varie entre un et six. [Kucuk et al., 2014 ; Dincer et al., 2016] ont revu et comparé le grand nombre (67) des modèles de courbes de séchage. Ils ont noté que la sélection de modèles adéquats [Dincer et al., 2016] dépendait amplement des conditions de traitement et des caractéristiques du produit. Ainsi, bien qu'ils nécessitent plusieurs tests expérimentaux, ils ne peuvent pas être extrapolés facilement [Maire et al., 2004 ; Correa et al., 2011]. Des résultats satisfaisants sont ainsi obtenus en mettant en œuvre ces modèles dans différentes applications d'ingénierie [Peleg, 1988 ; Midilli et al., 2002].

Il est bien connu que le contrôle du processus de séchage est un point clé pour obtenir la qualité nécessaire et suffisante répondant au besoin, dans des limites acceptables de coût. En effet, le sur-séchage conduit à une certaine dégradation de la matière sèche et entraîne une augmentation du coût d'énergie [Arinze et al., 1996], tandis que le séchage rapide empêche les processus chimiques démarrés comme la fermentation [Ndukwu, 2009]. Par conséquent, une opération de séchage bien contrôlée avec une bonne prédiction du temps de séchage est très importante pour éviter de telles faiblesses. La connaissance de l'évolution de la teneur en eau et des constantes de séchage par rapport aux conditions opératoires, à l'épaisseur de la tranche et au temps est essentielle pour beaucoup de scientifiques et d'ingénieurs qui participent au contrôle des performances du processus de séchage, à la définition de la qualité finale du produit et à la conception fiable et sûre des sècheurs. Par conséquent, les chercheurs limitant leur activité à une simple identification d'un modèle empirique dans des conditions de séchage spécifiques ne pourraient pas tenter de prédire ou de développer l'ingénierie des procédés. Par conséquent, les modèles empiriques ne peuvent pas être intéressants sans établir les relations entre leurs propres paramètres et les conditions de séchage combinant variables extrinsèques et intrinsèques. Ainsi, le travail que nous décrivons dans ce chapitre propose une approche plus complète en utilisant les données expérimentales du séchage à flux d'air chaud et des tranches de citrouille afin de (i) déterminer les constantes de différents modèles empiriques (ii) étudier les effets des conditions de séchage et de l'épaisseur des

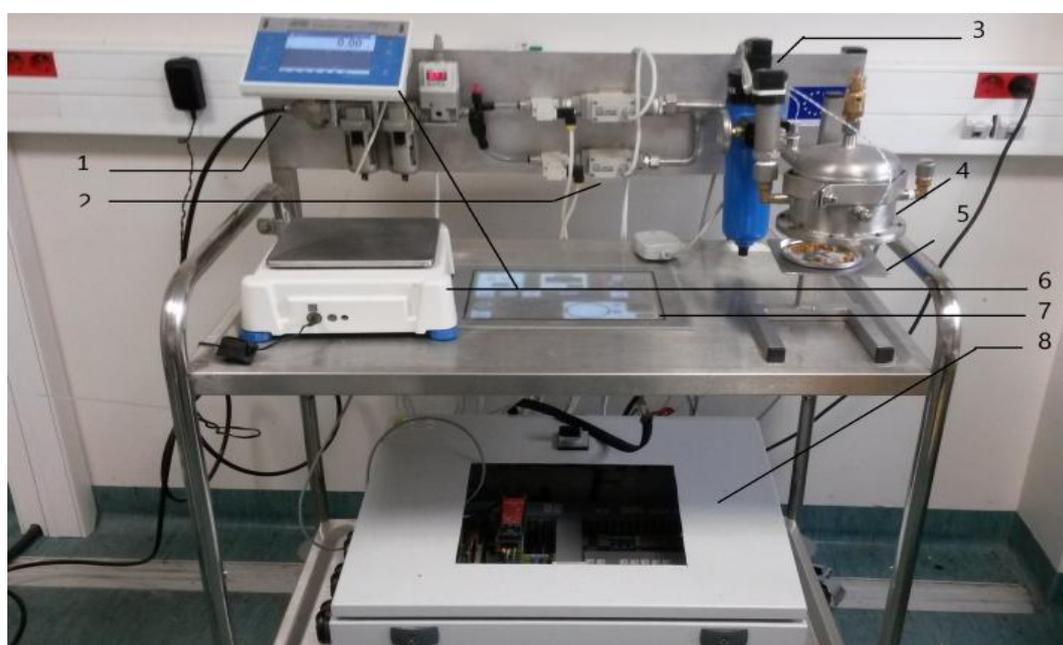
tranches sur les constantes du modèle sélectionné en utilisant plusieurs combinaisons des différentes équations comme types exponentiels et polynomiaux, (iii) étendre la pertinence du modèle sur de plus grandes gammes de température et de vitesse du flux d'air et d'épaisseur de tranche.

### III.1.2. MATERIELS ET METHODES

#### III.1.2.1. Préparation des échantillons

L'approvisionnement de produit à séché (citrouille) s'est effectué du marché local de la Rochelle. Au laboratoire, les citrouilles sont conservées dans un réfrigérateur à 4°C avant de lancer les expériences. Avant toute expérience, les morceaux des citrouilles sont découpés en cube selon le plan d'expériences en utilisant un appareil d'aide culinaire. La durée de préparation des échantillons ne dépasse pas 15 min. Le taux d'humidité initiale des produits est en moyenne de 87% (base humide). Ce taux d'humidité des échantillons de la citrouille est mesuré à chaque essai grâce à un dessiccateur halogène MB45, permettant d'avoir une mesure approximative de la matière sèche (par rapport à l'essai en cours), puis à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures [AOAC, 1990].

#### III.1.2.2. Dispositif expérimental de séchage à l'air chaud



*Figure III.1-1. Pilote de séchage (1. Entrée d'air, 2. Vanne de débit, 3. Chauffage, 4. Distributeur d'air, 5. Plateau de séchage, 6. Balance, 7. Interface homme-machine et 8. Boîtier d'automate programmable)*

Les essais de séchage sont réalisés à l'aide d'un séchoir pilote expérimental de séchage par entraînement (Figure III.1-1). Le séchoir pilote a été réalisée au Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement : LaSIE UMR - 7356 CNRS - Université de La Rochelle par l'équipe de Professeur ALLAF. Ce séchoir permet d'assurer un séchage de longue durée dont les conditions sont bien déterminées et parfaitement maîtrisées en température ( $20 < T < 80^{\circ}\text{C}$ ) et vitesse ( $0 < V < 20$

m/s) de l'air. Le séchoir fonctionne en boucle ouverte et est commandé par un automate programmable. La température et la vitesse de l'air sont des paramètres réglables. L'air traverse perpendiculairement, de haut en bas, les morceaux de la citrouille déposés sur une coupelle (diamètre = 10 cm). Pour maîtriser la variation des propriétés de l'air au contact du produit, toutes les expériences de séchage ont été effectuées sur une monocouche de morceaux de la citrouille. Le suivi de la masse est réalisé grâce à une balance de 0,001 g de précision.

### III.1.2.3. Modélisation mathématique de la cinétique de séchage en couche mince

Afin de transférer avec succès les résultats issus des études expérimentales vers une exploitation à l'échelle industrielle, une première modélisation mathématique du séchage en couche mince est cruciale pour la gestion, la prévision et l'optimisation des performances dans les gammes étudiées des paramètres opérationnels [Kocabiyik, 2010]. Parmi les modèles empiriques et semi-empiriques qui ont été appliqués pour décrire le comportement des produits alimentaires et biologiques au cours du séchage, on peut facilement identifier le modèle permettant le meilleur ajustement des résultats expérimentaux. Certaines combinaisons entre les constantes du modèle empirique et les paramètres physiques tels que le transfert de masse dans le séchage en couches minces peuvent être révélées, en vue d'une application plus facile et une utilisation plus pertinente de ces simulations de séchage.

Dans le présent chapitre, les résultats expérimentaux ont été calculés comme le taux de la teneur en eau ( $MR$ ) Eq (III.1.1) [Hasan et al., 2014] en fonction du temps  $t$  :

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (\text{Eq. III.1-1.})$$

avec  $M_t$ ,  $M_e$  et  $M_0$  sont les valeurs de la teneur en eau (base sèche) respectivement à l'instant  $t$ , à l'infini (équilibre) et à  $t=0$ .

Le modèle le plus approprié sera à identifier parmi sept différents modèles proposés par les auteurs comme indiqué dans le Tableau III.1-1. Des analyses de régression ont été effectuées en utilisant OriginPro 8.0. Le coefficient ( $R^2$ ) était l'un des principaux critères pour sélectionner le meilleur modèle pour définir les courbes de séchage [Balbay et al., 2012]. En plus de ( $R^2$ ), les différents paramètres statistiques tels que le khi-carré réduit ( $\chi^2$ ) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ont été utilisés pour déterminer la qualité de l'ajustement. Ces coefficients peuvent être calculés comme suit [Naderinezhad et al., 2016 ; Ruhanian et al., 2016] :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{exp} - MR_{exp,i})^2} \quad (\text{Eq. III.1-2.})$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{N - n} \quad (\text{Eq. III.1-3.})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pré,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (\text{Eq. III.1-4.})$$

Avec

$$\overline{MR_{exp}} = \frac{\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{N}$$

où  $MR_{exp}$  et  $MR_{pré}$  sont, respectivement, la teneur en eau issue de l'expérience et prédite par le modèle,  $N$  est le nombre d'observations,  $n$  est le nombre de constantes du modèle. L'analyse statistique et de corrélations et les méthodes de régression sont largement utilisées dans la modélisation du comportement au cours du séchage de divers produits agricoles. Les modèles de régression linéaire et non linéaire sont essentiels pour établir une relation entre les variables et sont d'une importance primordiale dans le cas où les auteurs n'ont pas établi de relations empiriques.

Dans ce chapitre, on injecte les constantes et les coefficients du meilleur modèle, avec les conditions de séchage et l'épaisseur de la tranche. Leur influence sur les constantes et les coefficients de l'expression de séchage a également été étudiée en utilisant l'analyse de régression linéaire multiple.

**Tableau III.1-1. Modèles de séchage en couche mince**

N°	Modèles	Équations	Références
01	Newton (Lewis, Exponential, Single exponential) Model	$MR = \exp(-kt)$	[Lewis, 1921]
02	Page Model	$MR = \exp(-kt^n)$	[Xanthopoulos et al., 2007]
03	Modified Page Model	$MR = \exp(-(kt)^n)$	[Midilli et al., 2002]
04	Henderson and Pabis (Single term, Generalized exponential) Model	$MR = a \exp(-kt)$	[Zhang et al., 1991]
05	Logarithmic (Asymptotic, Yagcioglu et al.) Model	$MR = a \exp(-kt) + b$	[Yaldiz et al., 2002]
06	Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[Midilli et al., 2002]
07	Approximation of Diffusion (Diffusion Approach) Model	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	[Yaldiz et al., 2001]

#### III.1.2.4. Modélisation par la méthode des plans d'expériences

Pour étudier l'effet des paramètres opératoires de séchage convectif, nous avons retenu et privilégié trois paramètres opératoires : i/ la température du flux d'air (entre 40 et 80 °C), ii/ sa vitesse (de 2 à 15 m/s) et iii/ l'épaisseur des échantillons (entre 0.25 et 1.4 cm). Après avoir choisi les paramètres opératoires qui sont les plus influents et en raison d'un grand domaine de variation

possible de chaque paramètre, il a été nécessaire de procéder à une méthode d'étude statistique capable de cerner, au moindre coût d'expérimentation, le domaine d'exploitation des paramètres.

Ainsi, au cours de la présente étude, nous avons adopté la méthode de plan composite centré à cinq niveaux ; il s'agit d'un plan composite centré avec trois facteurs, chacun a cinq niveaux différents. Le plan d'expérience réalisé est présenté dans le Tableau III.1-2.

**Tableau III.1-2. Facteurs retenus et domaine d'étude pour le plan composite centré.**

Facteurs	Variables	Niveau					
		Codées	$-\alpha=-1,682$	-1	0	1	$+\alpha=+1.682$
$x_1 = T$	Température du flux d'Air [°C]		40	48,11	60	71,89	80
$x_2 = V$	Vitesse du flux d'Air [m/s]	Réelles	2	4,64	8,50	12,36	15
$x_3 = E$	Épaisseur de l'échantillon [cm]		0.2	0,443	0,8	1,157	1,4

Un plan composite centré se compose de trois parties principales : (i) un plan factoriel complet à deux niveaux (-1) et (+1) ; (ii) des répétitions au point central ; (iii) des points en étoile. Les points en étoiles axiaux sont des points supplémentaires, notés  $-\alpha$  et  $+\alpha$  par facteur. La valeur de  $\alpha$  des points en étoile est liée au nombre de facteurs [Silva et al., 2006] :  $\alpha = \sqrt[4]{2^k}$  où k est le nombre de variables, donc  $\alpha = 1,68$  pour notre étude (3 variables indépendantes).

Le nombre total d'expériences est donné par l'expression suivante :  $n=2^k+2k+n_0$ , k étant le nombre de paramètres et  $n_0$  le nombre de répétitions au centre, soit, pour  $k=3$ , 18 points expérimentaux ( $2^3+4+(2*3)$ ) (Tableau III.1-4, Tableau III.1-5 et Tableau III.1-6).

La relation entre les variables indépendantes (température de l'air  $x_1$ , vitesse de l'air  $x_2$  et épaisseur des échantillons  $x_3$ ) et chacune des réponses Y a été exprimée mathématiquement sous la forme d'un modèle polynomial, Y en fonction de  $X_i$ . Une équation polynomiale de second ordre est présentée sous la forme suivante [Eren et al., 2007] :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i=1}^3 a_i x_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 a_{ij} x_i x_j + \Delta + \varepsilon \quad (\text{Eq. III.1-5.})$$

où Y est la réponse mesurée (teneur en eau) ;  $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  sont les coefficients du polynôme ;  $x_i$  représente un niveau de facteur i ;  $\Delta$  est l'écart et le manque d'ajustement (fit en anglais) ;  $\varepsilon$  est l'erreur aléatoire.

Après l'exécution des essais selon le plan d'expériences, les résultats sont exploités à l'aide du logiciel Statgraphics Centurion XVI version 16.1.15 (Statpoint Technologies Inc., Warrenton, Virginia, USA).

### III.1.2.5. Stratégie de la modélisation empirique

#### i. 1<sup>ère</sup> étape de la modélisation empirique

La première étape de l'analyse de régression consiste à déterminer les modèles adéquats qui décrivent le taux de la teneur en eau en fonction du temps. Fondamentalement, dans cette contribution actuelle, sept modèles ont été étudiés et évalués, ces modèles sont décrits dans le

Tableau III.1-1. Les résultats trouvés ont révélé que les meilleurs modèles qui décrivent le taux d'humidité MR par rapport au temps sont par ordre d'adéquation : Approximation de la diffusion (Approche de diffusion), modèle Midilli-Kucuk et modèle de page. Les équations de régression correspondantes sont présentées dans le Tableau III.1-1 alors que, dans le Tableau III.1-3, on présente les valeurs des constantes du modèle  $a$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $n$  et des paramètres statistiques.

*ii. 2<sup>ème</sup> étape : relation entre les constantes des meilleurs modèles et les conditions de séchage*

Les préoccupations de la 2<sup>ème</sup> étape de notre stratégie de modélisation empirique consistent à ajuster les constantes de modèles  $a$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $n$  selon les conditions de séchage telles que la température ( $T$ ) et la vitesse ( $V$ ) du flux d'air et l'épaisseur de la coupe ( $E$ ) suivant une conception de plans d'expérience, comme décrit dans Tableau III.1-4, Tableau III.1-5 et Tableau III.1-6. À la fin des expériences, les valeurs des constantes du modèle sélectionné ont été prises comme variables dépendantes. Deux types d'équations mathématiques ont été utilisés ; exponentiel (Eq. III.1.9) et polynomial (Eq. III.1.10) pour établir leurs correspondances aux données sur la base de la technique d'optimisation de moindres carrés. Il faudrait pour être plus précis, déterminer les équations des constantes  $a(T, V, E)$ ,  $b(T, V, E)$ ,  $k(T, V, E)$  et  $n(T, V, E)$  pour chaque modèle.

Selon les résultats obtenus, nous pouvons déduire que le paramètre :

$a(T, V, E)$  a un ajustement exponentiel dans le modèle Approximation de Diffusion et un ajustement polynomial dans le modèle Midilli-Kucuk.

$b(T, V, E)$  a un ajustement polynomial dans les modèles Approximation of Diffusion et Midilli-Kucuk.

$k(T, V, E)$  a un ajustement polynomial dans le modèle Approximation of Diffusion. Alors qu'il a un ajustement exponentiel dans les modèles Midilli-Kucuk et Page.

$n(T, V, E)$  a un ajustement exponentiel dans les modèles Midilli-Kucuk et Page.

*iii. Troisième étape de la vérification et de la validation du modèle final*

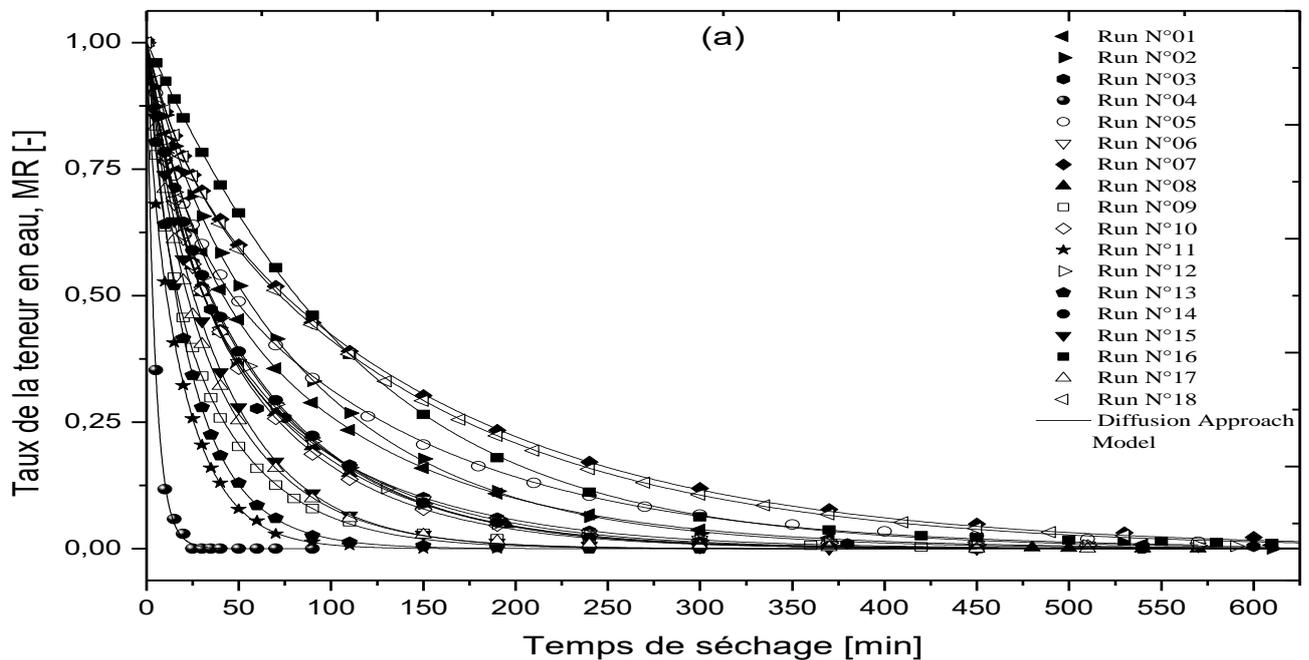
Une confirmation expérimentale supplémentaire a été ensuite menée à cette étape. Il visait à vérifier la validité de la conception expérimentale statistique lorsqu'elle était appliquée à d'autres données expérimentales obtenues à partir d'autres conditions de séchage en dehors de la conception de plans d'expérience.

### III.1.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### III.1.3.1. Évolution de MR en fonction de la température et de la vitesse d'air et de l'épaisseur de la tranche.

##### i. Courbes de séchage

Les données expérimentales en termes de teneur en eau (courbes de séchage) obtenues pour les différentes variables intrinsèques (température, vitesse d'air de séchage) et variables extrinsèques (épaisseur des tranches) ont été converties en une forme plus utile, c'est-à-dire l'expression sans dimension de la teneur en eau (MR). La variation de la teneur en eau avec le temps pour différentes variables intrinsèques et extrinsèques sont présentées à la Figure III.1 2 (a, b et c).



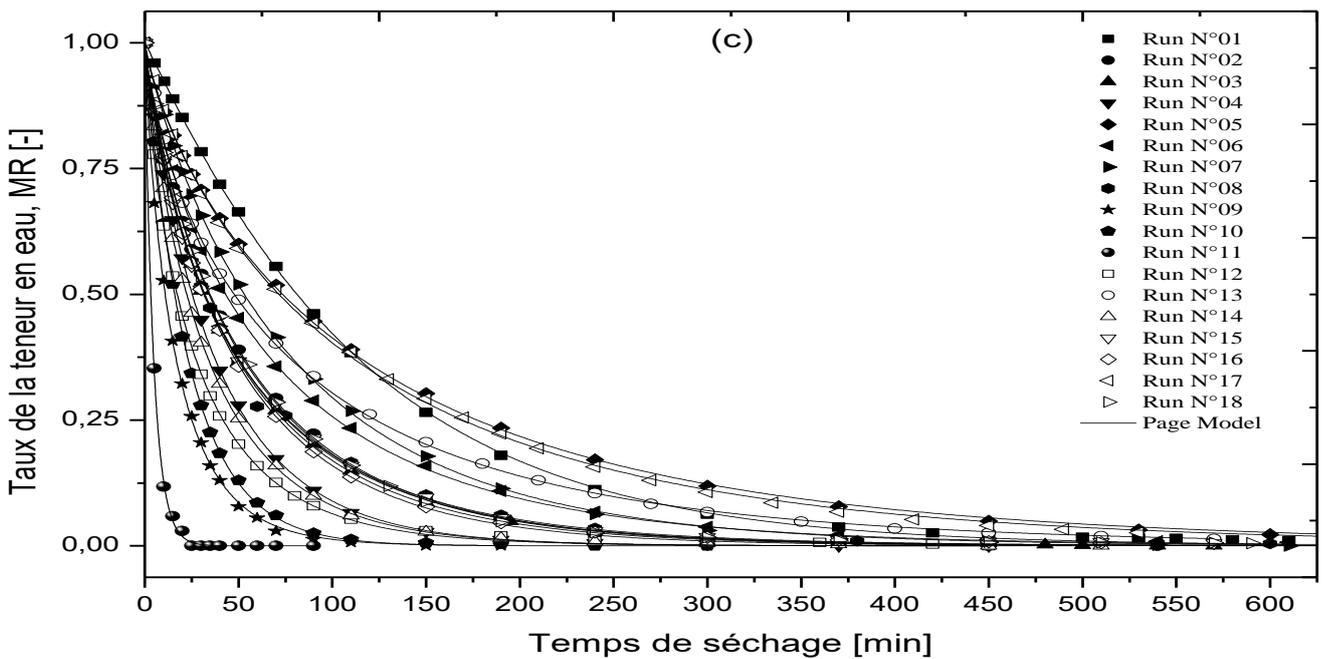
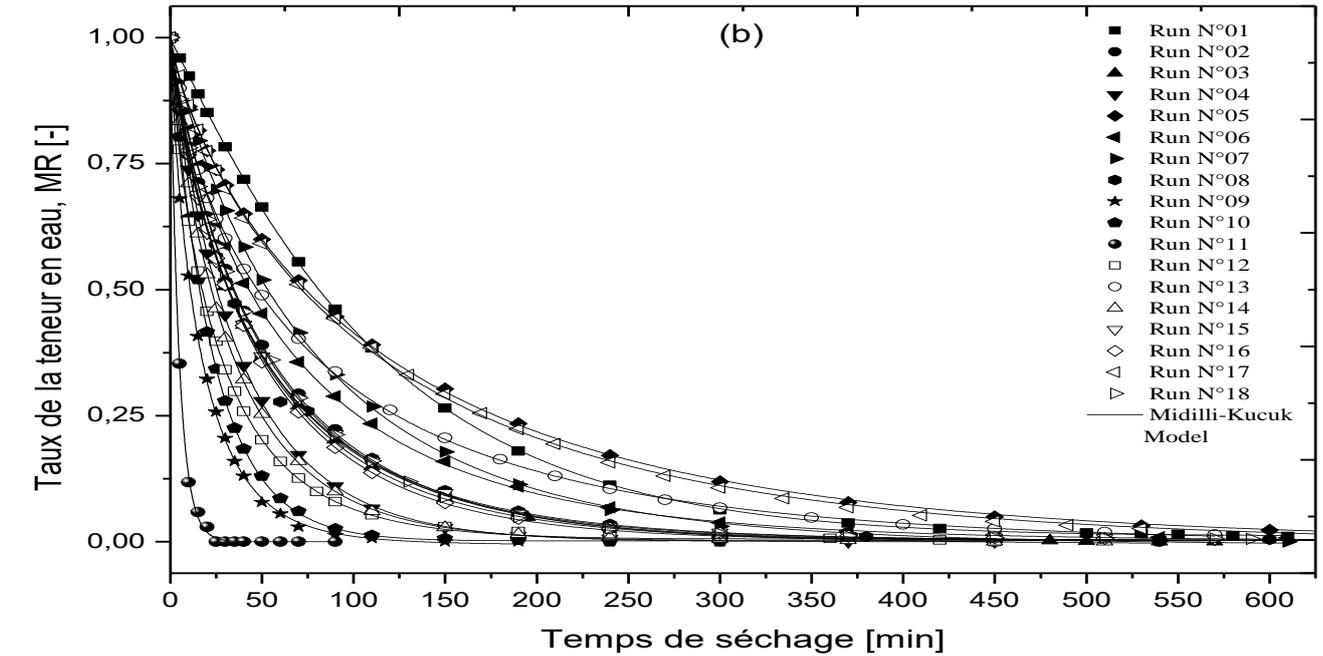


Figure III.1-2. Variation de la teneur en eau réduite versus la durée de séchage

ii. Différents modèles mathématiques empiriques du processus de séchage en couche mince

Afin de déterminer le rapport de teneur en humidité en fonction du temps de séchage, sept modèles de séchage de couche mince différents dans le Tableau III.1-1 ont été ajustés aux données expérimentales. A partir des valeurs de l'analyse statistique présentées dans le Tableau III.1-3, on suppose que le modèle le mieux adapté est celui qui a le coefficient de détermination le plus élevé  $R^2$ , le plus bas réduit le quadrant  $\chi^2$  et l'erreur carrée moyenne RMSE. Ainsi, les chiffres en gras dans ces tableaux montrent les valeurs des modèles les mieux adaptés. Comme on peut le voir dans le Tableau III.1-3, par rapport à d'autres modèles, les modèles Approximation de la diffusion,

Midilli-Kucuk et Page, ont donné le meilleur accord entre le taux d'humidité expérimental et prévu, car ils correspondent le mieux aux données expérimentales en premier.

