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

Contribution à l'étude de Séchage Solaire des Déchets Alimentaires Sous Serre.

Présentée par **:**
Mme BADAOUI Ouassila

Soutenu publiquement le : 06/07/2019, devant le jury composé de :

Président	**O. BENKORTBI**	**Prof.**	**UYFM de Médéa**
Examinatrice	**G. HENINI**	**MCA**	**UHBBC de Chlef**
Examinateur	**Y. LAIDANI**	**MCA**	**UHBBC de Chlef**
Directeur de thèse	**S. HANINI**	**Prof.**	**UYFM de Médéa**
Invitée	**A. BENHAMOU**	**MCB**	**UMBB de Boumerdes**

Je dédie ce modeste travail :

A mon mari,

Ma mère,

Mon fils,

Ma grand-mère,

Mes frères,

Mes sœurs

La mémoire de mon père.

مـــــلـــخـــص : المساهمة في دراسة التجفيف الشمسي بالاحتباس الحراري للمخلفات الغذائية

ينتج, عن قطاع معالجة الأغذية الزراعية في الجزائر ,كمية هائلة من النفايات التي تسبب أضرار بيئية خطيرة. منه ، استخدام التجفيف الشمسي كعملية طاقوية نظيفة يبدو حلا واعداً. إذ يؤدي ذلك إلى تعزيز قيمة مخلفات الصناعات الغذائية عبرة إعادة استخدامها في شكل جاف ، كما يساهم أيضًا في حماية البيئة. من اجل هذا كله ، تم تصميم مجفف شمسي بالاحتباس الحراري بوحدة تطوير الأجهزة الشمسية ببوإسماعيل. و حتى يتم اختبار أداء المجفف الشمسي الجديد كمجفف معالج لنفايات، تم القيام بدراسة تجريبية لحركية التجفيف الشمسي لثلاث مخلفات غذائية المتمثلة في مخلفات الطماطم، البرتقال والتفاح في الهواء الطلق مباشرة تحت أشعة الشمس ومقارنتها بحركية التجفيف داخل المجفف الشمسي الجديد. تعادل مدة عملية التجفيف للحصول على منتج نهائي 7 ساعات فقط داخل المجفف مقارنة بمدة التجفيف بأشعة الشمس التي تقدر بثلاثة أيام تقريبا. تم تقييم خمسة نماذج جديدة شاملة وبدون أبعاد مع إحدى عشرة نموذج من الأدب لاختيار الأنسب من بينهم والملائم للمعطيات التجريبية المتحصل عليها أثناء عملية التجفيف في كلتا طريقتي التجفيف. من بين النماذج المختلفة التي تم اختبارها، تبين أن النموذج الأنسب لوصف عملية تجفيف المخلفات الغذائية هو النموذج رقم 2. من جهة أخرى، تم دراسة وتحديد معامل الانتشار الفعال وطاقة التنشيط. تتراوح فعالية الانتشار بين 1,27 أس – 10 و 3,85 أس – 10 م^2 /ثا. تم القيام بتجارب مختلفة لتقييم المساحيق التي تم الحصول عليها من مخلفات الطماطم, البرتقال و التفاح المجففة بطريقتين تحت أشعة الشمس وداخل المجفف الشمسي من أجل دراسة تأثير نوع التجفيف على الخصائص الفيزيائية والميكروبيولوجية والمجهرية للمخلفات ومنه، تحديد طريقة التجفيف الأمثل التي تعطينا مخلفات غذائية جافة صحية وذات أفضل قيمة غذائية من اجل إدراجها في الوجبات الغذائية للحيوانات المجترة. حسب النتائج المتحصل عليها تبين أن التجفيف الشمسي داخل المجفف أفضل من التجفيف في الهواء الطلق.

كلمات مفتاحية : تجفيف الدفيئة الشمسية، تجفيف تحت أشعة الشمس، مخلفات الغذاء الزراعي، عملية التجفيف، نماذج جديدة، حمية المجترات، التثمين، التحليل الوصفي.

Résumé: Contribution à l'étude de séchage solaire des déchets alimentaires sous serre

L'industrie de transformation des produits agroalimentaires en Algérie génère une énorme quantité de déchets, ce qui entraîne de graves problèmes environnementaux. Par conséquent, l'utilisation du séchage solaire en tant que procédé d'énergie propre semble être une solution prometteuse. Cela valorisera les déchets de fruits en les réutilisant sous forme sèche et contribuera également à la protection de l'environnement. Pour cette raison, un séchoir serre solaire innovant a été mis au point. Conçu à l'unité de développement d'équipements solaires de Bou Ismail. Pour tester les performances de ce nouveau séchoir solaire en tant que séchoir serre solaire pour le traitement des déchets, une étude de la cinétique de séchage au soleil sur trois déchets de tomates, d'oranges et de pommes à été comparée à celle de la cinétique de séchage des mêmes déchets à l'intérieur du nouveau séchoir solaire. La durée de séchage pour l'obtention d'un produit final est seulement 7 heures à l'intérieur du séchoir comparé au temps de séchage au soleil qui prend environ trois jours. Cinq nouveaux modèles universels sans dimensions et onze modèles de littérature ont été évalués afin de sélectionner le modèle qui correspond le mieux aux données expérimentales obtenues lors du processus de séchage pour les deux méthodes de séchage. Parmi les différents modèles testés, le nouveau modèle 2 était le plus approprié pour décrire le processus de séchage au soleil et dans le séchoir des déchets agro alimentaires. De plus, le coefficient de diffusion effective et l'énergie d'activation on été étudiés et déterminés. La diffusivité effective varie entre 1,27E-10 et 3,85E-10 m²/s. Diverses expériences ont été menées pour évaluer les poudres obtenues à partir des déchets de tomates, d'oranges et de pommes séchés au soleil et à l'intérieur du séchoir solaire, afin d'étudier l'effet du séchage sur leurs propriétés physiques, physicochimique, microbiologiques et microscopiques. Par conséquent, déterminer la méthode de séchage optimale qui nous donne des déchets agroalimentaires secs, sains, nutritifs et de meilleure qualité à inclure dans les rations des ruminants. Selon les résultats obtenus, il a été constaté que le séchage solaire à l'intérieur du séchoir serre est meilleur que le séchage au soleil.

Mots clés : *séchage serre solaire, séchage au soleil, déchets agroalimentaires, processus de séchage, nouveaux modèles, régimes alimentaires des ruminants, valorisation, analyse de caractérisation.*

Abstract: Contribution to the study of food waste greenhouse solar drying

Algeria agro-food processing industry generates a huge amount of residues, which causes a serious environmental problem. Thereby, the use of solar drying as a clean energy process seems to be a promising solution. This will enhance the value of agro- food residues by reusing it in a dry form and will also contribute to the protection of the environment. For this purpose, an innovative greenhouse solar dryer has been designed at the Solar Equipment Development Unit in Bou Ismail. to test the performance of the new solar dryer as a residues processing dryer, an experimental study of open sun solar drying kinetics of three industrial residues ,tomato pomace, orange pomace and apple pomace was compared with that of solar drying kinetics of the same residues in the new solar dryer. The drying time to obtain a final product is only 7 hours inside the dryer compared to the drying time in the open sun which takes about three days .Five new universal and dimensionless models and eleven different drying models chosen from the literature were evaluated in order to select the model that better fits the experimental data generated during the drying process for both drying methods. Among the different tested models, it emerged that the new model2 was the most suitable to describe the drying process in the open sun and in the dryer of agro-food residues. Also, the diffusion coefficient and the activate energy were studied and determined. The effective diffusivity varies between 1,27E-10 et 3,85E-10 m^2/s. Various experiments have been conducted to evaluate the powders obtained from tomato, orange and apple residues dried in the open sun and inside solar dryer, in order to study the effect of drying on their physical, physicochemical, microbiological and microscopic properties. Therefore, determine the optimal drying method that gives us better quality, healthy and nutritious dry agro-food residues to be included in ruminant diets. According to the obtained results, it has been found that solar drying inside the greenhouse dryer is better than in the open sun solar drying.

Keywords: *Greenhouse solar drying, open sun solar drying, agro-food residues, drying Process, new models, ruminant diets, valorization, characterization analysis.*

Remerciements

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

Je présente mes sincères remerciements avec mes profonds respects à mon promoteur, Professeur HANINI Salah 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 ma Co-promotrice, Maitre de conférences B, pour ses remarques, ses directives et l'intérêt qu'elle porte à ses étudiants. Je tiens à lui exprimer mes sincères remerciements pour son suivi et ses orientations.

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 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.

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.

Je tiens à remercier mon époux, Mr. DJEBLI Ahmed chercheur à l'UDES Bouismail, pour son aide, ses conseils, ses discussions enrichissantes, ses orientations et ses encouragements.

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

Je tiens à remercier M^{elle}. CHALAL Amina, M^{elle}. MEHIEDINE Sara, M^{elle}. BELHOUT Dalila, Mr. BOUTRA Belkacem et Mr. KHALFI Mehdi.

La réussite de ce travail dépend aussi du soutien moral et de l'encouragement social très chaleureux dont ma famille en particulier ma Mère, mes sœurs, mes frères, ma belle sœur et mes beaux-frères m'ont donné.

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

Table des matières

Liste des tableaux viii
Liste des figures x
Abréviations xii
Introduction Générale 1

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

I.1 Introduction 5
I.2 Principe du séchage 6
I.3 Mode de transfert de chaleur et de masse au cours du séchage 7
I.4 Activité de l'eau dans le produit 8
I.5 Cinétique de séchage 8
I.6 Période de séchage 9
I.6.1 Phase a : phase de mise en température du produit 9
I.6.2 Phase b : phase de séchage à allure constante 9
I.6.3 Phase c : phase de ralentissement 10
I.7 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage 11
I.7.1 Influence de la température de l'air 11
I.7.2 Influence de la vitesse de l'air 11
I.7.3 Influence de l'humidité de l'air 12
I.8 Qualité des produits sèches 12
I.8.1 Altérations physiques et mécaniques 12
I.8.2 Altérations biochimiques 12
I.8.3 Pertes d'arôme 13
I.9 Les modes de séchage 13
I.9.1 Séchage direct/séchage par convection ou par entraînement 14
I.9.2 Séchage indirect ou par conduction 14
I.9.3 Séchage par rayonnement ou par l'éclairement 14
I.9.4 Le séchage à l'air libre ou au soleil 15
I.10 Séchage solaire 16
I.10.1 Principe de séchage solaire 16
I.10.2 Types de séchoirs solaires 17
I.10.3 Avantages du séchage solaire par rapport au séchage au soleil 20
I.11 Séchage solaire sous serre 20
I.11.1 Principe du séchage solaire sous serre 20
I.11.2 Les types des serres 22
I.12 Conclusion 25

Chapitre II Étude Bibliographique sur les Modèles de Séchage des Produits Agroalimentaires 26

II.1 Introduction 26
II.2 Théorie du séchage 27
II.2.1 Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Lewis Sherwood) 27
II.2.2 Théorie capillaire (1937) 28
II.2.3 Théories basées sur les transferts couples de chaleur et de masse 29
II.2.4 Diffusion de la vapeur d'eau (1968) 31
II.2.5 Modèles empiriques 32
II.3 Diffusivité effective 36
II.3.1 Détermination de la diffusivité effective 37
II.4 Énergie d'activation 38
II.5 Conclusion 38

Chapitre III Valorisation des Déchets Agroalimentaires 39

III.1 Introduction 39
III.2 Différentes appellations pour designer les déchets agroalimentaires issus de la transformation industrielle 40
III.3 Différents domaines pouvant utiliser les sous-produits de l'industrie de transformations 43
III.3.1 Alimentation animale 43
III.3.2 Épandage et compostage 45
III.3.3 Production d'énergie 46
III.3.4 L'industrie alimentaire 47
III.4 Les principaux sous produits agroalimentaires valorises en alimentation des ruminants 48
III.4.1 Les sous produits des agrumes 48
III.4.2 Les sous produits de tomates 50
III.4.3 Les sous produits de pommes 53
III.5 Les contraintes dans l'utilisation des déchets agro-alimentaires 56
III.6 Composition et méthodes d'analyse des aliments en alimentation des ruminants 57
III.7 Les différentes méthodes d'analyse de la valeur nutritive des aliments 60
III.7.1 Les méthodes chimiques 60
III.7.2 Les méthodes physiques 60
III.7.3 Les méthodes enzymatiques 61
III.7.4 Les méthodes microbiologiques 61
III.8 Conclusion 62

Chapitre IV Matériels et Méthodes 63

IV.1 Introduction 63
IV.2 Procédure expérimentale 63
IV.2.1 Matériel végétal 63
IV.2.2 Caractérisation physique 64
IV.2.3 Séchage et modélisation 64
IV.2.4 Caractérisation physicochimiques de poudres obtenues 74
IV.2.5 Caractérisation microbiologiques 82
IV.2.6 Caractérisation microscopique de poudres obtenues 85
IV.3 Conclusion 88

Chapitre V Résultats et Discussions 89

V.1 Introduction 89
V.2 Caractérisation physique du produit séché 89
V.3 Conditions de séchage 90
V.3.1 Rayonnement solaire 90
V.3.2 Profil de la température à travers le séchoir serre et à l'air libre 91
V.3.3 Rapport d'humidité et la vitesse de séchage en fonction du temps 93
V.3.4 Efficacité du séchoir 96
V.4 Modélisation de la cinétique de séchage 96
V.4.1 Déchets de tomates 97
V.4.2 Déchets de Pommes 101
V.4.3 Déchets d'Oranges 104
V.5 Validation du nouveau modèle2 avec des données expérimentales de la littérature 109
V.6 Calcul du coefficient de diffusion effectif 113
V.6.1 Déchets de tomates 113
V.6.2 Déchets de pommes 114
V.6.3 Déchets d'oranges 115
V.7 Calcul de l'énergie d'activation 116
V.8 Caractérisation physicochimiques de poudres obtenues 117
V.9 Caractérisation microbiologiques 120
V.10 Caractérisation microstructurale de poudres obtenues 121
V.11 Conclusion 125

Conclusion Générale 126

Bibliographie 129

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Composition chimique moyenne des aliments pour animaux [37] 44
Tableau III.2 : Analyse chimique des principaux nutriments des sous produits de pulpes d'orange séchés [167] 49
Tableau III.3 : Analyse chimique des principaux nutriments des sous produits de tomates séchés [167] 52
Tableau III.4 : Analyse chimique des principaux nutriments des sous produits de pommes séchés [167] 55
Tableau III.5 : Minéraux nécessaires dans la ration des ruminants ainsi que leur symbole chimique [198] 58
Tableau IV.1 : Nouveaux modèles mathématiques proposés 72
Tableau IV.2 : Onze modèles mathématiques de séchage cités par la littérature 73
Tableau IV.3 : Les phases d'extraction automatiques SOXTHERM® de la détermination quantitative de la teneur en matières grasses. 78
Tableau V.1 : Les photos des poudres de déchets de tomates de pommes et d'orange obtenues par le séchage à l'air libre et dans le séchoir serre solaire 90
Tableau V.2 : Séchage des déchets tomates à l'air libre 98
Tableau V.3 : Séchage des déchets de tomates dans le séchoir serre solaire 99
Tableau V.4 : Comparaison entre les deux meilleurs nouveaux model 100
Tableau V.5 : Séchage des déchets de la pomme à l'air libre 101
Tableau V.6 : Séchage des déchets de la pomme dans le séchoir serre solaire 103
Tableau V.7 : Comparaison entre les deux meilleurs nouveaux model 104
Tableau V.8 : Séchage des déchets d'oranges à l'air libre 105
Tableau V.9 : Séchage des déchets d'orange dans le séchoir serre solaire 107
Tableau V.10 : Comparaison entre les deux meilleurs nouveaux model 108
Tableau V.11 : Résultats obtenus à partir du nouveau modèle2 pour les produits de la littérature 111
Tableau V.12 : Résultats obtenus à partir du nouveau modèle2 pour les produits de la littérature avec différents vitesse de l'air et différents traitements 112
Tableau V.13 : Valeurs effectives du coefficient de diffusion 116
Tableau V.14 : Valeurs de l'énergie d'activation 117
Tableau V.15 : Composition chimique des déchets de pommes, d'oranges et de tomates en % de MS 117
Tableau V.16 : Analyses microbiologiques des sous-produits de pommes, d'oranges et de tomates en Germes/gr 121

Tableau V.17 : Images de MEB avec différents agrandissements de la poudre des déchets de pommes séchés.....122
Tableau V.18 : Images de MEB avec différents taille pour la poudre des déchets de tomates séchés.....123
Tableau V.19 : Images de MEB avec différents taille pour la poudre des déchets d'Oranges séchés 124

Liste des figures

Figure I.1 : Evolution des nombres des travaux de recherche sur le séchage solaire aux cours des dix dernières années 6
Figure I.2 : Mode de transfert lors du séchage 7
Figure I.3 : Allure de séchage en fonction du temps 9
Figure I.4 : Principe de fonctionnement du séchage à l'air libre 15
Figure I.5 : Différents types de séchoirs solaires [23] 18
Figure I.6 : Séchoir solaire direct [49] 19
Figure I.7 : Séchoir solaire indirect [23] 20
Figure I.8 : Classification du séchoir serre [7] 21
Figure I.9 : Exemple de serre à convection naturelle [73] 23
Figure I.10 : Exemple de serre à convection forcée [8] 23
Figure II.1 : Schéma du milieu poreux et de volume élémentaire représentatif 31
Figure III.1 : Schéma illustrent la production de déchets et de sous-produits (déchets) 42
Figure III.2 : Les principales voies de valorisation des déchets agroalimentaires 43
Figure III.3 : Schéma du traitement de la tomate. 50
Figure III.4 : Schéma du traitement de pomme. 54
Figure III.5 : Composition et analyse de laboratoire des aliments 59
Figure IV.1 : Nouveau séchoir serre solaire 65
Figure IV.2 : Les spécifications de la face droite du séchoir 66
Figure IV.3 : Face gauche du séchoir 66
Figure IV.4 : Face Avant et toit du séchoir 67
Figure IV.5 : Dessin d'un chariot 67
Figure IV.6 : Dessin d'une claie 68
Figure IV.7 : Diagramme schématique du nouveau séchoir 69
Figure IV.8 : Schéma de Principe de la méthode de Kjeldahl. 76
Figure IV.9 : Les systèmes automatiques d'extraction rapide SOXTHERM® 77
Figure IV.10 : Schéma de Principe de la méthode de dosage TITRIMETRIQUE 81
Figure IV.11 : Schéma de principe de fonctionnement du microscope électronique à balayage (MEB) 86
Figure IV.12 : Microscope électronique à balayage (MEB) QUANTA FEG250 87
Figure V.1 : Variation du rayonnement solaire en fonction du temps 91
Figure V.2 : Variation de la température dans le temps en 3 lieux de la serre 92
Figure V.3 : Variation de la température dans le temps à l'extérieur pendent trois jours au niveau de claie du séchage à l'air libre 92

Figure V.4 : Variation du rapport d'humidité et de vitesse du séchage en fonction du temps (déchets de tomates).....93
Figure V.5 : Variation du rapport d'humidité et de vitesse du séchage en fonction du temps (déchets de Pommes) 94
Figure V.6 : Variation du rapport d'humidité et de vitesse du séchage en fonction du temps (déchets d'Oranges) 94
Figure V.7 : Variation du rapport d'humidité avec le nouveau modèle2 pour le séchage des déchets de tomates à l'air libre.....97
Figure V.8 : Variation du rapport d'humidité prévue des deux nouveaux modèles avec le rapport d'humidité expérimentale 100
Figure V.9 : Variation du rapport d'humidité avec le nouveau modèle2 pour le séchage des déchets de pommes à l'air libre. 102
Figure V.10 : Variation du rapport d'humidité prévue des deux nouveaux modèles avec le rapport d'humidité expérimentale de pommes séchés dans le séchoir serre solaire. 104
Figure V.11 : Variation du rapport d'humidité avec le nouveau modèle2 pour le séchage des déchets d'oranges à l'air libre. 106
Figure V.12 : Variation de taux d'humidité prévue des deux nouveaux modèles avec le taux d'humidité expérimentale d'oranges séchés dans le séchoir serre solaire. 108
Figure V.13 : Variation du rapport d'humidité de nouveau modèle N° 2 avec le rapport d'humidité expérimentale de la littérature. 109
Figure V.14 : Évaluation des coefficients de corrélation pour deux types de séchage utilisés dans l'étude Akpinar (2010). 110
Figure V.15 : Variation du Ln(MR) au fil du temps (déchets de tomates). 113
Figure V.16 : Variation du Ln(MR) au fil du temps (déchets de pommes). 114
Figure V.17 : Variation du Ln(MR) au fil du temps (déchets d'orange). 115

Abréviations

ABS: Absence,

ADF: Fraction fibreuse non soluble dans le détergent acide.

Ca: Calcium,

CB: Cellulose brute,

DMO: Digestibilité de la Matière Organique,

DIC: Détente Instantanée Contrôlée

EC: Escherichia Coli,

FAO: Food and Agriculture Organisation

GA: Germes Aérobie à 30°C,

L: Levures,

LM: Microscope Optique,

M: Moisissures,

ME: Energie Métabolisable,

Max: Valeur maximale,

MEB: Microscope Electronique à Balayage,

MG: Matière Grasse,

Min: Valeur minimale,

MM: Matière Minéral,

MO: Matière Organique,

Moy: Valeur moyenne,

MS: Matière Sèche,

NDF: Fraction fibreuse non soluble dans le détergent neutre,

PB: Protéine Brute,

S: Salmonelles,

SAL: Séchage à l'air Libre,

SSS: Séchage dans le Séchoir Solaire Serre,

TEM: Microscope Electronique à Transmission,

UDES: Unité de Développement des Equipements Solaires,

Introduction Générale

L'Algérie est confrontée à une croissance démographique rapide, ce qui augmente le besoin de fournir de la nourriture. Afin de maintenir le bon équilibre entre l'offre de la nourriture et la croissance démographique, le pays a suivi une politique sur la base de l'intensification de la production agricole et de la tendance à la transformation des aliments. Cependant, nous nous sommes rendu compte que pendant la transformation alimentaire industrielle et les différentes étapes impliquées, une quantité importante de déchets est observée, ce qui provoque un grave problème environnemental.

Maintenant, en Algérie, l'industrie de transformation agroalimentaire jette des millions de tonnes de déchets agroalimentaires riches en éléments nutritifs et en fibres. Selon les statistiques de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), en 2004, certaines usines algériennes de la transformation alimentaire avaient une quantité de déchets estimée à 1,856 million de tonnes, y compris 270 000 tonnes de sucre de betterave, 350 000 tonnes de canne à sucre, 60 000 tonnes de déchets d'olives et 30 000 tonnes de déchets de tomates [1].

Les sous produits agroalimentaires sont des déchets obtenus après les traitements de transformation [2] tels que les déchets de raisin, les déchets de pommes et les déchets de tomates. Qui sont riches en éléments nutritifs [3]. Ainsi, ils représentent une source d'énergie importante pour les animaux et surtout les ruminants qui ont la capacité de digérer les fibres. La réintégration de ces sous-produits agricoles dans les aliments des ruminants peuvent contribuer à donner une valeur ajoutée à ces "déchets". En effet, ces produits naturels contribueront à apporter une meilleure qualité des aliments sur le plan nutritionnel.

En outre, les déchets alimentaires sont un matériau instable, pas facile à préserver. Son instabilité est liée à sa forte teneur en humidité, sa composition physico-chimique et l'activation des enzymes après la décomposition [4].

Un moyen prometteur consiste à conserver ces déchets sous forme de déchets secs. Le séchage des déchets alimentaires est une étape importante. Cette étape réduit la teneur en eau, ce qui réduit le poids et le volume et, par conséquent, réduit les coûts de stockage, de manutention et de transport et prolonge la durée de préservation.

La mise à jour et la réutilisation des déchets agroalimentaires à l'aide des processus utilisant des ressources énergétiques propres, contribueront à renforcer la protection de l'environnement. Dans ce contexte, le séchage solaire a été proposé comme solution pour assurer aux usines des transformations alimentaires une production propre et gérer des projets respectueux de l'environnement.

Le séchage est une opération qui consiste à réduire la quantité d'humidité dans un produit alimentaire spécifique dans une mesure spécifique [5]. Cependant, il existe plusieurs méthodes de séchage; la plupart d'entre elles sont caractérisées par une consommation élevée d'énergie. L'énergie solaire peut jouer un rôle actif dans la satisfaction de la demande en énergie, réduisant le coût du processus de séchage et la protection de l'environnement.

Le séchage solaire est une technologie prometteuse en Algérie, car elle reçoit une grande quantité de rayonnement solaire avec une durée annuelle d'environ 2650 h d'ensoleillement solaire en moyenne [6]. Les paysans algériens pratiquent le séchage au soleil en distribuant leurs produits sur le sol, sur des claies ou sur des surfaces en béton, mais cette méthode a des inconvénients parce que les produits à sécher sont exposés à la pluie, aux insectes et à la poussière. L'utilisation des séchoirs solaires est une alternative très intéressante. Un séchoir solaire bien conçu peut atténuer les inconvénients du séchage au soleil et par conséquent, la qualité du produit final peut être améliorée. De nombreux prototypes de séchoirs solaires ont été développés en Algérie. Parmi eux, certains ont été réalisés et expérimentés au sein du Centre de développement des énergies renouvelables (CDER) et son unité de développement des équipements solaires (UDES), afin de développer cette technique au niveau national. Les séchoirs solaires développés peuvent être classés en deux catégories, les séchoirs solaires indirects et les séchoirs solaires directs (de type cabine ou de type serre).

La structure du séchoir serre est simple à concevoir et facile à construire. Au début, il n'était utilisé que pour la culture [7]. Ensuite, les chercheurs ont détecté qu'il pourrait être utilisé à des fins de séchage [8]. Plusieurs études ont abordé la performance des séchoirs serres lors de l'application du séchage des cultures [9,10].

Le nouveau séchoir serre solaire utilisé dans cette étude a été conçu dans l'unité de développement d'équipements solaires (UDES) à Bou-Ismail, en utilisant des matériaux et des équipements existants localement. Il a été développé pour la valorisation des déchets issus des usines des traitements industriels des fruits et légumes par séchage solaire.

Malgré l'importance du séchage comme opération unitaire et les progrès récents dans la recherche sur la préservation par élimination de l'eau, les principes physiques des phénomènes complexes qui se produisent au cours de la déshydratation et de la réhydratation ne sont pas absolument éclaircis et compris. La modélisation du séchage est extrêmement difficile dans le cas des produits biologiques et alimentaires. Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles mathématiques pour décrire les phénomènes de variations de la teneur en eau, du transfert de chaleur et de la masse lors du séchage de couches minces. Ces modèles phénoménologiques impliquent souvent des paramètres d'approximation telle que la diffusivité effective. Ils permettent, s'ils sont bien adaptés, une bonne utilisation en tant qu'outil d'intensification, de développement de processus du séchage et/ou de la conception des séchoirs.

L'objectif principal de cette étude était de tester la performance du nouveau séchoir solaire à effet de serre comme séchoir de traitement des déchets agroalimentaires et la possibilité d'élaborer et/ou déduire des modèles se rapprochant le plus possible des données expérimentales de séchage solaires de ces déchets.

À cette fin, une étude comparative de la cinétique de séchage a été menée entre le séchage à l'air libre et sous séchoir serre des trois déchets agroalimentaires disponibles dans notre pays (déchets de tomates, de pommes et d'oranges). Cinq nouveaux modèles universels et sans dimension ont été proposés et évalués et comparés avec différents modèles de séchage de la littérature pour sélectionner le modèle qui convient le mieux aux données expérimentales de séchage. Ce dernier a été évalué avec d'autres données expérimentales de séchage de la littérature. De plus, le coefficient de diffusivité et l'énergie d'activation ont été étudiés et calculés à partir de la solution analytique de l'équation de Fick utilisant les séries de Fourier. De plus, diverses expériences ont été menées pour évaluer les six poudres obtenus à partir de deux méthodes de séchage afin d'étudier l'effet de type de séchage sur leurs propriétés physiques, physicochimiques, microbiologiques et microscopiques. Par conséquent, définir la méthode optimale de séchage pour la valorisation des déchets alimentaires qui nous donne des poudres sèches, saines et nutritives de meilleures qualités à inclure dans les rations alimentaires des ruminants.

Le travail, effectué dans le cadre de cette thèse, est rédigé dans un enchainement logique, composé d'une introduction générale, cinq chapitres et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur le domaine du séchage, en particulier le séchage solaire. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude bibliographique de la modélisation mathématique du séchage suivi d'une description de méthodes de la détermination de la diffusivité effective et l'énergie d'activation. Dans le troisième, une étude de la valorisation des sous-produits issus de l'industrie de transformation par la mise en évidence des différents domaines pouvant utiliser ces sous-produits. Par ailleurs, les techniques d'estimation de la valeur nutritive des aliments.

Le quatrième chapitre est consacré aux matériels et méthodes. Le chapitre décrit le séchoir solaire serre, les différents modèles utilisés, les protocoles de traitement et il présente la caractérisation des produits.

Le cinquième chapitre présente les principaux résultats expérimentaux obtenus à partir des séries des expériences effectuées sous différentes conditions opératoires. Les résultats obtenus sont alors exposés et commentés. Avec la modélisation mathématique des cinq nouveaux modèles et les différents modèles de séchage de la littérature pour examiner par le choix et la détermination des paramètres de modèle adapté. Ainsi, la détermination du coefficient de diffusivité. Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I
Étude Bibliographique sur le Séchage et le Séchage Solaire

I.1 INTRODUCTION

Ces dernières années, l'utilisation de l'énergie solaire est devenue de plus en plus populaire. C'est une source d'énergie durable. Elle a un potentiel énorme pour diverses applications car elle est facilement accessible et abondante. Divers procédés tels que le séchage, le chauffage, la cuisson et la distillation peuvent être réalisés à l'aide de l'énergie solaire. En termes d'utilisation d'énergie, elle est classée dans les applications électriques et thermiques. Une des applications les plus prometteuses d'énergie solaire thermique est le séchage solaire. Le séchage solaire dans les régions où le gisement solaire et important est très utile d'un point de vue économique. C'est une méthode de conservation et de restauration qui encourage le stockage de produits alimentaires, qui utilise l'énergie solaire comme source de chaleur.

Ce domaine est l'objet de nombreuses recherches et communications. Les recherches que nous avons menées dans Google Scholar [11] nous ont permis de constater qu'aux cours des dix dernières années, les chercheurs se sont beaucoup mobilisés pour aborder ce domaine, notamment en ce qui concerne le séchage des aliments (figure I.1).

L'objectif de ce chapitre est la description bibliographique du domaine de séchage, en particulier le séchage solaire. Au début, il traite la théorie du séchage en présentant les différentes lois fondamentales, il donne un bref aperçu des principes fondamentaux de cinétique de séchage des produits agroalimentaires. Ainsi, il traite l'ensemble des phénomènes physico-chimiques et biologiques qui se produisent pendant l'opération de séchage. A la fin, l'étude des différents modes de séchage, suivie d'une étude comparative (avantages et inconvénients) entre

le séchage à l'air libre et sous séchoir. Les différents types de séchoir solaires actifs et passifs sont énumérés.

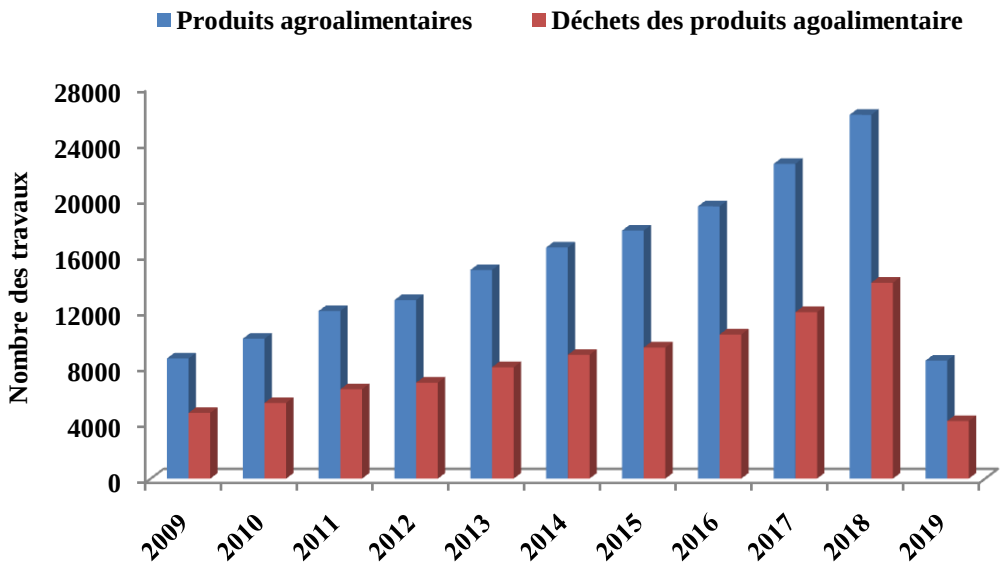


Figure I.1 : *Evolution des nombres des travaux de recherche sur le séchage solaire aux cours des dix dernières années*

I.2 PRINCIPE DU SECHAGE

Le séchage solaire est considéré comme le phénomène d'élimination de liquide par évaporation d'un corps humide. Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit obtenu est solide [12,13, 14]. Le séchage d'un produit a pour but de réduire sa teneur en eau, afin que son activité soit amenée à une valeur pouvant être maintenue à une température normale pendant de longues périodes [15].

