République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DE LA TECHNOLOGIE
Département de Génie des Procédés et Environnement



Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat En Sciences
En Génie des Procédés
Spécialité : Génie des Procédés

Thème

Étude Numérique et Expérimentale d'un Séchoir Solaire Mixte. Application au Séchage des Produits Alimentaires

Présentée par **:**
Mr. Ahmed DJEBLI

Soutenu publiquement le : 17/12/2019, devant le jury composé de :

Président	**O. BENKORTBI**	**Prof.**	**UYFM de Médéa**
Examinateur	**M. ABBAS**	**Prof.**	**UDES de Bou-ismail**
Examinateur	**Y. LAIDANI**	**MCA**	**UHBBC de Chlef**
Directeur de thèse	**S. HANINI**	**Prof.**	**UYFM de Médéa**
Invitée	**G. HENINI**	**MCA**	**UHBBC de Chlef**
Invitée	**A. BENHAMOU**	**MCB**	**UMBB de Boumerdes**

Je dédie ce modeste travail :

A

Mon épouse,

Mon fils,

Ma fille,

Mes frères,

Ma sœur

La mémoire de mon père et ma mère.

مـــــلـــخـــص : دراسة رقمية وتجريبية لمجفف شمسي مختلط: تطبيق على تجفيف المنتجات الغذائية

هذا العمل عبارة عن دراسة تجريبية وديناميكية حرارية لحركية التجفيف الشمسي لخمس منتجات: الطماطم، المشمش، البطاطا، التين والفلفل الأحمر الحلو في مجفف شمسي مختلط واسع النطاق، بالإضافة إلى محاكاة عددية لهذا المجفف. تهدف الدراسة التجريبية والديناميكية الحرارية إلى الحصول على منحنيات التجفيف وحساب معامل الانتشارية الفعال للتنبؤ بحركية التجفيف والخصائص الديناميكية الحرارية للمنتجات خلال التجفيف. استخدمت معادلة Fick لحساب معامل الانتشارية الفعال استنادا للبيانات التجريبية عن طريق تناسب الاعتماد الخطي. من خلال هذا العمل درسنا سبعة نماذج نظرية كما سمحت البيانات التجريبية من التحقق من دقتها النسبية. حسب النتائج المتحصل عليها، هناك نموذجين جديدين بدون أبعاد يناسبان منحنى تجفيف المنتجات. النماذج المقترحة هي النماذج الأكثر دقة لوصف عملية تجفيف العنب سلطانة والفلفل الحار والموز والمانجو والكسافا، مقارنة بنماذج ذكرت في المراجع في ظل ظروف التشغيل المختلفة وباستخدام تصاميم مختلفة للمجففات الشمسية. في هذه الدراسة، استعملنا نهجين جديدين مقترحين من معادلة أرينيوس لتحديد المعاملات الديناميكية الحرارية.تمت مقارنة المعلمات الديناميكية الحرارية المستمدة من النهجين الجديدين المقترحين مع بعضهما. تشير قيم طاقة جيبس الحرة إلى أن التجفيف الشمسي للمنتجات هي عملية طبيعية تلقائية. استنادًا إلى محاكاة رقمية باستخدام برنامج Fluent، قمنا بتحليل انتقال الحرارة للاقط الحراري الشمسي وحركة الهواء في الدفيئة. كان الهدف هو تحسين الانتقال الحراري داخل اللاقط الحراري الشمسي باستخدام عقبات مثبتة على الجدران المعزولة لإحداث اضطرابات في حركة الهواء. وضعت العقبات في زوايا مختلفة (15 و30 و45 و60 درجة)، وبأعداد مختلفة (0 و2 و4 و8). تمت دراسة حركة الهواء داخل الدفيئة لتحديد المسافة المثلى بين الصواني وسرعة الدخول. أظهرت النتائج أن عدد العوائق وزاوية الميول كان لها تأثير كبير على انتقال الحرارة ومعتدل على تدفق الهواء إلى الخارج. إن استخدام ثماني عوائق مائلة بزاوية 45 درجة هو أفضل حالة لتحسين أداء اللاقط الحراري الشمسي. من بين الحالات المحاكاة للدفيئة، تُظهر الحالة ذات المسافة 20 سم بين الرفوف و 2 م/ث أفضل حركة للهواء في المجفف الشمسي المختلط.

الكلمات المفتاحية: مجفف شمسي مختلط، منتج زراعي، عملية تجفيف نماذج جديدة، معلمات ديناميكية حرارية

Résumé : Etude numérique et expérimentale d'un séchoir solaire mixte. Application au séchage des produits alimentaires

Le présent travail est une étude expérimentale et thermodynamique de la cinétique de séchage solaire de cinq produits, la tomate, l'abricot, la pomme de terre, la figue et le poivron rouge dans un séchoir solaire mixte à grande échelle, ainsi qu'une simulation numérique de ce séchoir. L'étude expérimentale et thermodynamique a pour objectif d'obtenir les courbes de séchage et de calculer la diffusivité effective afin de prédire la cinétique de séchage et les caractéristiques thermodynamiques des produits en cours de séchage. L'équation de diffusion de Fick a été utilisée pour calculer la diffusivité effective des données expérimentales en ajustant une dépendance linéaire. Sept modèles théoriques ont été étudiés et leur précision relative a été validée à l'aide de données expérimentales. Deux nouveaux modèles sans dimension correspondent le mieux à la courbe de séchage des produits. Les modèles proposés se sont avérés plus précis pour caractériser le processus de séchage des raisins Sultana, des piments, des bananes, des mangues et du manioc selon les modèles rapportés dans la littérature dans différentes conditions de fonctionnement utilisant différentes conceptions de séchoirs solaires. Deux nouvelles approches proposées à partir de l'équation d'Arrhenius ont été utilisés pour déterminer les paramètres thermodynamiques. Ces paramètres ont été comparés et analysés. De toute évidence, les valeurs d'énergie libre de Gibbs indiquent que le séchage solaire des produits est un processus naturel et spontané. Sur la base d'une simulation numérique utilisant le logiciel Fluent, nous analysons le transfert de chaleur d'un capteur d'air solaire et l'écoulement de l'air dans la serre. L'objectif était d'améliorer le transfert thermique dans le collecteur d'air solaire en utilisant des obstacles fixés dans les murs isolés pour créer de la turbulence. Les obstacles ont été placés à des angles différents (15°, 30°, 45° et 60°) et des nombres différents (0, 2, 4 et 8). La circulation de l'air à l'intérieur de la serre a été étudiée afin de déterminer l'optimal écart entre les claies et la vitesse d'entrée. Les résultats montrent que le nombre d'obstacles et l'angle d'inclinaison ont un impact considérable sur le transfert de chaleur et sont modérés dans le flux

d'air sortant. L'utilisation de huit obstacles avec une inclinaison de 45° est le meilleur cas pour améliorer le rendement du capteur solaire à air. Parmi les géométries de la serre simulées, la géométrie avec un écart de 20 cm et 2m/s présente la meilleure circulation d'air dans le séchoir solaire mixte.

Mots-clés : *séchoir solaire mixte, produit agricole, procédé de séchage, nouveaux modèles, paramètres thermodynamiques,*

Abstract: Numerical and experimental study of a mixed solar dryer. Application to the drying of food products

The present work is an experimental and thermodynamic study of solar drying kinetics of five products, tomatoes, apricot, potato, fig and red pepper in a large scale mixed solar dryer, in addition to a numerical simulation of this dryer. The aim of the experimental and thermodynamic study is to obtain the drying curves and calculate the effective diffusivity to predict drying kinetics and thermodynamic characteristics of products drying. The Fick's diffusion equation was used to calculate the effective diffusivity from the experimental data by fitting a linear dependency. Seven theoretical models were investigated and their relative accuracy validated against experimental data. Two new dimensionless models were found to best fit the drying curve of products. The proposed models were found to be more accurate for charactering the drying process of Sultana grapes, chili peppers, bananas, mangoes and cassava, according to models reported in the literature under different operating conditions using various solar dryer designs. Two new proposed approaches from the Arrhenius equation were used to determine thermodynamic parameters. These parameters were compared and analyzed. Evidently, the Gibbs free energy values indicate that products solar drying is a spontaneous natural process. Based on a numerical simulation using the Fluent software, we analyzed the heat transfer of a solar air collector and the flow of air in the greenhouse. The objective was to improve the thermal transfer inside the solar air collector using obstacles fixed on the isolated walls to create turbulences. The obstacles were placed with different angles (15°, 30°, 45° and 60°), and different number (0, 2, 4 and 8). The circulation of air inside the greenhouse was studied to determine the optimal distance between the trays and the air velocity at the entrance. The results show that the number of the obstacles and the angle of inclinations had considerable impact on the heat transfer and temperate on the outlet airflow. The use of eight obstacles with a 45 ° inclination is the best case to improve the performance of the solar air collector. Among the simulated geometries of the greenhouse, the geometry with a distance of 20 cm between the trays and 2m/s shows the best air circulation in the mixed solar dryer.

Keywords: *mixed solar dryer, agricultural product, drying process, new models, thermodynamic parameters,*

Remerciements

Tout d'abord, je remercie infiniment le bon dieu "**ALLAH**" puissant, de la bonne santé, la volonté et la patience qu'il m'a données tout le long de mes études.

Je présente mes sincères remerciements avec mes profonds respects à mon promoteur, Professeur Salah HANINI qui a assuré la gestion quotidienne de ma thèse. Son immense expérience, ses fructueux conseils et critiques scientifiques ainsi que sa disponibilité régulière qui ont fortement facilité l'avancement de ce travail de recherche.

Je tiens à remercier aussi, M^{me} BENHAMOU Amina, Maitre de conférences B, pour ses remarques, ses directives et l'intérêt qu'elle porte à ses étudiants.

Je tiens à remercier mon épouse, chercheuse à l'UDES Bou-ismail, pour son aide, ses conseils, ses discussions enrichissantes, ses orientations et ses encouragements.

Je tiens à remercier beaucoup Mr. O. BENKORTBI, Professeur à l'Université Yahia Fares de Médéa pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury.

Mon profond remerciement s'adresse aussi à Mr. M. ABBAS, directeur de recherche à l'UDES pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de juger ce travail et de participer au jury de cette thèse.

Mes vifs remerciements à Mr.Y. LAIDANI, Maitre de conférences A à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef d'avoir accepté de juger ce travail et de participer au jury de cette thèse.

Mon profond remerciement s'adresse aussi à M^{me} G. HENINI, Maitre de conférences A à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de juger ce travail et de participer au jury de cette thèse.

Je tiens à remercier tous les membres du projet de séchage solaire EAH, UDES.

Je tiens à remercier, Mr. Mehdi KHALFI, Mr. Brahim HADAD et. M^{elle}. Amina CHALAL.

La réussite de ce travail dépend aussi du soutien moral et de l'encouragement social très chaleureux dont ma famille en particulier ma sœur et mes frères.

Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Liste des tableaux ..... **x**

Liste des figures ..... **xii**

Nomenclature ..... **xvi**

Introduction Générale **1**

Chapitre I Étude Bibliographique sur le Séchage et le Séchage Solaire **5**

I.1 INTRODUCTION 5

I.2 DEFINITION DU SECHAGE 6

I.3 MECANISME DU SECHAGE 7

I.4 MODE DE SECHAGE 9

I.4.1 Séchage par conduction 9

I.4.2 Séchage par convection (ou par entrainement) 9

I.4.3 Séchage par rayonnement (séchage infrarouge) 10

I.4.4 Séchage par micro-onde 10

I.4.5 Lyophilisation 11

I.4.6 Déshydratation osmotique 11

I.5 TERMINOLOGIE DE BASE 12

I.5.1 Teneur en humidité 12

I.5.2 Psychométrie 13

I.5.3 Humidité absolue (H) 14

I.5.4 Humidité relative (HR) 14

I.5.5 Activité de l'eau (a_w) 15

I.6 CINETIQUE DU SECHAGE 16

I.7 PERIODES DE SECHAGE 16

I.7.1 Période de mise en température du produit (AB) 16

I.7.2 Période de vitesse de séchage constante (BC) 17

I.7.3 Période de ralentissement du séchage (CD) 17

I.7.4 Paramètres influant sur la durée des trois périodes de séchage 18

I.8 CLASSIFICATION DES SECHOIRS 18

I.8.1 Séchoirs à haute température 18

I.8.2 Séchoirs à basse température 19

I.9 SECHAGE SOLAIRE 19

I.9.1 Source d'énergie solaire 19

I.9.2 Séchage au soleil 20
I.10 CLASSIFICATION DES SECHOIRS SOLAIRES 20
I.10.1 Les séchoirs solaires directs 22
I.10.2 Les séchoirs solaires indirects 22
I.10.3 Les séchoirs solaires mixtes 23
I.10.4 Les séchoirs solaires hybrides 24
I.10.5 Les avantages et les inconvénients des classes de séchoirs solaires 25
I.11 MODELES DE SECHAGE EN COUCHE MINCE 25
I.11.1 Modèles semi-théoriques 25
I.11.2 Modèles empiriques 29
I.12 CONCLUSION 30
Chapitre II Produits Agroalimentaires à Sécher 31
II.1 INTRODUCTION 31
II.2 L'ABRICOT 32
II.2.1 Description de l'abricot 32
II.2.2 Variétés des abricots 34
II.2.3 Production d'abricot 35
II.2.4 Valeur nutritionnelle 36
II.2.5 Abricots séchés 37
II.3 LA POMME DE TERRE 38
II.3.1 Description de la pomme de terre 38
II.3.2 Variétés de la pomme de terre 40
II.3.3 Production de la pomme de terre 41
II.3.4 Valeur nutritionnelle 42
II.3.5 Pommes de terre séchées 44
II.4 LA TOMATE 44
II.4.1 Description de la tomate 44
II.4.2 Variétés de la tomate 46
II.4.3 Production de la tomate 46
II.4.4 Valeur nutritionnelle 48
II.4.5 Tomates séchées 49
II.5 LA FIGUE 50
II.5.1 Description de la figue 50
II.5.2 Variétés de figue 52

II.5.3 Production de la figue 52
II.5.4 Valeur nutritionnelle 54
II.5.5 Figues séchées 55
II.6 LE POIVRON ROUGE 56
II.6.1 Description du poivron 56
II.6.2 Variétés du poivron 57
II.6.3 Production du poivron 58
II.6.4 Valeur nutritionnelle 59
II.6.5 Poivrons séchés 60
II.7 METHODES DES PRETRAITEMENTS AVANT LE SECHAGE 61
II.7.1 Blanchiment 61
II.7.2 Modes et méthodes de blanchiment 61
II.8 CONCLUSION 62
Chapitre III Modèle Physique, Formulation Mathématique et Résolution Numérique 63
III.1 INTRODUCTION 63
III.2 APPLICATION DE CFD AU SECHAGE SOLAIRE 64
III.3 DESCRIPTION DU PROBLEME 65
III.3.1 Capteur à air 65
III.3.2 Serre 67
III.4 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES 67
III.5 MODELISATION MATHEMATIQUE 68
III.5.1 Equation de continuité 68
III.5.2 Equation de mouvement 68
III.5.3 Equation d'énergie 69
III.5.4 Modélisation de la turbulence 69
III.5.5 Condition aux limites 70
A. Capteur à air 70
B. Serre 70
III.6 RESOLUTION NUMERIQUE 71
III.6.1 Présentation générale 71
III.6.2 Méthode des volumes finis 73
III.7 CONCLUSION 75
Chapitre IV Matériels et Méthodes 76
IV.1 INTRODUCTION 76

IV.2 PROCEDURE EXPERIMENTALE 76
IV.2.1 Matériel végétal 76
IV.2.2 Séchoir solaire mixte 77
IV.2.3 Processus 80
IV.2.4 Collection de données 80
IV.2.5 Mode opératoire 82
IV.3 CINETIQUE DE SECHAGE 82
IV.3.1 Modélisation de la cinétique de séchage 83
IV.3.2 Détermination de la diffusivité effective 85
IV.3.3 Détermination de l'énergie d'activation 86
IV.4 DETERMINATION DES PARAMETRES THERMODYNAMIQUES 87
IV.4.1 Première nouvelle approche 87
IV.4.2 Seconde nouvelle approche 87
IV.5 CONCLUSION 89
Chapitre V Résultats et Discussions 90
V.1 INTRODUCTION 90
V.2 SECHAGE DES PRODUITS AGROALIMENTAIRES 90
V.2.1 Séchage de pomme de terre 91
V.2.2 Séchage d'Abricot 94
V.2.3 Séchage de la tomate 96
V.2.4 Séchage de la figue 100
V.2.5 Séchage du poivron rouge 102
V.3 MODELISATION DE LA CINETIQUE DE SECHAGE 104
V.3.1 Pomme de terre 104
V.3.2 Abricot 105
V.3.3 Tomate 108
V.3.4 Figue 114
V.3.5 Poivron rouge 115
V.4 VALIDATION DU NOUVEAU MODELE1 AVEC DES DONNEES EXPERIMENTALES DE LA LITTERATURE 116
V.5 CALCUL DU COEFFICIENT DE DIFFUSION EFFECTIVE 120
V.5.1 Calcul avec ajustement linéaire 120
V.5.2 Calcul en utilisant la pente entre 2 points de mesure 124
V.6 CALCUL DE L'ENERGIE D'ACTIVATION 125

V.7 CALCUL DES PARAMETRES THERMODYNAMIQUE DE SECHAGE 126
V.8 SIMULATION NUMERIQUE D'UN CAPTEUR SOLAIRE A AIR 128
V.8.1 Etude du maillage 129
V.8.2 Effet du nombre d'obstacle 129
V.8.3 Effet de l'angle d'inclinaison d'obstacle 132
V.9 SIMULATION NUMERIQUE DE LA SERRE 135
V.9.1 Etude du maillage 135
V.9.2 Etude de circulation d'air 138
V.10 CONCLUSION 144
Conclusion Générale 145
Références bibliographiques 148

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des quatre types de séchoirs solaires (Tonui, 2014. El-Sebaii et Shalaby, 2012). 25

Tableau II.1 : Caractéristiques des vieilles variétés d'abricot (Lahbari M., 2015). 34

Tableau II.2 : Production mondiale en tonnes (FAO, 2019). 35

Tableau II.3 : Valeurs nutritionnelles d'abricot (Fratianni et al., 2018). 37

Tableau II.4 : production mondiale de la pomme de terre en 2017 (FAO, 2019). 41

Tableau II.5 : Teneur en éléments nutritifs d'une pomme de terre crue (avec chair et peau) par portion de 100 g (United States Department of Agriculture, 2016). 43

Tableau II.6 : Caractéristiques des variétés de tomates. 46

Tableau II.7 : Evolution de la production de la tomate en frais en Algérie entre (2005-2017) (FAO, 2019). 48

Tableau II.8 : Valeur nutritionnelle de 100g de tomate (Grasselly et al., 2000). 49

Tableau II.9 : Répartition de la production des figues dans le monde (FAO, 2019). 53

Tableau II.10 : Production de figue (tonnes/an) dans le monde et l'Algérie (FAO, 2019). 54

Tableau II.11 : Composition de la figue fraiche et sèche 100 g (CIQUAL et CNEVA, 1993). 55

Tableau II.12 : Principaux pays producteurs du poivron en 2007. 58

Tableau II.13 : Evolution de la production du poivron au niveau national. 58

Tableau II.14 : Apports nutritionnels pour 100 g net de poivron rouge cru (CIQUAL, 2019). 59

Tableau IV.1 : Données des produits. 77

Tableau IV.2 : Caractéristiques du séchoir solaire mixte. 79

Tableau IV.3 : Spécifications des instruments de mesure. 81

Tableau IV.4 : Nouveaux modèles mathématiques proposés. 84

Tableau IV.5 : Cinq modèles mathématiques de séchage cités par la littérature. 84

Tableau V.1 : Comparaison de la présente étude avec celle de la littérature 94

Tableau V.2 : Temps de séchage et température moyenne. 99

Tableau V.3 : Résultats obtenus à partir des modèles pour la pomme de terre. 104

Tableau V.4 : Résultats obtenus à partir des modèles pour l'abricot cuit à la vapeur. 106

Tableau V.5 : Résultats obtenus à partir des modèles pour l'abricot bouillie. 106

Tableau V.6 : Résultats obtenus à partir des modèles pour l'abricot sans traitement. 107

Tableau V.7 : Résultats obtenus à partir des modèles pour l'abricot coupé. 107

Tableau V.8 : Résultats obtenus à partir des modèles pour les rondelles de tomate d'une épaisseur e=0,5 cm. 109

Tableau V.9 : Résultats obtenus à partir des modèles pour les rondelles de tomate d'une épaisseur e=1 cm. 109

Tableau V.10 : Résultats obtenus à partir des modèles pour les rondelles de tomate d'une épaisseur e=1,5 cm. ... 110

Tableau V.11 : Résultats obtenus à partir des modèles pour les rondelles de tomate d'une épaisseur e=2 cm. 110

Tableau V.12 : Résultats obtenus à partir des modèles pour les quartiers de tomates avec un nombre N=4..... 112

Tableau V.13 : Résultats obtenus à partir des modèles pour les quartiers de tomates avec un nombre N=8..... 112

Tableau V.14 : Résultats obtenus à partir des modèles pour les quartiers de tomates avec un nombre N=16..... 112

Tableau V.15 : Résultats obtenus à partir des modèles pour la figue verte. 114

Tableau V.16 : Résultats obtenus à partir des modèles pour la figue noire. 114

Tableau V.17 : Résultats obtenus à partir des modèles pour le poivron rouge. 116

Tableau V.18 : Différentes conceptions et conditions de fonctionnement des séchoirs choisies de la littérature.... 117

Tableau V.19 : Résultats obtenus à partir du nouveau modèle2 pour les produits de la littérature. 119

Tableau V.20 : Coefficient de diffusion effective des produits séchés. 125

Tableau V.21 : Coefficient d'énergie d'activation pour les produits séchés..... 126

Tableau V.22 : Paramètres de séchage thermodynamiques pour les produits séchés 127

Tableau V.23 : Différent maillages utilisés. 129

Tableau V.24 : Différents maillages utilisés. 135

Tableau V.25 : Effet du maillage sur la vitesse de l'air entre les claies..... 136

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma d'un produit humide. 8

Figure I.2 : Représentation schématique des différents échanges lors d'une opération de séchage (Mujumdar et Menon, 1995). 9

Figure I.3 : Courbe de la vitesse de séchage. 17

Figure I.4 : Principe de séchage au soleil (Sharma et al., 2009). 20

Figure I.5 : Classification des séchoirs solaires (Green et Schwarz, 2001). 21

Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un séchoir solaire direct (Sharma et al., 2009). 22

Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'un séchoir solaire indirect (Sharma et al., 2009). 23

Figure I.8 : Principe de fonctionnement d'un séchoir solaire mixte (Sharma et al., 2009). 23

Figure I.9 : Séchoir solaire hybride (Pangavhanc et al., 2002). 24

Figure II.1 : Abricots frais. 33

Figure II.2 : Coupe longitudinale d'un abricot (Lichou et Jay, 2012). 34

Figure II.3 : Evolution de la production des abricots en Algérie entre les années 2005 et 2017 (FAO, 2019). 36

Figure II.4 : Abricots séchés. 38

Figure II.5 : Pommes de terre fraiches. 39

Figure II.6 : Principaux organes extérieurs du tubercule de pomme de terre (Bernhards, 1998). 40

Figure II.7 : Coupe longitudinale d'une pomme de terre (Bernhards, 1998). 40

Figure II.8 : Evolution de la production de pomme de terre en Algérie (2005-2017) (FAO, 2019). 42

Figure II.9 : Composition chimique du tubercule de pomme de terre (U.S. National Nutrient Database). 43

Figure II.10 : Chips et farine de pommes de terre séchées. 44

Figure II.11 : Tomate fraiches. 45

Figure II.12 : Coupe longitudinale (à gauche) et transversale (à droite) d'une tomate (De Broglie et Guéroult, 2005). 45

Figure II.13 : Production en million de tonnes des principaux pays producteurs de la tomate dans le monde pour l'année 2017 (FAO, 2019). 47

Figure II.14 : Tomates séchées. 50

Figure II.15 : Figues fraiches. 51

Figure II.16 : Coupe longitudinale d'une figue (Haesslein et Oreiller, 2008). 51

Figure II.17 : Répartition de la production de la figue fraiche dans les grands pays. 53

Figure II.18 : Figues sèches. 56

Figure II.19 : Poivrons crus. 57

Figure II.20 : Poivrons séchés. 60

Figure III.1 : Géométries avec différent nombre d'obstacles. (a) Géométrie sans obstacles, (b) Géométrie avec deux obstacles, (c) Géométrie avec quatre obstacles, (d) Géométrie avec huit obstacles 66

Figure III.2 : Géométries avec 8 obstacles et différents angles d'inclinaison. (a) Angle d'obstacles 15°, (b) Angle d'obstacles 30°, (c) Angle d'obstacles 45°, (d) Angle d'obstacles 60°..... 66

Figure III.3 : Disposition des claies dans la serre. 67

Figure III.4 : Volume fini typique. 74

Figure III.5 : Volumes de contrôle typique et décalé. 74

Figure III.6 : Maillage typique uniforme suivant X et suivant Y. 75

Figure IV.1 : Séchoir solaire mixte. 77

Figure IV.2 : Spécifications de la face droite du séchoir. 78

Figure IV.3 : Schéma du séchoir solaire mixte. 79

Figure IV.4 : Schéma du capteur solaire à air. 80

Figure IV.5 : Schéma de l'instrumentation utilisée. 81

Figure V.1 : Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour la pomme de terre. 91

Figure V.2 : Variation de la température dans le temps en 3 lieux de la serre pour la pomme de terre. 92

Figure V.3 : Variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour la pomme de terre. 93

Figure V.4 : Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour l'abricot. 94

Figure V.5 : Variation de la température en fonction du temps pendent le premier jour pour l'abricot. 95

Figure V.6 : Variation de la température en fonction du temps pendent le deuxième jour pour l'abricot. 95

Figure V.7 : Variation de la température en fonction du temps pendent le troisième jour pour l'abricot. 95

Figure V.8 : Variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour l'abricot. 96

Figure V.9 : Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour la tomate. 97

Figure V.10 : Variation de la température en fonction du temps pour la tomate. 97

Figure V.11 : Variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour les rondelles de tomates. 98

Figure V.12 : Variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour les quartiers de tomates. 99

Figure V.13 : Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour la figue. 100

Figure V.14 : Variation de la température en fonction du temps pour la figue. 101

Figure V.15 : Variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour la figue. 101

Figure V.16 : Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour le poivron rouge. 102

Figure V.17 : Variation de la température en fonction du temps pour le poivron rouge. 103

Figure V.18 : Variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour le poivron rouge. 103

Figure V.19 : Variation du rapport d'humidité avec les deux nouveaux modèles pour la pomme de terre. 105

Figure V.20 : Variation du rapport d'humidité prévue des deux nouveaux modèles avec le rapport d'humidité expérimentale pour la pomme de terre..... 105

Figure V.21 : Variation du rapport d'humidité prévue de nouveau modèle 1 avec le rapport d'humidité expérimentale pour l'abricot. 108

Figure V.22 : Variation du rapport d'humidité avec le nouveau modèle 1pour les rondelles de tomates. 111

Figure V.23 : Variation du rapport d'humidité prévue de nouveau modèle 1 avec le rapport d'humidité expérimentale pour les quartiers de tomates. 113

Figure V.24 : Variation du rapport d'humidité prévue de nouveau modèle 1 avec le rapport d'humidité expérimentale pour la figue. 115

Figure V.25 : Variation du rapport d'humidité avec le nouveau modèle 1 pour le poivron rouge..... 116

Figure V.26 : Variation du rapport d'humidité des deux modèles proposés avec le rapport d'humidité expérimental de la littérature. 117

Figure V.27 : Evaluation des coefficients de corrélation pour les trois produits utilisés par Koua et al. (2009). 118

Figure V.28 : Variation du ln (MR) en fonction du temps pour la pomme de terre..... 120

Figure V.29 : Variation du ln (MR) en fonction du temps pour l'abricot 121

Figure V.30 : Variation de ln (MR) en fonction du temps pour les rondelles de tomates. 122

Figure V.31 : Variation de ln (MR) en fonction du temps pour les quartiers de tomate. 123

Figure V.32 : Variation de ln (MR) en fonction du temps pour la figue. 123

Figure V.33 : Variation de ln (MR) en fonction du temps pour le poivron rouge..... 124

Figure V.34 : Variation de la température sur l'axe X pour des différents maillages. 129

Figure V.35 : Contour de température dans le canal d'air avec différent nombre d'obstacles. 130

Figure V.36 : Contours de vitesse d'air pour différent nombre d'obstacles. 130

Figure V.37 : Contour d'énergie cinétique turbulente k (m^2/ s^2) pour différent nombre d'obstacles. 131

Figure V.38 : Variation de température en fonction de nombre d'obstacles. 131

Figure V.39 : Contour de température dans le cas d'un canal d'air avec 8 obstacles et différents angles d'inclinaison. 132

Figure V.40 : Contours de vitesse pour un canal avec différents angles d'inclinaison. 133

Figure V.41 : Contour d'énergie cinétique turbulente dans le cas d'un canal d'air avec 8 obstacles et différents angles d'inclinaison. 133

Figure V.42 : Variation de la température sur l'axe X pour des différents angles d'inclinaison. 134

Figure V.43 : Variation de température en fonction de l'angle d'inclinaison. 135

Figure V.44 : Géométrie 2 utilisé pour le maillage. 136

Figure V.45 : Lignes de courants pour les trois maillages. 137

Figure V.46 : Contour de vitesse de la première géométrie. 139

Figure V.47 : Contour de vitesse de la deuxième géométrie..... 140

Figure V.48 : Contour de vitesse de la troisième géométrie. 142

Figure V.49 : Contour de vitesse de la quatrième géométrie. 143

Nomenclature

Lettres latines

a_w	Activité de l'eau	
$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$	Constantes	
Cp	Chaleur spécifique	J/kgK
D	Diamètre	m
D_0	Facteur pré-exponentiel de l'équation d'Arrhenius	m²/s
DA	Dinar Algérien	
D_{eff}	Coefficient de diffusivité effective	m^2/s
DM	Matière sèche	
D_{meff}	Coefficient de diffusivité effective moyen	m^2/s
e	Epaisseur de produit	m
E_a	Coefficient d'énergie d'activation	kJ/mol
F	Accélération gravitationnel	m/s^2
h	Constante de Planck	m^2kg/s
H	Humidité absolue	
HR	Humidité relative	
I	Tenseur unitaire	
j	Numéro d'observation	
k, k_1, k_2, g, h	Constantes de séchage	s^{-1}
K_B	Constante de Boltzmann	m^2kg/s^2K
k_t	Coefficient de distribution effective du séchage à l'instant t	
m_0	Masse initiale de l'eau présente dans le solide	kg
m_i	Masse initiale de l'échantillon	kg
M_0	Teneur en humidité initiale	
m_∞	Masse d'eau présente dans le solide à temps infini	kg
M_a	Poids moléculaire de l'air	g/mol
m_b	Masse du bécher	kg
m_d	Masse du produit séché dans le séchoir solaire	kg
M_d	Poids de la substance sèche du produit alimentaire	kg
M_{db}	Teneur en eau en base sèche	
m_{dw}	masse d'eau présente dans le solide à la fin du séchage solaire	kg
M_e	Poids moléculaire de l'eau	g/mol
M_{eq}	Teneur en humidité d'équilibre	
m_f	Masse finale de l'échantillon	kg
m_{fb}	Masse finale de l'échantillon avec le Bécher	kg

M_p	Poids total du produit alimentaire	
MR	Rapport d'humidité	
$MR_{exp,i}$	Rapport d'humidité	
$MR_{pre,i}$	Rapport d'humidité	
m_t	Masse d'eau présente dans le solide à l'instant t	kg
M_t	Teneur en humidité	
M_w	Poids de l'eau dans le produit alimentaire	
M_{wb}	Teneur en eau sur une base humide	
n, l, c, b, a, A_1, A_2, m, p	Constantes empiriques sans dimension	
N	Nombres de quartier de tomate	
P	Pression, kPa	
p_a	Pression partielle de l'air sec	kPa
P_f	Pression de vapeur partielle de l'eau dans les aliments	kPa
P_{pw}	Pression de vapeur de l'eau pure	kPa
p_w	Pression partielle de vapeur d'eau	kPa
p_{ws}	Pression de vapeur d'eau de saturation partielle	kPa
r	Rayon	m
R	Constante de gaz	J/K.mol
r^2	Coefficient de corrélation	
REQM	Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne	
T	Température	°K
t	Temps	h
T_m	Température moyenne	°C
WM	Matière humide	
x	Coordonnée horizontale	m
y	Coordonnée verticale	m
Z	Nombre des constantes de séchage dans le modèle	

Symboles grecs

ψ	Dissipation visqueuse	
λ	Conductivité thermique	w/mK
ΔG	Energie libre de Gibbs	J/mol
ΔH	Enthalpie	J/mol
ΔS	Entropie	J/molK
β	Pente de ligne	
μ	Viscosité dynamique	kg/ms

ρ	Masse volumique de fluide	kg/m^3
σ	Constante Stefan-Boltzmann	kg/s^3k^4
σ_k	Nombre de prandtl turbulent de k	
σ_ε	Nombre de prandtl turbulent de ε	
χ^2	Khi-carré	
κ	Coefficient de transmission	

Indices

0	Initiale
a	Air
eq	Equilibre
exp	Expérimentale
m	Moyen
pre	Prévus
w	Eau

Introduction Générale

La nourriture est le matériau de base de la vie et le besoin des êtres humains. Le problème crucial est de maintenir un équilibre entre la production et la consommation de produits alimentaires. L'augmentation des disponibilités alimentaires et la réduction de la croissance démographique sont citées comme deux solutions au déséquilibre alimentaire. Mais les deux solutions nécessitent beaucoup de temps et d'argent. La troisième solution et la plus valable, est la réduction des pertes alimentaires (Esper et Muhlbauer, 1998).

La conservation des aliments est essentielle pour les protéger longtemps sans que la qualité du produit ne se détériore. De nombreux procédés industriels ont été utilisés pour conserver les produits alimentaires, notamment la mise en conserve, la congélation et la déshydratation. Parmi ceux-ci, le séchage convient parfaitement aux pays en développement. C'est une méthode très efficace et pratique pour préserver les pertes après récolte et compenser les insuffisances de fournitures (Mujumdar, 2007).

Le séchage est l'une des techniques les plus anciennes permettant de conserver des aliments tels que les céréales, les fruits, les légumes et les fruits de mer. Il prolonge la durée de vie du produit en réduisant sa teneur en humidité pour arrêter l'activité bactérienne, élimine les microorganismes responsables de la détérioration ou de la fermentation, arrête la prolifération de moisissures et réduit le poids du produit pour faciliter son transport et son stockage. Le processus de séchage peut réduire les coûts de stockage du produit. En outre, le processus de séchage préserve le goût et les propriétés nutritionnelles du produit.

Si possible, l'opération de séchage doit être optimisée pour utiliser une quantité minimale d'énergie afin d'éliminer davantage l'humidité. En outre, il ne faut pas oublier que la température élevée signifie également une consommation d'énergie élevée pendant le séchage. L'utilisation de séchoirs solaires peut réduire les pertes et améliorer la qualité du produit sec (Nadeau et Puiggali, 1995).

Auparavant, le séchage était principalement effectué au soleil; de nombreux types d'équipement et de méthodes sont maintenant utilisés pour déshydrater les aliments. La technique de séchage au soleil présente certains inconvénients, notamment; Le produit à sécher est exposé à la poussière et aux insectes, car il s'étale sur le sol ou sur un tapis et est directement exposé au soleil et au vent. De plus, le produit sec peut être sujet à la contamination et à une mauvaise qualité. Une approche différente qui pourrait atténuer les inconvénients du séchage à l'air libre est que le séchage peut être effectué avec du combustible et de l'électricité, mais ces méthodes de séchage peuvent ne pas être économiques et nuire à l'environnement. D'autre part, l'utilisation d'un équipement de séchage solaire sur mesure peut constituer une bonne alternative et la solution la plus viable d'un point de vue économique et environnemental. De plus, les séchoirs solaires peuvent être utilisés dans des processus de séchage industriels. En principe, le séchage solaire consiste à convertir l'énergie solaire en énergie thermique, qui est ensuite utilisée pour éliminer l'humidité du produit directement ou indirectement. Le facteur le plus important ayant une incidence sur les performances est l'intensité quotidienne du rayonnement solaire.

En Algérie, les agriculteurs pratiquent le séchage traditionnel ou le séchage au soleil à l'air libre pour déshydrater le produit agricole, mais la qualité est très faible par rapport à celle obtenue avec le séchage industriel. L'utilisation du séchage solaire n'est pas très répandue dans notre pays. Il n'est toujours pas utilisé dans les secteurs industriel et agricole, même si le pays possède l'un des potentiels thermiques solaires les plus élevés au monde (Haddad et al., 2017). La communauté algérienne a l'obligation de participer au renforcement de la richesse du pays en utilisant le séchage solaire comme le processus le plus viable et économique pour convertir le produit agricole en produits secs pour couvrir les excédents et contribuer au développement économique et social de l'Algérie.

Indépendamment de l'importance du séchage en tant qu'opération unitaire et des progrès récents en matière de recherche sur la conservation par l'élimination de l'eau, les principes physiques des phénomènes complexes qui se produisent pendant la déshydratation et la réhydratation ne sont pas totalement compris. La modélisation du séchage est extrêmement difficile dans le cas de produits biologiques et alimentaires.

Cependant, Il convient de rappeler que les modèles phénoménologiques, bien que faisant souvent intervenir des paramètres d'approximation (coefficient de convection effective, conductivité effective, diffusivité effective, perméabilité effective, etc.) permettent, s'ils sont bien adaptés, un bon usage en tant qu'outil de développement de processus ou de l'équipement. Son

couplage avec la technique de séchage des aliments, qui repose toujours sur l'expérience et l'expérimentation, est un outil très important.

La simulation numérique en mécanique des fluides (CFD) est d'un soutien précieux dans la résolution des problèmes d'équipement industriel. Elle permet de dresser le portrait d'une situation, d'identifier les problèmes et de tester différentes solutions, le tout par ordinateur avant d'apporter les correctifs nécessaires. La simulation numérique peut être utilisée pour de nombreuses applications industrielles telles que le séchage solaire. La CFD a démontré le comportement du système du séchoir et d'identifier une solution prometteuse pour atteindre le taux de séchage hypothéqué en ajustant certains éléments constitutifs du séchoir. La mise en œuvre de la solution permettra d'améliorer l'efficacité du séchoir.

Cette étude présente les résultats d'une étude numérique, expérimentale et théorique sur le séchage de différents produits agricoles afin d'étudier l'effet de différentes formes et épaisseurs sur le comportement cinétique au cours du processus de séchage. L'opération de séchage a été réalisée dans un séchoir solaire mixte à Bou-Ismail (Algérie), une région climatique côtière. Pour étudier la cinétique du processus de séchage, les courbes de séchage caractéristiques et, par conséquent, la corrélation de la teneur en humidité des produits à sécher ont été déterminées par les résultats de l'expérience. Par conséquent, le coefficient de diffusivité et l'énergie d'activation ont été calculés à partir de la solution analytique de l'équation de Fick en utilisant la série de Fourier. Les données expérimentales ont été testées à l'aide de sept modèles: cinq de la littérature et deux modèles proposés par cette étude pour décrire la cinétique de séchage de la tomate, l'abricot, la pomme de terre, la figue et du poivron. Les deux modèles empiriques proposés n'ont pas de dimensions et sont conformes aux conditions aux limites. Ces deux modèles développés par nous ont été comparés à d'autres modèles de la littérature à l'aide de données expérimentales issues de ces travaux et de la littérature afin d'évaluer leur faisabilité technique pour différents produits, conditions de fonctionnement et équipements de séchage solaire. L'enthalpie, le changement d'énergie libre de Gibbs et le changement d'entropie ont été calculés à partir de deux nouvelles approches. Une étude numérique sur l'effet du nombre d'obstacles et l'angle d'inclinaison sur le transfert thermique d'un capteur à air et sur l'écoulement de l'air dans la serre a été effectuée.

L'objectif de cette étude est de promouvoir l'utilisation de séchoirs solaires dans les secteurs industriel et agricole en Algérie, en offrant une analyse complète de la technologie de séchage solaire qui sera appliquée à divers produits agricoles. Des études expérimentales peuvent

mener à l'intégration du séchage solaire dans l'économie algérienne et, par conséquent, apporter de nouveaux avantages sociaux.

Le travail effectué dans cette thèse est écrit dans une séquence logique comprenant une introduction générale, cinq chapitres et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous présentons des notions générales sur le domaine du séchage, en particulier le séchage solaire.

Dans le deuxième, nous fournissons une description générale des fruits et légumes, disponible dans la région de Tipaza, qui ont été utilisés dans cette étude. De plus, nous présentons la méthode de traitement la plus courante utilisée avant le séchage des fruits et légumes (le blanchiment).

Le troisième chapitre est consacré à l'étude bibliographique de la simulation numérique du séchage utilisant les logiciels CFD, et la présentation des équations utilisées par le logiciel Ansys qui est utilisé dans la simulation.

Le quatrième chapitre est consacré aux matériels et méthodes. Ce chapitre décrit le séchoir solaire mixte, les différents modèles utilisés (modèles de littérature et nouveaux modèles), la préparation de produits agro-alimentaires pour le séchage solaire, suivi d'une description des méthodes permettant de déterminer la diffusivité effective, l'énergie d'activation et les paramètres thermodynamiques (enthalpie, entropie et énergie libre de Gibbs).

Le cinquième chapitre présente les principaux résultats expérimentaux obtenus. Les résultats obtenus sont exposés et commentés. Dans ce chapitre, on trouve la modélisation mathématique des deux nouveaux modèles et des modèles de séchage de la littérature pour choisir le modèle le plus approprié pour les données de séchage expérimental de produits alimentaires, ainsi que pour la détermination du coefficient de diffusivité et de l'énergie d'activation. Les paramètres thermodynamiques ont été calculés on utilisant deux nouvelles approches. Le logiciel de simulation d'écoulement Ansys-Fluent CFD a été utilisé pour prévoir la répartition de l'air dans le capteur à air et la serre. Nous conclurons nos travaux par une conclusion générale.

Chapitre I
Étude Bibliographique sur le Séchage et le Séchage Solaire

I.1 INTRODUCTION

Dans la plupart des cas, les fruits et légumes sont consommés frais et leur valeur nutritionnelle est élevée. Les fruits et légumes de saison sont disponibles et consommés pendant une très courte période. Par conséquent, ils doivent être stockés pour être consommés en dehors de la saison des récoltes. Différentes technologies sont utilisées dans le domaine de la conservation des fruits et légumes. Les méthodes les plus importantes sont la mise en conserve, la congélation et le séchage.

Le séchage est un moyen de conservation ou une étape du traitement de certains produits. Il est utilisé dans le monde rural et dans le monde industriel par le biais de l'industrie alimentaire (Bennamoun et al., 2015).

Le séchage est l'un des processus essentiels pouvant augmenter les temps de stockage des aliments. Convertir les produits périssables en produits stabilisés en réduisant l'activité de l'eau (aw) à moins de 0,5 (Nguyen, 2015). Elle consiste à réduire la teneur en eau des produits alimentaires à des valeurs résiduelles qui empêchent la croissance de tout micro-organisme et lui permettent donc de se déposer dans des conditions ambiantes (Joshi et Mehata, 2010. Dasin et al., 2015). En outre, le poids et le volume finaux des produits alimentaires secs sont considérablement réduits après la déshydratation, ce qui peut contribuer à une réduction significative des coûts de transport et de stockage (Abouo et al., 2016. Benkhelfellah et al., 2005).

Cependant, l'utilisation du séchage dans les industries agroalimentaires peut avoir plusieurs objectifs :

- Stabiliser les produits agricoles (maïs, riz, lait, etc.) et promouvoir le caractère saisonnier de certaines activités.
- Augmente la durée d'utilité des produits (fruits, graines, pâtes alimentaires, épices, thé, champignons, viande, poisson etc.)
- Stabiliser les sous-produits industriels destinés à l'alimentation animale (pâte de caramel ou d'amidon, pâte de bière, farine de viande et de poisson).
- Générer des ingrédients ou des additifs pour transformation ultérieure, également appelés produits alimentaires intermédiaires (Giovanelli et al., 2002), tels que les légumes pour les soupes, les oignons pour les saucisses, les fruits pour les desserts, les épaississants, les arômes, les colorants, etc. (Bonazzi et Bimbenet, 2003).

Le séchage qui fonctionne avec des combustibles fossiles nécessite et consomme largement d'énergie. Le prix du pétrole augmente depuis quelques années et il semble que celui-ci va continuer à augmenter. Il est donc important de développer un système de séchage à énergie libre: le séchage solaire en fait partie, qui utilise uniquement l'énergie solaire qui est gratuite et inépuisable.

Il est facile de construire des séchoirs solaires à l'aide d'outils et de matériaux disponibles localement. Le séchage nécessite de l'énergie et de la chaleur en fonction de l'humidité de l'air, du système de séchage utilisé, de la température de séchage et de la spécificité du produit (épaisseur, superficie, etc.) et de la teneur en humidité du produit à sécher.

Ce chapitre consiste en une description bibliographique des processus de séchage dans un contexte général. Nous avons répertorié les principales méthodes utilisées dans le domaine du séchage solaire, ainsi que les différents points essentiels à maîtriser dans le domaine du séchage. Nous présentons un résumé des travaux liés à l'utilisation de l'énergie solaire dans le domaine de séchage. Enfin, nous donnerons un aperçu des modèles mathématiques en couche mince les plus couramment utilisés pour le séchage des produits alimentaires.

I.2 DEFINITION DU SECHAGE

Le séchage est l'opération qui consiste à évacuer l'eau contenue dans un produit pour l'amener à un état considéré suffisamment sec pour permettre une bonne conservation. Le séchage d'un produit a pour objectif de réduire sa teneur en eau, de sorte que son activité de l'eau

ait une valeur lui permettant d'être stockée à une température ordinaire pendant de longues périodes (Bimbenet, 1984). L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue mécaniquement ou thermiquement.

De cette manière, le séchage permet de diminuer voire d'éliminer les pertes de récolte dues à la dégradation, obtenant ainsi une autonomie temporaire pour les produits saisonniers. Le séchage est un processus qui s'applique aux produits qui ont une structure permettant la fixation de l'eau. Ces produits sont généralement des capillaires poreux dans la nature. La méthode de séchage la plus courante dans l'industrie est le séchage par entraînement: la température reste moindre à celle de l'eau bouillante et l'air est généralement le gaz d'entraînement. C'est l'air qui donne la chaleur au produit et reçoit l'humidité qui est extraite. Par conséquent, le séchage est défini comme un double transfert de chaleur et de masse (Benlahmidi, 2013). Le séchage présente plusieurs avantages, car il simplifie la manipulation des matériaux en réduisant le poids total et, par conséquent, réduit les coûts d'emballage et de transport, rend le produit disponible pendant la basse saison. Cependant, cette opération s'accompagne toujours de modifications du goût, de l'aspect, de la perte de la qualité nutritionnelle du produit ou de l'hygiène et une difficulté à récupérer les propriétés de réhydratation d'origine (Khaldi, 2018).

I.3 MECANISME DU SECHAGE

Le processus de séchage est régi essentiellement par deux processus fondamentaux et simultanés, le transfert de chaleur et de masse. (Duffie et Beckman, 1974. Ghazanfari et Sokhansanj, 2002. Ong, 1999) :

- Un transfert de chaleur pour fournir la chaleur latente nécessaire à la vaporisation;
- Mouvement d'humidité de l'intérieur de l'aliment à sa surface après diffusion, contraction cellulaire et gradient de pression de vapeur.

Pour sécher un produit humide, chauffez-le à une température appropriée par conduction ou convection à l'aide d'un moyen de séchage externe, généralement de l'air chaud. Un échange de chaleur et d'humidité se produit entre cet air et le produit humide. L'air chaud transfère une partie de sa chaleur au produit qui développe sur sa surface une pression partielle de l'eau supérieure à la pression partielle de l'eau contenue dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression provoque un transfert de matière de la surface du solide vers l'air de séchage.

Un produit humide peut être représenté schématiquement comme à la *Figure I.1*. Le solide a un film d'eau qui adhère à sa surface extérieure avec des forces superficielles.

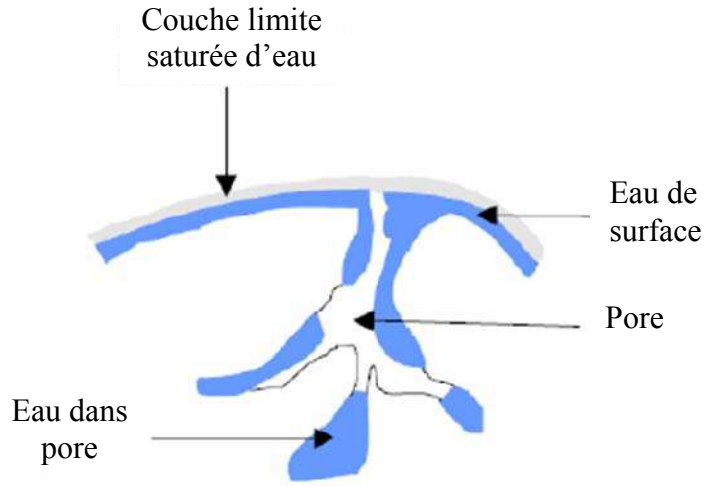


Figure I.1 : *Schéma d'un produit humide.*

Lorsque le contact avec l'air chaud, l'eau de la surface externe du produit sera délibérée sous l'influence du gradient d'humidité entre l'air et le produit. L'eau va s'écouler à l'état liquide de l'intérieur du grain vers cet environnement sec en raison d'une différence de pression. Au cours de cette migration, les poches d'air semblent remplacer les fuites d'eau. Pendant le séchage, la diffusion cellule-cellule sera de plus en plus inhibée par les cellules qui tendent à retenir l'eau. Les derniers points d'humidité seront plus difficiles à éliminer que les premiers.

L'eau liquide s'évapore complètement sauf l'eau très retenue. Le produit entre en équilibre hygrométrique avec le milieu ambiant ; ce qui correspond à la fin de l'opération de séchage.

Un bon séchage permet de maîtriser trois paramètres de base :

- L'énergie thermique qui chauffe le produit et anime le déplacement de l'eau vers la surface et sa transformation en vapeur d'eau ;
- La capacité de l'air entraînement à absorber la vapeur d'eau libérée par le produit. Cette capacité dépend du pourcentage de vapeur d'eau déjà contenu dans l'air avant qu'il n'atteigne le séchoir et de la température à laquelle il a été déplacé ;
- La vitesse de cet air au niveau du produit, qui, surtout au début du séchage, doit être augmentée jusqu'à une certaine limite pour activer les entraînements de la vapeur d'eau.

Il est nécessaire de sécher rapidement (pour éviter que le produit ne pourrisse) mais pas trop vite (il est probable qu'une croûte se forme à la surface) à une température trop élevée (le produit est dénaturé, noirci).

I.4 MODE DE SECHAGE

Le processus de séchage peut être effectué de plusieurs manières. Différents procédés de séchage peuvent être distingués (Schnell, 1983) :

- Les procédés de séchage mécanique (centrifugation, compression).
- Les procédés de séchage thermique, en élevant la température et en réduisant la pression de vapeur de la phase gazeuse. L'humidité est extraite par évaporation et diffusion.

Le critère de classification le plus couramment utilisé pour le séchage thermique dépend du mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur (Mujumdar et Menon, 1995). La *Figure I.2* résume les différents modes de séchage thermique rencontrés.

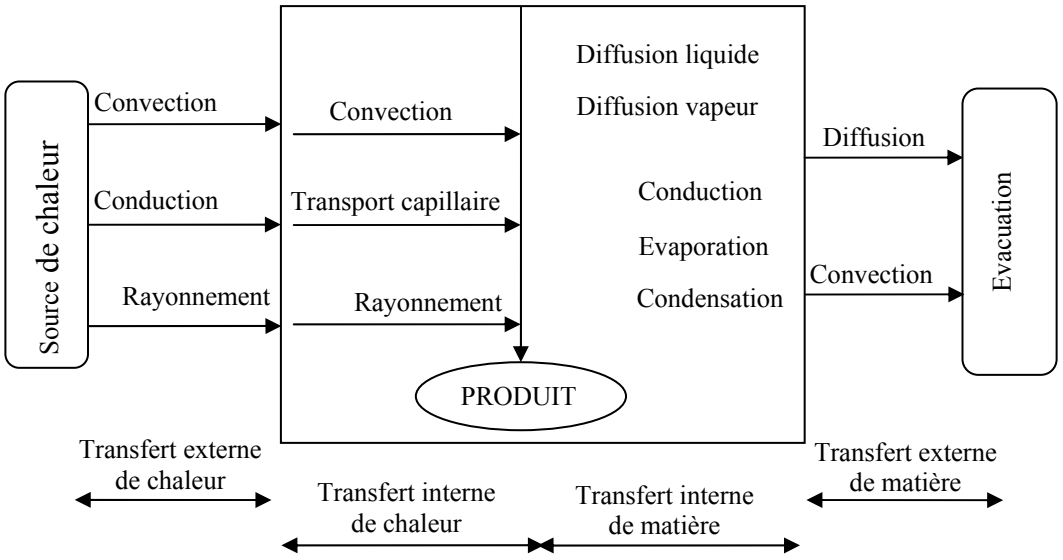


Figure I.2 : *Représentation schématique des différents échanges lors d'une opération de séchage (Mujumdar et Menon, 1995).*

I.4.1 Séchage par conduction

Le produit à sécher est directement relié à une paroi solide chauffée par un fluide caloporteur (air, eau, gaz, vapeur d'eau). Où la chaleur est échangée par contact entre la surface de la paroi chaude et le produit. Ce mode de séchage est largement utilisé dans l'industrie du textile et du papier (Duffie et Beckman, 1974).

I.4.2 Séchage par convection (ou par entrainement)

Un écoulement d'air chaud est envoyé au produit à sécher. Il s'effectue automatiquement entre ce produit et l'air une différence de température et de la pression partielle d'eau. La

particularité de ce mode de séchage réside dans le fait que l'air de séchage remplit deux fonctions simultanées :

- Transfert de chaleur de l'air au produit sous l'influence de la différence de température.
- Transfert d'eau dans la direction opposée en raison de la déférence de concentration en eau dans l'air.

Ce mode de séchage représente plus de 85% des séchoirs industriels (Mujumdar, 2000) et est largement utilisé dans le secteur agroalimentaire. Le mode de séchage par convection est plus répandu et fait l'objet de notre étude.

I.4.3 Séchage par rayonnement (séchage infrarouge)

Lors du séchage infrarouge, les aliments solides sont exposés à une source de chaleur infrarouge qui augmente leur température de surface. L'énergie du rayonnement infrarouge est transférée de l'élément chauffant au produit, chauffant le matériau plus rapidement et de manière uniforme sans chauffer l'air ambiant. Le rayonnement infrarouge a été appliqué avec plusieurs procédés de séchage en raison de ces avantages. En combinaison avec le pré-séchage à l'air chaud, le chauffage par infrarouge permet d'économiser 20% du temps de séchage par rapport au séchage par infrarouge uniquement (Adak et al., 2017).

I.4.4 Séchage par micro-onde

Cette méthode fournit une vitesse de chauffage élevée et ne provoque pas d'altération de la surface des aliments et, par conséquent, aucune croûte n'est formée. Le traitement par micro-ondes industriel est limité en raison de ses coûts élevés. Par conséquent, il est utilisé industriellement pour les aliments peu humides ou comme étape finale du processus de séchage (Pu et al., 2016).

Par rapport au séchage par convection, le séchage par micro-ondes peut être avantageux en raison de son chauffage volumétrique et de sa durée de traitement réduite. Cependant, il est important de garder à l'esprit que l'utilisation de micro-ondes basse pression augmente les coûts de séchage, qui pourraient toutefois être minimisés en combinant les deux procédés de séchage: par vide micro-ondes et par convection (Zielinska et Michalska, 2016).

I.4.5 Lyophilisation

Dans la lyophilisation l'eau est d'abord congelée puis sublimée, dans des conditions spéciales de pression et de température. La lyophilisation est plus lente et les coûts plus élevés, car elle implique la congélation, la production sous vide et le matériel lui-même est coûteux.

La lyophilisation est utilisée dans l'industrie pour la déshydratation d'aliments de grandes valeurs et d'arômes délicats (par exemple: champignons, herbes et épices, jus de fruits, viande, fruits de mer ou régimes complets à usage militaire ou pour des expéditions sportives), ainsi que pour la conservation des cultures microbiennes utilisées dans l'industrie alimentaire. En général, la lyophilisation est préférable pour convertir les matériaux thermosensibles en poudre, car il vaut mieux préserver leurs conformations natives. Cependant, les longs temps de traitement, la faible productivité, les méthodes de production discontinues et les risques de refroidissement liés au gel constituent des inconvénients considérables de ce processus (Haque et Adhikari, 2014).

I.4.6 Déshydratation osmotique

La déshydratation osmotique est basée sur le principe suivant : lorsque les matériaux cellulaires sont immergés dans une solution aqueuse hypertonique, une force motrice pour l'élimination de l'eau est établie en raison de la pression osmotique accrue de la solution hypertonique. Il est généralement utilisé pour éliminer partiellement l'eau de fruits ou de légumes qui sont immergés dans une solution de sucre ou de sel (dont la pression osmotique est supérieure à celle des aliments). Les aliments perdent de l'eau dans la solution, mais dans de nombreux cas, leur teneur en humidité finale n'est pas stable. (Barman et Badwaik, 2017). Ils sont utilisés industriellement comme prétraitement pour d'autres opérations. Pour les fruits, on utilise des solutions de sucre hypertoniques (40 à 70%), le saccharose étant le plus utilisé, mais des mélanges de fructose, de glucose ou de glucose / fructose et de glucose / polysaccharide sont également utilisés. Des solutions salines (5-20%), généralement du chlorure de sodium, sont utilisées pour les légumes (Eren et Ertekin, 2007).