*Tableau III.1-3. Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince.*

N° d'essais	N° de modèles	Constantes des modèles				R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>
		k	n	a	b			
01	01	0.00862				0.99952	0.00833	6.933E-5
	02	0.00698	1.04613			0.99984	0,00489	2.393E-5
	03	0.00868	1.04524			0.99984	0.00489	2.390E-5
	04	0.00877		1.01077		0.99967	0.00707	5.004E-5
	05	0.0088		1.00985	0.0013	0.99967	0.00721	5.200E-5
	<b>06</b>	<b>0.00631</b>	<b>1.06858</b>	<b>0.99583</b>	<b>1.639E-5</b>	<b>0.99997</b>	<b>0.00204</b>	<b>4.168E-6</b>
	07	0.03275		-0.0690	0.28263	0.99987	0.00447	1.99E-5
02	01	0.01917				0.99293	0.02803	7.854E-4
	02	0.03531	0.83878			0.99988	0.00374	1.399E-5
	03	0.01857	0.83908			0.99988	0.00374	1.398E-5
	04	0.01753		0.94732		0.99644	0.02046	4.188E-4
	05	0.01824		0.93838	0.01379	0.99695	0.01952	3.812E-4
	<b>06</b>	<b>0.03529</b>	<b>0.83795</b>	<b>0.99865</b>	<b>-7.098E-6</b>	<b>0.9999</b>	<b>0.00363</b>	<b>1.321E-5</b>
	07	0.08523		0.18258	0.17214	0.99989	0,00363	1.318E-5
03	01	0.02081				0.99266	0.02812	7.906E-4
	02	0.03995	0.82383			0.99975	0.00529	2.797E-5
	03	0.02006	0.82345			0.99975	0.00529	2.797E-5
	04	0.01908		0.94862		0.99541	0.02279	5.192E-4
	05	0.01992		0.93974	0.01453	0.99621	0.02124	4.510E-4
	06	0.04162	0.81583	1.00751	1.937E-6	0.99979	0.00515	2.655E-5
	<b>07</b>	<b>0.05711</b>		<b>0.31756</b>	<b>0.23902</b>	<b>0.99995</b>	<b>0.00237</b>	<b>5.607E-6</b>
04	01	0.02662				0.99819	0.01435	2.059E-4
	02	0.03672	0.90939			0.99995	0.00253	6.405E-6
	03	0.02642	0.9096			0.99995	0.00253	6.404E-6
	04	0.0256		0.97335		0.999	0,01104	1.218E-4
	05	0.02607		0.96892	0.00661	0.99914	0,01058	1.120E-4
	06	0.03634	0.91164	0.99834	-8.008E-8	0.99995	0,00267	7.112E-6
	<b>07</b>	<b>0.13585</b>		<b>0.09514</b>	<b>0.17344</b>	<b>0.99997</b>	<b>0.00193</b>	<b>3.740E-6</b>
05	01	0.00901				0.98416	0.04239	0.0018
	02	0.02357	0.78701			0.99985	0.00416	1.73E-5
	03	0.00855	0.78724			0.99985	0.00416	1.732E-5
	04	0.0078		0.92745		0.99387	0.02705	7.315E-4
	05	0.00855		0.90622	0.03034	0.99538	0.02413	5.822E-4
	<b>06</b>	<b>0.02305</b>	<b>0.78994</b>	<b>0.99591</b>	<b>-4.554E-6</b>	<b>0.99989</b>	<b>0.00379</b>	<b>1.438E-5</b>
	07	0.05327		0.19568	0.12098	0.99982	0.00475	2.259E-5
06	01	0.01543				0.98849	0.03601	0.0013
	02	0.03416	0.79977			0.9996	0.0069	4.765E-5
	03	0.01466	0.79934			0.9996	0.0069	4.765E-5
	04	0.0138		0.93933		0.99317	0.02846	8.097E-4
	05	0.01488		0.92387	0.02476	0.99487	0.02535	6.425E-4
	06	0.0365	0.78751	1.01117	2.083E-6	0.99968	0.00649	4.209E-5
	<b>07</b>	<b>0.04532</b>		<b>0.331</b>	<b>0.21058</b>	<b>0.99996</b>	<b>0.00236</b>	<b>5.593E-6</b>
07	01	0.01281				0.99699	0.01928	3.716E-4
	02	0.01999	0.89312			0.99988	0.00396	1.570E-5
	03	0.01252	0.89355			0.99988	0.00396	1.569E-5
	04	0.01209		0.96677		0.99856	0.01371	1.880E-4
	05	0.01238		0.96077	0.00863	0.99871	0.01335	1.782E-4
	06	0.02035	0.88826	1.00061	-8.849E-6	0.99991	0.00364	1.326E-5

	07	0.06293		0.11423	0.1728	0.99997	0.00192	3.678E-6
	01	0.02056				0.98865	0.03332	0.00111
08	02	0.04319	0.80121			0.99887	0.01077	1.161E-4
	03	0.01981	0.80055			0.99887	0.01077	1.160E-4
	04	0.01869		0.94066		0.99261	0.02751	7.567E-4
	05	0.01992		0.92712	0.02205	0.99433	0.0247	6.099E-4
	06	0.04522	0.7925	1.00915	3.922E-6	0.99894	0.01094	1.197E-4
	07	<b>0.04774</b>		<b>0.41997</b>	<b>0.24405</b>	<b>0.99918</b>	<b>0.00939</b>	<b>8.814E-5</b>
	01	0.05699				0.99176	0.02604	6.783E-4
09	02	0.09624	0.82759			0.99959	0.00604	5.105E-4
	03	0.05909	0.82772			0.99959	0.00604	3.646E-5
	04	0.05407		0.95344		0.99424	0.02254	5.080E-4
	05	0.05647		0.94566	0.01357	0.995	0.0218	4.751E-4
	06	0.09608	0.82612	0.99674	-2.785E-5	0.99964	0.00605	3.660E-5
	07	<b>0.36251</b>		<b>0.17473</b>	<b>0.12862</b>	<b>0.99992</b>	<b>0.00276</b>	<b>7.628E-6</b>
	01	0.04277				0.99957	0.00627	3.932E-5
10	02	0.04845	0.96134			0.99989	0.00325	1.059E-5
	03	0.0429	0.96102			0.99989	0.00325	1.059E-5
	04	0.04237		0.99187		0.99964	0.00591	3.497E-5
	05	0.04298		0.98854	0.00519	0.99975	0.00514	3.956E-4
	06	0.04891	0.95948	1.00243	6.787E-6	0.9999	0.00329	1.084E-5
	07	<b>0.06015</b>		<b>0.40881</b>	<b>0.57201</b>	<b>0.99994</b>	<b>0.00241</b>	<b>5.813E-6</b>
	01	0.2074				0.99949	0.0064	4.099E-5
11	02	0.22398	0.96034			0.99956	0.00621	3.856E-5
	03	0.21059	0.95998			0.99956	0.00621	3.856E-5
	04	0.20729		0.99926		0.99949	0.00668	4.466E-5
	05	0.20809		0.99824	0.00118	0.9995	0.00692	4.791E-5
	06	0.22429	0.95965	1.00023	-2.918E-6	0.99956	0.00686	4.710E-5
	07	<b>0.2355</b>		<b>0.78685</b>	<b>0.5852</b>	<b>0.9996</b>	<b>0.00621</b>	<b>3.854E-5</b>
	01	0.03575				0.98676	0.03238	0.00105
12	02	0.07403	0.78511			0.99976	0.00444	1.972E-5
	03	0.0363	0.78476			0.99976	0.00444	1.971E-5
	04	0.03278		0.934		0.99142	0.02672	7.138E-4
	05	0.03524		0.92233	0.02242	0.99383	0.02324	5.399E-4
	06	<b>0.0741</b>	<b>0.78625</b>	<b>1.00242</b>	<b>1.454E-5</b>	<b>0.99986</b>	<b>0.00364</b>	<b>1.328E-5</b>
	07	0.11076		0.32975	0.21408	0.9996	0.0059	3.478E-5
	01	0.01329				0.97071	0.05461	0.00298
13	02	0.04122	0.73039			0.99953	0.00711	5.053E-5
	03	0.0127	0.73042			0.99953	0.00711	5.053E-5
	04	0.01087		0.89853		0.98568	0.03908	0.00153
	05	0.01295		0.87528	0.04552	0.99061	0.03244	0.00105
	06	0.04386	0.71767	1.00849	-8.041E-6	0.99958	0.00708	5.007E-5
	07	<b>0.05854</b>		<b>0.30741</b>	<b>0.13535</b>	<b>0.9998</b>	<b>0.00477</b>	<b>2.278E-5</b>
	01	0.0297				0.99593	0.02041	4.165E-4
14	02	0.04714	0.86473			0.99989	0.00343	1.174E-5
	03	0.02923	0.86457			0.99989	0.00343	1.174E-5
	04	0.02812		0.963		0.99735	0.01695	2.872E-4
	05	0.02905		0.95565	0.01162	0.99788	0.01561	2.438E-4
	06	0.0476	0.86303	1.00237	4.302E-6	0.9999	0.00344	1.184E-5
	07	<b>0.08965</b>		<b>0.22614</b>	<b>0.25256</b>	<b>0.99993</b>	<b>0.00283</b>	<b>8.023E-6</b>
	01	0.02067				0.98799	0.03554	0.00126
15	02	0.04544	0.78799			0.99972	0.00552	5.790E-4
	03	0.01978	0.78778			0.99972	0.00552	3.047E-5
	04	0.01842		0.93358		0.99294	0.02795	7.810E-4

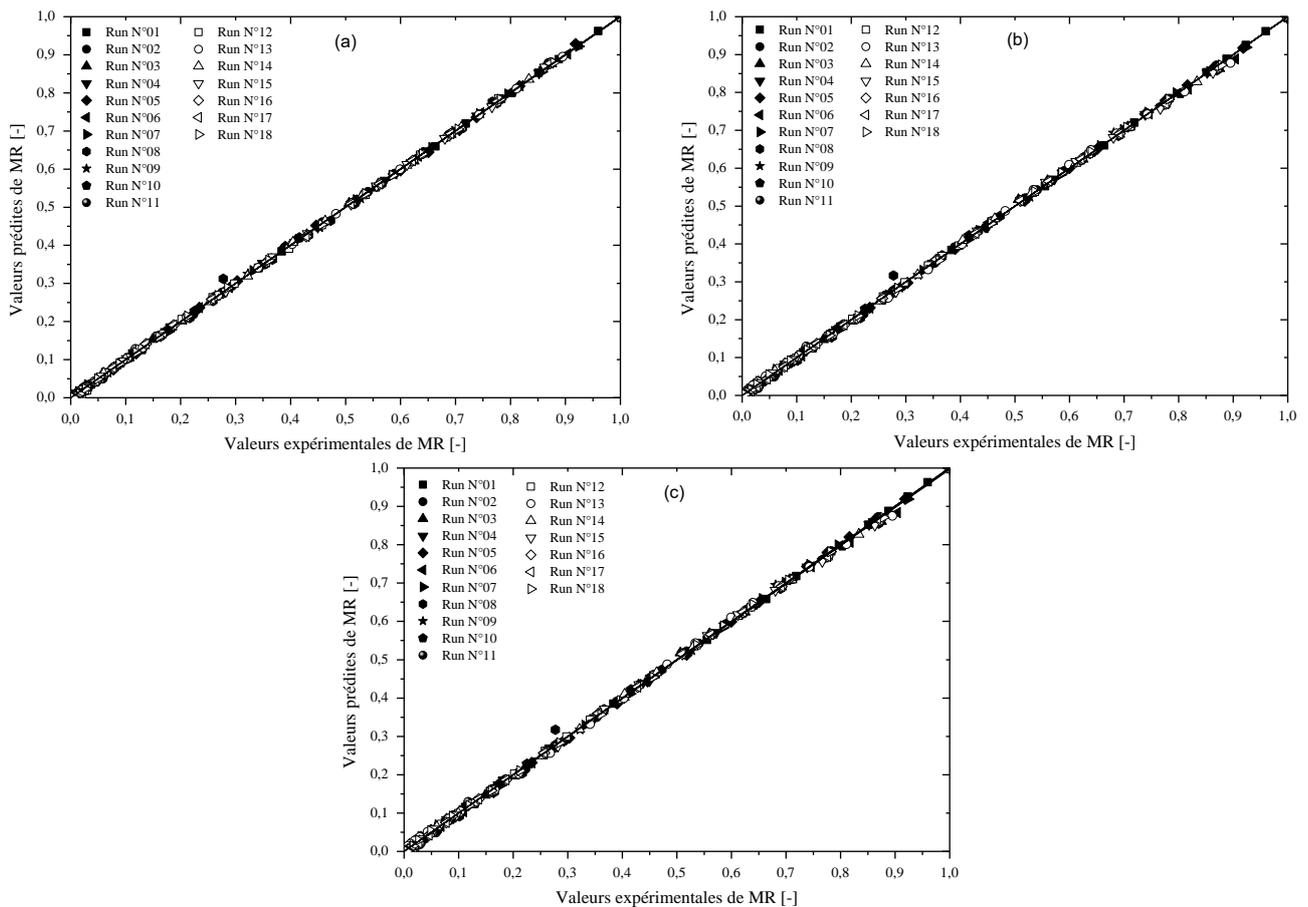
	05	0.01963		0.92128	0.02062	0.99444	0.02548	6.491E-4
	06	0.04673	0.78287	1.00573	3.0198E-6	0.99976	0.00548	3.003E-5
	<b>07</b>	<b>0.06807</b>		<b>0.30444</b>	<b>0.19347</b>	<b>0.99988</b>	<b>0.0037</b>	<b>1.366E-5</b>
	01	0.02118				0.99407	0.02542	6.462E-4
	02	0.03754	0.84474			<b>0.9998</b>	0.00482	2.323E-5
	03	0.02053	0.84425			0.9998	0.00482	2.322E-5
16	04	0.01966		0.95518		0.99635	0.02051	4.205E-4
	05	0.02076		0.94339	0.01875	0.99751	0.01743	3.039E-4
	<b>06</b>	<b>0.0385</b>	<b>0.84023</b>	<b>1.00515</b>	<b>5.274E-6</b>	<b>0.99985</b>	<b>0.00442</b>	<b>1.952E-5</b>
	07	0.05553		0.30006	0.26258	0.99983	0.0046	2.116E-5
	01	0.00884				0.98541	0.03891	0.00151
	02	0.02245	0.80333			<b>0.99971</b>	0.00561	3.149E-5
	03	0.00886	0.80357			0.99971	0.00561	3.148E-5
17	04	0.00788		0.92704		0.99449	0.02438	5.944E-4
	05	0.00863		0.90831	0.02876	0.99583	0.02165	4.688E-4
	06	0.02225	0.80344	0.99699	-6.799E-6	0.99976	0.00536	2.871E-5
	<b>07</b>	<b>0.05255</b>		<b>0.19035</b>	<b>0.12894</b>	<b>0.99996</b>	<b>0.00205</b>	<b>4.223E-6</b>
	01	0.01924				0.99338	0.02654	7.044E-4
	02	0.03569	0.83919			<b>0.99987</b>	0.00374	1.397E-5
	03	0.01884	0.83917			0.99987	0.00374	1.397E-5
18	04	0.01764		0.94695		0.99649	0.0198	3.920E-4
	05	0.01844		0.93823	0.01446	0.99724	0.01799	3.238E-4
	<b>06</b>	<b>0.03586</b>	<b>0.83874</b>	<b>1.00147</b>	<b>3.696E-6</b>	<b>0.9999</b>	<b>0.0036</b>	<b>1.294E-5</b>
	07	0.07812		0.19809	0.18783	0.99988	0.0037	1.367E-5

### iii. Comparaison avec d'autres données expérimentales

Les résultats expérimentaux et les valeurs obtenues théoriquement du taux de la teneur en eau (MR) sont enregistrés dans un tableau séparé, pour toutes les conditions de séchage du plan d'expérience.

Dans les trois parties de la Figure III.1-3 (a, b et c), nous avons tracé la valeur calculée versus les valeurs trouvées expérimentalement pour les différentes séries de l'expérience. Chaque essai représente des conditions différentes de séchage, par exemple dans l'essai n° 01, les conditions de séchage ont été : température de séchage  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , vitesse d'écoulement  $V = 8,5\text{ m/s}$  et épaisseur  $E = 0,8\text{ cm}$  (voir Tableau III.1-4, Tableau III.1-5 et Tableau III.1-6).

Sur la Figure II.2 3 (a, b et c), les valeurs théoriques obtenues en utilisant respectivement le modèle d'approximation diffusionnel, du modèle de Midilli-Kucuk et du modèle de Page sont toutes proches autour d'une droite de  $45^{\circ}$ . Une superposition presque parfaite est constatée entre les résultats théoriques et expérimentaux pour ces trois meilleurs modèles. Ainsi, nous concluons que les modèles utilisés s'adaptent adéquatement pour décrire le processus de séchage de la tranche de citrouille.



**Figure III.1-3. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les réponses calculées en termes de l'humidité relative MR dans diverses conditions opératoires et divers modèles : Diffusion (a), Midilli-Kucuk (b) et Page (c) pour des tranches de la citrouille.**

#### iv. Modélisation des constantes empiriques par rapport aux conditions de séchage

Après l'analyse globale des modèles Approximation of Diffusion, Midilli-Kucuk et Page par rapport à la température (T), la vitesse d'air de séchage (V) et l'épaisseur des tranches (E), les valeurs des constantes individuelles de ces trois modèles ont été obtenues dans Tableau III.1-4, Tableau III.1-5 et Tableau III.1-6, respectivement. En outre, l'analyse de régression multiple a été adoptée pour déterminer la relation entre les différentes constantes  $a$ ,  $k$ ,  $n$ ,  $b$  des modèles et les conditions opératoires de séchage (T, V et E). Les expressions données ci-dessus à partir de la procédure d'ajustement peuvent être utilisées pour prédire la cinétique de séchage en couche mince de la tranche de citrouille pendant le séchage convectif par air chaud.

Ils ne correspondent pas exactement aux données de séchage car toutes les constantes de ces expressions dépendent de variables telles que la température de l'air T (40-80 ° C), la vitesse de l'air V (2-15 m/s) et les épaisseurs des coupes E (0.2-1.4 cm). Ensuite, les valeurs des constantes dans ces modèles issues des régressions multiples des variables permettent de tester et inclure dans l'analyse toutes les combinaisons possibles de ces variables.

Tableau III.1-4. Résultats du plan d'expériences pour Approximation du modèle Diffusionnel.

N° essais	Variables indépendantes			Constantes des modèles et autres					Statistiques		
	T [°C]	V [m/s]	E [cm]	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$					R <sup>2</sup>	RMES	X <sup>2</sup>
				M <sub>0</sub>	M <sub>eq</sub>	k	a	b			
01	0	0	0	4.207	0.201	0.08523	0.18258	0.17214	0.99989	0.00363	1.318E-5
02	-1	-1	-1	5.301	0.228	0.13585	0.09514	0.17344	0.99997	0.00193	3.740E-6
03	+1	-1	-1	6.321	0.220	0.06015	0.40881	0.57201	0.99994	0.00241	5.813E-6
04	-1	+1	-1	4.705	0.195	0.11076	0.32975	0.21408	0.9996	0.0059	3.478E-5
05	+1	+1	-1	6.321	0.246	0.36251	0.17473	0.12862	0.99992	0.00276	7.628E-6
06	-1	-1	+1	5.240	0.381	0.05327	0.19568	0.12098	0.99982	0.00475	2.259E-5
07	+1	-1	+1	4.650	0.115	0.06293	0.11423	0.1728	0.99997	0.00192	3.678E-6
08	-1	+1	+1	5.238	0.027	0.04532	0.331	0.21058	0.99996	0.00236	5.593E-6
09	+1	+1	+1	5.579	0.096	0.04774	0.41997	0.24405	0.99918	0.00939	8.814E-5
10	0	0	0	5.101	0.174	0.05711	0.31756	0.23902	0.99995	0.00237	5.607E-6
11	0	0	0	6.559	0.198	0.05553	0.30006	0.26258	0.99983	0.0046	2.116E-5
12	-α	0	0	4.875	0.117	0.05854	0.30741	0.13535	0.9998	0.00477	2.278E-5
13	+α	0	0	5.789	0.098	0.08965	0.22614	0.25256	0.99993	0.00283	8.023E-6
14	0	-α	0	4.219	0.176	0.03275	-0.069	0.28263	0.99987	0.00447	1.994E-5
15	0	+α	0	5.301	0.144	0.06807	0.30444	0.19347	0.99988	0.0037	1.366E-5
16	0	0	-α	4.707	0.297	0.2355	0.78685	0.5852	0.9996	0.00621	3.854E-5
17	0	0	+α	9.650	0.515	0.05255	0.19035	0.12894	0.99996	0.00205	4.223E-6
18	0	0	0	4.208	0.205	0.07812	0.19809	0.18783	0.99988	0.0037	1.367E-5

Tableau III.1-5. Résultats du plan d'expériences pour Approximation du modèle Midilli-Kucuk.

Essai N°	Variables indépendantes			Constantes des modèles et autres						Statistiques		
	T [°C]	V [m/s]	E [cm]	M <sub>0</sub>	M <sub>eq</sub>	k	n	a	b	R <sup>2</sup>	RMES	X <sup>2</sup>
01	0	0	0	4.207	0.201	0.035	0.838	0.999	-7.098E-6	0.9999	0.00363	1.321E-5
02	-1	-1	-1	5.301	0.228	0.03634	0.91164	0.99834	-8.008E-8	0.9999	0.00267	7.112E-6
03	+1	-1	-1	6.321	0.220	0.04891	0.95948	1.00243	6.787E-6	0.9999	0.00329	1.084E-5
04	-1	+1	-1	4.705	0.195	0.0741	0.78625	1.00242	1.454E-5	0.9999	0.00364	1.328E-5
05	+1	+1	-1	6.321	0.246	0.09608	0.82612	0.99674	-2.785E-5	0.9996	0.00605	3.660E-5
06	-1	-1	+1	5.240	0.381	0.02305	0.78994	0.99591	-4.554E-6	0.9999	0.00379	1.438E-5
07	+1	-1	+1	4.650	0.115	0.02035	0.88826	1.00061	-8.850E-6	0.9999	0.00364	1.326E-5
08	-1	+1	+1	5.238	0.027	0.0365	0.78751	1.01117	2.083E-6	0.9997	0.00649	4.209E-5
09	+1	+1	+1	5.579	0.096	0.04522	0.7925	1.00915	3.922E-6	0.9989	0.01094	1.197E-4
10	0	0	0	5.101	0.174	0.04162	0.81583	1.00751	1.937E-6	0.9998	0.00515	2.655E-5
11	0	0	0	6.559	0.198	0.0385	0.84023	1.00515	5.274E-6	0.9999	0.00442	1.952E-5
12	-α	0	0	4.875	0.117	0.04386	0.71767	1.00849	-8.041E-6	0.9996	0.00708	5.007E-5
13	+α	0	0	5.789	0.098	0.0476	0.86303	1.00237	4.302E-6	0.9999	0.00344	1.184E-5
14	0	-α	0	4.219	0.176	0.00631	1.06858	0.99583	1.639E-5	0.9999	0.00204	4.168E-6
15	0	+α	0	5.301	0.144	0.04673	0.78287	1.00573	3.020E-6	0.9998	0.00548	3.003E-5
16	0	0	-α	4.707	0.297	0.22429	0.95965	1.00023	-2.918E-6	0.9996	0.00686	4.710E-5
17	0	0	+α	9.650	0.515	0.02225	0.80344	0.99699	-6.799E-6	0.9998	0.00536	2.871E-5
18	0	0	0	4.208	0.205	0.03586	0.83874	1.00147	3.696E-6	0.9999	0.0036	1.294E-5

Tableau III.1-6. Résultats du plan d'expériences pour Approximation du modèle Page.

Essai n°	Variables indépendantes			Constantes des modèles et autres				Statistiques		
	T [°C]	V [m/s]	E [cm]	$MR(t) = \exp(-kt^n)$				R <sup>2</sup>	RMES	X <sup>2</sup>
				M0	Meq	k	n			
01	0	0	0	4.207	0.201	0.03531	0.83878	0.99988	0.00374	1.399E-5
02	-1	-1	-1	5.301	0.228	0.03672	0.90939	0.99995	0.00253	6.405E-6
03	+1	-1	-1	6.321	0.220	0.04845	0.96134	0.99989	0.00325	1.059E-5
04	-1	+1	-1	4.705	0.195	0.07403	0.78511	0.99976	0.00444	1.971E-5
05	+1	+1	-1	6.321	0.246	0.09624	0.82759	0.99959	0.00604	5.105E-4
06	-1	-1	+1	5.240	0.381	0.02357	0.78701	0.99985	0.00416	1.732E-5
07	+1	-1	+1	4.650	0.115	0.01999	0.89312	0.99988	0.00396	1.570E-5
08	-1	+1	+1	5.238	0.027	0.03416	0.79977	0.9996	0.0069	4.765E-5
09	+1	+1	+1	5.579	0.096	0.04319	0.80121	0.99887	0.01077	1.161E-4
10	0	0	0	5.101	0.174	0.03995	0.82383	0.99975	0.00529	2.797E-5
11	0	0	0	6.559	0.198	0.03754	0.84474	0.9998	0.00482	2.323E-5
12	- $\alpha$	0	0	4.875	0.117	0.04122	0.73039	0.99953	0.00711	5.053E-5
13	+ $\alpha$	0	0	5.789	0.098	0.04714	0.86473	0.99989	0.00343	1.174E-5
14	0	- $\alpha$	0	4.219	0.176	0.00698	1.04613	0.99984	0.00489	2.393E-5
15	0	+ $\alpha$	0	5.301	0.144	0.04544	0.78799	0.99972	0.00552	5.791E-4
16	0	0	- $\alpha$	4.707	0.297	0.22398	0.96034	0.99956	0.00621	3.856E-5
17	0	0	+ $\alpha$	9.650	0.515	0.02245	0.80333	0.99971	0.00561	3.149E-5
18	0	0	0	4.208	0.205	0.03569	0.83919	0.99987	0.00374	1.397E-5

Les multiples combinaisons des paramètres qui ont donné le plus haut coefficient de détermination R<sup>2</sup>, le plus bas Chi-carré X<sup>2</sup> et l'erreur carrée moyenne RMES ont finalement été incluses dans le modèle final. Les résultats de cette analyse sont donnés dans le Tableau III.1-7.

Tableau III.1-7. Influences de la température de l'air de séchage, de la vitesse de l'air et de l'épaisseur des tranches sur les constantes des trois meilleurs modèles

Modèle N°	Constantes des modèles	$\text{Constants} = \exp(-a_0/T) + \exp(-a_2V^{a_3}) + \exp(-a_4E^{a_5})$ $\text{constants} = a_0 + a_1T + a_2V + a_3E + a_4T^2 + a_5T.V + a_6T.E + a_7V^2 + a_8V.E + a_9E^2$										Statistiques		
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	R <sup>2</sup>	RMES	X <sup>2</sup>
07	k	0,3999	-0,00787	-0,02395	2,88e-5	4,21e-5	9,33e-4	-0,0048	-1,45e-4	-0,029	0,2416	0,829	0,049	0,00241
	a	-1455,2	0,00826	1455,307	1,51e-5	7,19157	-12,857	-	-	-	-	0,711	0,113	0,01268
	b	-0,7027	0,03557	0,04246	-0,7963	-1,11e-4	-0,001	-0,0066	4,22e-6	0,0511	0,3281	0,757	0,096	0,00916
06	k	-258,51	0,11816	258,6002	1,49E-5	0,81872	-7,2858	-	-	-	-	0,973	0,009	8,70e-05
	n	2,4436	-381,362	0,57959	-0,3697	0,39987	-4,6782	-	-	-	-	0,905	0,031	9,34e-04
	a	1,0069	-5,07e-4	0,00267	-0,0072	6,68e-6	-5,18e-5	1,25e-4	-3,99e-5	0,0024	-0,011	0,746	0,003	1,24e-05
02	b	-1,3e-5	1,39e-06	4,57e-7	-6,07e-5	-1,05e-8	-1,16e-7	9,65e-7	1,76e-7	3,83e-6	-2,0e-5	0,503	1,02e-5	1,03e-10
	k	-258,08	0,1254	258,1745	1,43e-5	0,80599	-7,1913	-	-	-	-	0,973	0,009	8,50e-05
	n	2,3950	-372,356	0,50094	-0,3464	0,408	-4,959	-	-	-	-	0,892	0,030	9,31e-04

Les trois meilleurs modèles ont été les suivants :

i. *Modèle de diffusion (Diffusion Approach)*

$$MR(k, a, b, t) = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt) \quad (\text{Eq. III.1-6.})$$

où :

$$k = a_0 + a_1T + a_2V + a_3E + a_4T^2 + a_5T.V + a_6T.E + a_7V^2 + a_8V.E + a_9E^2$$

$$a = \exp(-a_0/T) + \exp(-a_2V^{a_3}) + \exp(-a_4E^{a_5})$$

$$b = a_0 + a_1T + a_2V + a_3E + a_4T^2 + a_5T.V + a_6T.E + a_7V^2 + a_8V.E + a_9E^2$$

ii. *Modèle de Midilli-Kucuk*

$$MR(k, a, b, t) = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt) \quad (\text{Eq. III.1-7.})$$

où :

$$k = \exp(-a_0/T) + \exp(-a_2V^{a_3}) + \exp(-a_4E^{a_5})$$

$$n = \exp(-a_0/T) + \exp(-a_2V^{a_3}) + \exp(-a_4E^{a_5})$$

$$a = a_0 + a_1T + a_2V + a_3E + a_4T^2 + a_5T.V + a_6T.E + a_7V^2 + a_8V.E + a_9E^2$$

$$b = a_0 + a_1T + a_2V + a_3E + a_4T^2 + a_5T.V + a_6T.E + a_7V^2 + a_8V.E + a_9E^2$$

iii. *Modèle de Page*

$$MR(k, n, t) = \exp(-kt^n) \quad (\text{Eq. III.1-8.})$$

où :

$$k = \exp(-a_0/T) + \exp(-a_2V^{a_3}) + \exp(-a_4E^{a_5})$$

$$n = \exp(-a_0/T) + \exp(-a_2V^{a_3}) + \exp(-a_4E^{a_5})$$

### III.1.3.2. Vérification du modèle final, y compris les conditions de séchage T, V et E

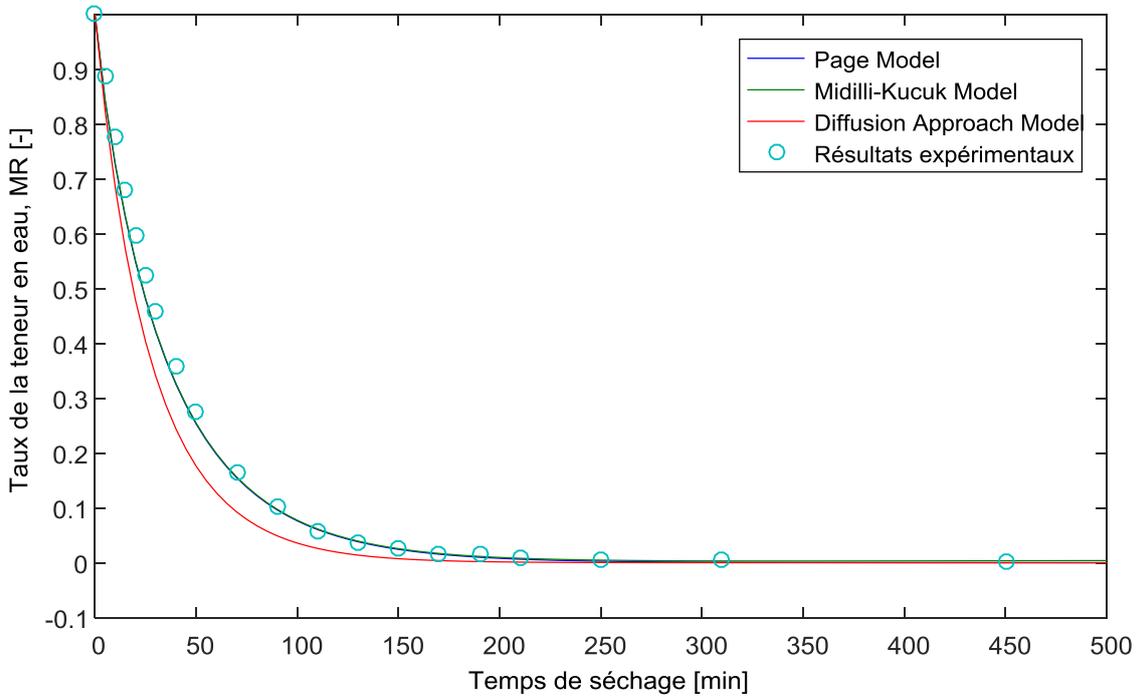
Le résultat final de l'expérience est un taux de la teneur en eau (MR) en fonction du temps (t) avec des conditions de séchage en dehors de plant d'expériences fixer à T = 60 ° C, V = 5 m / s et E = 0,5 cm pendant l'expérience (Figure III.1-4). Sur le même graphique, les modèles étudiés (Eq. III.1.6, III.1.7 et III.1.8) sont tracés. La comparaison de ces graphiques révèle que le modèle de Midilli-Kucuk a donné le meilleur ajustement suivi des modèles de Page que d'approximation de la diffusion (Tableau III.1-8).

La Figure III.1-4 illustre la qualité de ce modèle final. Le coefficient de corrélation carré était de 0,998, et la réduction de  $\chi^2$  khi-carré et de l'erreur carrée moyenne RMSE était de 0,0002 et 0,0142, respectivement.

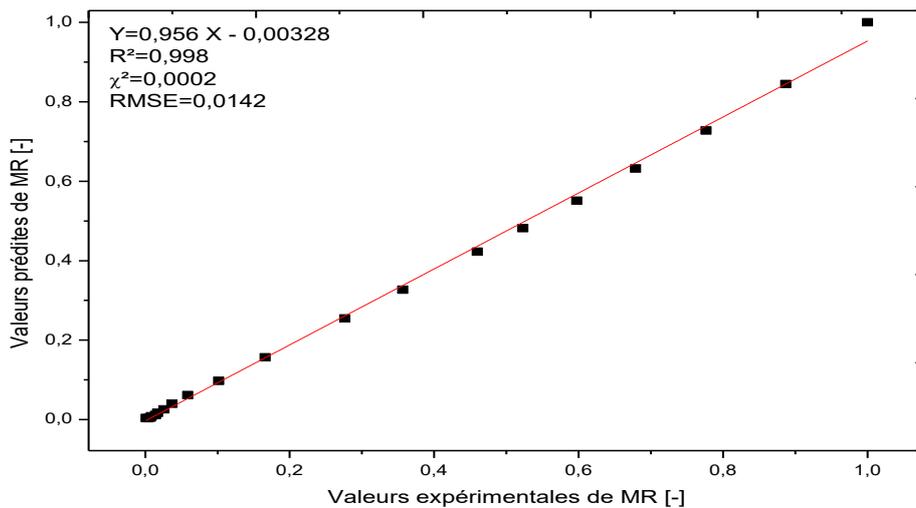
La proximité entre les valeurs observées et prédites a confirmé l'adéquation du modèle final correspondant utilisé pour décrire la cinétique de séchage en couche mince de la tranche de citrouille pendant le séchage convectif à air chaud. **Erreur ! Référence non valide pour un signet.**

**Tableau III.1-8. Résultats pour les meilleurs modèles créés (les relations entre les conditions de séchage, l'épaisseur des tranches, le temps et les paramètres ( $k$ ,  $n$ ,  $a$  et  $b$ ))**

Test de vérification	Equation (III.1.6)			Equation (III.1.7)			Equation (III.1.8)		
	Modèle "Approximation of Diffusion"			Modèle Midilli-Kucuk			Modèle Page		
	$R^2$	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	RMSE	$\chi^2$
	0.95341	0.07062	0.00554	0.9939	0.02552	7.237e-4	0.99337	0.02663	7.881e-4



**Figure III.1-4. Teneur en eau réduite (MR) versus le temps de séchage, on compare les valeurs expérimentales avec les courbes d'ajustement à travers les modèles de Page, Midilli-Kucuk et Diffusion Approach, equations (Eq. (III.1.6, III.1.7 et III.1.8)) pour les tranches de citrouille.**



**Figure III.1-5. Teneur en eau réduite prédite (MR) pour le modèle de Midilli-Kucuk versus expérimentale MR pour tout processus de séchage des tranches de citrouille.**

La pertinence de l'équation du modèle a été étudiée par la comparaison entre les valeurs observées avec celles prédites par le modèle final par rapport aux conditions de séchage.