L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique. L'eau contenue dans le produit peut se présenter sous différentes formes, telles que la forme liée ou libre ; le séchage vise la diminution de l'activité de l'eau qui se trouve généralement sous forme libre dans le produit à traiter. Cette opération met en jeu un transfert de chaleur et un transfert de masse :

- Un transfert de chaleur de l'air chaud au produit sous l'influence de la différence de température entre l'air et ce même produit,
- Le fait de déplacer l'eau dans la direction opposée améliore la sécheresse du produit. Cette sécheresse se caractérise par l'ouverture de pores à la surface des aliments où l'eau s'évapore. [16-18].

I.3 MODE DE TRANSFERT DE CHALEUR ET DE MASSE AU COURS DU SECHAGE

Le processus de séchage est réalisé par transfert de chaleur et masse (eau sous forme de vapeur). L'eau est transportée de l'intérieur du produit à l'interface produit/air par le phénomène de diffusion et de l'interface à l'air asséchant par le phénomène de convection comme le montre la figure I.2.

En fournissant l'énergie nécessaire pour activer et libérer les molécules d'eau, la chaleur est transférée en deux étapes différentes :

- **Transfert par convection :** l'air asséchant fournit en chaleur la surface du produit conformément à la loi de Newton.
- **Transfert par conduction :** la surface du produit étant chauffée par l'air asséchant, cette énergie thermique est transférée aux couches internes du produit par conduction. Ce phénomène est régi par la loi de Fourier.

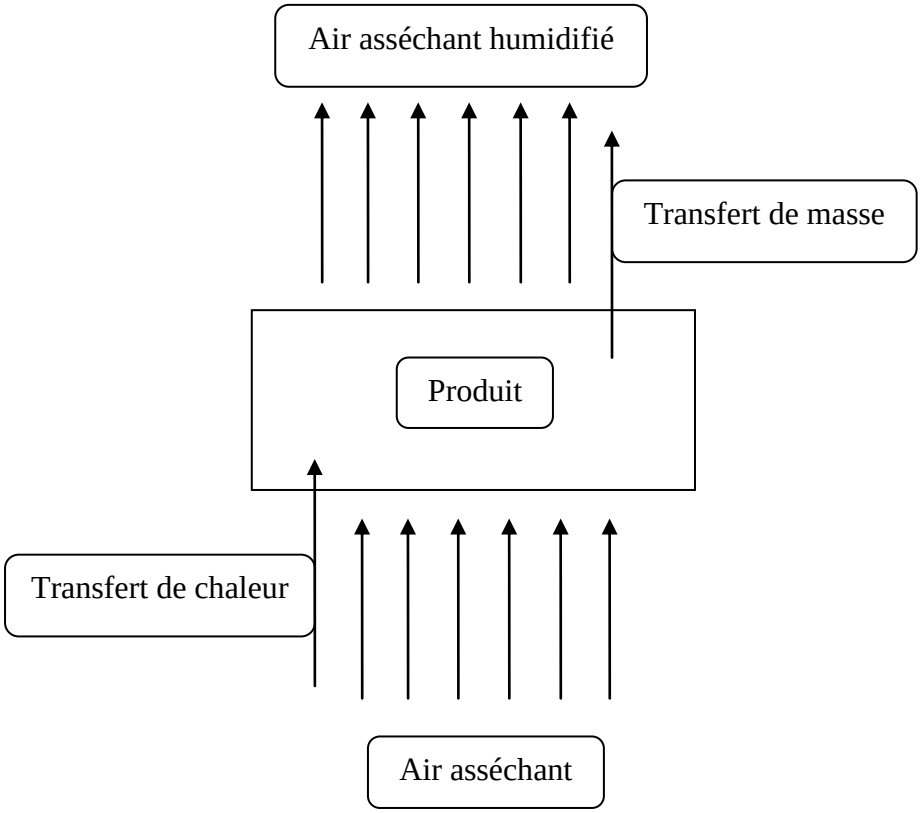


Figure I.2 : *Mode de transfert lors du séchage*

I.4 ACTIVITE DE L'EAU DANS LE PRODUIT

L'activité de l'eau dans un produit (a_w) est une quantité liée à l'humidité du produit. Elle représente également le produit par le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit (P_{vp}) par apport à la pression de vapeur de l'air sature (P_{vs}) [19-21].

$$a_W = \frac{P_{vp}}{P_{VS}} \quad (I.1)$$

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

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

Ces deux pressions sont fortement dépendantes de la température, tandis que leur rapport l'est beaucoup moins.

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

$$Hr(\%) = \frac{P_{vp}}{P_{VS}} \times 100 \quad (I.2)$$

Par conséquent, l'activité de l'eau dans le produit est directement liée à l'humidité relative de l'équilibre sur le produit à travers la relation :

$$a_W = \frac{P_{vp}}{P_{VS}} = \frac{Hr\,(\%)}{100} \quad (I.3)$$

La valeur optimale pour la conservation des produits biologiques, sans additif ni réfrigération, correspond à une activité de l'eau située entre 0.25 et 0.35 La croissance des bactéries est généralement limitée lorsque l'activité de l'eau tombe en dessous de 0,90 et que les moisissures et les levures sont contrôlées pour une activité de 0,70 et 0,80 [22].

I.5 CINETIQUE DE SECHAGE

La cinétique de séchage de différents produits est étudiée à l'aide des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues selon différentes conditions expérimentales (température, humidité, vitesse de l'air asséchant). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps.

Les travaux de séchage montrent que ces courbes se sont caractérisées par la nature du produit. Mais en général, il existe différentes périodes caractérisées par un comportement différent de la vitesse de séchage [23].

I.6 PERIODE DE SECHAGE

La Figure I.3, présente la courbe de l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps d'un produit soumis à un séchage convectif. On y distingue trois phases :

I.6.1 Phase a : phase de mise en température du produit

Lorsqu'un produit d'une température de surface T_s et d'une pression partielle de vapeur d'eau Ps est brassé par un flux d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière se produisent entre le produit et l'air de séchage. Pour être chargé sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit nécessite un correspondant de l'énergie de vaporisation, l'excès de chaleur produit par l'air augmente la chaleur du produit, conduisant à un équilibre du bilan de chaleur, si par contre, la température de surface du produit est trop élevée, le déficit énergétique entraînerait un refroidissement de produit. La période de mise en température est courte et ne se produit réellement que si les produits sont volumineux ou si la différence de température entre l'air et le produit est importante [23,24].

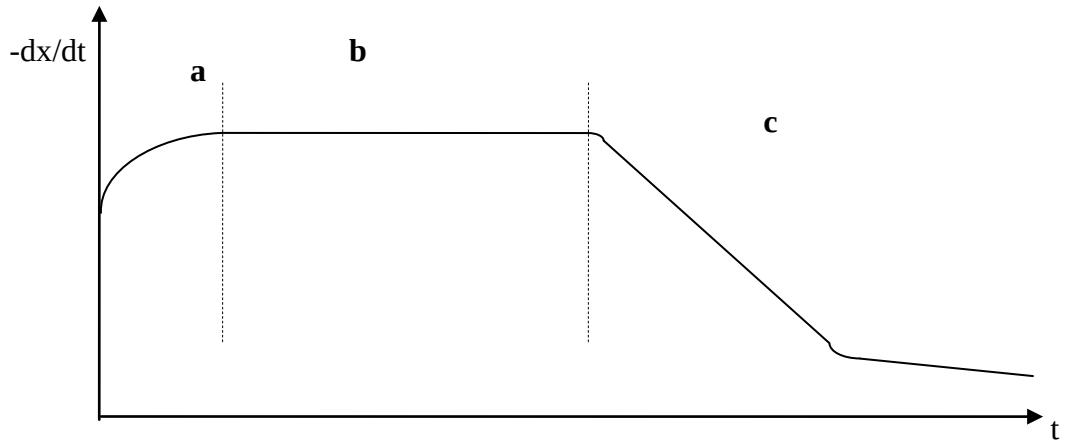


Figure I.3 : *Allure de séchage en fonction du temps*

I.6.2 Phase b : phase de séchage à allure constante

Cette phase existe uniquement s'il existe un film d'eau libre à la surface du produit. L'activité de l'eau à la surface du produit (a_{ws}) est égale à 1 et le séchage consiste en une évaporation isenthalpique de l'eau. La température de surface du produit correspond à la température humide de l'air asséchant C'est la température à laquelle le flux de chaleur fourni par l'air est égal au flux de chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau. La vitesse de séchage dépend uniquement des conditions externes telles que l'humidité de l'air, sa température sèche et sa vitesse de circulation [23,24].

La nature du produit n'intervient pas mais sa forme influe sur le débit d'eau évaporée $\dot{m}_e$ défini par O. Kricher & K. Kroll en 1963 [25] :

$$\dot{m}_e = -m_{Prs}\frac{dM}{dT} = k_m P_{sat}(T_{Pr}) - P_V(T_{fs}) \quad (I.4)$$

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

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

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

Pour les produits alimentaires et biologiques il n'y a généralement pas de période de séchage à vitesse constante. Ceci s'explique par le fait que les parois cellulaires interfèrent avec la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure du produit, par la migration des solutés qui obstruent les pores et par le durcissement et la rétraction de la surface du produit [26].

I.6.3 Phase c : phase de ralentissement

Cette période est caractérisée par un ralentissement de vitesse de séchage. Pendant cette période, la surface du produit n'est plus saturée de vapeur d'eau et le transfert de masse est contrôlé par les mécanismes complexes de transfert de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface [27] ; plusieurs phénomènes et caractéristiques doivent être pris en compte [28] :

- **La disparition de l'eau libre dans la surface du produit :** zone d'évaporation "front de séchage" sur la surface bouge vers l'intérieur. Au sommet de cette zone, il y a un déplacement d'eau libre, tandis qu'en aval s'évacuent l'eau liée et la vapeur.
- **Epaisseur du produit :** Si cette épaisseur augmente de plus en plus, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un chemin plus long et explique donc et en grande partie une vitesse de séchage plus lente.
- **La diffusivité de l'eau dans le produit :** elle varie avec le contenu du produit en eau, et plus le produit est sec, moins il devient perméable à l'eau.
- **Résistance mécanique des parois cellulaires intactes :** Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de sortir en vrac à l'extérieur du produit.
- **Le croutage :** Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (région b) et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est responsable des fortes concentrations en

surface de ces composés solubles qui obstruent les pores du produit. Accumulation et séchage de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

I.7 INFLUENCE DES PARAMETRES DE L'AIR SUR LA CINETIQUE DE SECHAGE

I.7.1 Influence de la température de l'air

La température de l'air asséchant affecte grandement la vitesse de séchage. Cet effet est dû à l'apport de chaleur au produit qui augmente avec l'augmentation de la température de l'air. Cela est également dû à la température du produit, qui est d'autant plus importante que la température de l'air est élevée. En conséquence, les conductivités de l'eau dans le produit deviennent importantes [23].

De nombreux chercheurs ont étudié l'effet de la température de l'air de séchage. Ces auteurs ont constaté que le temps de séchage diminuait avec l'augmentation de la température de séchage [29-31].

I.7.2 Influence de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air influe positivement sur la cinétique de séchage, surtout au début du processus. Mais, dans le cas des produits en peau à faible perméabilité (la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau), l'effet de la vitesse de l'air est très faible [22].

Les résultats des auteurs peuvent être classés en trois groupes en fonction de leur description de l'effet de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage [32] :

- Le premier groupe constate que l'effet de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage est très faible [33],
- Le deuxième groupe note que la vitesse de l'air affecte la vitesse de séchage : lorsque la vitesse est augmentée, le temps de séchage est réduit et la vitesse de séchage est augmentée [34],
- Le troisième groupe indique également que la vitesse d'air influence sur la vitesse de séchage. Cependant, la vitesse d'air atteint une valeur limite (en fonction du produit à sécher) au-delà de laquelle n'a aucun effet sur le temps de séchage [35].

I.7.3 Influence de l'humidité de l'air

La teneur en eau de l'air joue un rôle essentiel dans le comportement des cinétiques de séchage de certains produits. Cet effet semble être plus important au début du séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente [23]. Une faible humidité relative réduit le temps de séchage et accélère le processus de séchage [36].

I.8 QUALITE DES PRODUITS SECHES

Le séchage doit être effectué de manière à ce que la qualité du produit ne soit pas affectée de manière significative à la fin du processus. La majorité des produits agroalimentaires sont modifiés par séchage et le produit séché diffère du produit primaire et cela pour plusieurs raisons élucidées ci-dessous.

I.8.1 Altérations physiques et mécaniques

Le séchage entraîne des changements physiques et mécaniques chez la plupart des plantes, caractérisées par :

- la sortie de l'eau produite conduit à l'effondrement de celle-ci sur elle-même. La forme du produit séché final diffère de celle du produit initial. Cependant, dans certains cas, un écoulement très rapide d'eau et une matrice solide permettent d'obtenir un produit de même volume mais d'une structure poreuse,
- la migration des solutés vers la surface entraînant l'accumulation de sucres et d'autres substances dissoutes à la surface du produit Cette accumulation nuit à la qualité du produit, qui doit généralement être consommé réhydraté,
- la migration de matière grasse, fissuration et rétraction sont nuisibles à la qualité du produit.

I.8.2 Altérations biochimiques

Une exposition prolongée d'un produit agroalimentaire à une température de séchage élevée peut entraîner des modifications dans sa composition chimique, généralement indésirables pour la qualité du produit.

Ces changements sont nombreux. Mais les plus importants sont les suivants :

- Réaction de Maillard : il s'agit d'une réaction biochimique non enzymatique résultant d'une combinaison de protéines et de glucides qui donne au produit une couleur brune. Ces réactions entraînent aussi une perte de nutrition,
- Rancissement : oxydations des matières grasses,
- Destruction de vitamines,
- Dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altérant leur pouvoir liant ou moussant,
- Réactions enzymatiques : Production de l'effet du brunissement du produit. Pour détruire cet effet, les enzymes doivent être inactivés par un traitement préalable, tel qu'un blanchiment, ou par une réduction de la température de séchage [37].

I.8.3 Pertes d'arôme

Le séchage est un processus de séparation basé sur la volatilité. Par conséquent, l'eau du produit à sécher est éliminée en prenant avec elle tout autre produit volatil également présent dans le produit. Dans la plupart des cas, il s'agit des arômes présents dans les produits agroalimentaires [38,39].

I.9 LES MODES DE SECHAGE

Deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour évaporer l'eau d'un produit : l'ébullition ou l'entrainement.

Par ébullition, le produit est amené à la température telle que sa pression de vapeur d'eau soit égale à la pression totale ambiante régnant dans le séchoir. La température du fluide est donc déterminée par la pression d'ébullition (par exemple 100°C pour l'eau à 1,013x105 Pa) [40,41].

Par entraînement, Lorsqu'un corps humide est place dans un courant d'air (ou dans un autre gaz) suffisamment chaud et sec il crée automatiquement entre ce corps et l'air un gradient de température et de pression partielle d'eau telles que :

- Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit sous l'influence de la présence d'un gradient de température,
- Un transfert de matière (eau) provenant du produit vers l'air sous l'effet d'un gradient de pression partielle [40,41].

Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement.

I.9.1 Séchage direct/séchage par convection ou par entraînement

La particularité de ce mode de séchage réside dans le fait que l'air de séchage remplit deux fonctions simultanées. Lesquelles L'apport de chaleur vers la surface du produit, est conforme à la loi de Newton (Eq. I.5) pour récupérer la vapeur d'eau du produit. Il convient de noter que la circulation du fluide caloporteur peut être une convection naturelle ou forcée [40].

$$\phi_{conv} = \alpha S_p \left(T_{a,a} - T_{s,p}\right) \quad (I.5)$$

Avec : ϕ_{conv} *: Le flux de chaleur par convection, (W)*

α *: Coefficient de covection, (W/m²K)*

$T_{a,a}$ *et* $T_{s,p}$ *: Températures en Kelvin de l'air ambiant et la surface du produit respectivement.*

S_p *: Surface de la paroi, (m²)*

I.9.2 Séchage indirect ou par conduction

Le séchage indirect est caractérisé par le contact du produit en cours de séchage par une paroi conductrice de chaleur chauffée par un fluide caloporteur (air, eau, gaz ou vapeur d'eau). Sous l'influence de la chaleur transmise par la conduction, le liquide s'évapore ou se vaporise. La vapeur formée étant entraînée par un léger écoulement de gaz auxiliaire ou par une dépression. Le transfert de chaleur par conduction assure le passage de l'énergie vers les couches internes du produit conformément à la loi de Fourier [40] :

$$\varphi_{cond} = \lambda \cdot S_p \cdot \frac{dT_p}{dx} \quad (I.6)$$

Avec : φ_{cond} *: Le flux de chaleur par conduction, (W)*

S_p *: Surface de la paroi, (m²)*

λ *: Conductivité thermique de la pellicule de produit (W/m.K)*

$\frac{dT_p}{dx}$ *: Gradient de température, (K/m)*

I.9.3 Séchage par rayonnement ou par l'éclairement

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par l'éclairement. Ce processus de séchage est très efficace pour éliminer l'eau, en particulier lorsque le produit à sécher n'est pas sensible à la chaleur. Les sources chaudes peuvent être des émetteurs de gaz combustibles, des émetteurs électriques ou le soleil.

La quantité de chaleur Q (watt) transférée au produit à sécher par unité de temps est spécifiée par la loi de Stephan Boltzmann [40], telle que :

$$Q = A_1 * C\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]\varphi \quad (I.7)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2}-1\right)} \quad (I.8)$$

Avec : T_1 *: Température de la source émettrice (K)*

T_2 *: Température du produit (K)*

A_1 *: Surface du corps recevant le rayonnement (m²)*

A_2 *: Surface de l'émetteur infrarouge (m²)*

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

ε_1 *: Emissivité du produit*

ε_2 *: Emissivité de l'émetteur*

C*: Facteur de forme du corps gris*

I.9.4 Le séchage à l'air libre ou au soleil

Figure 1.4 montre le principe de fonctionnement du séchage traditionnel au soleil. Ce séchage se produit principalement dans les zones arides ou semi-arides où les conditions climatiques sont idéales : saison sèche avec fort ensoleillement, faibles précipitations, faible taux d'humidité. C'est une méthode ancestrale utilisée jusqu'aujourd'hui, consiste à répartir les produits à sécher à l'extérieur en plein air où ils reçoivent des radiations solaires pendant toute la journée.

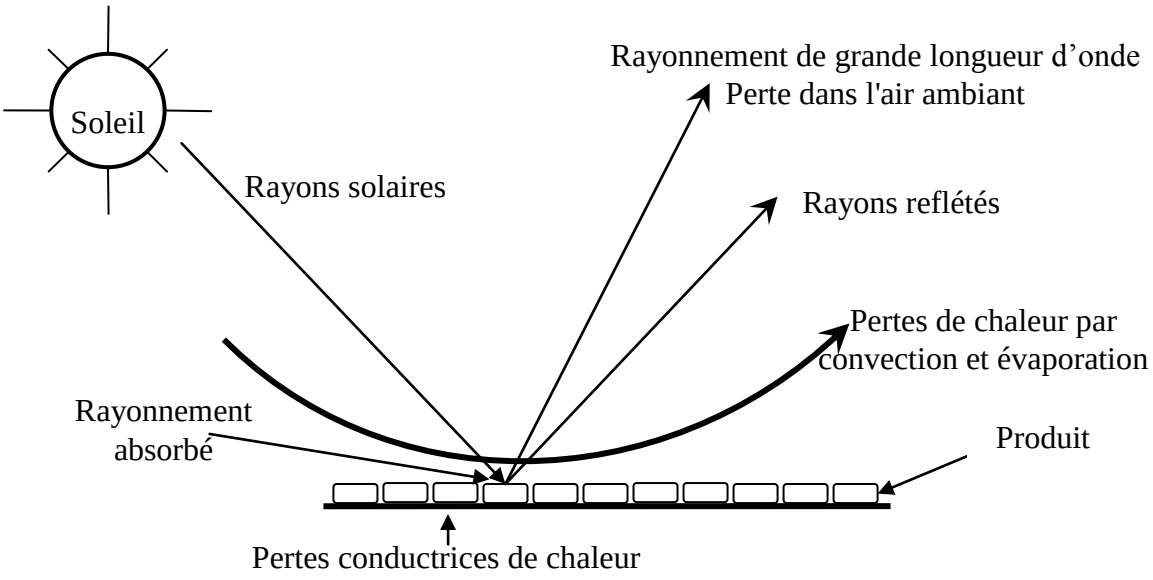


Figure I.4 : *Principe de fonctionnement du séchage à l'air libre*

Le séchage a lieu sur le sol, sur les nattes, sur les rochers plats ou sur les toits des maisons. C'est une technique facile et peu coûteuse, mais les résultats sont souvent médiocres car les produits sont contaminés par le sable et la poussière. Ils sont attaqués par des animaux, des insectes et des microorganismes. Les pertes sont très importantes. De plus, les produits se détériorent, sèchent trop ou insuffisant, entraînant une grave dégradation de leur qualité [42].

Certains scientifiques travaillent sur des méthodes de prétraitement ou la modélisation du séchage [43-45] pour améliorer la qualité des produits.

Le séchage au soleil présente les inconvénients suivants :

- C'est une méthode de séchage traditionnelle et non la plus rapide.
- Produits contaminés par la poussière, les insectes, les oiseaux et les rongeurs.
- Le séchage est effectué uniquement par temps ensoleillé.
- Les qualités sensorielles telles que l'apparence, la couleur et la texture sont médiocres.
- L'efficacité du processus est faible compte tenu des nombreux aléas : météorologie, constituants du produit sensibles aux rayonnements ultra-violets, insectes, rongeurs, perte de vitamine, etc.

En raison des inconvénients décrits ci-dessus et pour améliorer ces techniques traditionnelles, les professionnels ont eu recours au séchage artificiel en développant plusieurs prototypes de séchoirs solaires.

I.10 SECHAGE SOLAIRE

I.10.1 Principe de séchage solaire

Le séchage solaire a été utilisé pour sécher les légumes (fruits et feuilles), les fruits, les plantes, les graines, le poisson, la viande, le bois et certains produits forestiers et agricoles. Afin de tirer parti des sources d'énergie gratuites et renouvelables fournies par le soleil, un certain nombre d'efforts ont été déployés au cours des dernières années pour développer le séchage solaire, principalement par la mise au point de prototypes de séchoirs à énergie solaire destinés à conserver les fruits et légumes et produits forestiers [46,47]. Le séchage des produits agricoles utilisant les séchoirs solaires est un excellent moyen de réduire les pertes après récolte et la mauvaise qualité des produits séchés, associées aux méthodes traditionnelles de séchage au soleil [48]. Le séchage solaire utilisant les séchoirs solaires est une solution d'économie d'énergie pour les pays qui disposent d'un gisement solaire important. Les séchoirs solaires peuvent être classifiés en séchoirs solaires directs, indirects et hybrides. Le principe de fonctionnement des

séchoirs dépend de la méthode de collecte de l'énergie solaire, sa conversion en énergie thermique, la disposition des produits, les températures et le type de produit à sécher [49].

I.10.2 Types de séchoirs solaires

Il existe une grande diversité de types de séchoirs, tels que la variété de produits à sécher. La figure I.5 résume les différents types de séchoirs solaires. De façon générale, les systèmes du séchage à énergie solaire peuvent être classés en deux catégories principales : systèmes du séchage à énergie solaire actifs et systèmes de séchage à énergie solaire passifs.

Trois sous-catégories distinctes de systèmes de séchage solaire actifs ou passifs, qui sont fondamentalement différentes dans le schéma de la conception du système et dans la méthode d'utilisation de la chaleur solaire, peuvent être identifiées : les séchoirs solaires directs, les séchoirs solaires indirects et les séchoirs solaires mixtes.

I.10.2.1 Les séchoirs solaires passifs

Le séchage passif ou par convection naturelle utilise l'énergie solaire qui chauffe l'air caloporteur, et lui donne une capacité supplémentaire de recevoir de la vapeur d'eau. L'énergie solaire est la seule source qui assure le fonctionnement. Ces séchoirs sont particulièrement adaptés aux régions éloignées et isolée.

I.10.2.2 Les séchoirs solaires actifs

Le fluide de séchage est forcé par un ventilateur (convection forcée), permettant une énergie d'évaporation accrue pour le séchoir. Ces séchoirs utilisent une énergie supplémentaire pour permettre de maintenir une température constante à l'intérieur quelles que soient les conditions climatiques, comme énergie d'appoint, les systèmes du chauffage à énergie électriques ou par combustible fossile [24].

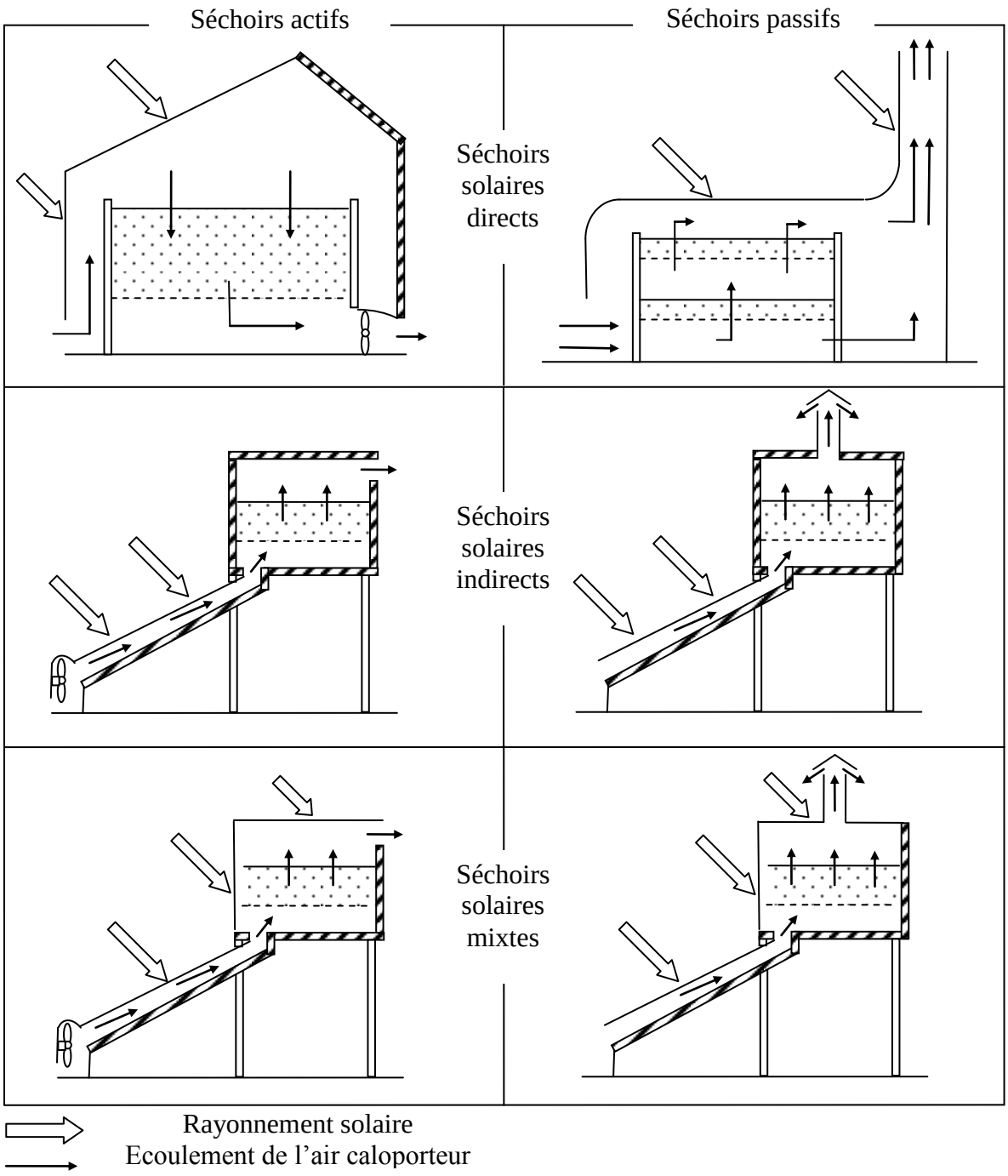


Figure I.5 : *Différents types de séchoirs solaires [24]*

I.10.2.3 Les séchoirs solaires directs

La figure I.6 explique le principe de fonctionnement du système de séchage solaire direct. En pratique, les séchoirs directs sont constitués d'un caisson de forme variable avec une couverture transparente : vitre ou film plastique, le rayonnement solaire total pénètre à travers la couverture transparente, une partie de ce rayonnement est renvoyée dans l'atmosphère et le reste est transféré dans le séchoir solaire. Ensuite, une partie du rayonnement transmis est réfléchie à la surface de produit à sécher. Cette surface absorbe la partie restante du rayonnement transmis,

ce qui entraîne une augmentation de la température et émet un rayonnement de grande longueur d'onde qui ne peut pas s'échapper de l'atmosphère en raison de la couche de verre transparente. Cela conduit à une température élevée au-dessus de produit à sécher à l'intérieur de l'armoire.

Le couvercle transparent du séchoir réduit les pertes de convection directes dans l'air. Cela joue un rôle important dans l'élévation de la température de l'armoire et de produit à sécher. Dans ce système, l'humidité est absorbée par l'air qui entre dans l'enceinte par le bas et passe à travers la sortie de l'air supérieur [50].

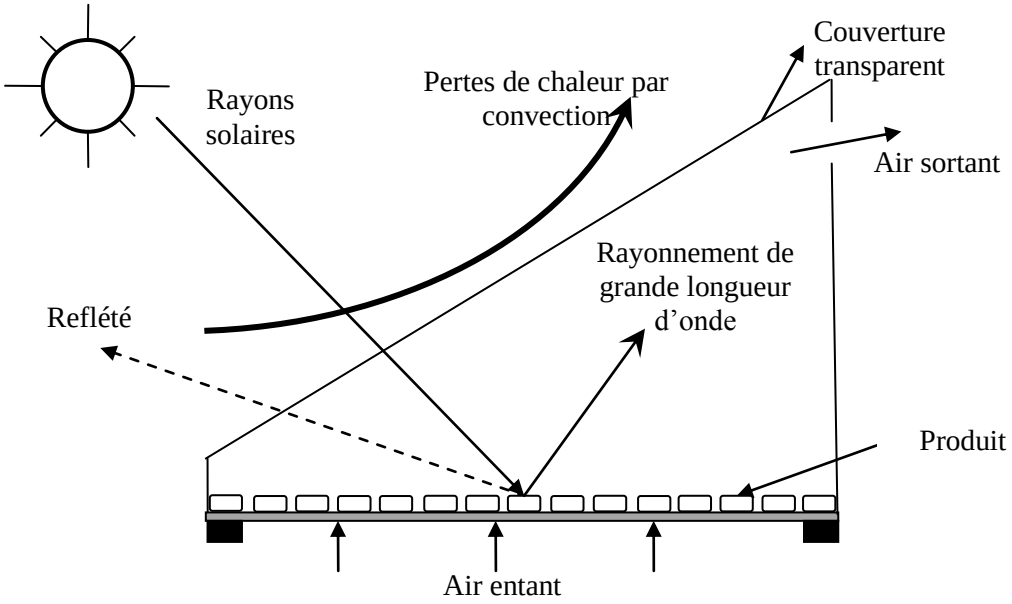


Figure I.6 : *Séchoir solaire direct [50]*

I.10.2.4 Les séchoirs solaires indirects

Le principe de fonctionnement du séchoir solaire indirect est illustré à la figure 1.7. Les produits à sécher de ces séchoirs solaires indirects sont placés sur des claies à l'intérieur de la chambre de séchage et un capteur solaire séparé est utilisé pour convertir l'éclairement solaire en chaleur pour chauffer l'air entrant dans la chambre. L'air chauffé passe à travers les aliments humides, fournissant la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'humidité par transfert de chaleur entre les aliments humides et l'air chaud. Les avantages résident dans le fait que le produit n'est pas directement exposé au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle [51].

I.10.2.5 Les séchoirs mixtes

Ces séchoirs solaires ont les caractéristiques communes des séchoirs solaires directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée de l'éclairement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire permet de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage [24].