I.5 TERMINOLOGIE DE BASE

I.5.1 Teneur en humidité

La teneur en humidité des aliments joue un rôle important dans le maintien de la qualité souhaitable du produit. Les informations sur la teneur en humidité sont importantes pour déterminer si les aliments conviennent à un stockage en toute sécurité ou à toute autre activité de transformation (Ekechukwu et Norton, 1997. Mujumdar, 2007).

La teneur en humidité est définie comme la quantité d'eau présente dans le produit alimentaire et est généralement exprimée en pourcentage. Il est défini de deux manières, comme indiqué ci-dessous:

a) Teneur en eau sur une base humide (M_{wb}) : elle est exprimée par le rapport entre le poids de l'eau présente dans l'aliment et le poids total du produit alimentaire.

$$M_{wb}(\%) = \frac{M_w}{M_p} \times 100 \quad \text{(I-1)}$$

$$M_{wb}(\%) = \frac{M_w}{M_p + M_d} \times 100 \quad \text{(I-2)}$$

Où : M_w *: Poids de l'eau dans le produit alimentaire,*

M_d *: Poids de la substance sèche du produit alimentaire,*

M_p *: Poids total du produit alimentaire.*

b) Teneur en eau en base sèche (M_{db}) : elle est exprimée par le rapport entre le poids de l'eau présente dans le produit alimentaire et le poids de la substance sèche.

$$M_{db}(\%) = \frac{M_w}{M_d} \times 100 \quad \text{(I-3)}$$

La teneur en humidité calculée sur une base sèche est toujours supérieure à la teneur en humidité sur une base humide. En règle générale, les calculs techniques sont effectués en fonction de la teneur en humidité sèche (Perry, 2007).

c) Relation entre M_{wb} et M_{db} : l'équation I-3 peut également être écrite comme :

$$M_{db}(\%) = \frac{M_w}{M_p - M_w} \times 100 \quad \text{(I-4)}$$

$$M_{db}(\%) = \frac{M_w / M_p}{1 - \left(M_w / M_p\right)} \times 100 \quad \text{(I-5)}$$

$$M_{db}(\%) = \frac{M_{wb}}{1 - M_{wb}} \times 100 \quad \text{(I-6)}$$

L'eau dans le produit est présente sous trois formes différentes, comme décrit ci-dessous:

- **Eau non liée :** humidité dans les aliments qui exerce une pression de vapeur égale à celle d'une pression de vapeur saturée d'eau pure à la même température.
- **Eau liée :** la teneur en humidité qui exerce une pression de vapeur inférieure à celle de l'eau pure à la même température en raison de la rétention dans les petits pores et des solutions dans les parois des cellules (Charreau et Cavalle, 1991).
- **Eau libre :** La teneur en eau supérieure à la teneur en eau d'équilibre s'appelle eau libre. Cette teneur en humidité peut être facilement éliminée par séchage dans certaines conditions de température et d'humidité. L'eau libre comprend à la fois l'eau non liée et une partie de l'eau jointe qui fait partie des plus grands capillaires. Il a une activité aquatique égale à l'unité.

I.5.2 Psychométrie

L'air humide, qui est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau, est utilisé comme fluide dans plusieurs opérations unitaires, telles que les processus de refroidissement, de chauffage, de mélange et de transport.

Les propriétés thermodynamiques de l'air humide sont appelées propriétés psychrométriques. Le sujet qui étudie ces propriétés du mélange sec d'air et de vapeur d'eau est appelé psychrométrie. La connaissance des propriétés de l'air humide est importante pour la conception de systèmes tels que les séchoirs, les climatiseurs et les tours de refroidissement (Treybal, 1980).

Les propriétés psychométriques de l'air humide sont définies et analysées ci-dessous:

a) **Température du bulbe sec (T_{db}) :** la température de l'air déterminée à l'aide du thermomètre est appelée température de bulbe sec.

b) **Température du bulbe humide (T_{wb}) :** c'est la température mesurée par le thermomètre avec son bulbe enveloppé dans un chiffon humide. La différence entre la température du bulbe humide et du bulbe sec s'appelle dépression du bulbe humide. La température du bulbe humide est toujours inférieure à la température du bulbe sec. Mais à 100% d'humidité relative, les températures de bulbe sec et humide sont les mêmes et la dépression du bulbe humide est nulle. La température humide est une mesure indirecte du dessèchement de l'air (Prabhat et al., 2012).

c) Température du point de rosée (T_{dp}) : la température maximale à laquelle l'air est complètement saturé avec l'humidité disponible pendant le refroidissement à un rapport de pression et d'humidité constant s'appelle température de point de rosée. Un refroidissement supplémentaire en dessous point de rosée entraîne la condensation de l'humidité dans l'air et réduit le taux d'humidité (Prabhat et al., 2012).

I.5.3 Humidité absolue (H)

L'humidité absolue, également appelée humidité spécifique ou rapport d'humidité, est définie comme la masse de vapeur d'eau associée à l'unité de masse d'air sec. L'humidité absolue est une quantité sans dimensions. Cependant, les unités sont souvent appelées kg de vapeur d'eau par kg d'air sec (Prabhat et al., 2012).

$$H = \frac{M_e p_w}{RT} \Big/ \frac{M_e p_w}{RT} \tag{I-7}$$

$$H = \left(\frac{M_e p_w}{M_a (1 - p_w)}\right) \tag{I-8}$$

$$H = 0.622 \left(\frac{p_w}{1 - p_w}\right) \tag{I-9}$$

Où : p_w *: pression partielle de vapeur d'eau, kPa,*

p_a *: pression partielle de l'air sec, kPa,*

M_e *: poids moléculaire de l'eau = 18 g/mol,*

M_a *: poids moléculaire de l'air = 29 g/mol,*

R *: constante de gaz = 8,3l4 J/K.mol,*

T *: température, en °K.*

I.5.4 Humidité relative (HR)

Il est défini comme le rapport entre la masse de vapeur d'eau (M_v) présente dans l'air humide et la masse totale de vapeur d'eau (M_{vs}) nécessaire pour saturer à la même température. Il peut également être défini comme le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans le mélange air / vapeur et la pression de vapeur d'eau de l'air saturé à la même température (Prabhat et al., 2012). Elle est connue sous le nom de HR et est exprimé en pourcentage.

$$RH = \frac{m_v}{m_{vs}} = \frac{p_w}{p_{ws}} \tag{I-10}$$

Où : p_{ws} *: pression de vapeur d'eau de saturation partielle, kPa.*

I.5.5 Activité de l'eau (a_w)

L'eau est une composante importante dans la plupart des aliments. La disponibilité en eau pour la croissance microbienne, la germination des spores, l'activité enzymatique et les réactions chimiques est l'un des facteurs les plus critiques qui affectent la qualité, la sécurité et la durée de vie des aliments. Cette disponibilité en eau est décrite comme l'activité de l'eau (a_w) (Prabhat et al., 2012).

L'activité de l'eau influence également des phénomènes tels que: oxydation, brunissement non enzymatique (réactions de Maillard) et réactions enzymatiques nécessitant une a_w beaucoup plus faible. La réduction de (a_w) peut inhiber la croissance microbienne et contrôler les réactions de détérioration (Beuchat, 1981). L'activité de l'eau peut être réduite par diverses techniques de conservation, telles que la déshydratation ou par l'ajout d'agents liant l'eau, tels que les sucres, le glycérol ou le sel.

L'activité de l'eau est une propriété thermodynamique et est définie comme la relation entre la pression de vapeur partielle de l'eau dans les aliments (P_f) et la pression de vapeur de l'eau pure (P_{pw}) à la même température.

$$a_w = \frac{p_f}{p_{pw}} \tag{I-11}$$

L'humidité relative de l'air est exprimée par le rapport entre la pression de vapeur partielle de l'eau présente dans l'air (P_w) et la pression de vapeur de l'eau pure (P_{pw}) à la même température.

$$HR = \frac{p_w}{p_{pw}} \times 100 \tag{I-12}$$

En fonction de l'activité de l'eau, les aliments peuvent également être classés. Les aliments très humides, dont l'activité de l'eau est supérieure à 0,85, nécessitent une réfrigération ou une autre barrière pour contrôler la croissance des agents pathogènes. Les aliments à humidité intermédiaire, ayant une activité aqueuse comprise entre 0,60 et 0,85. Celles-ci ne nécessitent pas de réfrigération pour lutter contre les agents pathogènes, mais ont une durée de vie limitée en raison de la détérioration, principalement due aux levures et aux moisissures. Les aliments à faible taux d'humidité, dont l'activité de l'eau est inférieure à 0,60 ont une longue durée de vie, même sans réfrigération.

I.6 CINETIQUE DU SECHAGE

La grande variabilité et diversité des produits alimentaires et biologiques suggère que le meilleur moyen de décrire le comportement d'un produit alimentaire au cours du séchage est de mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage. Dans le cas d'un produit solide qui a été séché par convection, l'expérience de base consiste à placer le produit dans un flux d'air continu et parfaitement contrôlé (température, humidité, vitesse) et à enregistrer l'évolution de sa masse dans le temps. Les résultats sont représentés sous forme de courbes appelées courbes caractéristiques de séchage (Daguenet, 1985).

Deux types de courbes décrivent l'évolution du produit lors du séchage :

- Teneur moyenne en eau (M) en fonction du temps (t) obtenu directement à partir de l'enregistrement de masse dans le temps, connaissant la teneur initiale en eau du produit ;
- Vitesse de séchage ($-\frac{dM}{dt}$) en fonction du temps (t).

I.7 PERIODES DE SECHAGE

Le produit à sécher est soumis à trois périodes de séchage, quelle que soit la méthode de séchage utilisée comme il est présenté sur la *Figure I.3*.

I.7.1 Période de mise en température du produit (AB)

C'est la première période où la vitesse de séchage augmente, est généralement courte ou inexistante. Elle correspond à l'augmentation de la température du produit jusqu'à ce qu'il arrive à la température d'équilibre, quand le produit reçoit suffisamment de chaleur de l'air qu'il doit en offrir à l'eau pour sa vaporisation. Cette température d'équilibre n'est pas atteinte immédiatement, car le produit au début du séchage est à basse température et il existe une inertie thermique relativement importante. La vitesse de séchage sera augmentée car le déplacement d'eau entre le produit et l'air sera plus efficace que le produit est réchauffé (Charreau et Cavalle, 1991. Mihoubi, 2004. Touati, 2008).

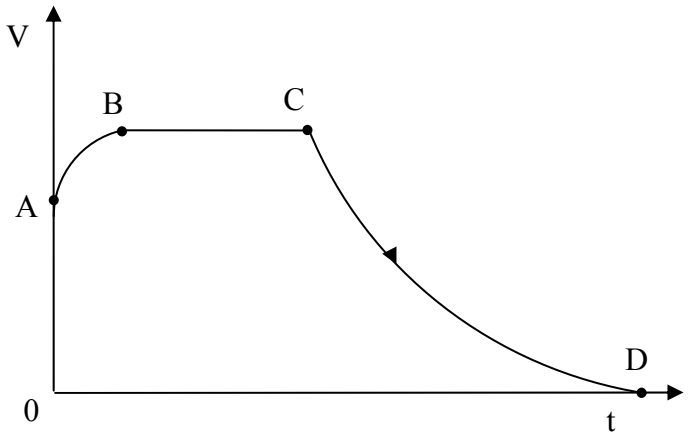


Figure I.3 : *Courbe de la vitesse de séchage.*

I.7.2 Période de vitesse de séchage constante (BC)

Pendant cette période, la vitesse de séchage reste presque constante pour la plupart des produits. Elle correspond à l'évaporation de l'eau libre en surface du produit.

L'humidité se déplace à la surface à l'état liquide essentiellement sous l'influence des forces capillaires. Un équilibre a été établi entre la diffusion dans la couche limite (à l'interface air-produit) et les mécanismes de transfert de l'humidité interne du produit à la surface. La température reste uniforme dans le produit car le flux de chaleur échangé avec de l'air chaud est complètement utilisé pour évaporer l'eau à la surface. Cette période se termine lorsque les forces capillaires ne supportent plus l'évaporation de la surface (Charreau et Cavalle, 1991. Touati, 2008).

I.7.3 Période de ralentissement du séchage (CD)

C'est la période qui correspond à l'évaporation de l'eau liée. La plupart des produits agricoles sèchent pendant cette période.

L'eau libre, qui déplaçait de l'intérieur vers l'extérieur du produit pour être alors transformée en vapeur d'eau, a entièrement disparu à la fin de la deuxième période. Tout ce qui reste dans le produit est l'eau liée. L'eau ne s'évapore plus à la surface du produit mais à l'intérieur. Un front d'évaporation s'enfonce vers le cœur du produit. La vapeur d'eau est ensuite dégagée à la surface par l'air. Plus le front est éloigné de la surface extérieure du produit, plus le déplacement d'eau est difficile. Dans cette période, et si le débit d'air et la température d'arrivée de l'air restent identiques qu'auparavant, la température du produit accroître et tend à devenir identique à la température d'arrivée de l'air (Charreau et Cavalle, 1991. Boughali, 2010).

I.7.4 Paramètres influant sur la durée des trois périodes de séchage

Il peut y avoir des variations significatives dans les durées de ces trois périodes en fonction des produits. La première période est presque inexistante dans le cas de produits à particules ou à feuilles. La deuxième période n'existe pas toujours. La troisième période peut être divisée en deux périodes (première période de ralentissement et deuxième période de ralentissement).

En règle générale, la taille et la disposition du produit lors de séchage influent aussi sur la durée des trois périodes :

- Réduction de la durée de la première période : plus les morceaux des produits à sécher sont petits et en couche mince (surface d'échange air / produit accrue) plus le produit arrivera rapidement à la température à partir de laquelle le séchage est efficace ;
- Pendant la deuxième période, l'élimination de l'eau se produit à la surface du produit, ce qui est plus rapide que la somme des surfaces de contact entre l'air et le produit est élevée et que l'air peut atteindre facilement à toutes ces surfaces ;
- Au cours de la troisième période, le dégagement de l'eau de cœur du produit sera d'autant plus facile car l'interface d'évaporation reste proche de la surface (de sorte que les morceaux à sécher sont de petites tailles).

I.8 CLASSIFICATION DES SECHOIRS

Tous les séchoirs peuvent être classés principalement en fonction de leurs plages de température de fonctionnement en deux groupes principaux: les séchoirs à haute température et les séchoirs à basse température. Cependant, les séchoirs sont plus couramment classés en fonction de leurs sources de chauffage dans des séchoirs à combustible fossile (plus fréquemment appelés séchoirs classiques) et des séchoirs à énergie solaire.

Pratiquement tous les séchoirs à haute température utilisent des combustibles fossiles, tandis que les séchoirs à basse température sont à combustibles fossiles ou des systèmes solaires.

I.8.1 Séchoirs à haute température

Des séchoirs à haute température sont nécessaires lorsqu'un séchage très rapide est souhaité. Ils sont généralement utilisés lorsque les produits nécessitent une brève exposition à l'air de séchage (McLean, 1980), (Brooker et al., 1974), (hall, 1980). En raison des plages de

température élevées dans les séchoirs à haute température, la plupart des conceptions connues fonctionnent à l'électricité ou aux combustibles fossiles. Seuls quelques projets de systèmes de séchage à haute température réalisés sont chauffés à l'énergie solaire (Ekechukwu et Norton, 1997).

I.8.2 Séchoirs à basse température

Dans les séchoirs à basse température, la teneur en humidité du produit est généralement équilibrée avec l'air de séchage par une ventilation constante. Le séchage à basse température permet de sécher les cultures à grande échelle et convient également mieux aux systèmes de stockage à long terme (McLean, 1980). Leur capacité à supporter un apport de chaleur irrégulier rend le séchage à basse température plus approprié pour les applications utilisant l'énergie solaire. Par conséquent, certains séchoirs conventionnels et la plupart des séchoirs solaires pratiquement réalisées sont du type à basse température.

I.9 SECHAGE SOLAIRE

I.9.1 Source d'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie qui provient du soleil. Chaque jour, le soleil dégage une énorme quantité d'énergie. Toute cette énergie vient de l'intérieur du soleil même. Comme les autres étoiles, le soleil est une grosse boule de gaz composée principalement d'hydrogène et d'hélium. Le soleil génère de l'énergie dans son noyau dans un processus appelé fusion nucléaire. Au cours ce dernier la pression et la température élevée du soleil entraînent la rupture des atomes d'hydrogène et la fusion de leurs noyaux. Une partie de la matière est perdue lors de la fusion nucléaire et émise dans l'espace sous forme d'énergie radiante.

Il faut des millions d'années avant que l'énergie du noyau solaire atteigne la surface solaire, puis environ huit minutes pour parcourir les 93 millions de kilomètres qui s'allient jusqu'à la Terre. L'énergie solaire se déplace vers la Terre avec une vitesse de 186 000 km/ seconde (vitesse de la lumière). Seule une petite partie de l'énergie rayonnée par le soleil dans l'espace frappe la Terre, soit une partie sur deux milliards. L'homme a utilisé cette énergie de différentes manières depuis longtemps. Il a essayé de collecter et d'utiliser cette énergie de manière adéquate et efficace car elle est moins gratuite, inépuisable et renouvelable. Cela inclut l'électricité stockée dans des batteries pour alimenter les appareils électriques, des radiateurs solaires pour chauffer les systèmes de distribution d'eau, etc. (Tonui, 2014).

I.9.2 Séchage au soleil

La *Figure I.4* suivante illustre le principe de fonctionnement du séchage au soleil traditionnel. Les fruits et les légumes sont généralement dispersés sur des tapis ou sur le sol, où ils reçoivent le rayonnement solaire pendant la majeure partie de la journée. Par rapport à l'énergie totale reçue, une partie de l'énergie solaire est réfléchie et le reste est absorbé par la surface en fonction de la couleur des fruits et des légumes. Le rayonnement solaire absorbé est converti en énergie thermique et la température du matériau commence à augmenter (Brenndorfer et al., 1987. Visavale, 2009). Le séchage au soleil ne dépend d'aucune autre source d'énergie, à l'exception de l'énergie solaire, et constitue donc une méthode économique, mais il présente de nombreux inconvénients. Par conséquent, en règle générale, la technique traditionnelle de séchage au soleil ne complète pas les normes de qualité nécessaires et, parfois, les produits ne peuvent pas être vendus sur le marché international (Hii et al., 2012. Seveda, 2013). En raison de cette insuffisance liée au séchage au soleil, une bonne méthode scientifique semblait utiliser l'énergie solaire pour sécher les fruits et les légumes, communément appelée séchage solaire (Raju et al., 2013).

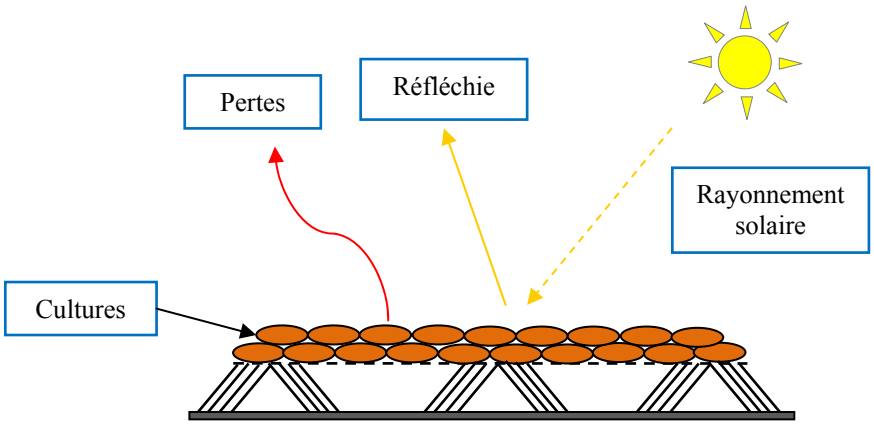


Figure I.4 : *Principe de séchage au soleil (Sharma et al., 2009).*

I.10 CLASSIFICATION DES SECHOIRS SOLAIRES

Le séchage solaire a été utilisé pour sécher les légumes, les fruits, les plantes, les graines, le poisson, la viande et le bois. Dans l'intention de tirer parti des sources d'énergie gratuites et renouvelables fournies par le soleil, de nombreux efforts ont été déployés au cours des dernières années pour développer le séchage solaire principalement dans le but de préserver le fruit; légumes et produits forestiers (Kadam et al., 2006. Patel et al., 2013). Cependant, il y a des limites à la production à grande échelle par séchage en plein air. Les limitations sont le manque de capacité à contrôler le processus de séchage, la dégradation possible due aux réactions

microbiologiques ou biochimiques, l'infestation par les insectes, les besoins étendus et les coûts de main-d'œuvre modérés (Youcef-Ali et al., 2007. Saleh et Badran, 2009). Le temps requis pour sécher un certain matériau peut être assez long et causer des pertes après récolte (plus de 30%). Le séchage de produits agricoles utilisant l'énergie solaire dans des structures couvertes est un moyen surprenant de réduire les pertes après récolte et la mauvaise qualité des produits secs liée aux méthodes classiques de séchage au soleil (Jain et Tiwari, 2003).

Les séchoirs sont principalement classés en fonction de leurs modes de chauffage et de la manière dont la chaleur solaire est utilisée. La *Figure I.5* illustre une classification des séchoirs solaires.

En général, ils peuvent être classés en deux groupes principaux, à savoir (Ekechukwu, 1999) :

- Séchoirs solaires actifs (souvent appelés séchoirs hybrides) ;
- et séchoirs solaires passifs (définis classiquement comme séchage solaire à circulation naturelle) (Green et Schwarz, 2001).

Trois sous-classes différentes des séchoirs solaires actifs ou passifs peuvent être identifiées, soit (Ekechukwu, 1999) :

- Séchoirs solaires directs ;
- Séchoirs solaires indirects ;
- Séchoirs solaires mixtes.

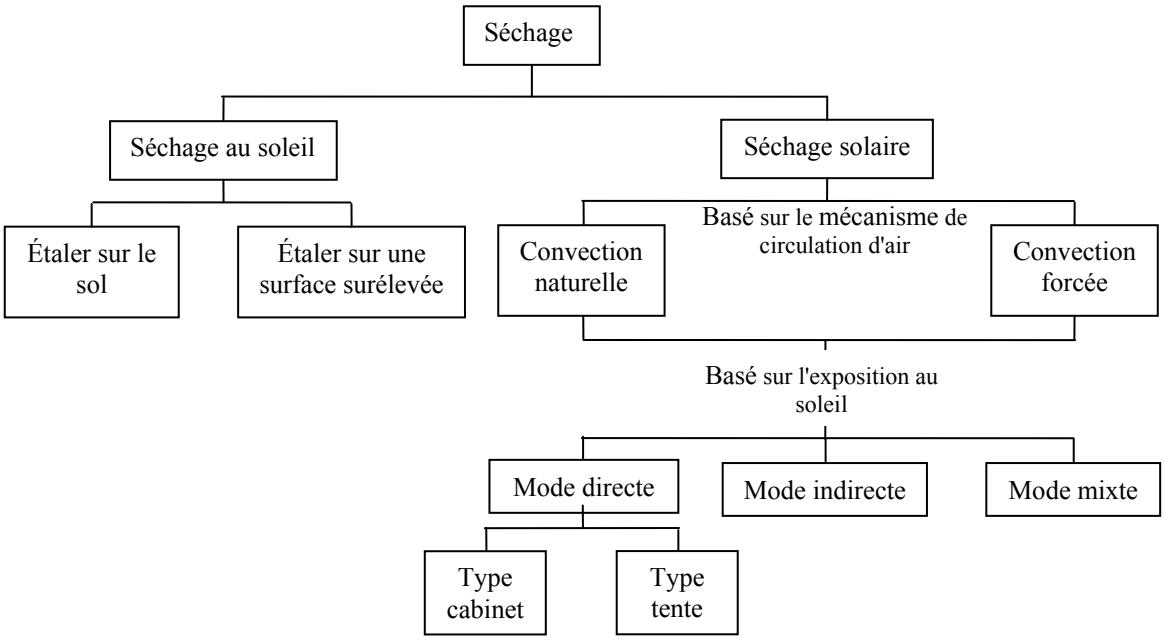


Figure I.5 : *Classification des séchoirs solaires (Green et Schwarz, 2001).*

I.10.1 Les séchoirs solaires directs

Le principe de fonctionnement des séchoirs solaires directs est illustré dans la *Figure I.6*. Dans ce système, l'humidité est enlevée par l'air entrant par le bas du séchoir et sort par la sortie d'air supérieure (Mujumdar, 2006). Dans le séchoir solaire direct, le rayonnement solaire total incident sur le couvercle transparent, une partie se reflète dans l'atmosphère et le reste est transmis à l'intérieur du séchoir solaire (Visavale, 2009). Une partie du rayonnement transmis est réfléchie par la surface des produits à sécher. La partie restante du rayonnement transmis est absorbée par la surface des produits, ce qui provoque une augmentation de la température et émet des rayonnements à grande longueur d'onde qui ne peuvent pas s'échapper dans l'atmosphère en raison du couvercle transparent. Il en résulte une température élevée au-dessus des produits à sécher à l'intérieur du séchoir. Par conséquent, le couvercle transparent permet de réduire les pertes par convection vers l'atmosphère. Cela joue un rôle important dans l'augmentation de la température du séchoir et des produits à sécher (l'effet de serre) (Mustayen et al., 2014).

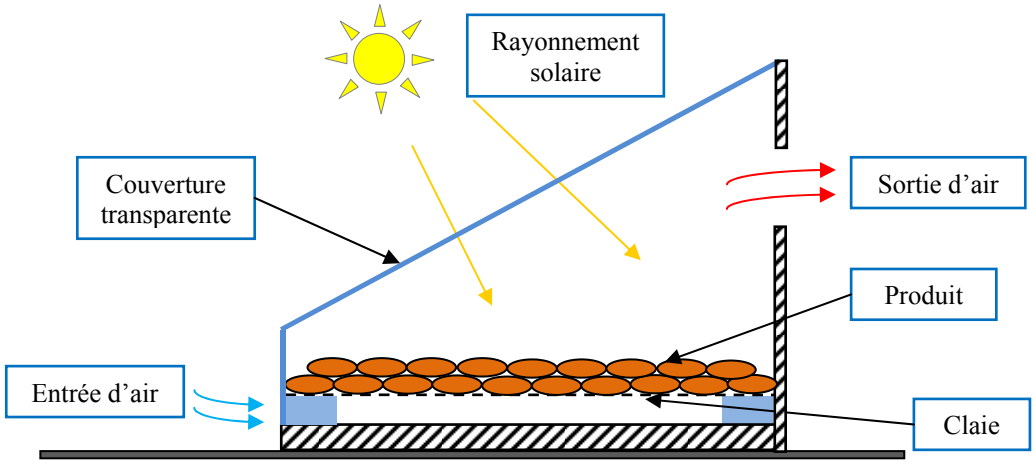


Figure I.6 : *Principe de fonctionnement d'un séchoir solaire direct (Sharma et al., 2009).*

I.10.2 Les séchoirs solaires indirects

Le principe de fonctionnement des séchoirs solaires indirects est illustré dans la *Figure I.7*. Ces séchoirs se distinguent des séchoirs solaires directs en termes de transfert de chaleur et d'élimination de vapeur. Les produits à sécher sont placés dans des plateaux à l'intérieur de la chambre de séchage et un capteur solaire séparé est utilisé pour chauffer l'air entrant dans la chambre. L'air chauffé traverse les aliments humides, ce qui fournit la chaleur nécessaire à

l'évaporation de l'humidité par transfert de chaleur par convection entre les aliments humides et l'air chaud (Dudez, 1999. Hii et al., 2012).

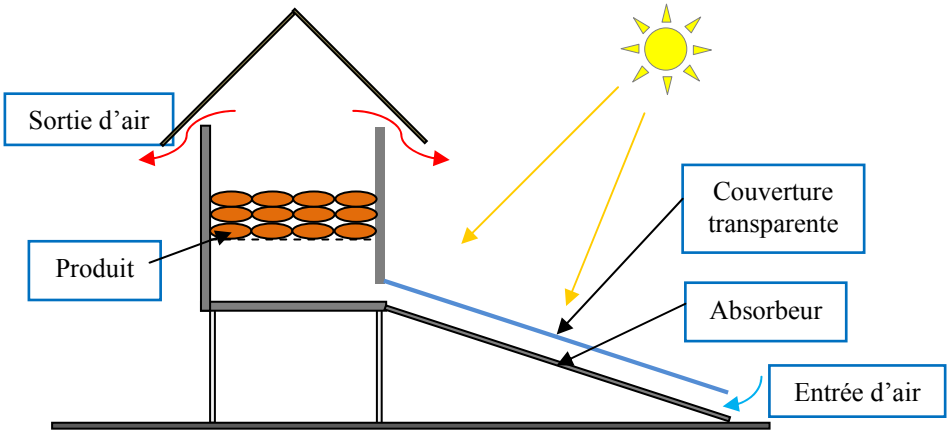


Figure I.7 : *Principe de fonctionnement d'un séchoir solaire indirect (Sharma et al., 2009).*

I.10.3 Les séchoirs solaires mixtes

Le principe de fonctionnement des séchoirs solaires mixtes est illustré dans la *Figure I.8*. Ces séchoirs combinent le principe de séchage direct et indirect. Dans ces séchoirs, Les produits subissent l'action combinée du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air réchauffé dans un capteur situé en dessous de la chambre de séchage (El-Sebaii et Shalaby, 2012). Les surfaces supérieures de la chambre de séchage et du capteur des séchoirs mixtes sont transparentes (Forson et al., 2007).

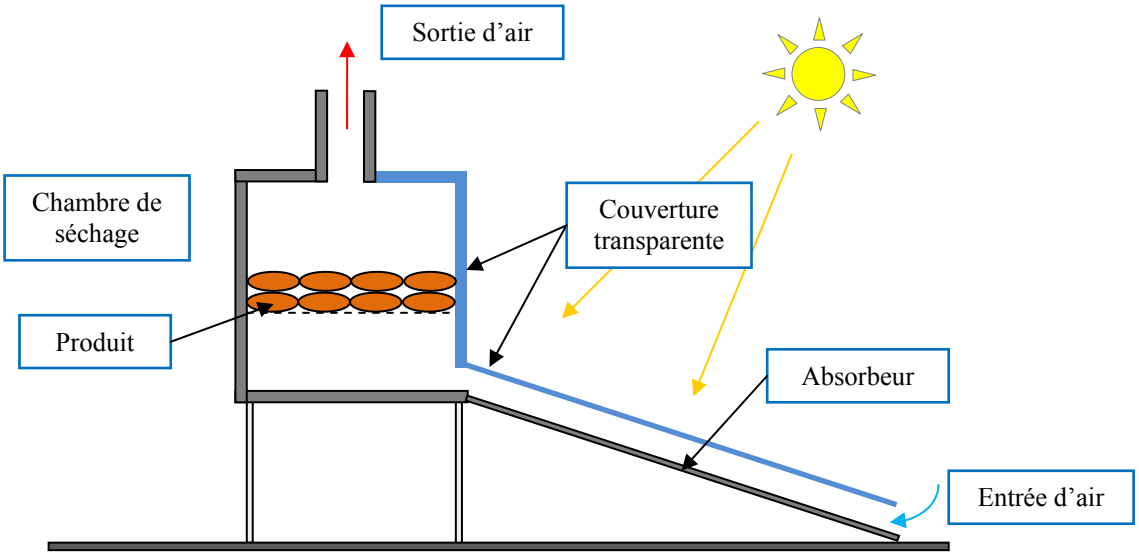


Figure I.8 : *Principe de fonctionnement d'un séchoir solaire mixte (Sharma et al., 2009).*

I.10.4 Les séchoirs solaires hybrides

Le principe de fonctionnement d'un séchoir solaire hybride est illustré dans la *Figure I.9*. Ces séchoirs utilisent une chaleur supplémentaire (combustible, électricité, bois, etc.) pour assurer un haut niveau de chauffage de l'air ou pour fournir une ventilation. Le séchage est donc accéléré, ce qui réduit le temps de séchage (Brenndorfer et al., 1987).

L'apport d'énergie appoint peut se trouver à deux endroits différents du séchoir :

- Garder la température constante dans le séchoir à l'aide d'un brûleur à gaz, une résistance électrique ou un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle ne permet que le préchauffage de l'air.
- Augmentation de la circulation de l'air à travers des ventilateurs électriques, l'énergie solaire reste la source de chaleur, mais le séchoir a une plus grande capacité d'évaporation grâce à une meilleure ventilation (Pangavhanc et al., 2002).

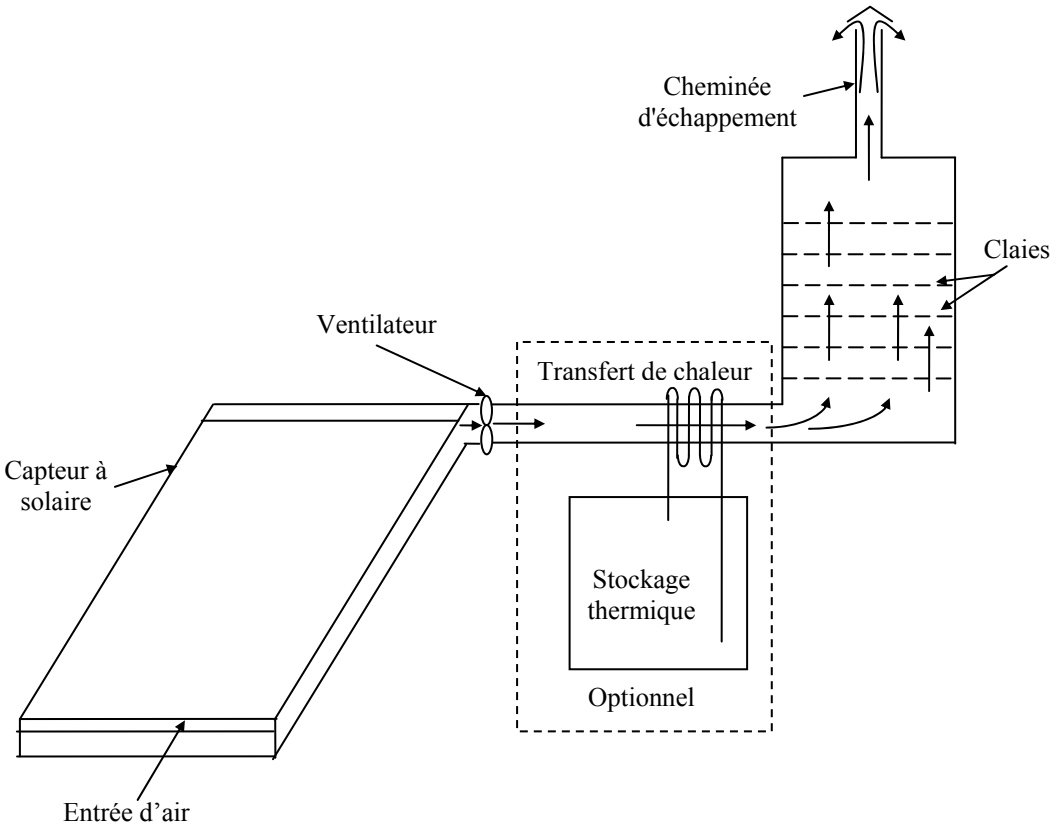


Figure I.9 : *Séchoir solaire hybride (Pangavhanc et al., 2002).*

I.10.5 Les avantages et les inconvénients des classes de séchoirs solaires

Le *Tableau I.1* présente les avantages et les inconvénients des quatre classes de séchoirs solaires ci-dessus.

Tableau I.1 : *Avantages et inconvénients des quatre types de séchoirs solaires (Tonui, 2014. El-Sebaii et Shalaby, 2012).*

Classification	Avantages	Inconvénients
Direct	- Moins cher - Simple	- Les rayons UV peuvent endommager les aliments.
Indirect	- Produits protégés des UV	- Plus complexe et coûteux que le séchage direct
Mixte	- Moins de dégâts causés par des températures extrêmes	- Les rayons UV peuvent endommager les aliments - Plus complexe et coûteux que le soleil direct
Hybride	- Moins de dégâts causés par des températures extrêmes - Ne dépend pas aux conditions climatiques. - Meilleur contrôle du séchage	- Cher - Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz.

I.11 MODELES DE SECHAGE EN COUCHE MINCE

Les modèles de couche mince sont souvent utilisés pour décrire le séchage des fruits et légumes. Ils peuvent être classés en trois groupes, des modèles théoriques, semi-théoriques et empiriques. Les catégories les plus largement utilisées de modèles de couches minces sont les modèles semi-théorique et empirique (Ozdemir et al., 2000. Panchariya et al., 2002. Akpinar, 2006. Doymaz, 2007. Raquel et al., 2011).

I.11.1 Modèles semi-théoriques

Les modèles semi-théoriques peuvent être classés en fonction de leur dérivation comme suit la :

- loi de refroidissement de Newton : ce sont les modèles semi-théoriques dérivés par des analogues de la loi de Newton sur le refroidissement.
- deuxième loi de diffusion de Fick : Les modèles de ce groupe sont les modèles semi-théoriques dérivés de la deuxième loi de diffusion de Fick.

a) Les modèles dérivés de la loi de Newton.

- ***Modèle de Lewis (Newton)***

De nombreux chercheurs ont défini ce modèle comme étant le modèle de Newton. Il supposait que le matériau était suffisamment mince et que les conditions de séchage, telles que la température et l'humidité relative, étaient maintenues constantes.

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad \text{(I-13)}$$

Où : *k : est la constante de séchage (s^{-1}) ; pouvant être obtenue à partir des données expérimentales.*

Dans le concept de séchage en couche mince, la constante de séchage est la combinaison des propriétés de transport du séchage telles que la diffusivité de l'humidité, la conductivité thermique, la chaleur à l'interface et les coefficients de masse (Marinos et Maroulis, 1995). Si *k* est indépendant de M, nous obtenant le modèle de Lewis (Newton) de l'Eq. I-13 qui peut être réécrit comme :

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = exp(-kt) \quad \text{(I-14)}$$

- ***Modèle de page***

Page (1949) a modifié le modèle de Lewis pour obtenir un modèle plus précis en ajoutant une constante empirique sans dimension (n) et en l'appliquant à la modélisation mathématique du séchage des cornes décortiquées :

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = exp(-kt^n) \quad \text{(I-15)}$$

En général, n est nommé comme constante de modèle (sans dimension).

- ***Modèles de Page modifiés***

Overhults et al. (1973) ont modifié le modèle de Page pour décrire le séchage du soja. Cette forme modifiée est généralement connue sous le nom de modèle de Page modifié-I :

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = exp(-kt)^n \quad \text{(I-16)}$$

De plus, White et al. (1978) ont utilisé une autre forme modifiée du modèle de Page pour décrire le séchage du soja. Ce formulaire est généralement appelé modèle de Page modifié-II :

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = exp - (kt)^n \quad \text{(I-17)}$$

Diamante et Munro (1993) ont utilisé une autre forme modifiée du modèle de Page pour décrire le séchage des tranches de patate douce. Cette forme est généralement connue sous le nom de modèle d'équation de page modifiée-III:

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = exp - k(t/l^2)^n \quad \text{(I-18)}$$

Où : *l : est une constante empirique (sans dimension).*

b) Les modèles dérivés de la deuxième loi de diffusion de Fick.

- ***Modèle de Henderson et Pabis***

Henderson et Pabis (1961) ont amélioré un modèle de séchage en utilisant la deuxième loi de Fick sur la diffusion et appliqué le nouveau modèle sur le séchage des grains :

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = A_1 exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{A_2} t\right) \quad \text{(I-19)}$$

Si D_{eff} est constant pendant le séchage, alors Eq. I-19 peut être réorganisé en utilisant la constante de séchage comme :

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = aexp(-kt) \quad \text{(I-20)}$$

Où, a est défini comme l'indication de la forme et généralement appelé constante de modèle (sans dimension). Ces constantes sont obtenues à partir de données expérimentales. L'équation I-20 est généralement connue sous le nom de modèle de Henderson et Pabis.

- ***Modèle logarithmique***

Chandra et Singh (1995) ont proposé un nouveau modèle comprenant la forme logarithmique de Henderson et de Pabis avec l'addition d'un terme empirique, et Yagcioglu et al. (1999) ont appliqué ce modèle au séchage des feuilles de laurier.

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = aexp(-kt) + c \quad \text{(I-21)}$$

Où : *c : est une constante empirique (sans dimension).*

- ***Modèle de Midilli***

Midilli et al. (2002) ont proposé un nouveau modèle avec l'ajout d'un terme empirique supplémentaire qui inclut t au modèle de Henderson et Pabis. Le nouveau modèle était la combinaison d'un terme exponentiel et d'un terme linéaire. Ils ont appliqué ce nouveau modèle au séchage du pollen, des champignons et de la pistache décortiquée/non décortiquée selon différentes méthodes de séchage.

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = aexp(-kt) + b^*t \quad \text{(I-22)}$$

Où : *b* est une constante empirique (s^{-1}).*

- ***Modèle de Midilli modifié***

Ghazanfari et al. (2006) ont souligné que l'indication du terme de forme (a) du modèle de Midilli (équation I-22) devait être de 1.0 à t = 0 et a proposé une modification comme suit :

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = exp(-kt) + b^*t \quad \text{(I-23)}$$

Ce modèle n'a pas été appliqué à un produit alimentaire, mais a donné de bons résultats avec la fibre de lin.

- ***Modèle de Demir et al.***

Demir et al. (2007) ont proposé un nouveau modèle similaire aux modèles de Henderson et Pabis, Modified Page-I, Logarithmic et Midilli ; le modèle proposé et appliqué au séchage des olives vertes et a donné de bons résultats :

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = aexp(-kt)^n + b \quad \text{(I-24)}$$

- ***Modèle de Two-term***

Henderson (1974) a proposé d'utiliser le premier terme de la deuxième série de la loi de diffusion de Fick pour corriger les défauts de modèle de Henderson et Pabis. Glenn (1978) a ensuite utilisé cette proposition pour le séchage des grains. Avec cet argument, le nouveau modèle est dérivé de :

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = aexp(-k_1 t) + bexp(-k_2 t) \quad \text{(I-25)}$$

Où : *a, b : définis comme l'indication de la forme et sont généralement nommés constantes du modèle (sans dimension),*

k_1, k_2 : les constantes de séchage (s^{-1}) ; obtenues à partir de données expérimentales.

- ***Modèle exponentiel de two-term (deux termes)***

Sharaf-Eldeen et al. (1980) ont modifié le modèle de two-term en réduisant le nombre constant et en organisant l'indication de la constante de forme (b) du deuxième terme. Ils ont souligné que b du modèle de two-term (Eq. I-25) devait être (1-a) à t = 0 pour obtenir MR = 1 et a proposé une modification comme suit :

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = aexp(-k_1 t) + (1 - a)exp(-kat) \quad \text{(I-26)}$$

- ***Modèles exponentiels de two- term modifiés***

Verma et al. (1985) ont modifié le second terme exponentiel du modèle exponentiel de two- term en ajoutant une constante empirique et appliqué au séchage du riz.

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = aexp(-kt) + (1-a)exp(-gt) \quad \text{(I-27)}$$

Ce modèle modifié (Eq. I-27) s'appelle modèle de Verma.

Kaseem (1998) a réorganisé le modèle de Verma en séparant le terme constant de séchage k de g et a proposé la forme renouvelée sous la forme:

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = aexp(-kt) + (1-a)exp(-kbt) \quad \text{(I-28)}$$

Cette forme modifiée (Eq. I-28) est connue sous le nom de modèle d'approche par diffusion. Ces deux modèles modifiés ont été appliqués simultanément pour le séchage de certains produits et ont donné les mêmes résultats que prévu (Togrul et Pehlivan, 2003. Akpinar et al., 2003. Gunhan et al., 2005. Akpinar, 2006. Demir et al., 2007).

- ***Modèle modifié de Henderson et Pabis***

Karathanos (1999) a amélioré les modèles de Henderson et Pabis et de Two-Term en ajoutant le troisième terme de la solution générale de la deuxième loi de diffusion de Fick pour corriger les faiblesses de ces modèles. Karathanos a souligné que le premier terme explique la dernière partie, le second explique la partie intermédiaire et le troisième explique le début de la courbe de séchage (MR-t) comme suit :

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = aexp(-kt) + bexp(-gt) + cexp(-ht) \quad \text{(I-29)}$$

Où : a, b et c : définis comme l'indication de la forme et sont généralement appelés constantes du modèle (sans dimension),

k, g et h : les constantes de séchage (s^{-1}) ; obtenues à partir de données expérimentales.

I.11.2 Modèles empiriques

a) Modèle de Thompson

Thompson et al. (1968) ont développé un modèle avec les résultats expérimentaux du séchage des cors décortiqués dans la plage de températures comprises entre 60 et 150 °C.

$$t = aln(MR) + b[ln(MR)]^2 \quad \text{(I-30)}$$

Où : a, et b : sont des constantes sans dimension obtenues à partir de données expérimentales.

Ce modèle a également été utilisé pour décrire les caractéristiques de séchage du sorgho (Paulsen et Thompson, 1973).

b) Modèle de Wang et Singh

Wang et Singh (1978) ont créé un modèle pour le séchage intermittent du riz brut.

$$MR = 1 + b^{*}t + a^{*}t^{2} \quad \text{(I-31)}$$

Où : *b^{*} (s^{-1}) et a^{*} (s^{-2}) sont des constantes obtenues à partir de données expérimentales.*

c) Modèle de Kaleemullah

Kaleemullah et Kailappan (2006) ont créés un modèle empirique qui comprenait MR, T et t. Ils l'ont appliqué au séchage des piments rouges.

$$MR = exp - c^{*}T + b^{*}t^{(pT+n)} \quad \text{(I-32)}$$

Où : *c^{*} est en $°C^{-1}s^{-1}$, b^{*} est en s^{-1}, p est en $°C^{-1}$ et n est sans dimension.*

I.12 CONCLUSION

Le séchage est l'une des opérations unitaires les plus importantes de l'industrie de la transformation des aliments. Une mauvaise application de séchage entraîne des problèmes de qualité des aliments séchés. Comprendre les principes du séchage permet de prendre une décision appropriée lors du choix du processus de séchage. Dans ce chapitre, une description générale de séchage a été présentée avec la classification des différents types de séchoirs solaires. On a essayé de fournir des informations générales sur les principes de base et la terminologie de base utilisée dans le processus de séchage, ainsi que sur la modélisation du séchage en insistant sur les modèles mathématiques en couche mince les plus généralement utilisés pour le séchage des produits alimentaires.

La classification des différents types de séchoirs solaires montre clairement que les conceptions de séchoirs solaires peuvent être systématiquement regroupées en fonction de leurs plages de température de fonctionnement, de leurs sources/modes de chauffage et de leurs modes de fonctionnement.

Chapitre II
Produits Agroalimentaires à Sécher

II.1 INTRODUCTION

Les fruits et légumes sont des produits à haute valeur nutritionnelle, riches en vitamines, en minéraux et en fibres.

Les fruits et légumes sont l'un des éléments indispensables pour une alimentation équilibrée et sont réputés pour leur rôle dans le maintien des fonctions vitales du corps humain. La valeur nutritionnelle, diététique et thérapeutique des fruits et des légumes est unanimement acceptée. Ils sont souvent considérés comme des "aliments fonctionnels" en raison de la richesse en micronutriments tels que les antioxydants, les minéraux, les vitamines etc.

De différentes études épidémiologiques ont montré une relation entre la consommation de fruits et légumes et l'évolution de diverses maladies. Elles montrent qu'un régime alimentaire riche en fruits et légumes peut réduire le risque d'apparition et améliorer les effets de maladies telles que celles cardio-vasculaires (Mirmiran et al., 2009) et cérébraux-vasculaires (Castaldo et Reed, 2008), le diabète (Aruoma et al., 2012), l'ostéoporose (Keen, 2007), la cataracte (Vinson, 2006), les différents types de cancers (Skuladottir, 2006. Martin et al., 2008.) etc.

Les fruits et les légumes ont toujours fait partie de l'alimentation quotidienne des humains. Caractérisés par des couleurs, des goûts et des parfums très attrayants, ils constituent l'un des éléments essentiels du régime alimentaire. Qu'ils soient frais ou sous forme de produits transformés, ils constituent une source inépuisable de nourriture.

Étant donné que la teneur en humidité des fruits et légumes frais dépasse 80%, ils sont classés comme produits très périssables (Orsat et al., 2005). Maintenir le produit au frais est le

meilleur moyen de conserver sa valeur nutritive, mais la plupart des techniques de conservation nécessitent des températures basses, difficiles à maintenir tout au long de la chaîne de distribution, tout en maintenant la qualité du produit pendant une durée de vie limitée. D'autre part, le séchage est une alternative appropriée pour la gestion après post- récolte, en particulier dans les pays où les installations de distribution et de manutention à basse température sont mal établies. Plus de 20% des cultures périssables dans le monde sont séchées pour augmenter la durée de conservation et promouvoir la sécurité alimentaire (Grabowskiet et al., 2003). Le séchage des fruits et des légumes a pour avantage non seulement de conserver les cultures comme denrées alimentaires, mais également de réduire les coûts d'emballage et de transport en termes de poids et de volume, tout en offrant la possibilité d'ajouter de la valeur aux produits récoltés. Le défi du séchage des fruits et des légumes est de réduire la teneur en eau à un certain niveau où la croissance microbiologique ne se produira pas tout en maintenant une valeur nutritive élevée.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les fruits et légumes que nous avons étudiés lors de ce travail. Il s'agit principalement de l'abricot, la pomme de terre, la tomate, la figue et le poivron rouge. Nous allons présenter aussi une description générale du blanchiment, la méthode la plus habituellement des prétraitements utilisée avant le séchage des fruits et des légumes.

II.2 L'ABRICOT

II.2.1 Description de l'abricot

L'abricot est un fruit charnu, une drupe, arrondi ou oblong, avec un noyau solide contenant une grosse graine (*Figure II.1*) ou amande.

L'abricot est généralement le fruit d'un petit arbre appelé abricotier, de la famille des Rosacées. Le nom scientifique de l'arbre est : Prunus armeniaca (Prune Arménie). Originaire de Chine, l'abricotier sauvage a poussé il y a 5000 ans. Il fut introduit à l'ouest par Alexandre le Grand qui prit la célèbre Route de la Soie. Les abricotiers l'ont ensuite propagé dans tout le bassin méditerranéen, en particulier dans le sud de l'Espagne (Lichou, 1989).



Figure II.1 : *Abricots frais.*

L'abricot est constitué d'une chair sucrée, peu juteuse, jaune orangée et ferme, avec une teneur élevée en carotène ou pro vitamine A, d'ailleurs c'est elle qui donne la couleur orange au fruit. Il est riche en pectines qui se gonflent facilement avec de l'eau et qui lui donne un côté moelleux. L'abricot se sépare facilement en suivant le sillon médian. (Arevalo et Murr, 2007). Il est caractérisé par une peau veloutée, dont la couleur peut aller du jaune au rouge, est des fois tachées de "taches de rousseur". La couleur rouge de l'abricot n'est pas une garantie de maturité (la maturité est estimée par le parfum et la souplesse du fruit) (Faust et al., 1998). De plus, les abricots ont tendance à s'arrondir à l'approche de leur maturité.

Les abricots sont constitués de deux oreillons séparés par une suture radiale plus ou moins profonde. Cette suture s'étend sur plus de la moitié des fruits entre l'attache pédonculaire et l'apex. Le poids moyen varie de moins de 40 g à plus de 90 g (Lichou, 1989) et La paroi se divise en trois structures tissulaires différentes : l'épiderme (peau), le mésocarpe (chair) et l'endocarpe lignifié (noyau) (*Figure II.2*). La chair est traversée par un réseau de vaisseaux qui assure l'approvisionnement en eau et son absorption. Dans la grande majorité des variétés, le noyau est libre ou peu cohérent et, à maturité, il est clairement séparé du corps. (Lichou, 1989).

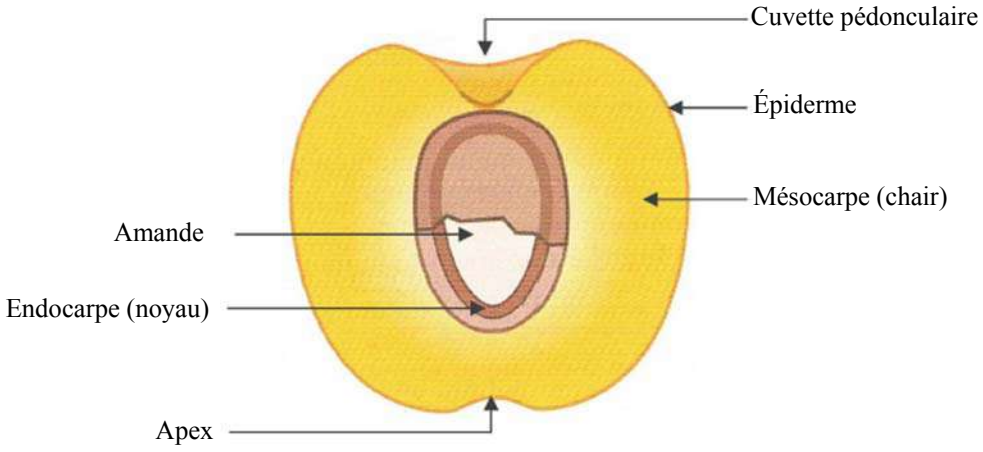


Figure II.2 : *Coupe longitudinale d'un abricot (Lichou et Jay, 2012).*

II.2.2 Variétés des abricots

Il existe plus de 750 variétés d'abricots répertoriées dans le monde. Parmi ces variétés, citons les caractéristiques des plus connues (*Tableau II.1*).

Tableau II.1 : *Caractéristiques des vieilles variétés d'abricot (Lahbari M., 2015).*

Variété	Caractères
Le Paviot	- Gros à très gros fruit, conique, enflé sur les joues épiderme rouge orangé. - Belle variété assez délicate pour le transport. - Fruit obtenu d'un semis de Hâtif du Clos, en 1882, à Marcilly d'arzegues par M. Paviot.
Le Luizet	- Fruit volumineux, de forme ovoïde allongée. - Une peau légèrement duveteuse, jaune orange ponctuée de rouge pourpre, juteux et sucré.
Le Bourbon	- Fruit assez gros, peu parfumé. - Maturation irrégulière, souvent fendu par la pluie.
Le Blanc Rosé (Poman Rosé)	- Fruit moyen allongé, ovale conique, bien comprimé sur les joues, à dos caréné, assez peu arqué, suture centrale arquée. - Epiderme jaune pâle, pourpré, carminé à l'insolation.

II.2.3 Production d'abricot

a) Production mondiale

La culture de l'abricot s'est développée autour du bassin méditerranéen et en Asie centrale jusqu'à ce jour, c'est dans cet océan où se trouvent les principaux pays producteurs. Ailleurs, il existe des bassins secondaires, notamment les États-Unis, la Chine et l'Afrique du Sud.

Selon les chiffres fournis par la FAO en 2017, la Turquie est le principal producteur d'abricots, en particulier dans la région de Malatya, avec une production mondiale d'environ 985000 tonnes d'abricots en 2017, suivie de Ouzbékistan avec 532565 tonnes (*Tableau II.2*).

Tableau II.2 : *Production mondiale en tonnes (FAO, 2019).*

Turquie	985000
Ouzbékistan	532565
Italie	266372
Algérie	256890
Iran	239712
Pakistan	178957
France	148500
Maroc	112538

Une importante partie de la production turque et iranienne est destinée au séchage, ce qui explique la présence abondante sur notre marché d'abricots secs originaires presque exclusivement de ces deux pays (Bretaudeau, 1981).

b) Production en Algérie

En Algérie, l'abricotier occupe une place privilégiée dans la vie des agriculteurs, en raison de la superficie qu'il occupe et de son importance sur le marché national. Les vergers d'abricotiers sont l'une des meilleures fortunes de l'Algérie (Bahlouli et al., 2008).

Au cours de la dernière décennie, la culture des abricots a considérablement augmenté. Depuis 2001, la superficie a été modifiée de 200%, passant de 13 500 hectares en 2001 à 38174 hectares en 2017. Ce qui correspond à une augmentation annuelle de 20%. De même, la production d'abricots s'est nettement améliorée ces dernières années, avec un doublement de 4 par rapport à 2001 (*Figure II.3*). L'Algérie, qui détient 256890 tonnes, est le premier producteur d'abricots en Afrique et le quatrième producteur mondial. Elle contribue à 7,3% de la production mondiale et 44 % de la production de l'Afrique (FAO, 2019).

Malgré cette situation apparemment favorable, la production algérienne d'abricots reste faible par rapport au nombre d'abricotiers existants récemment plantés dans le cadre du fonds de soutien aux agriculteurs et encore loin d'atteindre des niveaux record dans certains pays du monde (Bahlouli et al., 2008).