Ces résultats sont légèrement meilleurs que ceux rapportés par d'autres auteurs [Basunia et al., 2001 ; Xanthopoulos et al., 2009].

Finalement, l'équation du meilleur modèle qui est décrite par Midilli-Kucuk (Eq. III.1.7) est tracée pour différentes valeurs de T, V et E à un instant donné sur la Figure III.1-6. Ce graphique permettra de déterminer le taux de la teneur en eau (MR) à une température, épaisseur, vitesse d'air donnée.

Afin de visualiser les effets combinés des trois facteurs (T, V et E) sur le rapport de la teneur en eau (MR), nous avons tracé des surfaces 3D superposées comme alternative à la représentation à quatre dimensions (4-D). La Figure III.1-6 montre l'effet de la température, la vitesse de l'air et l'épaisseur de la tranche sur le taux de la teneur en eau au premier 10 minutes. On peut voir à partir de cette figure que lorsque l'épaisseur de la tranche de citrouille augmente, l'apport de la teneur en eau augmente. Ainsi, pour obtenir une meilleure valeur de la teneur en eau, il faut augmenter le temps de séchage ou choisir des tranches avec une épaisseur réduite.

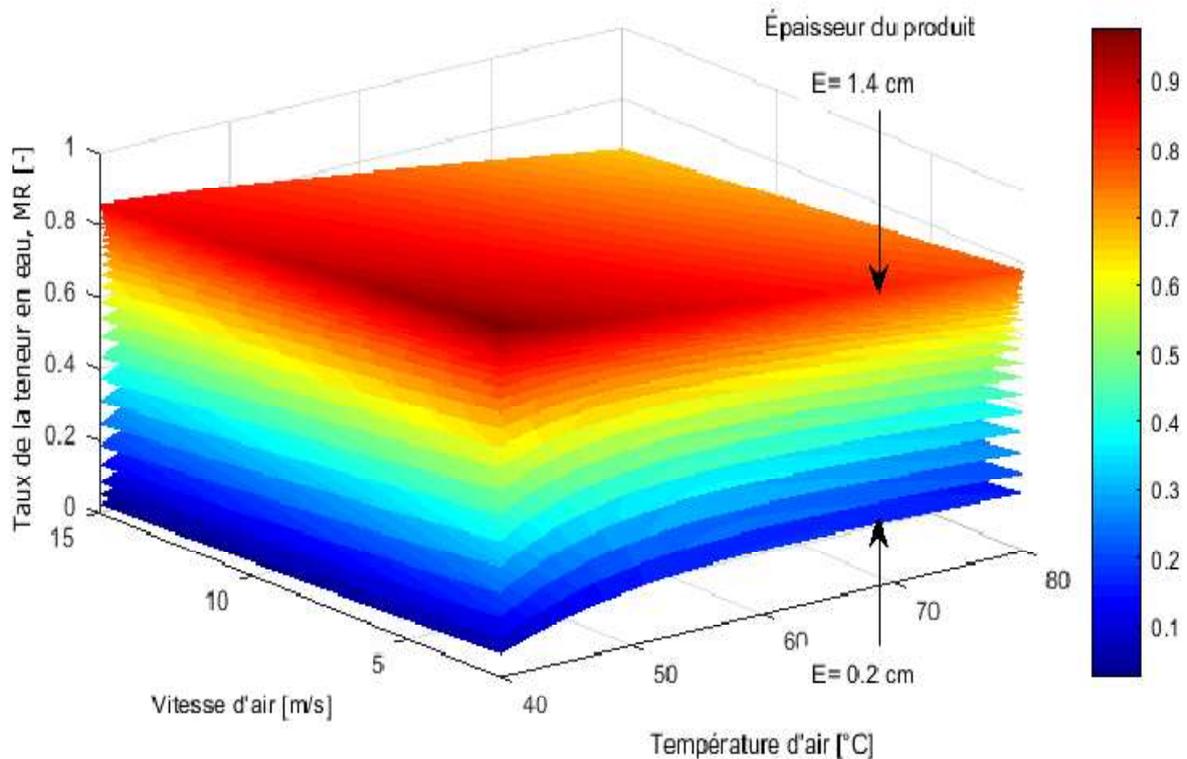
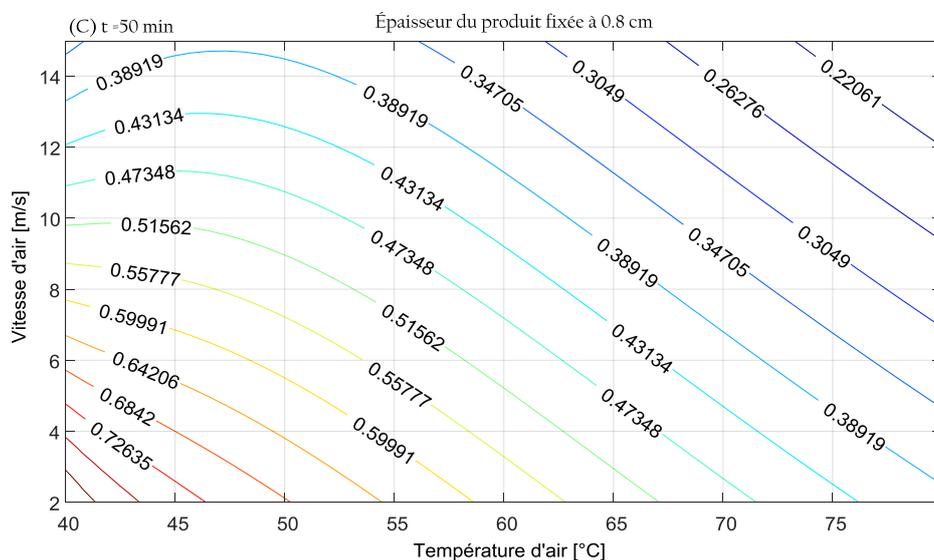
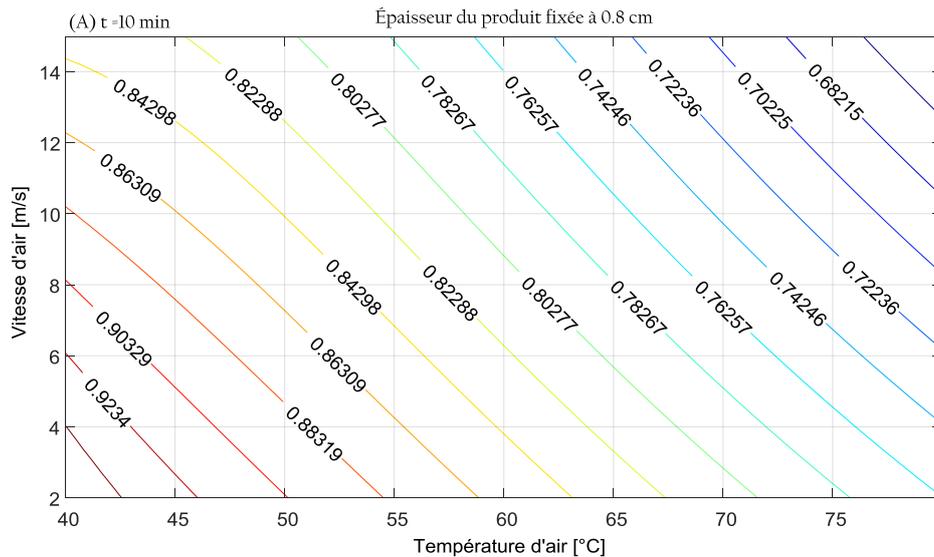


Figure III.1-6. Tracé tridimensionnel de taux de la teneur en eau pour le processus de séchage des tranches de citrouille obtenu par l'équation (III.1.7) à 10 min time.



### III.1.4. CONCLUSION

Il est très important d'utiliser des modèles empiriques incluant les conditions de l'air de séchage et l'épaisseur des tranches (T, V et E) pour modéliser la cinétique de séchage de la tranche de citrouille dans un procédé de séchage convectif à l'échelle macroscopique. Afin d'expliquer le comportement du processus de séchage convectif et de développer un modèle mathématique de la tranche de citrouille, sept modèles de séchage en couche mince, disponibles dans la littérature et trois nouveaux modèles dérivés du meilleur modèle ont été comparés en utilisant les paramètres statistiques tel que le coefficient de détermination  $R^2$ , le chi-carré réduit  $\chi^2$  et l'erreur carrée moyenne RMSE. Parmi ces modèles, les modèles Approximation of Diffusion, Midilli-Kucuk et Page ont donné les meilleurs résultats et ont montré un bon accord avec les données expérimentales obtenues à partir des expériences. L'effet des variables intrinsèques (températures de l'air de séchage, la vitesse de l'air) et des variables extrinsèques (épaisseur des tranches) sur les constantes du modèle de Midilli- Kucuk a été examiné. Le modèle résultant affiche de bons ajustements aux données expérimentales de la vérification en dehors de la conception des expériences ( $R^2 = 0,998$ ,  $\chi^2 = 0,0002$  et  $RMSE = 0,0142$ ). En outre, d'autres expériences indépendantes ont également été effectuées pour vérifier l'exactitude du modèle, et les résultats indiquent que la valeur prédite est convenue avec bien les valeurs expérimentales.

## BIBLIOGRAPHIE

- Adolfo, A.C., Michael, H. (2005). Mexican plants with hypoglycaemic effect used in the treatment of diabetes. *J Ethnopharmacol* 99: 325–348.
- Ang-Lee, M.K., Moss, J., Yuan, C.S. (2001). Herbal medicines and perioperative care. *J Am Med Dir Assoc* 286: 208-216.
- A.O.A.C. (1990). Official methods of analysis. Edition : Association of Official Analytical Chemist (AOAC). Washington, DC.
- Arinze, E.A., Sokhansanj, J.S., Schoenu, G.J., Trauttmansdorff, F.G. (1996). Experimental evaluation, simulation and optimization of a commercial heated-air batch hay drier : Part 1, drier functional performance, product quality, and economic analysis of drying. *J Agric Eng Res* 63: 301-314.
- Bakalis, S., Knoerzer, K., Fryer, P. (2015). Modeling Food Processing Operations. 1st edn. Elsevier.
- Balbay, A., Şahin, Ö. (2012). Microwave Drying Kinetics of a Thin-Layer Liquorice Root. *Drying Technol* 30: 859-864.
- Basunia, M.A., Abe, T. (2001). Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. *J Food Eng* 47: 295-301.
- Caili, F.U., Shi, H., Quanhong, L.I. (2006). A Review on Pharmacological Activities and Utilization Technologies of Pumpkin. *Plant Foods Hum Nutr* 61: 73–80.
- Carsky, M. (2008). Design of a dryer for citrus peels. *J Food Eng* 87: 40-44.
- Corrêa, P.C., Resende, O., Martinazzo, A.P., Goneli, A.L.D., Botelho, F.M. (2007). Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Eng. agríc.* 27: 501-510.

- Corrêa, P.C., Botelho, F.M., Oliveira, G.H.H., Goneli, A.L.D., Resende, O., Campos, S.C. (2011). Mathematical Modeling of the Drying Process of Corn Ears. *Acta Sci Agron* 33: 575-581.
- Dincer, I. (2000). Thermodynamics, exergy and environmental impact. *Energ Source* 22: 723-732.
- Dincer, I., Cengel, Y.A. (2001). Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. *Entropy* 3: 116-149.
- Dincer, I., Sahin, A.Z. (2004). A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *Int J Heat Mass Transf* 47: 645-652.
- Dincer, I., Ozalp, A., Zamfirescu, C. (2016). *Drying Phenomena : Theory and Applications*. John Wiley & Sons.
- Hasan, A.A.M., Bala, B.K., Rowshon, M.K. (2014). Thin layer drying of hybrid rice seed. *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 7: 169-175.
- Jia, W., Gao, W., Tang, L. (2003). Antidiabetic herbal drugs officially approved in China. *Phytother Res* 17: 1127-1134.
- Kocabiyik, H. (2010). Combined Infrared Radiation And Hot Air Drying. In : *Infrared Heating For Food And Agricultural Processing*, CRC Press Taylor & Francis Group, pp 101-116.
- Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A., Dincer, I. (2014). A review of thin-layer drying curve equations. *Drying Technol* 32: 757-773.
- Eren, I., Kaymak-Ertekin, F. (2007). Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 79: 344-352.
- Lertworasirikul, S., Tipsuwan, Y. (2008). Moisture content and water activity prediction of semi-finished cassava crackers from drying process with artificial neural network. *J Food Eng* 84: 65-74.
- Lewis, W.K. (1921). The rate of drying of solid materials. *J Ind Eng Chem* 13: 427-432.
- Mayor, L., Sereno, A.M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials : a review. *J Food Eng* 61: 373-386.
- Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technol* 20: 1503-1513.
- Naderinezhad, S., Etesami, N., Najafabady, A.P., Falavarjani, M.G.h. (2016). Mathematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parameters. *Food Sci Nutr* 4: 110-118.
- Ndukwu, M.C. (2009). Effect of Drying Temperature and Drying Air Velocity on the Drying Rate and Drying Constant of Cocoa Bean. *Agricultural Engineering International : the CIGR Ejournal*. Manuscript 1091 11.
- Nicoletti, J.F., Telis-Romero, J., Telis, V.R.N. (2001). Air-drying of fresh and osmotically pretreated pineapple slices : fixed air temperature versus fixed temperature drying kinetics. *Drying Technol* 19: 2175-2191.
- Peleg, M. (1988). An empirical model for description of moisture sorption curves. *J Food Sci* 53 1216-1219.
- Popovic, M. (1971). On growing squash and pumpkin (*Cucurbita* sp.) in Yugoslavia. *Savremena Poljoprivreda* 11: 59-71.

- Ruhanian, S., Movagharnejad, K. (2016). Mathematical modeling and experimental analysis of potato thin-layer drying in an infrared-convective dryer. *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 9: 84-91.
- Saeed, I.E., Sopian, K., Zainol Abidin, Z. (2008). Thin-Layer Drying of Roselle (I) : Mathematical Modeling and Drying Experiments. *Agricultural Engineering International : CIGR journal Manuscript* FP 08 015 10, 1-25.
- Sarsavadia, P.N., Sawhney, R.L., Pangavhane, D.R., Singh, S.P. (1999). Drying behavior of brined onion slices. *J Food Eng* 40: 219-226.
- Shi, Q., Xue, C., Zhao, Y., Li, Z., Wang, X. (2008). Drying characteristics of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier. *J Food Eng* 84: 12-20.
- Silva, N.L., Maciel, M.R.W., Batistella, C.B., Maciel Filho, R. (2006). Optimization of biodiesel production from castor oil. *Appl Biochem Biotechnol* 130: 405-414.
- Singh, G.D., Sharma, R., Bawa, A.S., Saxena, D.C. (2008). Drying and rehydration characteristics of water chestnut (*Trapa natans*) as a function of drying air temperature. *J Food Eng* 87: 213-221.
- Velić, D., Planinić, M., Tomas, S., Bilić, M. (2004). Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *J Food Eng* 64: 97-102.
- Waewsak, J., Chindaruksa, S., Punlek, C. (2006). A mathematical modeling study of hot air drying for some agricultural products. *Thammasat Int J Sci Tech* 11 : 14-20.
- Xanthopoulos, G., Lambrinos, G., Manolopoulou, H. (2007). Evaluation of Thin-Layer Models for Mushroom (*Agaricus bisporus*) Drying. *Drying Technol* 25: 1471–1481.
- Xanthopoulos, G., Yanniotis, S., Lambrinos, G. (2009). Water diffusivity and drying kinetics of air drying of figs. *Drying Technol* 27: 502–512.
- Yaldiz, O., Ertekin, C., Uzun, H.I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy* 26: 457–465.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. (2002). Thin-layer solar drying of some vegetables. *Drying Technol* 19: 583–596.
- Zhang, Q., Litchfield, J.B. (1991). An optimisation of intermittent corn drying in a laboratory scale thin-layer dryer. *Drying Technol* 9 : 383–395.

## **CHAPITRE III.2.**

### **OPTIMISATION DES CONDITIONS OPERATOIRES DU SECHAGE DE LA CITROUILLE PAR SECHEUR A AIR CHAUD EN UTILISANT LA METHODE DES SURFACES DE REPONSE (MSR)**

#### **III.2.1. INTRODUCTION**

La citrouille est plus couramment consommée au Maghreb et en Amérique du Nord. Les citrouilles contiennent une quantité particulièrement intéressante de caroténoïdes, des composés antioxydants. Elles sont de bonnes sources de caroténoïdes, et certaines variétés sont riches en provitamines A, principalement de bêta-carotène et d'alpha-carotène [Arima et al., 1988 ; Murkovic et al., 2002 ; Dutta et al., 2006 ; Garcia et al., 2007] . La consommation d'aliments riches en caroténoïdes a été associée à la prévention du cancer, la dégénérescence maculaire et d'autres maladies dégénératives, principalement liée à leurs propriétés antioxydantes et des propriétés de piégeage de radicaux libres [Krinsky, 1993]. Les pertes de fruits et légumes dans les pays en développement sont estimés à 30-40% de la production [Karim et al., 2006]. La plupart de ces produits contiennent plus de 80% d'eau et ils sont hautement périssables. La nécessité de réduire les pertes après récolte est d'une importance capitale pour ces pays. Les pertes post-récolte des produits agricoles dans les zones rurales des pays en développement peuvent être réduits de façon rigoureuse en utilisant des systèmes de séchage solaire bien conçues, décentralisés et adaptables à des productions locales près de la zone de récolte. Néanmoins ce mode de séchage présente des inconvénients du fait que le produit obtenu est de qualité médiocre. Pour remédier à cette problématique, on propose d'insérer un traitement de Détente Instantanée Contrôlée (DIC) des produits dans un centre permettant le traitement de la production d'une large région, après un pré-séchage solaire des produits au niveau de la zone de récolte afin de mieux préserver le contenu nutritionnel, sauvegarder la qualité organoleptique, aboutir à une parfaite décontamination du produit et longue durée de conservation de produit séché.

La méthodologie de surface de réponse (RSM) a été prouvée pour être un outil puissant pour déterminer les effets de chaque facteur et les interactions entre eux, ce qui permet l'optimisation des processus à mener efficacement [Bas et al., 2007]. Les procédures de surface de réponse impliquent la stratégie expérimentale, les méthodes mathématiques, et l'inférence statistique, qui, lorsqu'ils sont combinés, permettent aux utilisateurs de faire une exploration empirique efficace du système dans lequel ils sont intéressés [Myers, 1971]. La stratégie expérimentale permet à l'analyste d'explorer la surface de réponse avec la même précision, dans n'importe quelle direction. La conception expérimentale limite initialement la région sous enquête. Suite à l'enquête initiale, la conception expérimentale permet à l'analyste d'explorer la surface de réponse d'une manière systématique dans la direction qui offre la plus prometteuse pour l'amélioration [Krishnaiah et al., 2015].

RSM peut être appliquée à tout système qui comporte les éléments clés suivants : (i) un critère d'efficacité, qui est mesurable sur une échelle continue, et (ii) variables indépendantes

quantifiables qui affectent la performance du système (le procédé de séchage). Compte tenu de ces conditions, RSM propose des techniques pour trouver la réponse optimale du système d'une manière efficace. Le principal avantage de la RSM est que la quantité de données nécessaires à l'évaluation, l'analyse et l'optimisation réduit de manière significative le nombre d'expériences requises. RSM est une méthode plus rapide et plus économique pour la collecte des résultats de recherche que celui variable classique à un moment ou à pleine facteur expérimentation. Le logiciel Statgraphics Centurion XVI version 16.1.15 (Statpoint Technologies Inc., Warrenton, Virginia, USA) a été utilisé à cette fin. RSM a généré la table expérimentale de conception. Cette stratégie expérimentale a été largement utilisée dans le développement produit/process.

La présente étude a porté sur la modélisation de l'effet de la température de l'air, la vitesse d'air et l'épaisseur de l'échantillon (comme variables indépendantes) sur le taux de déshydratation (comme variables dépendantes) dans un processus de séchage à air pour des échantillons de la citrouille. La modélisation a été basée sur la Méthodologie des Surfaces de Réponses. Les expériences ont été conçues selon le plan composite centré avec trois facteurs, chacun a cinq niveaux différents.

### **III.2.2. MATERIELS ET METHODES**

#### **III.2.2.1. Préparation des échantillons (voir III.1.2.1, Préparation des échantillons)**

#### **III.2.2.2. Dispositif expérimental (voir II.2.2.2, Dispositif expérimental de séchage à l'air chaud)**

Les essais de séchage sont réalisés à l'aide d'un séchoir pilote expérimental de séchage par entraînement (Figure III.2-1). Le séchoir pilote permet d'assurer un séchage de longue durée dont les conditions sont bien déterminées et parfaitement maîtrisées en température ( $20 < T < 80^{\circ}\text{C}$ ) et vitesse ( $0 < V < 20 \text{ m/s}$ ) de l'air. Le séchoir fonctionne en boucle ouverte et il est commandé par un automate programmable. La température et la vitesse de l'air sont des paramètres réglables. L'air traverse perpendiculairement, de haut en bas, les morceaux de la citrouille déposés sur une coupelle (diamètre = 10 cm). Pour maîtriser la variation des propriétés de l'air au contact du produit, toutes les expériences de séchage ont été effectuées sur une monocouche de morceaux de la citrouille.

#### **III.2.2.3. Analyse de taux de déshydratation**

Le taux de déshydratation des échantillons de la citrouille a été calculé en utilisant l'Eq. (III.2.1) [Niu et al., 2012] :

$$\text{Taux de déshydratation} = \frac{M_0 - M_i}{M_0}, \quad (\text{Eq. III.2-1.})$$

où  $M_0$  est la teneur en eau initiale et  $M_i$  est la teneur en eau à des instants  $t$  au cours de la cinétique de séchage.

### III.2.2.4. Conception expérimentale et analyse statistique (voir III.1.2.4, Modélisation par la méthode des plans d'expériences)

## III.2.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### III.2.3.1. Analyse de la réponse et interprétation

La réponse de taux de déshydratation est chiffrée dans Tableau III.2-1. Les données expérimentales ont été utilisées dans le calcul des coefficients de l'équation quadratique, et Tableau III.2-3 et Tableau III.2-2 résument les résultats de l'analyse de la variance et des coefficients du modèle, respectivement.

*Tableau III.2-1. Conditions et les résultats de la conception expérimentale, pour le séchage de la citrouille basée sur le plan d'expériences composite centré à cinq niveaux*

Exps	Facteurs						Réponse
	Variables codées			Variables normale			Taux de déshydratation à 30% d.b
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$T[°C]$	$V[m.s^{-1}]$	$E[cm]$	[%]
1	0	0	0	60	9	0.8	60.6775
2	-1	-1	-1	48,1	5	0.44	48.5624
3	+1	-1	-1	71,9	5	0.44	47.7290
4	-1	+1	-1	48,1	12	0.44	45.7251
5	+1	+1	-1	71,9	12	0.44	47.2719
6	-1	-1	+1	48,1	5	1.16	...
7	+1	-1	+1	71,9	5	1.16	68.3585
8	-1	+1	+1	48,1	12	1.16	70.1221
9	+1	+1	+1	71,9	12	1.16	71.2618
10	0	0	0	60	9	0.8	61.0973
11	0	0	0	60	9	0.8	64.3485
12	-1.682	0	0	40	9	0.8	63.3096
13	+1.682	0	0	80	9	0.8	61.1444
14	0	-1.682	0	60	2	0.8	64.2823
15	0	+1.682	0	60	15	0.8	64.3279
16	0	0	-1.682	60	9	0.2	11.3896
17	0	0	+1.682	60	9	1.4	...
18	0	0	0	60	9	0.8	69.1628

Les valeurs de "Prob> F" inférieures à 0,05 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas,  $x_3$  et  $x_3^2$  sont significatifs sur le taux de déshydratation. Les valeurs de "Prob> F" supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs. Les valeurs de "Prob> F" de  $x_1, x_2, x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1^2$  et  $x_2^2$  sont 0.9156, 0.9701, 0.8257, 0.9924, 0.6961, 0.7012 et 0.4046 respectivement.

Sur la base de ces résultats, une relation empirique entre la réponse et les variables indépendantes a été établie selon une équation polynomiale de second ordre :

$$Y = 63,689 - 0,175232T + 0,0618386V + 11,8295E + 0,515562T.V - 0,0222866T.E + 0,919588V.E + 0,592851 T^2 + 1,32739V^2 - 9,79505T^2 \quad (\text{Eq. III.2-2.})$$

Le coefficient de détermination  $R^2$  représente la proportion de variation de la réponse attribuée au modèle plutôt que de l'erreur aléatoire. Il a été suggéré qu'un bon ajustement du modèle devrait avoir  $R^2$  supérieur à 80%.

*Tableau III.2-2. Niveaux des variables utilisées pour la construction du plan composite centré*

Niveaux	Valeurs optimales des variables indépendants						Réponse
	Variables codées			Variables réelles			Rapport de déshydratation
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$T [^{\circ}C]$	$V [ms^{-1}]$	$E [Cm]$	$Y$
Bas	-1,682	-1,682	-1,682	40	2	0.2	48.56
Haut	1,682	1,682	1,682	80	15	1.4	71.26
Optimum	0,858	1,682	0,638	70.20	15	1.03	73,11

*Tableau III.2-3. Analyse de variance (ANOVA), termes linéaires, d'interaction et quadratiques pour chaque variable de réponse et les coefficients de modèle de prévision*

Source	Coefs	Somme des carrés	DDL	Moyenne des carrés	F valeur	Prob > F
Constante	63,689	34,902	1	34,9021	1,36	0,296
$x_1$	-0,1752	0,3182	1	0,31822	0,01	0,916
$x_2$	0,0618	0,0396	1	0,03963	0,00	0,970
$x_3$	11,829	729,20	1	729,202	28,48	0,003
$x_1^2$	0,5928	4,2293	1	4,2293	0,17	0,701
$x_1x_2$	0,5155	1,3783	1	1,37832	0,05	0,826
$x_1x_3$	-0,0222	0,0025	1	0,00257	0,00	0,992
$x_2^2$	1,3273	21,201	1	21,2018	0,83	0,405
$x_2x_3$	0,9195	4,3850	1	4,38508	0,17	0,696
$x_3^2$	-9,7955	538,16	1	538,164	21,02	0,006
Résiduelle		128,02	5	25,6047	-	-
Lack-of-fit		116,34	3	38,7822	6,64	0,134
Pure error		11,676	2	5,83843		
R-carré %	0,962					
R-carré (ajusté pour les ddl) %	0,886					
Estimation de l'écart-type du résidu	5,06011					
Erreur absolue moyenne	2,2609					
Test de Durbin-Watson	1,7478					

Une valeur inférieure de  $R^2$  indique que le modèle n'est pas approprié pour expliquer la relation entre les variables [Little et al., 1978 ; Mendenhall, 1975]. La valeur  $R^2$  pour Eq. (III.2.2) a été jugée 0,962, indiquant qu'il y avait un bon accord entre les données expérimentales et le taux de déshydratation prédite à partir de modèle. Chacune des valeurs expérimentales ont été comparée aux valeurs prédites calculées à partir du modèle (Figure III.2-2).

Les résultats indiquent que le modèle utilisé dans cette étude était capable d'identifier l'état de fonctionnement optimal de séchage par air chaud de la citrouille. La Figure III.2-2 montre la corrélation entre la valeur de la réponse observée et celle de la réponse prédite par le modèle mathématique. Cette dernière figure, montre une excellente corrélation existe entre le taux de déshydratation obtenu expérimentalement et celle qui pourraient être prédites par la relation mathématique proposé à partir d'équation (Eq. III.2-2) citées précédemment. Par ailleurs, à partir

de cette même équation, on peut obtenir les surfaces de réponses en 3D et les courbes isoplèthes illustrées sur les Figure III.2-2 (a-c) et (d-f).

Ces figures montrant l'effet de la température de l'air ( $x_1$ ), la vitesse d'air ( $x_2$ ) et l'épaisseur de l'échantillon ( $x_3$ ) sur le taux de déshydratation ( $Y$ ). On constate sur la Figure III.2-2 (A et D) que le taux de déshydratation diminue lorsque la température et la vitesse d'air sont aux tours de niveaux moyens ( $x_1 = 0$  et  $x_2 = 0$ ), ce qui a révélé qu'une température et vitesse d'air plus bas ou plus élevé sont favorables pour l'obtention d'un taux de déshydratation plus élevé. Comme on peut voir sur la Figure III.2-2 (B et E) que à une température d'air ( $x_1$ ) plus bas ou plus élevée, le taux de déshydratation augmente lorsque l'épaisseur de l'échantillon augmente jusqu'à son niveau moyen ( $x_3 = 0$ ). Sur la Figure III.2-2 (C et D), on a remarqué un profil presque similaire à la Figure III.2-2 (B et E), lorsque la température d'air ( $x_1$ ) plus bas ou plus élevée, le taux de déshydratation augmente lorsque l'épaisseur de l'échantillon ( $x_3$ ) augmente jusqu'à un niveau moyen ( $0 < x_3 < 1,25$ ). Toutefois, Il était clair que les résultats expérimentaux de taux de déshydratation et les valeurs prédites obtenus en utilisant l'équation (Eq. III.2-2) ne sont pas significativement différentes (Figure III.2-1).

### III.2.3.2. Optimisation des paramètres

Selon l'analyse ci-dessus, l'épaisseur des échantillons est la variable la plus importante, de sorte que l'intervalle d'optimisation de l'épaisseur des échantillons est étroit. Dans les conditions de déshydratation, l'optimisation de chacune des variables et des résultats optimisés sont donnés dans Tableau III.2-2. Les variables indépendantes optimales sont les suivantes : Température de l'air est de 70.2 °C, vitesse de l'air est de 15 m/s, l'épaisseur des échantillons est de 1.03 cm. En vertu d'une condition appropriée, le taux de déshydratation peut atteindre la valeur maximale 73,11%.