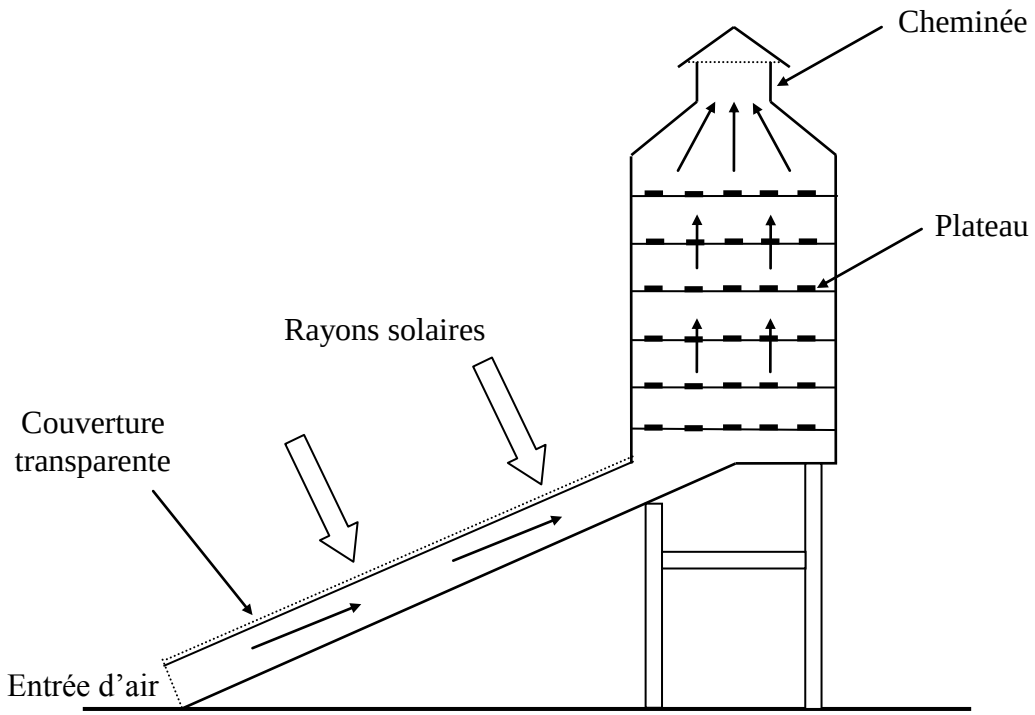


Figure I.7 : *Séchoir solaire indirect [24]*

I.10.3 Avantages du séchage solaire par rapport au séchage au soleil

Par rapport au séchage au soleil, le séchage solaire présente les avantages suivants :

- La technologie de séchage solaire est simple, facile et peu coûteuse à fabriquer.
- Les produits à sécher sont protégés de la pluie, des insectes et des rongeurs.
- La déshydratation est plus rapide, les produits séchés sont très sains et propres.
- La qualité des produits séchés est la meilleure.
- Le séchage est possible toute l'année, y compris pendant la saison des pluies (séchoirs hybride).
- Les qualités sensorielles telles que l'apparence, la couleur et la texture sont meilleures.

I.11 SECHAGE SOLAIRE SOUS SERRE

I.11.1 Principe du séchage solaire sous serre

Le fonctionnement d'une serre repose sur le principe de l'effet de serre [52]. L'énergie provenant de l'éclairement solaire, est émise dans deux gammes, une partie dans le domaine du visible et une autre dans le domaine de l'infrarouge. L'effet de serre repose, sur le fait que les murs de la serre et son toit sont formés de matériaux à propriétés différentes dans les deux domaines spectraux : transparents aux rayons solaires ils laissent pénétrer la chaleur du soleil

(l'éclairement de courte longueur d'ondes) mais ne transmets pas les rayons infrarouges (l'éclairement de grande longueur d'ondes). Les serres sont utilisées pour les cultures, la volaille, l'aquaculture et le chauffage du sol [53].

Depuis deux décennies, les chercheurs ont découvert qu'elles pouvaient également être utilisées pour le séchage à basse température. Par conséquent, la serre peut être utilisée tout au long de l'année pour la culture ou le séchage, ce qui la rend la plus rentable. Le séchage solaire sous serre d'un produit, utilise l'effet de serre pour accélérer le processus d'élimination de l'eau contenue dans le produit a déshydraté.

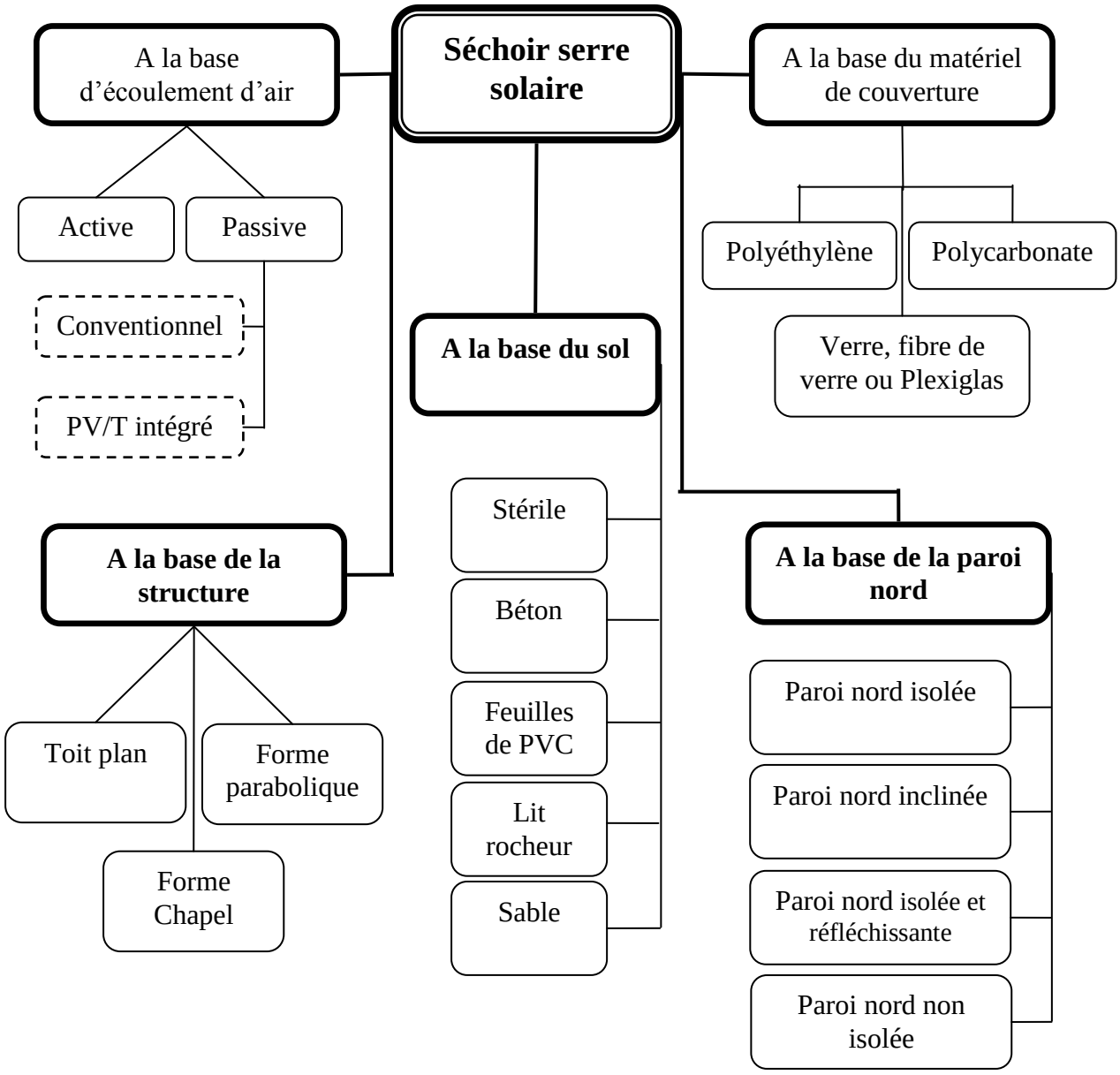


Figure I.8 : *Classification du séchoir serre [8]*

L'échauffement de la surface du produit, grâce à l'éclairement solaire et à l'éclairement infrarouge émis par le matériau transparent de la serre, permet d'augmenter la pression de vapeur

d'eau à la surface du produit, et par suite de favoriser l'évaporation. Un flux d'air frais admis sous serre permet d'évacuer la vapeur d'eau issue du séchage.

Le séchoir serre appartient à la catégorie des séchoirs solaires direct et parfois mixte. Il est peu coûteux, facile à fabriquer, simple à concevoir et peut être utilisé dans n'importe quelle partie du monde. Il fonctionne essentiellement en mode passif (convection naturelle) ou actif (convection forcée) [19]. En mode passif, un ventilateur ou une cheminée est prévu pour la circulation naturelle de l'air entrant dans le séchoir. Alors que dans le cas active, un ventilateur d'extraction est prévu pour déplacer l'air humide à l'extérieur du séchoir [54]. La figure I.8 montre la classification du séchoir serre solaire.

I.11.2 Les types des serres

Les séchoirs serre sont principalement classés en deux types basés sur le mode de transfert de chaleur, à savoir : Séchoir serre à convection naturelle (mode passif) et Séchoir serre à convection forcée (mode actif).

Diverses modifications et recherches ont été effectuées pour améliorer les performances du séchoir serre.

Certaines modifications apportées aux séchoirs solaires serre actifs et passifs dans la littérature sont les suivantes :

- Séchoir serre solaire PV intégrée [55-65].
- Utilisé un mur nord opaque pour l'isolation et éviter les pertes de chaleur [66-68].
- Des matériaux de stockage thermique tels que le sable, le lit de roche, les sols en béton peint en noir et les panneaux en PVC sont utilisés, pour que la serre puisse être utilisée pendant les périodes non ensoleillées [69-71].
- Mur nord incliné et réfléchissant pour capter les radiations maximales [72].

I.11.2.1 Séchoirs solaires serre à convection naturelle (mode passif)

Ils sont également appelés séchoirs à tente et sont essentiellement des serres modifiées. Ils sont constitués en général de parois en matière plastique transparente, ou en verre pour maximiser l'effet serre. Ils sont équipés des ouvertures de taille et de position appropriées afin de favoriser la convection naturelle. La gestion de l'atmosphère dans la serre est assurée par la ventilation naturelle donc non contrôlée. Le taux de renouvellement de l'air dans la serre n'est pas maitrisé car seule l'action sur l'ouvrant en toiture permet de gérer le débit de ventilation dans la serre (figure I.9) [73-75].

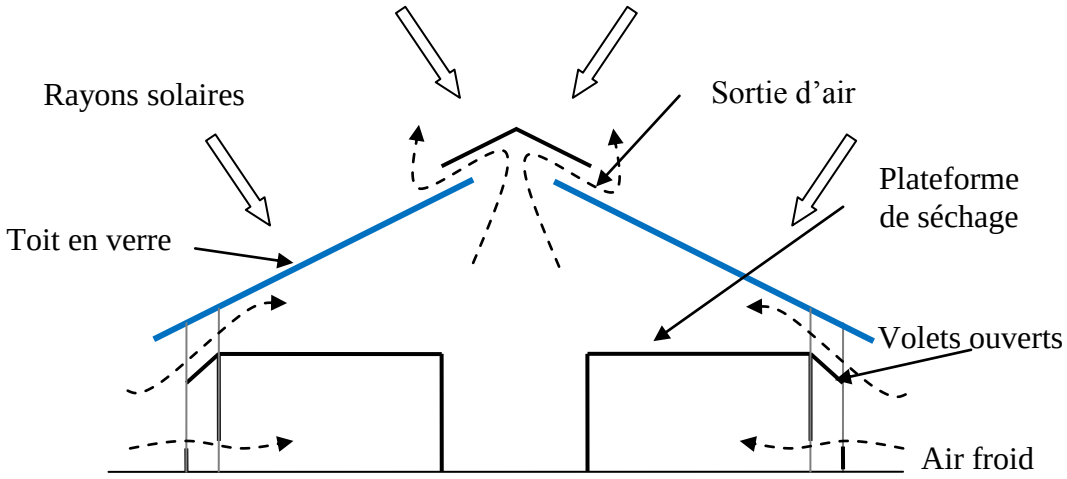


Figure I.9 : *Exemple de serre à convection naturelle [74]*

I.11.2.2 Séchoir solaires serre à convection forcée (mode actif)

La serre ne contient aucune ouverture libre ; la ventilation de la serre est exclusivement forcée, celle-ci est effectuée par des extracteurs situés en pignon (figure I.10).

L'avantage de cette serre est la maitrise de la ventilation d'où le taux de renouvellement élevé et l'inconvénient est le cout supplémentaire introduit par l'augmentation de la consommation énergétique qui est plus importante dans ce cas-là [73].

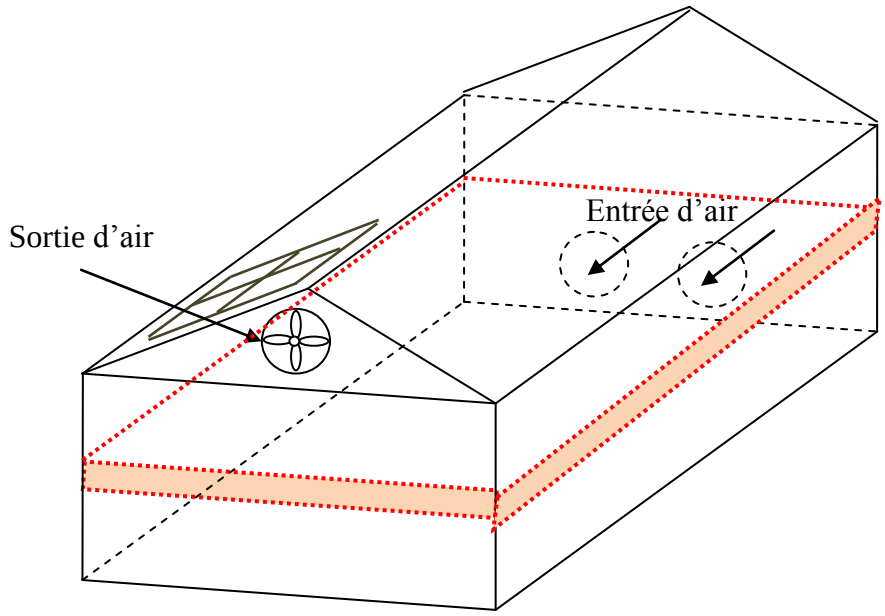


Figure I.10 : *Exemple de serre à convection forcée [9]*

I.11.2.3 Travaux antérieurs réalisés sur le séchage solaire serre par rapport au séchage à l'aire libre

Jain et Tiwari [76] ont traité le chou et les pois dans un séchoir serre en convection naturelle et simultanément, la même quantité de ces cultures a également été séchée au soleil. L'étude a montré que, comparé au séchage au soleil, le coefficient de transfert de masse par convection du séchage à l'intérieur de la serre est plus faible.

Berinyuy et al., [77] ont construit un séchoir tunnel solaire à double passage et stockage de chaleur utilisant des matériaux locaux. Les auteurs l'ont évalué pour le séchage des produits agricoles. Les résultats ont montré que le séchage était continu pendant les périodes du faible ensoleillement en raison du stockage de la chaleur. En fonction de la récolte, le temps de séchage a été réduit de 30% à 50%. La qualité du produit séché était acceptable en goût et en couleur.

Farhat et ses collaborateurs [78] ont proposé un séchoir serre en polyéthylène à convection naturelle (mode passif) pour le séchage du poivre. Ils ont constaté qu'il y avait plus de 83% de réduction de poids à la fin du processus de séchage.

Gbaha et al., [79] ont proposé un séchoir solaire à convection naturelle de type direct. La teneur en eau a été réduite à 80% en 19 heures pour le manioc et à 22 heures pour la banane douce afin d'atteindre le seuil de sécurité de 13%. Pour les produits alimentaires sélectionnés, ils ont constaté que les performances thermiques du séchoir étaient supérieures à celles du séchage au soleil en ce qui concerne les transferts de chaleur et de masse.

Koyuncu [80] a proposé deux nouveaux séchoirs serre à usage intensif en convection naturelle. Les séchoirs ont été étudiés à la fois en l'absence de charge et en charge. Un essai de séchage du poivre dans ces séchoirs a été comparé à un séchage naturel dans les mêmes conditions climatiques : la qualité du poivre séché était supérieure et la procédure de séchage deux fois et demie plus efficace que le séchage naturel.

Hossain et Bala [81], l'étude du séchoir tunnel solaire de type mixte en mode actif a été étudiée. Des expériences ont été menées sur du piment rouge et vert sec. Le séchoir a considérablement réduit le temps de séchage par rapport au séchage au soleil

.Kooli et al., [82] l'étude a été réalisée sur le séchage du poivron rouge au soleil dans la serre sous des conditions de laboratoire constantes dans diverses conditions atmosphériques. Les différents paramètres de séchage ont été calculés.

Barnwal et Tiwari [83], l'étude du séchage dans un séchoir serre hybride PV/T de grande taille en mode actif a été utilisée pour sécher le raisin. Les performances de séchage des raisins en serre ont été comparées au séchage naturel ainsi qu'au séchage à l'ombre. Le séchage en serre s'est avéré supérieur à tous les points de vue.

Janjai et al., [84] un séchoir à effet de serre actif à grande échelle en polycarbonate de forme parabolique ayant une capacité de 1000 kg avec un sol en béton noir a été conçu et développé. Une expérience a été menée pour sécher la banane, le piment et le café dans un séchoir, ainsi que pour le séchage au soleil.

I.12 CONCLUSION

Dans ce chapitre, une étude des principes de base régissant le processus de séchage a été réalisé avec la classification des différents types de séchoirs solaires. L'utilisation d'un séchoir solaire réduit considérablement le temps de séchage par rapport au soleil et la qualité du produit dans le séchoir solaire peut être comparée ou meilleure à celle des produits séchés au soleil. Le séchage solaire directe sou serre a été retenu dans le cadre de ce travail de recherche, de nombreux types de séchoirs solaire serre sont conçus et développés par plusieurs chercheurs. A partir de cette étude on conclue que le séchage solaire est un domaine de recherche très large et approfondi soit de point de vue théorique ou expérimental.

Chapitre II
Étude Bibliographique sur les Modèles de Séchage des Produits Agroalimentaires

II.1 INTRODUCTION

Le séchage joue un rôle important dans la conservation des produits agricoles. Ce processus augmente la durée de conservation du produit en réduisant le volume et le poids, ce qui simplifie son transport et entraîne une diminution des espaces de stockage. En fait, le séchage est une opération complexe incluant des phénomènes simultanés de transfert de chaleur et de masse, ainsi que des transformations physiques ou chimiques, qui peuvent causer des changements dans la qualité des produits. Les changements physiques qui peuvent survenir incluent des modifications géométriques (retrait), le gonflement, la cristallisation et des transitions vitreuses. Dans certains cas, des réactions chimiques ou biochimiques désirables ou indésirables peuvent se produire, entraînant des changements dans la couleur, la texture, l'odeur, ou d'autres propriétés du produit solide.

Des études ont montré que la dépendance purement à des pratiques expérimentales de séchage, sans considérations mathématiques sur la cinétique de séchage, peut affecter de manière significative l'efficacité des séchoirs, augmenter les coûts de production et réduire la qualité du produit séché. Ainsi, l'utilisation de modèles mathématiques pour estimer la cinétique de séchage, le comportement et l'énergie nécessaire au séchage de produits agricoles et alimentaires devient indispensable. En pratique, un séchoir d'aliments est considérablement plus complexe qu'un dispositif qui élimine l'humidité, et des modèles efficaces sont nécessaires à la conception, à l'optimisation, à l'intégration énergétique et au contrôle des processus.

Bien que les études de modélisation sur le séchage des aliments soient importantes, Un modèle théorique, tout à fait satisfaisant et applicable à des produits alimentaires donnés, n'est pas disponible à l'heur actuel. Par conséquent, les études expérimentales empêchent leur importance dans le séchage et les équations de séchage en couche mince sont des outils importants dans la modélisation mathématique du séchage des aliments.

Dans ce chapitre on va présenter une revue complète de la modélisation du séchage, en mettant l'accent sur les théories, les modèles et les applications, les modèles mathématiques les plus fréquemment utilisés pour le séchage des produits alimentaires. Ensuite, les calculs de la diffusivité effective de l'humidité et l'énergie d'activation ont été exprimés.

II.2 THEORIE DU SECHAGE

Le séchage résulte de la vaporisation de l'eau initialement à l'état liquide, en fournissant de la chaleur au produit initialement humide. Tel que montré au premier chapitre, la chaleur peut être fournie par convection (séchoirs directs), par conduction (séchoirs contacts ou séchoirs indirects) ou par rayonnement. Le transport de l'humidité dans le produit alimentaire dépend à la fois de la structure des pores et des interactions de l'humidité avec la matrice alimentaire.

De nombreux modèles de transfert simultané de chaleur et de masse ont été développés pour le séchage. Ils sont basés soit sur le transfert d'humidité pour une diffusivité effective ou sur la séparation de la diffusion liquide et la diffusion vapeur. Une brève revue de ces modèles est présentée avec les hypothèses simplificatrices des modèles [85].

II.2.1 Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Lewis Sherwood)

Ce modèle est régi par l'équation de diffusion. L. Sherwood et ses partenaires ont été les premiers qui ont appliqué cette idée et ont obtenu des solutions à l'équation de diffusion en parfait accord avec les données expérimentales. Sherwood a souligné que le comportement des principaux paramètres du modèle est complexe et qu'il est difficile de prévoir la décroissance de la diffusion avec la concentration en eau [86-88].

La théorie de la diffusion du liquide stipule que le mouvement de l'eau vers la surface du corps est gouverné par la loi de Fick, qui traduit le phénomène de migration de la vapeur d'eau du milieu de la concentration élevée au milieu de la concentration basse. En d'autres termes, du sein du solide à sécher vers sa surface. Puis on assiste à la surface, à l'évaporation due à un apport énergétique extérieur.

La diffusion se produit au sein de la structure fine du solide, des capillaires, des pores et de petites cavités saturées en vapeur d'eau. Cette vapeur diffuse vers l'extérieur jusqu'à ce que, à l'extrémité ouverte d'un tube capillaire, elle soit emprisonnée dans le flux d'air.

Malheureusement, la théorie de la diffusion ne prend pas en compte le retrait, le durcissement, ou les phénomènes de sorption/désorption isotherme [89].

La théorie de la diffusion s'applique à des produits de structure continue [90]. Ce qui n'est pas le cas pour les autres produits. La diffusivité dépend de plusieurs facteurs, comme la nature du solide, et celle de l'humidité, le taux d'humidité et la température.

La migration de l'eau par diffusion est proportionnelle au gradient de concentration en eau :

$$\frac{\partial \mathrm{M}}{\partial \mathrm{t}} = \mathrm{grad}\left(\mathrm{D_{eff}}\,\mathrm{grad}(\mathrm{M})\right) \qquad \text{(II.1)}$$

Où : M *: Teneur en eau (% db)*

D_{eff} *: Coefficient de diffusion ($m^2 s^{-1}$)*

t *: Temps (s)*

II.2.2 Théorie capillaire (1937)

L'écoulement capillaire est le mouvement du liquide à travers les capillaires, les pores d'interconnexion dans un solide, ou sur la surface du solide par l'attraction moléculaire entre le liquide et le solide [85].

Ceaglske et Hougen démontrent que pour le séchage d'un solide granulaire, l'écoulement de l'eau est entièrement dû à forces capillaires et totalement indépendant de la concentration en humidité. Le flux peut donc être dirigé dans le sens de l'augmentation de la concentration en eau. Plusieurs chercheurs ont soutenu cette observation, que la première étape du séchage est contrôlée par la capillarité, puis la diffusion de vapeur comme phénomène dominant les dernières étapes de séchage [85].

Lorsqu'on place un capillaire dans une cuve remplie d'eau, on observe une élévation du liquide dans le tube par rapport au niveau de la cuve. Cette théorie s'applique à des produits poreux ou à des produits granulaires, dans ce dernier cas, les espaces ou interstices entre les particules ont un comportement analogue à celui des pores [90].

La théorie capillaire repose sur le fait que le mouvement de l'eau dans les pores résulte d'un potentiel de succion qui est la différence de pression entre l'eau et l'air à l'interface

incurvée air-eau dans un capillaire. La courbure de l'interface résulte de la tension de surface de l'eau. Le flux liquide dans la théorie capillaire est donné par :

$$J_c = -K_h \text{grad}(\varphi) \quad \text{(II.2)}$$

Où J_c *: Flux liquide dû à la capillarité (kg* m^{-2} s^{-1}*)*

K_h *: Conductivité hydraulique insaturée (m* s^{-1}*)*

φ *: Potentiel capillaire ou succion (kg* m^{-2}*)*

II.2.3 Théories basées sur les transferts couples de chaleur et de masse

Les théories basées sur les transferts couplés de chaleur et de masse sont les théories qui détaillent le plus finement les différents phénomènes associés au séchage.

Elles permettent de séparer les phénomènes de transport internes à l'aide de tout un ensemble d'équations de conservation de la masse et de la chaleur. Les plus connus de ces théories sont les suivantes :

II.2.3.1 Théorie de Luikov (1934)

Luikov souligne que la température et de la pression interne sont des facteurs responsables de la migration de la vapeur d'eau. Il s'est fondé sur l'utilisation des équations fondamentales de la thermodynamique et du processus d'irréversibilité pour vérifier que le transfert de vapeur et de liquide est divisé en deux parties : le gradient de concentration et le gradient de température.

Les travaux de Loikov sur le séchage de la pression combinée en phase gazeuse et de températures comprises entre 0 et 100°C ont abouti à l'existence d'un système d'équations différentielles qui régissent le transfert de chaleur et la masse ; les équations différentielles qui composent ce système sont les suivantes :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{div}[a_m \text{grad}(M) + \delta \text{grad}(T)] \quad \text{(II.3)}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}\left(a_q \text{grad}(T)\right) + \frac{\varepsilon . r}{C} . \frac{\partial M}{\partial t} \quad \text{(II.4)}$$

Avec : a_m *: la diffusivité massique [m²/s],*

a_q *: la diffusivité thermique [m²/s],*

C *: chaleur spécifique [J/kg°C],*

r *: chaleur spécifique d'évaporation [J/kg],*

T *: la température [°C],*

t *: le temps [s],*

ε *: taux de changement de phase,*

δ *: Coefficient du gradient thermique base sur la différence de teneur en eau [1/°C].*

L'utilisation du système d'équation différentielle de Luikov s'est avérée efficace pour analyser la répartition de la température et de l'humidité dans les produits poreux au cours du séchage. [91-93].

Cependant, l'inconvénient de ce modèle est que le taux de changement de phase ε dans l'équation de transfert de chaleur (I.10) n'est pas dérivée d'une loi physique et que son estimation empirique est délicate.

II.2.3.2 Théorie de Philip et De Vries (1957)

A travers une analyse du comportement hydrique et thermique des matériaux, Philip et De Varies ont développé un autre modèle qui dépend également du couplage des transferts thermique et massique, qui prend en compte l'effet de la gravité g. Cette théorie est basée sur le développement d'un système d'équations décrivant l'humidité et le transfert de chaleur dans les matériaux poreux. Le système d'équations est le suivant :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \mathrm{div}\left[D_M \mathrm{grad}(M) + D_T \mathrm{grad}(T) - \frac{\rho_e}{\rho_0} K\right] \quad \text{(II.5)}$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \mathrm{div}(\lambda^* \mathrm{grad}(T)) + \rho_e L_V (D_{MV} \mathrm{grad}(M) + D_{TV} \mathrm{grad}(T)) \quad \text{(II.6)}$$

Avec : D_M *: coefficient de diffusion massique isotherme [m²/s],*

D_T *: coefficient de diffusion massique non isotherme [m²/s],*

D_{MV} *: coefficient de diffusion isotherme de la vapeur [m²/s],*

D_{TV} *: coefficient de diffusion non isotherme de la vapeur [m²/s],*

K *: conductivité hydraulique du milieu [W/m$^{2°C}$.],*

ρC *: capacité calorifique équivalente [J/ m^3.°C],*

ρ_0 *: masse volumique de la phase solide [kg/m^3],*

ρ_e *: masse volumique de la phase liquide [kg/m^3],*

λ^* *: conductivité thermique apparente [W/m$^{2°C}$].*

La théorie de Philip et De Vries est basée sur le fait que le mouvement de l'eau soit dû à la capillarité et à la diffusion de la vapeur. En général, ils conviennent au séchage des sols et aux matériaux de construction où la migration gravitationnelle joue un rôle important [94-96].

II.2.3.3 Théorie Whitaker (1977)

Whitaker propose une nouvelle façon d'écrire les équations de transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux. Il applique un système d'équations de conservation de chaleur et

de masse pour les trois phases contenues dans le milieu (solides, liquide et gaz) et les lois de la thermodynamique, ensuite, il applique pour chacune des phases la technique de la prise de la moyenne avec certaines simplifications en prenant un volume élémentaire représentatif à l'échelle des pores. Une valeur moyenne de chaque grandeur physique prise sur un volume élémentaire représentatif (VER) (figure (II.1)) est affectée a un point. Ces paramètres permettent de considérer le milieu poreux comme un milieu continu équivalent.

Le concept de volume élémentaire représentatif se traduit par une grandeur physique Φ_i associée a la phase i présente dans le milieu poreux [94]. Φ_i définit par :

$$\prec \Phi_i \succ = \frac{1}{V} \int_V \Phi_i dV \qquad (II.7)$$

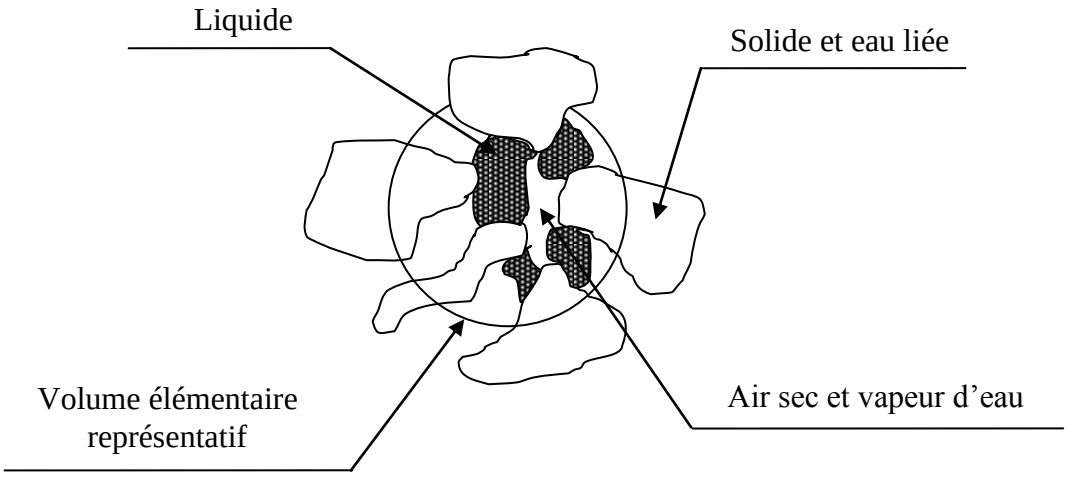


Figure II.1 : *Schéma du milieu poreux et de volume élémentaire représentatif*

Cette étude peut être considérée comme le point du départ de nouvelles et modernes théories car elle établit une très bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

II.2.4 Diffusion de la vapeur d'eau (1968)

King étudie la désorption de l'eau dans les produits alimentaires poreux. Il Crée un modèle mathématique basé sur l'hypothèse que le transfert de masse à l'intérieur du solide se produit principalement dans la phase vapeur. Le transfert de chaleur est considéré parallèlement au transfert de masse [32]. À tout moment, l'humidité en phase condensée est supérieure qu'en phase vapeur, de sorte que le transfert d'humidité se fait par diffusion au travers de la phase vapeur. La relation entre l'humidité de sorption et la pression de vapeur partielle dans la phase gazeuse est décrite par une isotherme de désorption.

L'équation exprimant la vitesse de changement du contenu en humidité d'un matériau poreux hygroscopique est, selon King, de la forme [97] :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{eff}\frac{\partial M}{\partial x}\right) \quad \text{(II.8)}$$

Avec : M *: Humidité absolue du solide (kg d'eau kg^{-1}de solide sec)*

D_{eff} *: Diffusivité effective (m²/s)*

t *: Temps (s)*

x *: Distance (m)*

II.2.5 Modèles empiriques

En général, le séchage en couche mince s'utilise pour sécher une couche des particules ou des tranches d'échantillon [98]. Il existe des modèles théoriques, semi-théoriques et empiriques permettant de prédire le comportement de différents produits au cours de séchage. Seuls les modèles semi-théoriques et empiriques se sont avérés utiles pour les concepteurs des séchoirs [99-101]. Les modèles théoriques expliquent clairement les comportements du séchage du produit et peuvent être utilisés dans toutes les conditions du procédé, bien qu'ils comportent de nombreuses hypothèses provoquant des erreurs considérables. Les modèles théoriques les plus utilisés sont dérivés de la diffusion. Les modèles de séchage semi-théoriques sont basés sur la théorie de la diffusion. Ainsi, en utilisant la loi de refroidissement de Newton et en supposant une similitude entre le refroidissement et le séchage d'un corps solide, l'expression suivante peut décrire la vitesse de séchage :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -k(M - M_e) \quad \text{(II.9)}$$

Où k est le coefficient de séchage, M_e est le taux d'humidité d'équilibre d'un produit et M est le taux d'humidité moyen d'un produit [102].