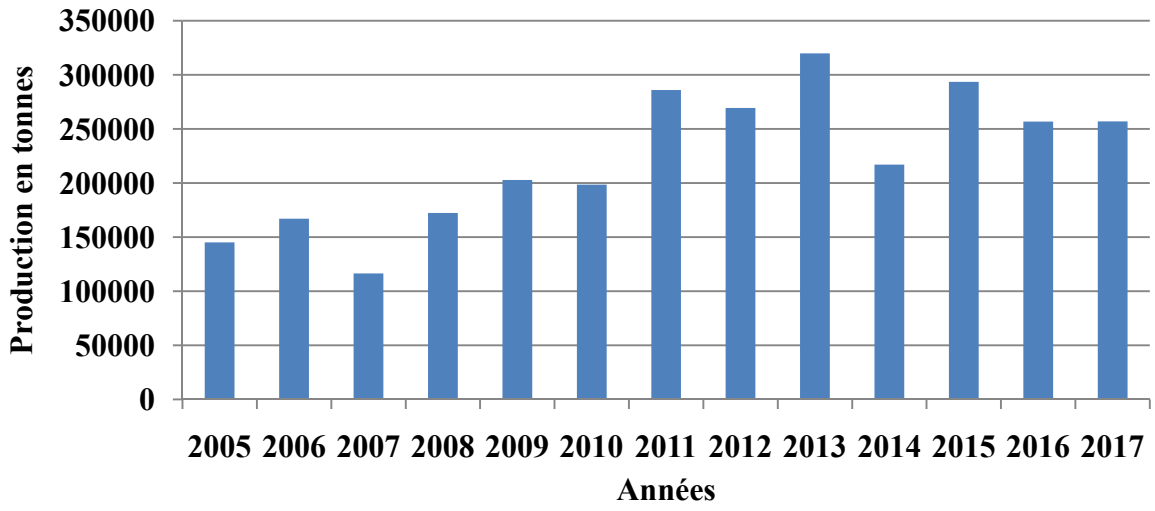


Figure II.3 : *Evolution de la production des abricots en Algérie entre les années 2005 et 2017 (FAO, 2019).*

II.2.4 Valeur nutritionnelle

Les abricots sont considérés comme une bonne source de fibres alimentaires (pectine) et de potassium, ainsi qu'une très bonne source de bêta-carotène (vitamine A) et de vitamine C. La pectine se gonfle facilement avec de l'eau et ramollit sa chair (*Tableau II.3*). L'abricot peut être consommé frais, séché ou sous forme de jus, de marmelade et de confiture. Son contenu en fibres, en antioxydants et en de nombreux autres nutriments font de l'abricot un fruit spécialement intéressant pour la santé (Bretaudeau, 1981).

Certaines futures études épidémiologiques ont démontré qu'une consommation élevée de fruits réduit le risque de maladies cardiovasculaires et de certains cancers et autres maladies chroniques (Bourgeois, 2003).

Les abricots contiennent divers antioxydants, notamment des flavonoïdes, mais la teneur en antioxydants des abricots séchés est supérieure à celle des abricots frais. L'abricot contient principalement du bêta-carotène, un caroténoïde qui participe de manière significative à sa couleur orangée, ainsi qu'une quantité réduite de lycopène. Dans le corps, le bêta-carotène a la capacité de se convertir en vitamine A.

Tableau II.3 : *Valeurs nutritionnelles d'abricot (Fratianni et al., 2018).*

Composition chimique	**Valeur /100g de produit frais**	**Composition chimique**	**Valeur / 100g de produit frais**
Portion cometible	94%	Protienes	0.4 g
Eau	86.3 g	Lipides	0.1 g
Coléstirole	0 g	Na	1 mg
Glucides disponibles	6.8 g	K	320 mg
Amidon	0 g	Fe	0.5 mg
Sucres solubles	6.8 g	P	16 mg
Fibres totales	1.5 g	Ca	16 mg
Fibres solubres	0.71 g	Riboflavine	0.03 mg
Fibres insoluble	0.83 g	Niacine	0.5 mg
Vit A rétinol eq	360 mg	Energie	28 kcal
Vit C	13 mg	Thiamine	0.03 mg

Les abricots, frais et séchés, sont une source de fibres alimentaires. La consommation de 125 ml d'abricot frais représente respectivement 5% et 8% des apports quotidiens recommandés en fibres des hommes et des femmes de 19 ans à 50 ans. En plus de prévenir la constipation et de réduire le risque de cancer du côlon, une alimentation riche en fibres peut aider à prévenir les maladies cardiovasculaires et à contrôler le diabète et l'appétit (Abrouche, 2013).

II.2.5 Abricots séchés

Les abricots ont une saison de récolte courte et une durée de stockage limitée, même dans les bonnes conditions (*Figure II.4*). Pour mettre les abricots à la disposition des consommateurs tout au long de l'année, différentes méthodes de conservation sont appliquées (Coskun et al., 2013). Exclusivement 15 à 20% de la production mondiale d'abricots est consommée frais, le reste est transformé. Le mode le plus important de transformation des abricots est le séchage, l'abricot séché représente près de la moitié de la production mondiale (Lichou et Jay, 2012).

Les abricots secs proviennent principalement de Turquie (goût Muscat, belle couleur), de Californie (un peu sucré et acidulé), d'Australie (insipide, parfois trempé dans un bain de sucre) ou d'Iran (de couleur jaune-pâle). Ce type d'abricot est beaucoup consommé seul par les athlètes et les astronautes ou associé comme on l'utilise ici par exemple en Algérie dans nos recettes de tajines lors d'événements, de festivals ou de Ramadan (Bimbenet, 1998).



Figure II.4 : *Abricots séchés.*

Parmi les régions réputées pour ses abricots secs, on trouve: le Ladakh en Inde et les Aurès en Algérie (l'abricot très sec s'appelle Affermas en Chaouia ou Fermas en arabe parlé, on l'utilise presque dans toute l'Algérie comme composant lors de la préparation de nombreuses recettes traditionnelles telles que le couscous grossier) (Bourgeois, 2003).

Les abricots séchés peuvent être utilisés pour préparer des céréales pour le petit-déjeuner ou ou barres céréalières (Lichou et Jay, 2012).

Une quantité de 125 ml d'abricots frais (environ deux abricots) contient environ 2 000 microgrammes de bêta-carotène, tandis qu'une quantité de 60 ml d'abricots secs contient 1 400 microgrammes (Abrouche, 2013). Les abricots secs fournissent des éléments essentiels tels que les glucides à action rapide, des vitamines du groupe B, du fer, du cuivre, du potassium et sa haute teneur en fibres (Bimbenet, 1998).

Les méthodes de séchage ont une incidence sur le taux des caroténoïdes chez les abricots (Bauernfeind et al., 1981). Le séchage au soleil est un moyen traditionnel simple de préservation des aliments dans les zones pauvres, mais l'exposition à l'air et au soleil conduit en particulier à la destruction des caroténoïdes (Britton et Khachik, 2009). La perte de carotène dépend de la quantité d'oxygène présente plus que de la température de séchage (Bauernfeind et al., 1981). Karabulut et al., (2007) ont constaté dans leur étude une différence importante entre la teneur en β-carotène des abricots frais et des abricots secs à différentes températures (50, 60, 70 et 80 °C).

II.3 LA POMME DE TERRE

II.3.1 Description de la pomme de terre

La pomme de terre est une plante tubéreuse, herbacée, cultivée pour ses tubercules riches en amidon et possédant des qualités nutritives (Clement, 1981). Cette plante vivace appartenant à la plante Solanum tuberosum (*Figure II.5*). Dans de nombreux contextes, le mot pomme de terre fait référence à la partie consommable des tubercules féculents de la plante, mais il peut

également désigner la plante elle-même. Elle est de la famille des Solanacées, qui sont des plantes à fleurs, et partage le genre Solanum avec au moins 2000 autres produits, comme la tomate, l'aubergine, le tabac, le piment et le pétunia (Renaud, 2003).

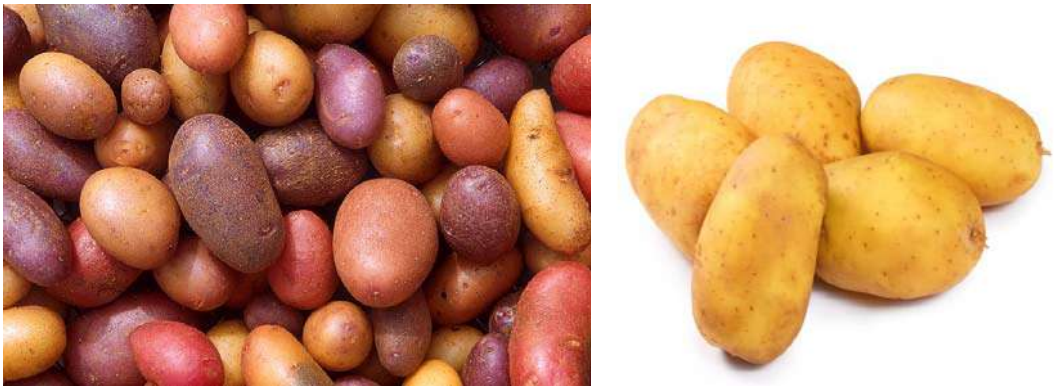


Figure II.5 : *Pommes de terre fraiches.*

Les pommes de terre ont été introduites en Europe par les Espagnols à partir des Amériques dans la seconde moitié du 16ème siècle, ensuite elles sont ramenées en France puis en Algérie pendant la période coloniale. Aujourd'hui, elles constituent un aliment de base dans de nombreuses régions du monde et font partie intégrante d'une grande partie de l'approvisionnement alimentaire mondial. En 2014, les pommes de terre constituaient la quatrième culture vivrière au monde après le maïs, le blé et le riz.

La pomme de terre n'est qu'une tige souterraine avec des entre-nœuds courts et épais. Il se compose de deux extrémités (*Figure II.6*) :

Le talon (ou hile) attaché par le stolon à la plante- mère et la couronne qui est l'extrémité apicale opposée au talon où, la majorité des yeux sont situées.

Les yeux sont arrangés en spirale et leur nombre dépend de la surface du tubercule. Chaque œil a beaucoup de bourgeons qui donnent des germes. Après plantation, ces germes produisent des tiges, des stolons et racines (Bernhards, 1998). On observe dans la section longitudinale (de l'extérieur vers l'intérieur tout d'abord) d'un tubercule arrivé à maturité:

Le périderme, connu plus couramment par la peau. La peau du tubercule mature devient dure et presque imperméable aux produits chimiques, gazeux et liquides. Elle est également une bonne couche protectrice contre les micro-organismes et la perte d'eau.

La communication entre l'extérieur et l'intérieur du tubercule est assurée par les lenticelles qui jouent un rôle majeur dans la respiration de cet organe. La microscopie optique montre que les cellules des parenchymes péri vasculaires sont petites et contiennent de très petits

grains d'amidon. Les cellules du parenchyme cortical sont plus grandes et contiennent beaucoup de plus de grains d'amidon, de petites tailles que dans la moelle.

L'enrobage tissulaire (le périderme) est la zone du tubercule la plus pauvre en grains d'amidon. La région périmédullaire offre les plus gros grains d'amidon (Bernhards, 1998).

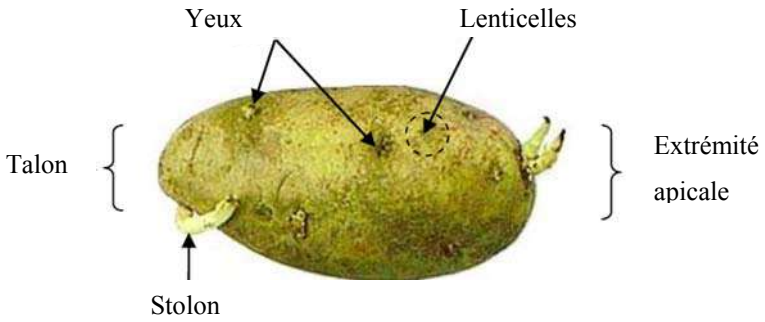


Figure II.6 : *Principaux organes extérieurs du tubercule de pomme de terre (Bernhards, 1998).*

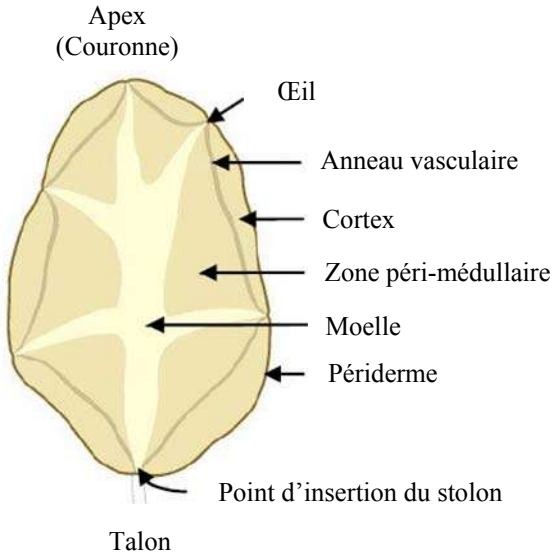


Figure II.7 : *Coupe longitudinale d'une pomme de terre (Bernhards, 1998).*

II.3.2 Variétés de la pomme de terre

Les pommes de terre peuvent être classées par la couleur de leur peau et de leur chair et leur forme (Ellissèche, 2000). Selon la forme Les pomme de terre sont classées en trois grands types:

- **Les claviformes :** qui sont plus ou moins en forme de rein, comme la Ratte.
- **Les oblongs :** de forme plus ou moins allongée (un peu comme un kiwi), comme Ostara, Bintje, Spunta ou Béa.

- **Les arrondis :** qui sont souvent bosselés ; ce sont des variétés destinées à la production de la fécule.
- **Selon la couleur on peut distinguer deux couleurs :**
- **La couleur de la peau :** est généralement jaune, mais peut être rouge, noire, brune ou rosée.
- **La couleur de la chair :** elle est blanche, jaune plus ou moins foncée, rose ou violette ça dépend les variétés (Rousselle et al., 1992).

Cent vingt variétés sont répertoriées au catalogue algérien des espèces et variétés cultivées. Cette inscription est exigée pour leur commercialisation. Les principales variétés cultivées en Algérie sont : Spunta (à chair blanche), Désirée (à chair jaune), Bartina et Lisita.

II.3.3 Production de la pomme de terre

a) Production mondiale

Sur le plan mondial l'Asie et l'Europe sont les deux principaux continents producteurs de la pomme de terre du monde. Ils ont fourni plus de 80% de la production mondiale en 2007. Bien que les latins soient nettement inférieurs, s'elles ont atteint leurs niveaux record. C'est l'Amérique du Nord qui obtient de loin les rendements les plus élevés avec plus de 36 tonnes/ha.

En 2017, la production mondiale de pommes de terre s'élevait à 388 millions de tonnes, la Chine venant en tête avec plus de 26% du total mondial (*Tableau II.4*). Les autres producteurs importants étaient l'Inde, la Russie, l'Ukraine et les États-Unis. Il s'agit d'une culture essentielle en Europe (en particulier dans le nord et l'est de l'Europe), où la production par habitant reste la plus élevée au monde, mais l'expansion la plus rapide des dernières décennies s'est produite dans le sud et l'est d'Asie (Potato Pro., 2014. FAO, 2019)

Tableau II.4 : *production mondiale de la pomme de terre en 2017 (FAO, 2019).*

Pays	Production (millions de tonnes)
Chine	99.2
Union européenne	61.3
Inde	48.6
Russie	31.1
Ukraine	21.8
États-Unis	20.0
Monde	**388.2**

b) Production en Algérie

Selon un rapport de la FAO pour l'année 2017, l'Algérie a occupé la deuxième place des pays producteurs de pommes de terre en Afrique après l'Egypte. Avec une production dépasse le seuil de 4.6 millions de tonnes cultivées sur une superficie de 1486000 hectares. La moyenne par hectare était de 30.9 tonnes.

L'Algérie a commencé à devenir un véritable producteur de pommes de terre avec une production annuelle moyenne de 4,6 millions de tonnes. L'excédent enregistré dans la production de pommes de terre hors saison dépassant 900000 tonnes, a été produit sur une superficie de 3623 hectares soit une production entre 230 et 250 quintaux par hectare.

Ayant largement répondu aux besoins du marché intérieur, la filière de la pomme de terre offre maintenant aux opérateurs la possibilité d'entrer dans l'industrie de la transformation et de conquérir des marchés à l'exportation (*Figure II.8*).

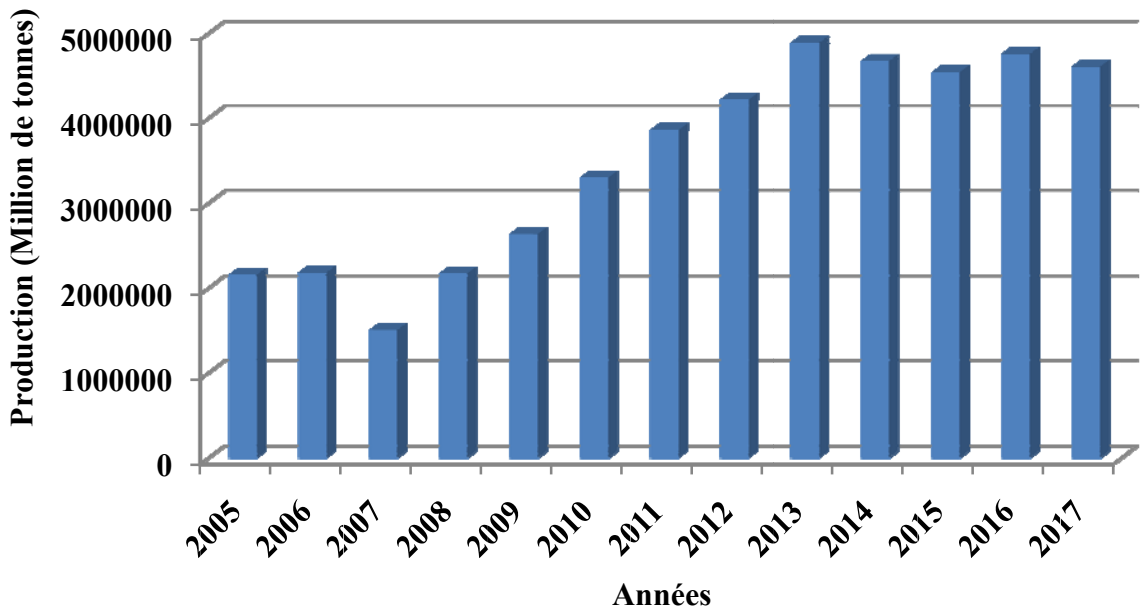


Figure II.8 : *Evolution de la production de pomme de terre en Algérie (2005-2017) (FAO, 2019).*

II.3.4 Valeur nutritionnelle

évolution Une pomme de terre crue est composée de 79% d'eau, 17% de glucides (88% d'amidon), 2% de protéines et contient des matières grasses insignifiantes (*Tableau II.5*). Avec une quantité de 100 grammes (3,5 onces), la pomme de terre crue fournit 322 kilojoules (77 kilocalories) d'énergie et constitue une riche source de vitamine B6 et de vitamine C

(respectivement 23% et 24% de la valeur quotidienne), sans autres vitamines ni minéraux en quantités importantes. Les pommes de terre sont rarement consommées crues, car la fécule de pomme de terre crue est mal digérée par les êtres humains. Quand une pomme de terre est cuite, sa teneur en vitamine B6 et en vitamine C diminue considérablement, alors qu'il y a un léger changement significatif dans la quantité d'autres nutriments. La pomme de terre est un aliment énergétique en raison de sa forte teneur en amidon (environ 20%) (Ellissèche, 2000).

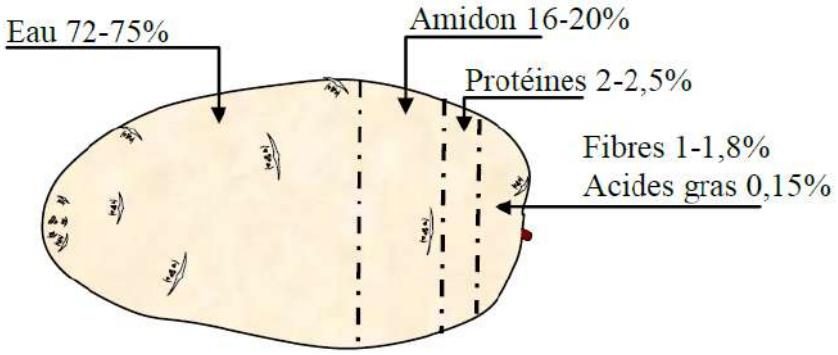


Figure II.9 : *Composition chimique du tubercule de pomme de terre (U.S. National Nutrient Database).*

Tableau II.5 : *Teneur en éléments nutritifs d'une pomme de terre crue (avec chair et peau) par portion de 100 g (United States Department of Agriculture, 2016).*

Elément nutritif	**Valeur**	**Vitamines**	**Valeur**	**Minéraux**	**Valeur**
Eau	79 g	C	19.7 mg	Calcium	12 mg
Energie	322 kJ	B1	0.08 mg	Fer	0.78 mg
Protéine	2.0 g	B2	0.03 mg	Magnésium	23 mg
Lipide	0.09 g	B3	1.05 mg	Phosphores	57 mg
Carbohydrates	17 g	B5	0.30 mg	Potassium	421 mg
Fibre	2.2 g	B6	0.30 mg	Sodium	6 mg
Sucre	0.78 g	B9	16 µg	Zinc	0.29 mg
		E	0.01 mg	Cuivre	0.11 mg
		K1	1.9 µg	Manganèse	0.15 mg
				Sélénium (µg)	0.3

Les pommes de terre sont consommées dans l'alimentation humaine soit après la cuisson, soit après une transformation industrielle de produits frites (chips, pomme paille, pommes dauphines congelés, frites surgelés), séchées (purée de pommes de terre séchée, poudre, flocons) et de conserves.

II.3.5 Pommes de terre séchées

L'augmentation de la production de la pomme de terre s'est réalisée en un temps très court, les capacités de stockage par les chambres froides n'ont pas suivi le même rythme, Pour prendre une solution de ce problème on propose le séchage thermique comme une solution de conservation ou de stockage de pomme de terre. Dans certaines régions, les pommes de terre sont conservées pendant la saison sèche par séchage au soleil pour produire des chips ou de la farine de pommes de terre séchées (*Figure II.10*).



Figure II.10 : *Chips et farine de pommes de terre séchées.*

Les chips séchées sont bouillies et écrasées seules ou avec d'autres légumes. La farine et la fécule de pommes de terre séchées sont utilisées dans la fabrication de produits de boulangerie (pour faire du pain et des gâteaux), de soupes rapides, de farine, que l'on peut mélanger à des farines du maïs ou du soja. Ces farines mélangées sont utilisées pour préparer des aliments pour bébés faciles à digérer.

II.4 LA TOMATE

II.4.1 Description de la tomate

La tomate est le fruit de la plante: Solanum lycopersicon de la famille des Solanacées (ombre nocturne). C'est une culture annuelle qui peut atteindre une hauteur de 70 à 200 cm. La tomate, cultivée dans le monde entier pour ses fruits comestibles (*Figure II.11*). Le terme tomate dérive du mot Nahuatl "tomalt", elle est originaire des Andes d'Amérique du Sud, au Pérou, en Bolivie et en Equateur. Elle a été cultivée lorsque les Européens ont découvert l'Amérique en 1544. Ce n'est qu'en 1835 que la tomate a été considérée comme une culture vivrière dans le nord-est des États-Unis (Naika et al., 2005).

En Algérie, la tomate a été introduite par les cultivateurs du Sud de l'Espagne. Sa culture a commencé dans la région d'Oran en 1905 puis, elle s'étendit vers le centre, notamment au littoral Algérois (Latigui, 1984).



Figure II.11 : *Tomate fraiches.*

Le fruit de tomate est une baie, c'est à dire un fruit dont la paroi est entièrement charnue de forme globulaire ou aplatie de 2 à 15 cm de diamètre. Quand il n'est pas encore mûr, le fruit est vert et velu. La couleur des fruits mûrs varie du jaune au rouge à l'orange. En règle générale, le fruit est rond, régulier ou côtelé (Naika et al., 2005).

Il peut être de tailles, de couleurs et de formes différentes. Il y a des fruits blancs, jaunes, orange ou noirs. La tomate est divisée en deux loges contenant les graines. Celles–ci, appelées pépins, sont fixés sur des placentas situés en position axiale (*Figure II.12*).

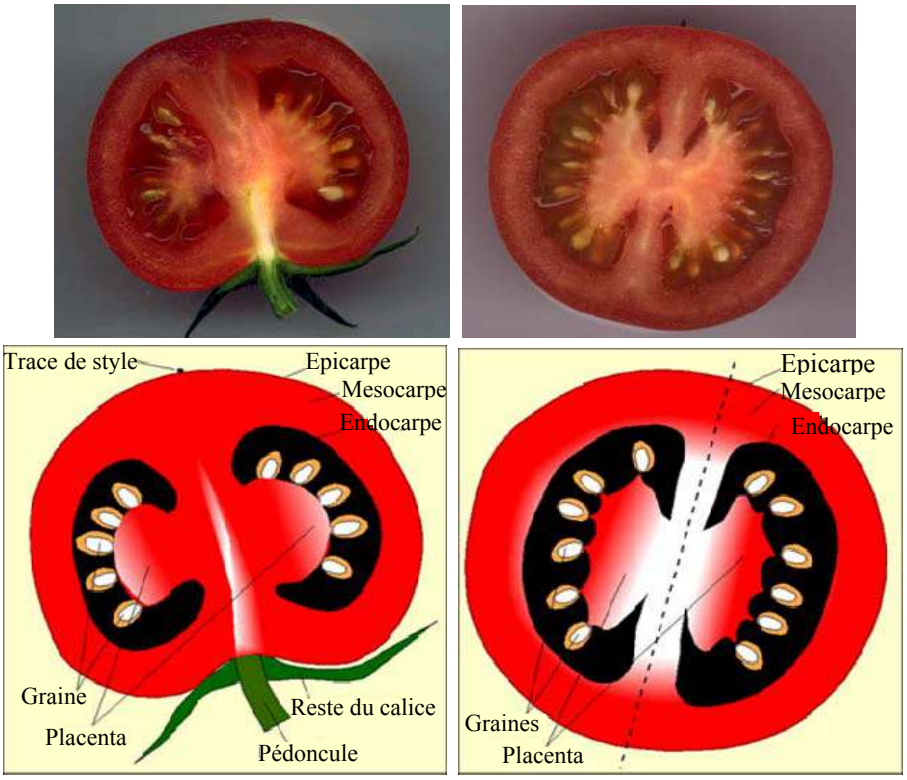


Figure II.12 : *Coupe longitudinale (à gauche) et transversale (à droite) d'une tomate (De Broglie et Guéroult, 2005).*

II.4.2 Variétés de la tomate

Il existe environ 7500 variétés de tomates, les variétés les plus cultivées du commerce étant comprises entre 5 et 6 cm de diamètre. La plupart des cultivars produisent des fruits rouges, mais il existe également plusieurs cultivars disponibles : fruits jaunes, oranges, roses, violets, verts, noirs ou blancs. Chaque variété de tomates à ses particularités. Les caractéristiques de chaque variété sont résumées dans le *Tableau II.6*, en se référant aux données de l'Institut International des Ressources Génétiques des Plantes (IPGRI, 1996).

Tableau II.6 : *Caractéristiques des variétés de tomates.*

Lieu de culture	Caractéristiques	Nom de la variété
Biskra	Forme aplatie avec un aspect irrégulier, d'une grande taille (8.1-10 cm de diamètre) et riche en graines.	Marmande
Tipaza	En forme de cœur, d'une taille moyenne (5, 1-8 cm diamètre), avec pédicelles.	Sammichele
Bejaia	Forme ronde, d'une taille moyenne et ferme.	Agora
	Légèrement aplatie, d'une taille moyenne et bien ferme.	Zahra
	Ronde, d'une petite taille (3-5 cm de diamètre) avec une bonne fermeté.	Nattih
	Tomate de forme ronde, d'une petite taille et bien consistante.	Tafna
	Variété d'une petite taille et d'une forme légèrement aplatie.	Kiti
	Légèrement aplatie, ferme et d'une taille moyenne.	Joker

II.4.3 Production de la tomate

a) Production mondiale

La tomate est le troisième produit le plus cultivé au monde, après la pomme de terre et la patate douce, et le deuxième le plus consommé (De Broglie et Guéroult, 2005). Elle est donc un enjeu économique et est soumise à une concurrence importante.

La tomate occupe une place très importante dans l'agriculture mondiale. Elle est cultivée dans presque tous les pays du monde ; sa production est distribuée dans toutes les régions climatiques, y compris dans des zones relativement froides grâce à l'évolution des cultures sous

abri (Desmas, 2005). En 2013 la Méditerranée a représenté 31% de la production mondiale de la tomate.

La Chine est, les États-Unis, l'Inde, la Turquie, l'Italie et l'Égypte sont parmi les plus grands producteurs de tomates au monde. D'après la *Figure II.13*, la Chine est le premier producteur mondial de tomates avec une production de 59,62 millions de tonnes, l'Inde est le second producteur pour 20,71 millions de tonnes, et en troisième position la Turquie avec 12,75 millions de tonnes produites.

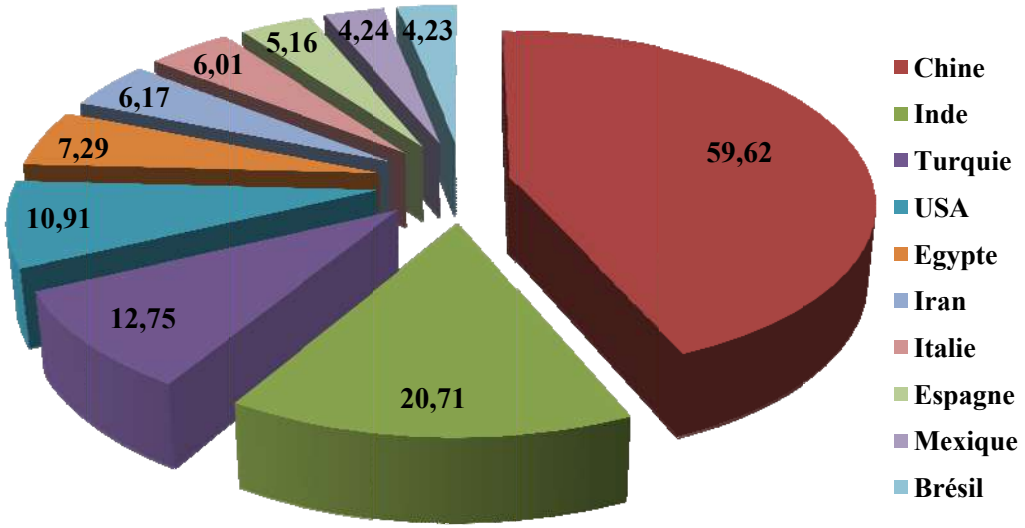


Figure II.13 : *Production en million de tonnes des principaux pays producteurs de la tomate dans le monde pour l'année 2017 (FAO, 2019).*

b) Production en Algérie

La tomate occupe une place particulière dans le secteur maraicher en Algérie. Sa production arrive en troisième position après les pommes de terre et les oignons. La production moyenne en 2017 est de 1.28 million tonnes avec un rendement moyen de 536 Qx/ha (FAO, 2019).

Une large extension des zones consacrées à la production de tomates a été enregistrée en raison de l'intérêt particulier des agriculteurs pour cette culture La superficie totale allouée à cette culture est de 23 400 hectares et sa répartition géographique dépend des conditions des conditions climatiques d'une part et de la vocation des terres d'autre part. Les régions consacrées aux tomates sont concentrées dans :

- Des plaines du littoral à climat modéré : Alger, Tipaza, Bejaia, Oran, Annaba, Skikda.
- Centre : Blida, Ain Defla, Chlef.

- Le Sud à climat aride (Biskra) : Dans ces zones, les investissements sont très importants en raison du climat qui permet d'avoir des récoltes entre décembre et avril avec des rendements qui peuvent atteindre jusqu'à 750 Qx/ha (Snoussi, 2010).

Le *Tableau II.7* suivant montre l'évolution de la production, les rendements et les superficies consacrées à la culture de la tomate en Algérie entre 2005 et 2017.

Tableau II.7 : *Evolution de la production de la tomate en frais en Algérie entre (2005-2017) (FAO, 2019).*

Année	Production (tonnes)	Surface cultivée (ha)	Rendement (Qx/ha)
2005	513780	21089	243625
2006	548934	20436	268611
2007	567313	20079	282540
2008	559249	19655	284533
2009	641034	20789	308352
2010	718235	21358	336284
2011	771606	20575	375021
2012	796963	21542	369958
2013	975075	22497	433424
2014	1065609	22646	470551
2015	1163766	24065	483593
2016	1280570	22556	567729
2017	1286286	23977	536467

II.4.4 Valeur nutritionnelle

La tomate est un produit qui contient des composés bénéfiques pour la santé et est très populaire en raison de son intérêt alimentaire et sa valeur nutritive. C'est une source de carotenoides (particulièrement le lycopene) et de l'acide ascorbique (vitamine C). Elle nous fournit également du fer, potassium, et quelque vitamine B. C'est une bonne source de fibres diététiques (*Tableau II.8*).

La valeur calorifique de la tomate est relativement faible, environ 20 calories pour 100 g, elle est pauvre en lipides et sans cholestérol. Elle contient environ 94% d'eau de sa matière fraîche cette grande quantité d'eau qu'elle contient la rend périssable. La tomate est riche en provitamine A (β-carotène) et vitamine C (Frusciante et al., 2007). En général la composition

chimique de la tomate dépend de la variété, de l'état de maturation, de la lumière, de la température, de la saison, du sol et de l'irrigation et (Blancard et al., 2009).

Tableau II.8 : *Valeur nutritionnelle de 100g de tomate (Grasselly et al., 2000).*

Composés (g)		**Minéraux (mg)**		**Vitamines (mg)**	
Eau	93,4-95,2	Ca	9,7-15	Provitamine A	0,5-0,8
Protides	0,9-1,1	K	202-300	B1	0,04-0,06
Lipides	Trace-0,3	Na	3-11	B2	0,02-0,05
Glucides	2,8-4,7	P	20-27	B6	0,08-0,1
Fibres	0,5-1,5	Fe	0,2-0,6	C	15-23
Minéraux	0,6	Mg	3-11	E	0,04-1,2

La tomate occupe une place importante dans l'alimentation humaine, se consomme fraiche ou transformée. Bien que ce soit un fruit sur le plan botanique, elle se consomme comme un légume, soit crue, soit en salade ou en apéritif (elle est souvent mélangée à d'autres ingrédients), soit en jus ou cuite et utilisée dans la préparation de nombreux plats cuisinés.

La tomate est alors transformée industriellement, à partir de produits frais, en conserves ou surgelés, sous forme de purée, du concentré, de condiment, de sauces et de plats préparés.

Les tomates font l'objet d'une industrie de transformation importante, qui offre au consommateur des tomates séchées, des tomates pelées en boîte, du coulis de tomate, du concentré de tomate, des sauces (ketchup) et une boisson, le jus de tomate. Les deux principales transformations industrielles de tomate sont la concentration et le séchage.

II.4.5 Tomates séchées

Les tomates sont souvent consommées fraîches sans cuisson ou cuites, vendues à des prix relativement bas ou laissées à l'abandon. Les statistiques actuelles indiquent des pertes pathogènes post-récolte allant de 20 à 25% dans les pays développés (EL-Ghaouth et al., 2004). Dans les pays en développement, les pertes sont supérieures à 35%. Par conséquent, il est important de sécher les tomates pour les conserver des dégâts et rester plus longtemps

L'utilisation de tomates séchées (*Figure II.14*) est devenue très populaire récemment. Les tomates séchées sont utilisées dans les salades, les pizzas, les soupes (tomate en poudre), les saules et d'autres plats. Compte tenu de son importance économique, il fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques et est considéré comme l'un des produits agricoles les plus commerciaux au monde.



Figure II.14 : *Tomates séchées.*

De nombreuses études ont montré que le traitement thermique des tomates (y compris le séchage) n'affectait pas de manière significative les niveaux de lycopène. De plus, le séchage préserve la qualité nutritionnelle, en particulier la teneur en lycopène, antioxydants, vitamine C et faible en sodium, lipides et calories (Dewanto, et al., 2002).

D'après Shi et Maguer (2000) et Hadley et al. (2002), le lycopène a des propriétés anticancéreuses, protégeant contre certains types de cancer (prostate, sein et peau), les maladies vasculaires (athérosclérose) et diminue le taux de cholestérol dans le sang.

II.5 LA FIGUE

II.5.1 Description de la figue

Le figuier, *Ficus Carica* est l'un des plus anciens arbres fruitiers cultivés par l'homme, largement cultivé dans tous les pays tropicaux et subtropicaux (Chawla et al., 2012) pour la haute valeur nutritive de ses fruits (*Figure II.15*). Cette espèce est présumée être originaire du Proche-Orient. Elle était en effet déjà cultivée au Sud-ouest et s'est propagée dans la région méditerranéenne. Les Carthaginois ont été les premiers à le répandre en Afrique du Nord. Les Romains, par la suite, étendirent considérablement son aire en le plantant sur tout le pourtour de la méditerranée (Padilla, 2003).

La figue n'est pas un vrai fruit mais c'est un faux-fruit un réceptacle charnu (le synconium), disponibles de fin juin à novembre. Elle abrite un grand nombre de petites graines (akènes). Lorsque la fécondation se fait, le réceptacle gonfle et les fleurs deviennent les petites graines qui forment le fruit (Haesslein et Oreiller, 2008).



Figure II.15 : *Figues fraiches.*

Le fruit mûri, a une peau dure de différentes couleurs (noir, pourpre, vert et vert jaunâtre). L'intérieur est une écorce blanche contenant une masse de graine liée avec la chair gélatineuse (Joseph et Justin, 2011).

Selon Haesslein et Oreiller, (2008), la figue est composée de :

- Une pellicule (peau ou épiderme) ;
- Une pulpe composée d'un réceptacle contenant les graines (akènes) ;
- Un ostiole (oeil ou opercule) ;
- Un pédoncule.

La *Figure II.16* représente les caractéristiques morphologiques de la figue:

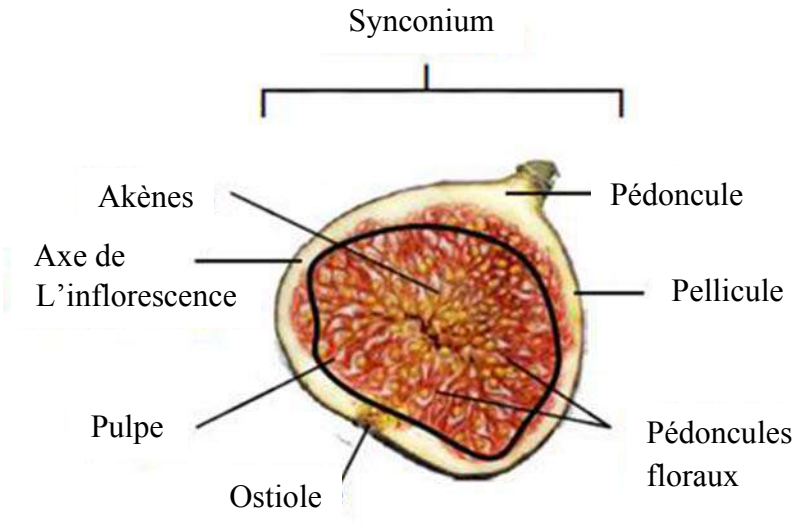


Figure II.16 : *Coupe longitudinale d'une figue (Haesslein et Oreiller, 2008).*

II.5.2 Variétés de figue

Plus de 700 variétés de figues comestibles sont identifiées à travers le monde (Hasselein et Oreiller, 2008). Les critères de classification (descripteurs) ont été bien définis par l'Institut international des ressources génétiques des plantes (IPGRI) en 2003, sur base des travaux d'Aksoy (1991). Selon l'IPGRI, 31 descripteurs au minimum sont considérés hautement discriminants (forme de la feuille et du fruit, nécessité de pollinisation, poids, couleur, hauteur et diamètre des fruits, largeur de l'ostiole, facilité d'épluchage, présence de craquelures sur la peau, etc.)

En Algérie, il existe un grand nombre de variétés avec beaucoup de synonymes d'appellation. Les plus courantes sont la figue noire, la figue verte et la figue violette. Toutes les trois ont leurs particularités (Haesslein et Oreiller, 2008) :

- La figue noire est sucrée et plutôt sèche ;
- La figue verte est juteuse et à la peau fine ;
- La figue violette est la plus sucrée, la plus juteuse, la plus fragile et la plus rare.

En 1850, plus de 70 variétés ont été introduite en Algérie, mais aucune n'avait été adoptée par les cultivateurs locaux qui se sont toujours tenus aux figuiers qui leur étaient familiers. 22 variétés de figuiers sont actuellement autorisées à la production et à la commercialisation par l'Etat (Chouaki et al., 2006).

II.5.3 Production de la figue

a) Production mondiale

Environ un million de tonnes de figues sont produites dans le monde chaque année. Cette production est largement basée sur la figue sèche, plus résistante et mieux conservable (*Tableau II.9*). Selon les statistiques du FAO en 2017, la Turquie assure plus de quart de la production mondiale. Plus de 75% de la production mondiale est assurée par les six premiers pays producteurs, dont la grande majorité de la production se limite dans l'espace méditerranéen (FAO, 2019).

Tableau II.9 : *Répartition de la production des figues dans le monde (FAO, 2019).*

Position	Région (Pays)	Production (T)	Superficies (ha)	Rendement (T/ha)
1	Turquie	315530	50330	6.074
2	Egypte	177135	28617	6.190
3	Maroc	137934	60533	2.279
4	Algérie	128684	40932	3.144
5	Iran	70730	54200	1.305
6	Syrie	43084	9491	4.539
7	Espagne	36380	13564	2.682
8	USA	28300	2510	10.927
/	Monde	1152799	315530	3.654

L'Algérie occupe la quatrième plus grande production mondiale. Elle représente environ 11% avec plus de 120 000 tonnes (*Figure II.17*) (FAO, 2019).

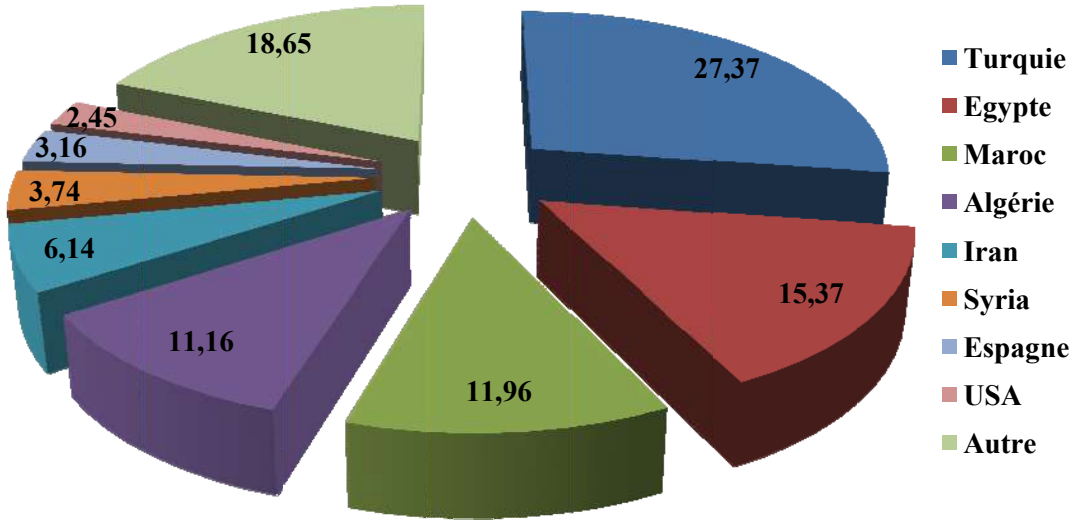


Figure II.17 : *Répartition de la production de la figue fraiche dans les grands pays.*

b) Production en Algérie

En Algérie, la production de figues est aussi importante que la production de la datte et des agrumes. Il existe deux espèces de figuier l'une sauvage, le caprifiguier, et l'autre cultivée. Le verger figuicole algérien occupe 40932 ha avec près de 5 millions d'arbres se maintient encore parmi les principales espèces fruitières du pays et constitue environ 6,9 % du patrimoine arboricole fruitier national (Chouaki et al., 2006. Ferradji et al., 2011). Le figuier se rencontre en petites plantations un peu partout au nord de l'Algérie, à Oran, aux environs de Mostaganem,

Mascara, à Constantine, mais 80% des arbres producteurs se trouvent en Kabylie; Tizi-Ouzou et Bejaia (Chouaki et al., 2006).

La production totale des figues, en Algérie, a été évoluée de 123763 jusqu'à 128684 (tonnes/an) entre les années 2010 et 2017 (*Tableau II.10*) (FAO, 2019), dont plus de 80 % est consommée à l'état frais, le reste de la production est soumis au séchage (Ferradji et al., 2011).

Tableau II.10 : *Production de figue (tonnes/an) dans le monde et l'Algérie (FAO, 2019).*

Année	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**
Algérie	123763	120187	110058	117100	128620	139137	120348	128684
Monde	1064810	1065480	1056475	1131412	1146321	1171340	1081405	1152799

II.5.4 Valeur nutritionnelle

Le fruit de figuier est largement consommé par l'Homme car, comparée aux autres fruits, il constitue une excellente source d'énergie, de vitamines (vitamine C, B1, B2, B5, PP) et de sels minéraux (calcium, potassium, phosphore et magnésium) (*Tableau II.11*). Les fibres alimentaires sont très abondantes dans la figue, puisqu'elles atteignent 2,3 g aux 100 g de figue fraîche et 8 g aux 100g de figue sèche (Oliveira et al., 2010. Solomon et al., 2006). A l'état frais, la figue renferme en moyenne 80 % d'eau et 13 % de sucres, après séchage les sucres dépassent les 53 % (El-Khaloui, 2010).

Il s'agit d'une composition moyenne donnée à titre indicatif : les valeurs sont à considérer comme des ordres de grandeur, susceptibles de varier selon les variétés, la saison, le degré de maturité, les conditions de culture, etc.

Consommée crue, la figue a un effet laxatif, diurétique, anti-inflamatoire, hypo-cholestérolémique, antidiabétique, anticancereuse et immuno-modulatrice (Chawla et al., 2012).

La transformation de la figue pour la production de produits à base de celle-ci, est considérée comme une initiative positive pour sa valorisation. Ces produits à base de figues sont beaucoup plus fabriqués artisanalement que par procède industriel, et parmi ces produits on a la figue sèche, la figue sèche fourrée ou enrobée de chocolat noir, les gâteaux à base de figues, le café de figue, le miel de figue, la confiture de figue, la pâte de figue et le vinaigre de figue.

Tableau II.11 : *Composition de la figue fraiche et sèche 100 g (CIQUAL et CNEVA, 1993).*

Constituants	Figue Fraiche	Figue sèche
Energie (kcal)	54,00	224,00
Eau (g)	79,50	25,00
Glucides (g)	13,00	53,00
Protéines (g)	0,90	3,20
Lipides (g)	0,20	1,20
Fibres alimentaires (g)	2,30	8,00
Vitamine C : acide ascorbique (mg)	5,00	1,00
Provitamine A : carotène (mg)	0,046	0,08
Vitamine B1 : thiamine (mg)	0,05	0,08
Vitamine B2 : riboflavine (mg)	0,05	0,09
Vitamine PP : riboflavine (mg)	0,46	0,80
Vitamine B5 : riboflavine (mg)	0,30	0,44
Vitamine B6 : riboflavine (mg)	0,11	0,22
Calcium (mg)	60,0	160,00
Potassium (mg)	232,0	770,00
Sodium (mg)	3,00	14,00
Phosphore (mg)	23,00	71,00
Magnésium (mg)	18,00	62,00
Fer (mg)	0,78	2,50

II.5.5 Figues séchées

Les figues sont des fruits fragiles qui ne se conservent pas longtemps (pas plus de 24 heures). De plus, l'utilisation des chambres froides est inefficace puisqu'elles détruisent leurs arômes. Cependant, la figue sèche (*Figure II.18*) peut se conserver plusieurs mois dans une boîte hermétique.

La transformation des figues par séchage et leur conservation est une pratique ancestrale. Les figues destinées au séchage doivent acquérir sur l'arbre une consistance pâteuse. La peau est non seulement fendillée, mais ridée et flétrie (sa teneur en eau est de 40 à 50 %).



Figure II.18 : *Figues sèches.*

En général, la plupart des variétés de figues sont bonnes pour le séchage, mais celles qui sont plus sucrées et à peau fine et blanche sont les plus appropriées (Oukabli, 2003).

La figue est essentiellement commercialisée sous forme sèche, seule une petite partie de la production est vendue fraîche durant l'été. On trouve la Turquie en première position dans le commerce des figues séchées suivi par les États-Unis et l'Iran. La Turquie, en tant que premier producteur mondial, fournit plus de la moitié des exportations en figues séchées (44821 tonnes).

Les figues sèches sont dépourvues de cholestérol et riches en acides aminés (Solomon et al., 2006) en sucres et en éléments minéraux (surtout le calcium). Ils sont bénéfiques pour l'équilibre alimentaire et la perte de poids.

II.6 LE POIVRON ROUGE

II.6.1 Description du poivron

Le poivron est le deuxième légume le plus consommé dans le monde (Guo et al., 2014). C'est une épice très appréciée pour son arôme. Le poivron (*Figure II.19*) est un terme souvent utilisé pour caractériser des variétés de piments doux de l'espèce Capsicum annuum à très gros fruits1 (parfois appelé piment au Québec). Sa couleur évolue au fur et à mesure de son mûrissement : il reste vert lorsqu'il est cueilli avant maturité. Laissés sur le plant, il deviendra jaune, puis rouge. Ils proviennent des régions tropicales et sont très sensibles aux basses températures, qui affectent leur développement végétatif (Guo et al., 2014).

La plante est cultivée comme plante potagère pour ses fruits consommés, crus ou cuits, comme légumes. Le terme désigne à la fois le fruit et la plante. Le poivron est une plante annuelle de la famille des Solanacées originaire d'Amérique central et d'Amérique du Sud. On trouve la totalité des espèces sauvages (environ 25) dans cette région. Les formes cultivées ont été domestiquées aux temps préhistorique (Pickersgill, 1997).

Le poivron est largement cultivé depuis le XVIII siècle, il a été déjà utilisé au Mexique 7000 à 50000 av. J.-C. Les graines de poivrons ont été amenées en Espagne pour la première fois en 1493, et se sont propagés vers l'Europe et l'Asie (Greenleaf, 1986).



Figure II.19 : *Poivrons crus.*

Le fruit est une baie d'un type particulier, la pulpe, relativement mince et formant une espèce de capsule entourant un placenta plus ou moins volumineux qui contient de nombreuses graines. Les graines sont petites, plates, réniformes, de couleur crème.

Extérieurement, la peau est lisse et brillante, de couleur vert brillante avant maturité, elle prend à maturité une couleur vive, en général rouge. Les principales molécules responsables de la coloration rouge du poivron sont les caroténoïdes dont le β-carotène, l'α-carotène, le cis-β-carotène (Hallmann et Rembiałkowska, 2012).

Les poivrons se distinguent des piments par des fruits plus gros et plus charnus, et surtout dépourvus de substance piquante (la capsaïcine).

II.6.2 Variétés du poivron

Le poivron est une espèce très polymorphe. Les variétés cultivées sont innombrables qui se présentent sous des formes, tailles, couleurs et saveurs différentes (Bernier et al., 2004) :

- Doux de Valence.
- Petit vert marseillais.
- Doux long des Landes.
- Piquant doux d'Algérie.
- Doux California Wonder.
- Petit carré de Nice.
- Le Pepper Mont Jolien.

II.6.3 Production du poivron

a) Production mondiale

La production mondiale de poivrons est estimée à 23,2 millions de tonnes (FAO, 2019). Le premier producteur mondial est la Chine avec 14 millions de tonnes, soit près de 50 % (*Tableau II.12*).

Tableau II.12 : *Principaux pays producteurs du poivron en 2007.*

Pays	Surface cultivée (Mha)	Rendement (q/ha)	Production (Mt)
Chine	0,603	191,3	14,033
Mexique	0,141	131,79	1,690
Indonésie	0,155	35,5	1,100
Turquie	/	/	1,090
Espagne	0,022	451,9	1,065
États-Unis	0,032	265,1	0,855
Nigeria	0,091	79,11	0,723
Égypte	0,026	148,8	0,475
Corée du Sud	0,077	49,7	0,345
Italie	0,014	251,2	0,252
Monde	**1,654**	**140,5**	**26,056**

b) Production en Algérie

Le *Tableau II.13*, révèle une augmentation de production du poivron en Algérie. Cette évolution de production serait la conséquence de l'augmentation de la superficie destinée à cette culture d'une part et d'autre part, à l'amélioration des différentes techniques culturales utilisées dans le secteur agricole.

Tableau II.13 : *Evolution de la production du poivron au niveau national.*

Années	Superficie (ha)	Production (tonnes)	Rendement (tonnes/ha)
2000	8580	97433	11,35
2005	11464	150643	13,14
2012	12216	245023	20,06

II.6.4 Valeur nutritionnelle

Le poivre est largement utilisé parce qu'il ne contient pas de cholestérol et qu'il contient peu de sodium et de calories (Luning et al., 1995). Composé à plus de 90% d'eau, le poivron contient peu de nutriments énergétiques. Son apport calorique reste par conséquent très modeste. Il est essentiellement dû à ses glucides, qui comprennent surtout du glucose et du fructose. Les protéines et les lipides ne sont présents qu'en très faibles quantités.

Le poivron constitue le légume frais le plus riche en vitamine C. Il apporte aussi de la vitamine A et des provitamines A, surtout lorsqu'il est bien mûr (rouge). Il constitue également une bonne source de vitamines de groupe B, notamment B6 et B9 et de la vitamine E.

Il renferme de nombreux minéraux : beaucoup du fer, du cuivre, du calcium, du potassium, du phosphore, du manganèse et du zinc. Sa chair et sa peau offrent des teneurs élevées en substances anti oxydantes : caroténoïdes et flavonoïdes.

Les poivrons rouges présentent quant à eux de bonne concentration en bêta-carotène et en bêta-cryptoxanthine, des composés précurseurs de vitamine A dans l'organisme. Il contient aussi du lycopène, un composé antioxydant (caroténoïde non provitaminique A). Ses fibres (celluloses et des hémicelluloses) sont relativement abondantes.

Les données présentes dans le tableau apportent une information sur l'apport nutritionnel pour 100 g net de poivron rouge cru.

Tableau II.14 : *Apports nutritionnels pour 100 g net de poivron rouge cru (CIQUAL, 2019).*

Nutriment					
Énergie (kcal)	27,1	Magnésium (mg)	12,0	Vitamine B1 (mg)	0,04
Protéines (g)	0,9	Phosphore (mg)	20,0	Vitamine B2 (mg)	0,03
Lipides (g)	0,3	Potassium (mg)	169,0	Vitamine B3 (mg)	0,09
Glucides (g)	5,2	Sodium (mg)	3,0	Vitamine B5 (mg)	0,1
Fibres (mg)	2,0	Bêta-Carotène (µg)	3480,0	Vitamine B6 (mg)	0,3
Calcium (mg)	9,0	Vitamine E (mg)	0,7	Vitamine B9 (µg)	22,0
Fer (mg)	0,4	Vitamine C (mg)	165,0		

Le poivron est bon pour la mémoire. Il contient une substance, la lutéoline, une flavone qui agit en activant des circuits neuronaux impliqués dans l'apprentissage (Tsai, 2007). Il est connu pour réduire le risque de maladies liées au mode de vie telles que l'arthrite, le cancer, le diabète (Lee et al., 1995. Eleyinmi et al., 2002. Donglin et Yasunori, 2003). Les capsiates sont

des substances chimiques dans le poivron qui peuvent provoquer la mort des cellules tumorales et ainsi permettre d'éviter le développement des tumeurs cancéreuses. Les capsiates sont très proches des capsinoïdes contenues dans le piment et elles ont le même effet. Il aide la digestion et protège des maladies cardio-vasculaires du fait de son action sur la formation du mauvais cholestérol (Gerard et François, 2009).

II.6.5 Poivrons séchés

Le poivron rouge est un ingrédient important dans l'industrie alimentaire où il est utilisé comme colorant et aromatisant dans la fabrication de sauces, soupes, cornichons, pizzas, etc. (Chuah et al., 2008).



Figure II.20 : *Poivrons séchés.*

Les poivrons sont de nature périssable et se détériorent quelques jours après la récolte, en particulier pendant la saison des pluies. Ces pertes sont encore aggravées par des problèmes de stockage, de commercialisation et par le manque de technologies de traitement appropriées (Kaushal et al., 2011). Ainsi, afin de minimiser les pertes et de fournir des rendements rémunérateurs aux producteurs, la transformation et la conservation du poivron constituent la seule alternative. La méthode de conservation principale pour tout fruit et légume est le séchage (*Figure II.20*), qui est réalisé soit par un séchage au soleil traditionnel, soit le séchage artificiel (Bareh et al., 2012). En outre, divers prétraitements avant le séchage, tels que le blanchiment, les traitements chimiques, à savoir. Du métabisulfite de sodium, de l'acide citrique, du chlorure de calcium, de l'acide ascorbique, une solution osmotique, etc. ont été suggérés pour obtenir des caractéristiques de meilleures qualités pour les piments (Doymaz et Pala, 2002. Wiriya et al., 2009). Par conséquent, la poudre de poivron rouge prétraitée et déshydratée chimiquement peut être facilement incorporée dans diverses recettes maison comme des sauces, des soupes, etc.