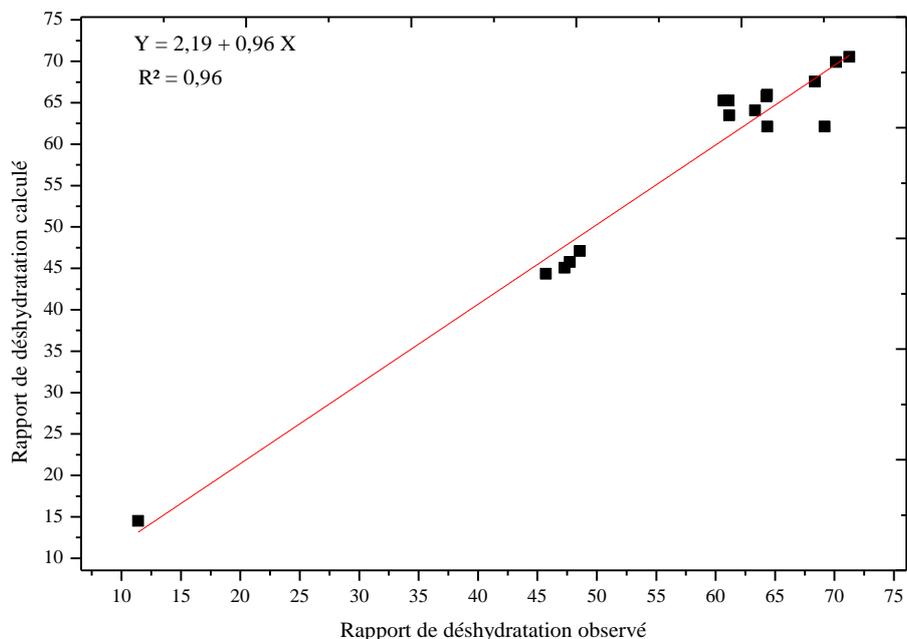


Figure III.2-1. Corrélation linéaire entre le rapport de déshydratation calculé et observé

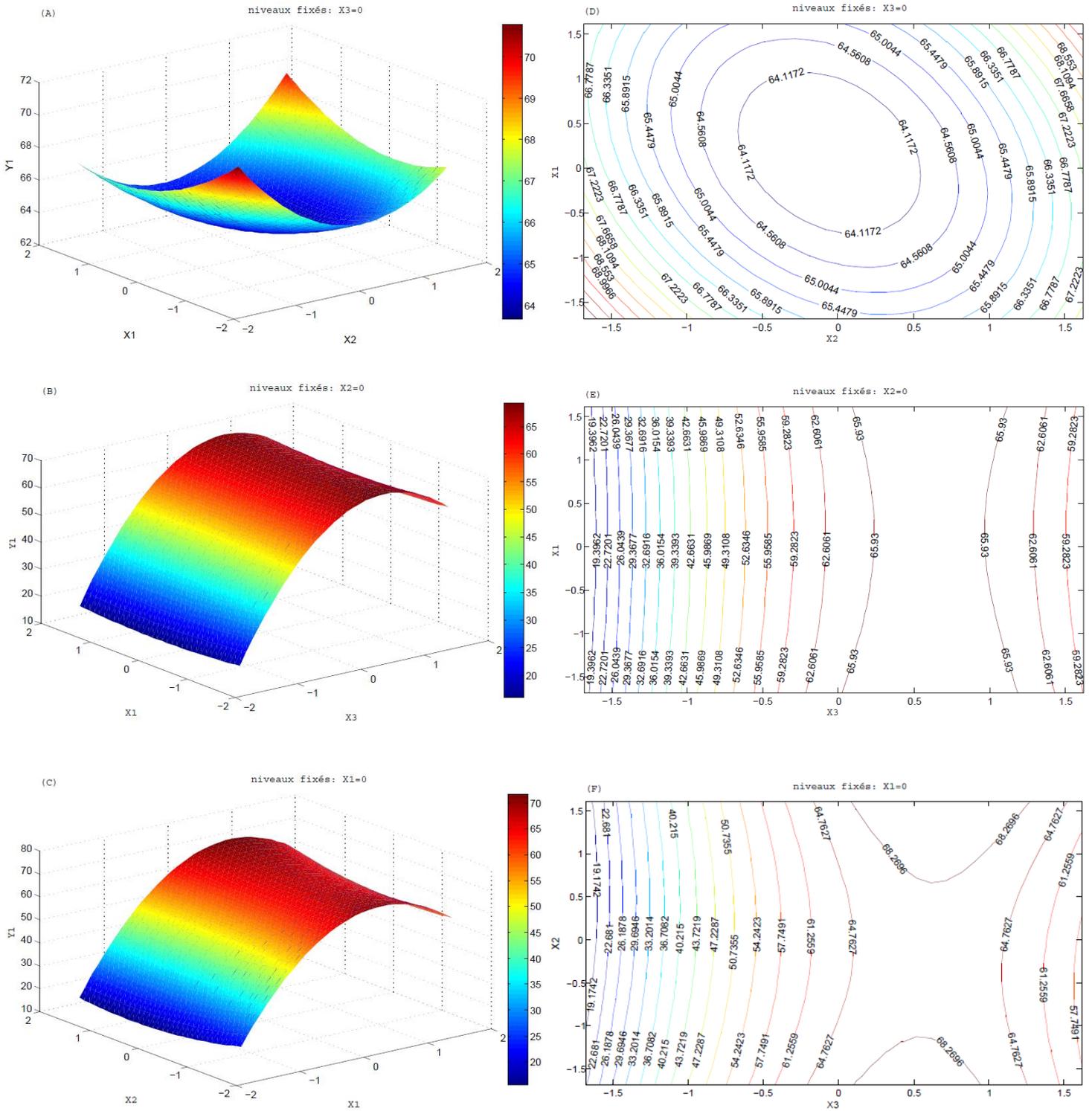


Figure III.2-2. Surfaces de réponses (a-c) et courbes isoplèthes (d-f) montrant l'effet de la température de l'air (X1), la vitesse d'air (X2) et épaisseur de l'échantillon (X3) sur le rapport de déshydratation (Y)

### III.2.4. CONCLUSION

Avec l'avènement des techniques statistiques telles que RSM, la capacité des logiciels à résoudre les problèmes d'optimisation des processus, introduire les caractéristiques des produits et procéder à la conception est devenue nettement plus accessible. Ce n'est pas seulement en raison de la vitesse de l'ordinateur, mais aussi parce que ces techniques permettent de réduire la quantité des données expérimentales nécessaires aux analyses et optimisation. Cela a conduit à une meilleure compréhension des processus à partir des résultats représentés sous la forme de graphiques telles que les surfaces de réponse, les contours 3D, etc. Un dispositif expérimental a été construit selon les conditions de conception optimale de RSM afin d'étudier l'influence des paramètres opératoires sur la teneur en eau réduite. A partir du modèle quadratique de la surface de réponse, nous avons constaté que le taux de déshydratation a été affecté de façon significative par l'épaisseur des échantillons.

## BIBLIOGRAPHIE

- Arima, H.K., Rodriguez-Amaya, D.B. (1988). Carotenoid composition and vitamin A value of commercial Brazilian squashes and pumpkins, *Journal of Micronutrient Analysis* 4 : 177–191.
- Bas, D., Boyaci, I.H. (2007). Modelling and optimization. I. Usability of response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 78: 836–845.
- Dutta, A., Raychaudhuri, U. and Chakraborty, R. (2006). Rheological characteristics and thermal degradation kinetics of beta-carotene in pumpkin puree. *Journal of Food Engineering* 76: 538–546.
- Garcia, C. C., Mauro, M. A., Kimura, M. (2007). Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (*Cucurbita moschata*). *Journal of Food Engineering* 82: 284–291.
- Karim, M.A., Hawlader, M.N.A. (2006). Performance evaluation of a v-groove solar air collector for drying applications. *Applied Thermal Engineering* 26: 121–130.
- Krinsky, N. (1993). Actions de caroténoïdes dans les systèmes biologiques. *Revue annuelle de la nutrition* 13: 561-587.
- Krishnaiah, D., Bono, A., Sarbatly, R., Nithyanandam, R., Anisuzzaman, S.M. (2015). Optimisation of spray drying operating conditions of *Morinda citrifolia* L. fruit extract using response surface methodology. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* 27: 26–36.
- Little, T.M., Hills F.J. (1978) *Agricultural Experimentation Design and Analysis*. John Wiley, New York.
- Mendenhall, W. (1975). *Introduction to Probability and Statistics*, fourth ed. Duxbury Press, North Settuete, MA.
- Murkovic, M., Muller, U. and Neunteufl, H. (2002). Carotenoid content in different varieties of pumpkins. *Journal of Food Composition and Analysis* 15: 633–638.
- Myers, R.H. (1971). *Response Surface Methodology*. Allyn and Bacon, Boston.
- Niu, H., Li, Y., Lei, Y., Zhang, L., Peng, J., Guo, S. (2012). Microwave Drying of Anthracite : A Parameter Optimized by Response Surface Methodology. *Journal Arabe pour la Science & Engineering* 37: 65–73.

## **CHAPITRE III.3.**

### **MODELISATION DU TRANSFERT DE MASSE AU COURS DU PROCESSUS DE REHYDRATATION DES TRANCHES DE CITROUILLE SECHES PAR DIFFERENTES METHODES.**

#### **III.3.1. INTRODUCTION**

Le séchage est un procédé conventionnel de conservation des aliments largement utilisé. De nombreux produits séchés sont consommés ou utilisés pour diverses applications industrielles. Les légumes déshydratés conservent un niveau élevé de leur valeur nutritive et peuvent être utilisés dans une variété de recettes, actuellement, les aliments séchés sont largement utilisés dans les soupes instantanées et les repas prêts à manger. Ainsi, la réhydratation des légumes secs est le processus indispensable pour restaurer les propriétés du produit de base en le faisant tremper dans l'eau de façon à ce que le produit final ressemble à la matière première initiale [Krokida et al., 2005]. Plusieurs nouvelles méthodes de déshydratation alimentaire ont été proposées au cours des dernières années. L'objectif de ces développements est de produire des aliments déshydratés de haute qualité à un coût relativement faible. Les aliments déshydratés devraient se reconstituer facilement lors de la réhydratation à un produit ressemblant étroitement à la matière fraîche.

Le séchage par air chaud, est l'un des méthodes les plus économiques de déshydratation alimentaire, requiert des températures élevées et de longues périodes, et le produit résultant a de mauvaises propriétés de réhydratation. Cette faible qualité de produit est principalement due à la texture très compacte résultant du phénomène de retrait. En effet, la température de transition vitreuse n'ayant pas lieu pendant la phase principale du processus de séchage, le produit rétrécit en perdant de l'eau. De plus, la structure compacte réduit considérablement la vitesse de séchage, entraînant ainsi une importante dégradation thermique et une perte de vitamines, de couleur et de saveur [Mounir et al., 2012].

En congelant le matériau à haute teneur en eau initial, la lyophilisation est la seule opération de séchage capable de maintenir la structure pendant la première étape de déshydratation (sublimation). Une partie principale de la deuxième étape de désorption est réalisée à une température inférieure à la transition vitreuse. La lyophilisation est définie comme l'opération de déshydratation capable de remplacer l'eau par l'air sans aucun processus de rétrécissement, conduisant ainsi à un matériau séché à haute porosité. Ainsi, le matériau lyophilisé obtient le comportement de réhydratation le plus adéquat [Caparino et al., 2012]. En outre, la lyophilisation (FD) est généralement réalisée sous une pression absolue inférieure à 620 Pa [Tolède, 2007] en utilisant à la fois des niveaux de sublimation et de désorption à basse température sans passage à l'état liquide et évitant la détérioration de la qualité du produit. La FD est généralement considérée comme la meilleure méthode de production d'aliments secs de haute qualité [Ratti, 2001]. Mais cette approche souffre de l'inconvénient d'un coût de production élevé résultant d'une consommation d'énergie élevée, d'un traitement à long terme et d'une faible efficacité [Ratti, 2001 ; Hsu et al., 2003 ; Speranza et al., 2017].

Deux technologies récemment développées ont été introduites pour la déshydratation des fruits et légumes. Il s'agit du séchage par SD qui combine l'utilisation d'une texturation instantanée contrôlée (DIC) entre deux étapes de séchage traditionnel par AFD et le procédé de Déshydratation par Détentes Successives (DDS) ou le procédé de déshydratation sous vide multi-flash VMFD. Ces deux technologies se distinguent par leur capacité à gérer une large gamme de produits alimentaires, quelle que soit leur sensibilité à la chaleur. Le matériau séché par SD à texture contrôlée permet d'atteindre rapidement et profondément la phase finale du processus de séchage, réduisant ainsi la consommation d'énergie et réduisant les coûts de fabrication. De plus, grâce à une telle texture poreuse, le processus de réhydratation doit être réalisé rapidement. Ce procédé a été utilisé dans les produits à base de viande, les algues, les fruits de mer et les légumes. La structure texturée bien contrôlée réduit la durée de séchage et engendre une amélioration nette des utilisations finales de la qualité du produit. La teneur en vitamines du produit est beaucoup plus élevée que celle des produits séchés conventionnellement et légèrement inférieurs aux produits lyophilisés. Cependant, la disponibilité des flavonoïdes et l'activité antioxydante sont souvent beaucoup plus élevées que celles existant dans la matière première brute elle-même. De plus, la texturation DIC au sein du SD permet également au produit de préserver la couleur et la saveur, tandis que les paramètres de traitement DIC peuvent être définis de manière à impliquer une décontamination microbienne pertinente. En outre, les produits DIC ont normalement une durée de vie plus longue en raison de l'absence d'insectes et de larves ; le stockage peut dépasser un et même deux ans [Allaf et al., 2014a].

La technologie de séchage sous vide multi-flash (VMFD) convient aux matériaux thermosensibles. Des variations cycliques de pression sont produites à l'intérieur d'un récipient de traitement afin : i) de fournir plus d'air pour la même quantité de matière humide ; ii) modifier la structure poreuse du matériau pour améliorer la cinétique de séchage ; Et iii) dans certains cas (lorsque le vide est établi), réduire la température d'évaporation de l'eau, permettant l'élimination de l'eau par "auto-évaporation". La technologie de séchage VMFD a été évaluée et mise en place pour des légumes sensibles à la chaleur [Louka et al., 2004a, Louka et al., 2004b ; Mounir et al., 2011], préparation d'un snack, etc. Le VMFD [Mounir et al., 2012] induit un produit déshydraté de haute qualité avec une plus grande conservation des nutriments, une moindre dégradation de la couleur, de la texture, etc., et une cinétique plus élevée de séchage et de réhydratation [Gutierrez-Pacheco et al., 2016 ; Sehwat et al., 2016].

La réhydratation est un processus complexe qui vise à restaurer les propriétés alimentaires initiales. Comme il dépend de la qualité intrinsèque des matières séchées, il peut être considéré comme une mesure des dommages infligés au produit pendant le processus de séchage [Krokida et al., 1999, Bilbao-Sáinz et al., 2005]. La réhydratation des tissus végétaux séchés se fait en trois étapes simultanées : 1/ le trempage des matières séchées dans un récipient d'eau, 2/ le gonflement des produits réhydratés 3/ le lavage des composés solubles dans le milieu de réhydratation [Krokida et Marinos-Kouris 2003 ; Lee et al., 2006].

En raison de la grande variété d'aliments déshydratés disponibles pour le consommateur et de la nécessité de satisfaire aux normes de qualité alimentaire tout en réduisant la consommation

d'énergie, une parfaite compréhension des processus concernés est nécessaire pour obtenir leur optimisation parfaite [Vega-Gálvez et al., 2009]. Par conséquent, les modèles mathématiques sont des outils importants pour concevoir et optimiser les opérations d'hydratation et de réhydratation. Plusieurs modèles empiriques existent pour modéliser la cinétique de transfert de masse pendant le processus de réhydratation. Récemment, de nombreux chercheurs ont appliqué ces modèles en raison de leur simplicité, de leur utilité mathématique et de leur facilité d'utilisation. Leurs résultats ont été utiles pour l'optimisation du processus lui-même. Les produits alimentaires étudiés comprennent les figues [Ansari et al., 2015], *Morchella esculenta* (Morel) [Garcia-Pascual et al., 2006], les coings [Noshad et al., 2011], les chips de manioc [Athanasia et al., 2009 ; Ajala et al., 2015], le basilic [Demirhan et al., 2010], le champignon shiitake (*Lentinus edodes*) [García-Segovia et al., 2011], le carassin [Planinic et al. 2005], le poivron rouge [Demiray et al., 2017], les lentilles culinaires [Oroian, 2017], les céréales de petit déjeuner de farine de tef [Solomon, 2008], les papayes chiliennes [Zura et al., 2013] et les cubes de pommes de terre [Salimi Hizaji et al., 2011], des cylindres de pommes de terre [Cunningham et al., 2008], des tranches de pommes de terre [Ghosh et al., 2004], des tranches d'oignon [Debnath et al., 2004] et des tranches de pommes (granny smith) [Zura-Bravo et al., 2013b].

Le but de ce travail était d'étudier l'influence de la température de l'eau sur la cinétique de réhydratation des tranches de citrouille déshydraté par quatre méthodes de séchage différentes (AFD, VMFD, SD combinant AFD + DIC + AFD et FD) afin d'appréhender et de bien décrire le processus.

### III.3.2. MATERIELS ET METHODES

#### III.3.2.1. Préparation des échantillons (voir III.1.2.1, Préparation des échantillons)

#### III.3.2.2. Méthodes de séchage

Les tranches de citrouille ont été disposées en quatre lots (Figure III.3-1) ; 1/ le premier lot est réservé au séchage par flux d'air chaud (AFD), 2/ le second sert à sécher par détentes successives (VMFD), tandis que 3/ le troisième est réservé au SD (AFD + DIC + AFD) et 4/ réalisée par lyophilisation.

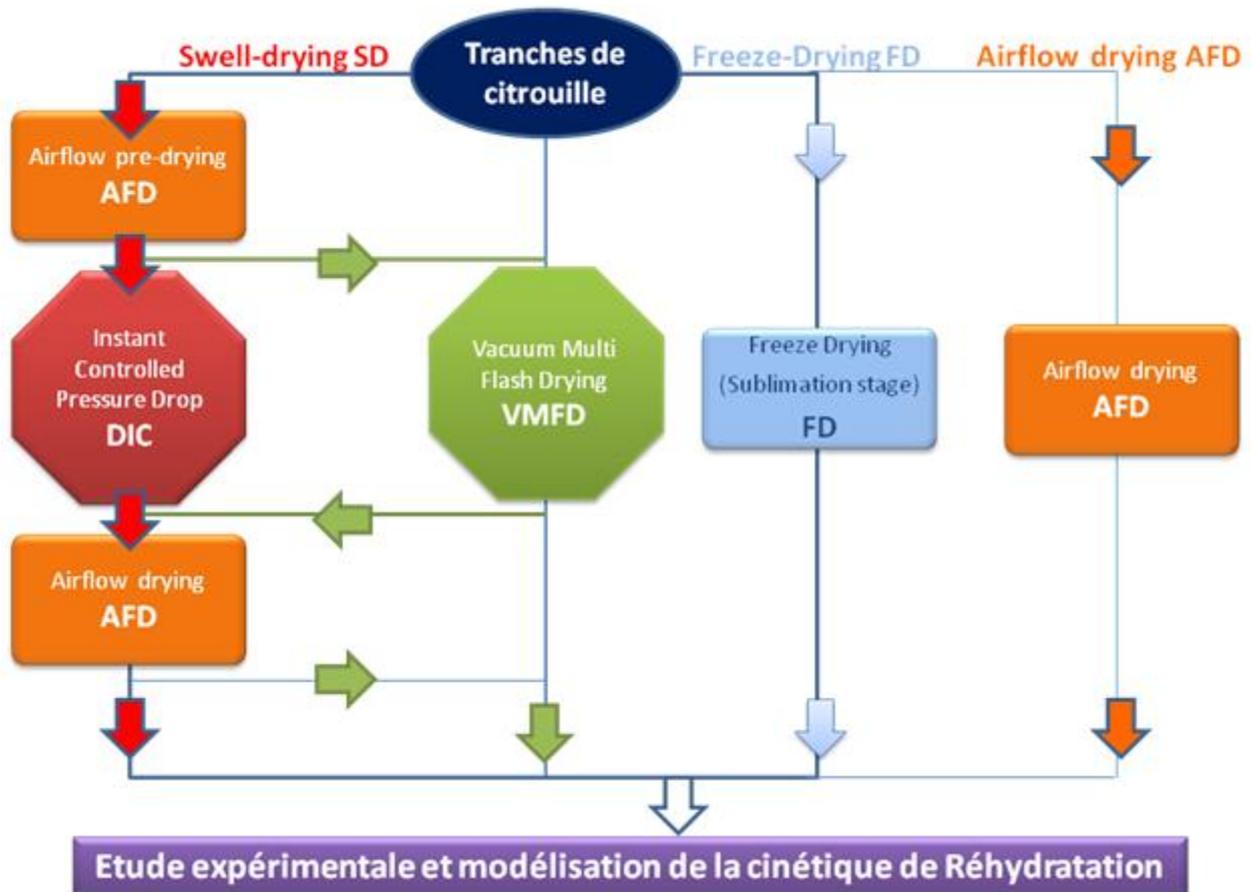


Figure III.3-1. Schéma des méthodes de traitement et d'évaluation adoptées pour les tranches de citrouille séchées.

#### i. Séchage convectif par air chaud

Les tranches de citrouille ont été séchées dans un séchoir à air chaud (Memmert : Four universel UNB Model 800) à 60 °C. Ce flux d'air avait une pression de vapeur initiale de 265 Pa et une vitesse d'environ 1,2 m/s. Les tranches ont été séchées jusqu'à une teneur en eau d'environ 0,03 g H<sub>2</sub>O/g db. Ensuite, les échantillons ont été enfermés dans des sacs hermétiques.

#### ii. Séchage par lyophilisation

L'équipement de lyophilisation (SubliMate® BENCH TOP LABORATORY FREEZE DRYERS) a été utilisé pour sécher les tranches de citrouille. Le processus a été réalisé en trois étapes différentes ; i/

congélation dans un congélateur à chambre (Whirlpool AFG 363 / G) à  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  et maintenu pendant 10 h, ii/ sublimation à 7,4 Pa sous pression absolue avec un piège à basse température ( $-52,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), et iii/ étape de séchage final de dessiccation ou de désorption secondaire pendant une période de 48h. Par la suite, les échantillons lyophilisés ont été placés dans des sacs hermétiques.

*iii. Swell-Drying SD en insérant une chute de pression contrôlée instantanée (DIC) entre deux étapes de l'AFD*

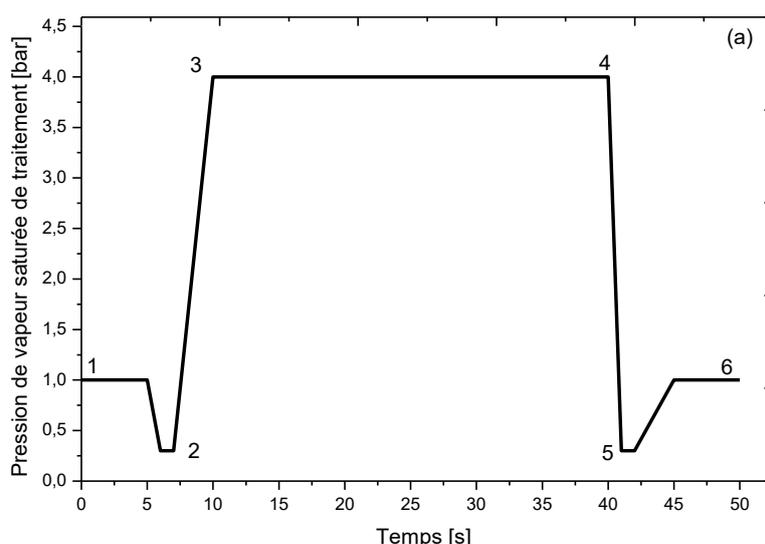
Le séchage par « Swell-Drying » SD comprenant une étape de texturation DIC a été réalisé avec ;

i/ une première étape de séchage par air chaud AFD à  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  avec 265 Pa comme débit d'air à pression de vapeur initiale et vitesse d'environ 1,2 m/s jusqu'à 0,18 g H<sub>2</sub>O/g db : Ces tranches partiellement séchées ont été enfermées dans des sacs hermétiques et stockées dans un réfrigérateur à  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant 24 heures pour rendre leur teneur en eau le plus homogène possible à 18% db, ce qui correspond au niveau d'humidité approprié pour permettre au processus de texturation DIC d'être adapté à la citrouille.

ii/ processus de texturation DIC : cycle DIC (Figure III.3-2 (a)) démarré par un étage sous vide de 5 kPa en pression absolue (1→2). Cela facilite le contact étroit entre la vapeur et la surface de l'échantillon. Par la suite, de la vapeur saturée a été injectée dans le réacteur jusqu'à une pression absolue de 0,40 MPa (2→3). Ce niveau de vapeur à haute pression a été maintenu pendant 30 s (3→4). Cette étape haute température/haute pression s'est terminée en libérant instantanément la pression vers un vide de (5 kPa) avec un taux de chute de pression  $\Delta P / \Delta t > 0,5\text{ MPa s}^{-1}$  (4→5).

Finalement, la pression a été relâchée et réglée à son niveau atmosphérique (5→6) pour permettre la récupération des échantillons texturés DIC ;

iii/ Post-séchage en utilisant un procédé AFD, à  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant environ 3 h afin d'obtenir une teneur en eau finale de l'ordre de 0,03 g H<sub>2</sub>O/g db. Ces échantillons ont été conservés dans des sacs hermétiques.



**Figure III.3-2. Schéma de cycle DIC (Détente Instantanée Contrôlée) ; 1-2 : vide initial 5 kPa ; 2-3 : injection de vapeur ; 3-4 : Maintien de la pression de vapeur à la pression de vapeur saturée de traitement ; 4-5 : Chute de pression instantanée vers le vide ; 5-6 : Relâchement vers la pression atmosphérique.**

#### iv. Déshydratation par Détentes Successives (VMFD séchage sous vide multi-flash)

Le processus Vacuum Multi-Flash Drying VMFD est une simple succession de cycles DIC à basse température. Chaque cycle VMFD est identique au processus DIC (Figure III.3-3). Le lot de tranches de citrouille a été partiellement séché avec un débit d'air de 18% db dans des conditions similaires à celles décrites dans le procédé AFD. Par la suite, les tranches ont été placées dans des sachets hermétiques et conservées au réfrigérateur à 4 °C pendant 24 h afin d'obtenir une grande homogénéité en termes de teneur en eau (environ 0,18 g H<sub>2</sub>O/g db). Ensuite, ces tranches partiellement séchées ont été soumises à une unité VMFD entièrement automatisée (procédé ABCAR-VMFD, La Rochelle, France).

L'étude du processus VMFD a nécessité des répétitions de 50 cycles. Les paramètres de chaque cycle VMFD ont été automatisés comme suit : Le niveau de pression d'air le plus élevé a été maintenu à  $P^+ = 300$  kPa pendant environ  $t^+ = 10$  s et s'est terminé par une chute de pression instantanée vers un niveau de vide de 5 kPa. Le produit est maintenu pendant environ  $t^- = 40$  s à la plus basse pression de gaz. Après le procédé VMFD, un séchage par convection avec de l'air chaud à 60 °C pendant une période d'environ 3 h suit afin d'obtenir une teneur finale en eau de l'ordre de 0,03 g H<sub>2</sub>O / g de db. Ces échantillons ont été conservés dans des sacs hermétiques.

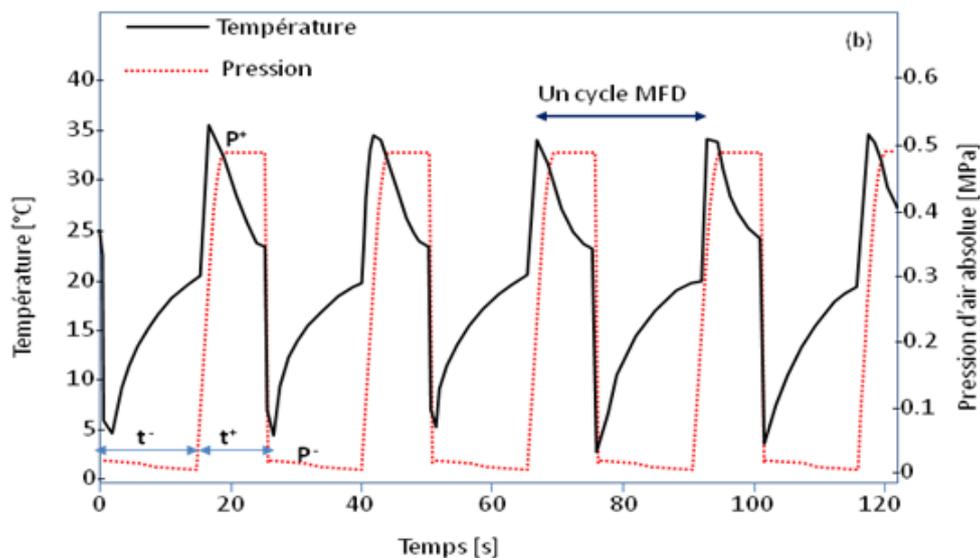


Figure III.3-3. Schéma de cycle de séchage sous vide multi-flash MFD ; Nombreux cycles de haute pression d'air  $P^+$  pendant un temps de haute pression  $t^+$  suivi d'une chute de pression instantanée vers une pression de vide  $P^-$  retenue pendant un temps de faible pression  $t^-$ .

### III.3.3. EXPERIENCE DE REHYDRATATION

Des expériences de réhydratation ont été réalisées dans un bain d'eau chaude distillée. Trois béchers de 400 ml chacun ont été remplis d'eau distillée utilisée pour tremper 2 g de tranches d'échantillons de citrouille séchés suivant l'un des procédés de séchage décrits ci-dessus. Trois niveaux de température différents ont été adoptés à l'aide d'un bain-marie (MEMMERT, type : WNB 22 F. Nr. : L509.0447) 30, 45 et 60 °C respectivement pendant une durée appropriée. Le poids des échantillons a été enregistré toutes les 5 minutes pendant les 30 premières minutes, toutes les 10 minutes pendant les secondes 30 minutes et toutes les 30 minutes jusqu'à ce que l'équilibre de

transfert de masse soit atteint. Ces expériences ont été menées avec trois répétitions pour tous les échantillons séchés. La teneur en eau de chaque échantillon a été déterminée selon la norme conventionnelle [AOAC, 1990] en utilisant un four de séchage et une balance analytique de haute précision (0,0001 g) (KERN & Sohn GmbH, type : ABJ 220-4NM). Les expériences ont également été triplées.

Le taux de réhydratation peut être exprimé comme suit [Marabi et al., 2004] :

$$RR = \frac{M_t - M_0}{M_e - M_0} \quad (\text{Eq. III.3-1.})$$

où  $M_t$ ,  $M_0$  et  $M_e$  sont la teneur en eau à l'instant  $t$ , la teneur en eau initiale et la teneur en eau à l'équilibre, respectivement ; exprimé en % base sèche db or g H<sub>2</sub>O/g db.