Les modèles semi-théoriques sont plus simples et ont besoin de moins d'hypothèses en raison du recours à quelques résultats expérimentaux. D'autre part, ils ne sont valables que dans les conditions du procédé appliqué [103]. Les modèles empiriques du séchage donnent souvent les meilleurs résultats pour prédire le comportement du séchage [99]. Ils ont des propriétés similaires aux modèles semi-théoriques. Ils s'appuient fortement sur des conditions expérimentales et donnent des informations limitées sur le comportement au séchage du produit [104]. Parmi ceux-ci, les modèles les plus utilisés sont listés ci-dessous.

II.2.5.1 Modèle de Lewis (1921)

Le modèle de Lewis est la solution générale de l'équation de Fick, ce modèle ne considère que la diffusion basée sur la migration de l'eau. Le modèle simple de Lewis est exprimé comme suit :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -k(M - M_e) \quad \text{(II.10)}$$

La forme générale du modèle de Lewis prend la forme exponentielle suivante :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \exp(-kt) \quad \text{(II.11)}$$

Où k est une constante de séchage, qui dépend de la température, l'humidité absolue et la vitesse de l'air ainsi du diamètre du produit utilisé [105-107].

II.2.5.2 Modèle de Page (1949)

Page a modifié le modèle de Lewis pour obtenir un modèle plus précis en ajoutant une constante sans dimension empirique (n) et à appliquer cette approche au séchage des grains [105, 108] :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \exp(-kt^n) \quad \text{(II.12)}$$

Où k et n sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et de la nature du produit.

II.2.5.3 Modèle modifié de Page (1973)

Overhults *et al.* ont modifié le modèle de Page pour décrire la phase de séchage des graines de soja. Cette forme est généralement connue sous le nom de modèle modifié de Page I :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \exp(-kt)^n \quad \text{(II.13)}$$

En outre, White *et al.*, ont utilisé une autre forme modifiée du modèle de Page pour décrire le séchage des fèves de soja. Cette forme est généralement connue sous le nom de modèle modifié de Page II [105, 108] :

$$\frac{M-M}{M_0-M_e} = \exp-(kt)^n \quad \text{(II.14)}$$

II.2.5.4 Modèle de Henderson et Pabis (1961)

Henderson et Pabis ont amélioré le modèle du séchage en utilisant la deuxième loi de Fick de la diffusion et en l'appliquant au séchage des grains [105, 108] :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = A\exp(-kt) \quad \text{(II.15)}$$

Où A et k sont des constantes de séchage

II.2.5.5 Modèle logarithmique (1995)

Chandra et Singh ont proposé un nouveau modèle dérivé du modèle de Henderson et Pabis avec l'addition d'un terme empirique [105, 108] :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a\exp(-kt) + c \quad \text{(II.16)}$$

Où k, *a et c sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et sa vitesse.*

II.2.5.6 Modèle de Midilli-Kucuk (2002)

Midilli *et al.* ont proposé un nouveau modèle avec l'ajout d'un terme supplémentaire empirique intégrant le temps t au modèle Henderson et Pabis. Ce nouveau modèle est la combinaison d'un terme exponentiel et d'un terme linéaire. Ils ont appliqué ce nouveau modèle pour le séchage du pollen, de champignons et de pistache pour différentes méthodes de séchage [105, 108].

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a\exp(-kt) + bt \quad \text{(II.17)}$$

Où b *est une constante empirique (1/s).*

II.2.5.7 Modèle modifié de Midilli (2006)

Ghazanfari *et al.* ont souligné que le terme *a* du modèle de Midilli (Eq. II.17) devait être 1 pour t = 0 et ont proposé la modification suivante [105, 108] :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = \exp(-kt) + bt \quad \text{(II.18)}$$

II.2.5.8 Modèle de Demir et al. (2007)

Demir *et al.* ont proposé un nouveau modèle qui est semblable aux modèles d'Henderson et Pabis, modifié de Page-I, logarithmique, et de Midilli [105, 108] :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a\exp-(kt)^n + b \quad \text{(II.19)}$$

II.2.5.9 Modèle à deux paramètres (1974)

Henderson a proposé d'utiliser les deux premiers termes de la série de solution générale de la deuxième loi de Fick pour corriger les lacunes du modèle Henderson et Pabis. Le nouveau modèle s'écrit comme suit [105, 108] :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a\exp(-k_1 t) + b\exp(-k_2 t) \quad \text{(II.20)}$$

Où a, b sont définis comme l'indication de la forme et généralement nommés tels que les constantes du modèle (sans dimension), et k_1, k_2 sont les constantes cinétiques du séchage (1/s). Ces constantes sont obtenues à partir de données expérimentales et l'Eq. II.20 est généralement connue sous la dénomination de : "modèle à deux paramètres".

II.2.5.10 Modèle exponentiel à deux paramètres (1980)

Sharaf-Eldeen *et al.* ont modifié le modèle à deux paramètres en réduisant le nombre de constantes (3 au lieu de 4) en supprimant la constante *b*. Ils ont souligné que *b* dans le modèle à deux paramètres (Eq. II.20) devait être égale à (1 - a), ils ont donc proposé la modification suivante [105, 108] :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat) \quad \text{(II.21)}$$

L'équation (Eq. II.21) est généralement connue comme le modèle exponentiel à deux paramètres.

II.2.5.11 Modèle de Verma et al. (1985)

Verma *et al.* ont modifié le deuxième terme du modèle exponentiel à deux paramètres en ajoutant une constante empirique et ils l'ont appliqué au séchage du riz [105, 108] :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt) \quad \text{(II.22)}$$

Ce modèle modifié (Eq. II.22) est connu sous le nom de modèle de Verma. Kassem a réarrangé le modèle de Verma en faisant apparaître la constante de séchage *k* dans la seconde exponentielle :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt) \quad \text{(II.23)}$$

Cette forme modifiée (Eq. II.23) est connue comme une première approche du modèle diffusionnel. Ces deux modèles ont été modifiés pour être appliqués à certains produits du séchage en même temps, et ont donné les mêmes résultats que prévu [109,110].

II.2.5.12 Modèle modifié de Henderson et Pabis (1999)

Karathanos a amélioré le modèle de Henderson et Pabis et le modèle à deux paramètres par l'ajout d'un troisième terme de la série de la solution générale de la deuxième loi de Fick. Karathanos a souligné que le premier terme explique la dernière phase du séchage, le second terme explique la phase intermédiaire et que le troisième terme explique le début de la courbe de séchage (MR) [105, 108] :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht) \quad \text{(II.24)}$$

Où : a, b, et c sont des constantes (sans dimension), et k, g et h sont les constantes cinétiques du séchage. Ces constantes sont obtenues à partir des données expérimentales et l'Eq. II.24 est généralement connue sous le nom de modèle modifié de Henderson et Pabis.

II.2.5.13 Modèle de Thompson (1968)

Thompson *et al.* ont développé un modèle à partir des résultats expérimentaux du séchage de grains décortiqués dans une gamme de température de 60 à 150°C.

$$t = aln(MR) + b[ln(MR)]^2 \quad \text{(II.25)}$$

Où : a et b sont des constantes sans dimension obtenues à partir des données expérimentales [111].

II.2.5.14 Modèle empirique de Wang et Singh (1978)

Singh et Wang ont proposé un modèle empirique pour décrire les caractéristiques de séchage du produit selon l'équation suivante :

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = 1 + at + bt^2 \quad \text{(II.26)}$$

Où : a et b sont des constantes de séchage [112].

II.3 DIFFUSIVITE EFFECTIVE

Le séchage des aliments est contrôlé pendant la période de séchage à vitesse décroissante par le mécanisme de diffusion liquide et/ou vapeur. Le taux de mouvement de l'humidité est décrit par la valeur de la diffusivité effective D_{eff} quel que soit le mécanisme de diffusion [113].

La diffusivité effective est une propriété de transport indispensable lors de la modélisation du processus de séchage des aliments. C'est l'une des propriétés physiques qui permet de caractériser les transferts de masse au sein des milieux poreux.

De nombreux auteurs ont déterminé la diffusivité effective, en vue soit d'obtenir une meilleure caractérisation physique des milieux, soit d'effectuer des tentatives d'utilisation des modèles théoriques [114].

II.3.1 Détermination de la diffusivité effective

La diffusivité effective a été déterminée sur la base de la deuxièmes loi de Fick, qui utilise la relation avec la teneur en eau réduite MR comme une variable dépendante [115]. L'application de la seconde loi de Fick permet de décrire le transport de masse [116] lors du séchage par l'équation, pour une géométrie plane :

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - \frac{1}{D_{eff}} \frac{\partial M}{\partial t} = 0 \qquad \text{(II.27)}$$

Avec D_{eff}, la diffusivité effective (m^2/s) varie le plus souvent avec la température et la teneur en eau du produit et est affectée par le retrait de la matrice solide.

Les conditions initiales et limites sont :

$$M(t=0,x)=M_0 \; ; \frac{\partial M}{\partial x}(t,x=0)=0 \text{ and } M(t,x = \mp \frac{e}{2})=M_s \qquad \text{(II.28)}$$

La solution de l'équation (II.27) à partir (II.28) s'effectue par l'utilisation de la série de Fourier (solution analytique de la deuxième loi de Fick, développée par Crank [117]). Quand le temps est suffisant, tous les termes de la série sont négligeables devant le premier et nous obtenons :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{e^2} t\right) \qquad \text{(II.29)}$$

Prenant le logarithme népérien des deux côtés de l'équation (II.29) :

$$\ln(MR) = \ln\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{e^2} t \qquad \text{(II.30)}$$

En traçant ln (MR) en fonction de (t), on obtient une ligne de pente égale à β :

$$\beta = \frac{\pi^2 D_{eff}}{e^2} \text{ que } D_{eff} = \frac{\beta e^2}{\pi^2} \qquad \text{(II.31)}$$

Plus (D_{eff}) est élevé, plus le séchage est efficace.

Où (D_{eff}) est la diffusivité effective, (e) l'épaisseur de la couche la couche mince de produit et (t) le temps de séchage.

II.4 ÉNERGIE D'ACTIVATION

Plusieurs auteurs [118-134] ont convenu que la diffusion est activée thermiquement et la relation entre la température et la diffusivité massique suit la relation d'Arrhenius. L'équation de D_{eff} en fonction de la température s'écrit comme suit :

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{(II.32)}$$

Où D_0 est le facteur pré-exponentiel de l'équation d'Arrhenius (m²/s), E_a l'énergie d'activation (kJ/mol), qui est l'équivalent d'une barrière de potentiel opposée à l'avancement de la réaction, R est la constante de gaz parfaits (kJ/mol.K) et T est la température de l'air de séchage en °K.

II.5 CONCLUSION

La modélisation de la cinétique de séchage et la détermination du temps de séchage des aliments sont deux domaines de séchage très importants. Cependant, la plupart des pertes de production dans l'industrie se produisent pendant le séchage. Afin de minimiser ces pertes, il est nécessaire d'optimiser les conditions de séchage, la conception des séchoirs et la qualité du produit. Il est aussi nécessaire d'identifier et d'évaluer les mécanismes de séchage, les théories, les applications et la comparaison des modèles de séchage des aliments disponibles dans la littérature.

Dans cette étude, on a décri de manière générale les théories et modèles du séchage les plus couramment utilisés, la diffusivité effective de l'humidité et l'énergie d'activation.

On peut conclure que la modélisation de la cinétique de séchage des aliments fournira des informations sur les conditions de stockage, le temps de séchage idéal, la température, la vitesse de l'air et l'humidité relative. Avec toutes ces informations, un séchoir plus efficace peut être conçu et son processus optimisé, réduisant ainsi les pertes post-récolte.

Chapitre III
Valorisation des Déchets Agroalimentaires

III.1 INTRODUCTION

Bien que la globalisation du marché assure la disponibilité des produits agro-alimentaires tout au long de l'année, une grande partie est soumise à divers processus de transformation afin d'obtenir de nouveaux produits répondant aux différentes exigences des consommateurs. Lors de la transformation industrielle de ces produits, les étapes à suivre sont plus nombreuses et donnent lieu à l'apparition d'une gamme variée de sous-produits et déchets composés, source de pollution pour l'environnement s'ils ne sont pas manipulés correctement. Des millions de tonnes de déchets produits par l'industrie agroalimentaire, sont rejetés en l'état. Cependant, ils constituent une source énergétique importante pour les ruminants qui tirent un grand bénéfice de ces déchets.

La production animale dépend essentiellement de la disponibilité et de la qualité du fourrage. Dans les pays en développement, le faible potentiel fourrager, lié à la rareté de l'eau et la limitation en surface cultivable, rend difficile à produire suffisamment des protéines animales de haute qualité pour la population humaine. Pour assurer une complémentarité animal/homme et supprimer tout risque de compétitivité, il est essentiel, de rechercher dans cette optique les solutions, permettant la meilleure utilisation possible de toutes les ressources fourragères disponibles localement. L'utilisation par l'animal des déchets agroalimentaires non utilisables pour l'homme est un des éléments de cette stratégie.

La valorisation des déchets agroalimentaire est devenue une pratique essentielle parce qu'elle permet de protéger l'environnement et d'éviter ainsi une pollution de plus en plus dangereuse, et diminue le cout alimentaire, comble le manque fourrager et développe ainsi la production animale.

Ce chapitre débute avec la présentation des différents domaines pouvant utiliser les sous-produits de l'industrie de transformation. En deuxième partie, on va décrire les principaux sous-produits agroalimentaires valorisés en alimentation des ruminants, concernant trois déchets agroalimentaires disponibles dans notre pays : il s'agit de déchets de tomates, de pommes et d'oranges. Par la suite, on va expliquer les contraintes dans l'utilisation des déchets agro-alimentaires et les différents éléments structuraux des sous produits agroalimentaires, Il se poursuit avec la mise en évidence. La dernière partie de ce chapitre répertorie les techniques d'estimation de la valeur nutritive des aliments.

III.2 DIFFERENTES APPELLATIONS POUR DESIGNER LES DECHETS AGROALIMENTAIRES ISSUS DE LA TRANSFORMATION INDUSTRIELLE

À cause de la grande diversité d'appellations utilisées pour décrire les déchets obtenus après la transformation des produits agroalimentaires et les processus dans lesquels ils sont impliqués il est apparu important de présenter quelques définitions. Ainsi, conformément à l'article 3 (ci-dessous reporté) de la directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets [135] on entend par :

- **Déchets :** toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire.
- **Bio-déchets :** les déchets biodégradables de jardin ou de parc, les déchets alimentaires ou de cuisine issus des ménages, des restaurants, des traiteurs ou des magasins de vente au détail, ainsi que les déchets comparables provenant des usines de transformation de denrées alimentaires.
- **Gestion des déchets :** la collecte, le transport, la valorisation et l'élimination des déchets, y compris la surveillance de ces opérations ainsi que la surveillance des sites de décharge après leur fermeture et notamment les actions menées en tant que négociant ou courtier.
- **Collecte :** le ramassage des déchets, y compris leur tri et stockage préliminaires, en vue de leur transport vers une installation de traitement des déchets.
- **Collecte séparée :** une collecte dans le cadre de laquelle un flux de déchets est conservé séparément en fonction de son type et de sa nature afin de faciliter un traitement spécifique.
- **Prévention :** les mesures prises avant qu'une substance, une matière ou un produit ne devienne pas un déchet et réduisant :

  - la quantité de déchets, y compris par l'intermédiaire du réemploi ou de la prolongation de la durée de vie des produits;
  - les effets nocifs des déchets produits sur l'environnement et la santé humaine;
  - la teneur en substances nocives des matières et produits.
- **Réemploi :** toute opération par laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.
- **Traitement :** toute opération de valorisation ou d'élimination, y compris la préparation qui précède la valorisation ou l'élimination.
- **Valorisation :** toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie.
- **Préparation en vue du réemploi :** toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation, par laquelle des produits ou des composants de produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement.
- **Recyclage :** toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Cela inclut le retraitement des matières organiques, mais n'inclut pas la valorisation énergétique, la conversion pour l'utilisation comme combustible ou pour des opérations de remblayage.
- **Elimination :** toute opération qui n'est pas de la valorisation même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances ou d'énergie. Parmi les opérations d'élimination on compte :
  - le dépôt sur ou dans le sol ;
  - le traitement en milieu terrestre ;
  - le rejet dans le milieu aquatique, sauf l'immersion ;
  - l'immersion, y compris enfouissement dans le sous-sol marin ;
  - le traitement biologique aboutissant à des composés ou à des mélanges qui sont éliminés selon un des procédés indiqués auparavant ;
  - l'incinération à terre ou en mer ;

Dans l'article 5, la même directive, définit aussi les sous-produits :

- **Sous-produit :** Une substance ou un objet issu d'un processus de production dont le but premier n'est pas la production dudit bien peut être considéré comme un sous produit et non comme un déchet au sens de l'article 3 que si les conditions suivantes sont remplies :
  - l'utilisation ultérieure de la substance ou de l'objet est certaine;
  - la substance ou l'objet peut être utilisé directement sans traitement supplémentaire autre que les pratiques industrielles courantes;
  - la substance ou l'objet est produit en faisant partie intégrante d'un processus de production;
  - l'utilisation ultérieure est légale, c'est-à-dire que la substance ou l'objet répond à toutes les prescriptions pertinentes relatives au produit, à l'environnement et à la protection de la santé prévues pour l'utilisation spécifique et n'auront pas d'incidences globales nocives pour l'environnement ou la santé humaine [136].

Les termes correspondant aux diverses définitions sont représentés de façon schématique dans la figure III.1.

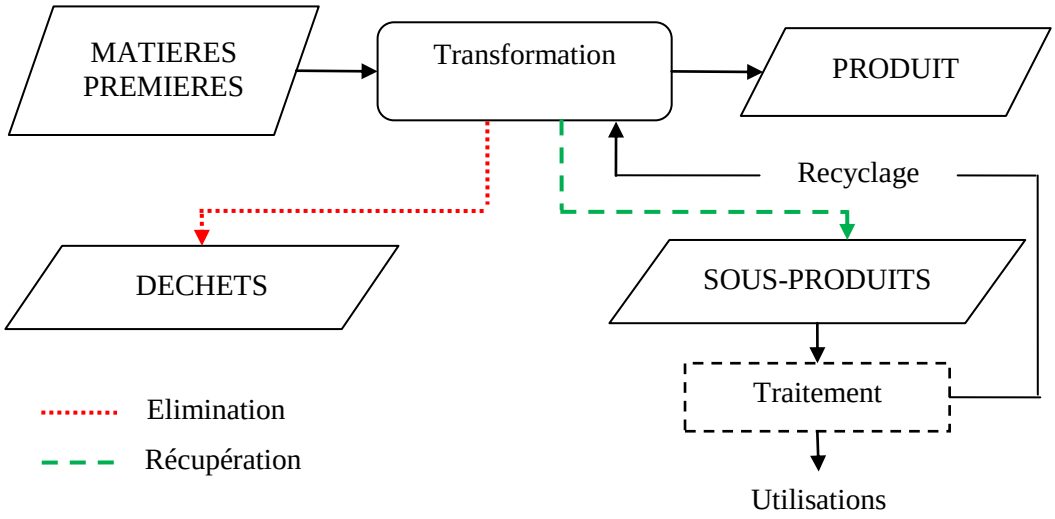


Figure III.1 : *Schéma illustrent la production de déchets et de sous-produits (déchets)*

Selon Ademe (2000), un sous-produit est un produit résidu qui apparaît durant la fabrication ou la distribution d'un produit fini. Il est non intentionnel et non prévisible et accidentel. Il peut être utilisé directement ou bien constituer un ingrédient d'un autre processus de la production en vue de la fabrication d'un autre produit fini [137].

III.3 DIFFERENTS DOMAINES POUVANT UTILISER LES SOUS-PRODUITS DE L'INDUSTRIE DE TRANSFORMATIONS

Plusieurs solutions ont été proposées pour répondre aux soucis environnementaux concernant la valorisation de sous-produits (alimentation animale, épandage, compostage, production d'énergie, récupération de différents constituants incorporables dans de nouveaux produits agroalimentaires, cosmétiques ou pharmaceutiques), comme décrit dans la figure III.2 [138].

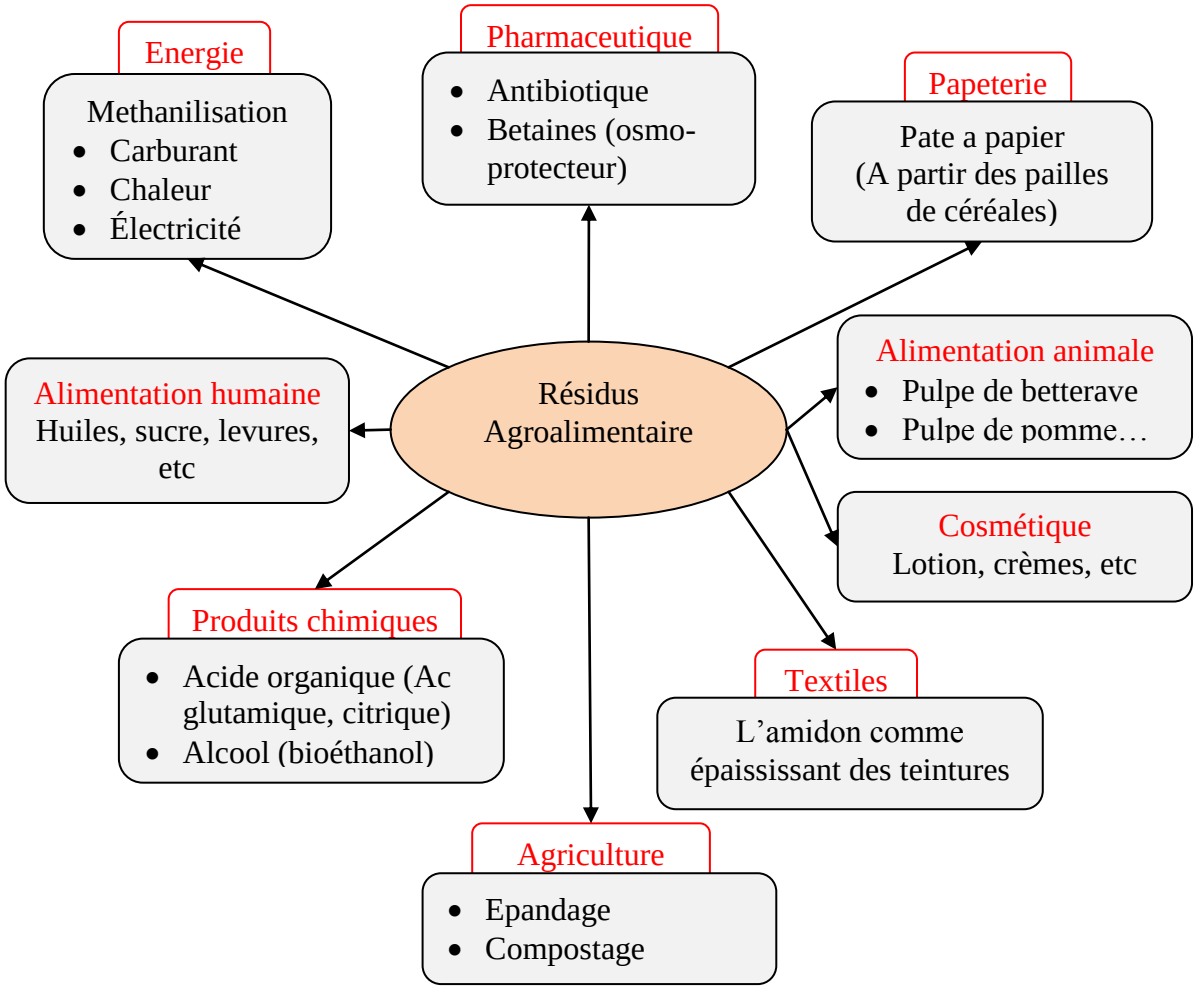


Figure III.2 : *Les principales voies de valorisation des déchets agroalimentaires*

III.3.1 Alimentation animale

C'est la plus ancienne tendance à utiliser les déchets agroalimentaires. En général, la valeur énergétique des déchets de fruits est assez élevée, grâce aux pectines digestibles et aux sucres. Les ruminants sont les premiers utilisateurs des déchets agroalimentaires frais ou ensilés.

Grâce aux microorganismes de leur rumen, ils peuvent utiliser les sous-produits riches en fibres ou contenant certains facteurs antinutritionnels qui ne sont pas supportés par les monogastriques.

Différentes études ont été réalisées afin de déterminer l'influence des ajouts de déchets agroalimentaires dans l'alimentation animale. Villas-Bôas *et al.* [139] ont présenté que les déchets de pommes peuvent être convertis dans un substrat présentant des propriétés nutritionnelles améliorées, notamment en ce qui concerne le niveau de protéines et la digestibilité.

Joshi et al. [140]. L'enrichissement des déchets de pommes en différents nutriments a été estimé pour une utilisation dans l'alimentation animale. Par rapport au matériel de départ, après la fermentation à l'état solide avec différentes levures et l'élimination de l'éthanol, les déchets de pommes sèches ont été trois fois plus riches en protéines et deux fois plus riches en graisses et en vitamine C. L'étude a indiqué également un contenu plus élevé en minéraux et en fibres brutes. Le contenu en protéines solubles a augmenté légèrement pendant que le contenu en sucre a diminué.

Pirmohammadi et al. [141], ont comparé la valeur nutritive de déchets de pommes séchés pendant deux heures à 80°C ou ensilés a été comparée avec celle de l'ensilage de maïs. Une tonne de chaque type de déchet de pomme a été mélangée à 100 kg de paille humide et à 5 kg d'urée. Après stockage dans un réservoir de 30 tonnes pendant 45 jours, des normes différentes ont été suivies pour chaque mélange (Tableau III.1).

Pour déterminer le taux de la matière organique digestible et estimer la teneur en énergie métabolisable, une étude *in vivo* a été menée sur trois moutons. Ces deux paramètres ont été plus élevés pour les déchets de pommes séchés par rapport aux déchets pommes ensilés.

Tableau III.1 : *Composition chimique moyenne des aliments pour animaux [38]*

Analyse	**Déchets de pommes séchés**	**Déchets de pommes ensilés**	**Maïs ensilés**
Matière sèche, g/kg	749,0	284,0	429,0
Matière organique, g/kg MS	929,0	925,0	936,0
Protéines butes, g/kg MS	64,0	72,0	76,0
Fibre de détergent acides, g/kg MS	405,0	460,0	260,0
Fibre de détergent neutre, g/kg MS	473,0	567,0	463,0
Lignine, g/kg MS	10,0	20,0	44,0
Azote insoluble en détergent acide, g/kg MS	5,6	6,5	4,4

III.3.2 Épandage et compostage

L'épandage et le compostage dépendent du recyclage des éléments fertilisants présents dans les effluents ou les produits épandus en agriculture.

Les plantes cultivées utilisent les éléments minéraux du sol pour développer leurs tissus. Une partie de ces éléments est exportée lors de la récolte (ou collectée par le bétail lors du pâturage). Pour éviter toute baisse de fertilité, ces exportations d'éléments minéraux doivent au moins être compensées par des apports minéraux au moins équivalents.

La minéralisation peut s'effectuer sous forme d'apports de minéraux ou à travers des apports de la matière organique.

Les déchets agroalimentaires peuvent-être utilisés directement comme fertilisants par épandage mais il est important de noter que si cette pratique n'est pas suffisamment contrôlée, elle peut impliquer certains risques liés à l'augmentation des éléments minéraux qui peuvent causer [142] :

- des fortes perturbations de la flore présente ;
- un déséquilibre des minéraux présents dans le sol ;
- une accumulation des minéraux et des métaux lourds dans le sol ;
- des fuites de ces minéraux vers les milieux aqueux.

Le compostage est un processus aérobie qui comporte plusieurs étapes au cours desquelles des microorganismes thermophiles (température optimale de développement autour de 50°C) changent le matériel organique dans un produit stable ressemblant au sol.

Le matériel végétal utilisé pour compostage doit être soumis à une phase initiale visant à réduire la teneur en eau (de 80-90% à 50-60%) en pressant ou en séchant naturellement. La neutralisation du pH, généralement acide, est également [143].

Le compostage permet la réduction du volume de sous-produits organiques avec 40%. De plus, les températures atteintes (40-70°C) tuent la plupart des pathogènes.

Plusieurs méthodes de compostage peuvent être réalisées plus ou moins complexes, cependant, on distingue :

- **Le compostage lent :** fait sur des aires de fermentation ou des aires de maturation.
- **Le compostage accéléré :** exécuté dans un bioréacteur rotatif, dans un tour de fermentation ou dans une cellule horizontale de fermentation [144].

III.3.3 Production d'énergie

III.3.3.1 Biomasse

La production de biomasse de levures utilisant des extraits de matière organique végétale facilement soluble a été proposée comme première étape dans la technologie de bioconversion des déchets agroalimentaires en sous produits à valeur ajoutée suivie par des traitements aérobies ou anaérobies du déchet solide [145].

Par exemple, les déchets issus de la valorisation des agrumes sont souvent colonisés par des levures mésophiles (température optimale de développement située autour de 25-40°C) [146]. Srilatha *et al*. [147] ont proposé l'inoculation des levures ou des champignons pour la réduction du contenu en acides organiques de déchets d'oranges avant le traitement aérobie. Les levures *Candida utilis* ont été sélectionnées pour être cultivées dans les effluents concentres de l'industrie de valorisation de fruits après traitements acidogènes anaérobies [148].

III.3.3.2 Agro-carburants

Les combustibles fossiles sont épuisables et contribuent à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, qui ont des impacts négatifs tels que le changement climatique, le déclin de la glace, l'élévation du niveau de la mer, la perte de biodiversité, etc.

Ces facteurs emmènent à rechercher de nouvelles sources d'énergie alternative [149] dont les agro combustibles, ceux-ci peuvent être classés selon différents critères. Une des classifications existantes les divise en primaires et secondaires : ceux primaires sont utilisés pour chauffage, pour la production d'électricité alors que ceux secondaires (obtenus par la valorisation de la biomasse) peuvent être utilisés dans différents processus industriels et selon les matières premières et la technologie d'obtention se classent en agro-combustibles de première, deuxième et troisième génération.

III.3.3.3 Biogaz

Diverses études ont été menées sur la génération de méthane par fermentation anaérobie de déchets végétaux. Vijayaraghavan et al. [150] ont étudié la digestion anaérobie des déchets issus de la transformation des pommes, de l'ananas et de la betterave. Les résultats ont montré un rendement de 0,429-0,568 L biogaz/g de charge totale de solide volatil avec un contenu en méthane de 50 à 60%. La fermentation d'un mélange de déchets d'ananas, de mangues et d'oranges a conduit à 0,6 m^3 biogaz/kg charge de solide volatil après une rétention hydraulique de 20 jours.

Callghan [151] a constaté une augmentation du rendement en méthane de 0,23 à 0,45 $m^3.kg^{-1}$ solide volatil quand la proportion de déchets de fruits et légumes augmente de 20 à 50% par rapport au fumier.

Feng et *al*. [152], la production d'hydrogène à partir de déchets de pommes en utilisant un mélange naturel de microorganismes a été étudié aussi par dans différentes conditions expérimentales.

Wang et *al*. [153], en vue de l'obtention du bio-hydrogène à partir de déchets de pommes ont étudiés les paramètres suivant : Le prétraitement avec de l'acide chlorhydrique, la durée et la température d'hydrolyse enzymatique, le dosage de la cellulase, la durée de soumission aux ultrasons et la concentration en hydrogène pendant la fermentation anaérobie du substrat.

Doi et al. [154], ont étudié l'obtention de l'hydrogène par fermentation sur des déchets de pommes en utilisant une microflore dérivée du riz.

III.3.4 L'industrie alimentaire

L'huile végétale peut-être obtenue par pressage ou par extraction par solvants à partir d'un matériel végétal huileux tel que les pépins des fruits. Tous les déchets de fruits peuvent être utilises pour l'obtention de vinaigre et de l'alcool alimentaire à condition que sa teneur en sucre ne soit pas inférieure à 8%.

Une valorisation possible des déchets de fruits, en particulier ceux des pommes, repose sur l'utilisation de leurs propriétés gélifiantes. Royer *et al.* [155], ont étudié l'amélioration de la production de la gelée à partir de déchets de pommes non traités enzymatiquement et de coings broyés. Ainsi, après l'ajout d'eau (25 ml d'eau pour 100 g de déchets de pommes), le mélange a été cuit pendant 15 minutes. Ensuite, l'ajout d'un sirop de sucre en eau (25 ml d'eau pour 100 g de sucre). Une nouvelle période de cuisson à 100°C a été suivie par un séchage à température ambiante pendant 48 heures. Les résultats obtenus ont révélé que l'utilisation de la combinaison déchets de pommes/coings conduit à une gelée ayant des propriétés sensorielles acceptables.