II.7 METHODES DES PRETRAITEMENTS AVANT LE SECHAGE

II.7.1 Blanchiment

Le blanchiment signifie un traitement thermique consistant à porter rapidement les légumes (quelques minutes) à 95-100 °C, puis à les refroidir rapidement pour éviter une cuisson excessive (Mafart, 1991). Le blanchiment est un prétraitement avant, séchage, est multiple :

- Elimination des enzymes susceptibles de modifier les légumes est la principale fonction du blanchiment. Il est nécessaire de prévenir l'activité enzymatique pour éviter la détérioration des légumes au cours de la transformation (brunissement, dénaturation de la flaveur ou de la texture).
- Désaération de légumes : les légumes contiennent de l'air ou du gaz présent dans les tissus. Les gaz (azote, oxygène) sont libérés lors du traitement thermique: ils peuvent conduire à une oxydation (Mafart, 1991) plus ou moins importante provoquant des colorations anormales ; pendant la cuisson du produit.
- Changement de la structure: le blanchiment permet de ramollir les légumes, de faciliter les opérations et les manipulations ultérieures et d'éliminer les faux goûts (Mafart, 1991).

II.7.2 Modes et méthodes de blanchiment

Le blanchiment en plongeant le produit dans un bain d'eau chaude, ou en le faisant passer dans la vapeur. Le blanchiment à l'eau est caractérisé par une grande souplesse dans le contrôle de la température (Mafart, 1991).

Les blancheurs à vapeur sont moins polluantes grâce à une meilleure rétention des constituants solubles. Enfin, la vapeur ne produit aucun effet de lavage, mais élimine moins efficacement les goûts irréguliers que l'eau (Mafart, 1991).

Refroidissement: Le mode de refroidissement le plus courant consiste à plonger le produit dans l'eau après le blanchiment. L'immersion peut être changée par une pulvérisation pour diminuer la consommation d'eau, diminuant ainsi le volume des effluents, mais peu de quantités absolues de matières organiques sont libérées

II.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre on a essayé de faire une présentation générale des fruits et légumes que nous avons étudiés lors de ce travail. Il s'agit principalement de l'abricot, la pomme de terre, la tomate, la figue et le poivron et montrer l'importance de leurs productions dans le monde et en particulier en Algérie. On a vu dans ce chapitre que ces produits sont consommés le plus souvent sous forme de produits frais sans cuisson ou cuits, sont aussi soumis aux processus de transformation tels que le séchage pour l'obtention d'autres produits. Par ailleurs, on a abordé la composition chimique des produits étudiés frais et séchés. Leur contenu en fibres, en antioxydants et en plusieurs autres nutriments (sucres, protéines, fibres, lipides**,** vitamines et minéraux) fait de ces produits des fruits et légumes particulièrement intéressants pour la santé. Une description générale de la méthode la plus couramment utilisée des prétraitements avant le séchage des fruits et des légumes (le blanchiment) a été présentée. En générale, on peut dire que les propriétés des aliments sont liées à la complexité de leur composition chimique qui évolue au cours du séchage et doit être bien maîtrisée.

Chapitre III
Modèle Physique, Formulation Mathématique et Résolution Numérique

III.1 INTRODUCTION

À la recherche d'un développement continu visant à optimiser les performances des séchoirs solaires, on se rend vite compte que le développement et les expérimentations ultérieures sur chaque conception avec un certain nombre de paramètres affectant de manière critique les performances sont une tâche qui nécessite du temps, de l'énergie et capitale. La dynamique des fluides numérique (CFD) a évolué pour devenir un outil très puissant pour modéliser et analyser numériquement des modèles physiques (Chouhan et al., 2015. Amanlou et Zomorodian, 2010). L'un de ses principaux avantages était de visualiser des scénarios hypothétiques et d'obtenir des informations détaillées dans le domaine informatique, contrairement aux expérimentations. La dynamique des fluides numérique est une branche de la mécanique des fluides qui utilise l'analyse numérique et des algorithmes pour résoudre et analyser des problèmes impliquant des écoulements de fluide. Avec les supercalculateurs à haute vitesse, de meilleures solutions peuvent être obtenues. Des recherches en cours produisent des logiciels qui améliorent la précision et la rapidité de scénarios de simulation complexes, tels que les écoulements turbulents.

Bien que l'utilisation de la CFD dans le domaine du séchage solaire favorise la compréhension de la dynamique et de la physique d'une opération de séchage des aliments et contribue ainsi à l'optimisation et à la conception d'équipements existants et nouveaux, des contraintes s'imposent pour obtenir un logiciel CFD plus rapide, plus facile et moins coûteux. En

ce nouveau millénaire, l'application de la CFD dans le domaine du séchage solaire a atteint un point critique, car il est de plus en plus clair que la croissance future de la CFD sera qualitative, quantitative et efficace au travail. Au cours des prochaines années, les chercheurs en séchage n'auront peut-être plus à s'inquiéter de problèmes non techniques, tels que la structure des mailles et la forme des cellules, en raison du développement de la génération entièrement automatisée de maille CFD (Aftosmis et al., 1997). Le taux d'avancement élevé de la puissance des ordinateurs et du développement de logiciels CFD transformera la conception et l'optimisation automatiques en réalité. Tous ces développements contribueront à faire de la CFD une discipline mature et un puissant outil d'ingénierie.

III.2 APPLICATION DE CFD AU SECHAGE SOLAIRE

Les séchoirs solaires sont disponibles dans une variété de modèles et de tailles en fonction de la capacité de séchage. Pour tester un séchoir, il est essentiel d'évaluer ses performances complètes avec les autres séchoirs. La dynamique des fluides numérique peut être utilisée pour l'analyse et l'investigation de la vitesse d'air, circulation d'air à l'intérieur du séchoir solaire, distribution de la température et de l'humidité. Le CFD est potentiellement un outil puissant pour la conception des sécheuses, permettant une meilleure manipulation et une meilleure compréhension du processus par rapport à l'expérimentation. Afin de minimiser les coûts et d'obtenir un meilleur temps de séchage à l'intérieur de la chambre de séchage, il serait intéressant d'étudier le séchage solaire en utilisant l'application CFD. Mathioulakis et al. (1998) ont construit un séchoir à claies pour le séchage des fruits. Le logiciel CFD FLUENT a été utilisé pour simuler le mouvement de l'air à l'intérieur de la chambre de séchage. Non-uniformité a également été observée dans certaines zones dans la chambre de séchage. La détermination des profils de pression, des vitesses de l'air et de la perte de poids des produits à différents niveaux dans le séchoir a permis de conclure que la principale cause des variations des vitesses de séchage et des teneurs en humidité était le manque d'homogénéité spatiale de la vitesse de l'air dans le séchoir.

Le logiciel FLUENT a été utilisé par Bartzanas et al. (2004) pour étudier l'effet de la disposition des ouvertures sur la ventilation de l'air d'un séchoir tunnel à effet de serre. Le modèle mathématique a été validé par rapport aux données expérimentales. Le modèle CFD a été utilisé pour étudier les conséquences de quatre configurations de ventilateurs différentes du système de ventilation naturelle. Il a été constaté que la configuration de la ventilation affecte la circulation d'air dans la serre et la distribution de la température de l'air. Chen et al. (2008) ont

exploité le logiciel CFD FLUENT pour la conception optimale de séchoir solaire intégrant une pompe à chaleur et l'effet bactéricide du photocatalyseur (TiO_2) utilisé pour le séchage des produits agroalimentaires. Les résultats ont montré que le séchoir peut fonctionner entre 40 et 45°C sans le chauffé, ce qui permet de maintenir la plage de température appropriée pour obtenir des produits agroalimentaires séchés de haute qualité. Il a été remarqué que la qualité des aliments séchés est également meilleure que celle séchée par séchage à l'air chaud conventionnel.

Un logiciel de dynamique des fluides numériques a été employé pour développer un modèle mathématique pour le processus de séchage des eaux usées dans un séchoir serre solaire à convection forcée par Krawczyk et Badyda (2011). Les résultats indiquent l'utilité de l'approche présentée dans le cadre des calculs de séchage solaire des boues. Une simulation numérique a été réalisée par Amjad et al. (2015) avec le logiciel de simulation d'écoulement Ansys-Fluent CFD utilisé pour prévoir la répartition de l'air dans le séchoir solaire utilisé pour sécher des tranches de pomme de terre ayant une épaisseur de 4 mm. Les données expérimentales et les résultats de l'étude numérique de l'écoulement d'air ont montré un bon accord en termes de coefficient de corrélation.

III.3 DESCRIPTION DU PROBLEME

III.3.1 Capteur à air

Nous allons considérer la simulation numérique du chanel bidimensionnelle. La géométrie du problème considéré est illustrée sur la *Figure III.1a*. Il s'agit d'une enceinte rectangulaire de longueur *L* et de hauteur *H*, qui est remplie d'une matière poreuse homogène et isotrope. La paroi verticale gauche du chanel est supposée soumise une température constante mais différente, tandis que la paroi verticale droite est considérée comme adiabatique et imperméable. L'air est supposé d'entrer de la surface inférieure et de sortir de la surface supérieure.

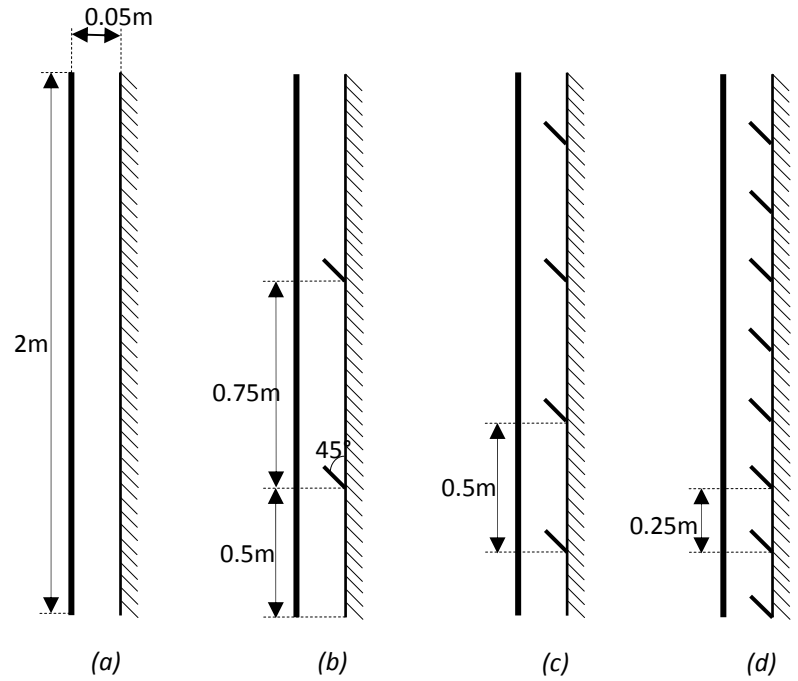


Figure III.1 : *Géométries avec différent nombre d'obstacles.*
(a) Géométrie sans obstacles, (b) Géométrie avec deux obstacles,
(c) Géométrie avec quatre obstacles, (d) Géométrie avec huit obstacles

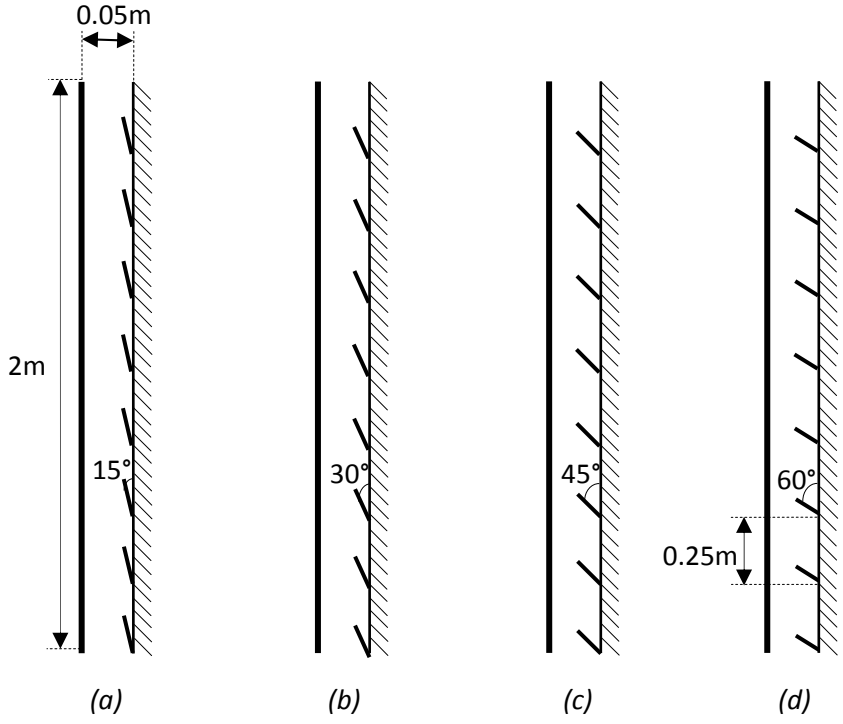


Figure III.2 : *Géométries avec 8 obstacles et différents angles d'inclinaison.*
(a) Angle d'obstacles 15°, (b) Angle d'obstacles 30°,
(c) Angle d'obstacles 45°, (d) Angle d'obstacles 60°.

III.3.2 Serre

La simulation numérique de la serre est considérée bidimensionnelle. La géométrie du problème considéré est illustrée sur la *Figure III.3*. Il s'agit d'une enceinte rectangulaire de longueur L et de hauteur H. L'enceinte contient trois chariots et chaque chariot contient n_c claies (sept au maximum) disposées avec un écart d_e et la claie inférieure est élevée du sol avec une hauteur h_c. Quarte géométries sont considérées:

- $n_c = 5$, $d_e = 30cm$ et $h_c = 20cm$.
- $n_c = 5$, $d_e = 25cm$ et $h_c = 35cm$.
- $n_c = 6$, $d_e = 20cm$ et $h_c = 35cm$.
- $n_c = 7$, $d_e = 15cm$ et $h_c = 35cm$.

La paroi verticale droite contient trois ouvertures, deux entrées et une sortie. Tandis que les parois, verticales gauches, supérieur et inferieur sont considérées comme adiabatiques et imperméables.

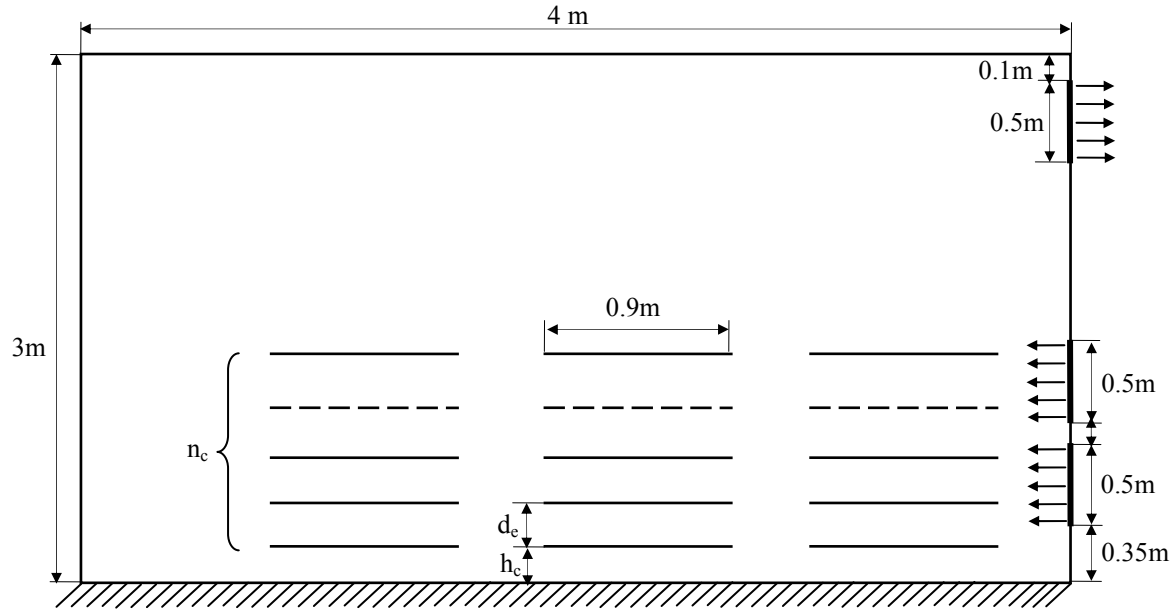


Figure III.3 : *Disposition des claies dans la serre.*

III.4 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Pour une formulation simple du modèle mathématique, nous considérons les approximations, les plus couramment employées dans type de problème, entre autres les approximations de Boussinesq.

Nous supposons alors que :

- Le fluide qui s'écoule est l'air.
- Le problème est bidimensionnel.
- L'écoulement engendré est turbulent.
- Il n'y a ni réaction chimique ni source de chaleur ou de masse.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.

III.5 MODELISATION MATHEMATIQUE

En tenant compte de toutes les hypothèses considérées, le système d'équations différentielles aux dérivées partielles décrivant ce problème est composé de l'équation de continuité, les équations de quantité de mouvement et les équations du transfert de chaleur. Les équations modélisantes s'écrivent alors sous les formes suivantes.

III.5.1 Equation de continuité

L'équation pour la conservation de la masse, ou l'équation de continuité, peut être écrite comme suit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \qquad \text{(III-1)}$$

III.5.2 Equation de mouvement

L'équation de mouvement peut être écrite comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\vec{u}) + \nabla(\rho \vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla(\tau) + \rho \vec{g} + \vec{F} \qquad \text{(III-2)}$$

Avec :
$$\tau = \mu\left[(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^{T}) - \frac{2}{3}\nabla \vec{u} I\right] \qquad \text{(III-3)}$$

Où :
- ρ : *masse volumique de fluide,*
- $\vec{v}$: *vecteur de vitesse,*
- τ : *tenseur des contraintes visqueuses,*
- μ : *viscosité dynamique,*
- P : *pression,*
- $\vec{F}$: *force de gravité,*
- I : *tenseur unitaire.*

III.5.3 Equation d'énergie

$$\nabla(\rho u T) = \nabla\left(\frac{\lambda}{C_p}\nabla T\right) + \Psi \qquad \text{(III-4)}$$

Où : ψ : dissipation visqueuse,

λ : *conductivité thermique,*

Cp : chaleur spécifique.

III.5.4 Modélisation de la turbulence

La modélisation et la simulation de la turbulence constituent l'un des défis majeurs de la solution numérique des problèmes d'écoulement de fluide. Même si on pense que les équations de Navier-Stokes sont capables de décrire en détail les écoulements turbulents, avec les ressources du calcul actuelles, il est tout simplement impossible de disposer de simulations permettant d'obtenir tous les détails d'un écoulement turbulent. La difficulté provient du fait que les écoulements turbulents sont par nature violemment instables. Par conséquent, une étude informatique est limitée à une discrétisation extrêmement petite de l'espace et du temps, ce qui dépasse la puissance du calcul actuelle.

Aujourd'hui, des dizaines de modèles de turbulence différents sont utilisés et présentent une grande complexité. Bien que certains d'entre eux soient nettement supérieurs aux autres en raison de la physique qu'ils impliquent, aucun d'entre eux ne peut malheureusement prédire tous les types de flux turbulents avec plus de précision et d'efficacité que les autres. Ils contiennent tous des constantes empiriques, qui sont des nombres ajustés de sorte que les résultats numériques correspondent mieux aux résultats expérimentaux ou analytiques connus.

Le modèle k-**ε** standard d'ANSYS FLUENT fait partie des modèles de turbulence les plus à deux équations cette catégorie de modèles et est devenu le plus utilisé depuis qu'il a été proposé par Launder et Spalding (1972). Robustesse, économie et précision raisonnable pour une large gamme d'écoulements turbulents expliquent sa popularité dans les simulations d'écoulement industriel et de transfert de chaleur. Les équations régissant l'énergie cinétique turbulente et son taux de dissipation sont données comme suit:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \qquad \text{(III-5)}$$

et

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad \text{(III-6)}$$

Où le terme G_k représente la génération de l'énergie cinétique turbulente due aux gradients de vitesse, G_b est la génération d'énergie cinétique de turbulence due au buoyancy, Y_M représente la contribution de la dilatation de fluctuation dans la turbulence compressible au taux global de dissipation, c'est l'effet de la compressibilité. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ sont des constantes, σ_k et σ_ε sont les nombres de prandtl turbulent de k et ε.

III.5.5 Condition aux limites

La résolution numérique du modèle mathématique adopté est conditionnée par les conditions initiales et les conditions aux limites appliquées aux frontières du domaine. Le fluide dans le capteur air plan est initialement au repos et à une température uniforme égale à la température ambiante.

A. Capteur à air

Les différentes conditions appliquées dans notre étude sont illustrées dans la *Figure III.1* et la *Figure III.2*.

a) Conditions initiales

a. t= 0 ; U = V = 0 et T = 288k.

b) Conditions aux limites

a. Y=0, ∀ X : U=3m/s ; V=0 ; T=288k.

b. Y=2m, ∀ X : $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$; $\frac{\partial U}{\partial y} = 0$; $\frac{\partial U}{\partial y} = 0$.

c. X=0, Y : T=343k ; $U = 0$; $V = 0$.

d. X=0.05m, ∀ Y : $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$; U = V = 0.

B. Serre

Les différentes conditions appliquées dans notre étude sont illustrées dans la *Figure III.3*.

a) Conditions initiales

a. t = 0 ; u = v = 0 et T = 288k.

b) Conditions aux limites

a. Y = 0, ∀ X : $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$; U = V = 0.

b. Y= 3m, ∀ X : $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$; U = V = 0.

c. X = 0, ∀ Y : $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$; U = V = 0.

d. X = 4 m :

- 0.35m ≤ Y ≤ 0.85m et 0.95m ≤ Y ≤ 1.45m : T=323k ; U =U_0 ; V = 0.
- 2.4m ≤ Y ≤ 2.9m : T=323k ; U =-2U_0 ; V = 0.
- 0 ≤ Y ≤ 0.35m, 0.85m ≤ Y ≤ 0.95m, 1.45m ≤ Y ≤ 2.4m, 2.9m ≤ Y ≤ 3m

  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$; U = V = 0.

III.6 RESOLUTION NUMERIQUE

Au cours de ces dernières années, nous assistons à une augmentation fulgurante de la performance des ordinateurs, qui a permis l'utilisation de méthodes numériques de plus en plus performantes et efficaces pour la résolution de systèmes d'équations différentielles non linéaires.

Depuis les 20 dernières années, nous vivons aussi une révolution qui a bouleversé notre vie de tous les jours. Bien entendu, il s'agit d'une révolution informatique. Les ordinateurs ont envahi les bureaux des chercheurs et aussi les foyers. Les ordinateurs sont, chaque jour, de plus en plus rapides et, aujourd'hui, à la veille du troisième millénaire, nous commençons à pouvoir résoudre des problèmes de transfert et de transport en 2D et 3D.

Ainsi, des codes commerciaux ont fait leur apparition sur le marché et ils sont actuellement employés par les grands groupes industriels pour simuler le comportement réel de leurs installations industrielles.

III.6.1 Présentation générale

En vue du passage d'un problème exact (continu) au problème approché (discret), on dispose de plusieurs techniques concurrentes et complémentaires : les différences finies, les éléments finis et les volumes finis. Chacune de ces trois méthodes correspond à une formulation différente des équations de la physique :

- équilibre des forces en chaque point pour les différences finies,
- minimisation de l'énergie ou principe des travaux virtuels pour les éléments finis,
- loi de conservation et calcul des flux pour la méthode des volumes finis.

a) Différences finies

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans le problème continu par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage. Elle représente l'avantage d'un faible coût de calcul et une grande simplicité d'écriture. Cependant ; elle a l'inconvénient d'une limitation de la géométrie des domaines de calcul, des difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue et en général l'absence de résultats de majoration d'erreurs.

b) Eléments finis

La méthode des éléments finis consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle (comme minimisation de l'énergie, en général) dans un espace de dimension infinie. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points (les nœuds du maillage).

Au contraire de la méthode précédente ; le traitement possible de géométries complexes est possible avec cette méthode, la détermination des conditions aux limites est plus naturelle, en plus de la possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs. D'autre part ; sa mise en œuvre est complexe et son coût en temps de calcul est élevé.

c) Volumes finis

La méthode des volumes finis intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle des approximations discrètes conservatives et elle est donc particulièrement bien adaptées aux équations de la mécanique des fluides : équation de conservation de la masse, équation de conservation de la quantité de mouvement et équation de conservation de l'énergie. Sa mise en œuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles (ou des parallélépipèdes rectangles en trois dimensions). Cependant, la méthode des volumes finis permet d'utiliser des volumes élémentaires de forme quelconque, donc de traiter des géométries complexes, ce qui est un avantage sur les différences finies.

Il existe une grande variété de méthodes selon le choix de la géométrie des volumes élémentaires et des formules de calcul des flux. Par contre, on dispose de peu de résultats théoriques de convergence.

Dans ce travail, nous avons choisi, d'employer la méthode des volumes finis intègre pour ses avantages.

III.6.2 Méthode des volumes finis

a) Présentation

Une grande majorité des codes commerciaux, actuellement disponible, résolvent les équations de conservation en variable primitives en emploient la méthode des volumes finis. Dans cette méthode, le domaine considéré est divisé en volumes finis, un seul volume entoure un nœud du maillage. Les équations de conservation sont intégrées sur chaque volume fini. La variation d'une grandeur ϕ entre le centre de deux volumes finis adjacents peut être linéaire, quadratique, ou constante dans chaque volume fini. Cette méthode a quelques points de similitude avec la méthode des différences finies tels que : les discrétisations, les méthodes de résolution des systèmes linéaires tridiagonaux, les notions de stabilité et de consistance ainsi que le traitement particulier des conditions aux limites.

La méthode de volumes finis, les algorithmes de résolution des équations de transport en variables primitives, le schéma Upwind pour la discrétisation des termes d'advection sont quelques idées qui ont été popularisées par Patankar (1980), qui est une référence incontournable dans ce domaine. Dans ce chapitre, la méthode des volumes finis et son utilisation pour résoudre des problèmes de transport est expliquée ainsi que l'algorithme SIMPLER utilisé pour résoudre les équations en variables primitives.

b) Principe

La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations de conservation des différentes grandeurs physiques ayant la forme générale :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + div\left(\rho\vec{U}\right) = div\left(\Gamma_\Phi \overrightarrow{grad\Phi}\right) + S_\Phi \qquad \text{(III-9)}$$

À l'intérieur de petits éléments de volumes, en veillant à ce que le flux d'une grandeur à travers un élément de surface soit le même pour les deux volumes adjacents. Les équations sont mises sous forme linéaire de façon à être résolues par une méthode matricielle.

Si on appelle *P* le point considéré, les points adjacents sont les points est *E*, ouest *W*, sud *S* et nord *N*. Les faces du volume sont dénommées de la même façon *e*, *w*, *s* et *n* (*Figure III.4*).

Une des particularités de cette méthode est d'utiliser des maillages décalés *(staggered grid)* suivant les grandeurs considérées (*Figure III.5*).

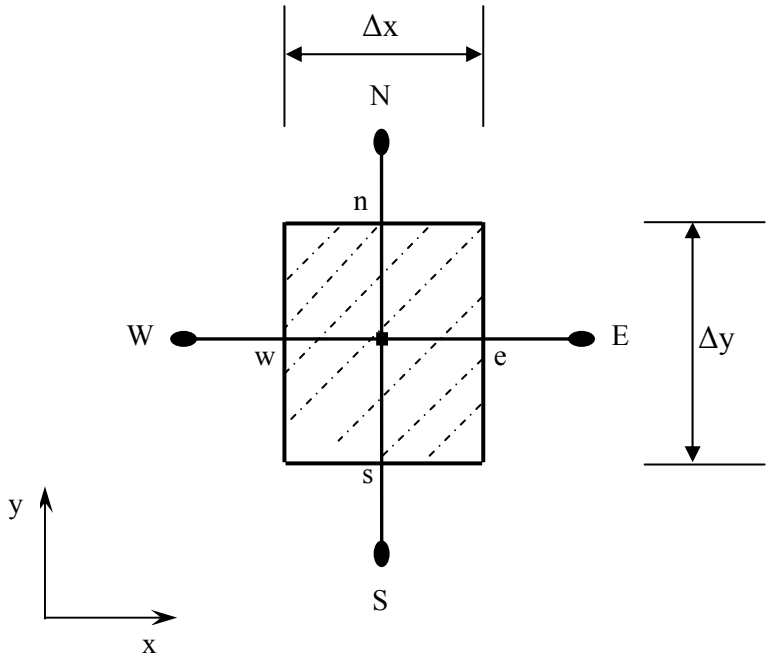


Figure III.4 : *Volume fini typique.*

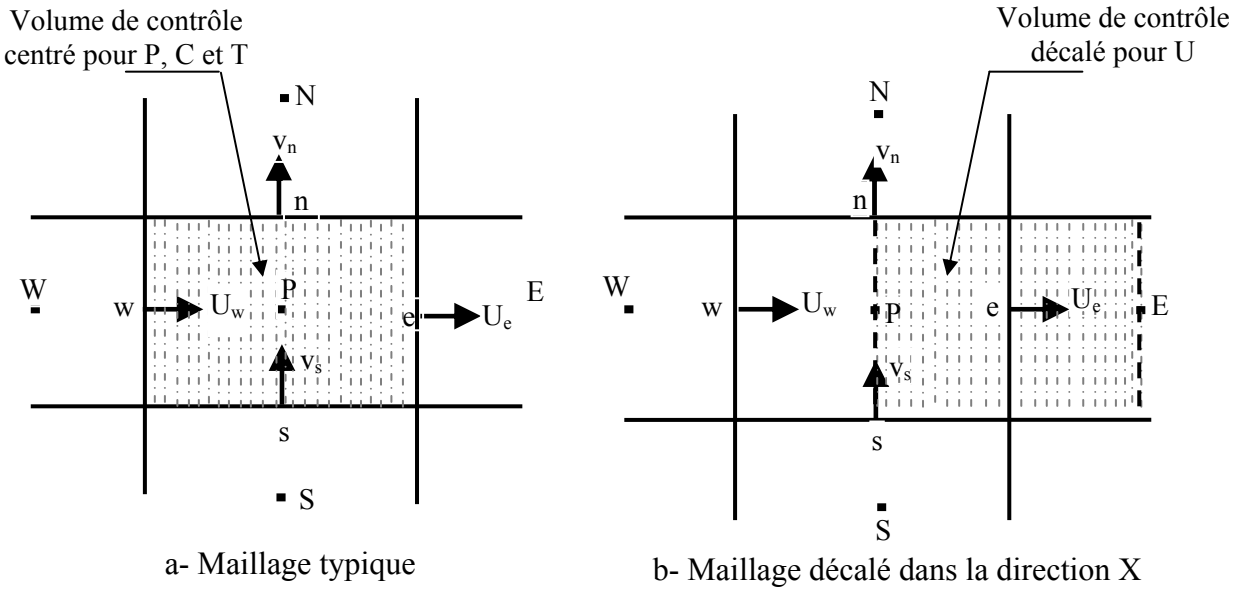


Figure III.5 : *Volumes de contrôle typique et décalé.*

La pression et la température sont calculées en considérant un volume de contrôle centré autour du point *P,* donc entre les faces *e,* w, *s* et *n* en bidimensionnel (*Figure III.6*). Les vitesses sont évaluées dans un volume centré sur une face du volume précédent, par exemple pour la vitesse horizontale U sur la face est entre deux faces passant par les points *P* et *E* et entre les faces sud et nord.

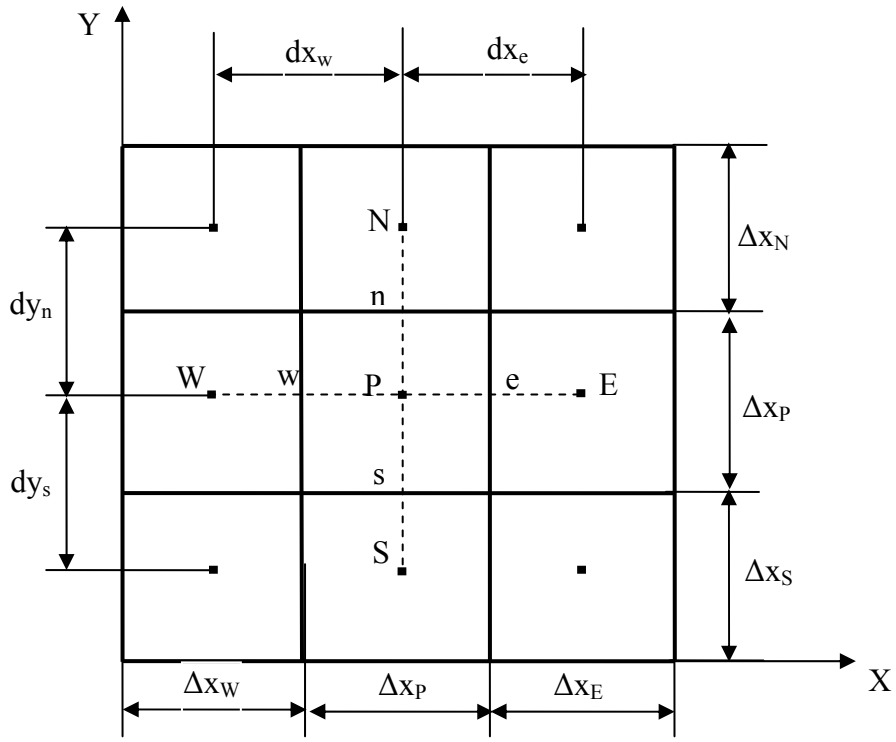


Figure III.6 : *Maillage typique uniforme suivant X et suivant Y.*

Physiquement, la température et la pression sont des grandeurs scalaires plus facilement calculables en un point (supposé représentatif du volume), tandis que la vitesse est plutôt liée à un flux (que l'on considérera constant) à travers une surface. Vues les hypothèses effectuées (grandeurs et flux constants), il conviendra de prendre des maillages suffisamment petits de façon à ce que les moyennes effectuées soient représentatives.

III.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre on a essayé de faire une présentation générale des études numériques de séchage solaire utilisant les logiciels CFD. Le problème étudié numériquement a été défini avec les conditions initiales et aux limites. Les équations utilisées par le logiciel Ansys utilisé dans la simulation et les méthodes de discrétisation ont été présentées.

Chapitre IV
Matériels et Méthodes

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on va sécher la tomate, l'abricot, la pomme de terre, la figue et le poivron rouge par un séchoir solaire mixte conçu à l'UDES. Ce chapitre rapporte aux expériences suivantes :

- Séchage solaire de la tomate, l'abricot, la pomme de terre, la figue et le poivron rouge on utilisant un séchoir solaire mixte.
- Modélisation pour trouver le modèle qui correspond le mieux aux données expérimentales.
- Détermination de la diffusion effective et l'énergie d'activation.
- Détermination des paramètres thermodynamique.

IV.2 PROCEDURE EXPERIMENTALE

IV.2.1 Matériel végétal

Notre étude porte sur cinq produits représentés par: tomate, pomme de terre, abricot, figue et poivron rouge, ont été achetés du marché locale à Bou-Ismail. Les de tomates ont été coupés sous deux formes différentes, à savoir des quartiers et des tranches plates. Dans le cas des tranches plates, il y avait quatre épaisseurs différentes, 0.5, 1, 1.5, 2 cm. Pour le cas quartiers, les tomates ont été coupées en 2, 4, 8 et 16 quartiers égales.

L'abricot a été séché sans noyau de quatre manières différentes. Dans le premier cas, l'abricot entier a été séché sans prétraitement. Dans le second cas, il a été séché après avoir été divisé en deux. Ensuite, dans le troisième cas, l'abricot entier était séché après avoir été cuit à la vapeur et trempé dans de l'eau froide, et dans le quatrième cas il a été bouilli, trempé dans de l'eau froide et puis séché. En ce qui concerne la pomme de terre, elle a été coupée en tranches plates d'une épaisseur de 0,5 cm. Le *Tableau IV.1* donne les détails des produits avant séchage. Les pommes de terre en tranches ont été placées sur des plateaux grillagés dans le séchoir solaire

mixte. Les figues achetées sont lavées à l'eau du robinet puis réparties de manière uniforme sur les claies de séchage. La même procédure a été appliquée sur le poivron. Le choix des cinq produits a été orienté par leur relative abondance, l'excès de production, la plus-value de leur transformation et l'amélioration des revenus dans la filière agro-alimentaire.

Tableau IV.1 : *Données des produits.*

	Tomate	**Abricot**	**Pomme de terre**	**Figue**	**Poivron rouge**
Poids acheté	10kg	10kg	1 kg	6kg	2kg
Poids dans chaque claie	1.950kg	8.020kg	0.825 kg	6kg	2kg
Variante	KAWA	Bulida	Spunta	Abicou et Dorée	/
Prix de 1kg	15DA	20DA	40DA	60DA	35DA

IV.2.2 Séchoir solaire mixte

Cette étude a été réalisée à l'aide d'un séchoir solaire mixte. Le séchoir mixte a été conçu et fabriqués dans l'UDES dans le cadre d'un projet de recherche utilisant des matériaux locaux (les matériaux utilisés sont courants et peu coûteux).

a) Description du séchoir solaire mixte

Le séchoir solaire mixte est composé de deux parties principales, une serre et un capteur solaire (*Figure IV.2*).



Figure IV.1 : *Séchoir solaire mixte.*

b) La serre

La serre est composée de six parois (*Figure IV.2* et *Figure IV.3*). Le mur supérieur en polycarbonate incliné à la latitude de la ville de Bou-Ismail (36°). Les parois avant, droit et gauche sont également en polycarbonate pour un passage maximal du rayonnement. La face interne de la paroi arrière est recouverte d'une plaque d'aluminium peinte en noir pour assurer l'absorption des rayons solaires qui traversent le polycarbonate et ainsi provoquer l'effet de serre dans la chambre de séchage. La paroi arrière est isolée thermiquement avec du polystyrène de 5 mm d'épaisseur afin de minimiser les pertes de chaleur vers l'extérieur pendant le processus de séchage. La paroi droite a une porte permettant l'accès à la serre et le dépôt des chariots contenant les claies contenant le produit à sécher.

La paroi droite a également trois ouvertures pour l'entrée d'air. Deux d'entre elles ont été utilisées pour connecter le capteur solaire thermique à la serre. En ce qui concerne l'évacuation de l'air humide, un ventilateur est placé en haut du mur droit pour faciliter l'opération, avec deux ouvertures en haut du mur supérieur. Le séchoir solaire est composé de neuf chariots répartis en trois rangées. Un chariot peut au moins porter 6 plateaux avec un espace de 20 cm entre chacun des deux plateaux.

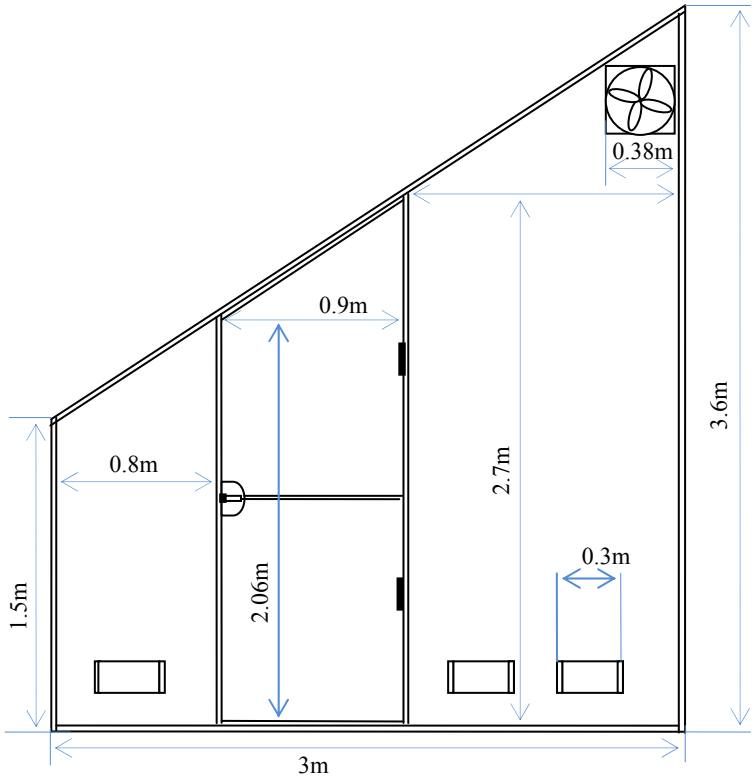


Figure IV.2 : *Spécifications de la face droite du séchoir.*

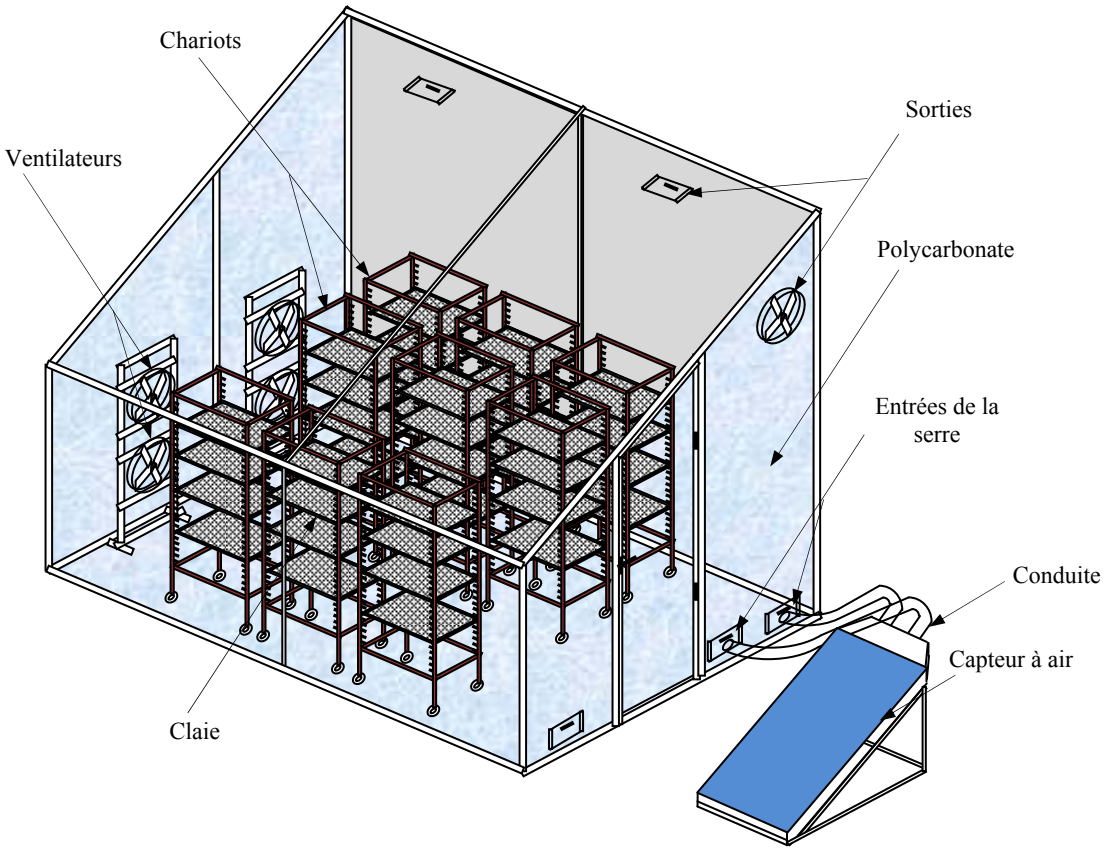


Figure IV.3 : *Schéma du séchoir solaire mixte.*

Tableau IV.2 : *Caractéristiques du séchoir solaire mixte.*

Composant	**Nombre**	**Spécification**
Volume de serre	1	$30.6 m^3$
Dimensions des chariots	9	Longueur :1.1 m Largeur : 0.65 m Hauteur : 1.5 m
Surface des claies	45	Surface : 0.65 m^2
Surface du collecteur	1	1.82 m^2 T_{max}=77 °C Equipé de chicanes
Ventilateurs (débit) (utilisé pour le collecteur)	2	0.0225 $m^3 s^{-1}$
Ventilateurs de circulation d'air et d'extraction d'humidité (débit)	5	0.19 $m^3 s^{-1}$

c) Capteur solaire thermique

Les dimensions du capteur solaire à air sont de 1.84 × 0.90 m, il comprend un passage d'air sous l'absorbeur, qui est une tôle peinte en noir. La couverture est un vitrage de 0.004 m d'épaisseur. Une couche de mousse de polystyrène de 0.04 m d'épaisseur assure l'isolation du capteur solaire à air.

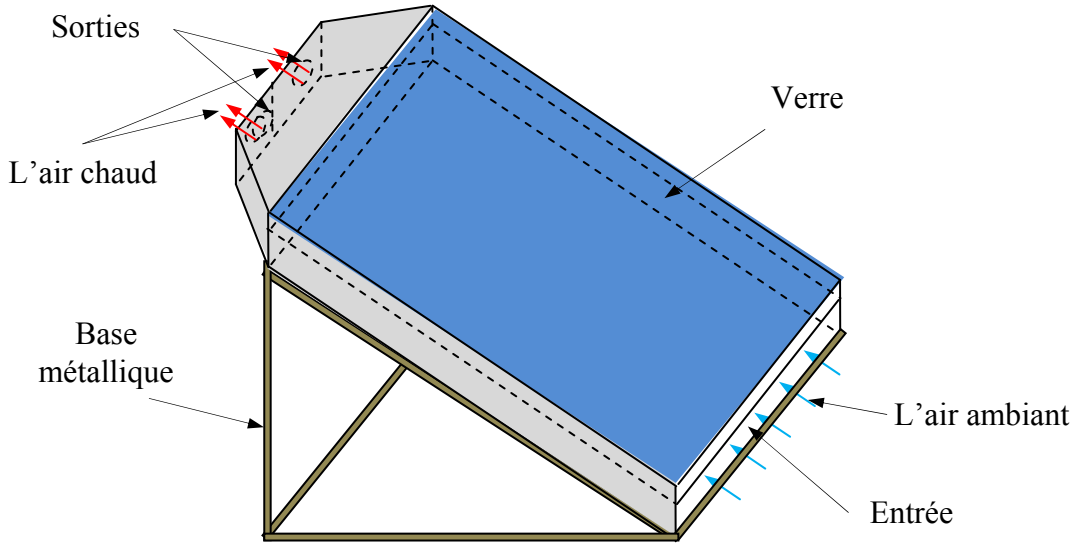


Figure IV.4 : *Schéma du capteur solaire à air.*

IV.2.3 Processus

Le rayonnement solaire pénètre à l'intérieur de la serre à travers la couverture transparente en polycarbonate. La paroi arrière de couleur sombre absorbe l'énergie du rayonnement solaire, générant ainsi de la chaleur à l'intérieur de la serre. Aussi, un capteur solaire à air est connecté à la serre pour fournir de la chaleur supplémentaire au processus de séchage. Le capteur solaire est utilisé pour chauffer l'air ambiant et augmenter l'efficacité de système. L'air sortent du capteur entre dans la serre à l'aide des deux ventilateurs. L'air chaud passe par les claies des produits pour extraire l'humidité et ensuite l'évacuer via les ouvertures de la sortie, transportant l'humidité libérée à l'extérieur.

IV.2.4 Collection de données

La durée du processus de séchage dépend du type de produit à sécher. L'opération est considérée comme terminée lorsque plus aucune perte de poids n'est détectée. Une balance RADWAG est utilisée pour peser le produit, avec une précision de ± 0,0005 kg pour surveiller le

processus de séchage en enregistrant la perte de poids d'eau dans le produit en fonction du temps écoulé ; à savoir, la balance indique un poids constant.

Le rayonnement global reçu sur le collecteur est mesuré pendant la journée de l'expérience. Le rayonnement incliné chaque heure ou chaque jour est mesuré à l'aide du pyranomètre Kipp & Zonen (*Tableau IV.3*). La température est mesurée à l'aide de thermocouples de type K de diamètre D = 0,001 m et d'une précision de 0.5 °C. Tous les thermocouples ont été connectés à un enregistreur de données (unité d'acquisition/enregistreur de données Keysight 34972A LXI) qui envoie les données à l'ordinateur d'acquisition de données.

Tableau IV.3 : *Spécifications des instruments de mesure.*

Appareil	**Range**	**Précision**	**Utilisation**
K-type thermocouples	-250 to 482°C	0.5 °C	Température
Kipp & Zonen pyranomètre	4000 w/m^2	0.1 w/m^2	Radiation
RADWAG Balance with digital display	25kg	0.5 g	Mesure de la masse
Keysight 34972A LXI Data acquisition/Switch unit.	/	/	L'acquisition des données

La *Figure IV.5* résume l'instrumentation utilisée et le processus de collection des données.

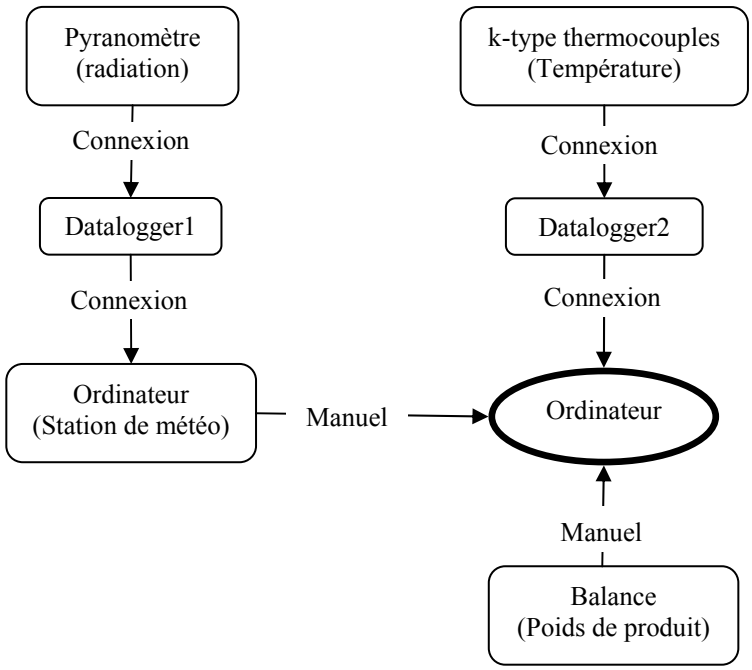


Figure IV.5 : *Schéma de l'instrumentation utilisée.*

IV.2.5 Mode opératoire

Le séchage a été effectué à Bouis mail, l'expérience a commencé à 9h. La durée de l'opération sera conditionnée par le produit à sécher. Après le prétraitement, les produits ont été placés sur un plateau métallique dans le séchoir solaire mixte. Les produits ont été répartis sur le plateau de séchage de manière à laisser passer l'air.

Afin de surveiller le processus de séchage, les produits ont été soigneusement pesés au cours de l'opération de séchage. Le poids du produit a été mesuré manuellement dans la serre à l'aide d'une balance RADWAG, avec une précision de 0.5 g.

Pour suivre l'évolution de la température en différents lieux du séchoir solaire, on a mis vingt thermocouples de type K. l'entrée de la serre pour mesurer la température de l'air chaud provenant du capteur solaire, d'autres thermocouples sur les claies contenant les produits agricoles, le deuxième au-dessus de la claie, le troisième pour la température ambiante à l'extérieur du séchoir et d'autres thermocouples sur les claies contenant les produits agricoles.

IV.3 CINETIQUE DE SECHAGE

En raison de la grande diversité des produits alimentaires, l'analyse de la cinétique de séchage est le meilleur moyen de décrire le comportement d'un produit alimentaire au cours du processus de séchage. En général, les résultats expérimentaux d'une analyse de cinétique sont présentés sous forme de courbes exprimant l'évolution de la vitesse du processus de séchage en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales, telles que la température, l'hygrométrie et la vitesse de l'air.

Dans le cas des produits utilisés, leur teneur en humidité a été calculée sur la base de leur poids sec. Pour mesurer la matière sèche, des échantillons de tranches des produits de 20 g ont été prélevés sur les produits séchés dans le séchoir solaire mixte. Ensuite, ils ont été placés dans des béchers et séchés au four à 105 °C pendant 24 heures. Après cela, ils ont été placés dans un dessiccateur. Les béchers ont ensuite été pesés et la masse sèche (DM) a été calculée à l'aide de l'équation (IV-1).

La matière sèche DM est définie comme :

$$DM = \frac{m_d \times m_f}{m_0} \qquad \text{(IV-1)}$$

Où m_f est calculé en utilisant l'équation ci-dessous :

$$m_f = m_{fb} - m_b \quad \text{(IV-2)}$$

Où la teneur en humidité M_t est définie comme suite :

$$M_t = \frac{WM-DM}{DM} \quad \text{(IV-3)}$$

Où : WM : matière humide.

La teneur en eau des échantillons au temps t a été transformée en rapport d'humidité (MR). Ce dernier est calculé à l'aide de l'équation ci-dessous (Ameri et al., 2018) :

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \approx \frac{M_t}{M_0} \quad \text{(IV-4)}$$

Où : MR : rapport d'humidité,

M_{eq} : teneur en d'humidité d'équilibre,

M_0 : teneur en humidité initiale.

M_{eq} est très petit et négligeable comparé à M_t et M_0.

IV.3.1 Modélisation de la cinétique de séchage

Plusieurs modèles ont été utilisés pour décrire la cinétique du processus de séchage et pour prédire le rapport d'humidité MR en fonction du temps de séchage. Les résultats expérimentaux du séchage des produits ont été utilisés pour valider les modèles théoriques dans le but d'identifier celui qui correspond le mieux aux données. À cette fin, cinq modèles ont été sélectionnés dans la littérature pour leur bon accord avec les données expérimentales. Le modèle Midilli s'est avéré adéquat pour prédire le comportement des tomates en matière de séchage, selon Boughali et al. (2009) et Lahnine et al. (2016). En ce qui concerne le modèle Two Term, Yaldiz et al. (2001) et Lahsasni et al. (2004) ont conclu que le modèle correspond le mieux aux données expérimentales du processus de séchage des raisins Sultana et des figues de Barbarie. Le modèle Page s'accordait remarquablement bien avec les courbes de séchage du thymus (El-Sebaii et Shalaby, 2012), des tranches de mangue crues (Goyal et al., 2006) et des piments (Tunde-Akintunde, 2011). Le modèle logarithmique a décrit de manière satisfaisante les caractéristiques de séchage des tranches de citrouille (Doymaz, 2007), des longs poivrons verts (Akpinar et Bicer, 2008) et des abricots (Toğrul et Pehlivan, 2002). Koua et al. (2009) ont constaté que les courbes de séchage des bananes, mangues et manioc correspondent bien au modèle de Henderson et Pabis.

Contrairement aux modèles de la littérature, les deux nouveaux modèles sans dimension proposés sont universels, indépendants des unités de mesure et vérifient les conditions aux limites, selon l'équation (IV-6) comme suit :

$$\frac{M_\infty - M}{M_\infty - M_0} = f\left(\frac{t_\infty - t}{t_\infty - t_0}\right) \quad \text{(IV-5)}$$

$$M_\infty = \lim_{t \to t_\infty} M,\ M_0 = \lim_{t \to t_0} M \quad \text{(IV-6)}$$

Après simplifications : $MR = f(\tau)$ (IV-7)

Avec : $MR = \frac{M_\infty - M}{M_\infty - M_0}$ et $\tau = \frac{t}{t_\infty}$ (IV-8)

Les Tableaux IV.4 et 5 récapitulent les nouveaux modèles proposés et les cinq modèles mathématiques sélectionnés de la littérature.

Tableau IV.4 : *Nouveaux modèles mathématiques proposés.*

Modèle	Expression du Modèle
Nouveau model 1	$MR\ (\tau) = \frac{1 + A\tau^n \exp\ (-A_1\tau^n)}{[1 + A\tau^m \exp\ (-A_2\tau^m]^p}$
Nouveau model 2	$MR\ (\tau) = \frac{1 + A\tau^n \ln\ (1 + A_1\tau^n)}{[1 + A\tau^m \ln\ (1 + A_2\tau^m]^p}$

Tableau IV.5 : *Cinq modèles mathématiques de séchage cités par la littérature.*

	Modèle	Expression du Modèle	Références
1	Page	$MR(t)=\exp(-kt^n)$	Page, 1949
2	Logarithmique	$MR\ (t)= A_1\exp(-kt)+A_2$	Sacilik et Elicin, 2006
3	Midilli-Kucuk	$MR(t)= A_1\exp(-kt^n)+A_2t$	Midilli, 2002
4	Henderson and Pabis	$MR(t)= A\exp(-kt)$	Henderson et Pabis, 1961
5	Two term	$MR(t)= A_1\exp(-k_1 t)+A_2\exp(-k_2t)$	Madamba et Driscoll, 1996

Les données expérimentales ont été ajustées aux modèles en utilisant le logiciel Origin. Les constantes des modèles, les coefficients de corrélation et le khi-carré ont été calculés par le logiciel Origin. Les constantes du modèle dépendent de la distribution des points de mesure MR en fonction du temps. Les contraintes sont les valeurs initiales entrées dans le logiciel pour adapter le modèle aux données expérimentales.

Pour sélectionner le modèle mathématique qui correspond le mieux aux données expérimentales du séchage des produits agroalimentaires, les sept modèles ont été évalués à l'aide de paramètres statistiques (Badaoui et al., 2019). Le modèle le plus approprié a été sélectionné, selon les critères suivants :

- Coefficient de corrélation r^2

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^{j}\left(MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp,i}\right)^2} \quad \text{(IV-9)}$$

- Khi-carré χ^2

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{j}\left(MR_{exp,i} - MR_{pre,i}\right)^2}{N-z} \quad \text{(IV-10)}$$

- Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne REQM

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{j}\sum_{i=1}^{j}\left(MR_{exp,i} - MR_{pre,i}\right)^2} \quad \text{(IV-11)}$$

Où $MR_{exp,i}$ *: rapport d'humidité expérimentaux,*

$MR_{pre,i}$ *: rapport d'humidité prévus,*

Z : nombre des constantes de séchage dans le modèle,

j : numéro d'observation.