### III.3.3.1. Modélisation de la cinétique de réhydratation

#### *i. Modèle phénoménologique de diffusion*

Bien que l'analyse phénoménologique de la réhydratation repose principalement sur la diffusion de l'eau à l'intérieur de la matrice solide, il n'est pas facile de l'étudier. En effet, il peut se produire avec diverses interactions entre l'eau et la matrice solide, avec une diffusivité éventuellement anisotrope selon différentes directions. Pour être plus précis, lorsque l'eau pénètre dans la matrice des tranches, le sucre et d'autres substances solubles peuvent être dissous. Bien que dans le cas particulier des citrouilles, on puisse supposer que pendant la période de réhydratation, la diffusion de l'eau dans les tranches est la cinétique la plus importante et la dissolution de certains composés est insignifiante et négligeable. Ainsi, on peut supposer que la cinétique de réhydratation est contrôlée par le transport le plus simple de l'eau de la surface vers le noyau de la tranche avec une diffusion isotrope et homogène à valeur de diffusivité constante. De plus, les tailles de la matrice ont été supposées rester constantes pendant la réhydratation. Par conséquent, le taux de transfert de masse par diffusion pure est proportionnel au gradient de concentration de la teneur en eau, avec le coefficient de diffusion effective. Ainsi, la détermination de ce dernier coefficient est essentielle pour mieux décrire le transfert de masse en utilisant la loi de Fick similaire, dont l'équation est exprimée par [Vasić et al., 2016] :

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \nabla [D_{eff} \nabla MR] \quad (\text{Eq. III.3-2.})$$

En supposant que la valeur de  $D_{eff}$  est constante, il est possible d'obtenir :

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 MR \quad (\text{Eq. III.3-3.})$$

La tranche de citrouille peut être considérée comme une plaque uniforme soumise à un régime graduel non stationnaire avec une distribution initiale uniforme et des concentrations égales à la surface. En supposant que la matrice est une plaque infinie indéformable (rétractable négligeable ou étendue) avec une répartition uniforme de l'humidité initiale, une résistance externe négligeable

et une diffusivité constante, la solution analytique de la deuxième loi de Fick a été développée par Crank [Crank, 1975] :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t / 4L^2) \quad (\text{Eq. III.3-4.})$$

où :  $D_{eff}$  est la diffusivité effective (en  $m^2/s$ ),  $t$  est le temps (en s),  $L$  est la demi d'épaisseur de la tranche (en m) et  $n$  est un entier positif.

Pour un temps de traitement suffisamment long, tous les termes de la séquence suivante ( $n \geq 1$ ) ont été considérés comme négligeables par rapport au premier terme. Donc l'équation (Eq. III.3-5) peut être supposée comme suit :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp(-\pi^2 D_{eff} t / 4L^2) \quad (\text{Eq. III.3-6.})$$

L'équation (Eq. III.3-5) peut être réarrangée et exprimée comme suit :

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \pi^2 D_{eff} t / 4L^2 \quad (\text{Eq. III.3-7.})$$

Les valeurs de données expérimentales de séchage sont représentées en termes de  $\ln(MR)$  en fonction du temps de réhydratation pour différentes températures. La diffusivité effective est calculée comme suit :

$$\text{Slope}(k) = -\pi^2 D_{eff} / 4L^2 \quad (\text{Eq. III.3-8.})$$

L'influence de la température sur la diffusivité effective peut être exprimée selon le modèle de l'équation d'Arrhenius :

$$D_{eff} = D_{eff_0} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{Eq. III.3-9.})$$

Où  $D_{eff_0}$  est le coefficient de diffusion initial (en  $m^2/s$ ),  $E_a$  est l'énergie d'activation de la réaction de diffusion (en J/mole),  $R$  est la constante des gaz parfaits (en J/mole.K) et  $T$  c'est la température (en Kelvin).

## ii. Modèles empiriques

Plusieurs modèles sont utilisés pour modéliser le processus de réhydratation. Parmi les différents modèles proposés jusqu'ici, les modèles empiriques sont les plus utilisés en raison de leur simplicité et de leur utilité mathématiques [Moreira et al., 2008]. En particulier, quatre modèles empiriques ont été utilisés pour décrire la cinétique de réhydratation (Tableau III.3-1). Le modèle proposé par Peleg (1988) (Eq. (III.3.9)) est une équation à deux paramètres, non exponentielle, utilisée pour décrire la cinétique de réhydratation. Le modèle de Peleg a été appliqué à la réhydratation pour différents types de produits alimentaires [Moreira et al., 2008]. La distribution de Weibull (Eq. (III.3.10)), qui décrit le processus comme une séquence d'événements probabilistes, a trouvé une

large application dans la transformation des aliments et a été proposée par plusieurs auteurs pour le processus de réhydratation [García-Pascual et al., 2006 ; Mujaffar et al., 2017]. Le modèle exponentiel (Eq. (III.3.11)) [Saguy et al., 2005] et le modèle du premier ordre (Eq. (III.3.12)) [Krokida et al., 2003].

**Tableau III.3-1. Modèles empiriques fréquemment utilisés pour la cinétique de réhydratation**

N° du Modèle	Modèle	Équations
01	Peleg Model	$RR = \frac{1}{X_e - X_0} \times \frac{t}{(K_1 + K_2 t)}$ (Eq. III.3-10.)
02	Weibull Model	$RR = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{B}\right)^A\right)$ (Eq. III.3-11.)
03	Exponential Model	$RR = 1 - \exp(-Kt^n)$ (Eq. III.3-12.)
04	First order Model	$RR = 1 - \exp(-Ht)$ (Eq. III.3-13.)

### iii. Analyse statistique des données

Dans le cas des tranches de citrouille, les résultats expérimentaux de réhydratation obtenus à trois températures ; 30, 45 et 60 °C ont été utilisés pour étudier, analyser, évaluer les paramètres du modèle et identifier le modèle le plus pertinent entre ces équations phénoménologiques (Eq. (III.3.2)) et les 4 équations mathématiques empiriques (Eq. (III.3.9- III.3.12)). La régression non-linéaire a été employée avec la procédure de Levenberg-Marquardt. Tableau III.3-2, Tableau III.3-3, Tableau III.3-4 et Tableau III.3-5 présentent les valeurs de ces paramètres en utilisant le coefficient statistique de détermination ( $R^2$ ), le test statistique khi-carré ( $\chi^2$ ) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE), respectivement définis comme suit [Darvishi et al., 2013] :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (RR_{exp,i} - RR_{pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{RR}_{exp} - RR_{exp,i})^2} \quad (\text{Eq. III.3-14.})$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (RR_{exp,i} - RR_{pré,i})^2}{N - n} \quad (\text{Eq. III.3-15.})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (RR_{pré,i} - RR_{exp,i})^2}{N}} \quad (\text{Eq. III.3-16.})$$

avec :

$$\overline{RR}_{exp} = \frac{\sum_{i=1}^N RR_{exp,i}}{N}$$

où  $RR_{exp}$  est le taux de réhydratation expérimentale,  $RR_{pré}$  est le taux de réhydratation prédite, N est le nombre de points expérimentaux.

### III.3.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### III.3.4.1. Effet des différentes méthodes de séchage sur la cinétique de réhydratation

Le processus de déshydratation peut entraîner des changements dans la structure (rétrécissement), le comportement rhéologique et la composition chimique des tissus végétaux [Lewicki, 1998]. La réhydratation étant un processus complexe visant à restaurer les propriétés des produits bruts une fois que le produit séché est mis en contact avec l'eau et la vapeur d'eau, la réhydratation peut être considérée comme une mesure des blessures causées par le séchage et d'autres procédures de prétraitement. Les données expérimentales montrent que le comportement du produit séché pendant la réhydratation dépendait de la méthode de séchage. Les courbes a, b, c et d de la Figure III.3-4 montrent la cinétique de réhydratation des tranches de citrouille à différents niveaux de température pour différentes méthodes de séchage (AFD, VMFD, SD et FD).

Quelles que soient les températures de réhydratation, les tranches de citrouille séchées par SD et VMFD présentaient un taux de réhydratation supérieur à celles séchées par AFD, mais inférieur à celles séchées par FD. On a également constaté que les produits séchés/texturés par DIC présentaient une diffusivité effective de réhydratation supérieure à celle des matières séchées par AFD et VMFD, mais inférieure à celle des matières séchées par FD (Tableau III.3-2, Tableau III.3-3, Tableau III.3-4 et Tableau III.3-5). La porosité des deux échantillons séchés par SD et FD était beaucoup plus grande que les tranches partiellement compactes séchées par flux d'air chaud AFD. Ainsi, le mauvais comportement de réhydratation est attribué aux échantillons séchés par AFD car il est corrélé avec le rétrécissement et la dégradation thermique due au long processus de séchage à haute température.

*Tableau III.3-2. Tests statistiques des modèles sélectionnés utilisés pour simuler les courbes de réhydratation des tranches de citrouille pour le séchage par flux d'air chaud (AFD).*

Température [°C]	Modèles	Paramètres		R <sup>2</sup>	RMSE	X <sup>2</sup>
		P1	P2			
30	Modèle Peleg	11,32401	0,1190	0,9570	0,0625	0,0039
	modèle Weibull	67,37891	0,9851	0,9523	0,0658	0,0043
	modèle Exponentiel	0,01597	0,9825	0,9523	0,0658	0,0043
	modèle 1 <sup>er</sup> ordre	0,0149		0,9522	0,065	0,0042
45	Modèle Peleg	8,7714	0,2457	0,9780	0,0482	0,0023
	modèle Weibull	34,44678	1,0460	0,9894	0,0334	0,0011
	modèle Exponentiel	0,02482	1,0443	0,9894	0,0334	0,0011
	modèle 1 <sup>er</sup> ordre	0,02891		0,9889	0,0338	0,0011
60	Modèle Peleg	20,77093	0,7905	0,9735	0,0513	0,0026
	modèle Weibull	25,89106	0,9568	0,9761	0,0487	0,0024
	modèle Exponentiel	0,04474	0,9549	0,9761	0,0487	0,0024
	modèle 1 <sup>er</sup> ordre	0,0386		0,9756	0,0485	0,0023

**Tableau III.3-3. Tests statistiques des modèles sélectionnés utilisés pour simuler les courbes de réhydratation des tranches de citrouille pour le séchage sous vide Multi-Flash (VMFD)**

Température [°C]	Modèles	Paramètres		R <sup>2</sup>	RMSE	X <sup>2</sup>
		P1	P2			
30	Modèle Peleg	13,19997	0,18744	0,90495	0,10626	0,01129
	modèle Weibull	1,06904	52,96386	0,90662	0,10532	0,01109
	modèle Exponentiel	0,01442	1,0678	0,90662	0,10532	0,01109
	modèle 1 <sup>er</sup> ordre	0,01873		0,90543	0,10478	0,01098
45	Modèle Peleg	9,13342	0,2253	0,96312	0,06272	0,00393
	modèle Weibull	0,99603	38,2697	0,96791	0,0585	0,00342
	modèle Exponentiel	0,02673	0,9937	0,96791	0,0585	0,00342
	modèle 1 <sup>er</sup> ordre	0,02614		0,96791	0,05775	0,00333
60	Modèle Peleg	5,71395	0,27278	0,98536	0,03868	0,0015
	modèle Weibull	0,97701	23,35104	0,99442	0,02387	5,697E-4
	modèle Exponentiel	0,04621	0,97582	0,99442	0,02387	5,6973E-4
	modèle 1 <sup>er</sup> ordre	0,0428		0,9943	0,02379	5,6583E-4

**Tableau III.3-4. Tests statistiques des modèles sélectionnés utilisés pour simuler les courbes de réhydratation des tranches de citrouille pour le séchage par swell-drying (SD)**

Température [°C]	Modèle	Paramètres		R <sup>2</sup>	RMSE	X <sup>2</sup>
		P1	P2			
30	Modèle Peleg	13,68506	0,40253	0,98082	0,0394	0,00155
	modèle Weibull	0,76938	40,70681	0,98477	0,03512	0,00123
	modèle Exponentiel	0,05804	0,76795	0,00123	0,98477	0,03512
	modèle 1 <sup>er</sup> ordre	0,02531		0,95987	0,05624	0,00316
45	Modèle Peleg	7,8723	0,30853	0,96386	0,05333	0,00284
	modèle Weibull	0,70271	37,54167	0,96818	0,05004	0,0025
	modèle Exponentiel	0,07836	0,70237	0,96818	0,05004	0,0025
	modèle 1 <sup>er</sup> ordre	0,02793		0,9218	0,07735	0,00598
60	Modèle Peleg	5,44888	0,29075	0,97543	0,04654	0,00217
	modèle Weibull	0,82694	23,75534	0,97764	0,0444	0,00197
	modèle Exponentiel	0,07285	0,82687	0,97764	0,0444	0,00197
	modèle 1 <sup>er</sup> ordre	0,04177		0,96859	0,05188	0,00269

**Tableau III.3-5. Tests statistiques des modèles sélectionnés utilisés pour simuler les courbes de réhydratation des tranches de citrouille pour le séchage par lyophilisation (FD)**

Température [°C]	Modèle	Paramètres		R <sup>2</sup>	RMSE	X <sup>2</sup>
		P1	P2			
30	Modèle Peleg	2,10712	0,34876	0,95554	0,0542	0,00294
	modèle Weibull	0,44801	11,44136	0,97463	0,04094	0,00168
	modèle Exponentiel	0,33586	0,44774	0,97463	0,04094	0,00168
	modèle 1 <sup>er</sup> ordre	0,06881		0,81541	0,10897	0,01187
45	Modèle Peleg	0,62186	0,22501	0,86265	0,10808	0,01168
	modèle Weibull	0,40926	3,87156	0,86766	0,10609	0,01126
	modèle Exponentiel	0,57481	0,40914	0,86766	0,10609	0,01126
	modèle 1 <sup>er</sup> ordre	0,1533		0,79804	0,12912	0,01667
60	Modèle Peleg	1,63975	0,31507	0,98263	0,03944	0,00156
	modèle Weibull	0,71814	7,55543	0,9833	0,03867	0,0015
	modèle Exponentiel	0,23408	0,71807	0,9833	0,03867	0,0015
	modèle 1 <sup>er</sup> ordre	0,11884		0,96847	0,05227	0,00273

En effet, de nombreux travaux de recherche ont prouvé qu'un processus de réhydratation plus rapide peut résulter d'un temps de séchage plus faible et d'un rétrécissement minimal [Cano-Chauca et al., 1974]. La texture poreuse et probablement des cellules ouvertes de matériaux traités

par DIC conduisent à une plus grande diffusivité de l'eau et donc à un temps de séchage et de réhydratation plus faible. Il est généralement admis que le degré de réhydratation dépend du taux de déformation de la structure cellulaire.

Pendant le séchage, nous avons observé une déformation irréversible et une dislocation des cellules. Cela induit une perte d'intégrité et donc une structure dense de capillaires effondrés, et un fort retrait. Ces propriétés hydrophiles réduites se traduisent par une capacité plus faible à absorber suffisamment d'eau requise pour une réhydratation complète [Jayaraman et al., 1990].

La capacité de reconstituer sous forme de morceaux dépend principalement de la structure interne et de la composition chimique des matériaux séchés. Cela dépend aussi des dommages possibles que le séchage peut produire sur les constituants principaux capables de retenir l'eau (Protéines et Amidon) [Bremman et al., 1990].

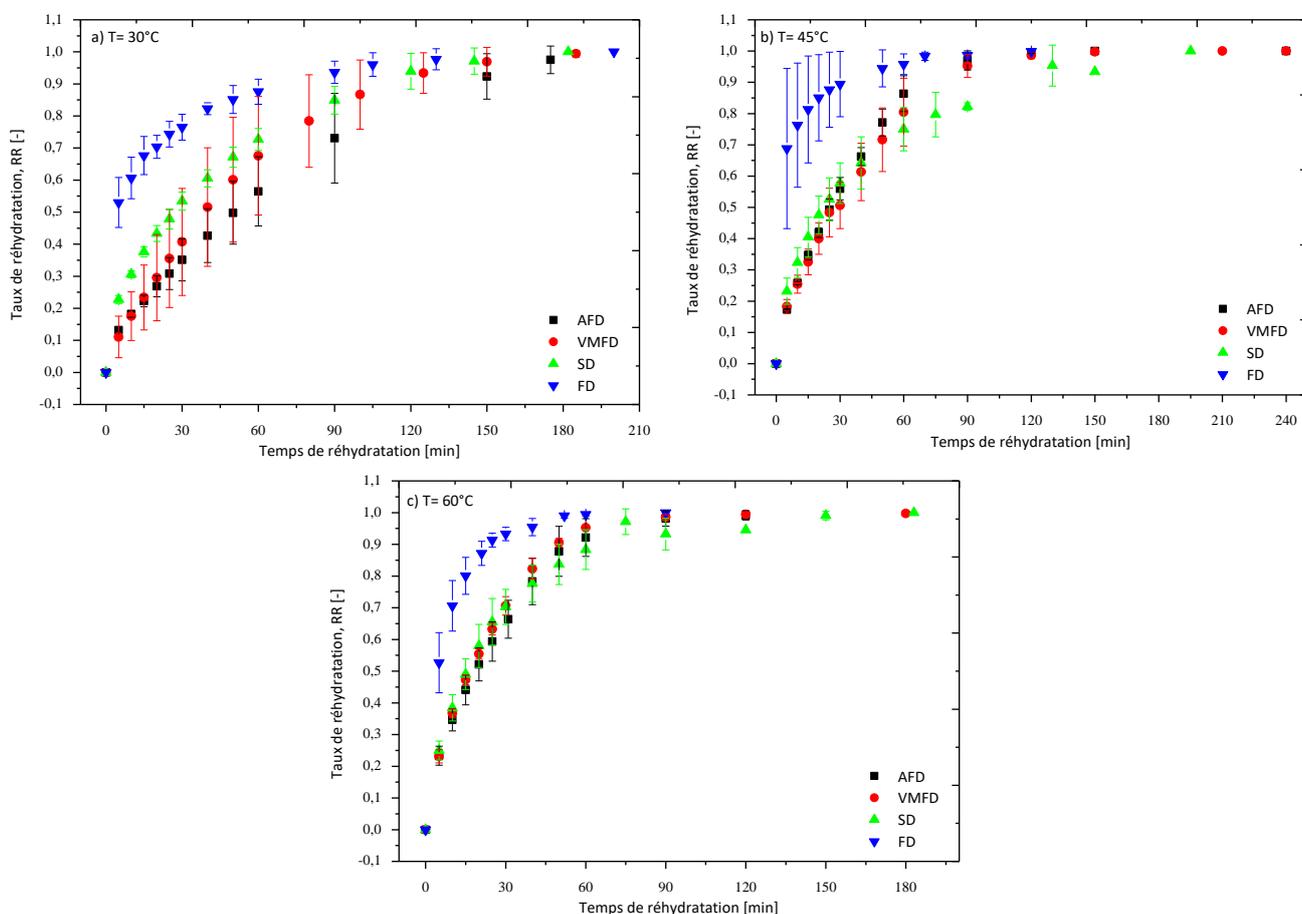


Figure III.3-4. Courbes de réhydratation du séchage par flux d'air chaud (AFD), du séchage sous vide multi-flash (VMFD), du séchage par gonflement (SD) et de la lyophilisation (FD) à : (a) 30, (b) 45 et (c) 60 °C.

Maritza et al. [Maritza et al., 2012] ont mené une étude sur l'effet de différents processus de séchage sur les propriétés physiques et chimiques des fraises (*Fragaria var. Camarosa*). On peut déduire de cette étude que le traitement DIC a eu un impact énorme sur la cinétique de séchage et les performances comparées à celles du séchage par air chaud classique (AFD). En outre, la texture modifiée améliore significativement la réhydratation. Des études mettant en corrélation la durée et la sévérité du processus de séchage avec la vitesse et le degré de réhydratation indiquent une

réhydratation plus rapide et plus complète avec une diminution du temps de séchage [Okos et al., 1992 ; McMinn et al., 1997]. Ceci reflète une minimisation du retrait et donc de la présence de vides intercellulaires bien définis Pour promouvoir des taux de réhydratation accrus [Krokida et al., 2005]. En d'autres termes, le taux de réhydratation peut être utilisé comme indice de qualité alimentaire. Le produit séché dans les conditions optimales de SD (AFD + DIC + AFD) et de FD réduit la dégradation de la structure et de la composition, ce qui permet une réhydratation plus rapide et plus complète par rapport aux produits séchés conventionnellement [Chung et al., 2015].

### III.3.4.2. Modélisation des courbes de réhydratation

#### i. Modèle phénoménologique de diffusion

La diffusivité effective des tranches de citrouille séchées par différents procédés a été évaluée selon l'équation (Eq. III.3-6), en supposant que l'épaisseur  $L$  est maintenue constante sur tout le processus de réhydratation. Les courbes typiques de  $\ln((M(t) - M_e)/(M_0 - M_e))$  en fonction du temps  $t$  pour la réhydratation des tranches de citrouille séchées en utilisant différentes méthodes sont représentées sur la Figure III.3-5. A partir de la pente de chaque courbe, on peut mesurer la diffusivité effective de chaque échantillon. Ces valeurs estimées à savoir  $D_{eff_1}$ ,  $D_{eff_2}$  et  $D_{eff_3}$  sont présentées dans les tableaux (Tableau III.3-2, Tableau III.3-3, Tableau III.3-4 et Tableau III.3-5).

Aux trois températures de réhydratation, les tranches de citrouille séchées par FD, SD et VMFD présentaient des diffusivités plus élevées que celles des échantillons séchés par AFD. Nous avons également observé que les courbes de cinétiques des échantillons FD et SD (c et d de la Figure III.3-5) avaient chacune trois pentes différentes suggérant trois étapes du processus de réhydratation (Tableau III.3-8), avec trois coefficients de diffusion effectifs.  $D_{eff_1}$  représente le début de la réhydratation et doit être comparé à l'accessibilité initiale déjà définie par de nombreux chercheurs [Albitar et al. 2011 ; Allaf et al., 2014b ; Téllez-Pérez et al., 2014], et a révélé l'absorption initiale d'eau à haut débit. Les deux étapes suivantes de  $D_{eff_2}$  et  $D_{eff_3}$  représentent respectivement les périodes intermédiaire et finale de réhydratation avec un taux d'absorption d'eau décroissant.  $D_{eff_3}$  pourrait révéler la perméabilité à travers les parois cellulaires non cassées.

**Tableau III.3-6 Effet de la température de l'eau sur les coefficients de diffusion effective ( $D_{eff_1}$  et  $D_{eff_2}$ ) pour la réhydratation des tranches de citrouille séchées par flux d'air chaud (AFD)**

Température [°C]	Time [min]	$D_{eff_1} \times 10^9$ [m <sup>2</sup> /s]	R <sup>2</sup>	Time [min]	$D_{eff_2} \times 10^9$ [m <sup>2</sup> /s]	R <sup>2</sup>
30	0-50	0.7815	0,989	50-150	1.1511	0,99509
45	0-30	1.5980	0,99583	30-120	2.9435	0,99509
60	0-30	2.1062	0,99345	30-90	2.9558	0,9992

**Tableau III.3-7. Effet de la température de l'eau sur les coefficients de diffusion effective ( $D_{eff_1}$  et  $D_{eff_2}$ ) pour la réhydratation des tranches de citrouille séché par vide Multi-Flash (VMFD)**

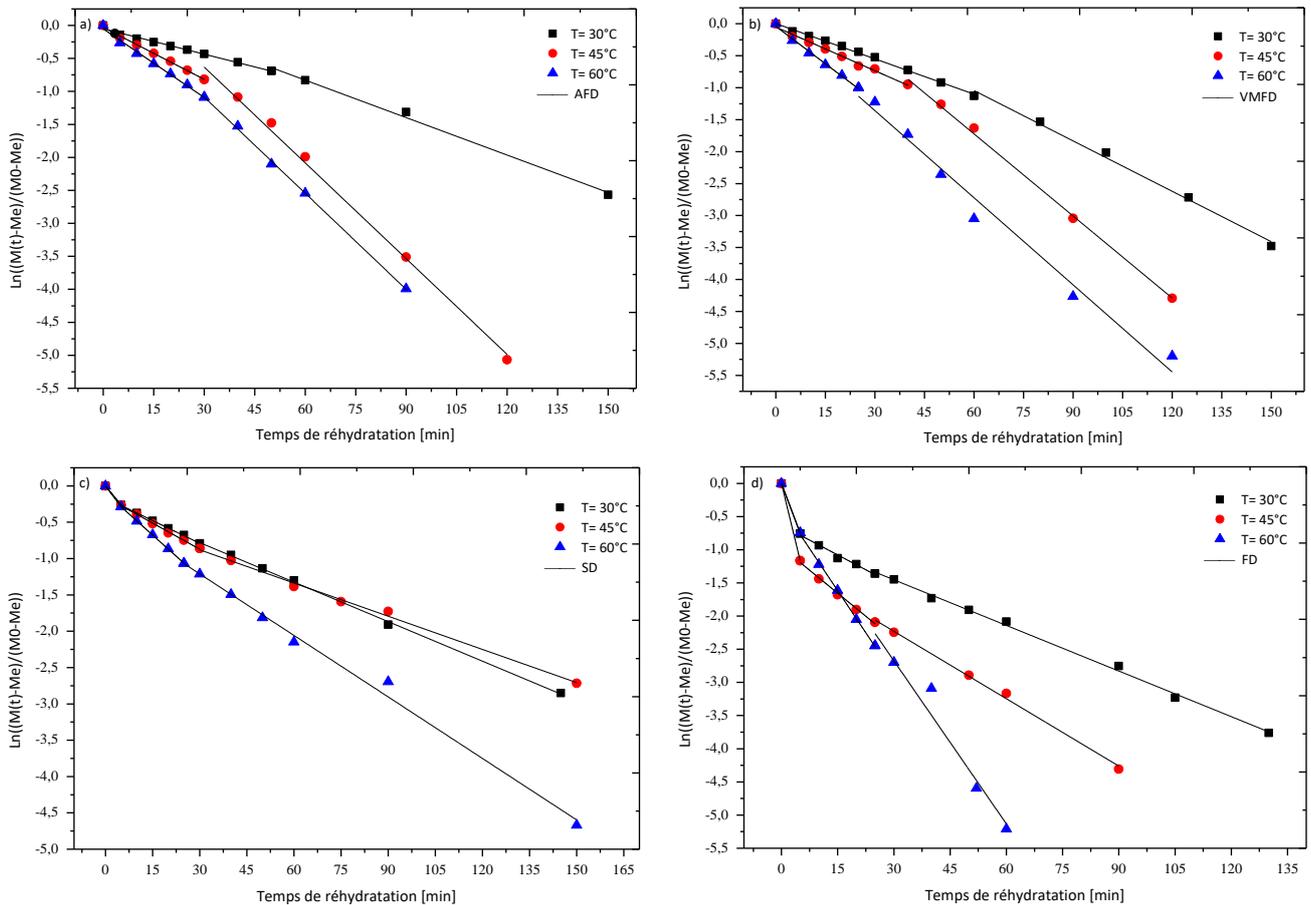
Température [°C]	Time [min]	$D_{eff_1} \times 10^9$ [m <sup>2</sup> /s]	R <sup>2</sup>	Time [min]	$D_{eff_2} \times 10^9$ [m <sup>2</sup> /s]	R <sup>2</sup>
30	0-60	7.4613	0,99751	60-150	10.647	0,99417
45	0-40	9.2324	0,98965	40-120	17.346	0,99576
60	0-25	15.794	0,99486	25-120	18.408	0,97872

**Tableau III.3-8. Effet de la température de l'eau sur les coefficients de diffusion effective ( $D_{eff_1}$  et  $D_{eff_2}$ ) pour la réhydratation des tranches de citrouille séchées par swell-drying (SD)**

Température [°C]	Temps [min]	$D_{eff_1}$ [ $10^{-9}$ m <sup>2</sup> /s]	R <sup>2</sup>	Temps [min]	$D_{eff_2}$ [ $10^{-9}$ m <sup>2</sup> /s]	R <sup>2</sup>	Time [min]	$D_{eff_3}$ [ $10^{-9}$ m <sup>2</sup> /s]	R <sup>2</sup>
30	0-5	21.521	1	5-30	8.4380	0,9993	30-145	7.350	0,9990
45	0-5	21.350	1	5-30	9.690	0,9982	30-150	6.170	0,9963
60	0-5	23.27	1	5-25	15.71	0,9999	25-150	11.44	0,9937

**Tableau III.3-9. Effet de la température de l'eau sur les coefficients de diffusion effective ( $D_{eff_1}$  et  $D_{eff_2}$ ) pour la réhydratation des tranches de citrouille séchées par lyophilisation (FD)**

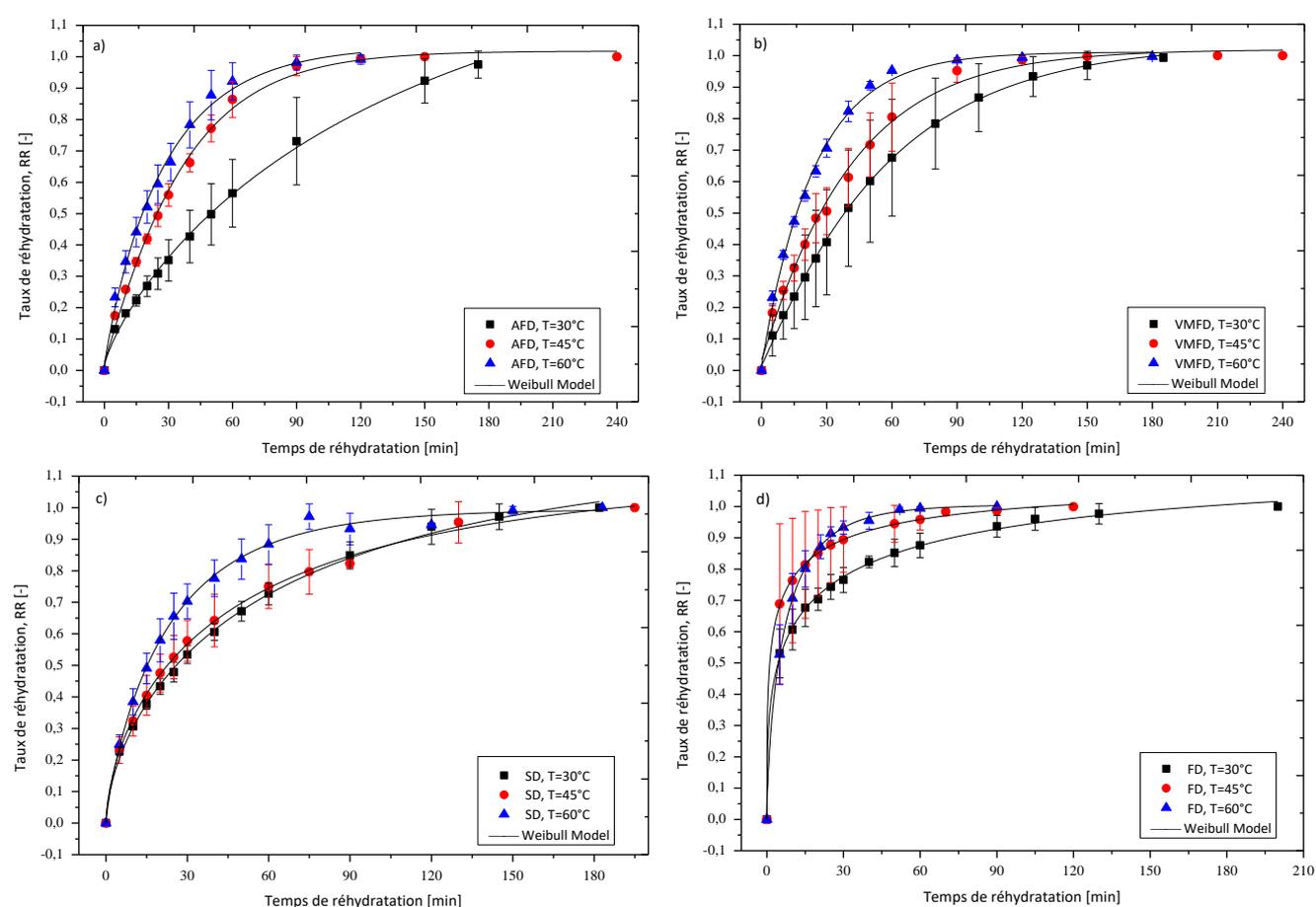
Température [°C]	Time [min]	$D_{eff_1}$ [ $10^{-9}$ m <sup>2</sup> /s]	R <sup>2</sup>	Time [min]	$D_{eff_2}$ [ $10^{-9}$ m <sup>2</sup> /s]	R <sup>2</sup>	Time [min]	$D_{eff_3}$ [ $10^{-9}$ m <sup>2</sup> /s]	R <sup>2</sup>
30	0-5	61.222	1	5-25	12.077	0,9843	25-130	9.289	0,9972
45	0-5	94.488	1	5-25	18.740	0,9954	25-90	13.723	0,9969
60	0-5	60.602	1	5-25	34.259	0,9989	25-60	33.221	0,9638



**Figure III.3-5. Détermination graphique des coefficients de diffusion effective ( $D_{eff_1}$ ,  $D_{eff_2}$  et  $D_{eff_3}$ ) de la réhydratation des tranches de citrouille pour : a) séchage par flux d'air chaud (AFD), b) séchage sous vide multi-flash (VMFD), c) séchage par swell-drying (SD) et d) séchage par lyophilisation (FD) à : 30, 45 et 60 °C.**

Les tranches de citrouille lyophilisées FD et séchées par SD ont présenté le taux de réhydratation le plus élevé en raison de la grande porosité, quelle que soit la température de réhydratation. En

effet, le taux le plus élevé d'absorption d'eau des tranches de citrouille  $D_{eff1}$  a eu lieu au cours des premières minutes de la réhydratation pour les trois températures considérées. Puisque cette phase de réhydratation devrait révéler la première interaction entre l'eau et la surface de la matrice (similaire à l'accessibilité initiale), le deuxième taux de décroissance révélé par  $D_{eff2}$  a duré près de deux heures et les échantillons ont atteint un niveau de saturation de la teneur en eau apparemment sans la troisième étape de réhydratation. En revanche, les courbes a et b de la Figure III.3-6 correspondent respectivement aux échantillons séchés par AFD et VMFD avec une forte interaction initiale eau-surface. Les trois niveaux décroissants  $D_{eff1}$ ,  $D_{eff2}$  et  $D_{eff3}$  des courbes de cinétique de réhydratation, suggèrent ainsi deux diffusivités de réhydratation (Tableau III.3-6 et Tableau III.3-7). Cela peut probablement dévoiler le rétrécissement de la structure et l'impact des cellules déformées.