Bhushan *et al*. [156], ont étudié la production de la levure de boulangerie en substituant la mélasse (un substrat traditionnel issu de l'industrie sucrière) avec un extrait de déchets de pommes. Ces déchets ont subi un séchage, broyage et ensuite sont dilués dans l'eau dans un rapport de un à six et portés à ébullition pendant 30 minutes. Après filtration, le liquide obtenu a été stérilisé et utilisé comme substrat de fermentation pour une souche de *Saccharomyces cerevisiae* v. *diastatic*, le rendement expérimental atteint étant de 96%.

III.4 LES PRINCIPAUX SOUS PRODUITS AGROALIMENTAIRES VALORISES EN ALIMENTATION DES RUMINANTS

III.4.1 Les sous produits des agrumes

Les agrumes Sont l'un des fruits les plus importants au monde. Les oranges, les mandarines, les citrons et les pamplemousses sont les principales espèces cultivées. En 2010, les oranges représentaient 61% de la production mondiale d'agrumes (82 millions de T) [157].

Environ 30% de la production d'agrumes (et 40% de la production d'orange) sont transformés (USDA-FAS, 2010), principalement pour la fabrication de jus, ce qui génère de grandes quantités de sous-produits.

Selon la FAO, une quantité énorme de déchets d'agrumes est produite annuellement en Algérie (en 2007) estimée à 1.488.000 tonnes/an.

Les sous produits sont le déchet solide qui reste après la pression des fruits frais pour leur jus, il présente de 50 à 70% du poids frais du fruit entier et contient : 60 à 65 de la peau, 30 à 35% des tissus internes et 0 à 10% des graines [158]. Le déchet d'agrumes est généralement à base d'orange, mais peut également contenir des sous produits d'autres agrumes, notamment de pamplemousses et de citrons.

Le déchet d'agrumes est utilisé comme substitut de céréales dans l'alimentation des ruminants, en raison de son contenu énergétique élevé et de sa bonne digestibilité chez les espèces de ruminants. Le déchet d'agrumes frais a une acidité naturelle, mais reste un produit périssable en raison de sa forte teneur en eau et en sucres solubles [159]. Il peut rapidement dégrader et libérer des boues dangereuses pour l'environnement. Le déchet frais peut être préservé par des traitements d'ensilage ou séchage.

Le déchet séché est plus facile à transporter et à gérer et peut être stocké toute l'année au cours du processus de séchage, la teneur en eau du déchet d'agrumes diminue d'environ 80% à 11% d'eau [160], sa valeur nutritive est supérieure à celle du déchet frais [161,162]. Le séchage est généralement effectué sur le site de transformation des fruits pour économiser sur les coûts de transport [159].

III.4.1.1 Composition chimique

Le déchet d'agrumes séchés a une teneur élevée en fibres (environ 20% de NDF dans la MS (matière sèche)) et contient de grandes quantités (10 à 40%) de substances peptiques

hautement digestibles et des sucres solubles dans l'eau (principalement du saccharose) [159]. Il est également riche en calcium (1-2% MS), sa teneur en protéines est faible (environ 5 à 10% MS) de même que les extrait à l'éther (environ 2% de MS) et de phosphore (0,1% MS). La valeur nutritive du déchet d'agrumes séchés est variable d'une usine à l'autre. Le tableau III.2 présente une analyse chimique des principaux nutriments des sous produits de pulpes d'orange séchés [163]

Tableau III.2 : *Analyse chimique des principaux nutriments des sous produits de pulpes d'orange séchés [163]*

Analyse principale	Unité	Moy	Min	Max	Nb d'échantillons utilisés
Matière sèche (MS)	% Comme nourris	88,0	85,6	89,4	5,0
Protéine brute	% MS	6,4	5,6	7,0	5,0
Fibre brute	% MS	12,9	9,6	17,3	5,0
NDF	% MS	20,6	---	---	---
ADF	% MS	14,9	---	---	---
extrait éthéré	% MS	2,5	1,1	4,0	2,0
Cendre	% MS	6,6	5,0	9,4	3,0
énergie brute	MJ / kg MS	17,2	---	---	---

III.4.1.2 Les sous produits des agrumes séchés en alimentation des ruminants

En raison de sa digestibilité de la matière organique relativement élevée (DMO dans la gamme de 85 à 90%) et de sa valeur énergétique (ME d'environ 2900 kcal/kg de MS, 85 à 90% de celle du maïs et comparable à celle de l'orge), le déchet d'agrumes est utilisé comme substitut de céréale dans les régimes concentrés [164,165]. Contrairement aux céréales, son énergie ne repose pas sur l'amidon, mais sur les glucides solubles et les fibres digestibles.

Le déchet d'agrumes est donc considéré comme un aliment plus sûr que les céréales pour les animaux nourris avec des aliments riches en concentrés et faibles en fibres tels que les vaches laitières à haut rendement [166]. Dans les rations contenant des fourrages à faible digestibilité (foin ou paille) ou basées sur des fibres telles que l'ensilage de maïs ou de sorgho, le déchet d'agrumes semble avoir un effet positif sur la digestibilité des fibres, peut-être en raison d'un temps de rétention plus long dans le rumen [167,168]. Le déchet d'agrumes séché est considéré comme un aliment qui peut améliorer les systèmes de production de bœuf et de produits laitiers basés sur des herbes à faible valeur nutritive et d'autres sources de fourrage [163].

III.4.2 Les sous produits de tomates

La tomate (Lycopersicon esculentum Mill.) est l'un des principaux légumes et elle est classée la deuxième après la pomme de terre en termes de production mondiale. La production mondiale de tomates était de 152 millions de tonnes en 2009 (FAO, 2011). Alors que la majorité des tomates sont vendues fraîches, un peu plus du tiers de la production est destinée à la mise en conserve, au jus de tomate ou à la purée de tomate, aux sauces et au ketchup, la figure III.3 [163] présente un schéma du traitement de la tomate. En 2007, les déchets de tomates ont été estimés à 11 millions de tonnes [169]. En Algérie, la production annuelle des déchets de tomates est estimée à 1.305.000 tonnes/an (FAO, 2006).

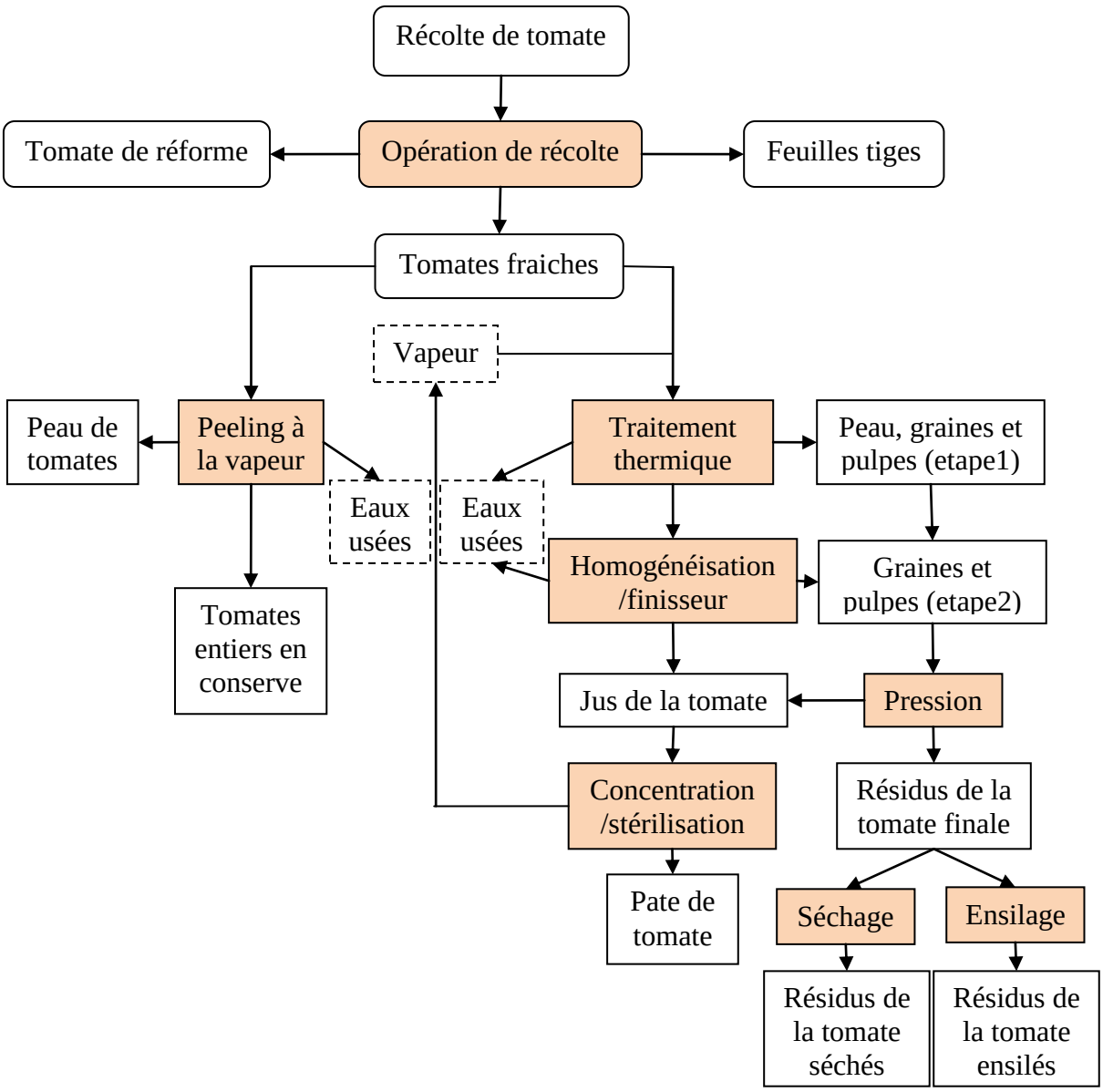


Figure III.3 : *Schéma du traitement de la tomate.*

La transformation de la tomate donne les sousproduits suivants, qui représentent 5 à 13% de la tomate entière [170,171] :

III.4.2.1 Les pulpes de tomates

Ce déchet est peu répandu et reste disponible pendant la période estivale (d'aout à octobre). Les analyses des composés pariétaux montrent une forte teneur en cellulose brute et en lignine de 24.65% de MS par rapport à celle de la pectine (5%) [172]. Les protéines ont une composition en acides aminés proche de celle du tourteau de soja, ceci place les pulpes de tomates parmi les aliments ayant une valeur protéique intéressante pour les ruminants. La pulpe de tomate est ainsi une source raisonnable de vitamine B1, B2 et vitamine A [173].

III.4.2.2 Les peaux de tomates

Concernant les tomates, récoltées généralement à un stade de maturité assez avancé, les peaux sont donc essentiellement constituées de cellules à parois lignifiées (15 à 35% de lignine). Elles sont recouvertes d'une cuticule constituée de produit d'excrétions lipidiques désignées globalement sous le terme de cires ou de cutine**.** Comme la lignine, les constituants de la peau des tomates sont donc susceptibles de diminuer la digestibilité de sous produits, notamment celle de la matière organique [172].

III.4.2.3 Les graines de tomates

Les graines de tomates présentent une forte teneur en matière grasse (MG) et protéines, une analyse qualitative séparée des peaux et graines de tomates donne les valeurs suivantes : 24.5% de protéines et 28.1% de MG dans les graines contre 10% de protéines et 3.6% de MG dans les peaux. Au vu de ces données, il apparaît que les graines représentent la part la plus importante du potentiel énergétique et azoté des sous produits de la tomate [172].

En plus de ce qui précède des sousproduits, les industries de tomate produit également des tomates de réforme, les feuilles de tomates et tourteaux de graines de tomates.

Les sous produits fraîches des tomates présentent les mêmes inconvénients que les autres aliments à haute humidité (plus de 80% d'humidité et il peut être allé jusqu'à 98% [163]). Ils sont coûteux à transporter et ils se dégradent rapidement [172]. Pour ces raisons les déchets frais de la tomate sont généralement ensilés ou séchés avant d'alimenter les ruminants, la volaille et d'autres animaux [174].

En raison de la teneur élevée en humidité des sous produits de tomate, le séchage artificiel peut être coûteux et le séchage au soleil est préférable ; le produit doit être séché jusqu'à

ce qu'il soit croustillant. Une fois séchées, les sous produits de tomates doivent être broyés et mélangés soigneusement au régime alimentaire des ruminants [175].

III.4.2.4 Composition chimique

Les sous produits de tomate sont des produits très hétérogènes, leur forme physique, leur composition chimique et leur valeur nutritionnelle dépendent des proportions relatives des pelures, des graines et d'autres matières restantes laissées aux différentes étapes du processus de transformation, par exemple, la protéine brute et teneur en matières grasses des déchets de tomates varie avec la quantité de graines, qui sont plus riches en protéines et en gras que les pelures [176]. Le tableau III.3 [163] présente une analyse chimique des principaux nutriments des sous produits de tomates séchés.

Tableau III.3 : *Analyse chimique des principaux nutriments des sous produits de tomates séchés [163]*

Analyse principale	Unité	Moy	Min	Max	Nb d'échantillons utilisés
Matière sèche (MS)	% Comme nourris	93,5	90,4	95,2	8,0
Protéine brute	% MS	21,0	17,3	35,0	16,0
Fibre brute	% MS	39,0	27,6	56,9	14,0
NDF	% MS	54,9	43,2	71,6	12,0
ADF	% MS	44,3	36,6	60,4	12,0
lignine	% MS	25,4	20,6	40,5	12,0
extrait éthéré	% MS	11,9	8,9	22,0	9,0
HCl	% MS	13,3	10,0	17,3	6,0
Cendre	% MS	5,2	3,4	8,4	15,0
Les sucres totaux	% MS	0,0	---	---	1,0
énergie brute	MJ/kg MS	21,8	---	---	---
Minéraux					
Calcium	g/kg MS	4,4	1,8	10,1	4,0
Phosphore	g/kg MS	3,6	2,6	4,1	4,0
Potassium	g/kg MS	8,7	7,1	10,2	2,0
Sodium	g/kg MS	2,4	---	---	1,0
Magnésium	g/kg MS	2,2	1,8	2,5	2,0
Manganèse	mg/kg MS	72,0	---	---	1,0
Cuivre	mg/kg MS	11,0	---	---	1,0
Le fer	mg/kg MS	227,0	---	---	1,0

III.4.2.5 Les sous produits des tomates séchés en alimentation des ruminants

Les sous produits de tomates sont généralement utilisés dans alimentation des ruminants en raison de leur teneur élevée en fibres, ils ne sont pas d'excellents ingrédients alimentaires, car

ils sont moins digestibles, ils peuvent être amers et doivent être utilisés avec des aliments plus agréables au goût. Cependant, ils peuvent constituer une source précieuse et rentable de protéines, d'énergie et de fibres [161,175].

Safari et *al.* [177], ils ont fait Une étude sur les vaches laitières en début de lactation (41 kg de lait/jour), ils ont incorporé jusqu'à 10% du déchet de tomates séché dans le régime alimentaire. Cet ajout n'a pas modifié la consommation de MS (matière sèche), le rendement en lait et la composition du lait.

Belibasakis [178] a fait Une étude sur les vaches laitières multipares (26 kg de lait/jour), il a inclus jusqu'à 32,5% du déchet de tomate, en remplaçant une partie du grain d'orge et de la farine de graine de coton entière. Aucun effet négatif n'a été observé sur la santé, sur le rendement laitier et sur l'ingestion de MS.

Yuangklang et *al.* [179], ils ont fait une étude sur les veaux de boucherie, les sous produits des tomates séchés remplacent complètement le foin traité à l'urée, améliorant ainsi la digestion dans le rumen et l'efficacité alimentaire.

Yuangklang et *al.* [180], ils ont nourri pendant 21 jours les bouvillons adultes (370 kg) avec une ration totale mélangée dans laquelle du déchet de tomates séché remplaçait des cossettes de manioc (jusqu'à 11% de MS du régime), aucun changement significatif de l'apport en MS et de la digestibilité des nutriments (matière organique, protéines et fibres).

Chez les béliers adultes, un régime contenant du déchet de tomates séché et du foin de luzerne dans un rapport de 1/1 a entraîné une digestibilité du MS, de la MO et des protéines brutes de 57, 59 et 57% respectivement. Un ajout de levure (4 g/j) a significativement augmenté la digestibilité jusqu'à 68, 67 et 66% respectivement [181].

III.4.3 Les sous produits de pommes

Les pommes sont la deuxième culture fruitière au monde après les bananes, en 2016, 82 millions de tonnes ont été produites dans le monde : 70 millions de tonnes ont été directement utilisées pour l'alimentation, 5.8 millions de tonnes ont été transformées, 7 millions de tonnes ont été gaspillées et 0.66 millions de tonnes ont été utilisées pour l'alimentation animale [163].

Les sous produits de pommes sont les déchets solides qui restent après la fabrication de jus de pomme ou de cidres. Ils représentent 30% de la totalité du fruit [182-184]. La figure III.4 [167] présente un schéma du traitement de pomme.

Les sous produits de pommes représentent environ 25% des pommes transformées en jus ou en cidre, on peut estimer que 1,4 million de tonnes de déchet de pomme frais ont été produites en 2016 [163].

Un échantillon du déchet de pomme peut contenir 54% de pulpe, 34% de peau, les graines 7%, le noyau 4% de graines et de 2% tige [185], sa teneur en humidité dépendent des méthodes de traitement et de la maturité de la pomme. Les déchets de pomme sont des produits polyvalents avec de nombreuses utilisations, y compris le carburant (production d'éthanol), la combustion directe, de la gazéification, la digestion anaérobie (production de méthane), la production de la pectine, de l'acide citrique, l'extraction de la fibre et l'alimentation du bétail [186].

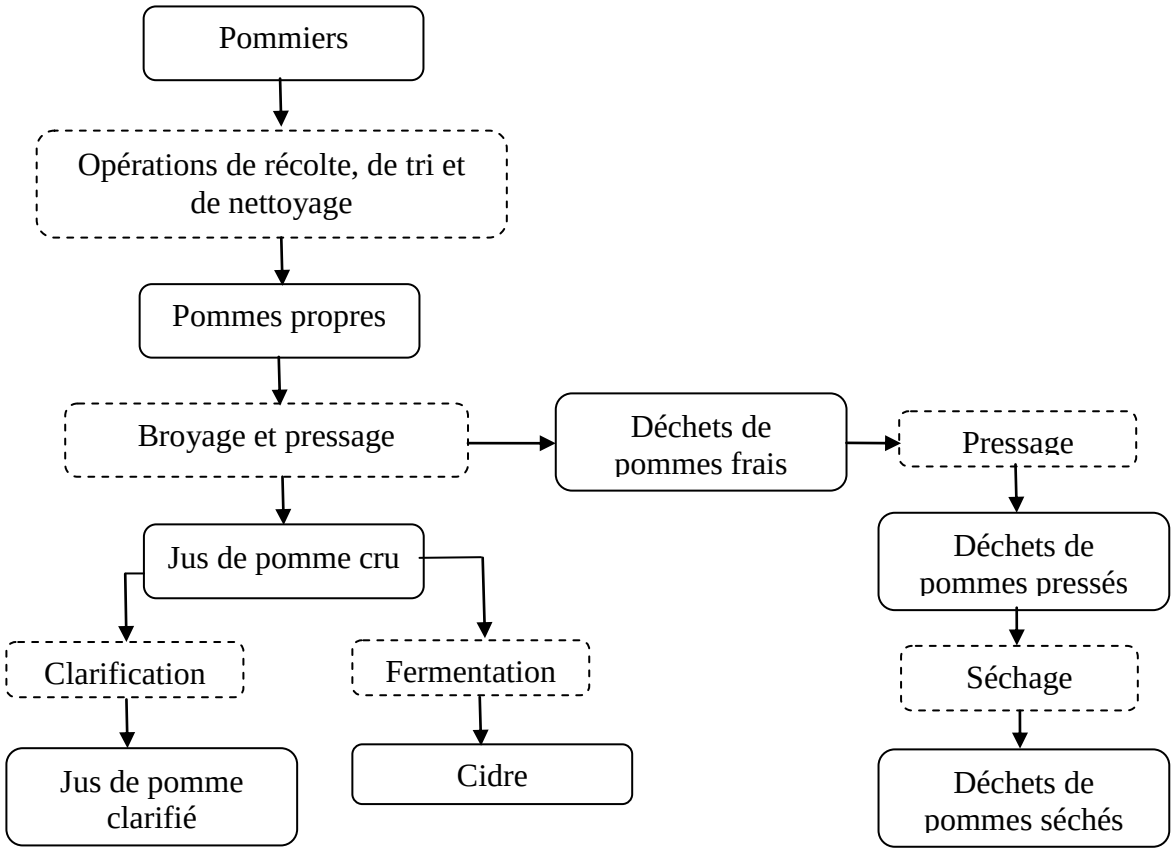


Figure III.4 : *Schéma du traitement de pomme.*

Les Pulpes de pomme sont des aliments fibreux agréables qui ont été utilisés pour toutes sortes d'animaux depuis longtemps [187], en raison de sa forte teneur en humidité elles sont souvent ensilées ou séchées pour la conservation.

La première étape du processus de séchage consiste à placer le sou produit de pomme sur une surface inclinée afin que l'excès d'eau puisse s'écouler. Il peut ensuite être pressé à travers un filtre-presse et séché en couches minces par circulation d'air chaud ou par séchage au soleil en

l'étalant sur un sol en béton en une couche de 5 à 7 cm d'épaisseur exposée au soleil et tournant deux à trois fois jusqu'à MS atteint 90%. Une fois le sou produit de pomme est séché, il est broyé et stocké dans des sacs en polyéthylène [188].

III.4.3.1 Composition chimique

Les sous produits de pomme sont généralement pauvres en protéines (3 à 11% de MS) et riches en fibres et en sucres. Les fibres brutes représentent entre 18 et 50% de MS, les NDF entre 48 et 75% de MS, les ADF entre 36 et 67% de MS et la lignine entre 16 et 35% de MS. Le tableau III.4 [163] présente une analyse chimique des principaux nutriments des sous produits de pommes séchés.

Tableau III.4 : *Analyse chimique des principaux nutriments des sous produits de pommes séchés [163]*

Analyse principale	Unité	Moy	Min	Max	Nb d'échantillons utilisés
Matière sèche	% Comme nourris	91,2	87,8	94,7	224,0
Protéine brute	% DM	8,0	3,6	11,4	119,0
Fibre brute	% DM	36,0	18,1	49,6	224,0
NDF	% DM	65,1	48,2	74,6	70,0
ADF	% DM	57,7	36,7	67,1	70,0
lignine	% DM	26,8	16,2	35,0	172,0
Les parois cellulaires, insoluble dans l'eau	% DM	72,8			1,0
extrait éthéré	% DM	2,8	1,2	4,7	50,0
Cendre	% DM	2,1	0,8	5,0	67,0
Amidon (polarimétrie)	% DM	8,1	0,9	18,4	7,0
Les sucres totaux	% DM	5,5	2,6	13,9	111,0
Fructose	% DM	14,5	14,5	14,5	2,0
énergie brute	MJ / kg MS	19,4	---	---	---
Minéraux					
Calcium	g/kg MS	0,6	0,2	1,1	25,0
Phosphore	g/kg MS	1,4	1,0	2,0	27,0
Potassium	g/kg MS	1,9	1,2	3,4	18,0
Sodium	g/kg MS	2,7	0,1	15,0	20,0
Manganèse	g/kg MS	7,0	6,0	9,0	2,0
Zinc	mg/kg MS	4,0	3,0	5,0	2,0
Cuivre	mg/kg MS	5,0	5,0	5,0	2,0
Le fer	mg/kg MS	72,0	60,0	100,0	4,0

La teneur en sucre est également variable : le déchet de pomme est riche en fructose (14 à 35% de MS). Les teneurs en saccharose et en glucose sont inférieures mais également variables : 1-11% et 6-13% de MS, respectivement [189,190].

Les sous produits de pomme sont des déchets de valeur nutritive médiocre, en raison de leurs faibles teneurs en matières azotées digestibles, de la mauvaise digestibilité de leurs parois cellulaires riches en sucres insolubles et de leur faible teneur en minéraux et en vitamines [191]. Ils sont réputés pour leur appétibilité, cependant, leur consommation doit être limitée à 1% du poids vif en raison de leur teneur en alcool qui peut atteindre 100 g/kg de MS [192].

III.4.3.2 Les sous produits des pommes séchés en alimentation des ruminants

Les sous produits de pommes frais ou séchés qui ont été ajoutés à l'urée n'ont pas répondu aux exigences des vaches et des brebis gestantes. Comparé à un régime de contrôle, il y avait plus de mort naissances, un poids de naissance inférieur, une survie à la grossesse médiocre et des anomalies structurelles. Les pommes avec une bonne source de protéines (tourteau de soja) et d'aliments pour le fourrage (foin ou aliments pour animaux) améliorent ou atténuent ces effets négatifs [193]. Le déchet de pommes séché inclus dans une ration totale mélangé à 20 ou 30% a permis un bon gain de poids quotidien en agneaux d'engraissement [194].

Chez les ovins, l'apport alimentaire de MS avaient tendance à être plus élevé lorsque le déchet de pomme a était complété par un azote de bonne qualité, tel que la luzerne (55,4 g/kg 0,75) plutôt que par de l'urée (38,7 g/kg 0,75) [195].

III.5 LES CONTRAINTES DANS L'UTILISATION DES DECHETS AGRO-ALIMENTAIRES

Plusieurs facteurs limitent l'utilisation de quelques déchets agroalimentaires, parmi lesquels [196-198] :

- une faible valeur nutritive (Grignons d'olives),
- une courte période d'utilisation (disponibilité saisonnière surtout pour les sous produits de fruits et légumes),
- une forte humidité (comme la pulpe de citron, pulpe de tomate, grignons d'olives, etc.),
- un coût élevé pour la manutention et le transport du site de production (pulpe de tomate, grignons d'olive, raisin, etc.) à la ferme,
- existence des facteurs antinutritionnels (tannins, composés phénoliques principalement les saponines, etc.),
- le séchage peut causer la perte de la valeur des protéines,
- peroxydation des lipides (rancissement des produits à haute teneur en graisses),
- peuvent être toxiques à cause de la croissance des moisissures sur les aliments.

III.6 COMPOSITION ET METHODES D'ANALYSE DES ALIMENTS EN ALIMENTATION DES RUMINANTS

Les aliments contiennent des matières nutritives qui sont utilisées pour assurer les besoins des animaux. La plupart des aliments pour les ruminants consistent en tiges, feuilles, graines et racines de nombreuses plantes, les ruminants peuvent également être nourris avec des sous-produits industriels et leur ration nécessite souvent être complétée avec de petites quantités de minéraux et vitamines. Les aliments pour les ruminants sont souvent classifiés comme suit :

- Fourrages.
- Concentrés (suppléments énergétiques, suppléments protéiques, suppléments minéraux et vitaminés).

Bien qu'arbitraire, cette classification dépend de la richesse d'un aliment en éléments nutritifs utilisés pour le maintien, la croissance, la production, la reproduction et la santé des animaux (certaines plantes et certains aliments mal conservés peuvent contenir des toxines nocives à la santé des animaux).

Il existe cinq catégories d'éléments nutritifs : l'eau, l'énergie (hydrates de carbone, protéines, lipides), les fibres (celluloses), les sucres de réserves (amidons) et les protéines (composés azotés).

La quantité d'eau dans un aliment est généralement peu importante. Les vaches laitières boivent de 4 à 5 kg d'eau par kg de MS ingérée, cette eau doit être fraîche, propre et disponible à toute heure de la journée. A l'exception de l'eau, touts les éléments nutritifs se trouvent dans la MS de l'aliment.

La concentration d'une substance nutritive, telle que la protéine, est généralement exprimée en fonction de la quantité de MS contenue dans l'aliment et non en fonction de la matière fraîche (le poids de la MS et de l'eau que l'aliment contient) car la quantité d'eau contenue dans les aliments est variable et par conséquent la concentration d'une substance nutritive apparaît moins variable lorsqu'elle est exprimée sur la base de sa teneur en MS. Ceci facilite la comparaison de la valeur nutritive de différents aliments.

La matière sèche d'un aliment contient de la matière organique et inorganique, ou minérale. Les composés qui contiennent du carbone (C), de l'hydrogène (H), de l'oxygène (O) et de l'azote (N) sont des composés organiques. D'autre part, les autres éléments chimiques présents dans les aliments (calcium, phosphore, sodium, etc.,) font partie de la matière minérale.

Les minéraux sont souvent classifiés en deux catégories : les macro-minéraux et les micro-minéraux, comme il est indiqué dans le tableau III.5 [199], cette différenciation est basée sur la quantité requise par l'animal. Le besoin en macro-minéraux est requis dans l'ordre d'une ou quelques dizaines de grammes par jour, au contraire, le besoin en micro-minéraux ne dépasse pas les quelques milligrammes par jour.

Tableau III.5 : *Minéraux nécessaires dans la ration des ruminants ainsi que leur symbole chimique [199]*

Macro Minéral	**Symbole chimique**	**Micro Minéral**	**Symbole chimique**
Calcium	Ca	Iode	I
Phosphore	P	Fer	Fe
Magnésium	Mg	Cuivre	Cu
Sodium	Na	Cobalt	Co
Potassium	K	Manganèse	Mn
Chlore	Cl	Molybdène	Mo
Sulfure	S	Zinc	Zn
		Sélénium	Se

L'azote se trouve dans les protéines et dans d'autres composés faisant partie de la matière organique. Les protéines consistent en une ou plusieurs longues chaînes d'acides aminés. Certains acides aminés sont essentiels; ils doivent être dans la ration, car les cellules du corps ne savent pas les synthétiser. D'autre part, d'autres acides aminés peuvent être synthétisés dans le corps ; ils ne sont donc pas nécessaires dans la ration.

Les lipides (matières grasses) sont des nutriments contenant de l'énergie, ils produisent environ 2.25 fois plus d'énergie que les hydrates de carbone, cependant, la grande majorité de l'énergie des fourrages et des concentrés provient des hydrates de carbone. Les aliments pour vaches contiennent généralement moins de 5% de lipides, mais plus de 50 à 80% d'hydrates de carbone (la cellulose, glucose, fructose, etc.).

Les aliments peuvent également contenir des substances sans valeur nutritive. Certaines de ces substances contiennent des structures complexes non digestibles telles que la lignine et les tannins et elles peuvent interférer avec la digestion de certains éléments nutritifs.

La figure III.5 [199] présente un schéma descriptif de différents éléments nutritifs des aliments destinés aux animaux.

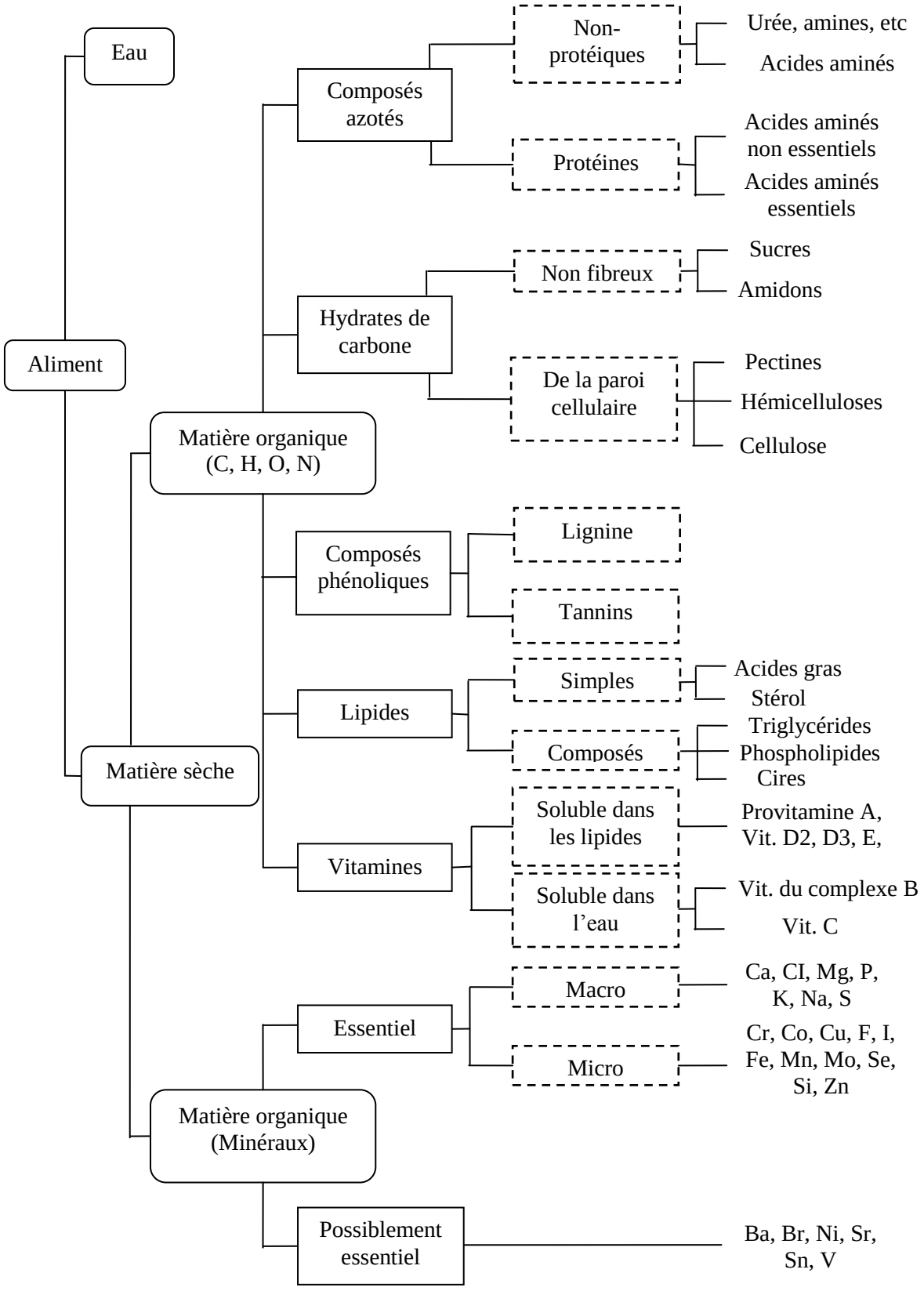


Figure III.5 : *Composition et analyse de laboratoire des aliments*

III.7 LES DIFFERENTES METHODES D'ANALYSE DE LA VALEUR NUTRITIVE DES ALIMENTS

L'évaluation de la valeur nutritive des aliments fournit aux nutritionnistes les informations nécessaires pour la formulation d'une ration. Dans l'évaluation des aliments pour ruminants, différentes méthodes sont couramment disponibles et elles peuvent être subdivisées en deux grandes catégories : les méthodes n'utilisant pas les microorganismes (chimiques, physiques et enzymatique) et les méthodes basées sur l'utilisation des microorganismes (les méthodes microbiologiques).