IV.3.2 Détermination de la diffusivité effective

La diffusivité est un paramètre de transport important pour le calcul du transfert d'eau à l'intérieur du produit. Ce coefficient détermine en grande partie l'activité de l'eau de surface. Certain nombre de modèles de transfert d'humidité dans la phase de ralentissement de séchage sont proposés dans la littérature, mais le modèle par diffusion est généralement le plus approprié. Ce modèle diffusif est utilisé pour adapter les données de séchage de plusieurs produits organiques. En général, le coefficient de diffusion est estimé à partir de la cinétique de séchage en résolvant l'équation de diffusion de Fick. Il a été largement utilisé pour décrire le processus de séchage de la plupart des produits biologiques (Ameri et al., 2020).

a) Géométrie plane

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - \frac{1}{D_{eff}}\frac{\partial M}{\partial t} = 0 \quad \text{(IV-12)}$$

Avec : D_{eff} *: diffusivité effective* (m^2/s).

Les conditions initiales et aux limites sont :

$$M(t=0,x)=M_0 \; ; \; \frac{\partial M}{\partial x}(t,x=0)=0 \text{ et } M\left(t,x = \mp\frac{e}{2}\right)=M_s \quad \text{(IV-13)}$$

Avec : e épaisseur de tranches planes (m).

En utilisant les séries de Fourier pour résoudre l'équation (IV-12), nous obtenons :

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{e^2}t\right) \quad \text{(IV-14)}$$

Ainsi, en prenant le logarithme népérien des deux membres de l'équation (IV-14) :

$$ln(MR) = ln\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{e^2}t \quad \text{(IV-15)}$$

Où la pente de ligne égale à β est :

$$\beta = \frac{\pi^2 D_{eff}}{e^2} \text{ et } D_{eff} = \frac{\beta e^2}{\pi^2} \quad \text{(IV-16)}$$

b) Géométrie sphérique

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 . D_{eff} . \frac{\partial M}{\partial r}\right) - \frac{\partial M}{\partial t} = 0 \quad \text{(IV-17)}$$

Les conditions initiales et aux limites sont les suivantes :

$$M(t=0,r)=M_0 \; ; \; \frac{\partial M}{\partial x}(t,r=R)=M_s \text{ et } M(t,r=0)=M_0 \quad \text{(IV-18)}$$

Les séries de Fourier ont été utilisées pour résoudre l'équation de Crank (Crank, 1975). De plus, tous les termes de la série sont négligeables devant le premier, on obtient l'équation suivante (Djebli et al., 2019) :

$$MR = \frac{6}{\pi^2}\exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{R^2}t\right) \quad \text{(IV-19)}$$

Prenant le logarithme népérien des deux membres de l'équation (IV-19) :

$$ln(MR) = ln\frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{R^2}t \quad \text{(IV-20)}$$

On obtient une ligne avec une pente égale à β :

$$\beta = \frac{\pi^2 D_{eff}}{R^2} \text{ et } D_{eff} = \frac{\beta R^2}{\pi^2} \quad \text{(IV-21)}$$

IV.3.3 Détermination de l'énergie d'activation

La relation entre le coefficient de diffusion effective (D_{eff}) est la température de séchage suit l'équation d'Arrhenius (équation (IV-22) :

$$D_{eff} = D_0 exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{(IV-22)}$$

L'énergie d'activation est calculée à partir de la pente du graphe lnD_{eff} en fonction de 1/T.

$$lnD_{eff} = lnD_0 - \frac{E_a}{RT} \quad \text{(IV-23)}$$

Où : D_0 : *facteur pré-exponentiel de l'équation d'Arrhenius (m²/s),*

E_a : *énergie d'activation (kJ/mol),*

R : *constante de gaz parfaits (kJ/mol.K).*

IV.4 DETERMINATION DES PARAMETRES THERMODYNAMIQUES

IV.4.1 Première nouvelle approche

En général, le phénomène de séchage solaire est un processus thermique caractérisé par la ΔH, qui peut être exothermique (ΔH <0) ou endothermique (ΔH >0).

La relation thermodynamique$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ associée à la relation de Vant 'Hoff $\Delta G = -RT\ln(k_t)$, nous permet d'atteindre l'équation d'Eyring :

$$lnk_t = (\Delta S/R) - (\Delta H/R)\,(1/T) \quad \text{(IV-24)}$$

Par analogie avec l'adsorption (Ould brahim, 2018), le coefficient de distribution effective du séchage solaire à l'instant t (k_t) sera défini comme la quantité d'eau évaporée à l'instant t par la quantité d'eau restante dans le solide :

$$k_t = \frac{m_0 - m_t}{m_t - m_\infty} \quad \text{(IV-25)}$$

Où : m_0 : *masse initiale de l'eau présente dans le solide (kg),*

m_t : *masse d'eau présente dans le solide à l'instant t (kg),*

m_∞ : *masse d'eau présente dans le solide à temps infini (séchage au four) (kg).*

Le coefficient de distribution effective du séchage solaire k_f à la fin du séchage sera défini comme la quantité d'eau évaporée au séchage final (en g)) par la quantité d'eau restant dans le solide :

$$k_f = \frac{m_0 - m_{dw}}{m_{dw} - m_\infty} \quad \text{(IV-26)}$$

Où : m_{dw} : *masse d'eau présente dans le solide à la fin du séchage solaire (kg).*

IV.4.2 Seconde nouvelle approche

L'équation d'Eyring, également appelée équation d'Eyring-Polanyi en cinétique chimique, relie la vitesse de réaction à la température. Il a été établi quasi-simultanément par Eyring (1935) et Evans et Polanyi (1935). Cette équation découle de la théorie de l'état de transition (ou théorie

du complexe activé) et correspond à un modèle théorique basé sur la thermodynamique statistique (Laidler et King, 1983. Polanyi, 1987). La structure générale de l'équation d'Eyring-Polanyi ressemble à celle d'Arrhenius :

$$k = \frac{\kappa k_B T}{h} exp\left(\frac{\Delta G^{++}}{RT}\right) \quad \text{(IV-27)}$$

Où : k : *la constante de vitesse,*

κ : *Coefficient de transmission,*

ΔG^{++} : *l'enthalpie libre d'activation,*

h : *la constante de Planck,*

k_B : *la constante de Boltzmann.*

En prenant en compte la relation thermodynamique ($\Delta G^{++} = \Delta H^{++} - T\Delta S^{++}$), la forme linéaire de l'équation d'Eyring-Polanyi peut être déduite :

$$ln\left(\frac{k}{T}\right) = \left(ln\frac{\kappa k_B}{h} + \frac{\Delta S^{++}}{R}\right) - \frac{\Delta H^{++}}{R}\frac{1}{T} \quad \text{(IV-28)}$$

Où : ΔH^{++} : *l'enthalpie d'activation,*

ΔS^{++} : *l'entropie d'activation.*

Si on admet comme hypothèse que le séchage est analogue à un processus thermodynamique caractérisé par un état normal (ΔG, ΔH, ΔS) et régit par une réaction surfacique. Si on admet aussi que suppose aussi que le coefficient de transmission ($\kappa \neq 1$) c'est-à-dire que la fraction du flux qui passe dans l'état de transition jusqu'au produit s'effectue avec croissance de l'état de transition. Si pour chaque température, on définit un coefficient de diffusion effective de séchage solaire D_{eff} analogue à la constante de vitesse k, on obtient une équation générale analogue à celle d'Eyring-Polanyi tel que :

$$D_{eff} = D_0 T exp[-(\Delta G)/RT] \quad \text{(IV-29)}$$

La dépendance en température du changement d'énergie libre de Gibbs est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad \text{(IV-30)}$$

La combinaison des deux équations IV-29 et IV-30 donne :

$$\left[D_{eff}/(TD_0)\right] = exp[-(\Delta H - T\Delta S)/RT] \quad \text{(IV-31)}$$

En supposant que ΔH et ΔS sont approximativement indépendantes de la température, l'équation IV-31 peut s'écrire sous la forme :

$$ln\left[D_{eff}/(TD_0)\right] = \Delta S/R - \Delta H/RT = b - a/T \quad \text{(IV-32)}$$

Par analogie à l'analyse adimensionnelle utilisé en transfert de chaleur, D_0 peut être exprimé par (Djebli et al., 2020) :

$$D_0(m^2s^{-1}K^{-1}) = h^{\alpha}K_B^{\beta}\sigma^{\gamma}c_p^{\delta} = m^{(2\alpha+2\beta+2\delta)}s^{(-\alpha-2\beta-3\gamma-2\delta)}K^{(-\beta-4\gamma-\delta)}kg^{(\alpha+\beta+\gamma)} \quad \text{(IV-33)}$$

L'origine de h et K_B se trouve dans l'équation d'Eyring, et σ et C_p représente la phénoménologie du séchage solaire.

h= $6.6261.10^{-34}$ $m^2.kg.s^{-1}$; K_B=$1.381.10^{-23}$ $m^2.kg.s^{-2}K^{-1}$; σ=$5.67.10^{-8}$ $kg.s^{-3}.K^{-4}$;

c_p = 4180 $m^2.s^{-2}.K^{-1}$; R = 8.314 $J.mol^{-1}.K^{-1}$

Où : σ : *la constante Stefan-Boltzmann,*

c_p : *la capacité calorifique de l'eau.*

Par identification des deux membres de l'équation IV-33, on obtient le système suivant :

$$\left.\begin{array}{c} 2\alpha+2\beta+2\delta=2 \\ -\alpha-2\beta-3\gamma-2\delta=-1 \\ -\beta-4\gamma-\delta=-1 \\ \alpha+\beta+\gamma=0 \end{array}\right\} \equiv \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 0 \\ -1 & -2 & -3 & -2 \\ 0 & -1 & -4 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{(IV-34)}$$

La solution du système précédent conduit à :

$$D_0 = h^4K_B^{-5}\sigma^1c_p^2 = 3.825 \times 10^{-19}(m^2S^{-1}K^{-1}) \quad \text{(IV-35)}$$

Avec : α=4, β=-5, γ=1 et δ=2.

IV.5 CONCLUSION

Les préparations de cinq produits agroalimentaires : pomme de terre, tomates, abricots, figue et poivron rouge ; ont été soumis à un séchage dans un séchoir solaire mixte. Une étude de la cinétique de séchage des cinq produits dans le séchoir solaire mixte est élaborée et sept modèles ont été évalués en utilisant le coefficient de corrélation (r^2) et le khi-carré (χ^2) :

- Deux nouveaux modèles universels sans dimensions.
- Cinq modèles de la littérature.

Cela est afin de sélectionner le modèle qui correspond le mieux aux données expérimentales obtenues lors du processus de séchage pour les deux méthodes de séchage.

Le coefficient de diffusion effective et l'énergie d'activation ont été étudiés et les paramètres thermodynamiques ont été étudiés en utilisant deux nouvelles approches.

Chapitre V
Résultats et Discussions

V.1 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est la discussion des expérimentations effectuées et la présentation et l'interprétation des résultats obtenus dans le présent travail tout en faisant une comparaison avec les résultats d'autres chercheurs dans la littérature.

La première partie est consacrée à :

- Une étude de la cinétique de séchage des cinq produits agricoles dans le séchoir solaire mixte.
- Une modélisation.
- Un calcul des coefficients de diffusion effective et d'énergie d'activation
- Une évaluation du modèle qui correspond le mieux aux données expérimentales va être effectuée avec des données expérimentales dans la littérature pour le valider.
- Un calcul des paramètres thermodynamiques.

Finalement, la deuxième partie présente les résultats d'une simulation bidimensionnelle d'un capteur solaire à air et d'une serre.

V.2 SECHAGE DES PRODUITS AGROALIMENTAIRES

Les essais de séchage des produits agricoles dans le séchoir solaire mixte ont été effectués pendant les journées suivantes :

- Tomate : 10, 11, 12 et 13/07/2017.
- Pomme de terre : 30/07/2017.
- Poivron rouge : 31/07/2017, 01, 02, 03, 04, et 05/08/2017.
- Abricot : 06, 07 et 08/06/2018.
- Figue : 09, 10, 11, 12, 13 et 14/08/2017.

V.2.1 Séchage de pomme de terre

a) Rayonnement solaire

Le rayonnement horizontal global a été mesuré pendant 24 heures. La variation du rayonnement solaire en fonction du temps est présentée à la *Figure V.1*. Dans ce cas, la valeur maximale, 747 W/m², a été atteinte à midi et a ensuite été réduite pour le reste de la journée. La fluctuation des données est due au nuage qui ne permet pas au rayonnement solaire d'atteindre sa valeur maximale.

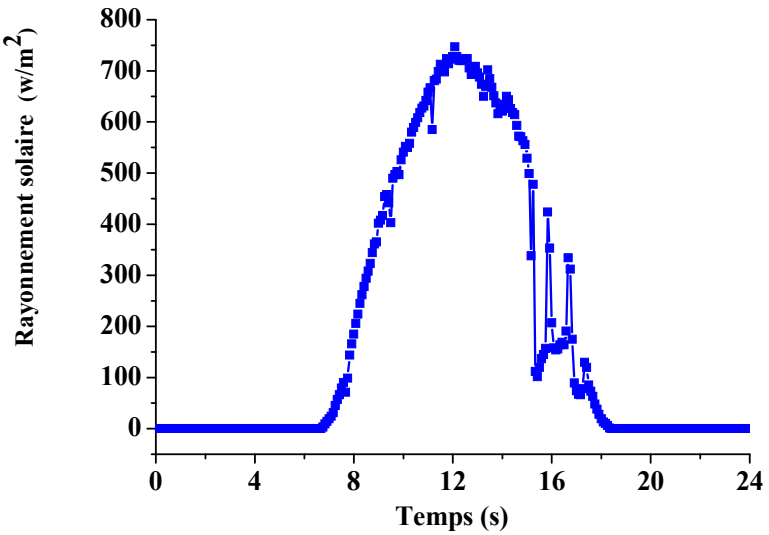


Figure V.1 : *Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour la pomme de terre.*

b) Profil de la température à travers le séchoir mixte

Comme le montre la *Figure V.2* la température de l'air entrant dans la serre augmente progressivement à mesure que le soleil passe d'une basse altitude le matin à son point le plus haut à midi, heure à laquelle la température atteint son niveau maximum. Des tendances similaires s'appliquent aux autres courbes qui correspondent aux températures au niveau et au-dessus des claies. À midi, la température au-dessus de claie indique des valeurs plus élevées que les valeurs de températures obtenues au niveau de claie en raison de la hauteur la plus élevée de l'emplacement du thermocouple.

Le capteur solaire à air utilisé dans le séchoir solaire mixte est équipé avec des chicanes et donne une température moyenne de 50 °C à l'entrée de la serre, ce qui est satisfaisant pour les besoins de ce travail et améliore l'efficacité thermique du séchoir. Le capteur solaire à air a été

utilisé pour assurer de faibles différences de température entre les claies inférieure et supérieure des chariots et améliorer l'efficacité thermique.

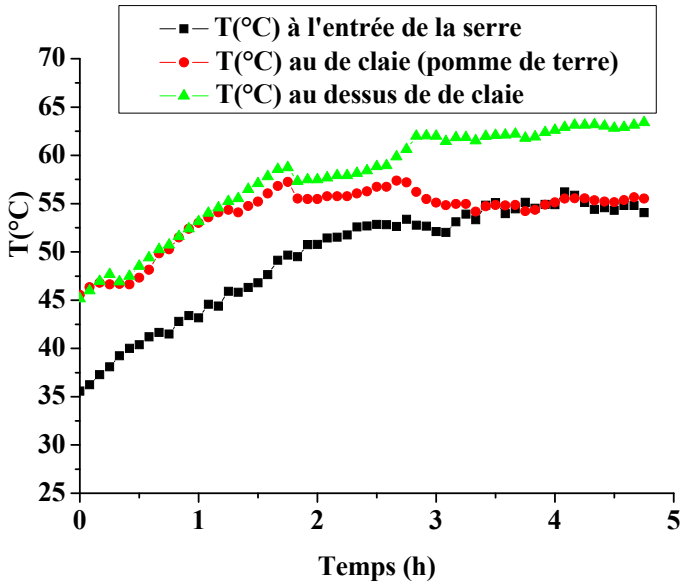


Figure V.2 : *Variation de la température dans le temps en 3 lieux de la serre pour la pomme de terre.*

La température ambiante était en moyenne de 26,5 °C. Dans la serre la température moyenne était de 53,8 °C au niveau de claie (les tranches de pomme de terre). Le gain de température est de 26,1 °C pour le séchoir solaire mixte. Au début du processus de séchage, la vitesse de l'air joue un rôle positif dans la cinétique de séchage. Tandis que, pour les produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de l'air devient insignifiante.

c) Rapport d'humidité en fonction du temps

La *Figure V.3* illustre la variation du rapport d'humidité des tranches de pomme de terre dans le séchoir en fonction du temps (MR = f(t)). Le rapport d'humidité diminue avec le temps jusqu'à atteindre le rapport d'humidité d'équilibre. On a observé une phase qui a été étiquetée comme la phase c, correspondant aux diminutions à la fois de la vitesse de séchage et de la teneur en humidité du produit.

Bonazzi et Bimbenet (2003) ont argumenté que les courbes du séchage théoriques, obtenues pour des produits non hygroscopiques et indéformables tels que la cellulose, le bois, l'argile ou le plâtre, sont caractérisées par la présence de trois phases. Cependant, l'avancement du processus de séchage n'est pas le même et les trois phases ne sont pas toujours observables,

comme des études expérimentales l'ont montré. Une classification des produits en fonction de leur comportement au séchage a été présentée par Van Brakel (1980).

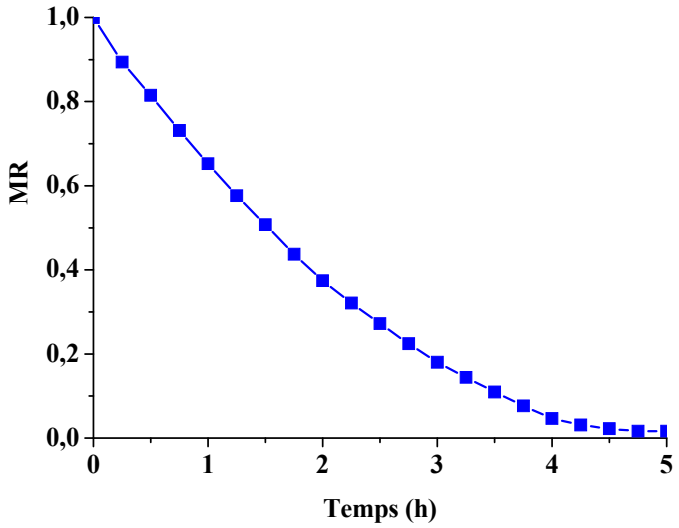


Figure V.3 : *Variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour la pomme de terre.*

L'absence de la phase de mise en température du produit (phase a) et la phase de séchage à allure constante (phase b), probablement dues à la structure des produits agricoles et au fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface externe, comme le notent Boughali et al. (2008). Le transfert d'humidité de l'intérieur de ces produits vers la surface se produit via plusieurs mécanismes complexes tels que la diffusion de liquide, la diffusion de vapeur ou la capillarité (Cui et al., 2004). La phase de ralentissement (phase c) comme le montrent des études expérimentales portant sur plusieurs produits, tels que le maïs, les pommes de terre, les prunes, les pommes (Bimbenet et al., 1985), les tranches de pomme de terre (Magee et Wilkinson, 1992. Yusheng et Poulsen, 1988), les carottes (Sereno et Medeiros, 1990), l'avocat (Alzamora et Chirife, 1980), les dates (Falade et Abbo, 2007) et pommes (Kaya et al., 2007) est la seule phase présente.

Le *Tableau V.1* présente une comparaison entre la présente étude et des études expérimentales de la littérature dans le séchage des pommes de terre. Le séchoir solaire mixte utilisé dans notre étude a une meilleure performance que le séchoir utilisé par Tripathy et Kumar (2008) à New Delhi, en Inde, en prenant en compte du temps de séchage. Chouicha et al. (2013) ont utilisé le séchoir hybride indirect dans leur étude et ont conclu que celui-ci avait les valeurs de température les plus élevés et le meilleur temps de séchage. L'étude de Chouicha et al. (2013) a été menée dans le désert (Sahara) avec un environnement sec tandis que la présente étude a été menée à Bou-Ismail avec un climat côtier humide.

Tableau V.1 : *Comparaison de la présente étude avec celle de la littérature*

	Type de séchoir	Temps de séchage	T_{min}-T_{max} °C	Emplacement de séchoir
Tripathy et Kumar, 2008	Séchoir solaire mixte	5h 30min	30.4-50.4	New Delhi, Inde
Chouicha et al., 2013	Séchoir solaire indirect hybride	2h 45 min	41.6-61.1	Ouargla, Algérie
Travail présent	Séchoir solaire mixte	4h 45 min	45.5-57.4	Bou-Ismail, Algérie

V.2.2 Séchage d'Abricot

a) Rayonnement solaire

La *Figure V.4* représente la variation du rayonnement solaire en fonction du temps. Le rayonnement solaire dans les trois jours a atteint 954 W/m^2, 934 W/m^2 et 923 W/m^2, respectivement. Le rayonnement solaire atteint sa valeur maximale à midi pour les trois jours de séchage, puis diminue à la fin des jours.

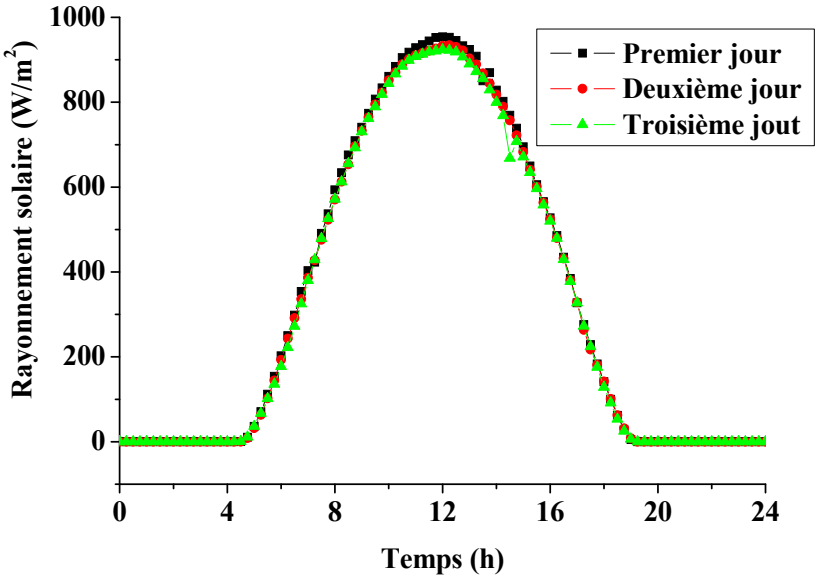


Figure V.4 : *Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour l'abricot.*

b) Profil de la température à travers le séchoir mixte

Un thermocouple a été placé dans chaque claie sur le produit afin de mesurer la variation de température pendant le processus de séchage. Les *Figures V.5, V.6* et *V.7* indiquent les variations de température pendant trois jours. Les valeurs de la température au niveau des claies au cours des trois jours sont presque identiques et sont acceptables pour un bon séchage.

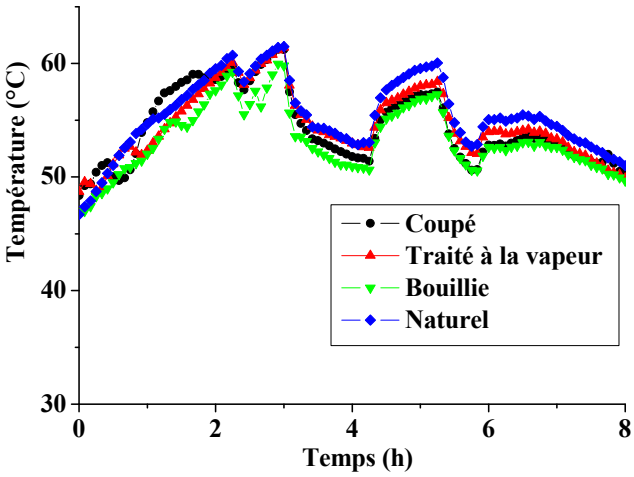


Figure V.5 : *Variation de la température en fonction du temps pendent le premier jour pour l'abricot.*

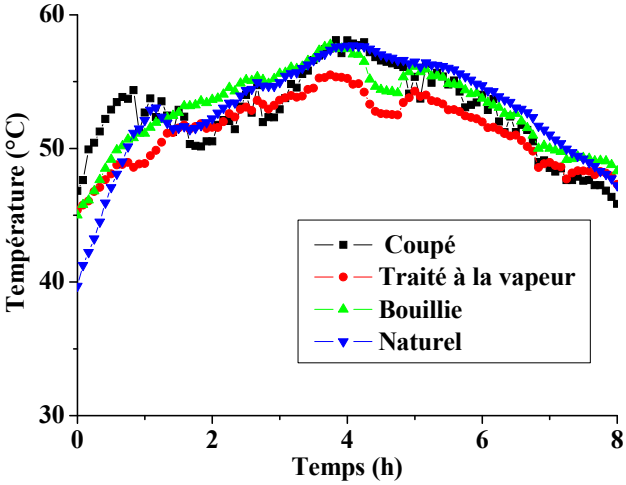


Figure V.6 : *Variation de la température en fonction du temps pendent le deuxième jour pour l'abricot.*

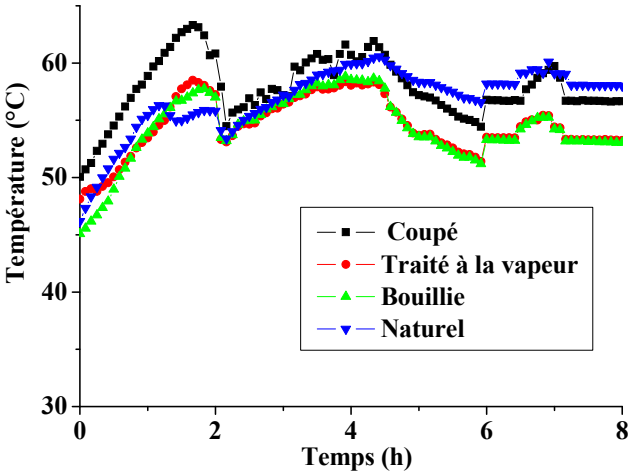


Figure V.7 : *Variation de la température en fonction du temps pendent le troisième jour pour l'abricot.*

c) Rapport d'humidité en fonction du temps

La *Figure V.8* présente la variation du rapport d'humidité en fonction du temps. Le rapport d'humidité dans le cas des abricots coupées en deux diminue plus rapidement que dans les trois autres cas. L'accélération de ce dernier cas des abricots coupées s'explique par l'augmentation de la surface d'échange. La forme du produit a un effet important sur le temps de séchage. Pour les abricots cuits à la vapeur et bouillis, le temps de séchage est presque identique.

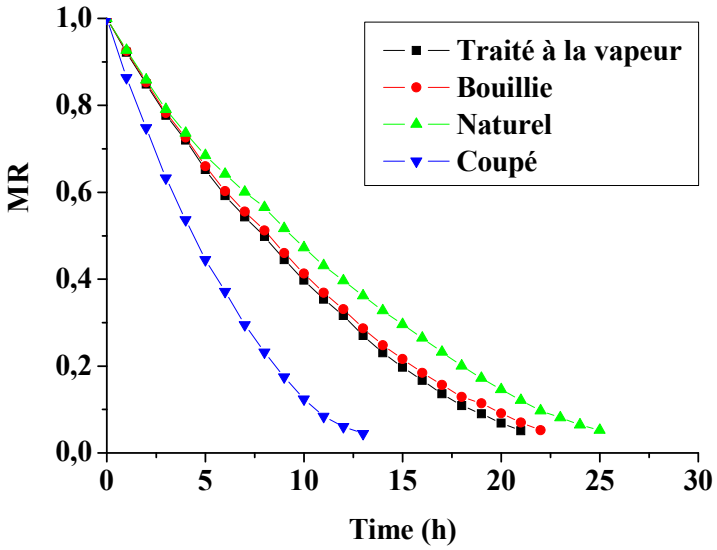


Figure V.8 : *Variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour l'abricot.*

V.2.3 Séchage de la tomate

a) Rayonnement solaire

La *Figure V.9* représente la variation du rayonnement solaire en fonction de temps. Les mesures du rayonnement solaire ont été obtenues à partir d'une station solaire située à la proximité de l'équipement. Les valeurs maximales de rayonnement solaire pour les quatre jours sont respectivement 814 W/m^2, 667 W/m^2, 925 W/m^2 et 920 W/m^2. Le rayonnement solaire du deuxième jour de séchage était le plus faible à cause du mauvais temps. Le rayonnement solaire atteint sa valeur maximale à midi pour les quatre jours de séchage, puis diminue à la fin des jours.

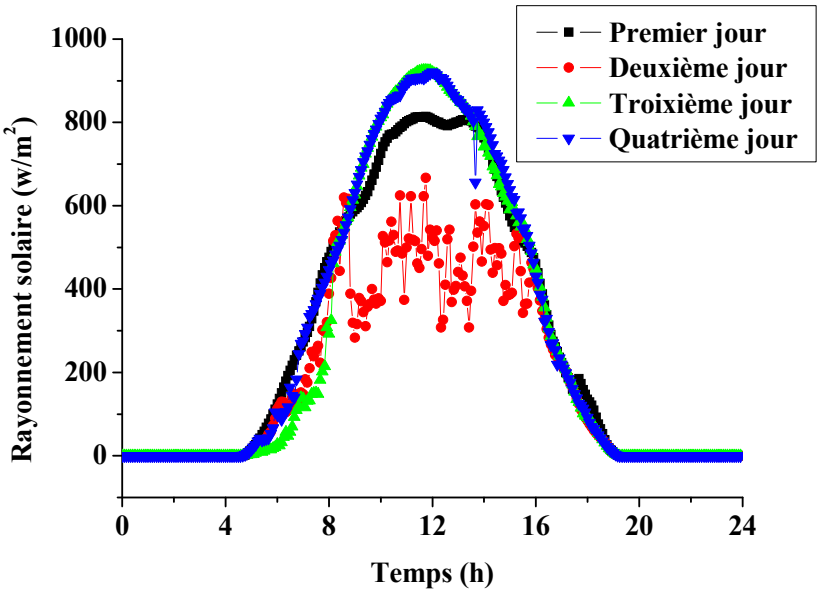


Figure V.9 : *Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour la tomate.*

b) Profil de la température à travers le séchoir mixte

Le thermocouple a été placé sur la claie 2 située au top du chariot qui se trouve au centre de la serre. Les plus basses valeurs de température sont obtenues le deuxième jour à cause de la fluctuation du rayonnement (mauvais temps). La température dans le séchoir solaire mixte à midi montre des valeurs plus élevées pendant les quatre jours (*Figure V.10*).

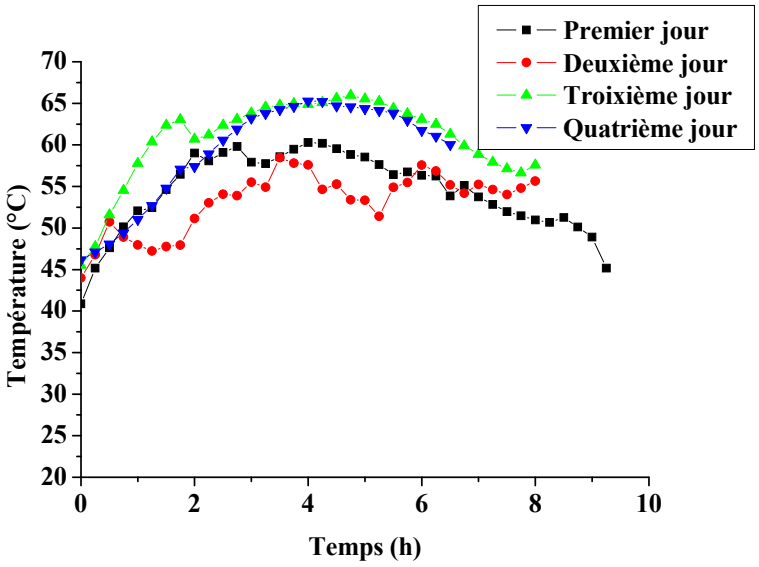


Figure V.10 : *Variation de la température en fonction du temps pour la tomate.*

c) Rapport d'humidité des rondelles de tomates avec différentes épaisseurs

La *Figure V.11* présente la variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour les différentes épaisseurs des rondelles de tomates. Le rapport d'humidité diminue avec le temps jusqu'à l'humidité de produit atteint l'intervalle entre 18 et 25%, conformément aux normes européennes (la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies, 2007). Dans des travaux antérieurs, l'humidité relative à l'intérieur de la serre a été mesurée et s'est avérée se situer entre 11% et 15%, ce qui est très favorable au processus. Au cours de la première heure de séchage, la diminution du rapport d'humidité est rapide en raison de la séparation facile de l'eau libre. Le rapport d'humidité dans le cas e = 0,005 m diminue plus rapidement par rapport aux trois autres cas. La *Figure V.11* montre que l'augmentation de l'épaisseur du produit entraîne l'augmentation de sa teneur en eau. L'eau libre du produit s'évapore plus facilement comparer à l'eau liée qui a un trajet plus long à parcourir pour une épaisseur de 0,01, 0,015 et 0,02 m.

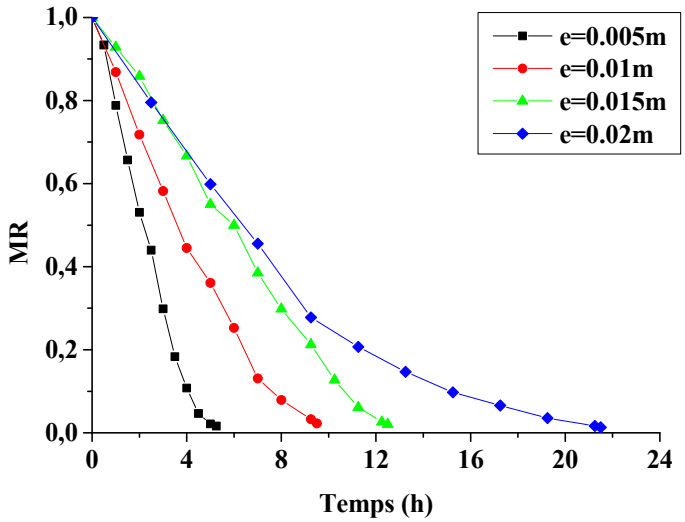


Figure V.11 : *Variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour les rondelles de tomates.*

d) Rapport d'humidité des quartiers de tomate avec différent nombre

La variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour différents nombres de quartier de tomate N est illustrée dans la *Figure V.12*. Le rapport d'humidité dans le cas N = 16 diminue plus rapidement par rapport aux deux autres cas. Ces courbes montrent que la cinétique de séchage est caractérisée par la présence d'une seule phase correspondant à la phase ralentissement. Cette phase de ralentissement du rapport de séchage présente deux phases :

- Une phase de diminution rapide de la vitesse de séchage apparaît lorsque les propriétés physiques du matériau influencent le profil de la cinétique de séchage.

- Une phase de diminution lente de la vitesse de séchage est indiquée lorsque le matériau est complètement dans le domaine hygroscopique. La vitesse de séchage diminue lentement jusqu'à ce que la teneur en humidité atteigne l'équilibre avec les conditions d'humidité de séchoir. Dans ce cas, seul le début de cette phase est observé car le processus de séchage est arrêté lorsque l'humidité dans le produit atteint 18 à 25%.

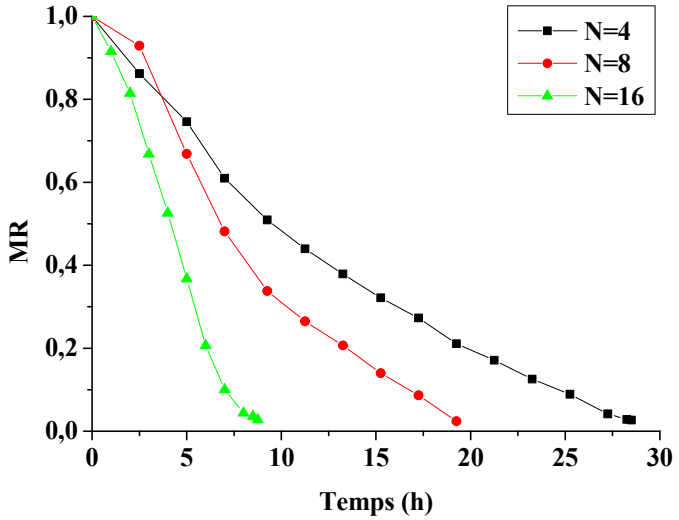


Figure V.12 : *Variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour les quartiers de tomates.*

Le *Tableau V.2* présente les temps de séchage et la température moyenne pour tous les cas étudiés. Un jour a suffi pour sécher les tomates dans les cas des rondelles de tomate avec une épaisseur de 0,005 et 0,01 m et les quartiers de tomate avec un nombre de N = 16 comme indiqué dans le *Tableau V.2*. Dans le cas des quartiers de tomate N = 2, les tomates pourrissent le troisième jour. La température moyenne dans tous les cas varie entre 52,7 et 56,9 ° C.

Tableau V.2 : *Temps de séchage et température moyenne.*

Tranches de tomates		**t (h)**	**T_m (°C)**
Rondelles	e = 0.005 m	5 (1 jour)	56.9
	e = 0.01m	9h 15 min (1 jour)	54.7
	e = 0.015 m	12h 15 min (2 jours)	52.7
	e = 0.02m	21h 15min (3 jours)	54.8
Quartiers	N = 2	détérioré	/
	N = 4	28h 15 min (4 jours)	55
	N = 8	19h 15min (3 jours)	53.9
	N = 16	8h 30 min (1 jour)	55

V.2.4 Séchage de la figue

a) Rayonnement solaire

La variation du rayonnement solaire en fonction du temps est présentée à la *Figure V.13*. Dans ce cas, les valeurs maximales de rayonnement solaire pour les six jours sont respectivement 823 W/m^2, 963 W/m^2, 859 W/m^2, 846 W/m^2, 847 W/m^2 et 830 W/m^2, a été atteinte à midi. La fluctuation des données est due au nuage.

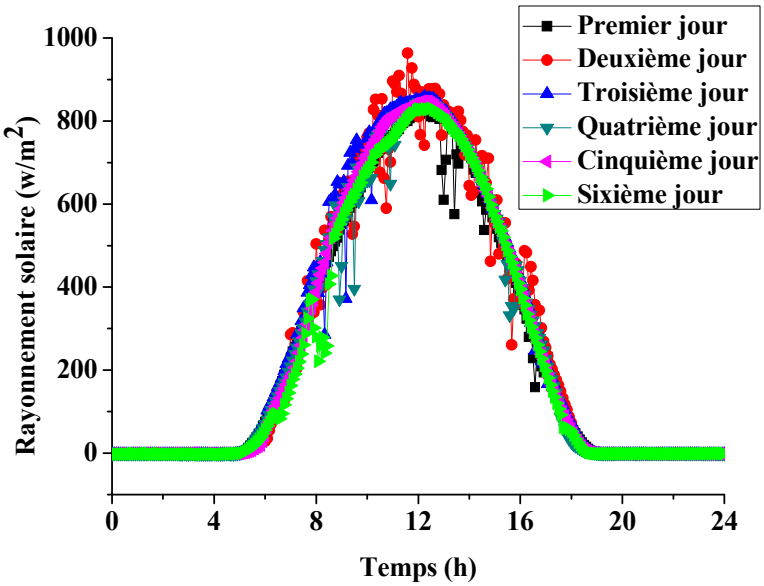


Figure V.13 : *Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour la figue.*

b) Profil de la température à travers le séchoir mixte

La *Figure V.14* présente les profils de la température au niveau de la claie pendant les six jours de séchage. Les fluctuations de la température sont causées par les nuages (mauvais temps). La température dans le séchoir solaire mixte à midi montre des valeurs plus élevées pendant les six jours.

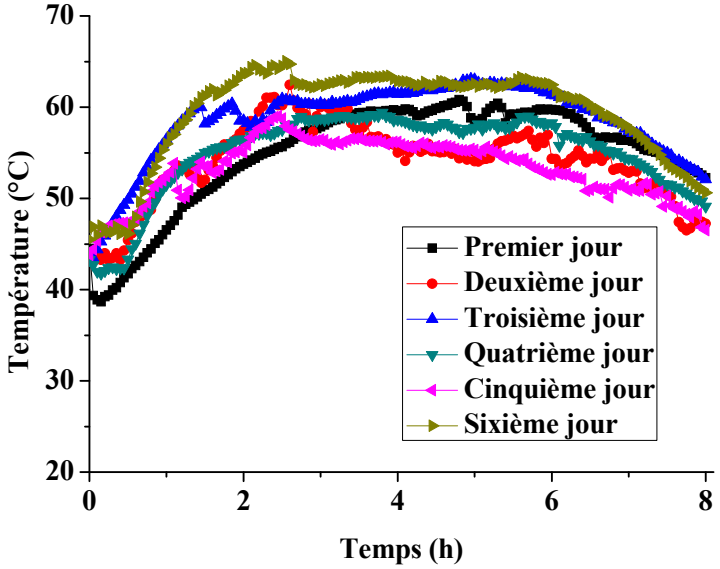


Figure V.14 : *Variation de la température en fonction du temps pour la figue.*

c) Rapport d'humidité de la figue

La variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour la figue verte et noire est illustrée sur la *Figure V.15*. Le rapport d'humidité diminue avec le temps jusqu'à la fin de l'opération de séchage. Dans ce cas, seul le début de la deuxième partie de la phase est observé pendant le séchage de la figue verte et noire car le processus de séchage est arrêté lorsque l'humidité dans le produit atteint 28 à 32%.

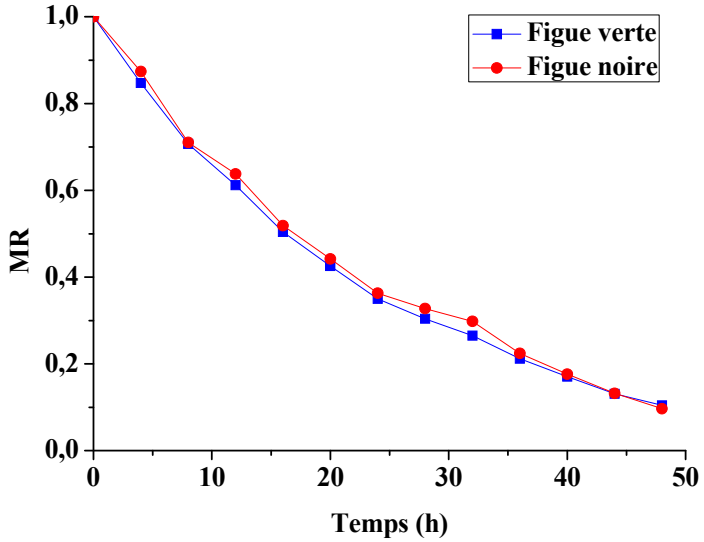


Figure V.15 : *Variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour la figue.*

V.2.5 Séchage du poivron rouge

d) Rayonnement solaire

La variation du rayonnement solaire en fonction de temps est présentée dans la *Figure V.16***.** Les valeurs maximales de rayonnement solaire pour les six jours sont respectivement 857 W/m^2, 871W/m^2, 830 W/m^2, 854 W/m^2, 835 W/m^2 et 826 W/m^2. Le rayonnement solaire du deuxième jour de séchage était le plus faible à cause du mauvais temps. Le rayonnement solaire atteint sa valeur maximale à midi pour les quatre jours de séchage, puis diminue à la fin des jours.

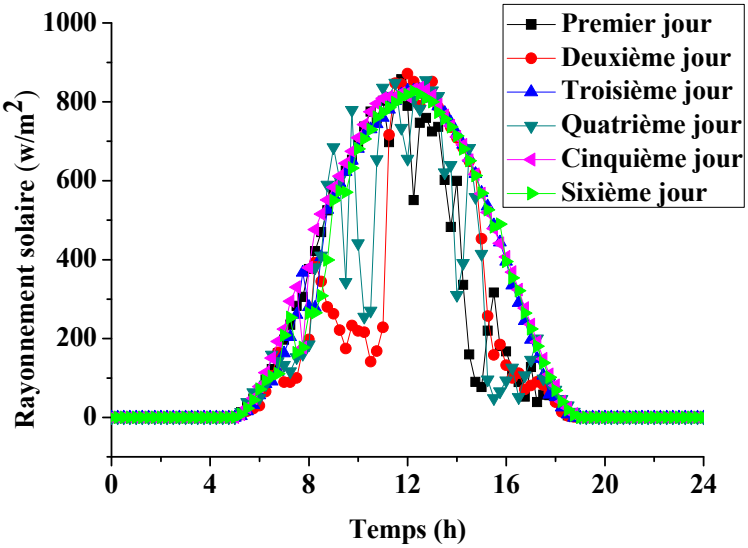


Figure V.16 : *Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour le poivron rouge.*

e) Profil de la température à travers le séchoir mixte

Les profils de la température au niveau de la claie pendant les six jours de séchage sont illustrés dans la *Figure V.17*. Les plus basses valeurs de température sont obtenues le deuxième jour à cause de la fluctuation du rayonnement (mauvais temps).

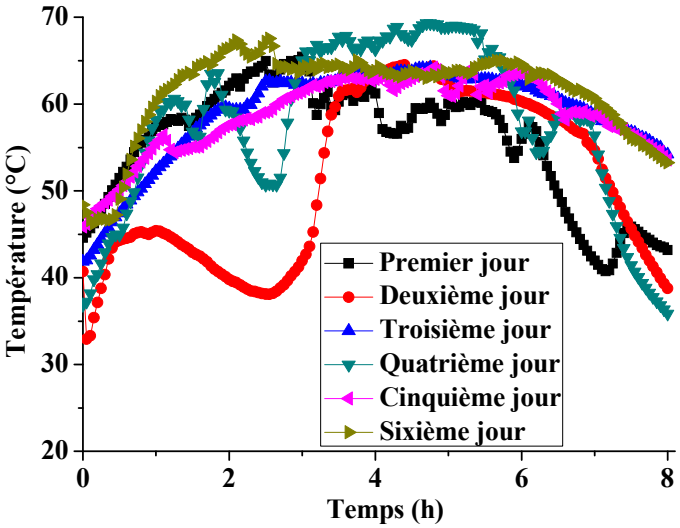


Figure V.17 : *Variation de la température en fonction du temps pour le poivron rouge.*

f) Rapport d'humidité du poivron rouge

La variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour le poivron rouge est illustrée sur la *Figure V.18*. Le rapport d'humidité diminue avec le temps jusqu'à atteindre le rapport d'humidité d'équilibre.

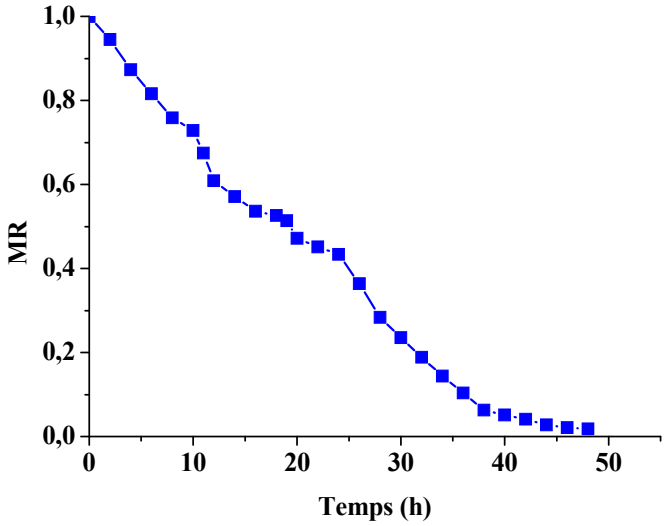


Figure V.18 : *Variation du rapport d'humidité en fonction du temps pour le poivron rouge.*

V.3 MODELISATION DE LA CINETIQUE DE SECHAGE

V.3.1 Pomme de terre

Les valeurs obtenues des paramètres des modèles, le coefficient de corrélation et le khi-carré sont résumées dans le *Tableau V.3*. Les valeurs des paramètres sont comprises entre 0,95837 à 0,9999 pour le coefficient de corrélation r^2 et 2 10-5 à 1,35 10^{-3} pour le khi-carré χ^2.

Tableau V.3 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour la pomme de terre.*

Modèles	**Paramètres des modèles**	**r^2**	**χ^2**
Nouveau Modèle1	A= 0,0102, n= 0,5603, A_1= -7,2166, m= 0,6000, A_2= -2,9703, p= 42,022	0,9999	2 E-5
Nouveau Modèle 2	A= 49,2082, n= 0,3782, A_1= -0,0197, m= 0,9235, A_2= 0,00001, p= 2965,1	0,99972	4 E-5
Page	k= 0,4226, n= 1,3373	0,99408	4,3 E-4
Logarithmic	A_1= 1,2931, k= 0,3452, A_2= -0,2819	0,99765	1,8 E-4
Midilli–Kucuk	A_1= 0,9866, k= 0,3914, n= 1,1750, A_2= -0,0226	0,99921	6 E-5
Henderson and Pabis	A_1=1,0691, k= 0,5826	0,98082	1,38 E-3
Two term	A_1= 11,361, k_1= 0,2167, A_2= -10,352, k_2= 0,1957	0,95837	3,4 E-3

Les données expérimentales sont en bon accord avec les deux nouveaux modèles suggérés, basées sur les valeurs élevées du coefficient de corrélation r^2 qui est égal à 0,9999 et 0,99972. Les faibles valeurs khi-carré $\chi 2$ ont été obtenues avec le nouveau modèle 2 pour la pomme de terre.

La *Figure V.19* illustre l'évolution des variations du rapport d'humidité mesuré expérimentalement et les nouveaux modèles 1 et 2 et le modèle Midilli-Kucuk. Les nouveaux modèles proposés ont montré un bon accord avec les données expérimentales.

Les valeurs calculées du rapport d'humidité MR à l'aide des modèles théoriques sont comparées aux valeurs MR mesurées expérimentalement, voir la *Figure V.20*, pour évaluer la précision des modèles. Un bon accord entre les valeurs expérimentales et prévues du rapport d'humidité a été noté pour les deux modèles suggérés.

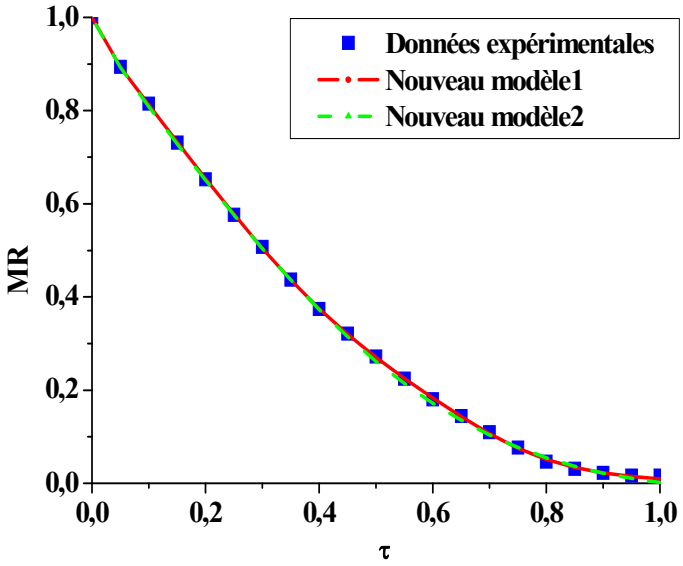


Figure V.19 : *Variation du rapport d'humidité avec les deux nouveaux modèles pour la pomme de terre.*

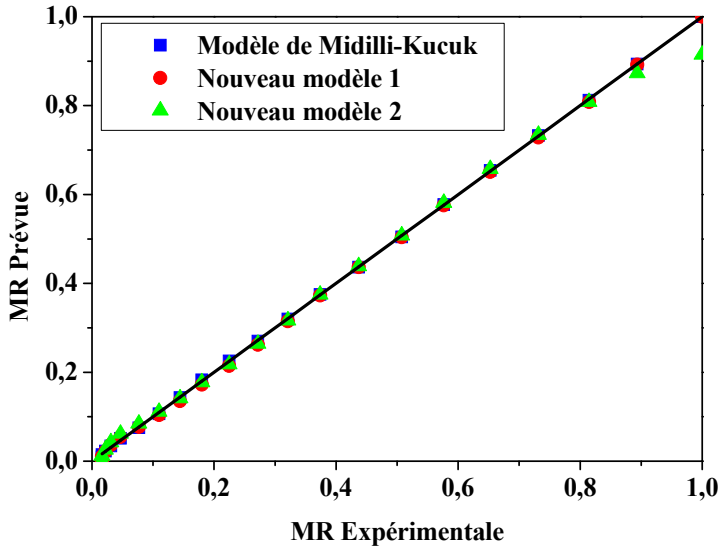


Figure V.20 : *Variation du rapport d'humidité prévue des deux nouveaux modèles avec le rapport d'humidité expérimentale pour la pomme de terre.*

Toutes les données des deux nouveaux modèles proposés sont plus proches de la droite indiquant un meilleur ajustement. Les valeurs prévues du rapport d'humidité du modèle Midilli-Kucuk s'écartaient légèrement de la droite.

V.3.2 Abricot

Les résultats obtenus à partir des modèles sont présentés dans les *Tableaux V.4, V.5, V.6 et V.7* avec le coefficient de corrélation et le khi-carré pour les quatre cas. Les données

expérimentales correspondent remarquablement bien aux nouveaux modèles proposés, basés sur des valeurs élevées du coefficient de corrélation (r^2) et du khi-carré (χ^2) pour tous les cas. Les valeurs de r^2 obtenues pour tous les cas pour le nouveau modèle 1 sont les plus élevés. Pour tous les modèles, les valeurs de coefficient de corrélation r^2 étaient supérieures à 0,98, indiquant un bon ajustement.

Tableau V.4 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour l'abricot cuit à la vapeur.*

Modèles	**Paramètres des modèles**	**r^2**	**χ^2**
Nouveau Modèle1	A= 0,2908, n= 0,8183, A_1= -3,9219, m= 0,9624, A_2= -1,5020, p= 6,8009	0,99993	7,95 E-6
Nouveau Modèle 2	A= 1,5515, n= 0,3838, A_1= -0,4384, m= 0,6774, A_2= 0,0081, p= 65,026	0,99981	2 E-5
Page	k= 0,0552, n= 1,2476	0,99553	4,1 E-4
Logarithmic	A_1= 1,3403, k= 0,0602, A_2= -0,3385	0,99968	3 E-5
Midilli–Kucuk	A_1= 0,9956, k= 0,0669, n= 1,0587, A_2= -0,0069	0,99967	3 E-5
Henderson and Pabis	A_1=1,0535, k= 0,1049	0,98429	1,4 E-3
Two term	A_1= 6,3538, k_1= 0,0396, A_2= -5,3535, k_2= 0,0322	0,99973	3 E-5

Tableau V.5 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour l'abricot bouillie.*

Modèles	**Paramètres des modèles**	**r^2**	**χ^2**
Nouveau Modèle1	A= 0,2631, n= 0,6411, A_1= -3,5332, m= 0,9789, A_2= -0,9302, p= 10,108	0,99989	1 E-5
Nouveau Modèle 2	A= 4,2295, n= 0,3945, A_1= -0,1878, m= 0,7119, A_2= 0,0008, p= 238,87	0,9998	2 E-5
Page	k= 0,0547, n= 1,2326	0,99624	3,4 E-4
Logarithmic	A_1= 1,2992, k= 0,0610, A_2= -0,2962	0,99961	4E-5
Midilli–Kucuk	A_1= 0,9949, k= 0,0649, n= 1,0696, A_2= -0,0056	0,99963	4 E-5
Henderson and Pabis	A_1=1,0518, k= 0,101	0,98615	1,2 E-3
Two term	A_1= 4,0649, k_1= 0,0425, A_2= -3,0635, k_2= 0,0309	0,99968	3 E-5

Tableau V.6 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour l'abricot sans traitement.*

Modèles	**Paramètres des modèles**	r^2	χ^2
Nouveau Modèle1	A= 0,0445, n= 0,4558, A_1= -5,0941, m= 0,9601, A_2= -0,8112, p= 52,934	0,99986	1 E-5
Nouveau Modèle 2	A= 36,034, n= 0,3744, A_1= -0,0254, m= 0,7775, A_2= 7,79E-6, p= 1845,1	0,99965	4 E-5
Page	k= 0,0502, n= 1,1990	0,9926	6,3 E-4
Logarithmic	A_1= 1,3393, k= 0,0487, A_2= -0,3534	0,99938	6E-5
Midilli–Kucuk	A_1= 0,9972, k= 0,0676, n= 0,9397, A_2= -0,0084	0,99948	5 E-5
Henderson and Pabis	A_1=1,0396, k= 0,0869	0,98402	1,3 E-3
Two term	A_1= 2,9976, k_1= 0,0357, A_2= -2,0132, k_2= 0,0212	0,99935	6 E-5

Tableau V.7 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour l'abricot coupé.*

Modèles	**Paramètres des modèles**	r^2	χ^2
Nouveau Modèle1	A= 0,0460, n= 0,4355, A_1= -4,4709, m= 0,9904, A_2= -0,7169, p= 53,944	0,99989	2 E-5
Nouveau Modèle 2	A= 200,17, n= 0,3851, A_1= -0,0044, m= 0,7978, A_2= 1,23E-6, p= 4835,5	0,99979	3 E-5
Page	k= 0,1134, n= 1,2439	0,99705	3,1 E-4
Logarithmic	A_1= 1,2372, k= 0,1217, A_2= -0,2298	0,9992	9E-5
Midilli–Kucuk	A_1= 0,9948, k= -0,1230, n= 1,1139, A_2= -0,0066	0,99946	7 E-5
Henderson and Pabis	A_1=1,0476, k= 0,1859	0,98655	1,4 E-3
Two term	A_1= 6,2074, k_1= 0,0814, A_2= -5,2016, k_2= 0,0688	0,99939	8 E-5

Les rapports d'humidités prévues ont été présentés dans la *Figure V.21* en fonction des rapports d'humidités expérimentales pour une meilleure comparaison entre les données obtenues. Un bon accord entre le rapport d'humidité expérimental et prévu a été noté pour tous les cas. Toutes les valeurs de rapport d'humidité obtenues avec le nouveau modèle 1 sont plus proches de la ligne droite, indiquant le meilleur ajustement.