**Figure III.3-6. Détermination expérimentale des courbes d'évolution de la réhydratation des tranches de citrouille pour : a) séchage par flux d'air chaud (AFD), b) séchage sous vide multi-flash (VMFD), c) séchage par swell-drying (SD) et d) séchage par lyophilisation (FD) à : 30, 45 et 60 °C.**

Notons que, de toute évidence, les trois étapes de réhydratation dépendent également de la température. Le temps de réhydratation diminue avec l'augmentation de la température. Ainsi, en augmentant la température de 30 à 60 °C, la première phase des échantillons séchés par AFD et VMFD est devenue respectivement de 20 et 35 minutes (Tableau III.3-6 et Tableau III.3-7). Des résultats similaires ont été signalés ailleurs [Cunningham et al., 2008]. La diffusivité augmente avec la température de réhydratation (Tableau III.3-6, Tableau III.3-7, Tableau III.3-8 et Tableau III.3-9).

Un comportement similaire a été observé pour la réhydratation à basse température d'autres produits végétaux : coings [Noshad et al., 2011], papayes chiliennes (*Vasconcellea pubescens*) [Zura et al., 2013a], oignons [Debnath et al., 2004 ; Cunningham et al., 2008], cubes de pommes de terre [Markowski et al., 2009], poire [chafer et al., 2011], cerise acide (*Prunus cerasus* L.) [Aghbashlo et al., 2010].

Les valeurs de diffusivité effective  $D_{eff\ 1}$ ,  $D_{eff\ 2}$  et  $D_{eff\ 3}$  obtenues à 30, 45 et 60 °C permettent de calculer par régression linéaire (Eq. III.3.7) les valeurs de  $D_{eff\ 0}$  et de  $E_a$ . On peut citer les échantillons séchés par AFD (Tableau III.3-10) :

$$D_{eff\ 10} = 4.8955 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, D_{eff\ 20} = 8.1736 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, E_{a1} = 27.8 \text{ kJ/mol et } E_{a2} = 28.0 \text{ kJ/mol.}$$

Nous avons rapporté dans Tableau III.3-11, Tableau III.3-12 et Tableau III.3-13, les résultats des échantillons séchés par VMFD, SD et FD en utilisant respectivement des coefficients de corrélation ( $R^2$ ). Plusieurs auteurs ont exprimé l'influence de la température sur la réhydratation en termes similaire à la relation d'Arrhenius. Les valeurs d'énergie d'activation se situaient dans la même gamme pour d'autres produits végétaux : Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) [Vega-Gálvez et al., 2009], carotte [Planinic et al., 2005], basilic [Demirhan et al., 2010] Les couvercles de brocoli [Sanjuan et al., 1999], les cylindres de pommes de terre [Cunningham et al., 2008], Morchella esculenta (morel) [García-Pascual et al., 2006], la papaye chilienne [Zura et al., 2013], les déchets végétaux [Lopez et al., 2000].

**Tableau III.3-10. Estimation des paramètres de l'équation d'Arrhenius pour (AFD)**

Time [min]	$D_{eff\ 10}$ [ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	$E_{a1}$ [kJ/mol]	$R^2$	Time [min]	$D_{eff\ 20}$ [ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	$E_{a2}$ [kJ/mol]	$R^2$
0-50	4.895	27,798	0,99637	50-150	8.174	27,975	0,89524

**Tableau III.3-11. Estimation des paramètres de l'équation d'Arrhenius pour (VMFD)**

Time [min]	$D_{eff\ 10}$ [ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	$E_{a1}$ [kJ/mol]	$R^2$	Time [min]	$D_{eff\ 20}$ [ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	$E_{a2}$ [kJ/mol]	$R^2$
0-60	1.364	19.0783	0,82279	60-150	0.603	15.904	0,94603

**Tableau III.3-12. Estimation des paramètres de l'équation d'Arrhenius pour (SD)**

Time [min]	$D_{eff\ 10}$ [ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	$E_{a1}$ [kJ/mol]	$R^2$	Time [min]	$D_{eff\ 20}$ [ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	$E_{a2}$ [kJ/mol]	$R^2$	Time [min]	$D_{eff\ 30}$ [ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	$E_{a3}$ [kJ/mol]	$R^2$
0-5	0.0044	1.8142	0,491	5-30	0.3867	15.587	0,76936	30-150	0.0286	9.4762	0,2998

**Tableau III.3-13. Estimation des paramètres de l'équation d'Arrhenius pour (FD)**

Temps [min]	$D_{eff\ 10}$ [ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	$E_{a1}$ [kJ/mol]	$R^2$	Temps [min]	$D_{eff\ 20}$ [ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	$E_{a2}$ [kJ/mol]	$R^2$	Temps [min]	$D_{eff\ 30}$ [ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	$E_{a3}$ [kJ/mol]	$R^2$
0-5	0.0170	2.3374	0,0287	5-25	59.856	27.375	0,923	25-130	0.0035	32.587	0,841

## *ii. Modèles empiriques et lissage des courbes*

Afin de décrire la cinétique de réhydratation des tranches de citrouille séchées différemment à l'aide de l'AFD, de la VMFD, de la SD et de la FD, quatre modèles empiriques ; Les modèles de Peleg, Weibull, Exponential et premier ordre ont été utilisés (Tableau III.3-1). Les paramètres estimés A et B du modèle de Weibull, pour des conditions données, sont également donnés dans Tableau III.3-2, Tableau III.3-3, Tableau III.3-4 et Tableau III.3-5 et l'ajustement des résultats expérimentaux est illustré sur Figure III.3-4. Certains chercheurs ont suggéré que le paramètre B représente le temps nécessaire pour atteindre un processus de 63% [Machado et al., 1999 ; Marabi et al., 2003 ; Cunningham et al., 2007]. Pour les échantillons de tranches de citrouille séchés par AFD, VMFD et SD, la valeur de B variait de 3,872 à 67,378 min diminue lorsque la température de réhydratation a augmenté de 30 à 60 °C. Un comportement similaire a été observé dans le cas d'autres produits : les céréales de petit déjeuner prêtes à manger [Machado et al., 1999], Figs [Ansari et al., 2015]. En revanche, dans le cas des échantillons séchés par FD, la valeur du paramètre d'échelle B augmente à mesure que la température augmente à partir de 45°C, ce qui indique une réduction de taux de réhydratation à mesure que la température augmente. Cela peut être attribué à l'effondrement de l'échantillon pendant la réhydratation. Afin d'expliquer ce phénomène, des propriétés structurelles ainsi qu'une compréhension plus approfondie des phénomènes de transfert de masse au cours de la réhydratation sont nécessaires. [Marabi et al., 2003] ont utilisé le modèle de distribution de Weibull pour commenter leurs résultats de réhydratation. Ils ont conclu que la porosité du produit des matériaux lyophilisés contrôlait parfaitement le transfert de masse. Alors que dans le cas des produits à faible porosité (c'est-à-dire les matières séchées par l'AFD), l'impact de la température de réhydratation est corrélé avec l'évolution de la diffusivité par une équation de type Arrhenius [Meda et al., 2005]. Le paramètre de forme A du modèle de Weibull devrait interpréter la mesure du taux d'absorption d'eau au début du processus. La valeur A varie entre 0,409 et 1,069 pour tous les échantillons séchés différemment ; ces valeurs se situaient dans la même gamme (entre 0,2 et 1,0) de valeurs rapportées par différents chercheurs [Cunningham et al., 2007 ; Athanasia et al., 2009]. Plus la valeur de A est faible, plus le taux d'absorption d'eau est rapide.

Le modèle de Peleg a également été utilisé pour déterminer les paramètres K1 et K2. K1 a été considéré comme la valeur de réhydratation initiale, tandis que K2 la capacité d'absorption d'eau maximale, les valeurs les plus faibles de K2 ont présenté une grande capacité d'absorption d'eau comme suggéré par [Solomon, 2007]. Avec une température plus élevée, K1 augmente légèrement de manière linéaire dans le cas des échantillons séchés par AFD et VMFD (Tableau III.3-2 et Tableau III.3-3) et diminue de manière non linéaire dans le cas des échantillons séchés par SD et FD. Avec l'augmentation de la température, K2 décroît linéairement dans le cas des échantillons séchés AFD, VMFD et SD (Tableau III.3-2 et Tableau III.3-3) et de manière non linéaire dans le cas des échantillons FD (Tableau III.3-5). Un comportement similaire a été trouvé par d'autres auteurs [Garcia-Pascual et al., 2006 ; Moreira et al., 2008]. En outre, Tableau III.3-2, Tableau III.3-3, Tableau III.3-4 et Tableau III.3-5 montrent les paramètres des modèles d'association de premier ordre et des modèles exponentiels qui peuvent également décrire l'absorption d'eau lors de la réhydratation des tranches de citrouille séchées. Comme on peut le voir, les constantes de cinétiques des modèles

d'association de premier ordre et exponentiels, ont augmenté avec l'augmentation de la température de manière linéaire pour les échantillons séchés par AFD et VMFD (Tableau III.3-2 et Tableau III.3-3), et non linéaire pour les échantillons séchés par SD et FD (Tableau III.3-4 et Tableau III.3-5). Cela implique une grande vitesse de réhydratation à haute température.

### *iii. Analyse statistique des modèles*

Les analyses statistiques ont été appliquées à ces différents modèles proposés pour la cinétique de réhydratation des tranches de citrouille séchées par différentes méthodes (Tableau III.3-2, Tableau III.3-3, Tableau III.3-4 et Tableau III.3-5). En utilisant l'analyse de régression non linéaire, on a déterminé les paramètres des différents modèles. En outre, les valeurs de  $R^2$  et de RMSE ont été obtenues. Les quatre modèles de réhydratation ont donné un excellent ajustement aux données expérimentales. Cependant, dans le cas de tranches de citrouille séchées différemment (AFD, VMFD, SD et FD) et à différentes températures de réhydratation, le modèle de Weibull a donné la plus haute valeur de  $R^2$  et la plus faible valeur de  $X^2$  et RMSE pour tous. Ceci corréle plusieurs travaux de recherche effectués sur la cinétique de réhydratation de différents produits alimentaires, qui ont rapporté la haute qualité d'ajustement obtenue en utilisant le modèle de Weibull : [Marabi et al., 2003 ; Demirhan et al., 2010 ; Demiray et al., 2017].

### **III.3.5. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, différentes méthodes de séchage, à savoir le séchage par flux d'air chaud (AFD), le séchage par lyophilisation (FD), le séchage par swell-drying (SD) combinant le traitement DIC entre deux étapes de AFD et le séchage sous vide multi-flash (VMFD) ont été étudiés en termes de réhydratation dans le cas spécifique des tranches de citrouille. Les résultats ont démontré que les techniques de séchage ont un effet significatif sur la cinétique de réhydratation. A trois températures de réhydratation, on a constaté que le séchage par air chaud (AFD) était le procédé dont résulte la réhydratation la plus lente, tandis que les autres procédés tels que FD, SD et VMFD ont permis de réduire le temps de réhydratation.

En outre, on a constaté que les tranches de citrouilles séchées par FD et SD présentaient le taux de réhydratation le plus élevé avec un modèle de diffusion phénoménologique caractérisé par trois coefficients de diffusion effective, ou trois étages ( $D_{eff_1}$ ,  $D_{eff_2}$  et  $D_{eff_3}$ ). Cela est dû à l'interaction entre l'eau et la surface de la matrice, à une porosité élevée, facilement accessibles à l'eau pour pénétrer. Le transfert de masse le plus élevé s'est produit au cours des premières minutes de réhydratation, ensuite diminué jusqu'à ce que les échantillons atteignent une saturation en eau. Cependant, dans le cas des tranches séchées par AFD et VMFD, le transfert de masse le plus important a eu lieu après la première étape du processus de réhydratation en raison de la rétraction des tranches qui peut se produire pendant le processus de séchage. Ce rétrécissement ralentit la diffusion de l'eau de la surface vers le centre. La dépendance de la température de réhydratation a été modélisée de manière adéquate en utilisant l'équation d'Arrhenius avec deux énergies d'activation dans le cas de tranches séchées en utilisant AFD et VMFD et trois niveaux d'énergie d'activation pour les tranches séchées avec SD et FD.

Plusieurs modèles empiriques ont été testés pour analyser la cinétique de réhydratation. Le modèle de Weibull a donné la meilleure solution avec des résultats expérimentaux avec le coefficient  $R^2$  le plus élevé, les plus faibles valeurs de  $\chi^2$  et  $RMSE$ . Ils ont été tous considérés comme la meilleure façon d'élucider les caractéristiques de réhydratation des tranches de citrouille séchées en fonction de différentes méthodes de séchage ; AFD, VMFD, SD et FD.

Le choix de techniques de séchage appropriées ainsi que la température de réhydratation adéquate sont essentiels pour la conception d'un processus de réhydratation fiable produisant des produits alimentaires de haute qualité.

## BIBLIOGRAPHIE

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Hassan-Beygi, S.R. (2010). Drying and rehydration characteristics of sour cherry (*Prunus cerasus* L.). *Journal of Food Processing and Preservation*, 34 (3), 351–365.
- Ajala, A. S., Ajala, F. A., & Oyedele, J. O. (2015). Rehydration characteristics and modeling of cassava chips. *American Journal of Engineering Research*, 4(5), 45-49.
- Albitar, N., Mounir, S., Besombes, C. & Allaf, K. (2011). Improving the Drying of Onion Using the Instant Controlled Pressure Drop Technology. *Drying Technology*, 29(9), 993–1001.
- Allaf, T., & Allaf, K. (2014a). Instant Controlled Pressure Drop (D.I.C.) in Food Processing : From Fundamental to Industrial Applications. New York : Springer.
- Allaf, T., Besombes, C., Tomao, V., & Chemat, F. (2014b). Coupling DIC and Ultrasound in Solvent Extraction Processes. In T. Allaf, & K. Allaf (Eds.), *Instant Controlled Pressure Drop (D.I.C.) in Food Processing : From Fundamental to Industrial Applications* (pp. 151-161). New York : Springer.
- Ansari, S., Maftoon-Azad, N., Hosseini, E., Farahnaky, A., & Asadi, Gh. (2015). Modeling Rehydration Behavior of Dried Figs. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(1), 133-144.
- AOAC. (1990). *Official methods of analysis*. Edition : Association of Official Analytical Chemist (16th ed.). Washington, DC.
- Athanasia, M. G., & Konstantinos G. A. (2009). Modeling the Rehydration Process of Dried Tomato. *Drying Technology*, 27(10), 1078–1088.
- Bilbao-Sáinz, C., Andrés, A. & Fito, P. (2005). Hydration kinetics of dried apple as affected by drying conditions. *Journal of Food Engineering*, 68(3), 369–376.
- Bremman, J. G., Butters, J. R., Cowell, N. D., & Lilly, A. E. V. (1990). *Dehydration in Food Engineering Operations* (3rd ed.). London : Elsevier Applied Science.
- Cano-Chauca, M., Stringheta, P. C., Ramos, A. M., & Cal-Vidal, J. (2005). Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 6(4), 420–428.
- Caparino, O. A., Tang, J., Nindo, C. I., Sablani, S. S., Powers, J. R., & Fellman, J. K. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. *Journal of Food Engineering*, 111(1), 135–148.
- Chafer, M., González-Martínez, C., Pastor, C., Xue, K. & Chiralt, A. (2011). Rehydration kinetics of pear as affected by osmotic pretreatment and temperature. *Journal of Food Process Engineering*, 34(2), 251–266.

- Chung, H. S. & Lee J. H. (2015). Comparative Evaluation of Physicochemical Properties of Pine Needle Powders Prepared by Different Drying Methods. *Preventive Nutrition and Food Science*, 20(2), 143-147.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion* (2nd ed.). Oxford : Oxford University Press.
- Cunningham, S. E., McMinn, W. A. M., Magee, T. R. A., & Richardson, P. S. (2007). Modelling Water Absorption of Pasta during Soaking. *Journal of Food Engineering*, 82(4), 600-607.
- Cunningham, S. E., McMinn, W. A. M., Magee, T. R. A., & Richardson, P. S. (2008). Experimental Study of Rehydration Kinetics of Potato Cylinders. *Food and Bioproducts Processing*, 86(1), 15-24.
- Darvishi, H., Azadbakht, M., Rezaeiasl, A., Farhang, A. (2013). Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12(2), 121–127.
- Debnath, S., Hemavathy, J., Bhat, K. K. & Rastogi, N. K. (2004). Rehydration characteristics of osmotic pretreated and dried onion. *Food and Bioproducts Processing*, 82(4) : 304–310.
- Demiray, E., & Tulek, Y. (2017). Effect of temperature on water diffusion during rehydration of sun-dried red pepper (*Capsicum annum L.*). *Heat and Mass Transfer*, 53(5), 1829-1834.
- Demirhan, E., & Özbek, B. (2010). Rehydration kinetics of microwave-dried basil. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34(4), 664–680.
- García-Pascual, P., Sanjuán, N., Melis, R., & Mulet, A. (2006). *Morchella esculenta* (morel) rehydration process modeling. *Journal of Food Engineering*, 72(4), 346–353.
- García-Segovia, P., Andrés-Bello, A., & Martínez-Monzó, J. (2011). Rehydration of air-dried Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps : Comparison of conventional and vacuum water immersion processes. *LWT - Food Science and Technology*, 44(2), 480-488.
- Ghosh, U., & Gangopadhyay, H. (2004). Effect of drying methods on rehydration kinetics of potato slices. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 63(5), 452-457.
- Goula, A., & Adamopoulos, K. (2009). Modeling the Rehydration Process of Dried Tomato. *Drying Technology*, 27(10), 1078-1088.
- Gutierrez-Pacheco, S., Godbout, S., Palacios, J. H., Parra-Coronado, A., Zegan, D., Lagacé, R., & Pelletier, F. (2016). Potato color evolution in swell drying. The Canadian Society for Bioengineering, Paper No. CSBE16-105, Written for presentation at the CSBE/SCGAB Annual Conference Halifax World Trade and Convention, Centre 3-6 July 2016.
- Haas, G. J., Prescott, H. E., & Cante, C.J. (1974). On rehydration and respiration of dry and partially dried vegetables. *Journal of Food Science*, 39(4), 681–684.
- Hsu, C. L., Chen, W., Weng, Y. M., & Tseng, C. Y. (2003). Chemical composition, physical properties, and antioxidant activities of yam flours as affected by different drying methods. *Food Chemistry*, 83(1), 85-92.
- Jayaraman, K. S., Das Gupta, D. K., & Babu Rao, N. (1990). Effect of pre-treatment with salt and sucrose on the quality and stability of dehydrated cauliflower. *International Journal of Food Science & Technology*, 25(1), 47–60.
- Krokida, M. K., Kiranoudis, C. T. & Maroulis, Z. B. (1999). Viscoelastic behaviour of dehydrated products during rehydration. *Journal of Food Engineering*, 40(4), 269–277.

- Krokida, M., & Marinos-Kouris, D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57(1), 1–7.
- Krokida, M. K., & Philippopoulos, C. (2005). Rehydration of Dehydrated Foods. *Drying Technology*, 23(4), 799–830.
- Lee, K.T., Farid, M. & Nguang, S.K. (2006). The mathematical modeling of the rehydration characteristics of fruits. *Journal of Food Engineering*, 72(1), 16–23.
- Lewicki, P. P. (1998). Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties : A review. *International Journal of Food Properties*, 1(1), 1–22.
- Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A., & Virseda, P. (2000). Thin-layer drying behaviour of vegetable wastes from wholesale market. *Drying Technology*, 18(4&5), 995-1006.
- Louka, N., & Allaf, K. (2004a). Expansion ratio and color improvement of dried vegetables texturized by a new process “controlled sudden decompression to the vacuum” : application to potatoes, carrots and onions. *Journal of Food Engineering*, 65(2), 233 – 243.
- Louka, N., Juhel, F., & Allaf, K. (2004b). Quality studies on various types of partially dried vegetables texturized by Controlled Sudden Decompression : General patterns for the variation of the expansion ratio. *Journal of Food Engineering*, 65(2), 245 – 253.
- Machado, M., Oliveira, F., & Cunha, L. (1999). Effect of Milk Fat and Total Solids Concentration on the Kinetics of Moisture Uptake by Ready-to-eat Breakfast Cereal. *International Journal of Food Science & Technology*, 34(1), 47–57.
- Magee, S., & Richardson, P. (2007). Modelling Water Absorption of Pasta during Soaking. *Journal of Food Engineering*, 82(4), 600–607.
- Marabi, A., Livings, S., Jacobson, M., & Saguy, I. S. (2003). Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. *European Food Research and Technology*, 217(4), 311–318.
- Marabi, A., & Saguy, I. S. (2004). Effect of porosity on rehydration of dry food particulates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(4), 1105-1110.
- Maritza, A. M., Sabah, M., Anaberta, C. M., Montejano-Gaitán, J. G., & Allaf, K. (2012). Comparative study of various drying processes at physical and chemical properties of strawberries (*Fragaria var. camarosa*). *Procedia Engineering*, 42, 267-282.
- Markowski, M., Bondaruk, J., & Błaszczak, W. (2009). Rehydration behaviour of vacuum-microwave-dried potato cubes. *Drying Technology*, 27(2), 296-305.
- McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (1997). Quality and physical structure of dehydrated starch based system. *Drying Technology*, 15(6-8), 49–55.
- Meda, L., & Ratti, C. (2005). Rehydration of freeze-dried strawberries at varying temperatures. *Journal of Food Process Engineering*, 28(3), 233–246.
- Moreira, R., Chenlo, F., Chaguri, L., & Fernandes, C. (2008). Water Absorption, Texture, and Color Kinetics of Air-Dried Chestnuts During Rehydration. *Journal of Food Engineering*, 86(4), 584-594.
- Mounir, S., Besombes, C., Albitar, N., & Allaf, K. (2011). Study of instant controlled pressure drop DIC treatment in manufacturing snack and expanded granule powder of apple and onion. *Drying Technology*, 29(3), 331–341.

- Mounir, S., Allaf, T., Mujumdar, A. S. & Allaf, K. (2012). Swell Drying : Coupling Instant Controlled Pressure Drop DIC to Standard Convection Drying Processes to Intensify Transfer Phenomena and Improve Quality—An Overview. *Drying Technology*, 30(14), 1508-1531.
- Mujaffar, S., & Lee Loy, A. (2017). The rehydration behavior of microwave-dried amaranth (*Amaranthus dubius*) leaves. *Food Science & Nutrition*, 5(3), 399-406.
- Noshad, M., Mohebbi, M., Shahidi, F., & Mortazavi, S. A. (2011). Kinetic modeling of rehydration in air-dried quinces pretreated with osmotic dehydration and ultrasonic. *Journal of Food Processing and Preservation*, 36(5), 383-392.
- Ohaco, E. H., Ichiyama, B., Lozano, J. E., & De Michelis, A. (2015). Rehydration of *Rosa rubiginosa* Fruits Dried with Hot Air. *Drying Technology*, 33(6), 696–703.
- Okos, M. R., Narishman, G., Singh, R. K., & Weitnauer, A. C. (1992). Food dehydration. In *Handbook of Food Engineering*. New York : Marcel Dekker.
- Oroian, M. (2017). The temperature hydration kinetics of *Lens culinaris*. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(3), 250-256.
- Planinic, M., Velic, D., Tomas, S., Bilic, M., & Bucic, A. (2005). Modelling of drying and rehydration of carrots using Pelegs model. *European Food Research and Technology*, 221(3-4), 446–451.
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods-a review. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 311–319.
- Saguy, I. S., Marabi, A., & Wallach, R. (2005). New approach to model rehydration of dry food particulates utilizing principles of liquid transport in porous media. *Trends in Food Science & Technology*, 16(11), 495–506.
- Salimi Hizaji, A., Maghsoudlou, Y., & Jafari, S.M. (2011). Effect of water temperature, variety and shelf life on rehydration kinetics of microwave dried potato cubes. *Latin American Applied Research*, 41(3), 249-254.
- Sanjuan, N., Simal, S., Bon, J. & Mulet, A. (1999). Modelling of broccoli stems rehydration process. *Journal of Food Engineering*, 42(1), 27–31.
- Sehrawat, R., Nema, P. K., & Pal Kaur, B. (2016). Effect of superheated steam drying on properties of foodstuffs and kinetic modeling. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 285-301.
- Solomon, W. K. (2007). Hydration kinetics of lupin (*lupinus albus*) seeds. *Journal of Food Process Engineering*, 30(1), 119–130.
- Solomon, W.K. (2008). Effect of barrel temperature on rehydration kinetics of direct-expanded tef flour breakfast cereal. *Journal of Food Process Engineering*, 31(4), 469–487.
- Speranza, B., Bevilacqua, A., Corbo, M. R., & Sinigaglia, M. (2017). *Starter Cultures in Food Production* (1st ed.). United States : John Wiley & Sons Inc.
- Télliez-Pérez, C., Sobolik, V., Montejano-Gaitán, J. G., Abdulla, G., & Allaf, K. (2015). Impact of swell-drying process on water activity and drying kinetics of Moroccan pepper (*capsicum annum*). *Drying Technology*, 33(2), 131–142.
- Toledo, R. T. (2007). *Fundamentals of Food Process Engineering* (3th ed.). New York : Springer.

Vasić, M., Grbavčić, Ž., & Radojević, Z. (2016). Methods of determination for effective diffusion coefficient during convective drying of clay products. In K. Jian (Eds.), *Operations Research - the Art of Making Good Decisions*.

Vega-Gálvez, A., Notte-Cuello, E., Lemus-Mondaca, R., Zura, L., & Miranda, M. (2009). Mathematical modelling of mass transfer during rehydration process of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller). *Food and Bioproducts Processing*, 87(4), 254–260.

Yagci, S., & Evcı, T. (2015). Effect of instant controlled pressure drop process on some physicochemical and nutritional properties of snack produced from chickpea and wheat. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(8), 1901-1910.

Zura-Bravo, L., Uribe, E., Lemus-Mondaca, R., Saavedra-Torrico, J., Vega-Gálvez, A., & Di Scala, K. (2013a). Rehydration Capacity of Chilean Papaya (*Vasconcellea pubescens*) : Effect of Process Temperature on Kinetic Parameters and Functional Properties. *Food and Bioprocess Technology*, 6(3), 844–850.

Zura-Bravo, L., Ah-Hen, K., Vega-Gálvez, A., García-Segovia, P., & Lemus-Mondaca, R. (2013b). Effect of rehydration temperature on functional properties, antioxidant capacity and structural characteristics of apple (granny smith) slices in relation to mass transfer kinetics. *Journal of Food Process Engineering*, 36(5), 559–571.

## **CHAPITRE III.4.**

### **EFFET DES METHODES DE SECHAGE SUR LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES, LES COMPOSES PHENOLIQUES TOTAUX, LA TENEUR EN FLAVONOÏDES ET L'ACTIVITE ANTIBACTERIENNE DE LA POUDRE DE CITROUILLE.**

#### **III.4.1. INTRODUCTION**

La citrouille est utilisée en médecine traditionnelle pour lutter contre de nombreuses maladies e. g. l'hypertension, le cancer [Zuhair et al., 2000 ; Jian et al., 2005] et le diabète [Boaduo et al., 2014]. D'autres vertus thérapeutiques ont été signalés tels que l'inhibition de la formation de la roche, utilisée comme substance anti-inflammatoire et contre la coagulation sanguine [Yadav et al., 2010]. Ce fruit possède plusieurs propriétés pharmacologiques telles que : antibactériennes [Hammar et al., 1999], antioxydantes et anti-inflammatoires [Nawirska-Olszańska et al., 2013]. La citrouille est utilisée dans les préparations culinaires en raison de sa saveur hautement appréciable, de sa douceur et de sa couleur jaune-orange profonde [Cumarasamy et al., 2002]. En outre, sa poudre présente des propriétés pharmacodynamiques très intéressantes (bons écoulement et stockage) durant une longue période [Roongruangsri et al., 2015], aussi elle peut répondre aux demandes de consommateurs comme une alternative aux citrouilles fraîches.

La poudre de citrouille a été incorporée dans les farines de céréales dans les produits de boulangerie comme le pain sandwich, le pain sucré, le gâteau au beurre, le gâteau mousseline et les biscuits [Pongjanta et al., 2006 ; Bhat et al., 2013 ; Kulkarni et al., 2013], dans les soupes, les épices, les sauces et les nouilles instantanées. Elle est aussi utilisée comme un colorant naturel dans les pâtes et les mélanges de farines [Cerniauskiene et al., 2014].

Plusieurs procédés de séchage ont été appliqués pour le séchage des denrées alimentaires citant l'air chaud et la lyophilisation. En comparant ces deux procédés, la lyophilisation demeure la meilleure méthode appliquée dans les différentes industries (alimentaire et pharmaceutique). Cependant, le coût trop élevé de cette méthode limite son utilisation aux seuls aliments et produits pharmaceutiques de grande valeur ajoutée [Ratti, 2001].

En plus à ces technologies, nouvelles technologies ont été utilisées pour améliorer la qualité des aliments séchés et préserver leur valeur nutraceutique. Citant, le séchage sous vide multi-flash (Vacuum Multi Flash Drying VMFD) et le séchage par (Swell-Drying SD) couplant (AFD + DIC (Détente Instantanée Contrôlée) + AFD) [Mounir et al., 2012]. Ce dernier a été largement utilisé à l'échelle industrielle pour fabriquer des produits swell-dried avec de nombreuses références de travaux de [Allaf et al., 2014]. D'autres auteurs ont examiné l'effet de SD sur les attributs de qualité des produits alimentaires séchés et sur la performance du processus de séchage [Louka et al., 2004 ; Haddad et al., 2007 ; Kamal et al., 2008 ; Albitar et al., 2011 ; Mounir et al., 2011].