III.7.1 Les méthodes chimiques

La méthode chimique est la méthode la plus simple pour évaluer les fourrages, cette méthode utilise les résultats de réactions physico-chimiques en laboratoire afin d'en déduire la digestibilité de la matière organique du fourrage. De cela, on peut calculer à partir d'équations de prédictions les valeurs alimentaires du fourrage considéré.

Cette méthode d'analyse approximative offre le maximum de précision pour déterminer la composition chimique (matière sèche, matière azotée totale, matière minérale, etc) d'un fourrage, mais c'est la plus onéreuse et la plus longue en termes de délai de résultats [200].

Le procédé proposé par Van Soest et Wine (1967) pour l'estimation des fibres est maintenant le plus utilisé et le plus fiable [201], il a été développé pour déterminer à la fois les composants cellulaires et les composants pariétaux, principalement présents dans le matériel végétal comme :

- **L'NDF** (fraction fibreuse non soluble dans le détergent neutre), donne une estime assez précise de la fibre totale d'un aliment.
- **L'ADF** (fraction fibreuse non soluble dans le détergent acide) correspond au complexe composé de lignine qui se dépose sur la cellulose (lignocellulose) [202].

III.7.2 Les méthodes physiques

La spectrophotométrie à réflectance dans l'infrarouge (NIRS) est une méthode analytique physique se base sur les propriétés d'absorption de la matière organique dans le proche infrarouge [203]. Elle repose sur l'étude des spectres de réflectance (c'est-à-dire l'émission de radiation par la substance étudiée, lorsqu'elle est soumise aux rayons infrarouges sous différentes longueurs d'ondes).

Elle se passe en deux temps : Il faut insérer en premier temps un échantillon de fourrage dans le spectrophotomètre, on obtient alors une donnée « brute » : un spectre. Ce spectre est ensuite comparé à une base de données très importante (qui est régulièrement étalonnée par des analyses chimiques complémentaires). Cette étape permet de déduire la composition chimique du fourrage (matière sèche (MS), matière azotée totale (MAT), cellulose brute (CB), matière minérale, etc). Par la suite, à partir de la composition chimique trouvée et en fonction des caractéristiques du fourrage renseignés sur une fiche (nature, espèces, cycle de végétation), des équations de prédictions permettent de calculer les valeurs alimentaires (UFL, PDIN, PDIE,...) du fourrage analysé [203]. Cette méthode, développée par Norris et *al* en 1967 a été largement utilisée dans la prédiction de la digestibilité in vitro de la matière organique et de l'énergie métabolisable [204].

D'autres méthodes physiques se basent sur l'énergie nécessaire au broyage, elle s'appelle indice de fibrosité, elle peut donner une meilleure prévision de la digestibilité que celle de la cellulose brute ou de l'NDF [205].

III.7.3 Les méthodes enzymatiques

La prévision de la digestibilité des fourrages a été réalisée depuis 1963 [206], s'étaient avec un mélange d'enzymes qui attaquaient la cellulose, l'hémicellulose, les protéines et l'amidon, l'action de ce mélange est comparable à celle de la flore ruminale, mais avec une intensité faible. La digestibilité des aliments est mesurée par le déchet qui reste après 24 heures d'incubation dans un milieu tamponné. Ces méthodes sont simples, peu couteuses et elles pallient à l'inconvénient majeur des méthodes in vitro et in situ (nécessité d'utiliser des animaux munis de fistules) [197].

III.7.4 Les méthodes microbiologiques

Parmi les méthodes microbiologiques habituellement disponibles pour déterminer la valeur nutritive des aliments pour ruminants, nous considérons :

- **La technique de digestibilité in vitro de Tilley et Terry:** Elle comprend deux étapes, représentant la digestion ruminale et intestinale. Le substrat subit, en premier lieu, une fermentation anaérobie dans une salive artificielle composée de jus de rumen et d'une solution tampon. Après, il est soumis à un traitement pepsine-acide pour digérer le substrat non dégradé et les protéines microbiennes [207].

- **La méthode in sacco:** Appelée aussi la méthode des sachets ou in situ, est basée sur le dépôt des échantillons dans des sachets qui sont incubés directement dans le rumen des animaux munis d'une canule ruminale. L'objectif principal est la mesure de la disparition de la matière sèche ou d'autres composants alimentaires [205].
- **Les méthodes de production de gaz in vitro :** L'association entre la fermentation ruminale et la production de gaz est depuis longtemps connue, quand un substrat est incubé in vitro en présence de jus de rumen et d'une solution tampon, les glucides sont fermentés en acides gras volatiles, en gaz (essentiellement CO_2 et CH_4) et en biomasse microbienne. La production de gaz est fondamentalement le résultat de la fermentation des glucides en acétate, propionate et butyrate. Les gaz générés dans les essais de production de gaz sont originaires de la fermentation des aliments par la flore ruminale (production directe) et des gaz libérés (CO_2) par le système tampon pour neutraliser les acides gras (production indirecte) [208].

III.8 CONCLUSION

On a vu dans ce chapitre que Les fruits sont consommés le plus souvent sous forme de produits frais. Même si, de nos jours, la globalisation peut assurer les quantités nécessaires tout au long de l'année, les fruits sont aussi soumis aux processus de transformation pour l'obtention d'autres produits tels que le jus, la confiture, la compote, etc. Les importantes quantités de déchets issus de ces processus sont facilement dégradables et peuvent contribuer à l'augmentation de taux de pollution de l'environnement.

On a vu que les sous produits de fruits sont souvent valorisés sous forme des fertilisants ou de fourrage pour les animaux mais qu'ils peuvent être aussi matière de départ dans la production des agro combustibles par exemple.

On a remarqué que les sous produits d'agrumes, de pommes et de tomates sont utilisés comme substitut de céréales dans l'alimentation des ruminants, en raison de leur contenu énergétique élevé et de leur bonne digestibilité chez les espèces de ruminants.

Les aliments pour les ruminants sont souvent classifiés en fourrage ou concentrés qui sont des suppléments énergétiques, des suppléments protéiques, des suppléments minéraux et vitaminés. Les analyses de fourrage montrent un intérêt très significatif pour pouvoir piloter au mieux la ration. Encore faut-il trouver la méthode qui corresponde le mieux aux besoins de l'éleveur.

Chapitre IV
Matériels et Méthodes

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on va sécher des déchets de tomates, d'oranges et de pommes par deux méthodes de séchage, séchage en couche mince au soleil et séchage solaire en couche mince dans un nouveau séchoir serre solaire conçu à l'UDES, suivi de différentes expériences visant à évaluer les poudres obtenus à partir des deux méthodes de séchage afin de déterminer lesquelles sont les meilleurs produits qu'on peut utiliser comme aliment pour les ruminants. Ainsi, l'effet de méthode de séchage sur leurs propriétés physiques, physicochimiques, microbiologiques et microscopiques.

Ce chapitre rapporte aux expériences suivantes :

- Caractérisation physique des déchets de tomates, d'oranges et de pommes ;
- Séchage et modélisation (Obtention de la poudre des déchets de tomates, d'oranges et de pommes par deux méthodes de séchage, séchage en couche mince au soleil et séchage solaire en couche mince dans un nouveau séchoir serre solaire conçu à l'UDES. Trouver le modèle qui correspond le mieux aux données expérimentales. Déterminer la diffusion effective) ;
- Caractérisation physicochimique des différentes poudres obtenues ;
- Caractérisation microbiologique des différentes poudres obtenues ;
- Caractérisation microscopique des différentes poudres obtenues.

IV.2 PROCEDURE EXPERIMENTALE

IV.2.1 Matériel végétal

Notre étude porte sur trois sous produits issus de l'industrie agroalimentaire représentés par : déchets d'oranges, déchets de pommes et déchets de tomates, ont été importés d'une usine de jus algérienne sous forme humide et pâteuse. Ils sont placés au congélateur, la congélation ne détruit pas les microorganismes responsables de la dégradation du produit; il ne fait que stopper

leur développement lors du stockage à -20°C; comme les réactions enzymatiques sont seulement ralenties. Le jour de séchage, quatre kilos grammes de chaque déchet ont été pesées et divisées en deux quantités équivalentes (Deux kilos grammes de déchets ont été utilisés pour chaque méthode de séchage). Le choit des trois déchets à été orienté par la composition et la disponibilité.

IV.2.2 Caractérisation physique

Les caractéristiques physiques sont réalisées sur les déchets agricoles avant et âpres le séchage au soleil et dans le séchoir sur lesquels sont déterminés :

- Le poids de produit au moyen d'une balance RADWAG d'une précision de 0,5 g.
- la couleur (visuellement)

IV.2.3 Séchage et modélisation

IV.2.3.1 Séchage dans le séchoir serre solaire

Le séchage est effectué en couche mince dans un nouveau séchoir serre solaire conçu à l'UDES.

a) Description du nouveau séchoir serre solaire :

Le nouveau séchoir serre solaire utilisé dans cette étude (figure IV.1) a été conçu dans l'unité de développement d'équipements solaires (UDES) à Bou-Ismail, en utilisant des matériaux et des équipements existants localement (les matériaux utilisés sont courants et peu coûteux). Il a été développé pour la valorisation des déchets issus du traitement industriel des fruits et légumes par séchage solaire. Ces déchets humides, une fois stockés à l'air libre, se dégradent très rapidement et causent une nuisance environnementale, un problème qu'il n'est pas évident de résoudre pour l'entreprise. Le séchoir solaire à effet de serre est une construction qui convertit l'énergie solaire en énergie thermique par mode direct.

Ce séchoir à grande échelle avec un rendement énergétique optimal, permet de traiter une grande quantité de tout type de produit agroalimentaire. Il est recommandé pour des usines de productions, des fermes agricoles ou de grandes plantations. Il offre aux opérateurs du monde agricole une alternative aux techniques traditionnelles de séchage et à l'utilisation d'appareillages énergivores leur permettant, pour certains, un gain de temps et, pour d'autres, une réduction des coûts. Obtenir une siccité élevée par évaporation naturelle de l'eau contenue dans les produits à sécher.

Le but de réaliser ce séchoir est le développement d'un dispositif performant et fiable susceptible d'être produit à moindre coût avec des matériaux disponibles sur le marché local afin d'offrir au secteur agricole une alternative économique pour promouvoir la conservation et le stockage des aliments et la valorisation des déchets agroalimentaires.



Figure IV.1 : *Nouveau séchoir serre solaire*

La performance d'un séchoir variera avec l'attention apportée à sa conception, à sa fabrication et à son fonctionnement. La serre de largeur 3 m, de longueur 4 m, de hauteur max 3,6 m et de hauteur min 1,5 m, comporte une couverture transparente en polycarbonate disposée sur une charpente métallique en acier. Son axe est orienté dans la direction nord-sud. Le séchoir serre solaire est composé de six faces, droite, gauche, avant, arrière, supérieure (le toit), et inferieure (la base).

Les faces avant ; gauche et droite sont en polycarbonate, la face droite (figure IV.2) dispose de :

- une porte permettant l'accès à la serre et le dépôt des chariots contenant des claies avec le produit à sécher.
- trois ouvertures sur la partie inferieure pour l'entrée de l'air.
- un ventilateur placé sur la partie supérieure permettant l'évacuation de l'air humide.

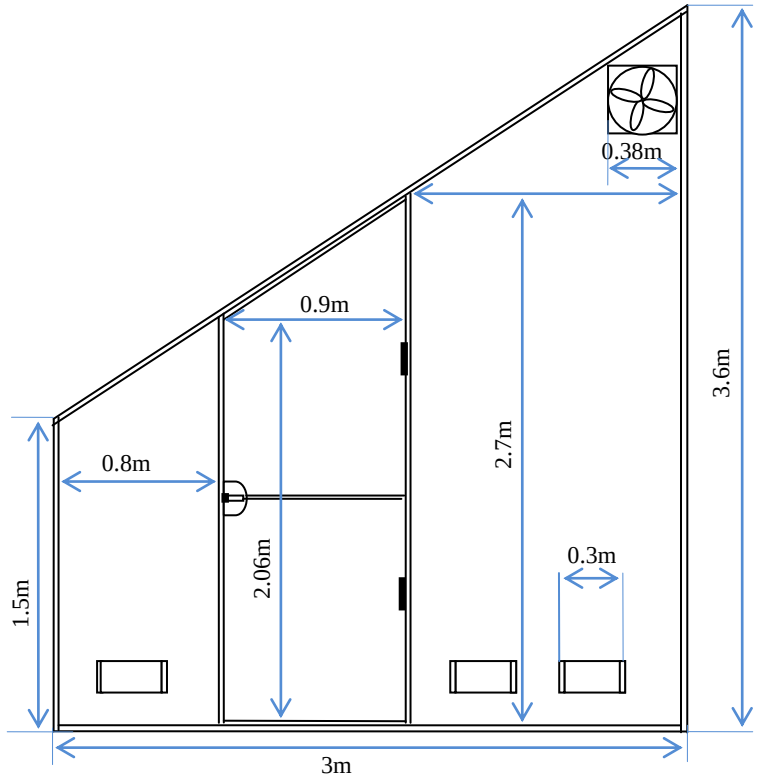


Figure IV.2 : *Les spécifications de la face droite du séchoir*



Figure IV.3 : *Face gauche du séchoir*

La face arrière est fait en aluminium, c'est un mur peinte en noir isolé thermiquement avec du polystyrène de 25 mm d'épaisseur afin de minimiser les pertes de chaleur vers l'extérieur pendant le processus de séchage et pour résister aux taux d'humidité dégagés par le déchets et faire face aux effets de vieillissement. Ce mur est peint en noir pour assurer l'absorption des rayons solaires qui traversent le polycarbonate et, par conséquent, provoque l'effet de serre dans le séchoir (figure IV.3).

Le toit, incliné à la latitude de la ville de Bouismail à 36°, dispose de deux ouvertures (figure IV.4). La base de la serre est recouverte d'une plancher en bois carrée peinte en noir et joue le rôle d'un absorbeur.



Figure IV.4 : *Face Avant et toit du séchoir*

Les produits à sécher sont placés dans neuf chariots en aluminium répartis en trois rangées, chaque chariot comporte six claies avec un espace de 20 cm entre une claie et autre, un espace suffisamment grand pour que la circulation de l'air puisse se faire de la meilleure façon. Les chariots sont munis de plusieurs supports pour porter les claies afin de contrôlé l'espace entre les claies et avoir un bon contact entre l'air chaud et le produit à sécher (figure IV.5).

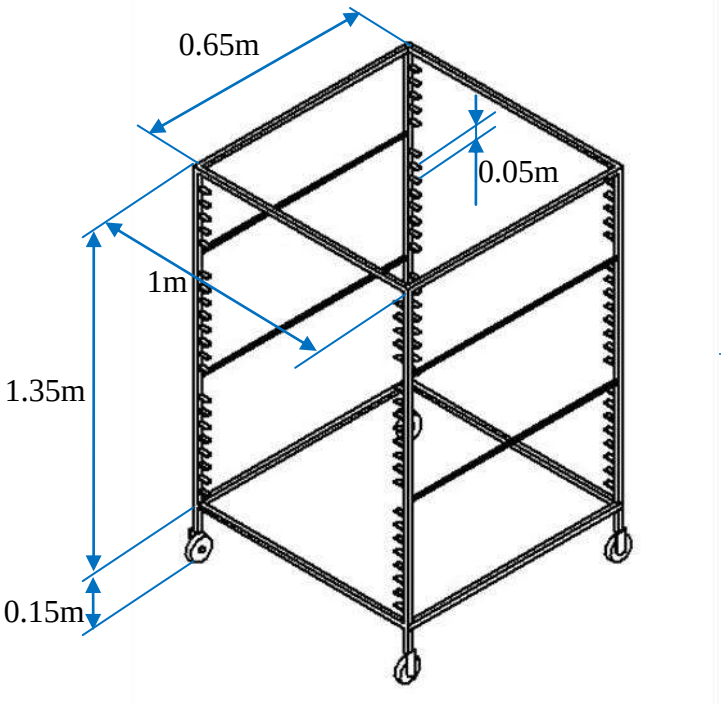


Figure IV.5 : *Dessin d'un chariot*

Les claies de séchage sont des plateaux à fond en tamis permettant à l'air chaud de circuler à travers les couches du produit et augmentent ainsi l'efficacité du séchage, les treillis étant en matière galvanisée, les produits ne s'y collent pas et peuvent sécher uniformément sans devoir être retourné. Ayant chacune une superficie de 0.585 m² (650mm × 900mm) (figure IV.6). La capacité maximale des claies est de 2,5 kg.

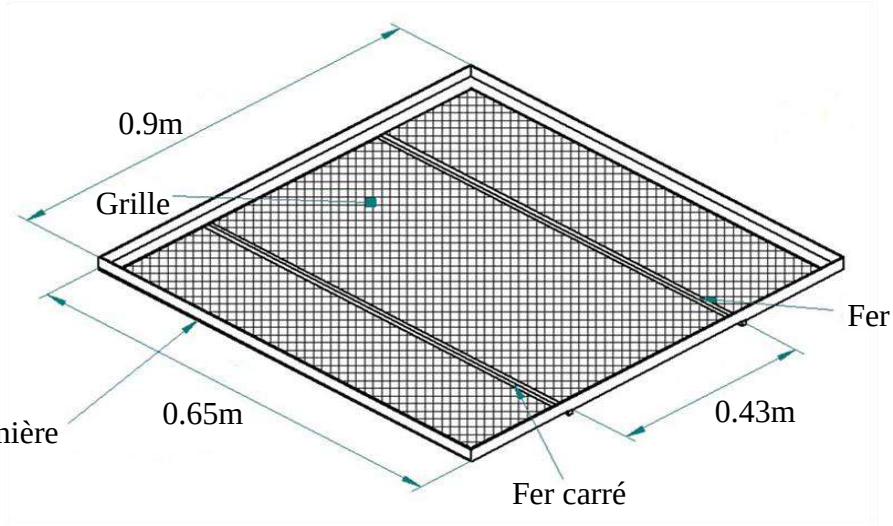


Figure IV.6 : *Dessin d'une claie*

Le polycarbonate a été choisi pour constituer le couvercle transparent du séchoir, car elle présente une transmission élevée de 70% dans le rayonnement solaire à ondes courtes et une transmission infrarouge faible, elle permet le passage des rayons solaires créant ainsi un effet de serre élevé dans le séchoir. Le choix du matériau de couverture de la serre c'est fait en fonction de leurs qualités, de la luminosité, du rendement, de la thermicité et la rigidité, également en fonction de la résistance aux rayons UV et au vieillissement du matériau, garantissant une réponse optimale aux exigences du séchage.

Cinq ventilateurs de 55W avec un débit de 0,19 m^3/s sont alimentés par un système photovoltaïque. Un ventilateur est placé sur la partie supérieure de la face droite assure une extraction continue de l'air humidifié par l'évaporation de l'eau. Quatre ventilateurs on été placés à l'intérieur du séchoir pour créer une circulation d'air chaud et l'orienté vers le produit à sécher et puis vers les ouvertures d'évacuation et l'extracteur. Le débit d'air créé par les ventilateurs entraine une diminution du temps de séchage du produit. Ces ventilateurs assurent le brassage de l'air à l'intérieur de la serre qui favorise le séchage en créant une vitesse relative entre l'air et le produit.

Ce système comprend un générateur photovoltaïque de 1 KW, un groupe de batteries au plomb-acide de 12×2V pour le stockage d'énergie et un onduleur solaire de 2,1 KVA permettant de convertir l'énergie CC en énergie AC. L'alimentation photovoltaïque permet l'utilisation du séchoir solaire dans les zones rurales sans accès aux réseaux électriques.

Les ouvertures (entrée et sortie de l'air) permettent l'aération de la serre et au même temps l'évacuation de l'air humidifié par l'évaporation de l'eau. Les cinq ouvertures de la serre sont équipées d'un système coulissant d'ouverture/fermeture pour contrôler le flux d'air entrant et sortant. La figure IV.7 présente un diagramme schématique du nouveau séchoir serre.

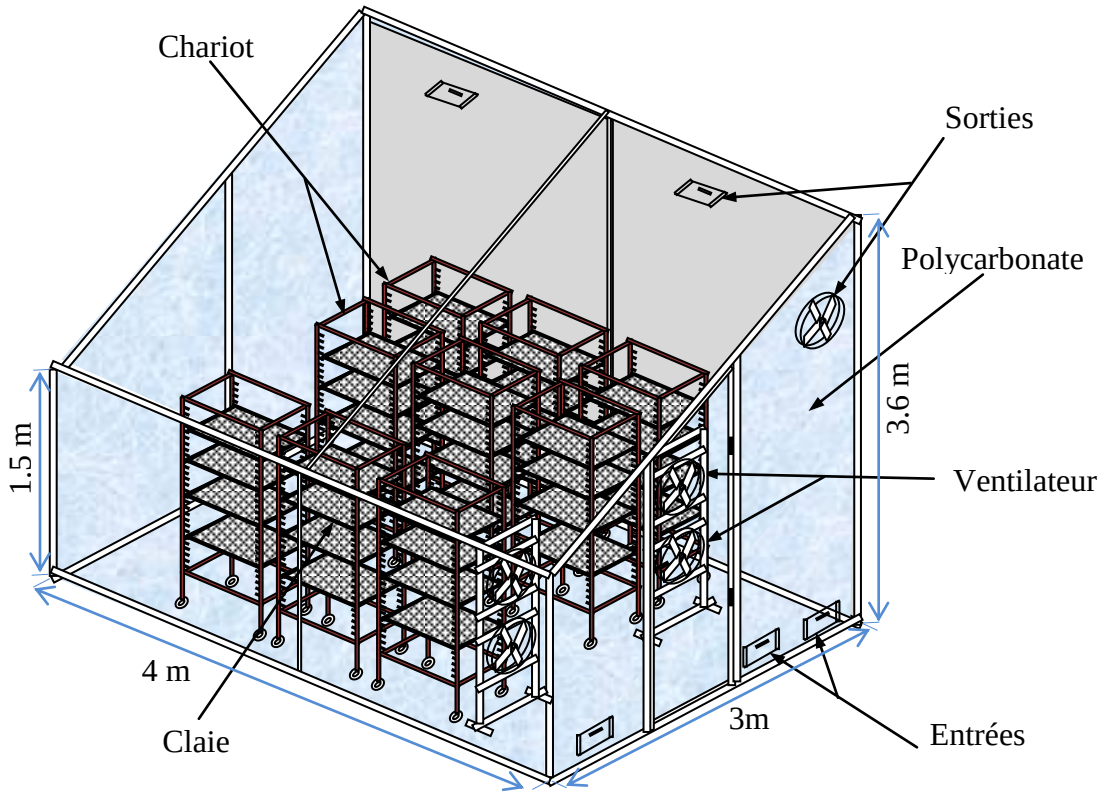


Figure IV.7 : *Diagramme schématique du nouveau séchoir*

b) Processus :

Le rayonnement solaire pénètre à l'intérieur du séchoir à travers le couvercle transparent [209]. Il est absorbé par les murs de couleur sombre et génère de la chaleur. Le rayonnement infrarouge réfléchi qui émerge des murs est piégé par le couvercle transparent (effet de serre), ce qui provoque le réchauffement du séchoir. L'air pénètre dans le séchoir par les ouvertures d'entrée et il est chauffé à l'intérieur, puis passe à travers les claies et sèche les déchets agroalimentaires. En outre, une circulation d'air horizontale a été fournie à l'aide des quatre ventilateurs placés dans la serre. Enfin, l'air humide sort par les ouvertures de sortie, éliminant ainsi l'humidité libérée par le produit.

c) Efficacité du séchoir :

L'efficacité quotidienne du séchoir; η_d est le rapport entre l'énergie nécessaire pour évaporer l'humidité du produit et l'énergie fournie au séchoir solaire [210, 211], il est calculé à partir de l'équation IV.1, qui prend en compte l'énergie consommée par les ventilateurs pour les séchoirs solaires à convection forcée.

$$\eta_d = \frac{W_v L \times 100}{IAt + E} \quad \text{(IV.1)}$$

Où L est la chaleur latente de vaporisation, W_v est la masse d'élimination de la teneur en eau en kg, A est la zone de séchage, I est le rayonnement solaire et t est l'intervalle de temps entre deux mesures et E est l'énergie de ventilateurs fournie aux séchoir solaire (kJ).

d) Mode opératoire :

Le séchage a été effectué le 5, 6 et 7/11/2018 à Bouis mail, l'expérience a commencé à 9h. La durée de l'opération sera conditionnée par le produit à sécher. Elle sera terminée si aucune perte de poids n'est constatée sur les déchets des produits agricoles étudiés (tomate, pomme et orang) jusqu'à ce que l'humidité totale soit éliminée du produit. Pour suivre l'évolution de l'opération de séchage, le produit a été pesé complètement avant le début de l'opération, par la suite, il a été étendu sur la grille en une couche mince (e = 0.007 m) pour permettre le passage de l'air. Pour surveiller avec précision le processus de perte d'eau du produit en fonction du temps, le produit a été pesé toutes les cinq minutes à l'aide d'une balance RADWAG, avec une précision de 0.5 g.

Le rayonnement incident a été mesuré pendant 24 heures à l'aide d'un pyranomètre (Kipp & Zonen). De plus, pour suivre l'évolution de la température dans le temps en différents lieux du séchoir solaire, on a mis quatre thermocouples de type K, le premier au niveau de la claie, le second dans la serre et le troisième à l'entrée d'air et le quatrième au mur noir. Les thermocouples sont connectés à un enregistreur de données (unité d'acquisition/commutateur de données Keysight 34972A LXI), qui envoie les données requises à l'ordinateur.

IV.2.3.2 Séchage au soleil

Pour comparer les performances du séchage dans le séchoir serre solaire à celles du séchage au soleil, la moitié de la quantité globale de chaque déchet a été distribuée sur une claie et exposée directement au soleil. Des enregistrements ont également été réalisés pour enregistrer la réduction de masse, l'ensoleillement et la température au niveau de la claie de séchage. Les expériences de séchage au soleil ont été effectuées simultanément avec les expériences de séchoir.

Les produits séchés obtenus des deux méthodes de séchage ont été broyés, tamisés et conservés dans des boites fermées hermétiquement à l'abri de l'air et l'humidité afin de les caractériser.

IV.2.3.3 Cinétique de séchage

Dans cette partie d'étude, nous observons les évolutions des pertes de masse des déchets séchées par les deux méthodes, afin de déterminer leurs vitesses de séchage. Pendant toute l'opération de séchage, l'évolution de la masse humide (WM) du produit à sécher en fonction du temps a été suivie de pondérations successives jusqu'à ce qu'il devienne stationnaire. Les déchets agricoles sont ensuite déshydratés dans un four à 105°C jusqu'à ce que le poids devienne constant puis sortis du four et placés dans un dessiccateur. Enfin, nous pesons les produits afin de déterminer la masse sèche [212-214].

L'évolution du séchage des déchets agricoles peut être représentée par deux courbes : le rapport d'humidité et la vitesse de séchage V en fonction du temps. Le taux d'humidité (MR) a été calculé selon l'équation (IV.2) :

$$\mathrm{MR} = \frac{\mathrm{M_t} - \mathrm{M_{eq}}}{\mathrm{M_0} - \mathrm{M_{eq}}} \approx \frac{\mathrm{M_t}}{\mathrm{M_0}} \qquad \text{(IV.2)}$$

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

Où M_R est le rapport d'humidité; M_t est la teneur en humidité; M_{eq} est le contenu d'équilibre; M_0 est la teneur en humidité initiale.

M_t a été calculée en utilisant l'Eq. (IV.3) :

$$\mathrm{M_t} = \frac{\mathrm{WM} - \mathrm{DM}}{\mathrm{DM}} \qquad \text{(IV.3)}$$

La vitesse de séchage V a été calculée par calcul direct de la dérivée de la teneur en humidité à partir des points expérimentaux (Eq.(IV.4)) :

$$V = dM_t/dt \qquad \text{(IV.4)}$$

IV.2.3.4 Modélisation de la cinétique de séchage

Seize différents modèles mathématiques de séchage pour les produits alimentaires, y compris cinq nouveaux modèles proposés, ont été évalués dans le but de trouver le modèle qui correspond le mieux aux données expérimentales générées pendant le processus de séchage. L'opération d'ajustement a été réalisée à l'aide du logiciel Origine (logiciel d'analyse Origin Lab-Data). Le tableau IV.1 montre les cinq nouveaux modèles proposés dans notre étude.

La modélisation des courbes de séchage solaire vise à définir une fonction qui suit l'équation : M = f(t). Le tableau IV.2 résume 11 modèles mathématiques de séchage trouvés dans la littérature décrivant la cinétique de séchage solaire d'un produit. Ces modèles reposent sur le séchage en couche mince de produits tels que les fruits et les légumes.

Cependant, l'utilisation de ces modèles est très limitée car chacun d'entre eux est spécifique à un type de produit et aux conditions expérimentales de séchage, ce qui ne permet pas l'extrapolation aux limites de l'expérience. Afin d'illustrer le raisonnement de notre étude (séchage solaire des déchets agricoles), cinq nouveaux modèles universels, sans dimension (indépendantes des unités de mesure) et avec vérification des conditions aux limites ont été utilisés, qui se présentent comme suit :

$$MR = \frac{M_\infty - M}{M_\infty - M_0} = f\left(\frac{t_\infty - t}{t_\infty - t_0}\right) = f\left(\frac{1-\tau}{1-\tau_0}\right) \quad (IV.5)$$

Après simplifications :

$$MR = f(\tau) \quad (IV.6)$$

Où : $\tau = \frac{t}{t_\infty}$ et $\tau_0 = \frac{t_0}{t_\infty}$

De l'équation (IV.4) : $\lim_{t\to 0} \tau = 0$, $\lim_{t\to\infty} \tau = 1$, $\lim_{\tau\to 0} MR = 1$ et $\lim_{\tau\to\infty} MR = 0$.

Tableau IV.1 : *Nouveaux modèles mathématiques proposés*

Modèle	**Expression du Modèle**
Nouveau model 1	$MR(\tau)=\frac{A_1[1-exp(-k_1(1-\tau))]^n}{1+(A_2-1)[1-exp(-k_2(1-\tau))]^m}$
Nouveau model 2	$MR(\tau)=\frac{A_1 * exp(-k_1\tau^n)}{[1+A_2 * exp(-k_2\tau^m)]^p}$
Nouveau model 3	$MR(\tau)=A_1\left[\frac{1-\tau}{1-A_2\tau}\right]^n$
Nouveau model 4	$MR(\tau)=A_1(1-k_1\tau)^n exp[-(1-k_2\tau)^m]$
Nouveau model 5	$MR(\tau)=A_1(1-k_1\tau)^n + A_2 exp[-(1-k_2\tau)^m]$

Tableau IV.2 : *Onze modèles mathématiques de séchage cités par la littérature*

	Modèle	Expression du Modèle	Références
1	Page	$MR(t)=\exp(-kt^n)$	[215]
2	Logarithmique	$MR(t)= A_1\exp(-kt)+A_2$	[216]
3	Midilli-Kucuk	$MR(t)= A_1\exp(-kt^n)+A_2t$	[217]
4	Two term	$MR(t)= A_1\exp(-k_1 t)+A_2\exp(-k_2t)$	[218]
5	Lewis	$MR(t)= \exp(-kt)$	[219]
6	Henderson and Pabis	$MR(t)= A\exp(-kt)$	[220]
7	Wang and Singh	$MR(t)=1+A_1t+A_2t^2$	[221]
8	Approximation of diffusion	$MR(t)= A\exp(-kt)+(1-A)\exp(-kbt)$	[222]
9	Verma et al.	$MR(t)= A\exp(-kt)+(1-A)\exp(-gt)$	[223]
10	Modified Henderson and Pabis	$MR(t)= A_1\exp(-k_1t)+ A_2\exp(-k_2t)+ A_3\exp(-k_3t)$	[224]
11	Two term exponential	$MR(t)= A\exp(-kt)+(1-A)\exp(-Akt)$	[225]

Les différentes équations donnent l'évolution du rapport d'humidité dans le temps. Ces équations contiennent des constantes qui sont ajustées pour correspondre aux courbes de séchage expérimentales. Par conséquent, ils ne sont valables que dans le domaine des études expérimentales pour lesquelles ils ont été réalisés [226, 227].