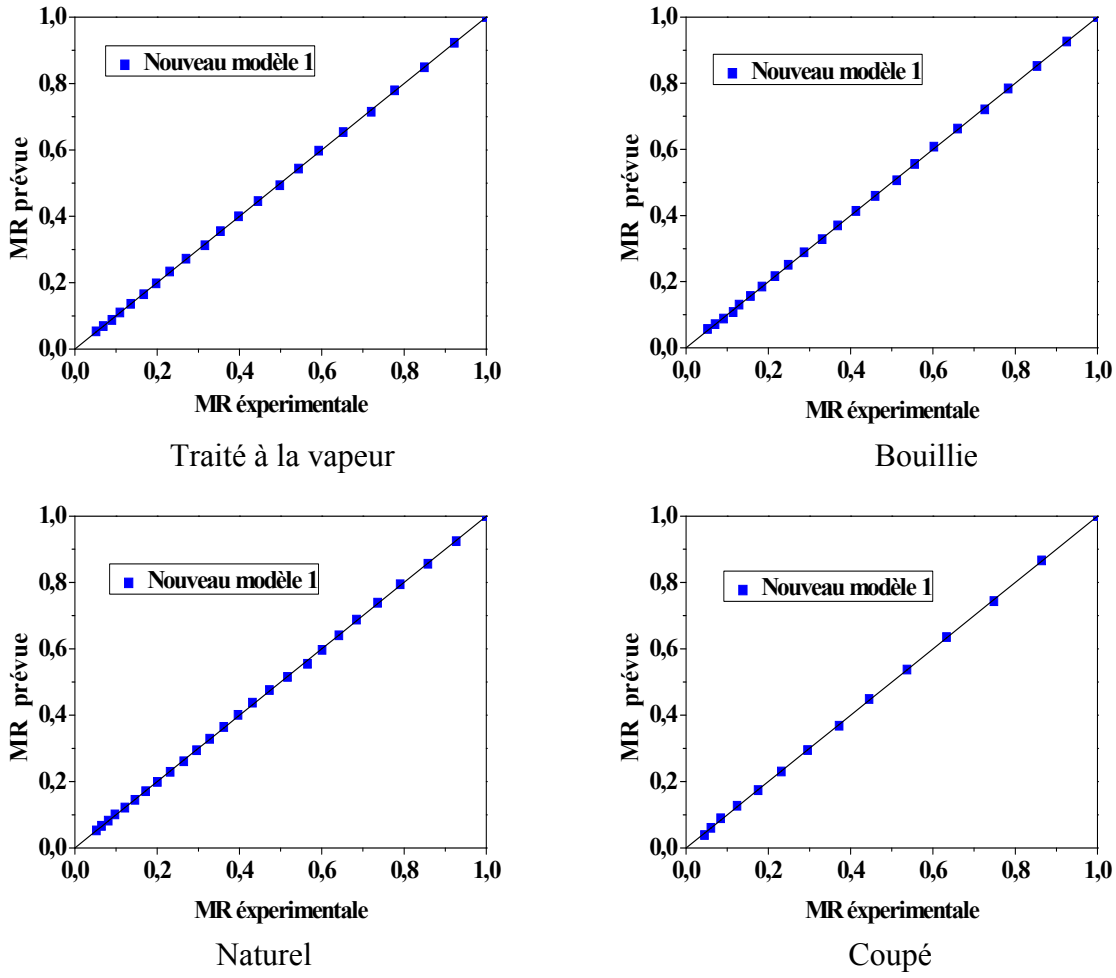


Figure V.21 : *Variation du rapport d'humidité prévue de nouveau modèle 1 avec le rapport d'humidité expérimentale pour l'abricot.*

V.3.3 Tomate

a) Rondelles de tomate avec différente épaisseurs

Les *Tableaux V.8, V.9, V.10 et V.11* indiquent les valeurs résultantes des paramètres du modèle, le coefficient de corrélation et le khi-carré concernant le séchage dans le séchoir solaire mixte.

Les résultats montrent que la plupart des modèles présentent des valeurs de (r^2) supérieures à 0,99, indiquant un bon accord avec les données expérimentales. Les deux nouveaux modèles sont les plus adaptés avec les données expérimentales de séchage de la tomate dans le séchoir solaire mixte. Ces modèles montrent les valeurs les plus élevées du coefficient de corrélation (r^2) et les valeurs les plus basses de l'erreur khi-carré (χ^2). Parmi ces modèles, le nouveau modèle1 est le mieux pour caractériser les données de séchage de la tomate séchée dans le séchoir serre solaire.

Tableau V.8 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour les rondelles de tomate d'une épaisseur e=0,5 cm.*

Model	**Coefficient**	r^2	χ^2
Nouveau Modèle1	A= 13,142, n= 3,2877, A_1= 5,1385, m= 2,0734, A_2= -2,8950, p= 0,7626	0,99989	6 E-5
Nouveau Modèle2	A= 12,368, n= 0,5568, A_1= -0,0762, m= 1,8961, A_2= 0,0005, p= 365,04	0,99978	7 E-5
Page	k= 0,19836, n= 1,7444	0,99456	8 E-4
Logarithmic	A_1= 1,772, k= 0,1832, A_2= -0, 7188	0,98952	1,72 E-3
Midilli–Kucuk	A_1= 0,9985, k= -0,4553, n= 0,6811, A_2= -0,7785	0,99798	3,7 E-4
Henderson and Pabis	A_1=1,1218, k= 0,4615	0,94358	8,32 E-3
Two term	A_1= 14,196, k_1= 0,1114, A_2= -13,142, k_2= 0,0958	0,98993	1,86 E-3

Tableau V.9 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour les rondelles de tomate d'une épaisseur e=1 cm.*

Model	**Coefficient**	r^2	χ^2
Nouveau Modèle1	A= 0,0557, n= 0,9488, A_1= -7,8613, m= 0,8447, A_2= -3,2083, p= 11,675	0,99958	1,2 E-4
Nouveau Modèle2	A= 49,7358, n= 0,4389, A_1= -0,0199, m= 1,0990, A_2= 9,09E-6, p= 2471,69	0,99822	4,9 E-4
Page	k= 0,1096, n= 1,5074	0,99295	9,8 E-4
Logarithmic	A_1= 1,4868, k= 0,1277, A_2= -0,4621	0,99501	7,8 E-4
Midilli–Kucuk	A_1= 1,0005, k= -0,0002, n= 3,2173, A_2= -0,1453	0,99889	2 E-4
Henderson and Pabis	A_1=1,0817, k= 0,2604	0,96158	5,34 E-3
Two term	A_1= 23,133, k_1= 0,0764, A_2= -22,108, k_2= 0,0714	0,99538	8,3 E-4

La *Figure V.22* montre l'évaluation des variations du rapport d'humidité en fonction du temps de séchage avec le nouveau modèle1 le plus adapté avec les données expérimentales de séchage des rondelles de tomate. On voit un bon ajustement entre les deux courbes expérimentale et prévue.

Tableau V.10 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour les rondelles de tomate d'une épaisseur e=1,5 cm.*

Model	**Coefficient**	r^2	χ^2
Nouveau Modèle1	A= 0,0049, n= 0,6767, A_1= -8,2622, m= 0,7546, A_2= -3,1819, p= 64,532	0,99903	2 E-4
Nouveau Modèle2	A= 58,186, n= 0,5268, A_1= -0,0169, m= 1,1339, A_2= 4,52E-6, p= 2625,9	0,99878	2,5 E-4
Page	k= 0,0371, n= 1,7332	0,99456	1,15 E-3
Logarithmic	A_1= 2,7651, k= 0,0384, A_2= -1,7334	0,99567	6,3 E-3
Midilli–Kucuk	A_1= 0,9958, k= -0,1730, n= 0,7312, A_2= -0,239	0,99823	2,8 E-4
Henderson and Pabis	A_1=1,1205, k= 0,1719	0,93783	8,34 E-3
Two term	A_1= 20,296, k_1= 0,0227, A_2= -19,264, k_2= 0,0184	0,99574	6,9 E-4

Tableau V.11 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour les rondelles de tomate d'une épaisseur e=2 cm.*

Model	**Coefficient**	r^2	χ^2
Nouveau Modèle1	A= 0,0004, n= 0,6788, A_1= -11,189, m= 0,6883, A_2= -2,7084, p= 1307,0	0,9995	1,1 E-4
Nouveau Modèle2	A= 44,122, n= 2,42E-9, A_1= -0,0013, m= 0,7389, A_2= 0,00002, p= 5149,2	0,99915	1,9 E-4
Page	k= 0,0595, n= 1,3623	0,99885	2,4 E-4
Logarithmic	A_1= 1,1582, k= 0,1053, A_2= -0,1270	0,99382	8,4 E-4
Midilli–Kucuk	A_1= 0,9954, k= -0,0417, n= 1,0536, A_2= -0,1317	0,99612	5,9 E-4
Henderson and Pabis	A_1=1,0609, k= 0,1403	0,98176	2,23 E-3
Two term	A_1= 23,937, k_1= 0,0689, A_2= -22,907, k_2= 0,0669	0,99478	8 E-4

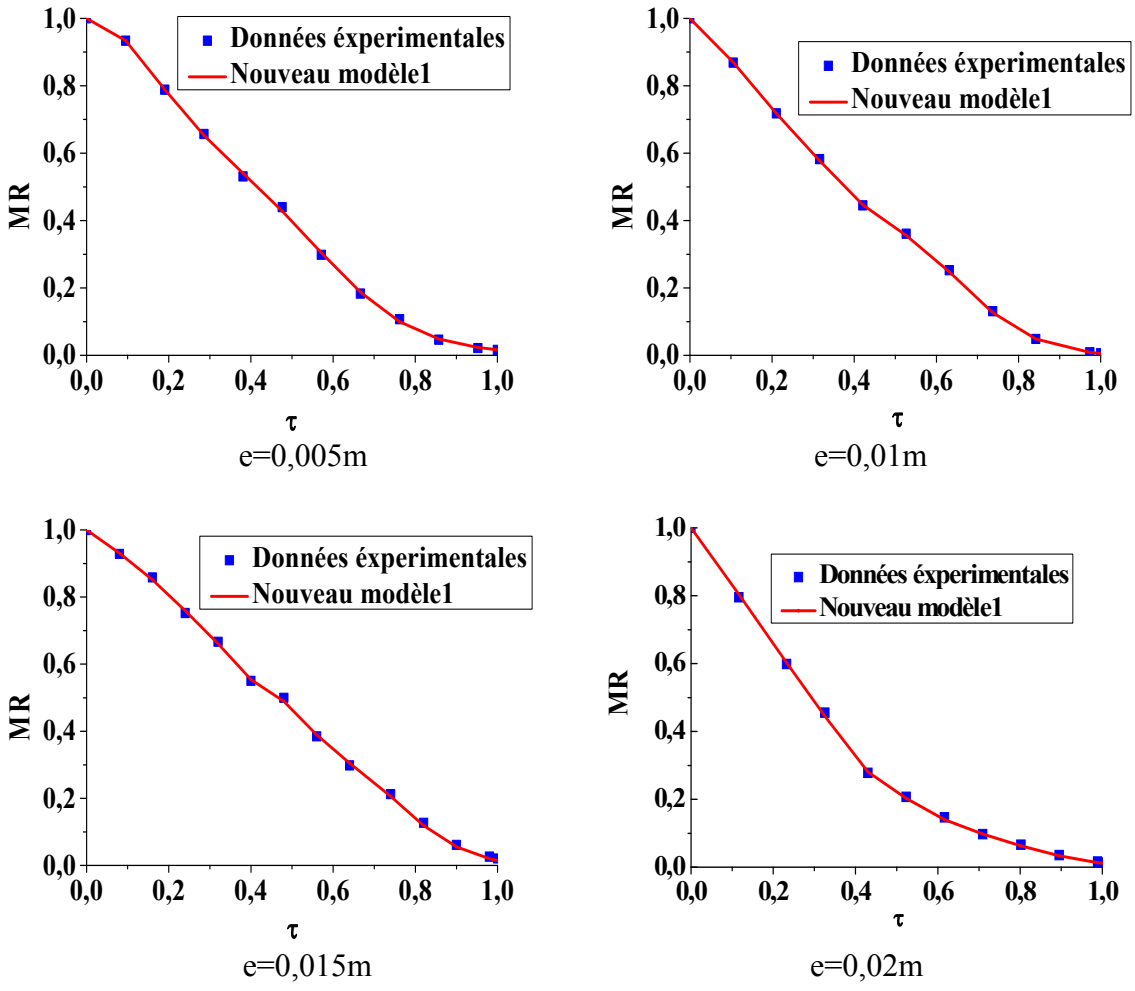


Figure V.22 : *Variation du rapport d'humidité avec le nouveau modèle 1pour les rondelles de tomates.*

b) Quartier de tomate avec différent nombre

Les valeurs des paramètres du modèle, le coefficient de corrélation et le khi-carré concernant le séchage des quartiers de tomate dans le séchoir solaire mixte sont indiquées dans les *Tableaux V.12, V.13 et V.14.*

Les données expérimentales correspondent parfaitement au nouveau modèle1 qui montre une valeur supérieure du coefficient de corrélation (r^2) 0,9993, 0,9998 et 0,99989 et une valeur inférieure de l'erreur khi-carré (χ^2) 1,1E-4, 6E-5 et 4E-4 pour les cas de nombre de quartier N = 4, 8 et 16 respectivement. Donc, le nouveau modèle1 est le meilleur pour définir les données de séchage des quartiers de tomate séchées.

Tableau V.12 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour les quartiers de tomates avec un nombre N=4.*

Model	**Coefficient**	**r^2**	**χ^2**
Nouveau Modèle1	A= 0,0015, n= 0,5464, A_1= -10,248, m= 0,4190, A_2= -4,7162, p= 49,043	0,9993	1,1 E-4
Nouveau Modèle2	A= 48,681, n= 0,5524, A_1= -0,0196, m= 0,4898, A_2= 8,35E-6, p= 2473,6	0,99858	2,2 E-4
Page	k= 0,0388, n= 1,2868	0,99352	6,8 E-4
Logarithmic	A_1= 1,2945, k= 0,0523, A_2= -0,2855	0,99863	1,6 E-4
Midilli–Kucuk	A_1= 1,0046, k= 0,0561, n= 1,0572, A_2= -0,0048	0,99877	1,5 E-4
Henderson and Pabis	A_1=1,0611, k= 0,0875	0,97967	2,14 E-3
Two term	A_1= 31,427, k_1= 0,1475, A_2= -30,436, k_2= 0,1510	0,99322	8,4 E-4

Tableau V.13 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour les quartiers de tomates avec un nombre N=8.*

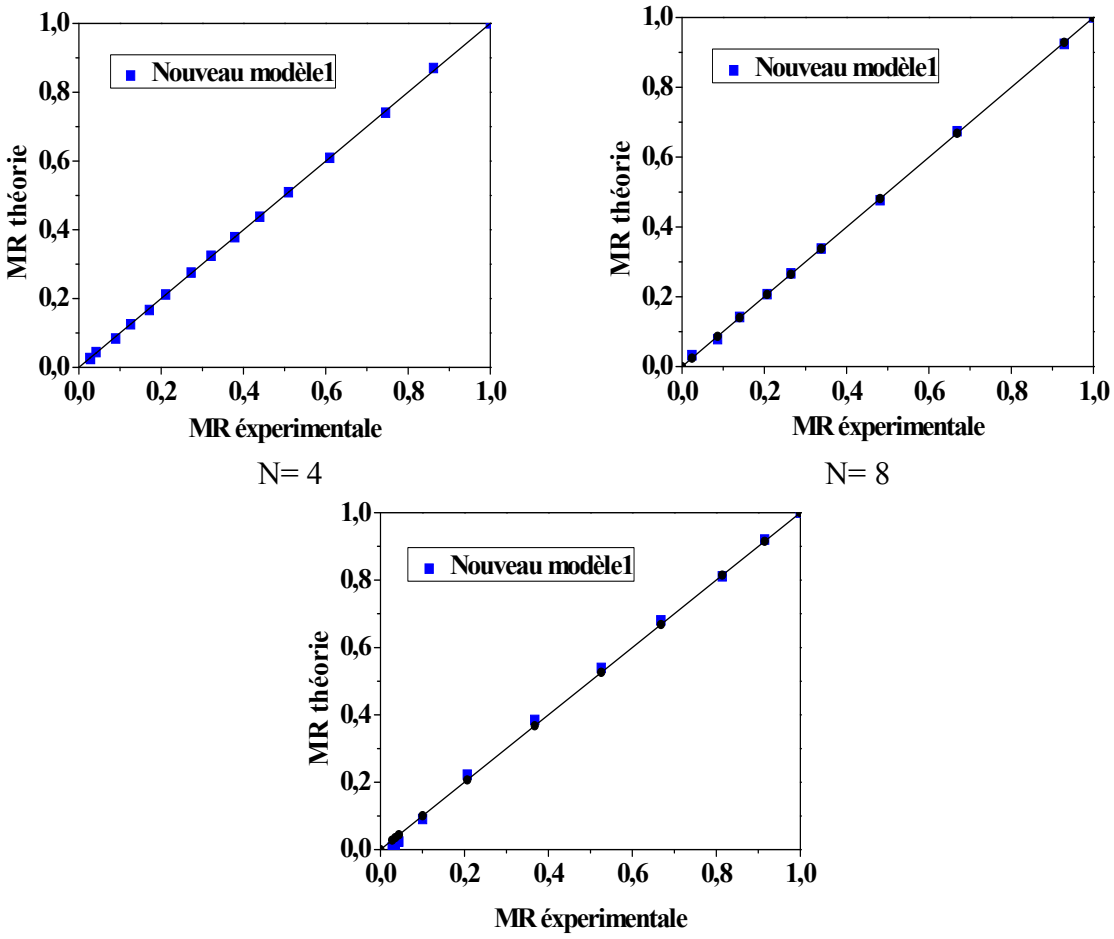
Model	**Coefficient**	**r^2**	**χ^2**
Nouveau Modèle1	A= 15,255, n= 4,8042, A_1= 1,5917, m= 2,5633, A_2= -2,0840, p= 1,0050	0,9998	6 E-5
Nouveau Modèle2	A= 51,184, n= 0,7832, A_1= -0,0004, m= 0,7804, A_2= 0,00001, p= 4378,6	0,99381	1,74 E-3
Page	k= 0,0328, n= 1,5632	0,99381	8,7 E-4
Logarithmic	A_1= 1,4083, k= 0,0732, A_2= -0,3464	0,98317	2,71 E-3
Midilli–Kucuk	A_1= 1,0222, k= 0,0367, n= 1,5288, A_2= 0,0002	0,99441	1,05 E-3
Henderson and Pabis	A_1=1,1050, k= 0,1274	0,95989	5,66 E-3
Two term	A_1= 1,7528, k_1= 0,1802, A_2= -0,7524, k_2= 0,5447	0,99714	5,4 E-4

Tableau V.14 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour les quartiers de tomates avec un nombre N=16.*

Model	**Coefficient**	**r^2**	**χ^2**
Nouveau Modèle1	A= 0,0179, n= 0,7283, A_1= -7,2166, m= 0,7584, A_2= -3,8342, p= 13,767	0,99989	4 E-5
Nouveau Modèle2	A= 72,052, n= 0,5624, A_1= -0,0135, m= 1,906, A_2= 9,74E-6, p= 3346,6	0,99978	7 E-5
Page	k= 0,0427, n= 2,0567	0,99406	9,7 E-4

Model	**Coefficient**	**r^2**	**χ^2**
Logarithmic	A_1= 4,3186, k= 0,0345, A_2= -3,2723	0,98735	2,37 E-3
Midilli–Kucuk	A_1= 0,9806, k= 0,0414, n= 1,9532, A_2= -0,0092	0,99801	4,3 E-4
Henderson and Pabis	A_1=1,1300, k= 0,2513	0,91198	1,44 E-2
Two term	A_1= 50,845, k_1= 0,5299, A_2= -49,869, k_2= 0,5438	0,97793	4,82 E-3

Pour évaluer la précision de nouveau modèle 1, les valeurs calculées du rapport d'humidité MR à l'aide des modèles théoriques sont comparées aux valeurs MR mesurées expérimentalement (*Figure V.23*). Un bon accord entre les valeurs expérimentales et prévues du rapport d'humidité a été noté pour le nouveau modèle 1. Toutes les données de nouveau modèle proposé sont plus proches de la droite indiquant un meilleur ajustement.



N= 4 N= 8

N= 16

Figure V.23 : *Variation du rapport d'humidité prévue de nouveau modèle 1 avec le rapport d'humidité expérimentale pour les quartiers de tomates.*

V.3.4 Figue

Les valeurs des paramètres du modèle, le coefficient de corrélation et le khi-carré concernant le séchage de figue verte et noire dans le séchoir solaire mixte sont indiquées dans les *Tableaux V.15 et V.16*.

Les données expérimentales correspondent parfaitement au nouveau modèle1 qui montre une valeur supérieure du coefficient de corrélation (r^2) 0,99963 et 0,99844 et une valeur inferieurs de l'erreur khi-carré (χ^2) 5 E-5 et 2,2 E-4 pour figue verte et noire respectivement. Donc, le nouveau modèle1 est le meilleur pour définir les données de séchage de la figue.

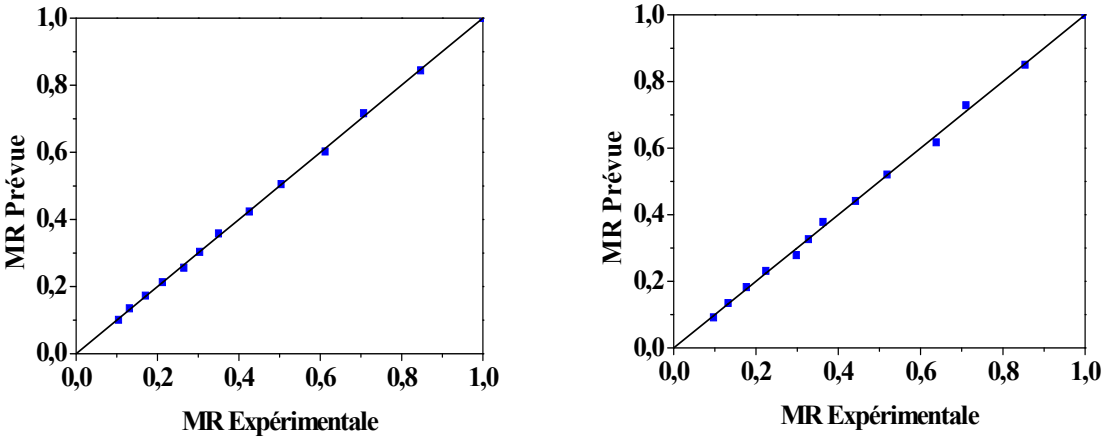
Tableau V.15 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour la figue verte.*

Modèles	**Paramètres des modèles**	**r^2**	**χ^2**
Nouveau Modèle1	A= 0,1100, n= 0,8932, A_1= -4,695, m= 0,8031, A_2= -1,725, p= 10,107	0,99963	5 E-5
Nouveau Modèle2	A= 92,009, n= 0,5100, A_1= -0,0067, m= 0,4665, A_2= -7,40E-6, p= -1828,9	0,99939	9 E-5
Page	k= 0,0385, n= 1,0362	0,99899	9 E-5
Logarithmique	A1= 1,0457, k= 0,0393, A2= -0,0483	0,99935	6 E-5
Midilli–Kucuk	A1= 1,0016, k= 0,0440, n= 0,9692, A2= -0,0010	0,99944	6 E-5
Henderson and Pabis	A1=1,0071, k= 0,0435	0,99865	1,2 E-4
Two term	A1= 40,667, k1= 0,0566, A2= -39,670, k2= 0,0571	0,99912	1 E-3

Tableau V.16 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour la figue noire.*

Modèles	**Paramètres des modèles**	**r^2**	**χ^2**
Nouveau Modèle1	A= 0,0231, n= 0,7218, A_1= -6,4613, m= 0,6732, A_2= -2,2353, p= 26,297	0,99844	2,2 E-4
Nouveau Modèle 2	A= 92,088, n= 0,4802, A_1= -0,0082, m= 0,4305, A_2= -6,1E-6, p= -1506,2	0,99763	3,3 E-4
Page	k= 0,0346, n= 1,0561	0,9959	3,6 E-4
Logarithmique	A1= 1,0925, k= 0,0343, A2= -0,1004	0,99725	2,7 E-4
Midilli–Kucuk	A1= 1,0029, k= 0,0456, n= 0,9135, A2= -0,0022	0,99775	2,4 E-4
Henderson and Pabis	A1=1,0097, k= 0,0152	0,99506	4,4 E-4
Two term	A1= 40,664, k1= 0,0580, A2= -39,670, k2= 0,0586	0,99629	4 E-4

Les valeurs calculées du rapport d'humidité MR à l'aide de nouveau modèle 1 sont comparées aux valeurs MR mesurées expérimentalement (*Figure V.24*). Un bon accord entre les valeurs expérimentales et prévues du rapport d'humidité a été noté pour le nouveau modèle 1. Toutes les données de nouveau modèle proposé sont plus proches de la droite dans le cas de la figue verte et noire indiquant un meilleur ajustement.



Figue verte Figue noire

Figure V.24 : *Variation du rapport d'humidité prévue de nouveau modèle 1 avec le rapport d'humidité expérimentale pour la figue.*

V.3.5 Poivron rouge

Les valeurs des paramètres du modèle, le coefficient de corrélation et le khi-carré concernant le séchage du poivron rouge dans le séchoir solaire mixte sont indiquées dans le *Tableau V.17*. La *Figure V.25* montre l'évaluation des variations du rapport d'humidité en fonction du temps de séchage avec les deux nouveaux modèles le plus adapté avec les données expérimentales de séchage du poivron rouge. On voit un bon ajustement entre les courbes expérimentale et prévue.

Les données expérimentales correspondent parfaitement au nouveau modèle1 qui montre une valeur supérieure du coefficient de corrélation (r^2) 0,99823 et une valeur inferieurs de l'erreur khi-carré (χ^2) 2,1 E-4 pour le poivron rouge. Donc, le nouveau modèle1 est le meilleur pour définir les données de séchage du poivron rouge.

La *Figure V.25* montre l'évaluation des variations du rapport d'humidité en fonction du temps de séchage avec les deux nouveaux modèles le plus adapté avec les données expérimentales de séchage du poivron rouge. On voit un bon ajustement entre les courbes expérimentale et prévue.

Tableau V.17 : *Résultats obtenus à partir des modèles pour le poivron rouge.*

Modèles	**Paramètres des modèles**	r^2	χ^2
Nouveau Modèle1	A= 0,1343, n= 1,0458, A_1= -10,204, m= 0,8484, A_2= -4,5511, p= 4,8533	0,99823	2,1 E-4
Nouveau Modèle 2	A= 98,907, n= 0,3891, A_1= -0,0102, m= 2,9822, A_2= 0,00001, p= 2430,3	0,99521	5,7 E-4
Page	k= 0,0113, n= 1,4347	0,97881	2,13 E-3
Logarithmique	A1= 1,7683, k= 0,0185, A2= 0,7644	0,9908	9,6 E-4
Midilli–Kucuk	A1= 0,9886, k= 0,0193, n= 1,1307, A2= -0,0051	0,99079	1,01 E-3
Henderson and Pabis	A1=1,0911, k= 0,0489	0,95069	4,95 E-3
Two term	A1= 40,632, k1= 0,0889, A2= -39,67, k2= 0,091	0,97668	2,55 E-3

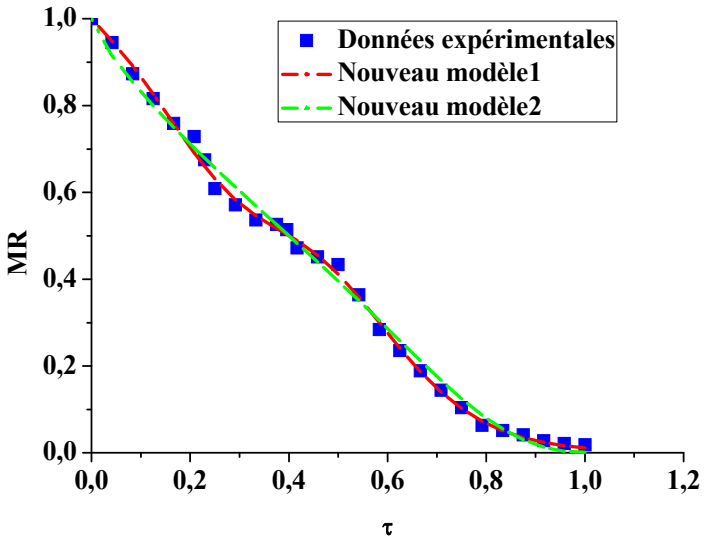


Figure V.25 : *Variation du rapport d'humidité avec le nouveau modèle 1 pour le poivron rouge.*

V.4 VALIDATION DU NOUVEAU MODELE1 AVEC DES DONNEES EXPERIMENTALES DE LA LITTERATURE

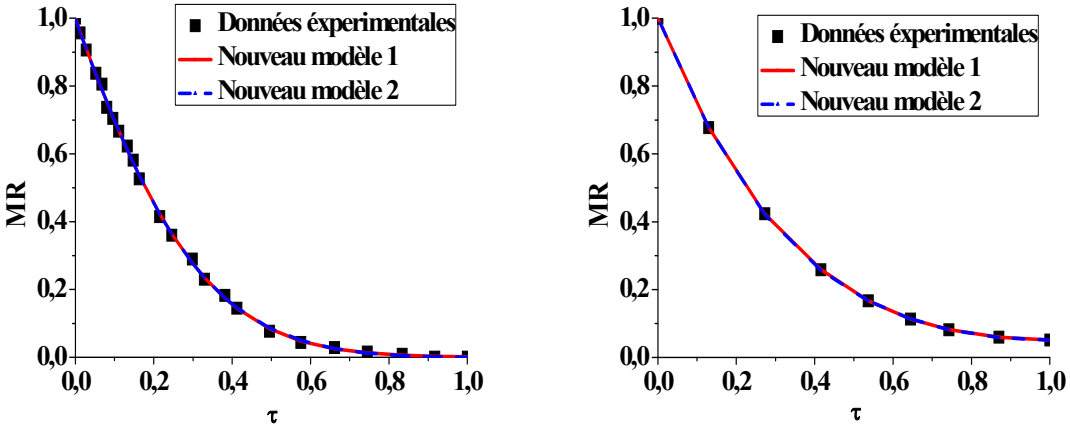
Les données expérimentales de la littérature ont été utilisées pour tester la robustesse des modèles suggérés en fonction de diverses conditions de fonctionnement (vitesse de l'air, température), de différentes conceptions et de différents types de produits. Le *Tableau V.18* présente diverses conceptions et conditions de fonctionnement des séchoirs choisi de la littérature.

Tableau V.18 : *Différentes conceptions et conditions de fonctionnement des séchoirs choisies de la littérature.*

	Type de séchoir	**T_m (°C)**	**Vitesse d'air (ms^{-1})**	**Produit**	**Forme de produit**
Yaldiz et al., 2001	Séchoir solaire indirect	60	0,5	Raisin Sultana	sphérique
Tunde-Akintunde, 2011	Séchoir solaire type cabinet	38,9	2	Piment	conique
Koua et al., 2009	Séchoir solaire direct avec cheminée	52	0	banane plantain	Tranche
				Manioc	Tranche
				Mangue	Tranche

Les nouveaux modèles suggérés ont été évalués à l'aide de données expérimentales sélectionnées dans la littérature pour une variété de produits alimentaires; à savoir les raisins Sulatana, les bananes, les mangues, le manioc et les piments. Les produits sélectionnés ont naturellement des structures et des porosités différentes de celles des Produit utilisé dans cette étude (Tomate, pomme de terre et abricot). Comme le montre la *Figure V.26*, les modèles proposés se sont avérés être en bon accord avec les données expérimentales.

Les coefficients de corrélation des modèles proposés sont comparés à ceux obtenus de l'étude de Koua et al., 2009 (les bananes plantains, les mangues et le manioc) comme il est illustré sur la *Figure V.27*.



(a) Piment (b) Raisin Sultana

Figure V.26 : *Variation du rapport d'humidité des deux modèles proposés avec le rapport d'humidité expérimental de la littérature.*

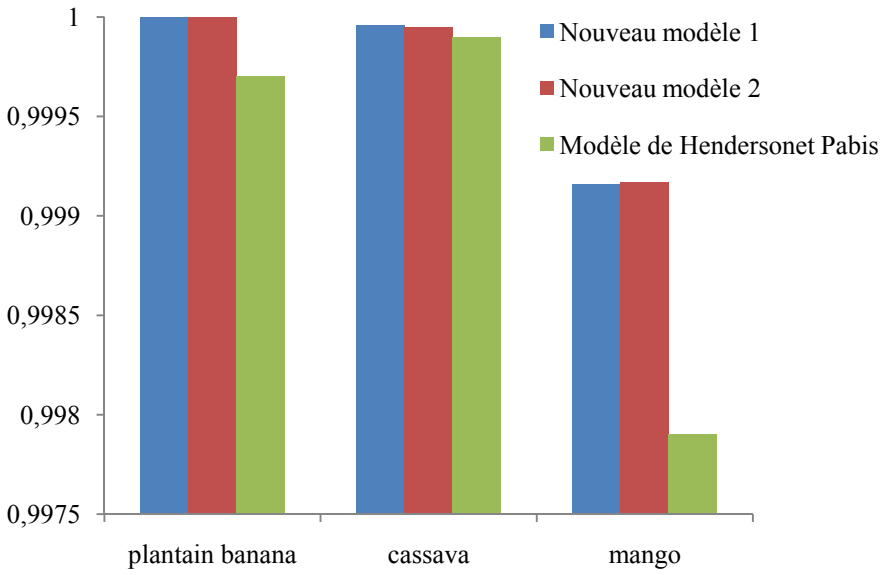


Figure V.27 : *Evaluation des coefficients de corrélation pour les trois produits utilisés par Koua et al. (2009).*

Une comparaison entre les deux nouveaux modèles et les meilleurs modèles trouvés dans la littérature pour les raisins Sulatana, les bananes, les mangues, les maniocs et les piments, en utilisant le coefficient de corrélation, l'erreur khi-carré et l'erreur quadratique moyenne est présentée dans le *Tableau V.19*. Les deux nouveaux modèles ont des valeurs élevées de (r^2) et des valeurs faibles de (χ^2) et de REQM par rapport à celles obtenues avec les modèles de deux termes, page et Henderson et Pabis.

Les données ont confirmé que les deux nouveaux modèles sont universels et peuvent parfaitement caractériser les courbes de séchage de différents produits agricoles dans différentes conditions de fonctionnement, quel que soit le type de conception.

Tableau V.19 : *Résultats obtenus à partir du nouveau modèle2 pour les produits de la littérature.*

Référence	Produit	Modèle	Paramètres	r^2	χ^2	REQM (%)
Yaldiz et al., 2001	Raisin Sultana	Nouveau Modèle 1	A= 37,308, n= 1,8024, A_1= 5,3469, m= 1,7035, A_2= 1,3649, p= 1,3307	0,999999	1,34E-7	0,02
		Nouveau Modèle 2	A= 0,2868, n= 6,6147, A_1= 10,136, m= 0,5381, A_2= 0,0009, p= 14024	0,99999	3,23E-6	0,11
		Two term	A_1= 0,1943, k_1= 6,3513, A_2= 0,8057, k_2= 0,0339	0,95837	3,4 E-3	/
Tunde-Akintunde, 2011	Piment	Nouveau Modèle 1	A= 0,4512, n= 1,57E7, A_1= 3,05E6, m= 0,9896, A_2= -1,2479, p= 7,0576	0,99953	7 E-5	0,73
		Nouveau Modèle 2	A= 11,102, n= 0,3765, A_1= -0,0870, m= 0,6966, A_2= 0,0005, p= 814,65	0,99953	7 E-5	0,74
		Page	k= 1,1894, n= 1,3373	0,9991	1,2E-4	1,14
Koua et al., 2009	Banane plantain	Nouveau Modèle 1	A= 0,2712, n= 0,7744, A_1= 5,7142, m= 0,5743, A_2= -1,6343, p= 2,5100	0,999999	3,77E-7	0,05
		Nouveau Modèle 2	A= 5,3709, n= 0,2658, A_1= -0,0861, m= 0,6130, k_2= 0,0307, p= 10,145	0,999999	3,92E-7	0,05
		Henderson and Pabis	A_1=0,1206, k= 0,9856	0,9997	4,20E-5	0,61
	Cassava	Nouveau Modèle 1	A= 0,3686, n= 2,7026, A_1= 6,6703, m= 1,0176, A_2= -0,1655, p= 5,5143	0,99996	4,08E-6	0,16
		Nouveau Modèle 2	A= 1,3772, n= 0,8813, A_1= -0,1026, m= 0,4931, A_2= 0,0104, p= 130,17	0,99995	5,23E-6	0,18
		Henderson and Pabis	A_1=0,1250, k= 1,0137	0,9999	1,52E-5	0,37
	Mango	Nouveau Modèle 1	A= 0,47778, n= 1,4934, A_1= 6,5357, m= 0,6653, A_2= -1,8269, p= 2,4153	0,99916	8 E-5	0,77
		Nouveau Modèle 2	A= 30131, n= 0,2684, A_1= -0,00003, m= 0,9831, A_2= 0,0002, p= 0,8224	0,99917	7 E-5	0,7
		Henderson	A_1=0,1119, k= 1,0489	0,9979	4,89E-5	2,14

V.5 CALCUL DU COEFFICIENT DE DIFFUSION EFFECTIVE

La diffusivité effective est l'une des propriétés physiques permettant de caractériser les transferts de masse au sein de milieux poreux. La mesure du paramètre est essentielle lors de la modélisation du séchage. Les coefficients de diffusivité effectives pour les différents produits séchés ont été calculés à l'aide de la loi de Fick. Les pentes sont calculées selon deux méthodes. La première méthode consiste à obtenir la pente d'une droite ajustée aux points de données expérimentales en utilisant la méthode des moindres carrés. Quant à la deuxième méthode, D_{eff} est calculée à partir des pentes de tous les deux points adjacents, puis le coefficient de diffusion effective D_{meff} est pris comme valeur moyenne de toutes les valeurs individuelles de D_{eff}.

V.5.1 Calcul avec ajustement linéaire

a) Pomme de terre

La *Figure V.28* montre la variation de ln (MR) en fonction du temps. La pente de la droite, β, est de 2,33 E-4. La pente de la ligne est donnée par un ajustement avec données expérimentales utilisons le logiciel OriginLab. Le coefficient de diffusion effective D_{eff} a été calculé à l'aide et présenté dans le *Tableau V.20*.

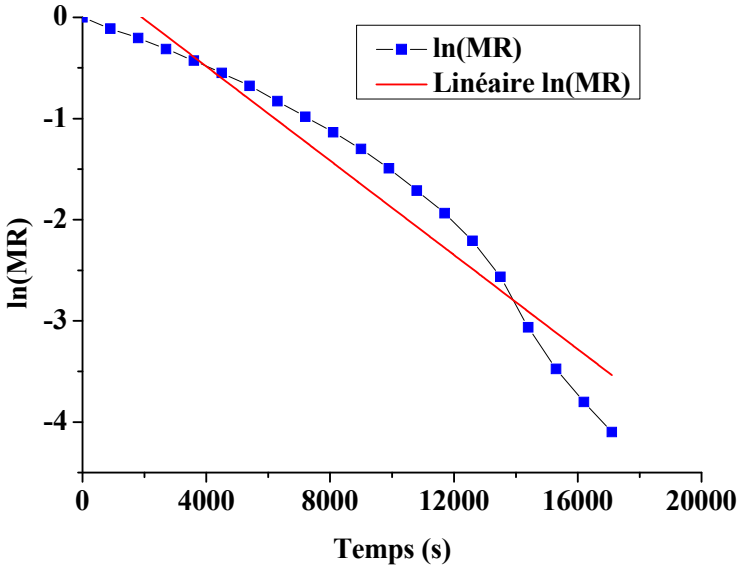
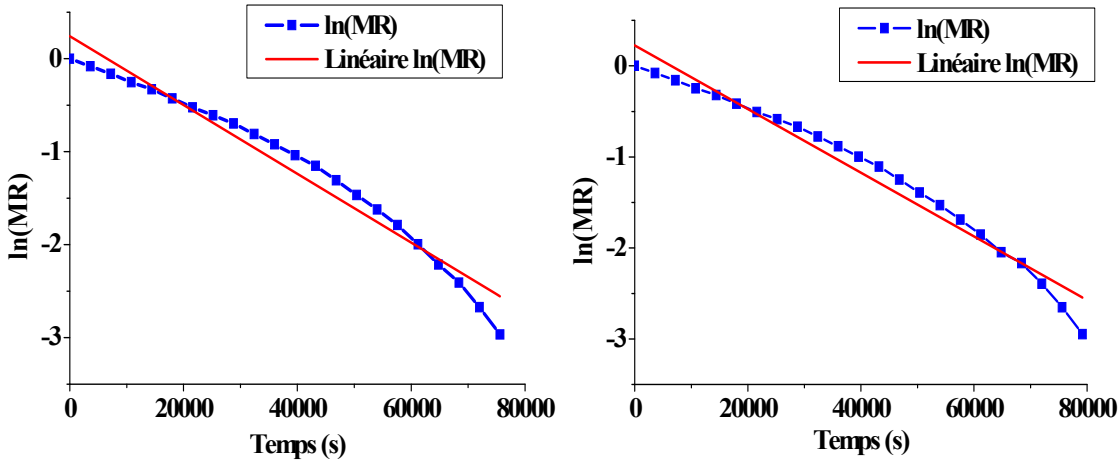


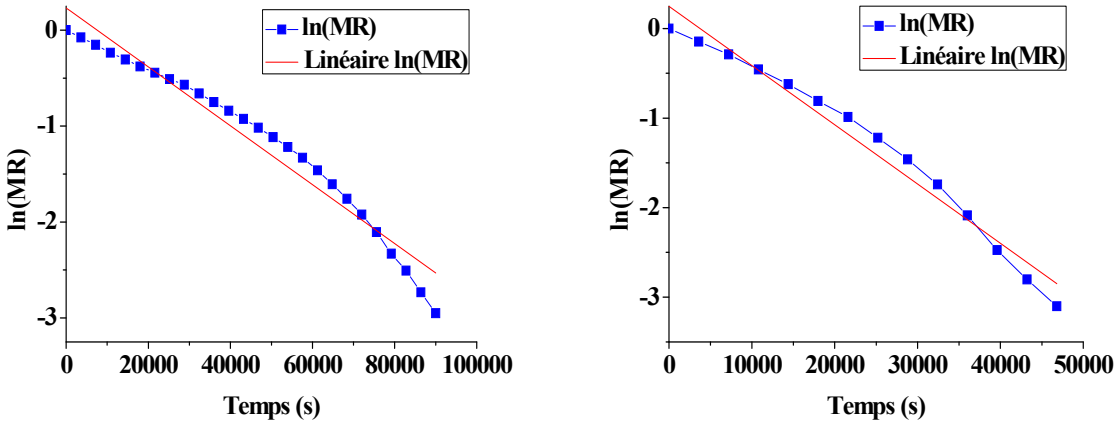
Figure V.28 : *Variation du ln (MR) en fonction du temps pour la pomme de terre*

b) Abricot

La *Figure V.29* montre la variation du ln (MR) en fonction du temps pour les différents cas étudiés. La pente de ligne β obtenue est égale à 3,1 E-5, 3,5 E-5, 3,7 E-5 et 6,6 E-5. Le coefficient de diffusion effective D_{eff} a été calculé et présenté dans le *Tableau V.20*.



Traité à la vapeur Bouillie



Naturel Coupé

Figure V.29 : *Variation du ln (MR) en fonction du temps pour l'abricot*

c) Tomate

- ***Rondelles de tomate avec différente épaisseur***

La *Figure V.30* montre la variation du ln (MR) en fonction du temps pour différentes épaisseurs. La ligne de pente β obtenue est égale à 2,34 E-4, 1,23 E-4, 8 E-5 et 5 E-5. Le coefficient de diffusion effective D_{eff} a été calculé et présenté dans le *Tableau V.20*.

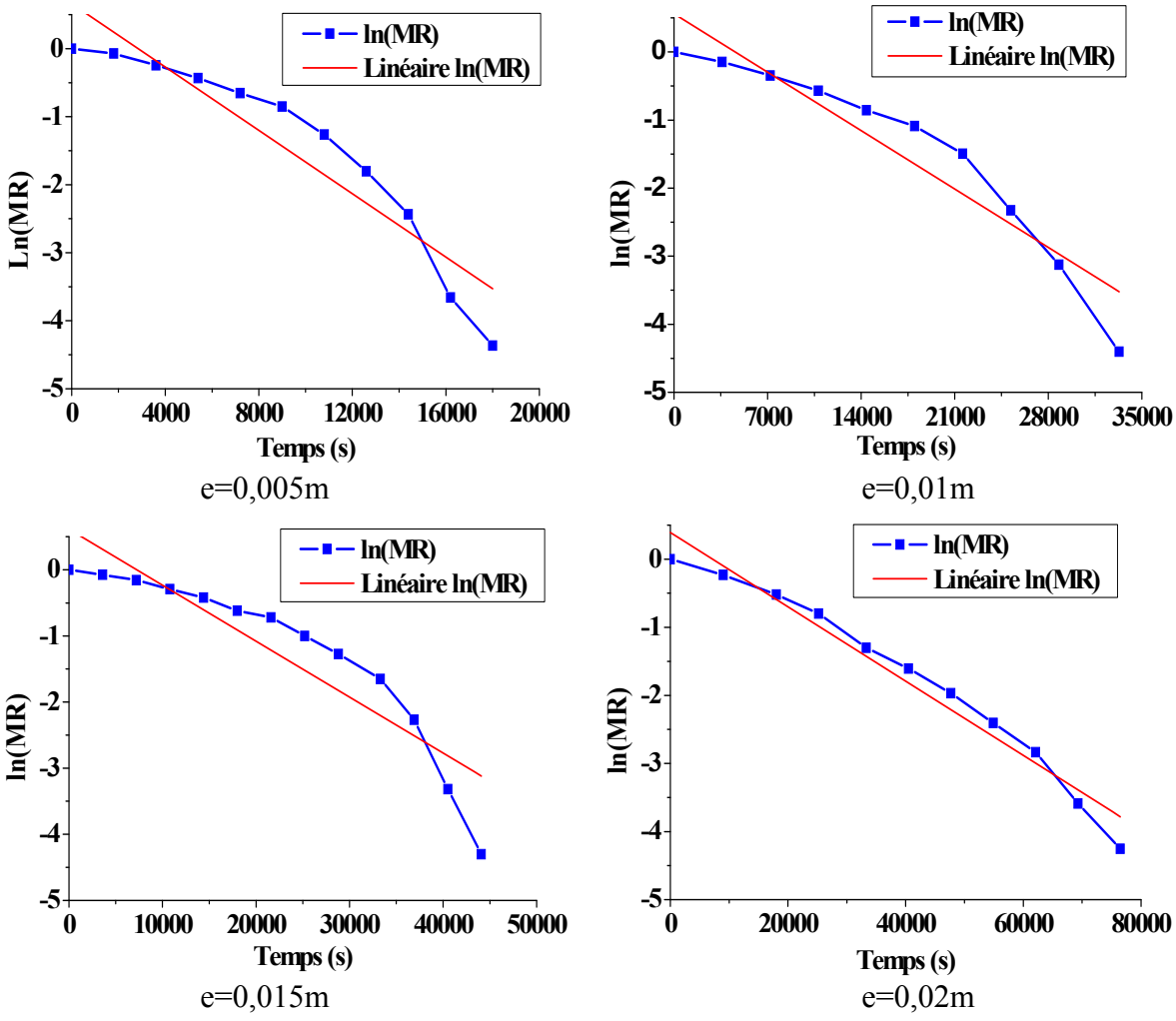


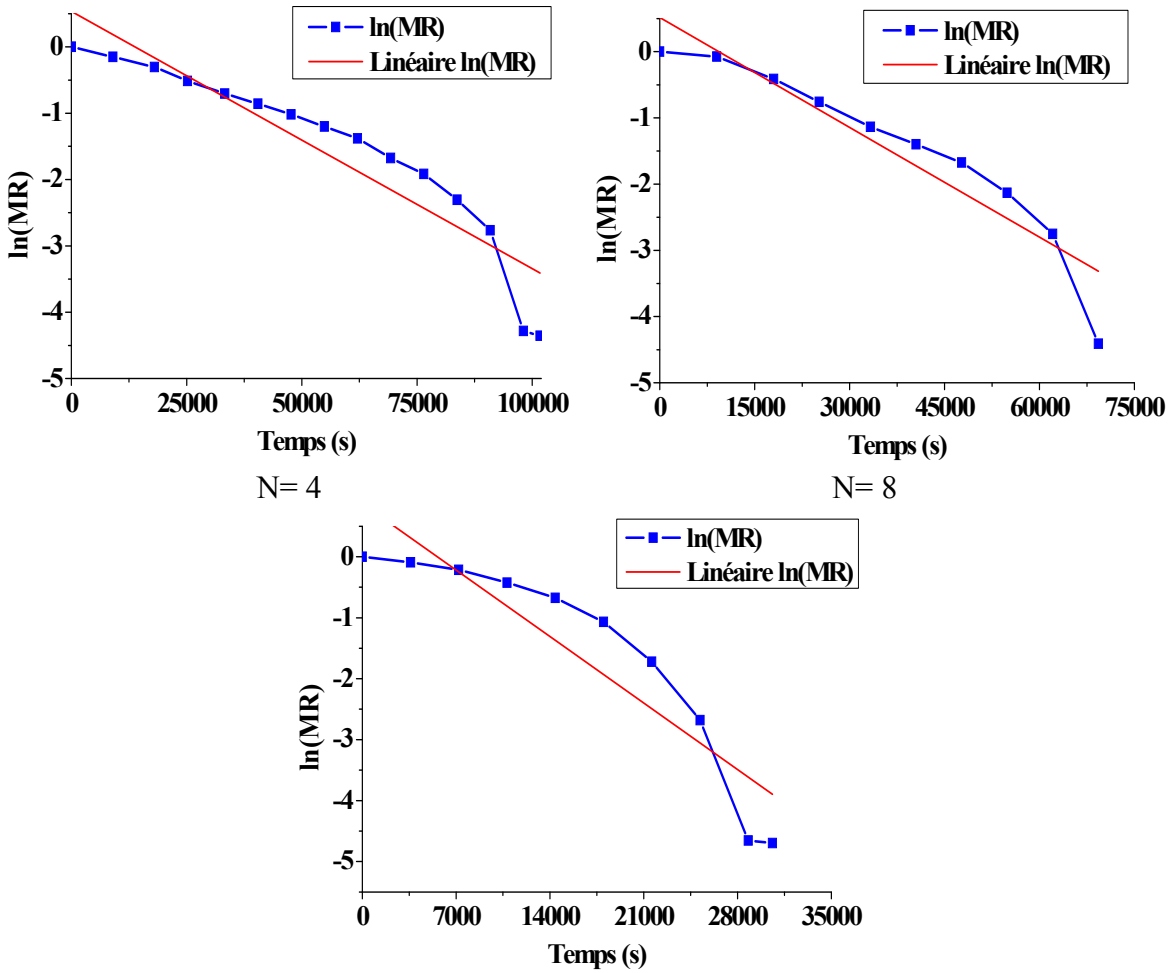
Figure V.30 : *Variation de ln (MR) en fonction du temps pour les rondelles de tomates.*

- ***Quartier de tomate avec différent nombre***

La variation du nombre de ln (MR) en fonction du temps pour différents nombres de quartiers de tomates est présentée dans la *Figure V.31*. La ligne de pente β obtenue est égale à 4E-5, 6E-5 et 1.56E-4. En utilisant les valeurs de pente, le coefficient de diffusion effective D_{eff} est calculé et illustré dans le *Tableau V.20*.

d) Figue

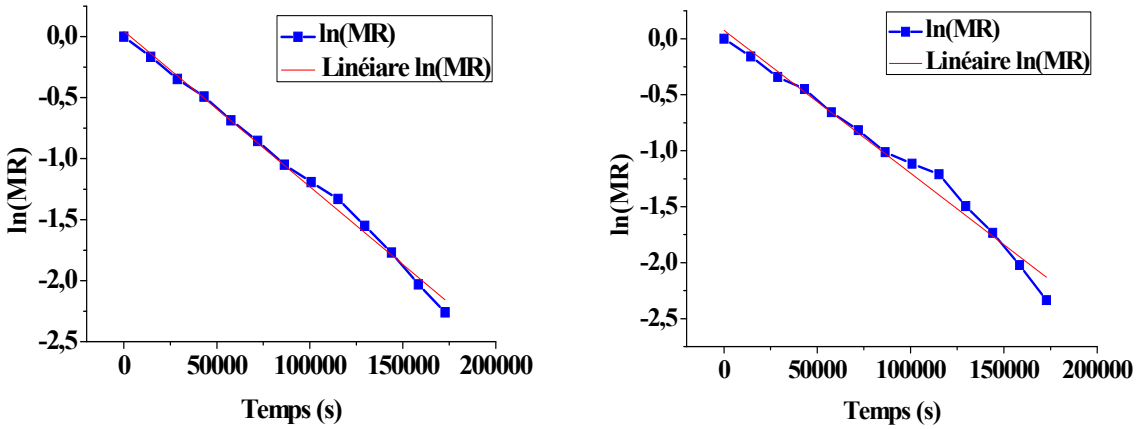
La variation du nombre de ln (MR) en fonction du temps pour la figue verte et noire est présentée dans la *Figure V.32*. La ligne de pente β obtenue est égale à 1,27E-5 et 1.28E-5. En utilisant les valeurs de pente, le coefficient de diffusion effective D_{eff} est calculé et illustré dans le *Tableau V.20*.



N= 4 N= 8

N= 16

Figure V.31 : *Variation de ln (MR) en fonction du temps pour les quartiers de tomate.*



Verte Noire

Figure V.32 : *Variation de ln (MR) en fonction du temps pour la figue.*

e) Poivron rouge

La variation du nombre de ln (MR) en fonction du temps pour le poivron rouge est présentée dans la *Figure V.33*. La ligne de pente β obtenue est égale à 2,30E-5. En utilisant les valeurs de pente, le coefficient de diffusion effective D_{eff} est calculé et illustré dans le *Tableau V.20.*

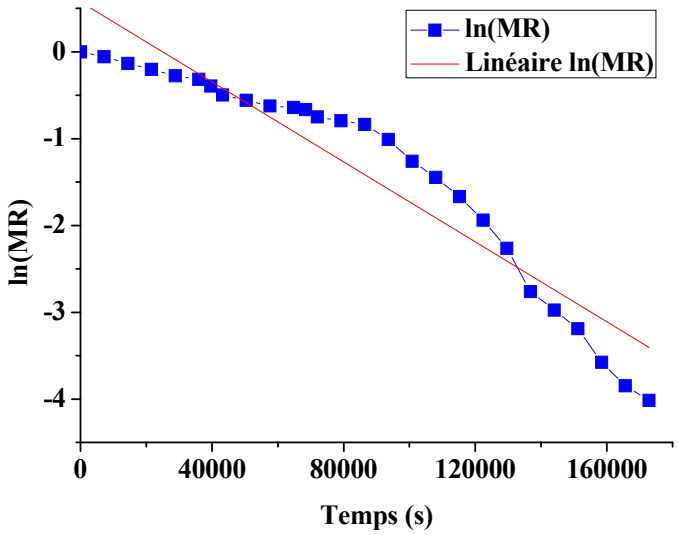


Figure V.33 : *Variation de ln (MR) en fonction du temps pour le poivron rouge.*

V.5.2 Calcul en utilisant la pente entre 2 points de mesure

Le D_{eff} obtenu en utilisant des pentes de chaque deux points adjacents a été utilisé pour calculer la moyenne du coefficient de diffusion effective est présentée dans le *Tableau V.20*. Le coefficient de diffusion effective calculé en ajustement linéaire et en utilisant des pentes de tous les deux points adjacents a presque les mêmes valeurs pour tous les produits séchés (pomme de terre, abricot, tomate, figue et poivron rouge).

Le *Tableau V.20* contient les valeurs du coefficient de diffusion obtenues à partir des deux méthodes de calcul pour tous les produits séchés dans le séchoir solaire mixte.

Les graphes logarithmiques de l'évolution expérimentale de la teneur en eau montrent clairement la non-linéarité de la cinétique de séchage. Celles-ci montrent que le coefficient de diffusivité effective varie considérablement avec la teneur en eau du produit pendant le séchage solaire. Au cours du processus de séchage, les valeurs du coefficient de diffusivité massique augmentent avec la diminution de la teneur en eau. Ce résultat est en parfait accord avec ceux

trouvés par Sharma et al. (2005), Karatanos et al. (1990) et Erenturk (2007) pour les produits agroalimentaires.