Certains chercheurs [Gutierrez-Pacheco et al., 2016] ont remarqué certains effets du VMFD sur les produits secs tels que la diminution des pertes en nutriments, un moindre effet de dégradation sur la qualité du produit, par exemple la contraction de la couleur, la texturation et la réhydratation

[Sehrawat et al., 2016]. VMFD a été mis en œuvre et évalué pour le séchage des légumes qui sont sensibles à la chaleur [Louka et al., 2004a ; Louka et al., 2004b ; Mounir et al., 2011], la préparation de collations [Yagci et al., 2015].

La qualité des produits déshydratés est évaluée principalement par rapport à la composition biochimique et les propriétés organoleptiques des produits non transformés [Krokida et al., 1997]. Il est bien connu que les processus de séchage provoquent des changements dans la qualité et la quantité de composés bioactifs et leur capacité antioxydante [Ratti, 2011 ; Leong et al., 2012].

L'objectif de cette étude est d'étudier l'impact de quatre procédés de séchage (AFD, VMFD, SD, FD) sur les propriétés physico-chimiques, la disponibilité des substances bioactives (composés phénoliques totaux et flavonoïdes), et sur l'activité antimicrobienne des poudres de citrouille obtenues.

### III.4.2. MATERIELS ET METHODES

#### III.4.2.1. Matériels végétaux (voir III.1.2.1, Préparation des échantillons)

#### III.4.2.2. Méthodes de séchage (voir III.3.2.2, Méthodes de séchage)

#### III.4.2.3. Préparation des poudres

Quatre lots d'échantillons de citrouille séchés par quatre techniques de séchage (AFD, VMFD, SD et FD) ont été broyés en poudres avec un broyeur (Mammonlex, Model 242, Taiwan), puis tamisés pour obtenir une poudre avec des particules suffisamment fines (taille  $\leq 200 \mu\text{m}$ ) (Le tamis type : Euromatest-Sintoo, NFX11-501). Ainsi, les produits finis ont été conservés dans des sacs hermétiques. La distribution granulométrique (Figure III.4-1) de la poudre a été étudiée à l'aide d'un granulomètre à diffraction laser Malvern (MASTERSIZER 2000). C'est une méthode indirecte qui consiste à déterminer la répartition granulométrique par la technique de diffraction de la lumière laser. Les particules passant devant un faisceau de laser, provoquant une déviation de la lumière. La quantité de la lumière déviée est proportionnelle à la taille des particules. Cet appareil permet de mesurer des particules sphériques à partir de  $0,05 \mu\text{m}$ . Cette analyse a été réalisée au Laboratoire de Recherche en Sciences des Matériaux de l'Université de Boumerdès.

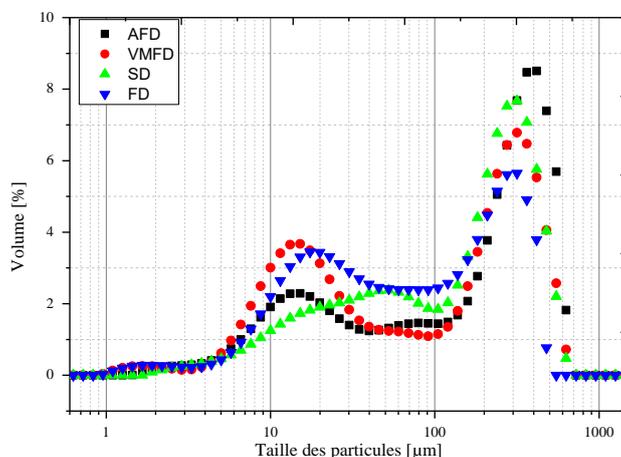


Figure III.4-1. Distribution granulométrique des différentes poudres.

#### **III.4.2.4. Préparation des extraits des échantillons**

Il s'agit d'une extraction solide-liquide. Le principe consiste à faire traverser la barrière de l'interface solide-liquide par le solvant dans lequel doit ainsi dissoudre le principe actif à l'intérieur du solide pour qu'il soit entraîné vers l'extérieur. La macération est ainsi suivie d'une analyse colorimétrique par spectrophotométrie UV-visible. Dans le cas des polyphénols, le procédé adopté est comme suit : 2 g de poudre de citrouille sont macérés dans 20 ml de solvants différents (100% d'éthanol ou d'eau distillée pure) pendant 120 heures dans un réfrigérateur sombre. En outre, une opération de filtration est réalisée à travers un papier filtre (Whatman N ° 4) suivie d'une évaporation à 45 °C en utilisant un appareil Rotavapor (LABOROTA 4000 HEIDOLPH, Allemagne). L'extrait sec est ensuite conservé à 4 °C jusqu'à son utilisation [Mau et al., 2001]. Les solutions obtenues sont ensuite utilisées pour la détermination de la teneur en TPC et en TFC.

#### **III.4.2.5. Microorganismes utilisés pour les tests antimicrobiens**

Trois souches ont été utilisées pour évaluer l'activité antimicrobienne des extraits de citrouille séchés. Cette partie du travail a été réalisée au Laboratoire de Microbiologie de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou -Algérie, durant la période de mai à juin 2017.

Deux espèces bactériennes *P. aeruginosa* ATCC 27853 et *S. aureus* ATCC 25923 et la moisissure sauvage non classifiée "*Aspergillus niger*" ont été utilisées. Ces souches ont été livrées par le laboratoire de microbiologie de la même université.

#### **III.4.2.6. Détermination du contenu phénolique total**

La teneur totale en phénols est estimée selon la méthode de Folin Ciocalteu modifiée par [Dewanto et al., 2002]. Des extraits de 0,5 ml sont mélangés avec 5 ml d'eau distillée dans un tube à essai, puis additionnés de 0,5 ml de réactif Folin-Ciocalteu (FCR). Les échantillons sont bien mélangés et ensuite laissés au repos pendant 3 minutes avant d'ajouter 0,5 ml d'une solution aqueuse de carbonate de sodium à 20%. L'absorbance est mesurée à 760 nm, après incubation dans l'obscurité pendant 60 minutes à température ambiante. L'équation de régression de l'étalonnage est obtenue avec diverses concentrations de l'étalon d'acide gallique (Figure III.4-2). On opte pour trois répétitions par traitement pour calculer la valeur du PTC. Les résultats sont exprimés en milligramme d'équivalent d'acide gallique pour cent de gramme de masse sèche de la poudre de citrouille (mg GAE/100 g db).

#### **III.4.2.7. Détermination de la teneur totale en flavonoïdes**

Les teneurs en polyphénols sont exprimées en mg d'équivalent acide gallique par gramme de matière sèche (mg GAE/100 g db) ou en mg d'équivalent acide gramme d'extrait (mg EAG/g extrait) selon la méthode décrite par [Kosalec et al., 2004 ; Miliauskas et al., 2004]. Les flavonoïdes sont mesurés en mélangeant 1 ml d'extrait méthanolique adéquatement dilué avec 1 ml de solution méthanolique AlCl<sub>3</sub> à 2%. Après incubation à température ambiante pendant 10 minutes, l'absorbance est mesurée à 430 nm. La teneur totale en flavonoïdes est déterminée à partir de la courbe d'étalonnage (Figure III.4-2) et exprimée en milli- gramme d'équivalent de quercétine par

gramme d'extrait (mg EQ/g d'extrait). Trois répétitions sont effectuées par traitement pour calculer la valeur de TFC.

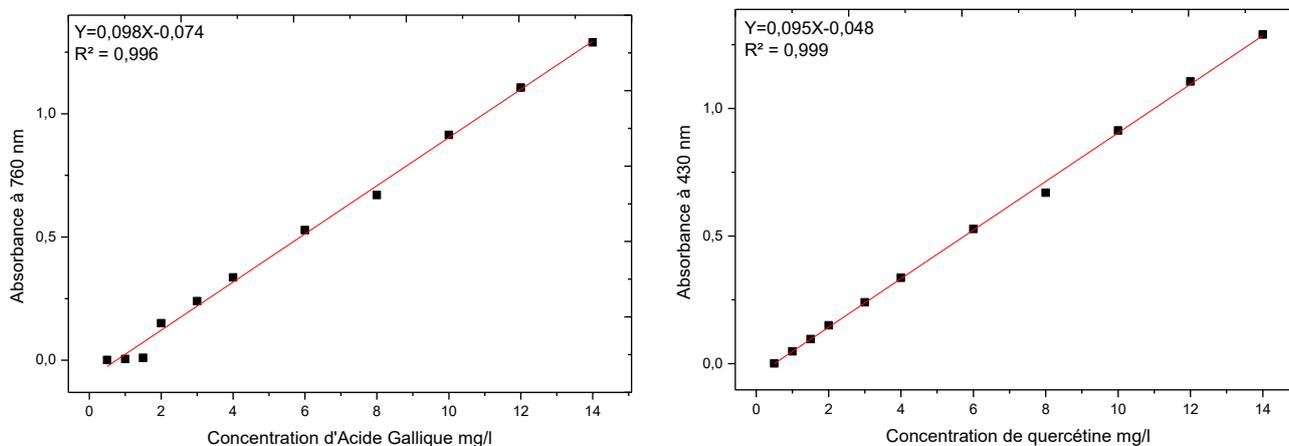


Figure III.4-2. Courbe de calibration Standard de a) Gallic Acid et b) Quercetin.

#### III.4.2.8. Test d'activité antimicrobienne

Pour évaluer l'activité antimicrobienne, la méthode de diffusion sur milieu gélosé en utilisant des disques stériles en cellulose telle décrite par [Rahal, 2005] a été adaptée. Le principe de cette méthode repose sur la diffusion d'un composé antimicrobien en milieu solide dans une boîte de Pétri, avec création d'un gradient de concentration après un certain temps de contact entre le composé et le microorganisme cible. L'effet antimicrobien sur la cible est apprécié par la mesure de diamètre d'inhibition, et en fonction du diamètre d'inhibition de la souche sera qualifiée de sensible, très sensible, extrêmement sensible ou résistante.

Deux extraits de composés phénoliques (extraits éthanolique et aqueux) des poudres obtenues sont examinées pour leur activité antimicrobienne. La sensibilité des trois souches *S. aureus* ATCC 25923, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 et *A. niger* par rapport aux extraits de composés phénoliques obtenus est évaluée sur la base du diamètre de la zone d'inhibition.

Préparation des précultures : Les souches microbiennes à tester sont cultivées dans des boîtes de Pétri contenant de la gélose nutritive et incubé pendant 24 h à 37°C afin d'obtenir une culture jeune et des bactéries et des colonies isolées.

Préparation des disques : Des disques de papier Wattman de 6mm de diamètre sont préparés, puis mis dans un tube à essai, stérilisés dans l'autoclave et conservés jusqu'à l'utilisation.

Préparation des suspensions bactériennes : A l'aide d'une anse à boucle, quelques colonies bien isolées et identiques sont mises dans 10ml d'eau physiologique stérile à 0,9% de sel (Na Cl). La suspension bactérienne est bien homogénéisée et laissée sur la paillasse pendant 30 min [OMS, 2005].

Lecture : La lecture se fait par la mesure des diamètres des zones d'inhibition et peut être symbolisée par des signes d'après la sensibilité des souches vis-à-vis de l'extrait [Ponce et al., 2003] :

- Souches non sensible (-) ou résistante : ...diamètre < à 8mm ;
- Souches sensibles (+) : .....diamètre compris entre 9 et 14mm ;
- Souche très sensible (++) : .....diamètre compris entre 15 et 19mm ;
- Souche extrêmement sensible (+++) : .....diamètre > à 20mm.

#### **III.4.2.9. Microscopie Électronique à Balayage (MEB)**

La microstructure de différents types de poudres a été étudiée au moyen d'un Microscope électronique à balayage environnemental SEM (PHILIPS ESEM XL.30 ; Heindoven, Netherlands).

#### **III.4.2.10. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier**

Les spectres FT-IR de différentes poudres (AFD, VMFD, SD et FD) ont été obtenus en utilisant un spectrophotomètre IR Shimadzu (VECTOR 22 BRUKER) dans l'espace de 400 et 4000 cm<sup>-1</sup> et les disques de bromure de potassium. Cette section permet de voir si les échantillons subissent des modifications lors du processus de séchage.

### **III.4.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS**

#### **III.4.3.1. Microstructure des poudres**

En ce qui concerne les poudres de citrouille, la Figure III.4-1 montre les courbes de distribution granulométrique des particules pour les échantillons séchés par AF, VMFD, SD=AF+DIC+AF et FD. Les courbes tracées pour les poudres étaient unimodales et présentaient une forme normale. Deux pics principaux, l'un entre 10 et 20 µm sauf pour DIC à 50 µm et l'autre entre 300 et 400 µm ont été observés. Selon la Figure III.4-1, le traitement de séchage n'avait aucun effet évident sur la distribution granulométrique du produit finement broyé.

#### **III.4.3.2. Phénols et flavonoïdes totaux**

Les résultats des taux de polyphénols totaux et des flavonoïdes caractérisant les différentes poudres de citrouille issues de différents procédés de séchage sont présentés dans le Tableau III.4-1. Nous constatons d'après ce tableau que le séchage avec la SD influence positivement la disponibilité des polyphénols totaux avec le meilleur taux obtenu dans l'extrait aqueux (6,10173± 1,68649 mg GAE / g (poids frais)). Ces résultats indiquent clairement que, la citrouille possède un « contenu phénolique assez élevé pour permettre une utilisation à des fins sanitaires. Cependant, les avantages potentiels de ces composés sur la santé dépendent largement de leur capacité d'absorption et de leur métabolisme.

La variation constatée dans les taux des polyphénols obtenus peut s'expliquer d'une part par la solubilité de ces composés dans le solvant d'extraction, la polarité du solvant, la viscosité et la pression de vapeur [Wijekoon et al., 2011 ; Annegowda et al., 2013], et d'autre part, par l'origine géographique, les caractéristiques de sol et les conditions climatiques. En effet, la teneur des composés phénoliques d'une plante dépend d'un certain nombre de facteurs intrinsèques (génétiques, maturité à la récolte, etc.) et extrinsèques (conditions climatiques, la maturité à la récolte) [Podsdek, 2007 ; Falleh et al., 2008]. Les taux trouvés en polyphénols totaux sont proches

de certains autres fruits [Patthamakanokporn et al., 2008 ; Wijekoon et al., 2011 ; Annegowda et al., 2013]. En effet, l'extraction de ces substances bioactives a été basée sur les résultats d'autres travaux de recherche affirmant que l'éthanol et l'eau sont les solvants les plus appropriés pour l'extraction de composés bioactifs à partir de matériaux végétaux avec une bonne acceptabilité pour la consommation humaine [Annegowda et al., 2013].

Nous pouvons déduire que la poudre de citrouille issue de séchage SD possède des propriétés biologiques très intéressantes en comparaison avec les autres poudres analysées. Ceci en raison de sa richesse en PPT. En effet, [Babar et al., 2007] rapportent que les polyphénols possèdent des propriétés biologiques diverses telles que des propriétés antibactériennes anti-inflammatoires, antivirales.

Sachant que, que les composés poly-phénoliques présents dans les aliments d'origine végétale agissent comme antioxydants potentiels et sont des piègeurs de radicaux libres actifs [Herken et al., 2010 ; Bhat et al., 2011]. Fondamentalement, le mécanisme antioxydant de ces composés est basé sur leurs capacités de chélation et de donneur d'hydrogène [Lee et al., 2004 ; Wijekoon et al., 2011].

Ainsi que, le taux des flavonoïdes est influencé par le procédé de séchage et le type de solvant utilisé. En effet, la poudre issue de séchage des tranches de citrouille par VMFD avait la plus forte teneur en flavonoïdes (3.04 mg QE/g d.b dans l'éthanol). Tandis que, les valeurs les plus basses ont été enregistrées pour les deux extraits des échantillons de citrouille séchés par AFD (0,161± 0,01453 et 0,03767± 0,00814 mg QE / g d.b dans l'éthanol et l'extrait aqueux, respectivement). Les flavonoïdes sont des composés phénoliques de faible masse molaire, qui se trouvent dans différentes parties de la plante aux niveaux du fruit, de la fleur ou de la feuille. Ces composés sont des puissants antioxydants capables de retarder l'oxydation des lipides en inhibant l'activité de la lipoxigénase [Annegowda et al., 2013]. Par conséquent, la présence de flavonoïdes, même à des seuils différents dans la citrouille, devrait avoir des effets bénéfiques sur la santé humaine.

**Tableau III.4-1. Teneur totale en composés phénoliques et flavonoïdes par extractions aqueuse et par éthanol des tranches de citrouille obtenus après différentes méthodes de séchage.**

Méthodes de séchage	Phénoliques totaux (mg GAE/g db)		flavonoïdes totaux (mg QE /g db)	
	Ethanol	Aqueux	Ethanol	Aqueux
AFD	0,01767± 0,00513	0,02833± 0,00643	0,161± 0,01453	0,03767± 0,00814
VMFD	3,90877± 0,18059	4,91607± 4,26271	3,04963± 0,20747	0,29077± 0,12824
SD	1,79647± 0,24668	6,10173± 1,68649	1,39363± 0,17414	0,34367± 0,12386
FD	3,95087± 0,47614	0,1685± 0,1789	1,60993± 0,14167	0,3156± 0,2705

GAE : mg Equivalent Acide Gallique; QE : Equivalent Quercetine; toutes les valeurs sont exprimées à base sèche (db) ; Tout les résultats sont exprimés par la moyenne ± l'écart type de trois répétitions.

### III.4.3.3. Activité antimicrobienne

Les résultats de cette activité révèlent que, les extraits aqueux issus des poudres des échantillons de citrouille séchés par AFD, VMFD et SD ont montré les meilleures zones d'inhibition vis-à-vis du *P. aeruginosa* ATCC 27853 ( $\Theta > 20$  mm) en comparaison avec les deux autres souches qui s'avèrent

nettement plus résistantes ou moins sensibles aux mêmes types extraits analysés (Tableau III.4-2). Cependant, les extraits ethanoliques issus des poudres analysées sont moins efficaces que les extraits aqueux issus de différentes poudres de citrouille vis-à-vis des souches testées.

Nous pouvons déduire que, les extraits aqueux issus de ces poudres montrent un plus large spectre d'activité sur les Gram- et les levures. Ces extraits exercent une action bactériostatique, vis-à-vis la souche examinées [Sagdaç, 2003]. Cette activité est liée à la richesse de ces poudres en PPT et en flavonoïdes.

Il est intéressant de formuler des compléments ou des formes pharmaceutiques à base de ces poudres. La parfaite décontamination qu'apporte le traitement DIC et le faible coût de l'opération font que le swell drying se présente comme ayant une dimension particulièrement plus intéressante dans ce domaine.

**Tableau III.4-2. Activité antimicrobienne des poudres de citrouille obtenues à partir des différentes méthodes de séchage**

Méthodes de séchage	Zones d'inhibition (mm)					
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>		<i>Staphylococcus aureus</i>		<i>Aspergillus niger</i>	
	A.E (4%)	E.E (4%)	A.E (4%)	E.E (4%)	A.E (4%)	E.E (4%)
AFD	Ø>20	8.5	R	6	9.5	R
VMFD	Ø>20	20	R	7.5	R	R
SD	Ø>20	7.5	-	10	12.5	R
FD	R	7	R	R	6	R

E.E= Extrait Ethanolique; A.E= Extraits aqueux; R= Resistant

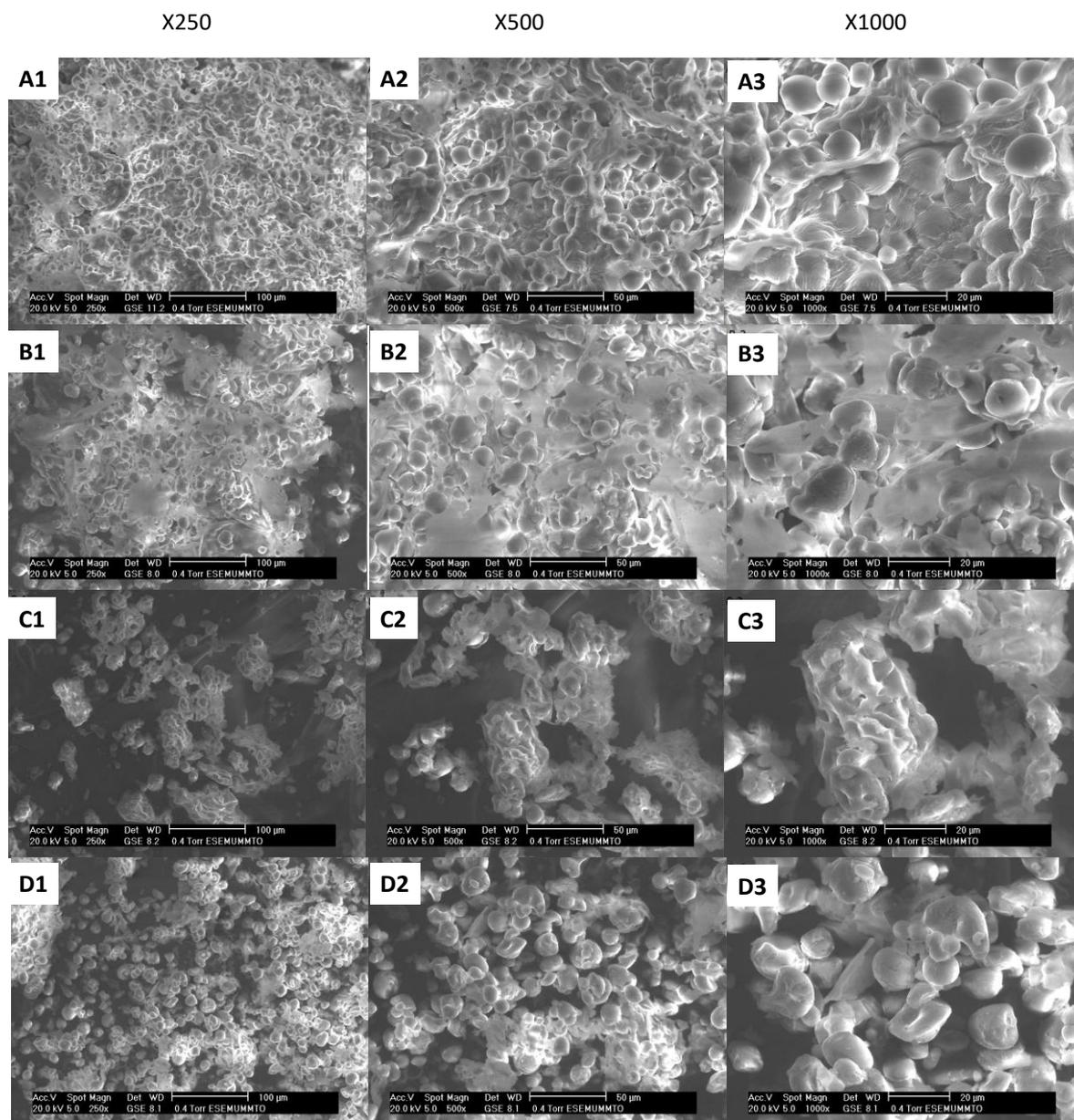
#### III.4.3.4. Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

La morphologie des diverses poudres de citrouille préparées par les diverses techniques de séchage a été examinée par MEB. La Figure III.4-3 montre l'impact des différents procédés de séchage sur la microstructure des poudres obtenues à partir des différentes méthodes de séchage. En effet, les diverses poudres AFD, VMFD et FD (A, B, D de la Figure III.4-3) possèdent la même structure granuleuse de différentes tailles. Cependant, la microstructure de la poudre de citrouille séchée par SD montre l'impact important de la texturation DIC (C de la Figure III.4-3). Cette microstructure peut s'expliquer par de nombreuses constatations de grand taux d'expansion, de faibles masses volumiques apparentes, et également de grande porosité au sein du produit. Nos résultats coïncident avec ceux rapportés par [Mounir et al., 2011].

#### III.4.3.5. Analyse Spectrale : spectroscopies IR

Les spectres FT-IR de AFD, VMFD, SD et FD sont présentés à la Figure III.4.4 (a) AFD; (b), VMFD ; (c) Swell-drying SD et (d), FD. En effet, les quatre spectres montrent l'apparition des mêmes pics caractéristiques, avec une plus large bande d'absorption autour de  $3350\text{ cm}^{-1}$ , due aux interactions O-H stretching, alors que des pics d'environ  $2920\text{ cm}^{-1}$  ont été attribués aux interactions de vibration C-H stretching. AFD, VMFD, SD et FD ont toutes montré des bandes d'absorbance IR à  $1740\text{ cm}^{-1}$ ,  $1600$  et  $1410\text{ cm}^{-1}$  due au C=O stretching (stretching asymétrique et symétrique) de groupe -COOR [Singthong et al., 2004], ce qui suggérerait l'existence d'acide uronique. Sachant que

chaque polysaccharide particulier a une bande spécifique dans la région de 1200-1000  $\text{cm}^{-1}$  [Kacurakova et al., 2000 ; Gnanasambandam et al., 2000], la region est dominée par vibrations annulaires chevauchant les vibrations d'étirement des groupes latéraux (C-OH) et la vibration de la bande glycosidique (C-O-C). Nous remarquons que la texturation par DIC, par comparaison avec les échantillons ayant subi le séchage par air chaud, en améliore l'intensité des pics caractéristiques attribués aux groupements fonctionnels. L'intensité est d'autant plus élevée que le produit a, au préalable, subi pré séchage ou un séchage doux [Li et al., 2010].



**Figure III.4-3. Microscopie électronique à balayage MEB de poudres de citrouille séchées par différentes méthodes: A) séchage par flux d'air (AFD); B) Séchage multi-flash sous vide (VMFD); C) séchage swell-drying (SD); D) Lyophilisation (FD).**

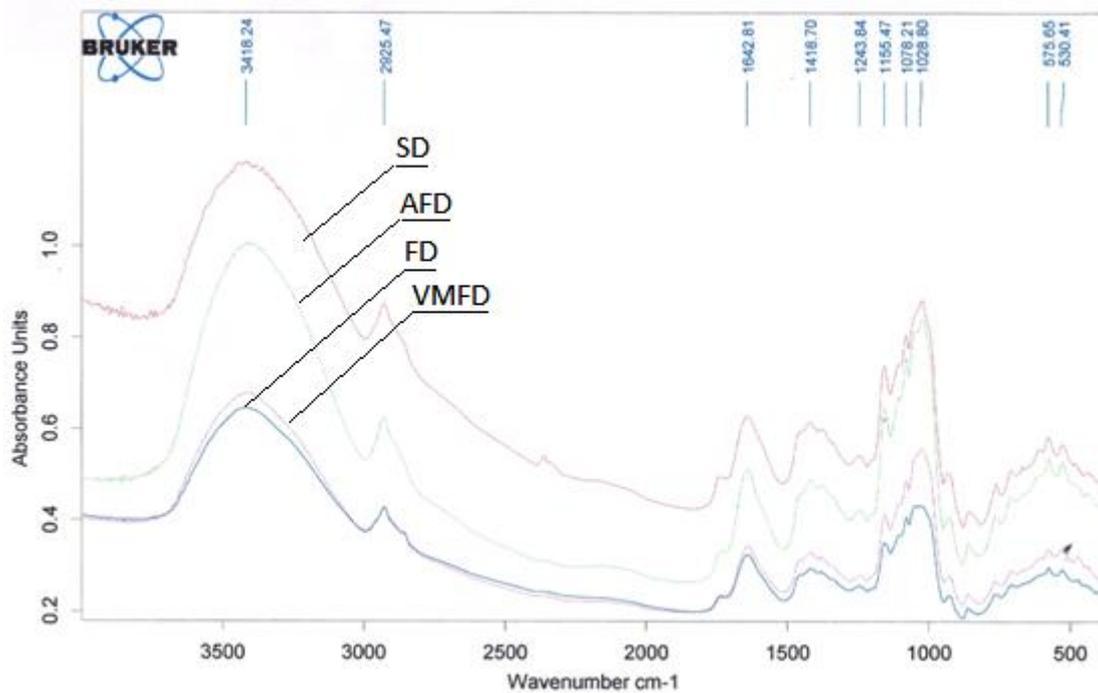


Figure III.4-4. Spectre de FT-IR de poudre de citrouille issue de diverses méthodes de séchage

#### III.4.4. CONCLUSION

Les résultats obtenus confirment que la technique de séchage et les solvants d'extraction utilisés ont un impact important sur la qualité de la poudre. En général, parmi les techniques de séchage analysées, on considère que le Swell-Drying SD est celui qui assure la meilleure préservation avec une faible dégradation de la qualité des poudres de citrouille. Le séchage par SD, qui est la technique la plus courante (moins coûteuse que la lyophilisation) pour la production de produits alimentaires, peut être recommandé pour la production de poudres de citrouille. Cependant, la production de poudre de citrouille de haute qualité doit toujours être adaptée aux exigences et à la conception du produit final.

## BIBLIOGRAPHIE

- Albitar, N., Mounir, S., Besombes, C., & Allaf, K. (2011). Improving the Drying of Onion Using the Instant Controlled Pressure Drop Technology. *Drying Technology*, 29, 993-1001.
- Annegowda, H.V., Bhat, R., Yeong, K.J., Liong, M.-T., Karim, A.A., Mansor, S.M. (2013). Influence of Drying Treatments on Polyphenolic Contents and Antioxidant Properties of Raw and Ripe Papaya (*Carica papaya* L.). *International Journal of Food Properties* 17(2): 283-292.
- Babar Ali, M., Hahn, E.J., Paek, K.Y. (2007). Methyl Jasmonate and Salicylic Acid Induced. Oxidative Stress and Accumulation of Phenolics in *Panax ginseng* Bioreactor Root. Suspension Cultures. *Molecules*. 12: 607-621.
- Barbosa-Canovas, G.V., & Vega-Mercado, H. (1996). *Dehydration of foods*. New York : Chapman & Hall.