Le modèle approprié pour la description de la cinétique de séchage des déchets de tomate est sélectionné en fonction des critères suivants :

- Coefficient de détermination r^2.

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{pr\,e,i}-\overline{MR}_{pre,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{exp,i}-\overline{MR}_{exp,i}\right)^2} \quad \text{(IV.7)}$$

- Chi-square réduit χ.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{exp,i}-MR_{pre,i}\right)^2}{N-z} \quad \text{(IV.8)}$$

- Mean absolute error MAE.

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|MR_{exp,i} - MR_{pre,i}\right| \quad \text{(IV.9)}$$

- Mean squared error MSE.

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

Où $MR_{exp,i}$ et $MR_{pre,i}$ sont les rapports d'humidité expérimentaux et prévus; Z est le nombre des constantes de séchage dans le modèle; N est le numéro d'observation.

IV.2.3.5 Détermination de la diffusivité effective et l'énergie d'activation

Les méthodes de détermination de la diffusivité effective et l'énergie d'activation ont été examinées au chapitre II « Etude bibliographique sur les modèles de séchage des produits agroalimentaires ».

IV.2.4 Caractérisation physicochimiques de poudres obtenues

L'analyse physico-chimique est la façon la plus simple pour évaluer les aliments des ruminants. Dans notre étude elle est basée sur l'étude de la composition chimique de chaque sou produit. Ces analyses ont été effectuées au niveau du laboratoire de l'UDES et du laboratoire de Chimie de l'ONAB.

IV.2.4.1 Détermination de la matière sèche (MS)

La matière sèche (MS) constitue la partie d'un produit végétal qui reste une fois que l'eau en a été totalement extraite. Elle est déterminée par séchage dans une étuve maintenue à 105°C jusqu'à ce que le poids soit constant [228]. La différence de poids correspond à la perte d'humidité et le déchet distingue la teneur en matière sèche de l'échantillon.

a) Matériel utilisé:

- Etuve réglée à 105°C.
- Boites Pétri en verre.
- Un dessiccateur muni d'un agent déshydratant.
- Une balance et une spatule.

b) Protocole opératoire:

Afin de déterminer le taux de la matière sèche, une quantité (5 à 10 g) des différentes poudres est pesée dans des boites de Pétri préalablement séchées et tarées, elles sont par la suite placées dans une étuve maintenue pendant 24 heures à 105°C jusqu'au poids constant.

Après 24 h, les boites sont mises dans un dessiccateur pendant au moins une demi-heure pour refroidir dans une atmosphère sèche.

IV.2.4.2 Détermination de la matière organique et de la matière minérale

La matière minérale (MM) représente la partie d'un produit végétal qui reste une fois que la matière organique (MO) en a été totalement extraite. Elle est déterminée par incinération à 550°C, la matière organique se consume et la matière résiduelle constitue la matière minérale [228].

a) Matériel utilisé:

- Four à moufle
- Creusets en porcelaine.
- Balance de précision et une spatule
- Un dessiccateur muni d'un agent déshydratant.

b) Protocole opératoire:

Une quantité (0.5-1.0 g) de la matière sèche déjà obtenue est pesée dans un creuset en porcelaine préalablement taré, celui ci est ensuite mis dans un four à moufle 550°C pendant 12 à 18 h. Nous le laissons refroidir à l'intérieur du four avant de le mettre dans le dessiccateur pendant au moins une demi-heure. Le résidu obtenu représente les cendres qui, par différence, donne la matière organique présente dans l'échantillon.

$$MO\% = \frac{(M_1 - M_2)}{P} \times 100 \qquad \text{(IV.11)}$$

Soit *MO* est la matière organique en (%), M_1 est la masse des creusets + prise d'essai, M_2 est la masse des creusets + cendres. *P* est la masse de la prise d'essai. La teneur en cendres (*Cd*) est calculée comme suit : *Cd = 100 - MO %*

IV.2.4.3 Détermination de la matière azotée totale (protéine brute)

L'azote total contenu dans les substrats et celui lié à la fraction pariétale est dosé en suivant la méthode de Kjeldahl qui comporte deux étapes: la minéralisation et la distillation (figure IV.8).

a) Matériel utilisé:

- Kjeltec 2400 FOSS : unité de distillation et de titration munie d'un passeur automatique
- Balance analytique à 10^{-4} g
- Unité de minéralisation
- Tubes de minéralisation de 250 ml et portoirs
- Distributeur d'acide sulfurique réglé sur 12 ml

b) Réactifs utilisés:

- Acide sulfurique (H_2SO_4) pur ;
- Catalyseur (sulfate de cuivre + sulfate de potassium) ;
- Acide borique à 4 % ;
- Indicateur coloré (mélange de bleu méthylène et rouge méthylène) ;
- La soude (NaOH) 4N ;
- Acide sulfurique (H_2SO_4) à 0.05 N pour la titration.

c) Protocole opératoire:

La minéralisation comporte les étapes suivantes :

- Introduire dans un matras de minéralisation, (5ml) d'échantillon ;
- Ajouter une pince de catalyseur ;
- Ajouter 20 à 25 ml d'acide sulfurique pur ;
- Utiliser un chauffage progressif, d'abord une attaque au froid pendant 15 min jusqu'à apparition de vapeur blanche d'anhydride sulfurique, puis le chauffage est rendu plus énergique (attaque à chaud) pendant 4 à 5 heures ;
- Après décoloration complète, la solution est refroidie et complétée à 100 ml avec l'eau distillée ;
- Filtrer la solution minéralisée dans des fioles à l'aide du papier filtre.

La distillation comporte les étapes suivantes :

- Prélever 20 ml de la solution minéralisée ;
- Ajouter 20 ml de soude, ensuite distiller ;
- Le dégagement d'ammoniac est récupéré dans une solution d'acide ; borique contenant l'indicateur coloré ;
- L'excès d'ammoniac est dosé par l'acide sulfurique 0,05 N.

La teneur en protéines brutes du produit est obtenue en multipliant la valeur obtenue lors de la détermination de la teneur en azote par le facteur 6,25 dans le cas des aliments pour animaux : *% protéines brute = % N × 6,25* [229].

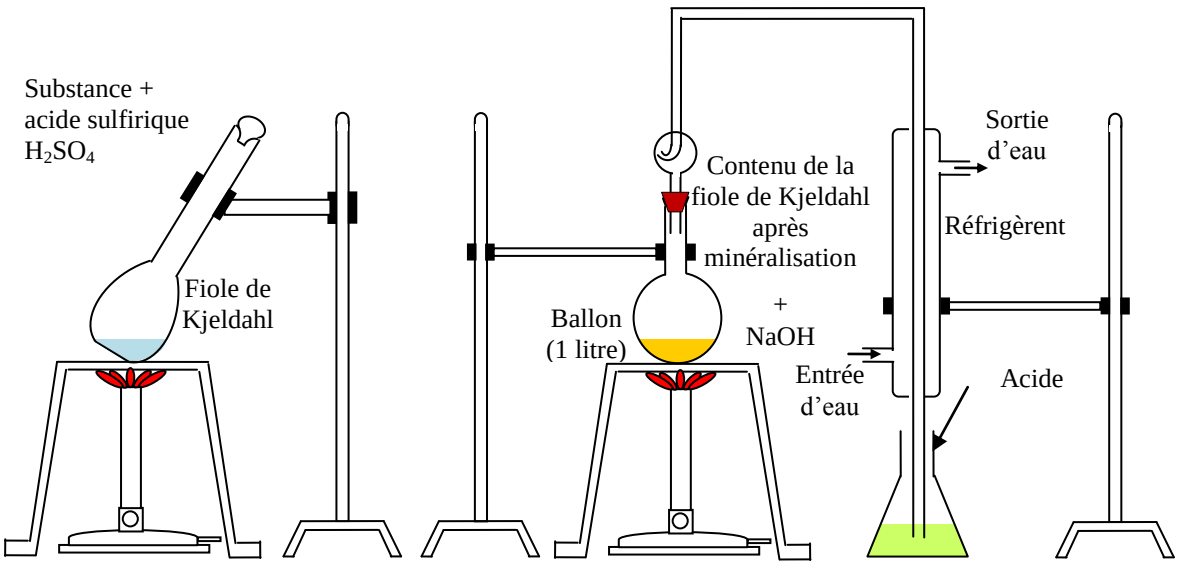


Figure IV.8 : *Schéma de Principe de la méthode de Kjeldahl.*

IV.2.4.4 Détermination de la teneur en matière grasse

La détermination quantitative de la teneur en matières grasses d'un échantillon s'effectue généralement par extraction. La méthode d'extraction la plus répandue est l'extraction solide-liquide. L'échantillon préparé est extrait avec le solvant. Après l'extraction, le solvant est éliminé par distillation et le résidu séché est pesé. La teneur en matières grasses libres correspond à la différence entre les poids initiaux et finaux.

Une extraction complète dans le reflux du solvant distillé, conformément à la méthode classique de Soxhlet, prend beaucoup de temps et nécessite plusieurs heures. Le chimiste américain Randall a ajouté à cette méthode une phase d'extraction dans laquelle la cartouche d'extraction contenant l'échantillon est immergée directement dans le solvant chaud et il a ainsi réussi à raccourcir la durée d'extraction à moins d'une heure [230].

a) Appareillage

Les systèmes automatiques d'extraction rapide SOXTHERM® (figure IV.9) réalisent l'extraction dans un procédé combiné à 5 niveaux et combinent les avantages de l'extraction à chaud à ceux du procédé Soxhlet traditionnel et de la méthode Twisselmann. Il est rapide, souple et aisément adaptable à une charge accrue d'analyses. Il garantit, pour longtemps, des résultats fiables grâce à une technologie éprouvée. L'appareil fonctionne entièrement automatiquement, et peut être utilisé en routine sans surveillance. Mettre en place les béchers d'extraction et les laisser tout simplement travailler Le logiciel de commande contrôle et consigne toutes les données du processus et de l'appareil.

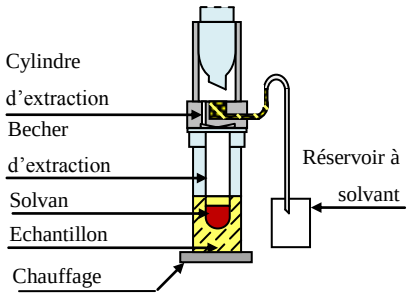
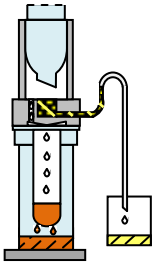
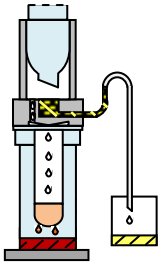
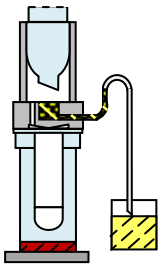
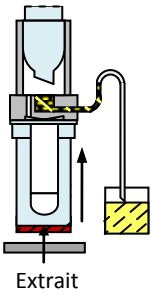


Figure IV.9 : *Les systèmes automatiques d'extraction rapide SOXTHERM®*

b) Protocole opératoire

L'extraction se déroule en 5 étapes programmables (tableau IV.3), ce qui garantit une manipulation en douceur des échantillons. La méthode brevetée est entièrement automatique et est particulièrement adaptée à la détermination des matières grasses.

Tableau IV.3 : *Les phases d'extraction automatiques SOXTHERM® de la détermination quantitative de la teneur en matières grasses.*

Phase 1	Extraction par immersion de l'échantillon dans le solvant chaud	
Phase 2	Le niveau de solvant est abaissé jusqu'à obtention d'une séparation claire entre le solvant et la cartouche d'extraction. Le distillat est récupéré dans un réservoir collecteur.	
Phase 3	L'échantillon est extrait par flux de solvant évaporé et condensé provenant du refroidisseur.	
Phase 4	La majeure partie du solvant est distillée et récupérée	
Phase 5	Les béchers d'extraction sont relevés de la plaque chauffante. Une nouvelle évaporation préservant les échantillons a lieu.	

IV.2.4.5 Détermination de la Cellulose brute

Résidu organique disposé après une double hydrolyse exécutée successivement avec une solution acide et une solution basique. C'est une appréciation par excès de la cellulose, car le résidu comporte aussi une fraction variable de la lignine et des hémicelluloses [231].

a) Matériel utilisé :

- Balance analytique à 0.1 mg de précision
- Creusets filtrants en verre robuste de 50 ml, avec un filtre en verre fritté de porosité 40-100 µm. Avant la première utilisation, chauffer prudemment et graduellement le nouveau creuset filtrant pendant quelques minutes à 500°C. Refroidir.
- Capsules d'incinération (en quartz).
- Etuve électrique chauffée et ventilée, capable de maintenir une température de 130°C.
- Dessiccateur contenant du silicagel.

b) Réactifs utilisés:

- Eau déminéralisée (R144)
- HCl 0.5 M D006 (pour un litre : 50 ml de HCl R013 + 950 ml d'eau R144)
- Acide sulfurique 0.13 mol/l (R438)
- Solution d'hydroxyde de potassium 0,23 mol/l (R443)
- Acétone (R0076)
- Adjuvant de filtration (Célite 545 ou équivalent) (R010)
- Antimousse (n-octanol) (R009)
- Ether de pétrole (point d'ébullition 40-60°C) (R012)

c) Protocole opératoire

1g de l'échantillon séché et broyé peser à 0.1 mg près est transférer au creuset filtrant en ajoutant 2g de Celite. L'échantillon (les poudres) est éventuellement décarbonaté, dégraissé et traité successivement par des solutions bouillantes d'acide sulfurique et d'hydroxyde de potassium de concentrations déterminées. Le résidu est séparé par filtration sur un filtre en verre, lavé, séché, pesé puis calciné à 500°C. La perte de poids résultant de la calcination correspond à la cellulose brute présente dans l'échantillon d'essai [232].

IV.2.4.6 Détermination de la teneur en calcium

Le calcium est le composant principal des os et des dents qui contiennent 99% % du calcium corporel. Non seulement cela est nécessaire pour l'intégrité du squelette, mais le calcium interfère avec de multiples processus vitaux, par exemple: la mauvaise régulation du contenu plasmatique en calcium se traduit par des difficultés de l'excitabilité neuromusculaire.

Le calcium contenu dans les cendres des poudres est dosé en suivant la méthode de dosage TITRIMETRIQUE. Elle permet de déterminer la teneur totale en calcium dans les aliments pour animaux.

Les cendres sont traitées avec de l'acide chlorhydrique et le calcium est précipité sous forme d'oxalate de calcium. Après dissolution de la substance précipitée dans de l'acide sulfurique, l'acide oxalique formé par une solution de permanganate de potassium est titré [231].

a) Matériel utilisé:

- Balance analytique
- Bécher
- Fiole jaugée
- Burette graduée
- Creuset filtrant G4
- Agitateur Magnétique
- Pipette jaugée

b) Réactifs utilisés:

- Acide chlorhydrique à 30%
- Acide nitrique d=1,40
- Acide sulfurique à 20% d=1,13
- Ammoniaque d=0,98
- Solution saturée à froid d'oxalate d'ammonium.
- Solution à 30% (p/v) d'acide citrique
- Solution à 5 % (p/v) de chlorure d'ammonium.
- Solution à 0,04 % (p/v) de vert de bromocrésol
- Solution de permanganate de potassium 0,1 N

c) Protocole opératoire

- Placer 1 mg de cendres dans un bécher de 250 ml. Ajoutez 40 ml d'acide chlorhydrique, 60 ml d'eau et quelques gouttes d'acide nitrique. Faire bouillir le mélange et maintenez pendant 30 minutes. Refroidir, placer la solution dans une fiole jaugée de 250 ml, compléter le volume jusqu'au trait de jauge avec de l'eau, mélanger et filtrer.
- À l'aide d'une pipette jaugée, prélever 10 ml du filtrat et insérer-le dans un bécher de 250 ml. Ajouter 1 ml de solution d'acide citrique et 5 ml de solution de chlorure d'ammonium. Remplissez le volume à environ 100 ml avec de l'eau. Faire bouillir le mélange et ajoutez

8 à 10 gouttes de solution de vert de bromocrésol et 30 ml de solution chaude d'oxalate d'ammonium. Si un précipité apparaît, dissolvez-le en ajoutant quelques gouttes d'acide chlorhydrique.

- Neutraliser très lentement avec de l'ammoniac, sous agitation constante, jusqu'à l'obtention d'un pH d'environ 4,4 à 4,6 (Figure IV.10). Placer le bécher dans un bain d'eau bouillante, maintenir-le pendant 30 minutes pour laisser déposer le précipité formé. Retirer le bécher du bain Marie. Laisser reposer pendant une heure et filtrer dans un filtre à creuset G4.
- Rincer le verre et le creuset avec 150 ml d'eau chaude jusqu'à ce que l'excès d'oxalate d'ammonium soit éliminé. Placer le creuset dans un bécher de 250 ml, ajoutez 80 ml de solution d'acide sulfurique chaude et laisser bouillir pendant 20 minutes.
- Titrer goutte à goutte par la solution de permanganate de potassium jusqu'à obtention d'une couleur rose stable pendant 1 minute [231].

La teneur en Calcium exprimée en g/kg d'échantillon = (20, 04. V. C) /m. (250/V')

Où *V : Volume en ml de la solution titrée de permanganate de potassium utilisé pour le titrage.*

C : Concentration de la solution titrée de permanganate de potassium.

m : masse de la prise d'essai en g.

V' : volume en ml de la partie aliquote prélevée.

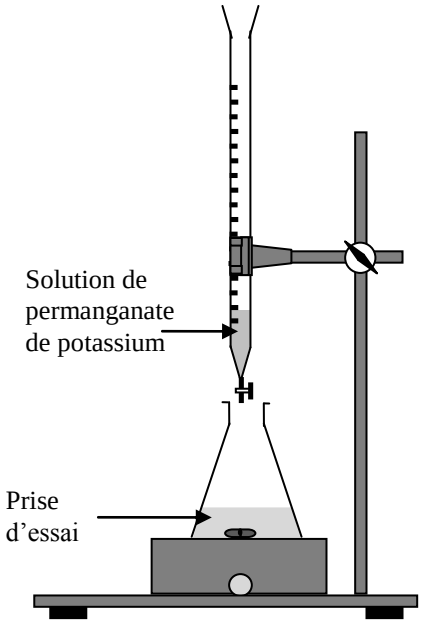


Figure IV.10 : *Schéma de Principe de la méthode de dosage TITRIMETRIQUE*

IV.2.5 Caractérisation microbiologiques

L'analyse de la qualité hygiénique se base sur la connaissance de la flore microbienne existante dans le produit alimentaire. Le développement de la recherche dans ce secteur est nécessaire pour mieux protéger la santé animale en contrôlant la conformité des aliments aux réglementations applicables.

Les analyses microbiologiques ont été réalisées conformément aux prescriptions de l'organisation internationale de normalisation (ISO). La solution mère a été obtenue selon la méthode ISO. Les différentes poudres obtenues (10 ou 25 g) ont été homogénéisés avec de l'eau de peptone (90 ml) puis dilués avec une solution Ringer 1/4 (de 10E-1 à 10E-6). Les dilutions ont été par la suite ensemencées sur différents milieux de culture pour évaluer le niveau de contamination des produits par les germes indésirables suivants : germes aérobies à 30 °C, Salmonella, levures et moisissures et Escherichia coli.

IV.2.5.1 Détermination des germes aérobies à 30°C

L'ISO 4833-1 [233] spécifie une méthode horizontale de dénombrement des micro-organismes capables de se développer et de former des colonies dans un milieu solide après incubation aérobie. La méthode est applicable :

- aux produits destinés à la consommation humaine et aux aliments pour animaux;
- aux échantillons d'environnement dans le domaine de la production d'aliments destinés à l'homme ou aux animaux et de la préparation des aliments.

Protocole opératoire

Une quantité spécifiée de la solution mère est distribuée dans une boîte de Pétri vide et mélangée à un milieu de culture spécifié en gélose fondue pour former une plaque versée. D'autres plaques sont préparées dans les mêmes conditions en utilisant des dilutions décimales de l'échantillon à tester ou de la suspension initiale. Les plaques sont incubées dans des conditions aérobies à 30°C pendant 72 h. Le nombre de micro-organismes par gramme ou par millilitre de l'échantillon à tester est calculé à partir du nombre de colonies obtenues dans des boîtes contenant moins de 300 colonies.

IV.2.5.2 Détermination de Salmonella

L'ISO 6579-1 [234] spécifie une méthode horizontale pour la détection de Salmonella dans les aliments (y compris le lait et les produits laitiers, décrits à l'origine dans l'ISO 6785), dans les aliments pour animaux, dans les excréments d'animaux et dans des échantillons

environnementaux du stade de la production primaire. Avec cette méthode horizontale, la plupart des sérovars de Salmonella doivent être détectés.

Protocole opératoire

La méthode a consisté à ajouter à la prise d'essai de la solution mère de l'eau peptone tamponnée. Ainsi, le mélange obtenu a été considéré comme le pré-enrichissement qui a été incubé à 37°C ± 1°C dans une étuve pendant 24 h. Ensuite, un millilitre du mélange pré-enrichi a été incubé dans 9 ml de Rapaport-Vassiladis et incubé à 37°C ± 1 °C dans une étuve pendant 24 h. Le mélange ainsi obtenu a été incubé à 37°C ± 1 °C pendant 24 h sur la gélose HEKTOEN. Les colonies suspectes (incolores ou incolores centre noir) ont été isolées à nouveau sur la gélose KLIGER (Hajna). L'identification a été réalisée à l'aide de la Xylose Lysine Décarboxylase (XLD) et de la gélose Triple Sugar Iron (TSI). Le test de l'uréase a été fait pour confirmer les Salmonella, sachant que Salmonella est uréase négative. Enfin, Les colonies de salmonelles présumées sont sous-cultivées et leur identité est confirmée par des tests biochimiques et sérologiques appropriés

IV.2.5.3 Dénombrement des levures et des moisissures

Le développement des levures et des moisissures dans les produits alimentaires cause l'altération de leurs qualités, par formation de trouble et apparition d'odeur désagréable. L'altération provoquée par les moisissures conduit à une modification de la qualité nutritionnelle et de la qualité organoleptique. Certaines moisissures arrivent même à produire des toxines.

L'ISO 21527-2 [235] spécifie une méthode horizontale de dénombrement des levures osmophiles viables et des moisissures xérophiles dans les produits destinés à la consommation humaine ou à l'alimentation des animaux déshydratés (fruits secs, gâteaux, confitures, viande séchée, etc.) ou poisson salé, céréales, produits céréaliers, farines, noix, épices et condiments, etc. au moyen de la technique de dénombrement des colonies à 25°C.

Protocole opératoire

Les plaques inoculées en surface sont préparées en utilisant un milieu de culture sélectif spécifié. En fonction du nombre attendu de colonies, une quantité spécifiée de la solution mère est utilisée. Des plaques supplémentaires peuvent être préparées dans les mêmes conditions, en utilisant de 0.1 ml de la solution mère. Les plaques sont ensuite incubées en aérobiose à 25°C-1°C pendant 5 à 7 jours, si nécessaire, les laissez à la lumière du jour pendant 1 à 2 jours.

Les colonies/propagules sont ensuite comptées et, si nécessaire (pour distinguer les colonies de levures des colonies bactériennes), l'identité de toutes les colonies douteuses est confirmée par un examen à la loupe binoculaire ou au microscope.

Le nombre de levures et de moisissures par gramme ou par millilitre d'échantillon est calculé à partir du nombre de colonies/propagules/germes obtenu sur des plaques choisies à des niveaux de dilution donnant des colonies dénombrables. Les moisissures et les levures sont comptées séparément, si nécessaire.

IV.2.5.4 Détermination d'Escherichia coli

NFV 08-060 [236] décrit une méthode pour le dénombrement des coliformes thermo tolérants tels qu'Escherichia coli, dans tous les produits destinés à la consommation humaine ou à l'alimentation animale, par comptage des colonies en milieu solide après incubation à 44°C. Il faut noter que le groupe des coliformes thermo tolérants contient une grande diversité d'espèces d'entérobactéries présentes dans de nombreux écosystèmes. C'est pourquoi leur présence dans les denrées alimentaires ne peut en aucun cas être uniquement imputable à une contamination d'origine fécale.

Protocole opératoire

On met en suspension 38.5 g de la poudre dans 1 litre d'eau distillée ou déminéralisée, puis on porte lentement le substrat à ébullition sous agitation constante et on le maintient durant le temps nécessaire à sa dissolution (ne pas surchauffer et ne pas autoclaver).

On additionne de MUG (4-méthyl-umbelliféryl-ß-D-glucuronide) afin de détecter *Escherichia coli.* Ensuite, nous suivons les étapes suivantes :

- Refroidir et maintenir le milieu à 44-47°C.
- Transférer 1 ml du produit à analyser et de ses dilutions décimales dans des boîtes de Pétri stériles.
- Couler 12 ml de gélose.
- Homogénéiser parfaitement.
- Laisser solidifier sur une surface froide.
- Couler à nouveau 4 ml de milieu, de façon à former une deuxième couche.
- Laisser solidifier puis incuber à 44°C.

IV.2.6 Caractérisation microscopique de poudres obtenues

La microscopie est de plus en plus utilisée pour étudier l'influence des processus de transformation et des ingrédients sur la structure des aliments et ce n'est qu'au cours des dernières décennies que le potentiel de la microscopie électronique (EM) a été pleinement reconnu [237]. Les développements récents dans ces domaines ont changé notre compréhension des structures alimentaires, mais également des types d'informations que l'on peut maintenant espérer obtenir au sujet de la structure. L'imagerie tridimensionnelle, l'intervention minimale sur des échantillons et la microscopie in situ pour les études dynamiques, associées à une plus grande appréciation du pouvoir de l'analyse d'images pour obtenir des informations quantitatives à partir d'images microscopiques, sont de plus en plus courantes [238,239].

La microscopie électronique à balayage (MEB) est un outil très utile pour visualiser la structure des aliments car, il combine à bien des égards les meilleures caractéristiques de la microscopie optique (LM) et de la microscopie électronique à transmission (TEM) [240].

Il existe plusieurs excellents examens des applications du SEM aux études sur les aliments, notamment des livres de Holcomb et Kalab, ainsi qu'une partie d'Aguilera et Stanley [241]. En plus de ceux-ci, des articles résumant les applications de MEB [242,243] et de cryo-MEB [244] constituent une introduction intéressante aux aspects de la structure des aliments pouvant être révélés par ces techniques.

Ces dernières années, l'étude de la microstructure des aliments a pris une importance croissante; la structure des aliments peut avoir une profonde influence sur sa valeur nutritionnelle, sa rhéologie et ses attributs texturaux. Le traitement des produits alimentaires, tels que les procédés thermiques et non thermiques, peut être considéré comme modifiant la structure naturelle et la composition des produits alimentaires [245]. Cependant, le traitement thermique, en particulier dans des conditions difficiles, peut entraîner des modifications chimiques et physiques qui altèrent les propriétés organoleptiques et réduisent le contenu ou la biodisponibilité de certains nutriments.

a) Principe

Dans cette méthode, les faisceaux d'électrons sont utilisés pour observer le spécimen plutôt que la lumière et par conséquent une préparation est nécessaire pour les matériaux biologiques. Cette préparation est beaucoup plus compliquée que celle requise pour la microscopie optique.

En MEB, l'image est formée étape par étape avec balayage d'un faisceau d'électrons focalisé à travers l'échantillon. Les électrons primaires pénètrent dans l'échantillon solide et sont déviés par un grand nombre de processus de diffusion élastique. Différents signaux sont générés en tant que résultats de l'impact des électrons incidents qui ont été collectés pour former une image ou analyser la surface de l'échantillon (figure IV.11). La microscopie électronique à balayage permet d'atteindre des grossissements allant jusqu'à 10000 fois, avec une profondeur de champ importante, ce qui permet l'observation d'échantillons rugueux.

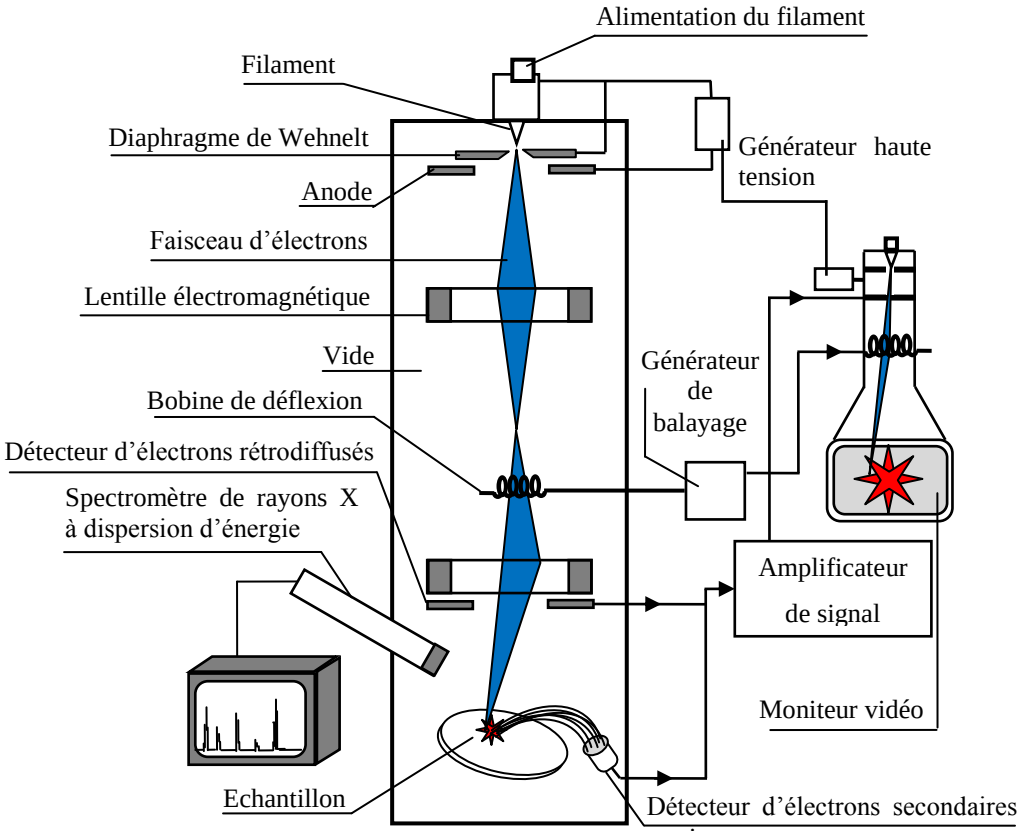


Figure IV.11 : *Schéma de principe de fonctionnement du microscope électronique à balayage (MEB)*

b) Appareillage

L'examen de la morphologie des poudres des déchets séchés au soleil et dans le séchoir serre a été effectué au niveau de CRAPC à l'aide d'un microscope électronique à balayage couplée à la microanalyse X (MEB) QUANTA FEG 250 (figure IV.12). Le Quanta MEB-EDX est équipé de système analytique du spectre du rayonnement X qui permet la microanalyse des rayons X (spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie) EDS ou EDX pour *energy dispersive X-ray spectrometry.*

Le MEB-EDX quanta peut être utilisé en 3 différents modes de vide :

- High vacuum (< 6. 10-4 Pa) pour l'imagerie et la microanalyse des matériaux conducteurs et/ou les échantillons préparés ;
- Low vacuum (10 à 130 Pa) pour l'imagerie et la microanalyse des échantillons non conducteurs sans préparation ;
- Mode ESEM (10-2600 Pa) pour les échantillons qui sont incompatibles avec le très grand vide et qui sont impossibles à analyser avec les méthodes traditionnelles de microscopie électronique.



Figure IV.12 : *Microscope électronique à balayage (MEB) QUANTA FEG250*

c) Protocole opératoire

De petites quantités de chaque poudre des déchets agroalimentaires ont été déposées sur une bande adhésive à double face découpée à la dimension du porte échantillon et fixée sur celui-ci. La surface de Chaque échantillon de poudre est métallisée par dépôt d'une couche d'or dont l'épaisseur dépend du temps d'exposition et de l'intensité du courant de l'enceinte de dépôt, avant d'être numérisé et photographié à différent agrandissements allant de 400× jusqu'à 1600×.