Tableau V.20 : *Coefficient de diffusion effective des produits séchés.*

Produit			Le coefficient de diffusion effective D_{eff}	Le coefficient de diffusion effective moyen D_{meff}
Pomme de terre	/	e= 0,005m	5,90E-10	6,07E-10
Abricot	/	Traité à la vapeur	3,37E-09	3,58E-09
		Bouillie	3,19E-09	3,39E-09
		Naturel	2,80E-09	2,99E-09
		Coupé	6,04E-09	6,04E-09
Tomate	**Rondelles**	e=0,005m	5,90E-10	6,14E-10
		e=0,01m	1,25E-09	1,30E-09
		e=0,015m	1,82E-09	2,23E-09
		e=0,02m	2,03E-09	2,30E-09
	Quartiers	N=4	2,74E-09	2,95E-09
		N=8	1,37E-09	1,51E-09
		N=12	8,89E-10	8,34E-10
Figue	**Verte**	Naturel	1,16E-09	1,19E-09
	Noire	Naturel	1,17E-09	1,23E-09
Poivron rouge	/	Naturel	2,10E-09	2,09E-09

V.6 CALCUL DE L'ENERGIE D'ACTIVATION

L'énergie d'activation est l'énergie nécessaire pour déclencher le phénomène de diffusion massive dans les produits agricoles (Mittal, 1999). Les valeurs calculées de l'énergie d'activation sont reportées dans le *Tableau V.21*.

Les valeurs de l'énergie d'activation obtenue varient entre 5,05E4 et 6,54E4 J/mole pour l'abricot, entre 2,23E4 et 1,21E5 J/mole pour la tomate, 7,34E4 et 6,19E4 J/mole pour la figue, 3,78E4 J/mole pour le poivron rouge et 7,44E4 J/mole pour la pomme de terre. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Zogzas et al. (1996) pour un bon nombre de produits alimentaires avec des valeurs d'énergie d'activation comprises entre 12,7 et 110 kJ/mol, à l'exception de la valeur obtenue pour le cas de tomate avec l'épaisseur de 0,005m qui est légèrement supérieure 1,21E5 J/mole.

Tableau V.21 : *Coefficient d'énergie d'activation pour les produits séchés.*

Produit			Le coefficient d'énergie d'activation E_a (J/mole)
Pomme de terre	/	e = 0,005m	7,44E4
Abricot	/	Traité à la vapeur	5,36E4
		Bouillie	5,05E4
		Naturel	5,27E4
		Coupé	6,54E4
Tomate	**Rondelles**	e=0,005m	1,21E5
		e=0,01m	3,90E4
		e=0,015m	3,71E4
		e=0,02m	2,23E4
	Quartiers	N=4	3,83E4
		N=8	4,33E4
		N=12	7,97E4
Figue	**Verte**	Naturel	7,34E4
	Noire	Naturel	6,19E4
Poivron rouge	/	Naturel	3,78E4

La valeur de l'énergie d'activation obtenue est élevée en raison de la quantité d'humidité dans l'air (climat côtier), de la forme du produit et de l'épaisseur des produits. Ces différences dans les valeurs d'énergie d'activation sont principalement dues à la constitution différente des produits.

V.7 CALCUL DES PARAMETRES THERMODYNAMIQUE DE SECHAGE

L'enthalpie ΔH, le changement d'énergie libre de Gibbs ΔG et l'entropie S, ont été calculés et présentés dans le *Tableau V.22* pour la pomme de terre, l'abricot et la tomate. Une valeur négative élevée de l'énergie libre de Gibbs reflète un séchage plus favorable sur le plan énergétique. Les valeurs d'enthalpie et d'entropie obtenues à l'aide du modèle de la littérature sont supérieures à celles obtenues à l'aide de la nouvelle approche proposée, ce qui conduit à une valeur négative plus élevée de l'énergie libre de Gibbs. La première approche repose sur différentes hypothèses simplificatrices et en particulier sur le coefficient de partage classiquement utilisé en adsorption.

Tableau V.22 : *Paramètres de séchage thermodynamiques pour les produits séchés*

Produit			Enthalpie ΔH (J.mol^{-1})		Entropie ΔS (J.mol^{-1}K^{-1})		Énergie libre de Gibbs ΔG (J.mol^{-1})	
			Première nouvelle approche	Seconde nouvelle approche	Première nouvelle approche	Seconde nouvelle approche	Première nouvelle approche	Seconde nouvelle approche
Pomme de terre	épaisseur	e=0,005m	2,03E5	7,17E4	6,53E2	3,46E2	-1,14E3	-4,15E4
Abricot	Traitement d'abricot	Traité à la vapeur	2,89E5	5,08E4	8,89E2	2,67E2	-2,77E3	-3,68E4
		Bouillie	3,16E5	4,78E4	9,70E2	2,69E2	-3,44E3	-4,03E4
		Naturel	2,88E5	4,95E4	8,84E2	2,80E2	-2,42E2	-4,23E4
		Coupé	2,91E5	6,28E4	8,99E2	3,32E2	-4,09E3	-4,56E4
Tomate	Rondelles	e=0,005m	2,94E5	1,18E5	8,98E2	4,85E2	-1,87E3	-4,13E4
		e=0,01m	1,17E5	3,62E4	3,63E2	2,38E2	-1,76E3	-4,18E4
		e=0,015m	1,16E5	3,44E4	3,58E2	2,33E2	-9,16E2	-4,18E4
		e=0,02m	1,26E5	1,96E4	3,99E2	1,93E2	-4,27E3	-4,38E4
	Quartier	N=4	8,36E4	8,10E4	2,57E2	3,89E2	-1,22E3	-4,74E4
		N=8	1,55E5	1,03E5	4,80E2	4,62E2	-2,46E3	-4,84E4
		N=12	2,02E5	1,84E5	6,20E2	7,15E2	-2,74E3	-4,97E4
Figue	Verte	Naturel	1,50E5	7,07E4	4,64E2	3,48E2	-1,50E3	-4,32E4
	Noire	Naturel	1,61E5	5,92E4	4,96E2	3,12E2	-1,34E3	-4,31E4
Poivron rouge		Naturel	1,08E5	3,51E4	3,32E2	2,42E2	-1,95E3	-4,48E4

Dans cette étude, un coefficient de partage du séchage défini par analogie avec le processus d'adsorption; tandis que la seconde approche est basée sur le coefficient de diffusion moléculaire effective et la constante D_0, en utilisant une analogie avec le théorème de Vaschy-Buckingham (théorème de π).

L'enthalpie est une fonction d'état, couramment utilisée lors de l'étude des changements d'état mettant en jeu l'énergie d'un système dans de nombreux processus chimiques, biologiques et physiques. Pour les processus effectués à pression constante comme le séchage solaire, la variation d'enthalpie correspond à la chaleur absorbée. Les valeurs d'enthalpie étaient positives car il s'agit d'un processus d'absorption de chaleur, c'est-à-dire endothermique (Shafaei et al.,

2016). Des valeurs d'enthalpie plus faibles indiquent qu'une énergie plus faible est nécessaire pour que le processus se produise.

L'entropie peut être interprétée comme une mesure du degré de désordre d'un système au niveau microscopique ; plus l'entropie du système est élevée, plus le désordre est élevé. Le séchage solaire est un exemple d'augmentation d'entropie, comme une augmentation du désordre dans les molécules d'eau dans la matrice solide. Le changement d'entropie (ΔS) exprime le caractère aléatoire des constituants du système thermodynamique (séchage).

L'énergie libre de Gibbs est une quantité qui peut être considérée comme une mesure du travail effectué par le système en cours d'adsorption ou de désorption (Shaik et Kailappan, 2007). L'énergie libre de Gibbs elle est la fonction d'état thermodynamique la plus appropriée pour étudier les équilibres chimiques. L'énergie libre de séchage de Gibbs est donc composée de deux termes, le premier est l'enthalpie qui exprime les énergies d'interaction entre les molécules et la surface de séchage, et le second terme est l'entropie du processus qui exprime la modification et l'arrangement des molécules dans la phase liquide et à la surface du solide. La fonction ΔG permet ainsi de définir le sens de la réaction et son état d'équilibre. Un changement d'état physique, tel que le séchage, peut être considéré comme une réaction chimique surfacique particulière.

Les valeurs d'énergie libre de Gibbs négatives indiquent que le processus de séchage se produit spontanément. Les valeurs de ΔG augmentent en valeur absolue avec la température, ce qui indique le degré de spontanéité du processus de séchage. Le processus de séchage est donc possible thermodynamiquement à une température de séchage fixe et la valeur négative plus élevée reflète un séchage plus favorable sur le plan énergétique.

V.8 SIMULATION NUMERIQUE D'UN CAPTEUR SOLAIRE A AIR

Dans notre étude, l'effet du nombre d'obstacles et l'angle d'inclinaison sur le rendement thermique d'un capteur à air est analysé et discuté. Le générateur du maillage Gambit est utilisé pour dessiner la géométrie et les résultats sont obtenus à l'aide du logiciel de calcul Fluent. L'amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire à air en utilisant des obstacles dans le canal d'air est une technique très reconnue.

V.8.1 Etude du maillage

L'influence du maillage sur la simulation de l'écoulement de l'air à l'intérieur d'un canal a été étudiée et analysée. Les quatre cas de maillages utilisés sont illustrés dans le *Tableau V.23*.

Tableau V.23 : *Différent maillages utilisés.*

Maillage	Espacement entre les mailles	Faces maillés
1	0,004	14172
2	0,003	25606
3	0,002	56266
4	0,001	223714

Les valeurs de températures obtenues dans les cas de maillage3 et maillage4 sont très similaires (voir *Figure V.34*). Le maillage 3 présente des résultats acceptables par rapport aux autres maillages 1, 2 et 4 avec un temps du calcul optimal.

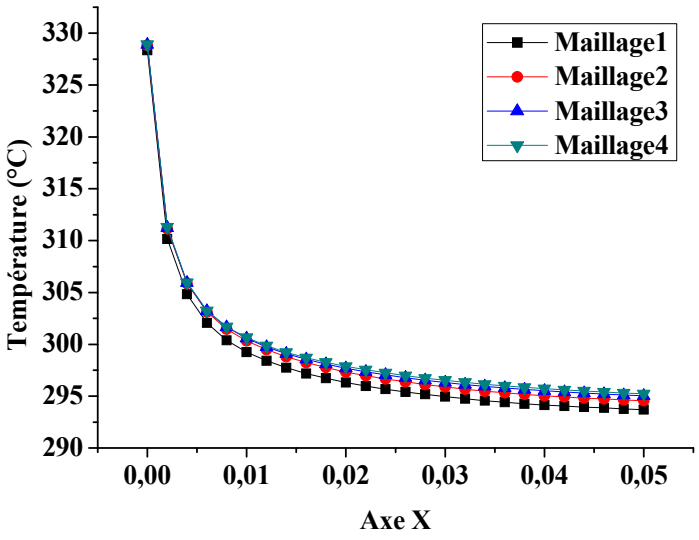


Figure V.34 : *Variation de la température sur l'axe X pour des différents maillages.*

V.8.2 Effet du nombre d'obstacle

Plusieurs nombres d'obstacles ont été utilisés pour améliorer l'efficacité du capteur solaire. Le cas du canal sans obstacles a été considéré comme un cas de référence. Les *Figures V.35, V.36 et V.37* illustrent les contours de la température, de la vitesse et de l'énergie cinétique turbulente dans le canal d'air avec un nombre d'obstacles variés. Il est noté que le transfert de chaleur est considérablement amélioré avec le renforcement du nombre d'obstacle.

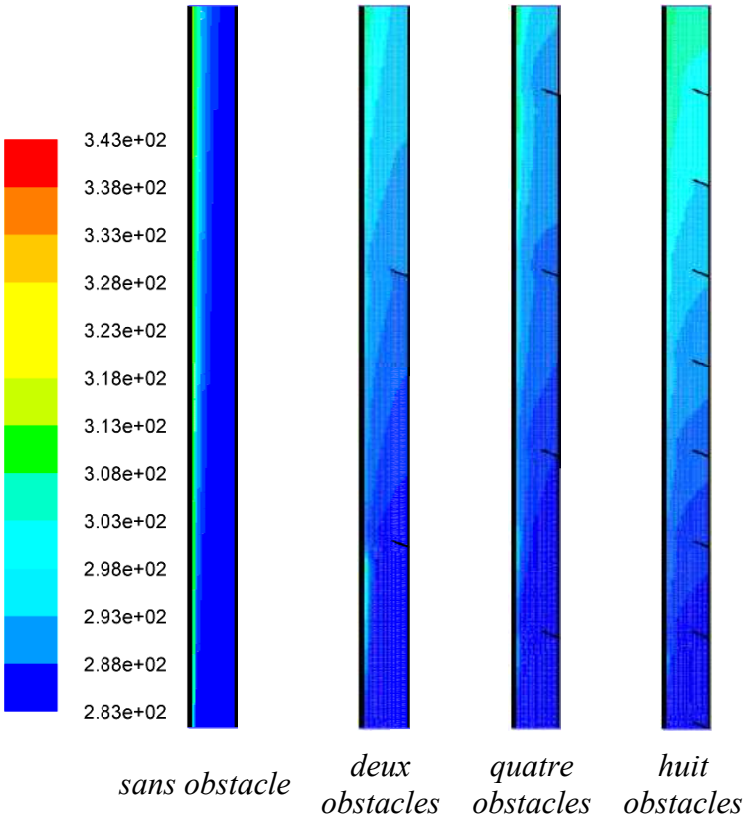


Figure V.35 : *Contour de température dans le canal d'air avec différent nombre d'obstacles.*

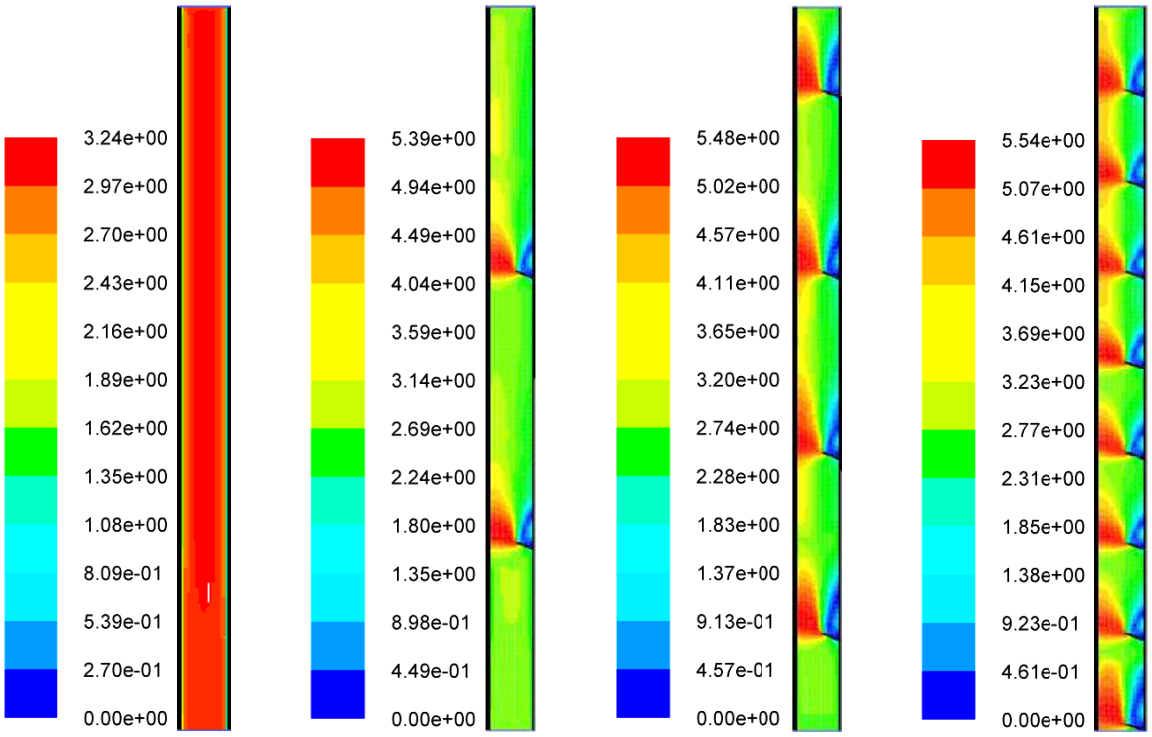


Figure V.36 : *Contours de vitesse d'air pour différent nombre d'obstacles.*

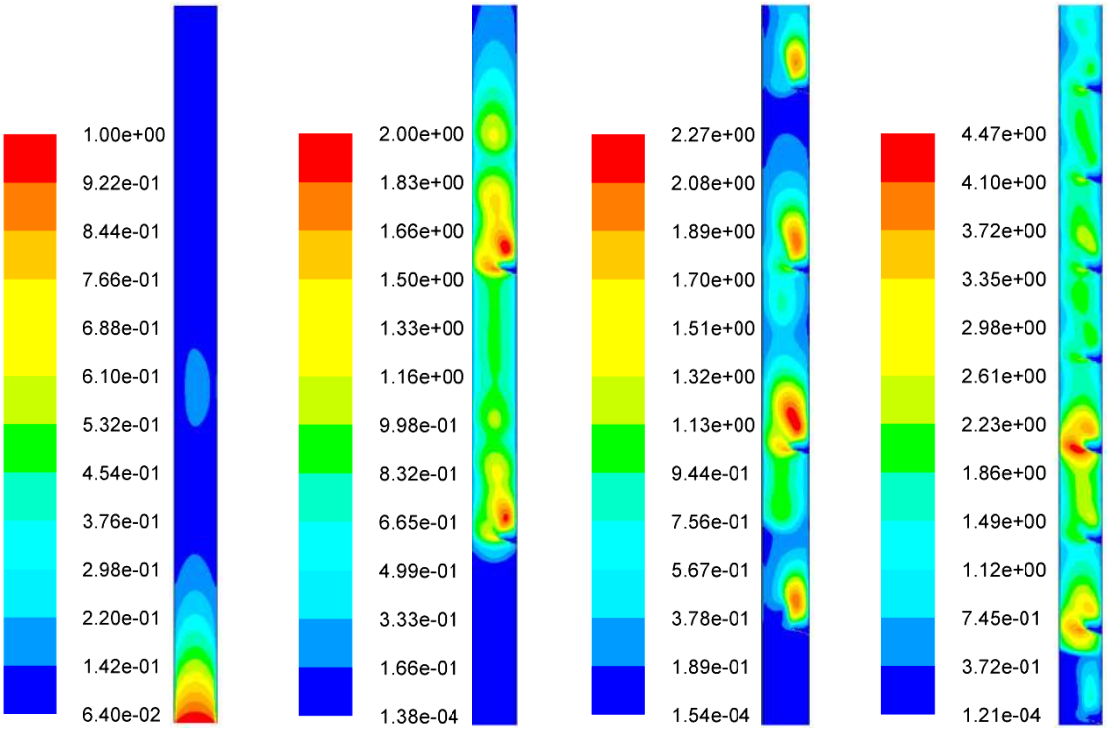


Figure V.37 : *Contour d'énergie cinétique turbulente k (m²/ s²) pour différent nombre d'obstacles.*

La vitesse maximale de l'air 5,5 m/s est obtenue au niveau de rétrécissement crée par les obstacles. L'augmentation de nombre des obstacles n'a aucun effet sur la valeur maximale de la vitesse (changement est négligeable).

La variation du profile de température en fonction du nombre d'obstacles est présentée dans la *Figure V.38*. Les résultats montrent que la température moyenne à la sortie s'élève proportionnellement avec l'augmentation de nombre d'obstacles du canal.

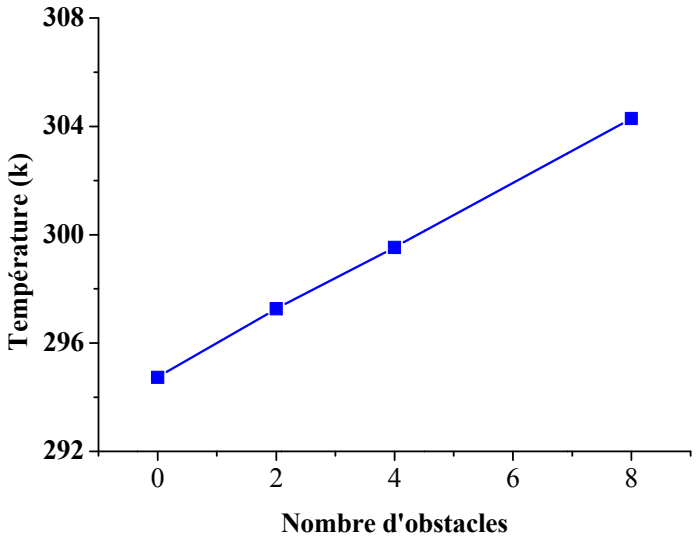


Figure V.38 : *Variation de température en fonction de nombre d'obstacles.*

V.8.3 Effet de l'angle d'inclinaison d'obstacle

Le meilleur cas avec huit obstacles a été sélectionné pour examiner l'effet de l'inclinaison de l'angle d'obstacle sur le rendement thermique du capteur. Des différents angles d'inclinaison des obstacles (15, 30, 45 et 60 °) ont été considérés dans notre étude.

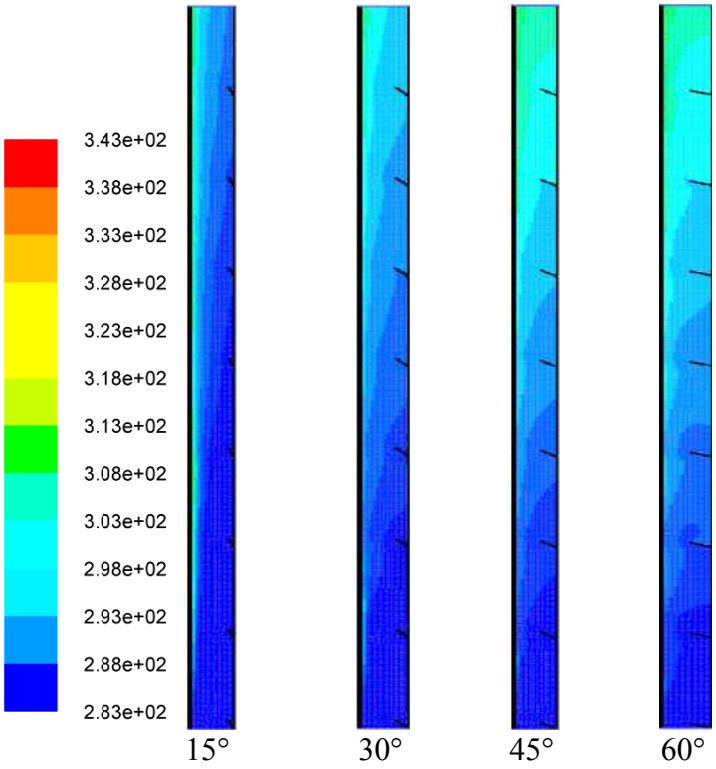


Figure V.39 : *Contour de température dans le cas d'un canal d'air avec 8 obstacles et différents angles d'inclinaison.*

Les *Figure V.39, V.40 et V.41* illustrent les contours de température, de vitesse et d'énergie cinétique turbulente dans le canal d'air avec différents angles d'inclinaison. Il a été remarqué que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison. Les cas où l'angle d'inclinaison égale à 45° et 60°, la propagation de la température dans l'air est meilleure dans le canal. Cette amélioration du transfert de chaleur est due à l'intensité de turbulence générée par les obstacles.

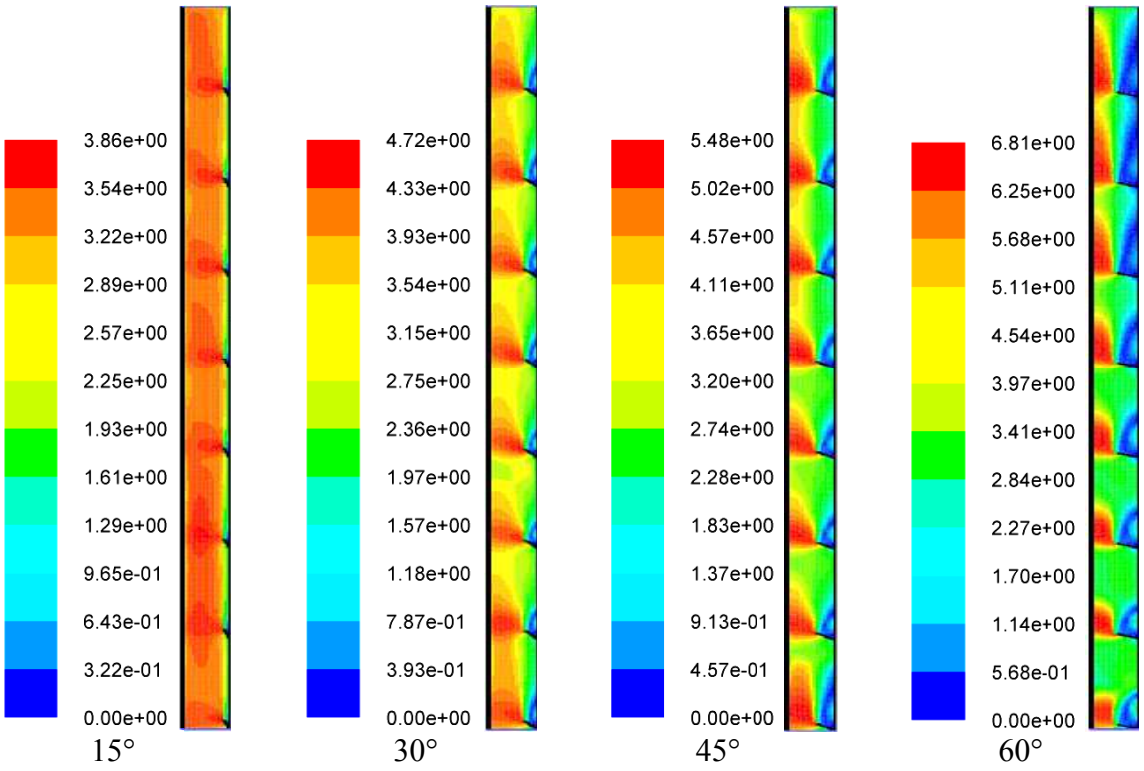


Figure V.40 : *Contours de vitesse pour un canal avec différents angles d'inclinaison.*

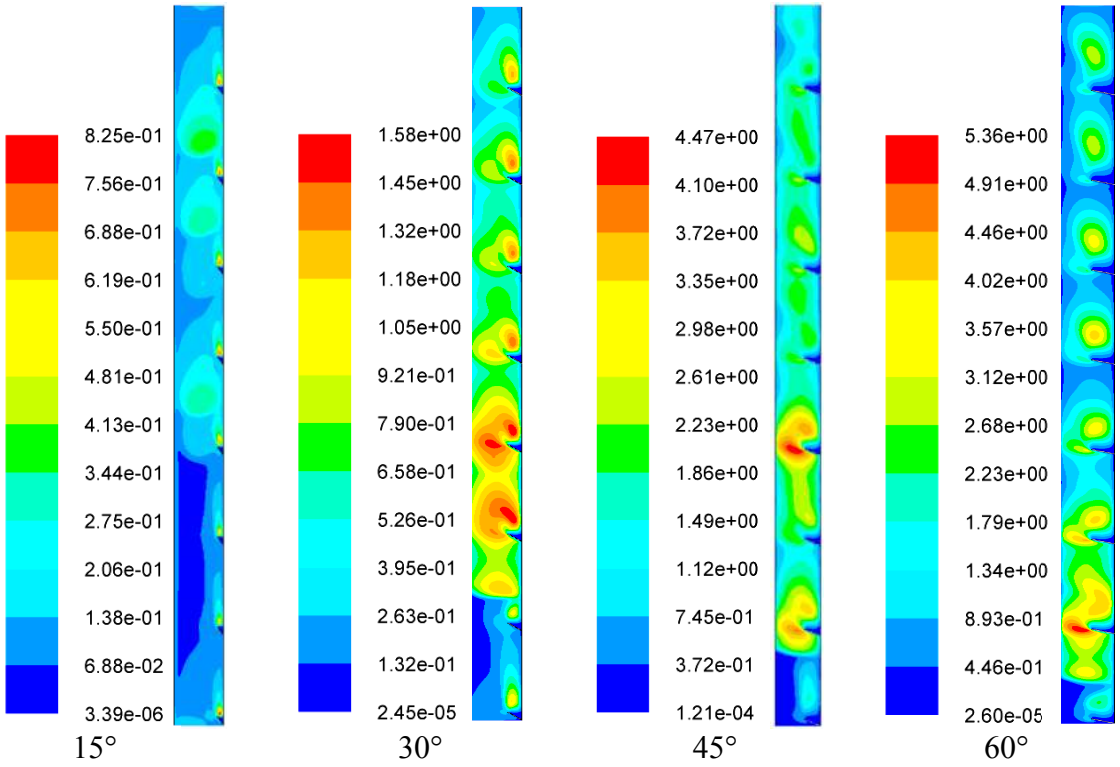


Figure V.41 : *Contour d'énergie cinétique turbulente dans le cas d'un canal d'air avec 8 obstacles et différents angles d'inclinaison.*

La vitesse de l'air et l'intensité de la turbulence augmente avec l'augmentation d'angle d'inclinaison des obstacles. La vitesse maximale de l'air est obtenue au niveau des obstacles où la turbulence est générée.

La variation de la température sur l'axe de l'abscisse est illustrée à la *Figure V.42*. La température atteint le max près de la paroi chaude et diminue légèrement vers la paroi adiabatique (Isolant du capteur).

L'augmentation de l'angle d'inclinaison des obstacles provoque l'augmentation de la température de l'air à l'intérieur du canal. Les valeurs de températures obtenues dans les cas de l'angle 45° et 60° sont très similaires comme la *Figure V.42* ***Figure V.42***le montre.

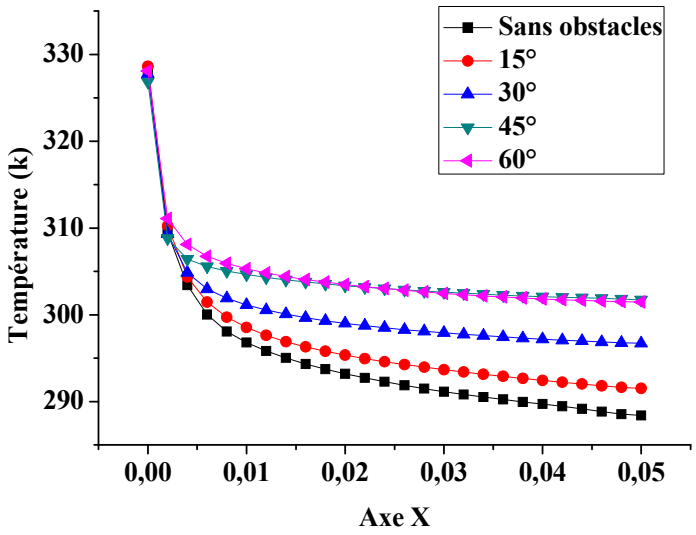


Figure V.42 : *Variation de la température sur l'axe X pour des différents angles d'inclinaison.*

La variation de la température en fonction de l'angle d'inclinaison des obstacles est illustrée en *Figure V.43*. Il est noté que la température moyenne de l'air à la sortie du canal augmente avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison jusqu'à 45°. Le changement de la température de l'air entre l'angle 45° et 60° est négligeable.

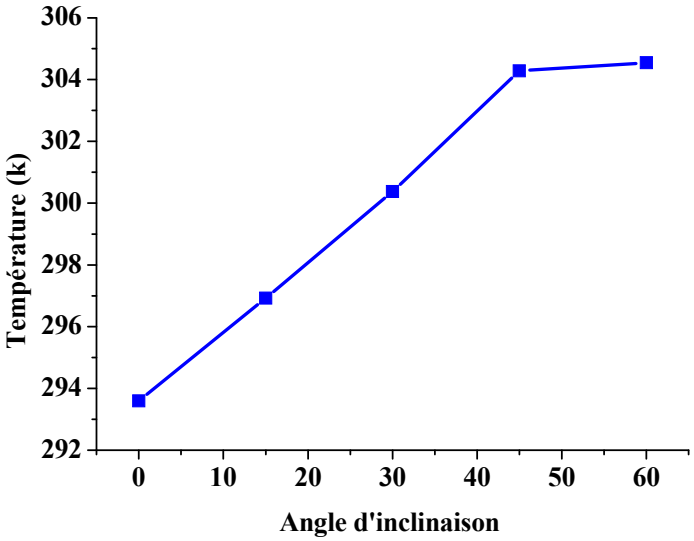


Figure V.43 : *Variation de température en fonction de l'angle d'inclinaison.*

V.9 SIMULATION NUMERIQUE DE LA SERRE

La circulation de l'écoulement de l'air à l'intérieure du la serre est un élément crucial et important pour le séchage. Notre but est d'étudier la circulation de l'air à l'intérieur de la serre et les claies en variant la vitesse d'air et l'écart entre les claies. L'étude permet de déterminer le nombre des claies et la vitesse d'air optimale a utilisé pour le séchage solaire dans la serre. Quatre géométries ont été étudiées avec des différentes vitesses d'air V=1, 2 et 3 m/s.

V.9.1 Etude du maillage

L'influence du maillage sur la simulation de l'écoulement de l'air à l'intérieur de la serre solaire a été étudiée et analysée. Trois cas du maillage avec différent espace entre les mailles sont examinés. L'étude a été réalisée avec différent espacements entre les mailles (*Tableau V.24*), en diminuant l'espacement le maillage se raffine. La simulation a été réalisée avec un ordinateur hp workstation Z6 avec 6 cores (20 processeurs).

Tableau V.24 : *Différents maillages utilisés.*

Maillage	Espacement entre les mailles	Faces maillés
1	0,008	186820
2	0,006	331250
3	0,005	477300

Afin de vérifier l'erreur des résultats, la vitesse de l'air est comparée dans six points au niveau des claies de la serre (Voir *Figure V.44*). L'erreur est calculée avec la différence entre les

vitesses de l'air pour le même point. Le *Tableau V.25* montre la sensibilité des résultats numériques aux maillages pour chaque cas.

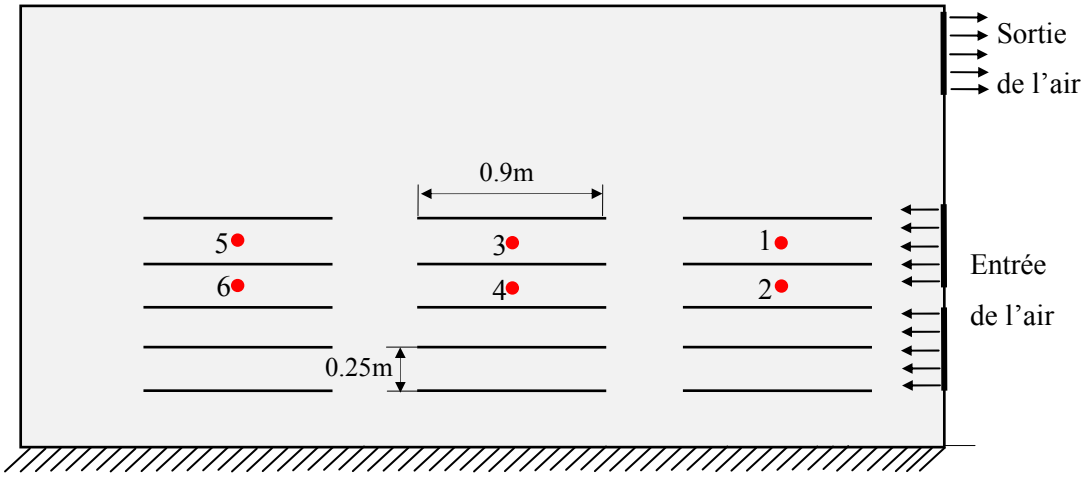


Figure V.44 : *Géométrie 2 utilisé pour le maillage.*

Il a été constaté que le maillage 1 donne des résultats ayant des erreurs relativement importantes par rapport au maillage 2, par conséquent, il n'est pas pris en considération. Nous remarquons que les différences relatives des résultats obtenus avec le maillage 2, par rapport au maillage 3, 0,29%, 1,35%, 1,20%, 0,03%, 0,86% et 1,05% respectivement pour les points 1, 2, 3, 4, 5 et 6 sont largement acceptables.

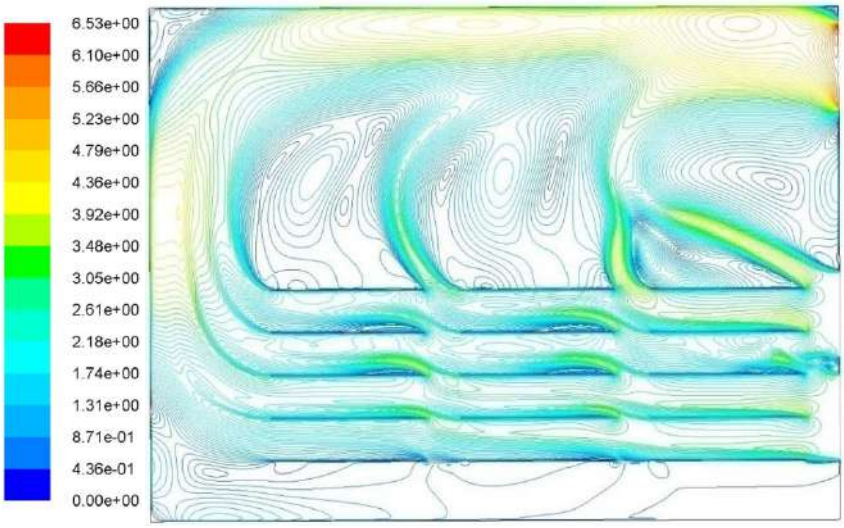
Tableau V.25 : *Effet du maillage sur la vitesse de l'air entre les claies.*

Point	**V_1**	**E_{1-2} (%)**	**V_2**	**E_{2-3} (%)**	**V_3**
1	3,145	1,20	3,108	0,29	3,117
2	2,723	2,32	2,788	1,35	2,751
3	2,373	3,64	2,289	1,20	2,317
4	2,253	5,61	2,387	0, 03	2,387
5	2,123	2,01	2,081	0, 86	2,099
6	2,086	3,95	2,172	1,05	2,150

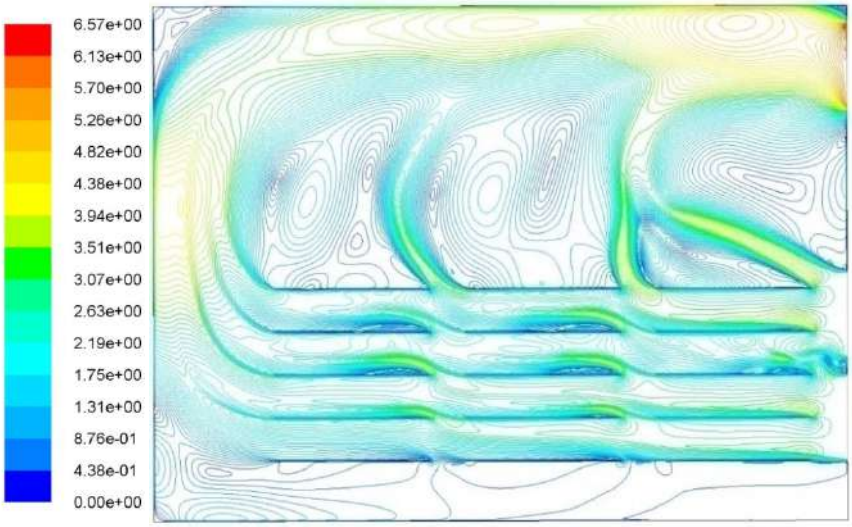
Où : E_{1-2} *l'erreur de la vitesse entre le maillage1 et le maillage 2*

E_{2-3} *l'erreur de la vitesse entre le maillage2 et le maillage 3*

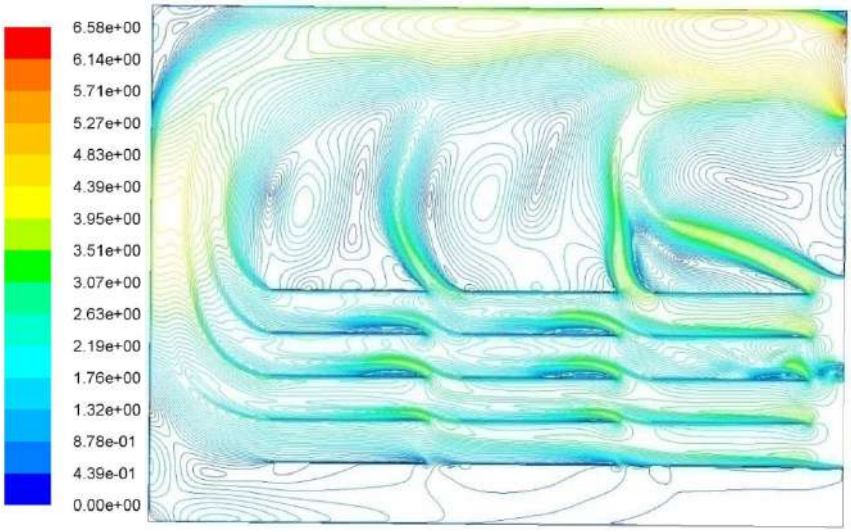
Une comparaison de la structure d'écoulement a été effectuée entre les différents maillages utilisés. Les contours de la vitesse dans la géométrie choisie pour l'étude de maillage sont présentés sous forme de lignes de courants dans la *Figure V.45* qui montre une concordance totale entre les résultats obtenus pour le maillage 2 et ceux obtenus par le maillage3.



maillage1



maillage 2



maillage 3

Figure V.45 : *Lignes de courants pour les trois maillages.*

Le maillage 2 présente des résultats acceptables par rapport aux maillages 1 et 3 avec un temps du calcul optimal. En conséquence, le type de maillage 2 (0,006 espaces et 331250 faces) est utilisé dans les simulations suivantes.

V.9.2 Etude de circulation d'air

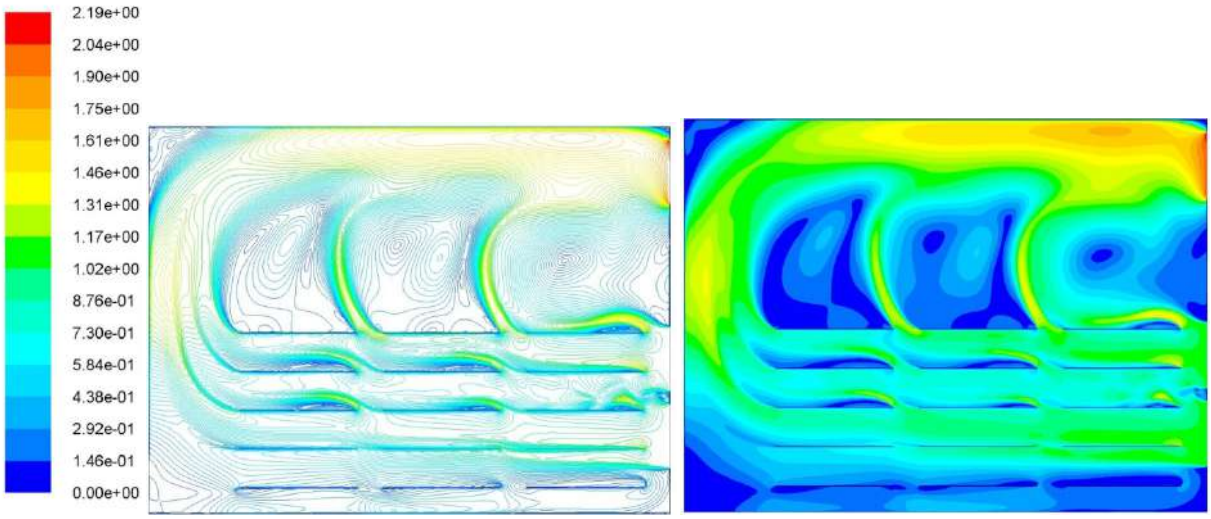
Le maillage avec un pas d'espace de 0,006 et 331250 faces a été appliqué pour les quatre géométries avec une vitesse d'air de 1, 2 et 3m/s.

a) Géométrie 1

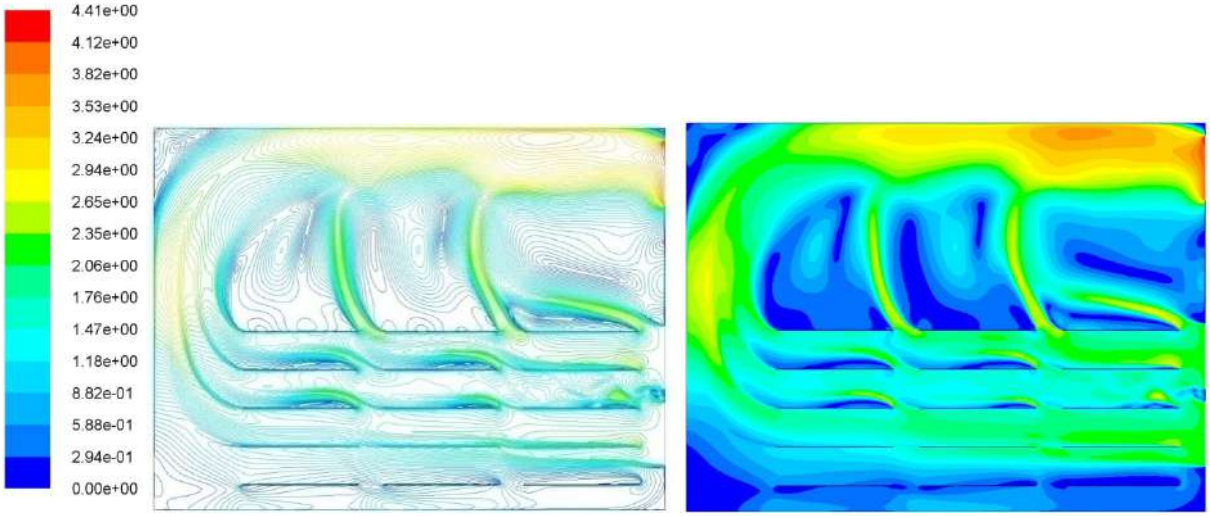
La *Figure V.46* illustre les contours de différentes vitesses de l'air V = 1, 2 et 3m/s, respectivement. La géométrie 1 avec un écart de 30cm et 5 claies est utilisée pour étudier la circulation d'air. La vitesse de l'air au niveau des claies inférieures est faible dans tous les chariots même si on augmente la vitesse d'air à l'entrée. Un grand nombre de zones de circulation est remarqué au niveau de claie située à côté des deux ventilateurs.

b) Géométrie 2

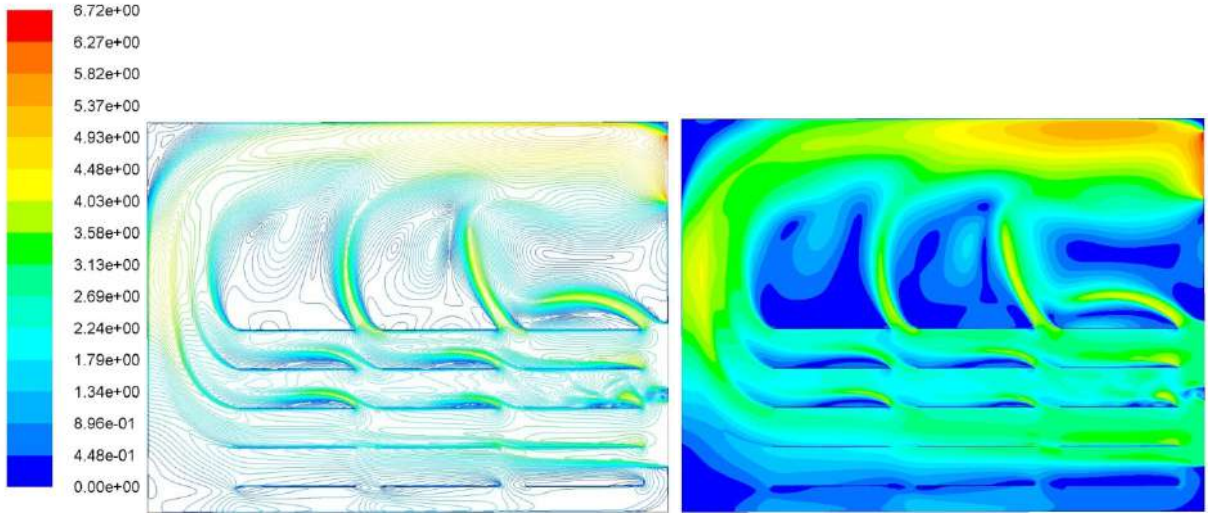
Les *Figure V.47* présentent les contours de vitesses de l'air à l'entrée de 1, 2 et 3m/s, respectivement. Dans ce cas, les valeurs de vitesse les plus élevées se situent en haut de l'enceinte près de la paroi verticale droite, ceci est dû aux conditions aux limites. Cependant, l'écoulement du fluide obtenu pour les trois vitesses a une structure presque similaire entre les claies. Les claies supérieures des trois chariots contiennent les valeurs des vitesses les plus faibles. Les Lignes de courant sont confinées entre les claies, ce qui signifie que l'écoulement résultant est extrêmement important. Concernant la claie inférieure dans le troisième chariot, les lignes de courants se rapprochent de claie supérieure ce que signifie que l'humidité évacuée de cette claie peut toucher la claie supérieure à faible vitesse. Donc avoir une vitesse plus importante évitera la possibilité de transfert de l'humidité d'une claie vers un autre.



V=1m/s

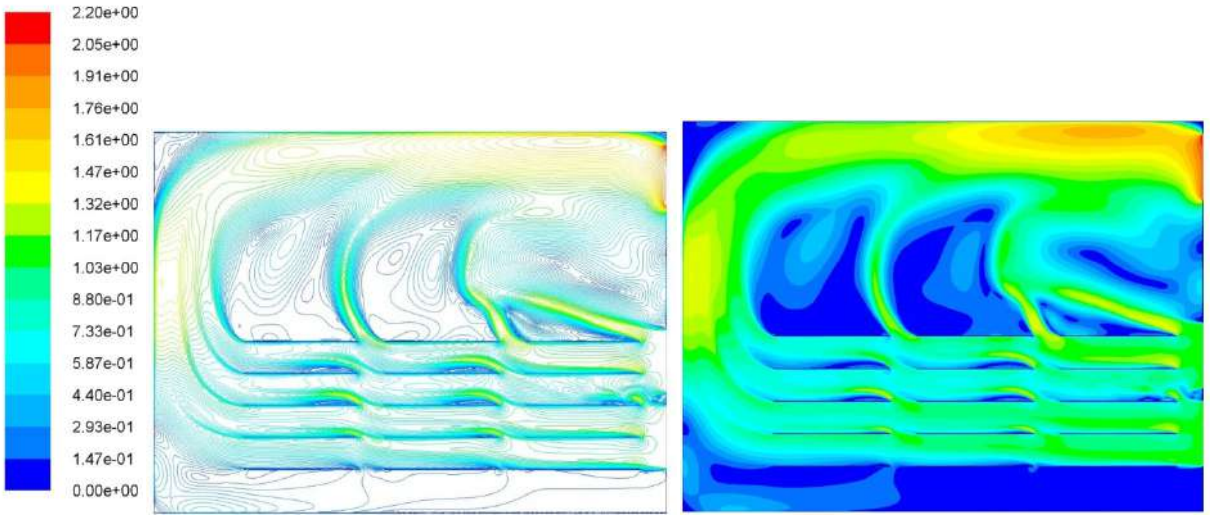


V=2m/s

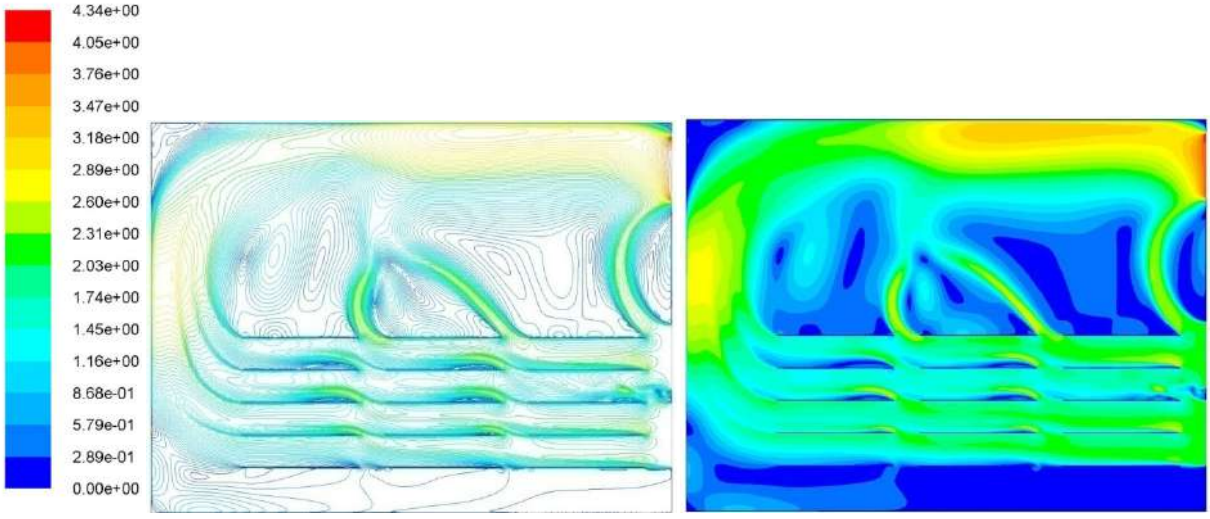


V=3m/s

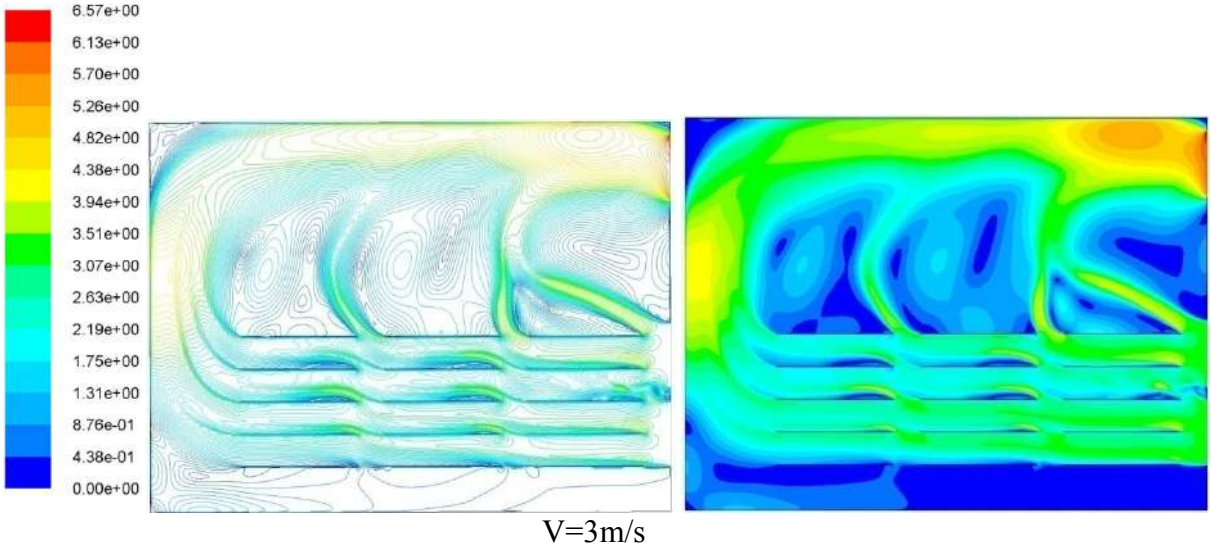
Figure V.46 : *Contour de vitesse de la première géométrie.*



V=1m/s



V=2m/s



V=3m/s

Figure V.47 : *Contour de vitesse de la deuxième géométrie.*

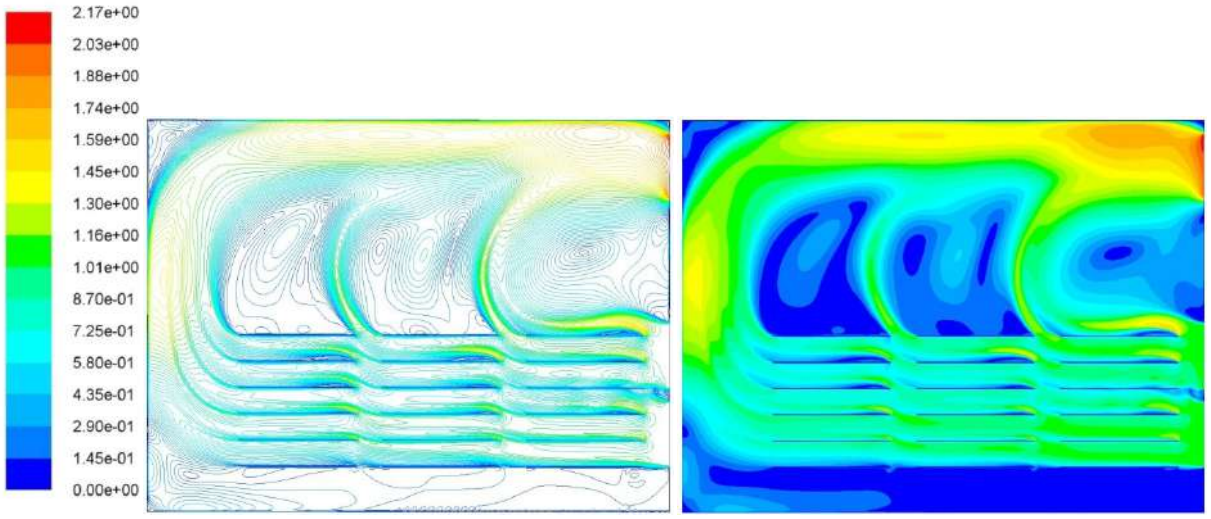
c) Géométrie 3

La géométrie 3 Avec un écart égale à 20 cm, nous avons pu ajouter une autre claie à chaque chariot, en obtenant 6 claies par chariot. L'augmentation du nombre de claie augmente la capacité de production séchoir. Les contours de vitesse pour trois différentes vitesses sont illustrés dans les *Figure V.48*. Dans ce cas, on constate aussi que les valeurs de vitesse les plus élevées se situent en haut de l'enceinte près de la paroi verticale droite, ceci est dû aux conditions aux limites. L'écoulement du fluide obtenu pour les trois vitesses a une structure presque identique entre les claies.