- Bhat, R., Kamaruddin, N.S.B.C., Liong, M.T., Karim, A.A. (2011). Sonication ameliorates Kasturi lime (*Citrus microcarpa*) juice quality. *Ultrasonics and Sonochemistry*, 18, 1295-1300.
- Bhat, M.A., Bhat, A. (2013). Study on PhysicoChemical Characteristics of Pumpkin Blended Cake, *Food Processing & Technology* 4(9) :1-4.
- Boaduo, N.K., Katerere, D., Eloff, J.N., Naidoo, V. (2014). Evaluation of six plant species used traditionally in the treatment and control of diabetes mellitus in South Africa using in vitro methods. *Pharm Biol* 52: 756–61.
- Cerniauskiene, J., Kulaitiene, J., Danilcenko, H., Jariene, E., Jukneviene, E. (2014). Pumpkin fruits as source for food enrichment in dietary fiber. *Not Bot Horti Agrobo* 42 (1) :19-23.
- Cumarasamy, R., Corrigan, V., Hurst, P., Bendall, M. (2002). Cultivar differences in New Zealand “Kabocho” (buttercup squash, *Cucurbita maxima*). *N Z J Crop Hortic Sci.* 30 :197–208.
- Dewanto, V., Wu, X., Adom, K., Liu, R.H. (2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity *J. Agric. Food Chem.*, 50, pp. 3010-3014.
- Falleh, H., Ksouri, R., Chaieb, K., Karray-Bouraoui, N., Trabelsi, N., Boulaaba, M. and Abdelly, C. (2008). Phenolic composition of *Cynara cardunculus* L. organs, and their biological activities. *Compt. Rend. Biol. Vol. 331.* pp. 372-379.
- Gnanasambandam, R., Proctor, A. (2000). Determination of pectin degree of esterification by diffuse reflectance Fourier transform infrared spectroscopy. *Food Chem.* 68 :327-332.
- Gutierrez-Pacheco, S., Godbout, S., Palacios, J. H., Parra-Coronado, A., Zegan, D., Lagacé, R., & Pelletier, F. (2016). Potato color evolution in swell drying. The Canadian Society for Bioengineering. Paper No. CSBE16-105
- Haddad, J., & Allaf, K. (2007). A study of the impact of instantaneous controlled pressure drop on the trypsin inhibitors of soybean. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 353-357.
- Hammar, K.A., Carson, C.F., Riley, R.V. (1999). Antimicrobial activity of essential oils and other plant extracts. *J Appl Microbiol.*;86 :985–90.
- Herken, E.N., Guzel, S. (2010). Total antioxidant capacity and total phenol contents of selected commercial fruit juices in Turkey. *International Journal of Food Properties*, 13, 1373-1379.
- Jian, L., Du, C.J., Lee, A.H., Binns, C.W. (2005). Do dietary lycopene and other carotenoids protect against prostate cancer? *Int J Cancer.*113 :1010–1014.
- Kacurakova, M., Capeka, P., Sasinkova, V., Wellner, N. and Ebringerova, A. (2000). FT-IR study of plant cell wall model compounds : Pectic polysaccharides and hemicelluloses. *Carbohydr. Polym.* 43 :195-203.
- Kamal, I. M., Sobolik, V., Kristiawan, M., Mounir, S. M., & Allaf, K. (2008). Structure expansion of green coffee beans using instantaneous controlled pressure drop process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(4), 534-541.
- Kosalec I., Bakmaz M., Pepeljnjak S. and Valadimir-Kneg EICS. (2004). Quantitative analysis of the flavonoids in raw propolis from northern Croatia-*Acta Pharn.* 54 :65-72.
- Krokida, M. K., & Maroulis, Z. B. (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, 15, 2441–2458.

- Kulkarni, A.S. and Joshi, D.C.(2013). Effect of replacement of wheat flour with pumpkin powder on textural and sensory qualities of biscuit, *International Food Research Journal* 20(2) : 587-591.
- Lee, J., Koo, N., Min, D.B. (2004). Reactive oxygen species, aging, and antioxidative nutraceuticals. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 3, 21–33.
- Leong, S. Y., Oey, I. (2012). Effects of processing on anthocyanins, carotenoids and vitamin C in summer fruits and vegetables. *Food Chemistry*, 133, 1577–1587.
- Li, J., Wang, Y., Zhang, D., Hu, X., Zhang, Z., & Xiang, C. (2010). Characterization and bioactivity of water-soluble polysaccharides from the fruit of pumpkin. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8, 237–241.
- Louka, N., Allaf, K. (2004a). Expansion ratio and color improvement of dried vegetables texturized by a new process “controlled sudden decompression to the vacuum” : application to potatoes, carrots and onions. *Journal of Food Engineering*, 65 : 233 – 243.
- Louka, N., Juhel, F., Allaf, K. (2004b). Quality studies on various types of partially dried vegetables texturized by Controlled Sudden Decompression : General patterns for the variation of the expansion ratio. *Journal of Food Engineering*, 65(2) : 245 – 253.
- Mau, J.L., Chao, G.R., Wu, K.T. (2001). Antioxidant properties of methanolic extracts from several ear mushrooms *J. Agric. Food Chem.*, 49: 5461-5467
- Miliauskas, G., Venskutonis, P.R., Beek, T.A., (2004). Screening of radical scavenging activity of some medicinal and aromatic plant extracts. *Food Chem.* 85, 231–237.
- Mounir, S., Besombes, C., Al-Bitar, N., & Allaf, K. (2011). Study of Instant Controlled Pressure Drop DIC Treatment in Manufacturing Snack and Expanded Granule Powder of Apple and Onion. *Drying Technology*, 29(3), 331-341.
- Mounir, S., Halle, D., Allaf, K. (2011). Characterization of pure cheese snacks and expanded granule powders textured by the instant controlled pressure drop (DIC) process. *Dairy Sci. & Technol.* 91 :441–455.
- Mounir, S., Allaf T., Mujumdar, A. S., Allaf, K. (2012). Swell Drying : Coupling Instant Controlled Pressure Drop DIC to Standard Convection Drying Processes to Intensify Transfer Phenomena and Improve Quality—An Overview. *Drying Technology* 30 (14).
- Nawirska-Olszańska, A., Kita, A., Biesiada, A., Sokół-Łętowska, A., Kucharska, A.Z. (2013) Characteristics of antioxidant activity and composition of pumpkin seed oils in 12 cultivars. *Food Chem* 139 :155–61.
- OMS. WHO Global Burden of Disease 2002 estimates. WHO, 2005
- Patthamakanokporn, O., Puwastien, P., Nitithamyong, A., Sirichakwal, P.P. (2008). Changes of antioxidant activity and total phenolic compounds during storage of selected fruits. *Journal of Food Composition and Analysis*, 21,241–248.
- Podsedeck, A. (2007) Natural antioxidants and antioxidant capacity of Brassica vegetables: A review. *LWT-Food sci Tech*, 40:1-11.
- Ponce, A.G., Fritz, R., Del Alle, C. Roura, S.I. (2003). Antimicrobial activity of essential oil on the native microflora of organic Swiss chard. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologic*, 36: 679-684.

- Pongjanta, J., Naulbunrang, A., Kawngdang, S., Manon, T., Thepjaikat, T. (2006). Utilization of pumpkin powder in bakery products. *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 28 (1): 71-79.
- Rahal, K. (2005). Standardisation de L'antibiogramme en Médecine Humaine à l'Echelle Nationale selon les recommandations de l'OMS, 4ème édition, éd Ministère de la Santé, de la Population et de la Réforme Hospitalière.
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods-a review. *Journal of Food Engineering*, 49, 311–319.
- Roongruangsri, W., Bronlund, J.E. (2015). A Review of Drying Processes in the Production of Pumpkin Powder. *International Journal of Food Engineering*, 11 (6).
- Sağdıç, O. (2003) Sensitivity of four pathogenic bacteria to Turkish thyme and oregano hydrosols. *Lebensm.-Wiss. U.-Technol.* 36: 467-473.
- Sehrawat, R., Nema, P.K., Pal Kaur, B. (2016). Effect of superheated steam drying on properties of foodstuffs and kinetic modeling. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34 : 285-301.
- Singthong, J., Cui, S. W., Ningsanond, S., Goff, H.D. (2004). Structural characterization, degree of esterification and some gelling properties of Krueo Ma Noy (*Cissampelos pareira*) pectin. *Carbohydr. Polym.* 58: 391-400.
- Wijekoon, M.M.J.O., Rajeev, B., Karim, A.A. (2011). Effect of extraction solvents on the phenolic compounds and antioxidant activities of bunga kantan (*Etilingera elatior* Jack.) inflorescence. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24: 615-619.
- Yadav, M, Jain,, S, Tomar, R, Prasad, G, Yadav, H. (2010). Medicinal and biological potential of pumpkin : an updated review. *Nutrition research reviews* 23 (2): 184-190
- Yagci, S., Evci, T. (2015). Effect of instant controlled pressure drop process on some physicochemical and nutritional properties of snack produced from chickpea and wheat. *International Journal of Food Science and Technology*, 50 : 1901-1910.
- Zuhair, H.A., Abd El-Fattah, A.A., El-Sayed, M.I. (2000). Pumpkin-seed oil modulates the effect of felodipine and captopril in spontaneously hypertensive rats. *Pharmacol Res* 41 :555–63.

## **CONCLUSION GENERALE**

Les fruits et les légumes sont tous des organes de végétaux vivants qui contiennent de 65 à 95% d'eau et dont les processus vitaux se poursuivent après la récolte. En conséquence, le traitement des aliments est impératif pour prolonger la durée de conservation et les principales caractéristiques de qualité des produits. Le présent travail de recherche avait pour objectif principal de contribuer à la compréhension, au développement et à l'amélioration du processus de séchage solaire des fruits et légumes.

Cette thèse s'est basée sur trois parties principales : la source d'énergie (gisement solaire en Algérie), l'unité de chauffage (insolateur plan à air muni d'ailettes destiné au séchage des produits agricoles) et l'unité de séchage (caractérisations technologiques, texturales, physiques, fonctionnelles et finalement, les contenus microbiologique et nutritionnel)

### **GISEMENT SOLAIRE EN ALGERIE**

La connaissance des variables météorologiques agissant sur le processus de séchage solaire en Algérie aide considérablement au bon choix du lieu d'implantation de procédé de séchage solaire et peut contribuer à diminuer sensiblement la consommation d'énergie. En effet, les cartes isoplèthes élaborées dans cette étude améliorent clairement la description et la compréhension des facteurs météorologiques agissant sur le processus de séchage solaire. Elles facilitent aussi l'analyse et la valorisation du gisement et permet de distinguer les forts contrastes entre les différentes zones étudiées. Le périmètre de l'étude présentée dans ce travail a été élargi de manière à englober toutes les villes représentatives de l'ensemble des climats algériens. L'ajustement de la distribution empirique estimée par la méthode de noyau aux données se révèle être une bonne approximation dans tous les cas considérés.

L'utilisation du potentiel solaire comme source d'énergie adaptée au séchage solaire des produits agricoles dans les sept zones climatiques de l'Algérie a été largement appréciée. L'analyse montre qu'au cours de la saison estivale, période de récolte, une très bonne performance de système de séchage solaire est également prévue à Tamanrasset, Ghardaïa et beaucoup plus à Adrar où l'intensité de rayonnement solaire est plus stable et élevée, la température ambiante touche les 45° et l'humidité relative peut être inférieure à 10% l'après-midi. Après Adrar, Tamanrasset et Ghardaïa, Chlef est la ville la plus chaude suivie de Batna, Tlemcen et Alger. Elle dispose d'un climat très favorable au séchage solaire. Effectivement, Ces cartes isoplèthes peuvent être utilisées pour diverses applications d'énergie solaire en Algérie.

### **UNITE DE CHAUFFAGE (L'INSOLATEUR PLAN A AIR)**

La prise en compte croissante des impératifs environnementaux a conduit à un développement considérable des énergies renouvelables dans lesquelles le pays est devenu un des leaders mondiaux. Les pertes post-récolte des produits agricoles dans les zones rurales des pays en développement peuvent être réduits de façon rigoureuse en utilisant des systèmes de séchage solaire simple, parfaitement adaptés aux besoins socio-économiques, de conception fondamentale directe et précise et de diverses tailles. Une fois les zones favorisées sont identifiées et le bon

séchage solaire reconnu, le système de séchage pourra être fondé sur un type spécifique d'insolateur à air. Cet élément constitue l'aspect le plus important d'un système de séchage solaire. Il a été la base d'étude et de simulation de l'insolateur le plus adapté à ces zones. Un modèle mathématique complet d'insolateur solaire à air a été présenté, comprenant l'influence de rayonnement solaire sur le fonctionnement annuel de système étudié. La simulation numérique de l'insolateur basée sur ce modèle a été faite sous l'environnement MATLAB. L'étude a été étendue à plusieurs villes de l'Algérie et les résultats ont montré que l'insolateur plan à air muni d'ailette est généralement considéré rentable, surtout dans le climat désertique (Adrar, Ghardaïa, Tamanrasset etc.) et on peut conclure que l'insolateur plan à air muni d'ailette peut être considéré comme l'un des systèmes d'énergie solaire les plus rentables en Algérie. Ainsi, les cartes isopèthes des isothermes élaborées dans cette étude permettent de visualiser clairement la réponse instantanée de l'insolateur dans des conditions météorologiques différentes, ce qui facilite l'analyse et la valorisation de l'énergie solaire récupérée. En plus, cette technique permet également de voir les forts contrastes entre les différents sites étudiés. Elles peuvent aussi obtenir un degré élevé de certitude sur le fonctionnement de l'insolateur à n'importe quel moment de l'année sur le territoire national quelles que soient les variations météorologiques observées.

En plus, Les opérations de séchage solaire à des valeurs d'éclairement élevées engendrent une augmentation de la température de séchage, ce qui nuit à la qualité du produit séché, y compris la valeur nutritive. Pour surmonter cet inconvénient, une fonction reliant le débit d'air, la température optimale de séchage, la température ambiante et l'irradiation solaire incidente a été élaborée. Ceci est réalisé en effectuant un travail de simulation en faisant varier le débit en fonction du temps et en enregistrant les températures à la sortie de l'insolateur correspondantes dans différents scénarios d'irradiance solaire courants du site. Ensuite, le tracé des contours d'isothermes en fonction du temps et du débit est réalisé. A partir de ce tracé, on déduit la fonction souhaitée de la variation du débit avec le temps pour avoir une température à la sortie de l'insolateur constante. Le travail de simulation a été effectué sous des ressources météorologiques qui imitent celles du site où le processus de séchage doit être effectué. Pour être plus clair, le code de calcul que nous avons développé concernant l'étude de la source de chaleur produite par l'insolateur muni d'ailettes OSF (Offset Strip Fins), nous a permis d'étudier les performances thermiques instantanées de l'insolateur et l'influence des paramètres aérothermique de l'air sur la température de séchage à la sortie de l'insolateur d'une façon détaillée.

Le fait que ces paramètres dépendent des variables non déterminées à leur tour, nous a obligés de concevoir un algorithme de calcul sous forme itérative. Le rayonnement solaire incident sur l'insolateur subit de nombreuses fluctuations dues aux passages nuageux ainsi qu'aux fluctuations de la température ambiante, alors que le pic de la température à la sortie de l'insolateur dépend du débit d'air. Le résultat global de la simulation a été satisfaisant car le débit d'air instantané a été contrôlé pour maintenir la température de séchage constante pendant la période de séchage. Ce faisant, la qualité et la valeur nutritive des produits séchés sont maintenues à un niveau standard acceptable.

On a également constaté que le séchage à débit variable à une température optimale égale à  $50 \pm 1$  °C, la quantité d'air aspiré à l'entrée était de 1207,8 kg. En revanche, un séchage à débit constant d'un total de 625,5 kg d'air a été souhaité et il peut en résulter une fluctuation de la température de séchage qui affecte la qualité du produit séché. Ainsi, le débit variable permet un taux de gain de l'air aspiré de 93% et une meilleure qualité du produit. Ceci est valable pour une journée à ciel clair. En cas d'une journée à ciel partiellement nuageux, le taux de gain était respectivement de 104% et 78%.

Les résultats pourraient également être bénéfiques pour le concepteur de contrôle de système. Ils peuvent être utilisés comme base pour le contrôle en boucle ouverte de l'insolateur dans lequel la température d'air à la sortie est maintenue constante quelle que soit la fluctuation des conditions météorologiques.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus pourraient être bénéfiques aux praticiens des systèmes de séchage solaire dans les régions arides et semi-arides pour avoir un produit de meilleure qualité dans des conditions météorologiques difficiles.

#### **UNITE DE SECHAGE (CARACTERISATIONS DIVERSES)**

- **Modélisation mathématique empirique de la cinétique de séchage**

La Modélisation et l'identification de comportements de produit lors de la déshydratation sont très importantes pour l'étude de différents systèmes de séchage, de la mise à l'échelle du procédé, de l'optimisation des différentes conditions de traitement et de la définition de la viabilité commerciale. Donc, Il est très important d'utiliser des modèles empiriques incluant les conditions de l'air de séchage et l'épaisseur des tranches (T, V et E) pour modéliser la cinétique de séchage à l'échelle macroscopique. Afin d'analyser les phénomènes et processus de séchage convectif et d'identifier un modèle mathématique à partir des données du matériau (tranche de citrouille), sept modèles de séchage en couche mince, disponibles dans la littérature et trois nouveaux modèles dérivés de la meilleure corrélation ont été comparés en utilisant les paramètres statistiques. Parmi ces modèles, les modèles Approximation of Diffusion, Midilli-Kucuk et Page ont donné les meilleurs résultats et ont montré un bon accord avec les données expérimentales obtenues à partir des expériences. L'effet des variables intrinsèques (températures et vitesse de l'air de séchage) et extrinsèques (épaisseur des tranches) sur les constantes du modèle de Midilli- Kucuk a été examiné. Le modèle résultant affiche de bons ajustements aux données expérimentales dans la vérification en dehors des domaines de conception du plan d'expériences ( $R^2 = 0,998$ ,  $\chi^2 = 0,0002$  et  $RMSE = 0,0142$ ). En outre, d'autres expériences indépendantes ont également été effectuées pour vérifier l'exactitude du modèle, et les résultats indiquent que la valeur prédite par le modèle est bien corrélée avec la valeur expérimentale.

- **Optimisation des conditions opératoires du séchage**

La méthodologie de surface de réponse (RSM) a été prouvée pour être un outil puissant pour déterminer les effets de chaque facteur et les interactions entre eux, ce qui permet l'optimisation des processus à mener efficacement. La disponibilité plus importante des logiciels et la durée plus réduite nécessaire pour optimiser les processus, les produits et la conception sont essentielles. Elles

ne sont pas seulement dues à la vitesse de l'ordinateur, mais aussi en raison de la possibilité d'utilisation des techniques permettant de réduire la quantité des données expérimentales nécessaires à l'analyse d'optimisation. Cela a conduit à une meilleure compréhension du processus par les résultats représentés sous la forme de graphiques telles que des surfaces et des contours 3D. Un dispositif expérimental a été construit selon les conditions de conception optimale de (RSM) afin d'étudier l'influence des conditions opératoires du séchage de la citrouille (tel que l'épaisseur de l'échantillon, la température et la vitesse d'air asséchant) sur le taux de déshydratation. A partir du modèle de régression quadratique de la surface de réponse, nous avons constaté que le taux de déshydratation a été affecté de façon significative par l'épaisseur des échantillons. Les conditions opératoires optimisées sont présentées comme suit : Température de l'air de 70.2 °C, vitesse de l'air de 15 m/s, épaisseur des échantillons de 1.03 cm. À ces conditions le taux de déshydratation est de 73,1138.

- **Modélisation du transfert de masse au cours du processus de réhydratation**

Les caractéristiques de réhydratation d'un produit séché sont utilisées comme indice de qualité et indiquent les changements physiques et chimiques au cours du séchage, influencés par les conditions de traitement, le prétraitement des échantillons et la composition. Une parfaite compréhension de processus est nécessaire pour obtenir leur optimisation parfaite. Dans cette partie de la thèse, différentes méthodes de séchage, à savoir le séchage par flux d'air chaud (AFD), la lyophilisation (FD), le swell-drying (SD) défini comme une insertion du traitement DIC entre deux étapes de AFD et le séchage sous vide multi-flash (VMFD) ont été étudiés. La qualité du produit fini a été quantifiée en termes de réhydratation dans le cas spécifique des tranches de citrouille. Les résultats ont démontré que les techniques de séchage ont un effet significatif sur la cinétique de réhydratation. A trois températures de réhydratation, on a constaté que le séchage par air chaud (AFD) était le procédé qui induit la plus lente réhydratation, tandis que les autres procédés tels que FD, SD et VMFD permettent d'avoir un bien meilleur temps de réhydratation. En outre, on a constaté que les tranches de citrouilles séchées par FD et SD présentaient le taux de réhydratation le plus élevé avec un modèle de diffusion phénoménologique caractérisé par trois coefficients de diffusion effective, ou trois étages ( $D_{eff_1}$ ,  $D_{eff_2}$  et  $D_{eff_3}$ ). Cela est dû à l'interaction entre l'eau et la surface de la matrice, à une porosité élevée, facilement accessibles à l'eau et une nécessité de traverser les parois cellulaires. Le transfert de masse le plus élevé est obtenu au cours des premières minutes de réhydratation, pour, ensuite, diminuer jusqu'à ce que les échantillons atteignent une saturation en eau. Cependant, dans le cas des tranches séchées par AFD et VMFD, le transfert de masse le plus important a eu lieu après la première étape du processus de réhydratation en raison de la rétraction des tranches qui peut se produire pendant le processus de séchage. Ce rétrécissement ralentit la diffusion de l'eau de la surface vers le centre. La dépendance de la température de réhydratation a été modélisée de manière adéquate en utilisant l'équation d'Arrhenius avec deux énergies d'activation dans le cas de tranches séchées en utilisant AFD et VMFD et trois niveaux d'énergie d'activation pour les tranches séchées avec SD et FD.

Plusieurs modèles empiriques ont été testés pour analyser la cinétique de réhydratation. Le modèle de Weibull a donné le meilleur ajustement aux résultats expérimentaux avec le coefficient  $R^2$  le plus

élevé, la plus faible valeur de  $\chi^2$  et de *RMSE*. Ils ont été tous considérés comme la meilleure façon d'élucider les caractéristiques de réhydratation des tranches de citrouille séchées en fonction de différentes méthodes de séchage ; AFD, VMFD, SD et FD. Le choix de techniques de séchage appropriées et de la température de réhydratation adéquate est essentiel pour la conception d'un processus de réhydratation fiable produisant des produits alimentaires de haute qualité.

- **Effet de différentes méthodes de séchage sur la qualité des poudres de citrouille**

De nouvelles tendances dans le processus de séchage sont utilisées pour améliorer la qualité des aliments séchés et préserver leur valeur nutraceutique. En plus des anciennes méthodes de séchage, on a utilisé deux nouvelles technologies, la déshydratation sous vide multi-flash VMFD et le séchage par Swell-Drying SD combinant AFD + DIC + AFD. Ces nouvelles technologies peuvent améliorer les performances des processus et les attributs de qualité des aliments séchés tels que les citrouilles. Les résultats obtenus confirment que la technique de séchage et les solvants d'extraction utilisés ont un impact important sur la qualité de la poudre. En général, parmi les techniques de séchage analysées, on considère que le séchage par SD est celui qui a le plus faible impact sur la dégradation de la qualité des poudres de citrouille. Le séchage par SD, qui est la technique la plus courante (plus économique que la lyophilisation) pour la production de produits alimentaires, peut être recommandé pour la production de poudres de citrouille. Cependant, la production de poudre de citrouille de haute qualité doit toujours être adaptée aux exigences et à la conception du produit final.

## **PERSPECTIVE**

Bien que le procédé de séchage solaire ait été utilisé depuis des millénaires et étudié pendant plusieurs siècles, le séchage des fruits et légumes reste un grand potentiel dans le secteur de la recherche scientifique et le développement technologique. Les consommateurs exigent des produits séchés capables de satisfaire à la fois les besoins nutritionnels, les qualités hygiéniques et organoleptiques, mais surtout à des prix abordables. Cette thèse se veut une contribution originale à la compréhension en fournissant des informations de base et appliquées sur le séchage des tranches de citrouille, en utilisant différents procédés de séchage tels que le séchage à l'air chaud AFD, le séchage par lyophilisation FD, le séchage sous vide multi-flash VMFD et le séchage par Swell-Drying SD couplant l'air chaud et Détente Instantanée Contrôlée (DIC). Ensuite, les recherches futures dans ce domaine de séchage doivent être abordées sur plusieurs aspects :

- Il est nécessaire d'étendre l'utilisation de la technique des cartes isoplethes pour l'analyse des variables météorologiques influençant le processus de séchage solaire à d'autres zones climatiques dans le monde. Un effort devra être mené pour la collecte de données, mais elles facilitent considérablement l'analyse et la valorisation du gisement solaire et permet de distinguer les forts contrastes entre les différentes zones ce qui permet de prévoir l'efficacité du système de séchage solaire dans toute condition climatique.
- Il est important d'examiner aussi l'influence des conditions météorologiques avec d'autres types de séchoirs solaires.

- Il est nécessaire d'étendre cette étude à d'autres fruits et légumes afin de soutenir techniquement des produits finis à l'échelle industrielle pour diverses applications (des aliments pour bébés, des aliments instantanés, etc.) pour les rendre disponibles dans le marché.
- La pression et le temps de traitement DIC, la taille, la forme et la teneur en eau des matières premières dans la chambre de traitement peuvent affecter l'efficacité du traitement DIC et les propriétés du produit fini. Il serait très utile de les examiner dans le futur.
- Ce travail a permis la caractérisation des tranches de citrouille d'un point de vue des propriétés physico-chimiques, de la teneur totale en phénolique, en flavonoïdes et en activité antibactérienne. Les données structurales (texturales), les cinétiques de séchage et de déshydratation seront indispensables pour mener à bien l'ensemble de ces études. Néanmoins, certaines propriétés d'ordre microbiologiques, nutritionnelles, sensorielles du produit fini devraient être également examinées.

L'ensemble de l'étude couplant l'analyse phénoménologique et les relations empiriques devrait permettre une meilleure définition du procédé de séchage. Il serait important d'exploiter les résultats obtenus au laboratoire pour passer à l'échelle pilote puis industrielle. Il faudrait compléter l'étude, par une étude économique du coût d'une telle opération, de la consommation énergétique et de l'impact environnemental.

**ملخص :** قمنا في هذه الأطروحة بالتحقيق في تحسين وإتقان عملية التجفيف الشمسي للمنتجات الزراعية مركزين في ذلك على جانبين أساسيين: (1 استخدام الطاقة الشمسية في عملية التجفيف و (2 تحسين جودة المنتج النهائي، بادئين بتقديم عرض بيليوغرافي للأبحاث السابقة التي تناولت مفاهيم مختلفة تتعلق بهذه الأطروحة، وبعد ذلك درسنا في ثلاث فصول تكميلية استغلال مصادر الطاقة المتجددة التي توفرها الشمس لأغراض التجفيف. أولاً، إنشاء خرائط كنتورية لتسهيل تحليل متغيرات الأرصاد الجوية التي تؤثر على عملية التجفيف الشمسي في الجزائر. ثانياً، تقييم الطاقة الشمسية التي تم استردادها من قبل المجفف الشمسي المجهز بزعانف (OSF) لتجفيف المنتجات الزراعية في مختلف الأقاليم المناخية في الجزائر. ثالثاً، محاكاة عددية لتشغيل هذا المجفف الشمسي في ظل مناخ مدينة غرداية (مناخ شبه جاف). وأخيراً، قمنا بالتحقيق في خمس فصول تكميلية لدراسة الخصائص الفيزيائية للمادة المجففة وتأثير مختلف طرق التجفيف عليها. أولاً، دراسة و نمذجة عملية اشتراط متساوي الحرارة لشرائح اليقطين من ناحية، ومن ناحية أخرى استغلال النتائج التجريبية لتحديد تغير الطاقة الحرارية اللازمة لإخراج الماء مع تغير المحتوى المائي عند التوازن. ثانياً، النمذجة الرياضية التجريبية لحركية التجفيف في طبقات رقيقة لشرائح اليقطين باستخدام مجفف الهواء الساخن. ثالثاً، تحسين ظروف التشغيل لتجفيف شرائح اليقطين باستخدام مجفف الهواء الساخن. رابعاً، نمذجة انتقال الكتلة بالحمل أثناء إعادة الإماهة لشرائح اليقطين المجففة باستخدام مختلف الطرق بما في ذلك التجفيف بواسطة مجفف الهواء الساخن AFD ، التجفيف بالتجميد FD، التجفيف بالفراغ متعدد الفلاش VMFD و التجفيف بالانتفاش SD. خامساً، دراسة تأثير طرق التجفيف على الخواص الفيزيائية، المحتوى الكلي للفينولات والنشاط المضاد للبكتريا من مسحوق اليقطين. ولهاذا ستكون نتائج هذه الرسالة مساهمة في تطوير القدرات التقنية لتصميم عمليات التجفيف الشمسي ذات الأداء العالي مما يعطي منتج نهائي جيد، وقد تم كذلك تحديد عدة وجهات نظر التي تفتح العديد من السبل للبحث.

**RÉSUMÉ :** Dans cette thèse, nous avons travaillé sur la maîtrise et l'optimisation du procédé de séchage solaire des produits agro-alimentaires aux deux plans : (i) l'utilisation de l'énergie solaire dans le procédé proposé et (ii) la qualité du produit fini. Nous avons commencé par présentation d'une synthèse bibliographique des recherches, traitant les différents concepts liés à la présente thèse. Ensuite, nous avons étudié trois volets complémentaires pour l'exploitation du gisement solaire à des fins de séchage : Le premier est l'élaboration des cartes isoplethes des variables météorologiques agissant sur le processus de séchage solaire. Le deuxième est l'évaluation d'énergie solaire récupérée par l'insolateur plan à air muni d'ailettes OSF (Offset Strip Fins) destiné au séchage des produits agricoles sous différents climats d'Algérie. Et le troisième, c'est la simulation numérique du fonctionnement de cet insolateur sous le climat de Ghardaïa. En fin, nous avons étudié Cinque volets complémentaires pour diverses caractérisations et influence sur la qualité du produit. Le premier s'intéresse d'une part de la modélisation de l'isotherme de désorption et d'autre part, l'exploitation des résultats expérimentaux pour déterminer leur chaleur isostérique de désorption. Le deuxième s'intéresse à la modélisation mathématique empirique de la cinétique de séchage en couche mince de la citrouille. Le troisième s'intéresse à l'optimisation des conditions opératoires du séchage de la citrouille par sécheur à air chaud, en utilisant la méthode des surfaces de réponse. Le quatrième s'intéresse à la modélisation du transfert de masse au cours du processus de réhydratation des tranches de citrouille séchées par différents procédés de séchage, à savoir : le séchage par air chaud (Air Flow Drying AFD), le séchage par lyophilisation (Freeze-Drying FD), le séchage sous vide multi-flash (Vacuum Multi Flash Drying VMFD) et le séchage par (Swell-Drying SD) couplant air chaud et Détente Instantanée Contrôlée (DIC). Le cinquième s'intéresse à l'effet des méthodes de séchage sur la qualité final de la poudre de citrouille. Les résultats de cette thèse seraient de contribuer au développement des capacités techniques pour la conception des procédés de séchage solaire de meilleures qualités des produits séchés.

**ABSTRACT :** In the current theses we investigated the optimization and mastering of solar drying process of agro-alimentary products on the following two axes: (i) The use of solar energy in the proposed process and (ii) The quality of final product. We started with presenting a bibliographical overview of previous researches which dealt with different concepts related to the present theses. Subsequently, we have studied in three complementary stages the exploiting of solar energy resources for solar drying applications. Firstly, elaboration of isopleths charts of different meteorological parameters influencing the solar drying process in Algeria. Secondly, consists in evaluation of harvested energy by solar air collector equipped with offset strip fin absorber plate under different climate conditions of Algeria. Thirdly, Simulation Study of solar air collector with offset strip fin absorber plate for drying agricultural products in a semi-arid climate. Finally, we investigated in five complementary steps for diverse characterisation and influences on product quality. The first step is interested from one hand in modelling of isotherm of desorption. On the other hand the exploiting of experimental results in order to determine the isosteric heat. The second step is interested in Mathematical empirical models of thin-layer airflow drying kinetics of pumpkin slice. The third step is interested in optimizing drying operation conditions or drying with hot air using Response Surface Methodology. The fourth step is interested in modelling mass transfer during rehydration of pumpkin slices dried by different dehydration processes including drying by Air Flow Drying AFD, Freeze-Drying FD, Vacuum Multi Flash Drying VMFD and swell drying (SD), which is a coupling of hot air drying to instant controlled pressure drop (DIC). The fifth step is interested in studying effect of drying methods on the final quality of pumpkin powders. The results found in this thesis may be used to develop technical capacity for designing high performances solar drying processes giving a good quality final product.