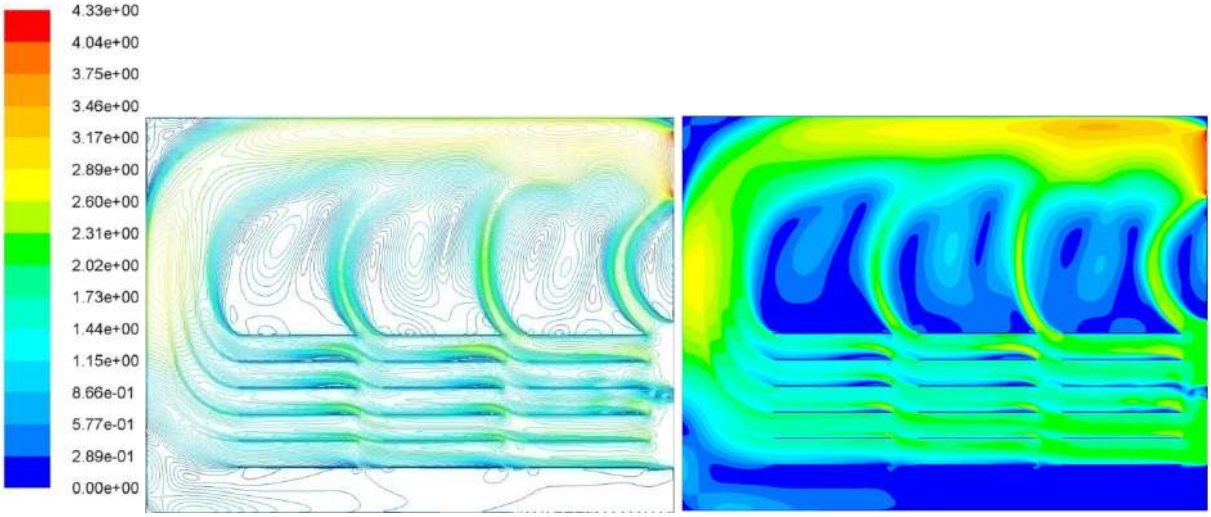
d) Géométrie 4

Dans la géométrie 4, le nombre de claie augmente à 7 par chariot avec un écart de 15cm entre les claies. La *Figure V.49* présente les contours de la vitesse de la géométrie 4 pour trois différentes vitesses. Les Lignes de courant sont plus confinées entre les claies, ce qui peut provoquer le transfert de l'humidité d'une claie à une autre dans les zones où il y a des turbulences. Les claies inférieures présentent toujours un problème au niveau de transfert d'humidité ; l'eau évacuée de produit étalé sur les claies inférieures touche les claies ci-dessus, à l'exception de la claie située près du ventilateur.

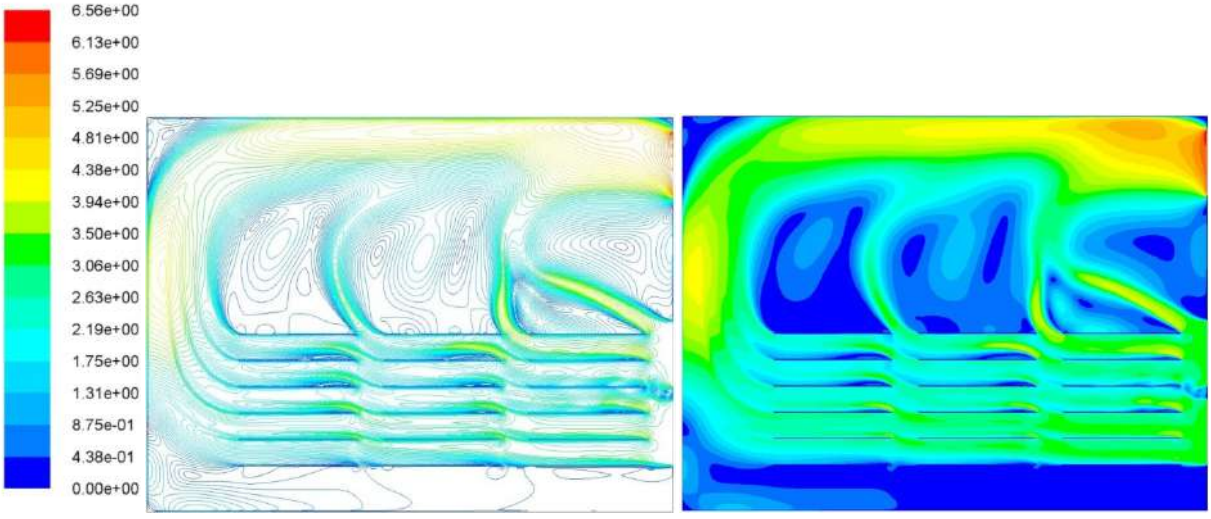
Les résultats montrent que la géométrie 3 avec un écart de 20 cm et une vitesse égale à 2 m/s est la plus convenable pour l'utiliser dans notre séchoir mixte pour le séchage des aliments. Ce choix est justifié par une bonne circulation d'air et une faible consommation d'énergie par les ventilateurs avec une grande capacité de production (6 claie par chariot). Avec la diminution de l'écart entre les claies à 15 cm ou moins, les lignes de courant deviennent plus confines ce que peut causer le transfert de l'eau évacuée des claies inferieures vers les claies supérieures. La création de deux forces horizontales opposées provoque une circulation d'air structurée et efficace.



V=1m/s

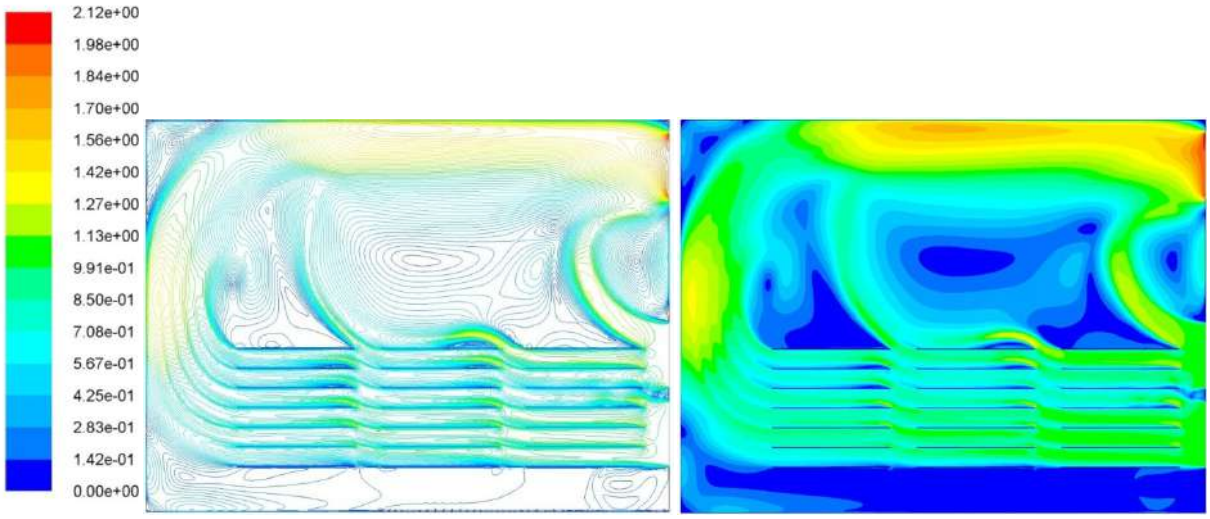


V=2m/s

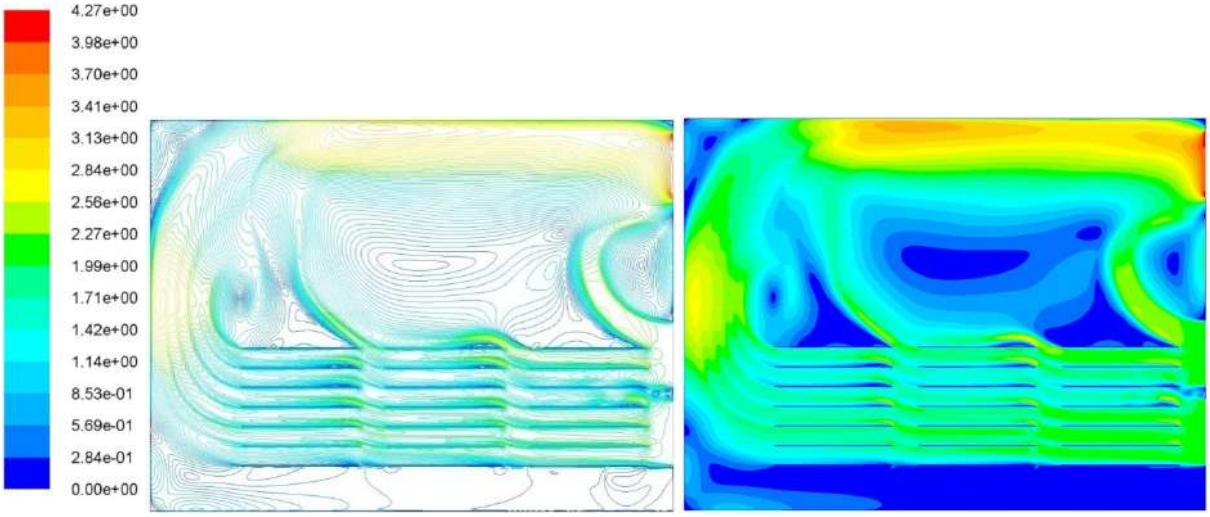


V=3m/s

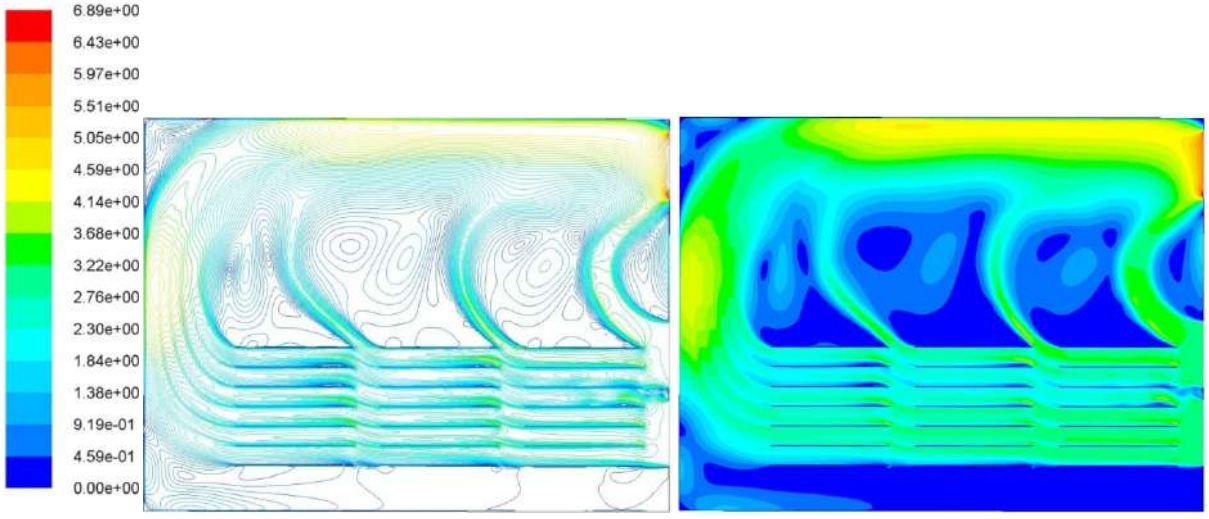
Figure V.48 : *Contour de vitesse de la troisième géométrie.*



V=1m/s



V=2m/s



V=3m/s

Figure V.49 : *Contour de vitesse de la quatrième géométrie.*

V.10 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons analysé d'une part le séchage solaire de cinq produits, pomme de terre, abricot, tomate, figue et poivron rouge, d'autre part une simulation sur l'influence de l'ajout obstacle avec différents nombres et angles d'inclinaison. Les remarques suivantes peuvent être conclues :

- Deux nouveaux modèles et cinq modèles de la littérature ont été utilisés et comparés pour modéliser la variation du rapport d'humidité en fonction d temps. Le nouveau modèle1 s'est avéré plus approprié pour la description de la cinétique de séchage solaire des cinq produits agricoles.
- Le coefficient de diffusivité effective a calculé avec deux méthodes. Les valeurs de coefficient de diffusivité varient entre 6,07E-10 et 1,30E-9 m²/s.
- Les valeurs de l'énergie d'activation obtenue pour les produits séchés dans le séchoir solaire mixte varient entre 22,3 et 121,1 (kJ/mole).
- Les valeurs d'enthalpie varient entre 8,36E4 et 3,16 E5 pour la première nouvelle approche et entre 1,96E4 et 1,84 E5 pour la seconde nouvelle approche. Les valeurs d'enthalpie étaient positives, car il s'agit d'un processus endothermique.
- Les valeurs d'énergie libre de Gibbs varient entre -4,27E3 et -9,10E2 pour le modèle de la littérature et entre -4,97E4 et -3,68 E4 pour la nouvelle approche. Les valeurs d'énergie libre de Gibbs négatives indiquent que le processus de séchage se produit spontanément. Le processus de séchage est donc possible thermodynamiquement à une température de séchage fixe et la valeur négative plus élevée reflète un séchage plus favorable sur le plan énergétique.
- L'utilisation de huit obstacles avec une inclinaison de 45° est le meilleur cas pour améliorer le rendement du capteur solaire à air.
- La géométrie 3 avec un écart de 20 cm et une vitesse égale à 2 m/s est le cas le plus adéquat à utiliser pour le séchage solaire des aliments dans le séchoir mixte.

Conclusion Générale

Le séchage est considéré comme une approche importante dans la transformation des produits agricoles. Il est l'une des méthodes les plus appréciés de production des produits séchés pouvant être consommées directement ou utilisées en tant qu'ingrédients. Le poids et le volume final des produits à sécher sont considérablement réduits, ce qui peut contribuer à une réduction significative des coûts de transport et de stockage.

Une étude numérique, expérimentale et théorique a été réalisée sur le séchage solaire des produits agroalimentaires, pommes de terre, abricot, tomate, figue et poivron rouge, à l'aide d'un nouveau séchoir solaire mixte. Le but de cette thèse est d'apporter une nouvelle contribution aux études sur le séchage de produits agricoles utilisant l'énergie solaire. Cela implique l'amélioration des mécanismes de transfert de chaleur afin de trouver la conception optimale d'un séchoir solaire mixte.

Le type de produit alimentaire à sécher détermine le taux de transfert d'humidité de l'intérieur vers la surface. Les matériaux non hygroscopiques peuvent être séchés jusqu'à une teneur en humidité nulle; Cependant, les matériaux hygroscopiques auront toujours une humidité résiduelle liée. La teneur en humidité présente dans le produit agricole dans des conditions d'équilibre s'appelle teneur en humidité à l'équilibre ou équilibre hygroscopique. Dans un tel cas, l'augmentation de la température de l'air de séchage sera plus efficace que l'augmentation du débit. Il est clair que le processus de séchage est contrôlé par les propriétés de l'air, principalement la température et l'humidité relative, et par les propriétés du produit agricole, principalement la teneur en humidité.

Les résultats expérimentaux ont montré que :

- La texture poreuse de la pomme de terre facilite le transfert de chaleur, ce qui favorise l'évaporation de l'eau. En conséquence, le temps de séchage est le plus court.
- La tomate sous forme de rondelles prend le moins de temps à sécher que la forme en quartier. La vitesse de séchage est le plus élevé pour les épaisseurs de rondelles les plus

minces. De même, les plus petites sections de tomates en forme de quartier prennent le temps le plus court pour sécher.

- Concernant l'abricot, le cas où le produit a été coupé est considéré comme le meilleur temps de séchage avec une qualité médiocre. Cependant, l'abricot traité à la vapeur a une bonne qualité comparée aux autres cas.
- Le temps requis pour le séchage du poivron rouge et de figue est un peu long, environ six jours, en raison de la structure de leur peau.

Pour caractériser la cinétique du séchage et l'humidité, sept modèles ont été utilisés pour ajuster les données expérimentales. Après avoir calculé les paramètres statistiques (r^2 et χ^2) leur comparaison montre que le nouveau modèle 1 est le modèle le plus approprié pour décrire le comportement des produits agroalimentaires pendant le séchage solaire.

Les nouveaux modèles proposés ont été validés avec les données expérimentales de la littérature et comparés aux modèles décrivant le mieux le processus de séchage des raisins Sultana et des piments. Les résultats indiquent qu'ils décrivent de manière adéquate le comportement au séchage solaire des raisins Sultana, des piments forts, des bananes, des mangues et manioc. Les deux nouveaux modèles proposés sont indépendants des unités de mesure, de la conception, des conditions de fonctionnement et tiennent compte des conditions aux limites, ce qui constitue un avantage significatif par rapport aux modèles existants de la littérature.

L'équation de diffusion de Fick a été utilisée pour calculer la diffusivité effective à partir des données expérimentales des cinq produits séchés dans le séchoir solaire mixte. Les valeurs calculées de la diffusivité effective varient entre 2,8 E-9 et 6,04E-9 m²/s pour l'abricot, entre 8,39E-10 et 1,25E-9 m²/s pour la tomate et 5,9E-10 m²/s pour la pomme de terre. Les deux méthodes différentes utilisées pour calculer le coefficient de diffusion effective à partir des données expérimentales ont donné des résultats presque similaires. Les valeurs de l'énergie d'activation obtenue varient entre 5,05E4 et 6,54E4 J/mole pour l'abricot, entre 2,23E4 et 1,21E5 J/mole pour la tomate et 7,44E4 J/mole pour la pomme de terre.

Deux nouvelles approches proposées à partir de l'équation d'Arrhenius ont été utilisés pour déterminer les paramètres thermodynamiques. Les valeurs d'enthalpie varient entre 8,36E4 et 3,16 E5 pour la première nouvelle approche et entre 1,96E4 et 1,84 E5 pour la seconde nouvelle approche. Le signe positif des valeurs d'enthalpie signifie un processus endothermique. Les valeurs d'entropie varient entre 2,57E4 et 9,7 E2 pour la première nouvelle approche et entre

1,93E2 et 4,85 E2 pour la seconde nouvelle approche. Les valeurs calculées d'enthalpie et d'entropie à l'aide de la première nouvelle approche ont montré des valeurs plus élevées par rapport à la seconde nouvelle approche.

Les valeurs d'énergie libre de Gibbs varient entre -4,27E3 et -9,10E2 pour la première nouvelle approche et entre -4,97E4 et -3,68 E4 pour la seconde nouvelle approche. Cette différence est due au fait que leur calcul repose sur deux choses différentes, à savoir : les pertes de poids du produit d'une part, tandis que la seconde nouvelle approche est basée sur le coefficient de diffusion effective calculé D_{eff} et le D_0. Les valeurs négatives de l'énergie libre de Gibbs indiquent que le séchage solaire des cinq produits est de nature spontanée. La valeur négative plus élevée de l'énergie libre de Gibbs reflète un phénomène plus favorable sur le plan énergétique.

Afin d'améliorer les performances thermiques du capteur solaire à air, une simulation a été effectué à l'aide des outils numériques CFD. L'effet de nombre et l'inclinaison des obstacles dans le canal d'air sur les performances du capteur solaire à air ont été étudiés et analysés. Une analyse de CFD bidimensionnelle a été effectuée pour évaluer les caractéristiques thermiques du capteur solaire pour divers nombre d'obstacles et angles d'inclinaison. Les résultats montrent que l'utilisation de huit obstacles avec une inclinaison de 45° est le meilleur cas pour améliorer le rendement du capteur solaire à air.

Pour assurer un bon écoulement de l'air à l'intérieure du la serre, une simulation numérique de la serre bidimensionnelle a été réalisée et analysés. La simulation numérique de la serre montre que la géométrie 3 avec un écart de 20 cm et une vitesse égale à 2 m/s est le meilleur cas à utiliser dans le séchoir solaire mixte. Les résultats illustrent une bonne circulation d'air avec une faible consommation d'énergie et une grande capacité de production.

Comme perspective à ce travail, on doit tester notre séchoir solaire mixte dans les régions arides ou semi-arides, comme dans le désert du Sahara ou les hauts plateaux (air sec), où on s'attend à ce que le séchoir fonctionne plus efficacement. Contrairement a cette étude qui été menée dans le nord de l'Algérie, où l'humidité de l'air est élevée.

En raison de la disponibilité immédiate et du faible coût du gaz naturel localement, son utilisation en tant que source d'énergie de secours pour le processus de séchage constitue une alternative attrayante à l'énergie solaire pour les longues périodes de temps nuageux.

Références bibliographiques

Abouo, V.N., Sadat, A.W., Akmel, C.D., Assidjo, E.N., Amani, G.N., 2016. Impact of Solar and Microwave Oven Drying on A Few Chemical Parameters of Market Value Quality of Fermented Forastero (Theobroma Cacao L.). Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 12(4), 402-406.

Abrouche, R., 2013. Incorporation du tourteau d'amande d'abricot en subistutition de tourteau de soja dans l'alimentation des animaux domestiques. Thèse de doctorat, Université de Batna.

Adak, N., Heybeli, N., Ertekin, C., 2017. Infrared drying of strawberry. Food chemistry 2019, 109-116.

Aftosmis, M.J., 1997. Solution Adaptive Cartesian Grid Methods for Aerodynamic Flows with Complex Geometries. 28th computational fluid dynamics lecture series 02.

Akpinar, E.K., 2006. Determination of suitable thin-layer drying curve model for some vegetables and fruits. J Food Engr 73, 75-84.

Akpinar, E.K., Bicer, Y., 2008. Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. Energy Conversion and Management 49, 1367-1375.

Akpinar, E.K., Bicer, Y., Cetinkaya, F., 2006. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. Journal of Food Engineering 75, 308-315.

Akpinar, E.K., Bicer, Y., Midilli, A., 2003. Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. Journal of Food Process Engineering 26, 515-541.

Aksoy, U., 1991. Descriptors for Fig (Ficus carica L. and related Ficus sp.). Ege University, Faculty of Agriculture. Department of Horticulture, Izmir−Turkey, p17.

Alireza, A., Touraj, T., Experimental study on eggplant drying by an indirect solar dryer and open sun drying, Iranica journal of energy and environment. 3(4), 347-353

Alzamora, S.L.M., Chirife, J., 1980. Some factors controlling the kinetics of moisture movement during avocado dehydration. J. Food Sci. 45(6), 1649-1651.

Amanlou, Y., Zomorodian, A., 2010. Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. Journal of Food Engineering 101(1), 8-15.

Ameri, B., Hanini, S., Benhamou, A., Chibane, D., 2018. Comparative approach to the performance of direct and indirect solar drying of sludge from sewage plants, experimental and theoretical evaluation. Solar Energy 159, 722-732.

Ameri, B., Hanini, S., Boumahdi, M., 2020. Influence of drying methods on the thermodynamic parameters, effective moisture diffusion and drying rate of wastewater sewage sludge. Renewable energy 147, 1107-1119.

Amjad, W., Munir, A., Esper, A., Hensel, O., 2015. Spatial homogeneity of drying in a batch type food dryer with diagonal air flow design. J Food Eng 144, 148-55.

Anonyme, 1991. Management of gysiferous soils. Ed: F.A.D. soils bulletin Nb2 Rome, p 81.

Arevalo, P.A., Murr, F.X., 2007. Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. Journal of Food Engineering 80, 152–156.

Aruoma, O.I., Landes, B., Ramful-Baboolall, D., Bourdon, E., Neergheen-Bhujun, V., Wagner, K.-H., Bahorun, T., 2012. Functional benefits of citrus fruits in the management of diabetes. Preventive Medicine 54, 12-16.

Badaoui, O., Hanini, S., Djebli, A., Haddad, B., Benhamou, A., 2019. Experimental and modelling study of tomato pomace waste drying in a new solar greenhouse: Evaluation of new drying models. Renewable energy 133, 144-155.

Bahlouli, F., Tiaiba, A., Slamani, A., 2008. Etude des différentes méthodes de séchage d'abricot, point sur les méthodes de séchage traditionnelles dans la région du Hodna, wilaya de M'Sila. Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger 61-66.

Bareh, G.F., Nadir, A.S., Wafaa, A.M., Elzamazmy, F.M., 2012. Effect of solar drying on nutritional characteristics of different pepper varieties and its mixtures with tomato. J Appl Sci Res. 8(3), 1415-1424.

Barman, N., Badwaik, L.S., 2017. Effect of ultrasound and centrifugal force on carambola (Averrhoa carambola L.) slices during osmotic dehydration. Ultrasonics Sonochemistry 34, 37-44.

Bartzanas, T., Boulard, T., Kittas, C., 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. Bio-Syst Eng 88, 479-90.

Bauernfeind, J.C., Stewart, G.F., Schweigert, B.S., Hawthorn, J., 1981. Carotenoids as colorants and vitamin a precursors: Technological and Nutritional Applications. Academic Press 47-316.

Benkhelfellah, R., El Mokretar, S., Miri, R., Belhamel, M., 2005. Sechoirs solaires. Etude comparative de la cinetique de sechage des produits agroalimentaires dans des modèles de type direct et indirect. 12th International Meeting on Heat Transfer, Morocco, 259-262.

Benlahmidi, S., 2013. Etude du séchage convectif par l'énergie solaire des produits rouges. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider, Biskra,

Bennamoun, L., Belhamri, A., 2007. Contribution à l'étude de faisabilité de séchoirs solaires pour les produits agricoles. Revue des Energies Renouvelables, CER'07 Oujda 201-204.

Bennamoun, L., Khama, R., Léonard, A., 2015. Convective drying of a single cherry tomato: Modeling and experimental study. Food and Bioproducts Processing 94, 114-123.

Bernhards, U., 1998. La pomme de terre Solanum tuberosum L. Monographie. Institut biotechnologies de la multiplication végétative. Cahiers Agricultures 7, 447-58.

Bernier, P.D., Borvano, M., Ougasta, F., 2004. Syndrome du côlon irritable. Manuel de nutrition clinique en ligne. Ordre professionnel des diététistes du Québec P12.

Beuchat, L.R., 1981. Microbial stability as affected by water activity. Cereal Foods World 26 (7), 345–349.

Bimbenet, J.J., 1984. Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire. Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A), Sepaic, Paris 2ème édition p34.

Bimbenet, J.J., 1998. Bases conceptuelles du génie des procédés agroalimentaires. Techniques de l'ingénieur, F1000, p 19.

Bimbenet, J.J., Daudin, J.D., Wolff, E., 1985. Air drying kinetics of biological particles. in: R., Toei, Mujumdar A.S., (Eds.), Drying '85, Springer Berlin Heidelberg 178-185.

Blancard, D., Laterrot, H., Marchoux, G., Candresse, T., 2009. Les maladies de la tomate, identifier, connaitre et maitriser. Edition : Quae, Paris. p691.

Bonazzi, C., Bimbenet, J.-J., 2003. Séchage des produits alimentaires - Principes. Techniques de l'Ingénieur F3000, p15.

Boughali, S., 2010. Etude et optimisation du sechage solaire des produits agroalimentaires dans les zones arides et désertiques. Thèse de doctorat, Université hadj lakhdar, Batna, Algerie.

Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., Bechki, D., 2009. Crop drying by indirect active hybrid solar – Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. Solar Energy 83, 2223-2232.

Boughali, S., Bouchekima, B., Nadir, N., Mennouche, D., Bouguettaia, H., Bechki, D., 2008. Expérience du séchage solaire dans le Sahara septentrional est algérien. Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger 105-110.

Bourgeois, C., 2003. Les vitamines dans les industries agroalimentaires. Ed : Tec et Doc., Lavoisier, Paris, p 708.

Brenndorfer, B., Kennedy, L., Oswin Bateman, C. O., Trim, D. S., Mrema, G.C., Wereko Brommy, C., 1987. Solar Dryers - Their Role in Post-Harvest Processing. 2ème ed., The Commonwealth Secretariat, London, p 298.

Bretaudeau, J., 1981. Atlas d'arboriculture fruitière. Volume8. Deuxième édition. Edition J-B. Baliere, Paris, p 246.

Britton, G., Khachik, F., 2009. Carotenoids in Food. In: Britton, G., Liaaen-Jensen, S., Carotenoids: Nutrition and Health. Birkhäuser Verlag (5) 45-65.

Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall C.W., 1974 Drying cereal grains. Westport AVI.

Castaldo, J.E., Reed, I.J.F., 2008. The lowering of vascular atherosclerotic risk (LOVAR) program: An approach to modifying cerebral, cardiac, and peripheral vascular disease. Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases 17(1), 9-15.

Chandra, P.K., Singh, R.P., 1995. Applied Numerical Methods for Food and Agricultural Engineers. CRC Press, Boca Raton, FL 163-167.

Charreau, A., Cavalle, R., 1991. Séchage : Théorie et calculs. Technique de l'ingénieur, J 2480,1-23, (1991).

Chawla, A., Kaur, R., Sharma, A.K., 2012. Ficus carica Linn: A Review on its Pharmacognostic, Phytochemical and Pharmacological Aspects. International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research 1(4), 215-232.

Chen, H.H., Huang, T.C., Tsai, C.H., Mujumdar A.S., 2008. Development and performance analysis of a new solar energy-assisted photocatalytic dryer. Drying Technol 26, 503-7.

Chouaki, S., Bessedik, F., Chebouti, A., Maamri, F., Oumata, S., Kheldoun, S., Kheldoun, A., 2006. Deuxième rapport national sur l'état des ressources phytogénétique. INRAA

Chouhan, P.S., Kumar, A., Tekasakul, P., 2015. Renewable and Sustainable Energy Reviews 51, 1326-1337.

Chouicha, S., Boubekri, A., Mennouche, D., Berrbeuh, M.H., 2013. Solar drying of sliced potatoes, an experimental investigation. Energy Procedia 36, 1276-1285.

Chuah, A.M., Lee, Y.C., Yamaghuchi, T., Takamura, H., Ying, L.J., Matobu, T., 2008. Effect of cooking on the antioxidant properties of coloured pepper. Food Chem 3, 20-28

CIQUAL et CNEVA (Centre Informatique sur la Qualité des Aliments et Centre National d'Études Vétérinaires et Alimentaires), 1993.

CIQUAL, 2019. Table de composition nutritionnelle des aliments. www.anses.fr, consultée le 20/11/2019.

Clement, J.M., 1981. Larousse agricole. Librairie Larousse, Paris, p1208.

Coskun, A.L., Turkyılmaz, M., Aksu, O.T., Koc, B.E., Yemis, O., Ozkan, M., 2013. Effects of various sulphuring methods and storage temperatures on the physical and chemical quality of dried apricots. Food Chemistry 141, 3670-3680.

Crank, J., 1975. The mathematics of diffusion. Second edition, Claredon press, Oxford.

Cui, Z.W., Shi-Ying Xu, Z.W., Da-Wen Sun, Z.W., 2004. Effect of microwave vacuum drying on the carotenoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of Chinese chive leaves. Dry. Technol. 22 (3), 563-575.

Daguenet, M., 1985. Les séchoirs solaires : théorie et pratique. Publication de l'UNESCO, Paris, France.

Dasin, D.Y., Godi, N.Y., Kingsely, O.C., 2015. Experimental investigations of the performance of passive solar food dryer tested in Yola-Nigeria. International journal of energy engineering 5, 9-15.

De Broglie, L.A., et Guéroult, D., 2005. Tomates d'hier et d'aujourd'hui. Hoëbeke, Paris, p143.

Demir, V., Gunhan, T., Yagcioglu, A.K., 2007. Mathematical modeling of convection drying of green table olives. Biosystems Engineering 98, 47-53.

Desmas, S., 2005. Analyse comparative de compétitivité : le cas de la filière tomate dans le contexte euro-méditerranéen. Thèse Ing. Agr., Inst. Agr. Méditerranéen. Montpellier. France.

Dewanto, V., Wu X.Z., Adom, K.K., Liu R.H., 2002. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. Journal of Agricultural and Food Chemistry 50, 3010–3014.

Diamante, L.M., Munro, P.A., 1993. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. Solar Energy 51, 271-276.

Djebli, A., Hanini, S., Badaoui, O., Boumahdi, M., 2019. A new approach to the thermodynamics study of drying tomatoes in mixed solar dryer. Solar Energy 193, 164-174.

Djebli, A., Hanini, S., Badaoui, O., Haddad, B., Benhamou, A., 2020. Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of potatoes. Renewable Energy 145, 1494-1506.

Donglin, Z., Yasunori, H., 2003. Phenolic compounds: ascorbic acid cartoneoids and antoxidant, carotenoids and antioxidant properties of green, red and yellow bell pepper. J Food Agric Environ 2, 22-27.

Doymaz, I., 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. Journal of Food Engineering 79, 243-248.

Doymaz, I., Pala, M., 2002. Hot air drying characteristics of red pepper. J Food Eng. 55, 331-335.

Dudez, P., 1999. Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés. Edition du Greth, France.

Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1974. Solar energy: Thermal processes, John Wiley, NewYork.

Ekechukwu, O.V., 1999. Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. Energy Conversion and Management 40, 593–613.

Ekechukwu, O.V., Norton, B., 1997. Experimental studies of integral-type natural-circulation solar-energy tropical crop dryers. Energy Conversion and Management 38, (14) 1483-1500.

Eleyinmi, A.F., Ilelaboye, N.O.A., Aiyeleye, F.B., Akoja, S.S., 2002. Effect of different pre-drying operations on some nutritionally valuable minerals, ascorbic acid and rehydration index of capsicum species. Trop Agric Res Ext. 5(1&2), 57–61.

El-Ghaouth, A., Wilson, C., Wisniewski, M., 2004. Biologically-based alternatives to synthetic fungicides for the control of postharvest diseases of fruit and vegetables. In Diseases of Fruits and Vegetables 2, 511–535.

El-Khaloui, M., 2010. Valorisation de la figue au Maroc. Transfert de technologie en agriculture (Maroc) 186, 1-4

Elliseche, D., 1999. La pomme de terre Dans Technologie des légumes 65-91. Tirilly Y. Bourgeois C M. Collection sciences et techniques agroalimentaires, éditions Tec et Doc Paris, Londres, New York.

Ellissèche, D., Pellé, R., Andrivon, D., 2000. La culture biologique de la pomme de terre : critères de sélection variétale et production de plants. 2ème Journée d'étude sur l'état de la Recherche en Agriculture Biologique 26-31.

El-Sebaii, A.A., Shalaby, S.M., 2012. Solar drying of agricultural products: A Review. Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews 16(1), 37-43.

Eren, I., Ertekin, F.K., 2007. Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. Journal of Food Engineering 79(1), 344-352.

Erenturk, S., Erenturk, K., 2007. Comparison of genetic algorithm and neural network approaches for the drying process of carrot. Journal of Food Engineering 78, 905-912.

Esper, A., Muhlbauer, W., 1998. Solar drying –an effective means of food preservation. Renewable energy 15(1–4), 95–100.

Evans, M.G., Polanyi, M., 1935. Some applications of the transition state method to the calculation of reaction velocities, especially in solution. Trans. Faraday Soc., 31, 875-894.

Eyring, H., 1935. The activated complex in chemical reactions. J. Chem. Phys., 3, 107-115.

Falade, K.O., Abbo, E.S., 2007. Air-drying and rehydration characteristics of date palm (Phoenix dactylifera L.) fruits. J. Food Eng. 79(2), 724-730.

FAO, 2017. Division Statistique de l'Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture. http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC. (Consulté le 25.09.2019).

Faust, M., Surányi, D., Nyujtó, F., 1998. Origin and dissemination of apricot 225–266. In: J. Janick (ed.), Horticultural Reviews 22. John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto.

Ferradji, A., Chabour, H., Malek, A., 2011. Séchage solaire des figues. Revue des Energies Renouvelables 14(4), 717-726.

Ferrari, C.K.B. 2007. Functional foods and physical activities in health promotion of aging people. Maturitas 58(4), 327-339.

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. Journal of Renewable Energy 32(14), 2306-2319.

Fratianni, F., Ombra, M.N., d'Acierno, A., Cipriano, L., Nazzaro, F., 2018. Apricots: biochemistry and functional properties. Current Opinion in Food Science19, 23-29

Frusciante, L., Carli, P., Ercolano, M.R., Pernice, R., Di Matteo, A., Fogliano, V., Pellegrini, N., 2007. Antioxidant nutritional quality of tomato. Mol Nutr Food Res 51, 609-617.

Gerard, D., François, C., 2009. Petit Larousse des plantes médicinales p47

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 Technology 24, 1637-1642.

Ghazanfari, A., Sokhansanj, S., 2002. Experiments on solar drying of Pistachio nuts. AIC 2, 303-309.

Giovanelli, G., Zanoni, B., Lavelli, V., Nanic, R., 2002. Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products. J Food Eng 52, 135-141.

Glenn, T.L., 1978. Dynamic analysis of grain drying system. Ph.D. Thesis, Ohio State University.

Goyal, R.K., Kingsly, A.R.P., Manikantan, M.R., Ilyas, S.M., 2006. Thin-layer Drying Kinetics of Raw Mango Slices. Biosystems Engineering 95 (1), 43-49.

Grabowski, S., Marcotte, M., Ramaswamy, H.S., 2003. Drying of fruits, vegetables, and spices. In: Handbook of Postharvest Technology: Cereals, Fruits, Vegetables, Tea, and Spices. Chakraverty, A., Mujumdar, A.S., Raghavan, G.S.V., Rawaswamy, H.S. (ed), Marcel Dekker, New York 653-695.

Grassely, D., Navez, B., Letard, M., 2000. Tomate, pour un produit de qualité. CTIFL, Paris.

Green, M.G., Schwarz, D., 2001. Solar Drying Technology for Food Preservation. Infogate, https://energypedia.info/wiki/File:Green_Schwarz_(2001)_Solar_Drying_Technology_for_Food_Preservation.pdf. Consulté le 20 septembre 2019.

Greenleaf, W.H., 1986. Pepper Breeding. In: Breeding Vegetable Crops, Bassett M.J. (ed.). AVI Publishing USA: 67-134.

Gunhan, T., Demir, V., Hancioglu, E., Hepbasli, A., 2005. Mathematical modelling of drying of bay leaves. Energy Conversion and Management 46, 1667-1679.

Guo, W.L., Chen, R.G., Du, X.H., Zhang, Z., Yin, Y.X., Gong, Z.H., Wang, G.Y., 2014. Reduced tolerance to abiotic stress in transgenic Arabidopsis over expressing a Capsicum annuum multiprotein bridging factor 1. BMC Plant Biol. 14(1), 138.

Haddad, B., Liazid, A., Ferreira, P., 2017. A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system. Renewable Energy 107 (2017), 462-472.

Hadley, C.W., Miller, E.C., Schwartz, S.J., Clinton, S.K., 2002. Tomatoes, Lycopene, and Prostate Cancer: Progress and Promise. Experimental Biology and Medicine, 227, 869-880.

Haesslein, D., Oreiller, S., 2008. Fraîche ou séchée, la figue est dévoilée. Filière Nutrition et diététique. Haute Ecole de Santé Genève, 1-4.

Hall, C.W., 1980. Drying and storage of agricultural crops. Westport AVI.

Hallmann, E., Rembiałkowska, E., 2012. Characterisation of antioxidant compounds in sweet bell pepper (Capsicum annuum L.) under organic and conventional growing systems. J Sci Food Agric. 92(12), 2409-2415.

Haque, M.A., Adhikari, B., 2014.Drying and Denaturation of Proteins in Spray Drying Process. In A. S. Mujumdar (Ed.), Handbook of industrial drying, 4th Edition. CRC Press, Taylor and Francis group, NW, USA, pp 971-984.

Henderson, S.M., 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. Trans. ASAE 17, 1167-1172.

Henderson, S.M., Pabis, S., 1961. Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. Journal of Agricultural Engineering Research 6(3), 169-174.

Hii, C.L., Jangam, S.V., Ong, S.P., Mujumdar, A.S., 2012. Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations. Transport Phenomena Group, Singapore, p 150.

Jain, D., Tiwari, G.N., 2003. Thermal aspects of various crops. Energy 28, 37-54.

Joseph, B., Justin R.S., 2011. Pharmacognostic and phytochemical properties of Ficus carica Linn-An overview. International Journal for Pharmaceutical Research 3(1), 08-12.

Joshi, P., Mehata, D., 2010. Effect of drying on the nutritive value of drumstick leaves. Journal of Metabolomics and Systems Biology1 (1), 5-9.

Kadam, D.M., Samuel, D.V.K., 2006. Convective flat plate solar heat collector for Cauliflower drying. Biosystems engineering. 93(2), 189-198.

Kaleemullah, S., Kailappan, R., 2006. Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies. Journal of Food Engineering 76, 531-537.

Karabulut, I., Topcu, A., Duran, A., Turan, S., Ozturk, B., 2007. Effect of hot air drying and sun drying on color values and β-carotene content of apricot (Prunus armenica L.). LWT. 40, 753-758.

Karathanos, V.T., 1999. Determination ofwater content of dried fruits by drying kinetics. Journal of Food Engineering 39, 337-344.

Karthanos, V.T., Villalobos, G., Savacos, G.D., 1990. Comparison of methods of estimation of effective moisture diffusivity from drying data. Journal of Food Science 55(1), 218-231.

Kaseem, A.S., 1998. Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In 13th International Congress on Agricultural Engineering February, Morocco 6, 2-6.

Kaushal, M., Joshi, V.K., Sharma, R., 2011. Preparation and evaluation of value added products from bell pepper. Indian Food Packer. 65(6),159-165.

Kaya, A., Aydin, O., Demirtas, C., 2007. Drying kinetics of red delicious apple. Biosyst. Eng. 96(4), 517-524.

Keen, R., 2007. Osteoporosis: strategies for prevention and management. Best Practice & Research Clinical Rheumatology 21(1), 109-122.

Khaldi, S., 2018. Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie. Thése de Doctorat. Université Bourgogne Franche-Comté; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie).

Koua, K. B., Fassinou, W. F., Gbaha, P., Toure, S., 2009. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. Energy 34, 1594-1602.

Koua, K.B., Fassinou, W.F., Gbaha, P., Toure, S., 2009. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. Energy 34, 1594-1602.

Krawczyk, P, Badyda, K., 2011. Two-dimensional CFD modeling of the heat and mass transfer process during sewage sludge drying in a solar dryer. Archives of Thermodynamics 32,3-16.

L'Institut International des Ressources Génétiques des Plantes Ipgri, 1996. Descriptors for tomato (Lycopersicon spp.). Rome, Italy.

Lahbari, M., 2015. Etude et simulation du séchage de l'abricot : Application a quelques variétés de la région des Aures. Thèse de doctorat, Université de Batna.

Lahnine, L., Idlimam, A., Mahrouz, M., Mghazli, S., Hidar, N., Hanine, H., Koutit, A., 2016. Thermophysical characterization by solar convective drying of thyme conserved by an innovative thermal-biochemical process. Renewable Energy 94, 72-80.

Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Idlimam, A., Jamali, A., 2004. Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (Opuntia ficus indica). Energy 29(2), 211-224.

Laidler, K.J., King, M.C., 1983. The development of Transition-State Theory. J. Phys. Chem., 87, 2657-2664.

Latigui, A., 1984. Effets des différents niveaux de fertilisation potassique sur la fructification de la tomate cultivée en hiver sous serre non chauffée. Thèse de Doctorat en Science Agronomique. INA EL-Harrach. Alger.

Launder, B.E., Spalding, D.B., 1972. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England.

Lee, Y., Howard, L.R., Villalon, B., 1995. Flavonoid and ascorbic acid content and antioxidant activity of fresh pepper (Capsicum annuum) cultivars. J Sci 60(3), 473-476.

Lewis, W.K., 1921. The rate of drying of solid materials. I&EC-Symposium of Drying 3(5), 42.

Lichou, J., Audubert, A., 1989. L'abricotier. Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes. (CTIFL).

Lichou, J., Jay, M., 2012. Abricot, collection Monographie. Centre technique au service de la filière fruits et légumes CTIFL.

Luning, P.A., Yuksel, D., Vuurst-de-Vries, R.V., Roozen, J.P., 1995. Aroma changes in fresh bell peppers (Capsicum annum) after hot-air drying. J Food Sci. 60(6), 1276-1296.

Madamba, P.S., Driscoll, R.H., Buckle, K.A., 1996. The thin layer drying characteristics of garlic slices. Journal of food engineering 29, 75-97.

Mafart, P., 1991. Génie Industriel Alimentaire. Tome 1, Les procédés physiques de conservation. Edition Lavoisier Tec et Doc, série APRIA, p295.

Magee, T.R.A., Wilkinson, C.P.d., 1992. Influence of process variables on the drying of potato slices. International Journal of Food Science & Technology 27(5), 541-549.

Marinos, K.D., Maroulis, Z.B., 1995. Transport Properties in the Drying of Solids. In:Handbook of Industrial Drying. 113-160. Mujumdar, A.S. Eds., 2nd Edition, Marcel Dekker Inc., New York.

Martin M.J.M., Soerjomataram, I., Magnusson, G., 2008. Cancer causes and prevention: A condensed appraisal in Europe in 2008. European Journal of Cancer 44(10), 1390-1403.

Mathioulakis, E.; Karathanos, V.T.; Belessiotis, V.G., 1998. Simulation of air movement in a dryer by computational fluid dynamics: Application for the drying of fruits. Journal of Food Engineering 36, 183-200

McLean, K.A., 1980. Drying and storage of combinable crops. Suffolk Farm Press.

Midilli, A., Kucuk, H., Yapar, Z., 2002. A new model for single layer drying. Drying Technology 20(7), 1503-1513.

Mihoubi, D., 2004. Déshydratations d'argile par compression et séchage. Aspects de modélisation et de simulation. Thèse de doctorat, université de Pan et des pays de l'Adour, école doctorale des sciences exactes et de leur application.

Mirmiran, P., Noori, N., Zavareh, M.B., Azizi, F., 2009. Fruit and vegetable consumption and risk factors for cardiovascular disease. Metabolism 58(4), 460-468.

Mittal, G.S., 1999. Mass diffusivity of food products. Food Research International 15, 19-66.

Mujumdar, A.S., 2000. Guide pratique du séchage industriel Application, principes, équipements et nouveau développement. Sakamon Devahastin, Montréal Exegex Corporation, Quebec.

Mujumdar, A.S., 2007, Handbook of Industrial drying, Taylor and Francis group, U.K.

Mujumdar, A.S., Menon, A.S., 1995. Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. Handbook of industrial drying 1, 1-39.

Mustayen, A.G.M.B., Mekhilef, S., Saidur, R., 2014. Performance Study of Different Solar Dryers: A Review. Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews. 34(1), 463-470.

Nadeau, J.P., Puiggali, J.R., 1995. Séchage : des processus physiques aux procèdes industriels. Tec and Doc- Lavoisier.

Naika, S., De Jeude, J.V.L., De Goffau, M., Hilmi, M., Van Dam, B., Florijn, A., 2005. La culture de la tomate, production, transformation et commercialisation. Cinquième édition révisée, Agromisa Foundation, coll. Agrodok, Wageningen p105.

Nema, P.K., Kaur, B.P., Mujumdar, A.S., 2015. Drying Technologies for Foods: Fundamentals & Applications 1-22, New India Publishing Agency, New Delhi - 110034, India 2015.

Nguyen, T.H., 2015. Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux. Thèse de doctorat, Université de Bretagne-sud.

Nishino, H., Murakosh, M., Tokuda, H., Satomi, Y., 2009. Cancer prevention by carotenoids. Arch Biochem Biophys. 483, 165-168.

Oliveira, A.P., Valento, P., Pereira, J.A., Silva, B.M., 2009. Ficus carica L.: Metabolic and biological screening. Food and Chemical Toxicology 47(11), 2841-2846.

Ong, K.S., 1999. Solar dryers in Asia pacific region. Renewable energy 16, 779-784.

Orsat, V., Raghavan, V., Meda, V., 2005. Microwave technology for food processing: an overview. In: The microwave processing of foods. Schubert H, Regier M (ed), Woodhead Publ, Cambridge, England 105-118.

Oukabli, A., 2003. Le Figuier : Un patrimoine génétique diversifié à exploiter. INRA, Transfert de Technologie en Agriculture 106, 1-4.

Ould brahim, I., 2018. Application d'un procédé adsorption-oxydation pour le traitement des colorants alimentaires au milieux aqueux. Doctoral thesis, USTHB Alger.

Overhults, D.G., White, G.M., Hamilton, H.E., Ross, I.J., 1973. Drying soybeans with heated air. Trans. ASAE 16,112-113.

Ozdemir, M., Devres, Y.O., 2000. The thin-layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. J Food Engr 42, 225-33.

Ozgur, M., Ozcan, T., Akpinar-Bayizit, A., Yilmaz-Ersan, L., 2011. Functional compounds and antioxidant properties of dried green and red peppers. Afr J Agr Res. 6(25), 5638–5644.

Padilla, M., 2003. Alimentation méditerranéenne et héritage. 2ème Conférence Méditerranéenne pour la Coopération Agricole. CIHEAM/NAGREF/INRA.

Page, G.E., 1949. Factors ınfluencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin-layers. M.S.Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.

Panchariya, P.C., Popovic, D., Sharma, A.L., 2002. Thin-layer modeling of black tea drying process. J Food Engr 52, 349-57.

Pangavhanc, D.R., Sawhcy, R.L., Sarsavadia, P.N., 2002. Design, development and performance testing of new natural convection solar dryer. Energy 27, 579-590.

Patankar, S.V., 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, McGraw-Hill, USA.

Patel, A.H., Shah, S.A., Bhargav, H., 2013. Review on solar dryer for grains, vegetables and fruits. IJERT 2(1), 4-10.

Paulsen, M.R., Thompson, T.L., 1973. Drying endysus of grain sorghum. Trans.ASAE 16, 537-540.

Perry, J.H., 2007. Chemical Engineering Handbook. 8ème ed., McGraw-Hill, New York, p. 28.

Ph.D. thesis. Cran®eld Institute of Technology, United Kingdom, 1987.

Pickersgill, B., 1997. Genetic resources and breeding of Capsicum spp. Euphytica 96, 129-133.

Polanyi, J.C., 1987. Some concepts in reactiondynamics. Science, 236(4802), 680-690.

Prabhat, Rubel, O., Byna, S., Wu, K., Li, F., Wehner, M., Bethel, W., 2012. Teca: A parallel toolkit for extreme climate analysis. Procedia Computer Science 9, 866-876.

Pu, H., Li, Z., Hui, J., Raghavan, G.V., 2016. Effect of relative humidity on microwave drying of carrot. Journal of Food Engineering 190, 167-175.

Rai, I., Bachheti, R.K., Saini, C.K., Joshi, A., Satyan, R.S., 2015. A review on phytochemical, biological screening and importance of Wild Apricot (Prunus armeniaca L.). Oriental Pharmacy and Experimental Medicine 16(1), 1-15.

Raju, R.V.S., Reddy, R.M., Reddy, E.S., 2013. Design and Fabrication of Efficient Solar Dryer. Journal of Engineering Research and Applications 3(6), 1445-1458.

Raquel, P.F., Susana, P., Maria, J.B., 2011. Study of the convective drying of pumpkin (Cucurbita maxima). Food Bioprod Process 89, 422-8.

Renaud, V., 2003. Tous les légumes courants, rares ou méconnus, cultivables sous nos climats. Les éditions Eugen Ulmer, Paris, p224.

Rousselle, P., Robert, Y., Crosnier, J.C., 1996. La pomme de terre : production, amélioration, ennemis et maladies, utilisations. INRA-paris.

Sacilik, K., Elicin, A.K., 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. Journal of food engineering 73, 281-289.

Saleh, A., Badran, I., 2009. Modeling and experimental studies on a domestic solar dryer. Renewable energy 34, 2239-2245.

Schnell, D., 1983. Technique de séchage. GMBH, Eschborn.

Sereno, A.M., Medeiros, G.L., 1990. A simplified model for the prediction of drying rates for foods. J. Food Eng. 12(1), 1-11.

Seveda, M.S., 2013. Design of a Photovoltaic Powered Forced Convection Solar Dryer in NEH Region of India. International Journal of Renewable Energy Research 3(4), 1-7.

Shafaei, S.M., Masoumi, A.A., Roshan, H., 2016. Analysis of water absorption of bean and chickpea during soaking using Peleg model. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 15, 135-144.

Shaik, K., Kailappan, R., 2007. Monolayer moisture, free energy change and fractionation of bound water of red chillies. Journal of Stored Products Research 43(2), 104-110.

Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J.L., Hamdy, M.Y., 1980. A model for ear corn drying. Transaction of the ASAE 23, 1261-1271.

Sharma, A., Chen, C.R., Lan, N.V., 2009. Solar-drying energy systems: A Review, Renewable and sustainable energy reviews. 13, 1185-1210.

Sharma, G.P., Verma, R.C., Pathare, P.B., 2005. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. Journal of Food Engineering 67, 361–366.

Shi, J., Maguer, M.L., 2000. Lycopene in Tomatoes: Chemical and Physical Properties Affected by Food Processing. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 40(1), 1-42.

Skuladottir, H., Tjoenneland, A., Overvad, K., Stripp, C., Olsen, J.H., 2006. Does high intake of fruit and vegetables improve lung cancer survival. Lung Cancer 51(3), 267- 273.

Snoussi, S.A., 2010 : Étude de base sur la Tomate en Algérie. Rapport de mission, FAO 53.

Solomon, A., Golubowicz, S., Yablowicz, Z., Grossman, S., Bergman, M., Gottlieb, H.E., Altman, A., Kerem, Z., Flaishman, M.A., 2006. Antioxidant activities and anthocyanin content of fresh fruits of common fig (Ficus carica L.). Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54: 7717−7723.

Steinmetz, K.A., Potter, J.D., 1996. Vegetables, Fruit, and Cancer Prevention: A Review. Journal of the American Dietetic Association 96(10), 1027-1039.

Thompson, T.L., Peart, P.M., Foster, G.H., 1968. Mathematical simulation of corn drying: A new model. Trans. ASAE. 11, 582-586.

Togrul, Ý.T., Pehlivan, D., 2003. Modelling of drying kinetics of single apricot. Journal of Food Engineering 58, 23-32.

Toğrul. İ.T., Pehlivan, D., 2002. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. Journal of Food Engineering 55, 209-216.

Tonui, K.S., 2014. Design and evaluation of solar maize grain dryer with a back-up heater, Master of Science in Environmental and Biosystems Engineering, University of Nairobi.

Touati, B., 2008. Etude théorique et expérimentale du séchage Solaire des feuilles de la menthe verte (mentha viridis). Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon Ecole Doctorale M.E.G.A et l'universite Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, Faculté des Sciences. Département de Physique, Algérie.

Treybal, R.E., 1980. Mass Transfer Operations. 3ème ed., McGraw-Hill, New York, chapitre 7 et 12.

Tripathy, P.P., Kumar, S., 2008. Determination of temperature dependent drying parameters for potato cylinders and slices during solar drying. Energy Convers. Manag. 49, 2941-2948.

Tsai, F.S., 2007. Effects of luteolin on learning acquisition in rats: Involvement of the central cholinergic system. Life Sci 80(18), 1962-1968.

Tunde-Akintunde, T.Y., 2011. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. Renewable Energy 36, 2139-2145.

Van Brakel, J., 1980. Mass transfer in convective drying, in: Advances in Drying. Hemisphere Publishing Corporation.

Verma, L.R., Bucklin, R.A, Ednan, J.B., Wratten, F.T., 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. Transaction of the ASAE 28, 296-301.

Vinson, J.A., 2006. Oxidative stress in cataracts. Pathophysiology 13(3), 151-162.

Visavale, G.L., 2009. Design and characteristics of industrial drying systems. Thèse de doctorat, Institut de technologie chimique, Mumbai, Inde.

Wang, C.Y., Singh, R.P., 1978. A single layer drying equation for rough rice. ASAE Paper 78, 3001.

White, G.M., Bridges, T.C., Loewer, O.J., Ross, I.J., 1978. Seed coat damage in thin layer drying of soybeans as affected by drying conditions. Transactions of the ASAE 23(1), 0224-0227.

Wiriya, P., Paiboon, T., Somchart, S., 2009. Effect of drying air temperature and chemical pre-treatments on quality of dried chilli. Inter Food Res J. 16, 441-454.

Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., Cagatay, F., 1999. Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy, ICAME'99, Adana, Turkey 565-569.

Yaldiz, O., Ertekin, C., Uzun, H.I., 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. Energy 26, 457-465.

Youcef-Ali, S., Desmons, J.Y., 2007. Influence of the aerothermic parameters and the product quality on the production capacity of an indirect solar dryer. Renewable energy 32, 496-511.

Yusheng, Z., Poulsen, K.P., 1988. Diffusion in potato drying. J. Food Eng. 7(4), 249-262.

Zielinska, M., Michalska, A., 2016. Microwave-assisted drying of blueberry (Vaccinium corymbosum L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture. Food Chemistry 212, 671-680.

Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B., Marinos, K.D., 1996. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. Drying technology 14 (10), 2225-2253.