IV.3 CONCLUSION

La préparation de trois sous produits agroalimentaires, déchets de pommes, de tomates et d'oranges. Ils ont été soumis à :

- Un séchage au soleil, ensuite un broyage et tamisage.
- Un séchage dans un nouveau séchoir serre solaire, ensuite un broyage et tamisage.

L'évaluation du nouveau séchoir par l'étude de la cinétique de séchage au soleil de trois déchets agroalimentaires et la comparée à la cinétique de séchage des mêmes déchets dans le nouveau séchoir solaire, pour déterminer la méthode optimale de séchage pour la valorisation des déchets issus de l'industrie de transformations alimentaires.

Seize modèles ont été évalués en utilisant le coefficient de corrélation (r^2) et le chi-quarré réduit (χ^2), afin de sélectionner le modèle qui correspond le mieux aux données expérimentales obtenues lors du processus de séchage pour les deux méthodes de séchage :

- Cinq nouveaux modèles universels sans dimensions.
- 11 modèles de la littérature.
- Une évaluation du modèle qui correspond le mieux aux données expérimentales a été réalisée avec des données expérimentales dans la littérature pour le valider.

Le coefficient de diffusion effective et l'énergie d'activation ont été étudiés.

La valorisation des déchets agroalimentaires issus de l'industrie de transformations comme substitut de céréales dans l'alimentation des ruminants dans cette étude a abouti à la caractérisation des six poudres obtenues, pour étudier l'effet de la méthode de séchage sur leurs propriétés physiques, chimiques, microbiologiques et morphologiques.

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 de ce chapitre présente les résultats obtenus concernant la cinétique du séchage des déchets de pommes, tomates et oranges au soleil et dans le séchoir serre solaire.

La deuxième partie est consacrée des résultats impressionnants concernant la modélisation des deux méthodes de séchages utilisées dans notre travail.

Finalement une partie présente les résultats des différentes analyses de caractérisation physicochimiques, microbiologiques et microscopique des poudres obtenues des trois déchets sèches par les deux méthodes de séchage, au soleil et dans le séchoir.

V.2 CARACTERISATION PHYSIQUE DU PRODUIT SECHE

La couleur est un attribut de qualité important du produit séché du point de vue du consommateur.

L'examen visuel de la couleur a montré que les déchets qui ont été séchés par les deux méthodes sont plus sombres par rapport aux sous produits frais. Entre les deux méthodes de séchage, les poudres obtenues par le séchage à l'air libre sont légèrement sombres que celles qui ont été obtenues par le séchage dans le séchoir serre solaire.

Le tableau V.1 montre les photos de déchets de tomates de pommes et d'orange en poudres obtenus par les deux méthodes du séchage.

Tableau V.1 : *Les photos des poudres de déchets de tomates de pommes et d'orange obtenues par le séchage à l'air libre et dans le séchoir serre solaire*

La poudre	**A l'air libre**	**Dans le séchoir serre**
Déchet de tomate		
Déchet de pomme		
Déchet d'orange		

V.3 CONDITIONS DE SECHAGE

Les essais de séchage des déchets agricoles à l'air libre et dans le séchoir solaire type serre ont été effectués pendant les journées 05, 06 et 07/11/2018.

V.3.1 Rayonnement solaire

La figure V.1 montre la variation du rayonnement solaire par heure pendant les 3 jours de l'expérience de séchage (jour/24 heures). On remarque que le rayonnement global suit une forme

de cloche, augmente depuis le lever du soleil jusqu'à atteindre une valeur maximale autour de midi. Il atteint jusqu'à 985 W/m² et puis diminue en fin de la journée.

Les courbes de rayonnement solaire des deux premiers jours du séchage présentent des fluctuations qui ont duré un peu plus de quatre heures (au environ de 11h00 jusqu'à 16h30), ceci est dû à cause d'un passage nuageux.

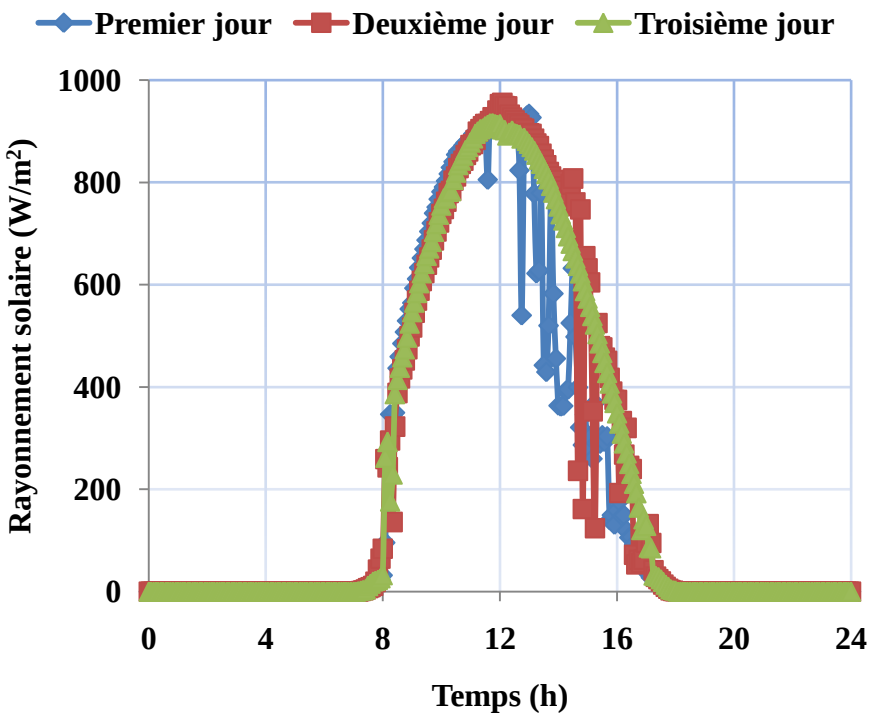


Figure V.1 : *Variation du rayonnement solaire en fonction du temps*

V.3.2 Profil de la température à travers le séchoir serre et à l'air libre

La figure V.2 montre l'évolution de la température en fonction du temps de séchage des différents lieus du séchoir serre solaire (au niveau de claie, l'entrée de l'air et le mur noir). Au début du processus, nous avons remarqué que la température dans le séchoir était basse. Cependant, avec le temps, elle devient acceptable. Selon la figure V.2, les températures sont plus élevées sur le mur noir et les températures les plus basses sont obtenues à l'entrée de la serre. De plus, nous avons constaté que le rythme des températures est identique à celui du rayonnement solaire.

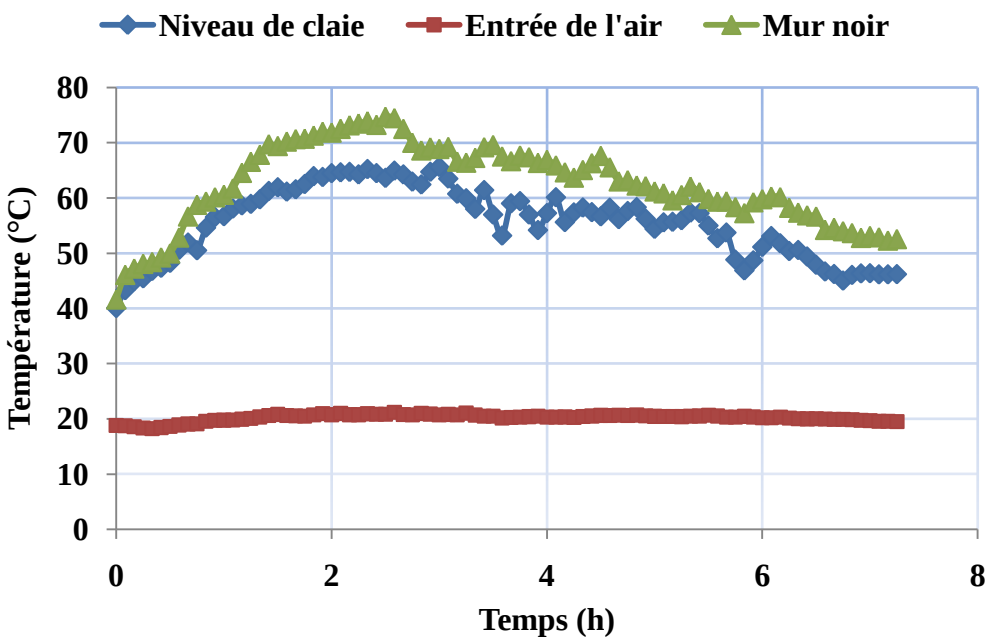


Figure V.2 : *Variation de la température dans le temps en 3 lieux de la serre*

La figure V.3 montre l'évolution de la température en fonction du temps à l'extérieure au niveau de la claie du séchage, pendant les trois jours du séchage des déchets à l'air libre.

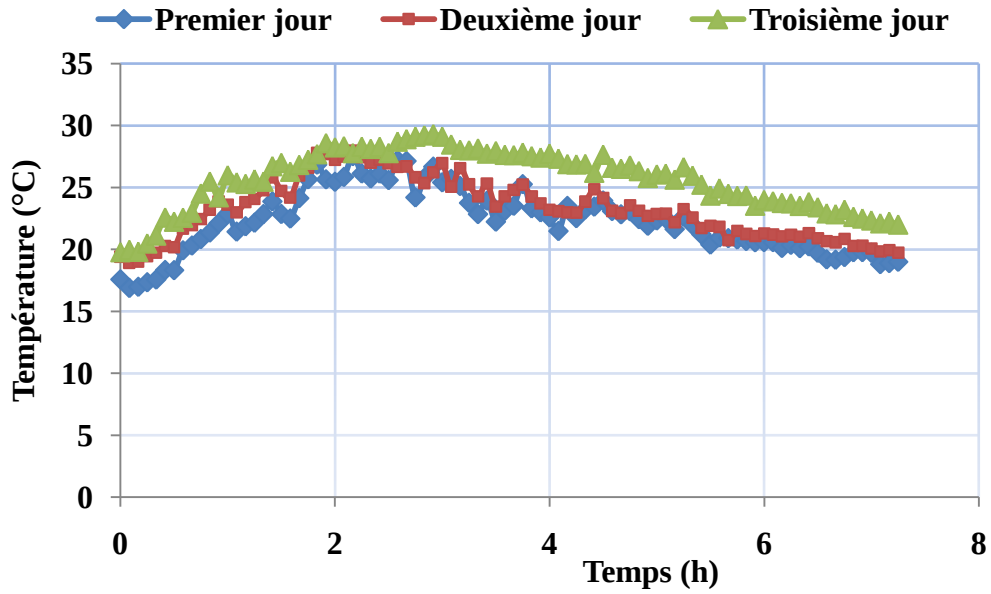


Figure V.3 : *Variation de la température dans le temps à l'extérieur pendent trois jours au niveau de claie du séchage à l'air libre*

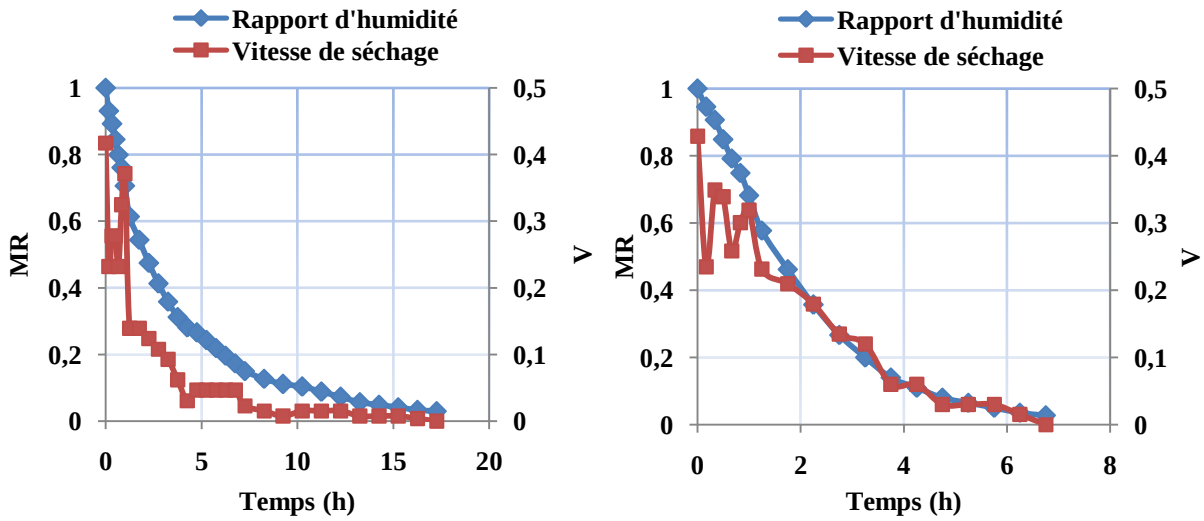
La température de l'air de séchage dans la serre atteint les 67°C au niveau de la claie, donc un écart avoisinant les 38°C par rapport à la température à l'extérieur, ce qui implique un bon rendement du séchoir.

V.3.3 Rapport d'humidité et la vitesse de séchage en fonction du temps

Le processus de séchage met en jeu deux transferts simultanés, transfert de chaleur et transfert de masse. Pour indiquer ces mouvements de transfert, il existe de nombreuses courbes typiques appelées « courbes de séchage ». Chaque produit présente une courbe de séchage illustrant ses caractéristiques de séchage dans des conditions spécifiques.

Les courbes expérimentales de séchage décrivant l'évolution du rapport d'humidité en fonction du temps de déchets de tomates séchés au soleil et dans le séchoir serre solaire *MR = f(t)* sont présentées aux figures V.4a et b respectivement. Le rapport d'humidité diminue en fonction du temps jusqu'à sa stabilisation, ce qui correspond aux déchets de tomates séchés dans le échoir serre solaire et au soleil**.** Au fur et à mesure que le temps de séchage augmente, le *MR* diminue, ce qui est analogue à la cinétique de séchage.

La teneur initiale en humidité des déchets de tomates, était de 86,23 et 85,68 %, à la fin du processus de séchage solaire, la teneur finale en humidité était de 14,66 et 15,24% pour les déchets de tomate séchés dans le séchoir serre et au soleil respectivement.

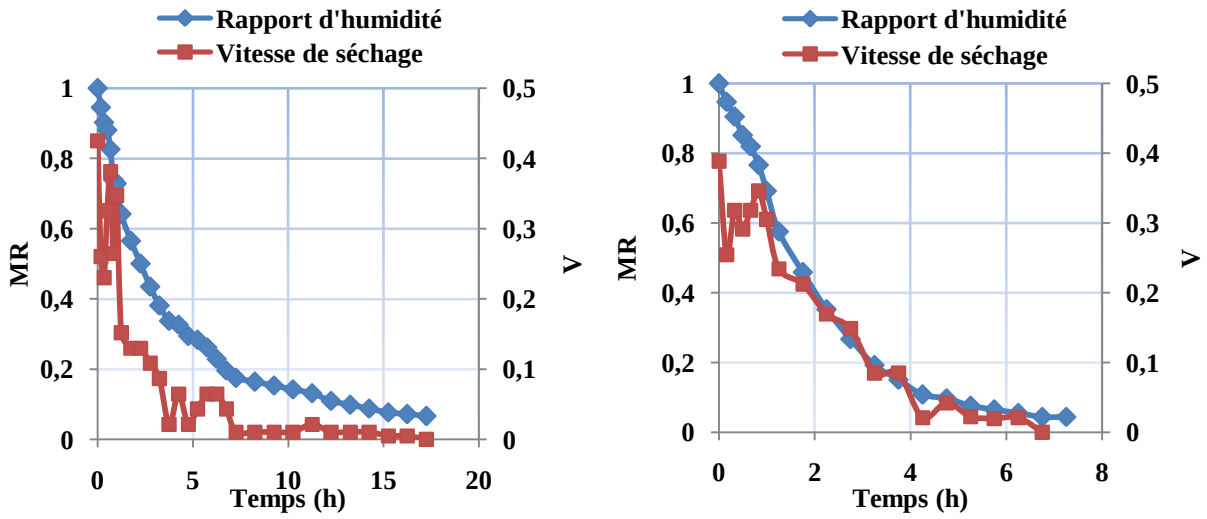


(a) Air libre *(b) Séchoir serre solaire*

Figure V.4 : *Variation du rapport d'humidité et de vitesse du séchage en fonction du temps (déchets de tomates)*

Les figures V.5a et b présentent les courbes expérimentales de séchage décrivant l'évolution du rapport d'humidité en fonction du temps de déchets de pommes séchés au soleil et dans le séchoir serre solaire respectivement. Le rapport d'humidité diminue en fonction du temps jusqu'à sa stabilisation.

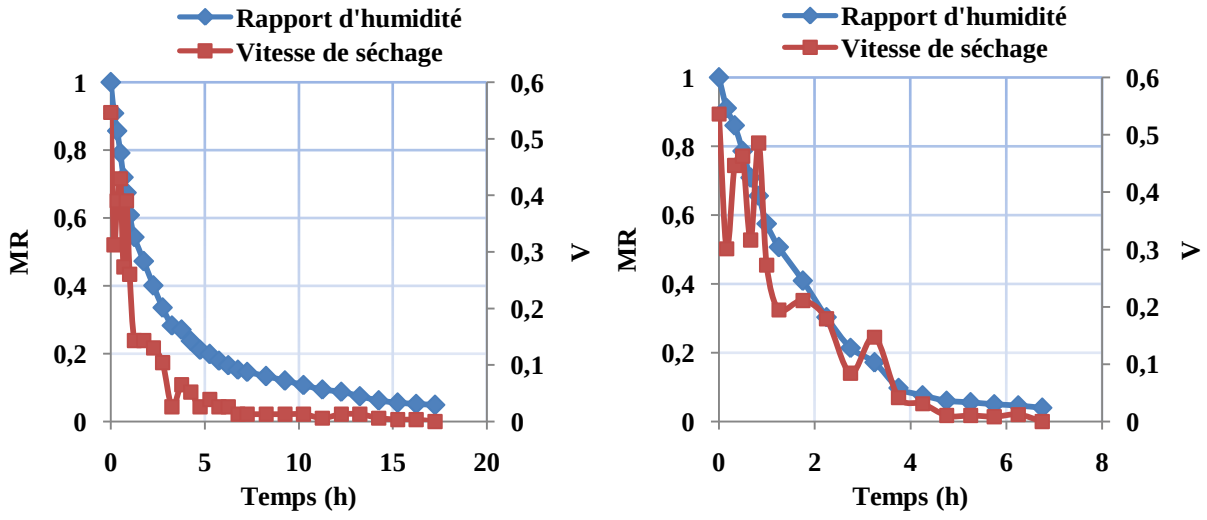
La teneur initiale en humidité des déchets de pommes, était de 74,3 et 74,15%, à la fin du processus de séchage solaire, la teneur finale en humidité était de 11,26 et 16,15% pour les déchets de pommes séchés dans le séchoir serre et au soleil respectivement.



(a) Air libre *(b) Séchoir serre solaire*

Figure V.5 : *Variation du rapport d'humidité et de vitesse du séchage en fonction du temps (déchets de Pommes)*

Les figures V.6a et b présentent les courbes expérimentales de séchage décrivant l'évolution du rapport d'humidité en fonction du temps de déchets d'oranges séchés au soleil et dans le séchoir serre solaire respectivement.



(a) Air libre *(b) Séchoir serre solaire*

Figure V.6 : *Variation du rapport d'humidité et de vitesse du séchage en fonction du temps (déchets d'Oranges)*

La teneur initiale en humidité des déchets d'oranges, était de 81,02 et 80,8%, à la fin du processus de séchage solaire, la teneur finale en humidité était de 14,58 et 17,06% pour les déchets d'oranges séchés dans le séchoir serre et au soleil respectivement.

Les courbes expérimentales de la vitesse de séchage en fonction du temps des deux méthodes de séchage *V = f(t)*, illustrées aux figures V.4, V.5 et V.6, ont été déterminées à partir de courbes de rapport d'humidité. Les courbes indiquent que la diminution de la vitesse de séchage est régulièrement parallèle à l'augmentation du temps de séchage ou à la diminution de la teneur en eau. Il convient de noter que la vitesse de séchage est très élevée au début du processus de séchage pour les deux méthodes du séchage.

Selon les courbes expérimentales de la vitesse, la cinétique de séchage des deux méthodes de séchage est caractérisée par l'absence de la phase de mise en température du produit (phase a) et la phase de séchage à allure constante (phase b) et par la présence de la phase de ralentissement (phase c). Ceci correspond aux résultats expérimentaux obtenus par certains auteurs pour le processus de séchage des divers produits végétaux [246-249]. Cette particularité est habituelle pour les produits biologiques, qui sèchent surtout à une vitesse de séchage décroissante. Cela s'explique par l'absence de l'eau libre à la surface du produit et aussi à la structure de ce dernier [250].

L'augmentation de la température augmente généralement la vitesse du séchage [210], en particulier au début de l'opération de séchage. Cependant, à la fin du processus, l'effet de ce paramètre est faible, la vitesse de séchage décroît lentement pour atteindre le point correspondant à l'équilibre du matériau avec les conditions extérieures. Ce qui s'explique par le fait que presque la toutes les molécules d'eau libres et liées ont été évaporées et reste que les molécules d'eau liées à la structure même du produit qui ne sont pas concernées par le processus de séchage.

On observe que le temps de séchage total pour les déchets de pommes, d'oranges et de tomates était de 7 heurs dans la serre alors que la durée de séchage au soleil était de 3 jours. Le séchoir serre solaire nécessite un temps de séchage plus court par rapport au séchage au soleil. En d'autres termes, le séchoir serre solaire entraine une diminution de la durée de séchage des déchets d'environ 65 heures. Cela peut être dû à deux raisons, premièrement une meilleure absorption de l'énergie solaire par le produit, car la plus grande partie de l'énergie solaire entrant dans la serers est piégée à l'intérieur, ce qui facilite son absorption, la surface noire libère son énergie au produit par chauffage.

Deuxièmement les ouvertures dans la serre facilitent l'élimination de l'humidité par la circulation naturelle de l'air atmosphérique. Cela indique explicitement que la vitesse de séchage des déchets dans le séchoir serre solaire sera supérieure à celle de l'expérience de séchage au soleil. Le temps du traitement est réduit indiquant que l'accélération du séchage dépend d'une part de l'augmentation de flux de chaleur apporte par l'air au produit et d'autre part de l'accélération de la migration interne de l'eau.

De ces résultats, la température semble bien être le paramètre le plus important en matière de séchage. En effet, la cinétique de séchage dépend fortement de la température.

De plus, la forme du produit affecte de plus en plus le comportement de la cinétique de séchage. La diminution de rapport d'humidité de séchage en fonction du temps est souvent interprétée par l'augmentation de la surface d'échange entre l'environnement externe et le produit.

V.3.4 Efficacité du séchoir

L'efficacité globale du séchoir serre solaire pendant la période expérimentale a été calculée et la valeur obtenue est de 61%. Cette efficacité a été jugée acceptable par rapport à celles trouvées dans la littérature [251,252]. Cela est dû au fait que le mur (face arrière), la base, les chariots et les plateaux sont peints en noir.

V.4 MODELISATION DE LA CINETIQUE DE SECHAGE

Actuellement, de nombreux chercheurs ont proposé des modèles mathématiques pour décrire le phénomène de variations du rapport d'humidité, de transfert de chaleur et de masse lors du séchage de couches minces. En théorie, il existe trois catégories de modèles mathématiques : théorique, semi-théorique et empirique [253,254].

Les modèles empiriques ont des caractéristiques similaires aux modèles semi-théoriques, mais ils sont plus simplistes. Ils s'appuient principalement sur les conditions expérimentales pour déterminer les paramètres de séchage et fournissent des informations limitées sur le comportement du produit au séchage [255]. La cinétique de séchage est souvent représentée par des modèles empiriques ou semi-empiriques, pour les fruits et légumes, par exemple, la tomate [256], la pomme de terre [221], la pistache [257], le raisin [258] et la banane [259].

V.4.1 Déchets de tomates

V.4.1.1 Séchage à l'air libre

Le tableau V.2 indique les valeurs résultantes des paramètres du modèle, le coefficient de corrélation (r^2) et le chi-carré réduit (χ^2) concernant le séchage des déchets de tomates à l'air libre. Pour obtenir un bon ajustement, les valeurs (r^2) doivent être les plus élevées et (χ^2) doivent être les plus basses [260,261].

Les résultats montrent que les données expérimentales correspondent remarquablement bien au nouveau modèle2, Two term et au Verma *al*., basés sur des valeurs élevées du coefficient de corrélation (r^2) soit : 0,99926, 0,99912 et 0,99909, respectivement et des valeurs faibles de l'erreur chi-carré réduit (χ^2) soit : 0,00009, 0,0001 et 0,0001, respectivement. Pour la plupart de ces modèles, les valeurs de r^2 étaient supérieures à 0,99, indiquant un bon ajustement. Le nouveau modèle2 donne des valeurs de (r^2), les plus élevés, et des valeurs de (χ^2), les plus basses par rapport aux autres modèles. Par conséquent, nous pouvons conclure que le nouveau modèle2 est le meilleur pour caractériser les données de séchage des déchets de tomates séchés au soleil.

La figure V.7 représente l'évaluation des variations du rapport d'humidité en fonction du temps de séchage avec le nouveau modèle2 le mieux adapté avec les données expérimentales de séchage au soleil des déchets de tomates.

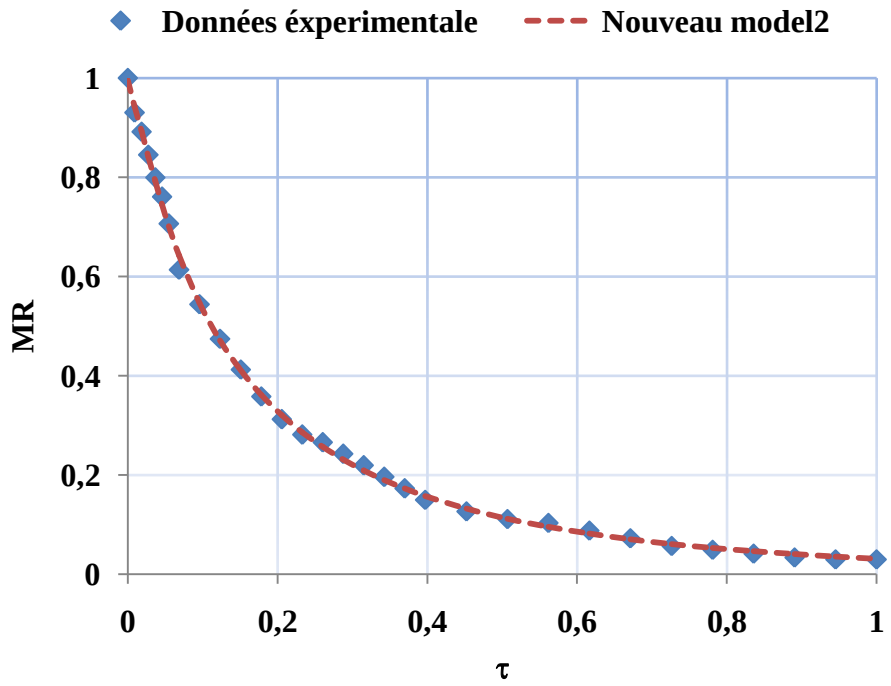


Figure V.7 : *Variation du rapport d'humidité avec le nouveau modèle2 pour le séchage des déchets de tomates à l'air libre*

Tableau V.2 : *Séchage des déchets tomates à l'air libre*

Modèles	**Paramètres des modèles**	r^2	χ^2
Nouveau modèle1	A_1= 0,23929, k_1= 0,15153, n= 0,53062, A_2= -0,33891, k_2= 1,61627, m= 1,70914	0,99839	0,00019
Nouveau modèle2	A_1= 1,01814, k_1= -0,00001, n= 0,80011, A_2= 0,15405, k_2= -23,6019, m= 0,60264, p= 0,15984	0,99926	0,00009
Nouveau modèle3	A_1= 1,0197, k_1= -7,41414, n= 0,97752	0,99773	0,00024
Nouveau modèle4	A_1= 2,7541, k_1= -2,4855E-8, n= -0,00002, k_2= -13,95181, m= 0,56046	0,99884	0,00013
Nouveau modèle5	A_1= 0,81405, k_1= 2,92, n= 2,71594, A_2= 0,44569, k_2= -107,61177, m= -0,13948	0,99657	0,00036
Page	k_1= 0,36354, n= 0,82289	0,99673	0,00033
Midilli-Kucuk	A_1= 1,02167, k_1= 0,38156, n= 0,82876, A_2= -0,00149	0,99799	0,00022
Logarithmic	A_1= 0,91958, k_1= 0,3275, A_2= 0,05513	0,99615	0,00040
Verma et al.	A_1=0,43687, k_1= 0,14614, A_2= 0,55318	0,99909	0,00010
Henderson and Pabis	A_1= 0,95002, k_1= 0,27137	0,98951	0,00106
Two term	A_1=0,55333, k_1= 0,5755, A_2= 0,45267, k_2=0,14897	0,99912	0,00010
Lewis	k_1= 0,2922	0,98585	0,00138
Wang and Singh	A_1=-0,17232, A_2= 0,00706	0,87974	0,01215
Approximation of diffusion	A_1= 49502353688,59039, k_1= 0,29103, A_2=1	0,98585	0,00148
Two term exponential	A_1= 0,27309, k_1= 0,79482	0,99699	0,00030
Modified Henderson and Pabis	A_1=0,31663, k_1= 0,27126, k_2=0,31663, A_2= 0,27126, k_3=0,31663, A_3= 0,27126	0,98951	0,00123

V.4.1.2 Séchage dans le séchoir serre solaire

Le tableau V.3 indique les valeurs résultantes des paramètres du modèle, le coefficient de corrélation et le chi-carré réduit concernant le séchage des déchets de tomates dans le séchoir serre solaire

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 modèles nouveau model2, Verma et al et Midilli-Kucuk sont les plus adaptés avec les données expérimentales de séchage des déchets de la tomate dans le séchoir serre solaire. Ces modèles

montrent les valeurs les plus élevées du coefficient de corrélation (r^2) soit : 0,9996, 0,99957 et 0,99956, respectivement et les valeurs les plus basses de l'erreur chi-carré réduit (χ^2) soit : 0,00008, 0,00006 et 0,00006, respectivement. Parmi ces modèles, le nouveau modèle2 est le mieux pour caractériser les données de séchage des déchets de tomates séchés dans le séchoir serre solaire.

Tableau V.3 : *Séchage des déchets de tomates dans le séchoir serre solaire*

Modèles	**Paramètres des modèles**	$\mathbf{r^2}$	$\boldsymbol{\chi^2}$
Nouveau modèle1	A_1= 0,05938, k_1= 7,20688, n= 0,93791, A_2= 0,03378, k_2= 5,54516, m= 6,74082	0,99914	0,00015
Nouveau modèle2	A_1= 1,02394, k_1= 1,73936, n= 1,54769, A_2= 0,09957, k_2= -10,5882, m= 0,60759, p=0,27029	0,9996	0,00008
Nouveau modèle3	A_1= 1,02644, k_1= -0,50126, n= 1,98868	0,99716	0,00041
Nouveau modèle4	A_1= 2,78864, k_1= 0,45743, n= 3,82746, k_2= - 0,08275, m= -14,26611	0,99827	0,00028
Nouveau modèle5	A_1= 0,89576, k_1= 2,23077, n= 1,71846, A_2= 0,27487, k_2= -25,2221, m= -0,78895	0,99841	0,00019
Page	k_1= 0,39103, n= 1,1998	0,99939	0,00008
Midilli-Kucuk	A_1= 0,99749, k_1= 0,38911, n= 1,23094, A_2= 0,00204	0,99956	0,00006
Logarithmic	A_1= 1,08556, k_1= 0,43916, A_2= -0,04258	0,99671	0,00048
Verma et al.	A_1= 1,31811, k_1= 0,58134, A_2= 1,68027	0,99957	0,00006
Henderson and Pabis	A_1= 1,0564, k_1= 0,48832	0,99518	0,00066
Two term	A_1= 0,5282, k_1= 0,48834, A_2= 0,5282, k_2= 0,4883	0,99518	0,00074
Lewis	k_1= 0,45558	0,99094	0,00117
Wang and Singh	A_1= -0,33803, A_2= 0,02903	0,99504	0,00068
Approximation of diffusion	A_1= -1,0737E12, k_1= 0,27367, A_2= 1	0,00065	0,99549
Two term exponential	A_1= 1,75969, k_1= 0,64434	0,99946	0,00007
Modified Henderson and Pabis	A_1= 0,35204, k_1= 0,48832, k_2= 0,35217, A_2= 0,48832, k_3= 0,35219, A_3= 0,48832,	0,99518	0,00085

Parmi les nouveau modèles proposés, on remarque que le nouveau modèle1 et le nouveau modèle2 sont les modèles les plus adaptés avec les données expérimentales de séchage des déchets de la tomate dans le séchoir serre solaire. La variation du rapport d'humidité prévue des deux nouveaux modèles par rapport au rapport d'humidité expérimentale est illustrée à la

figure V.8. Toutes les donnés des deux nouveaux modèles autour de la droite indiquent un bon accord entre la valeur de taux d'humidité expérimentale et prévue.

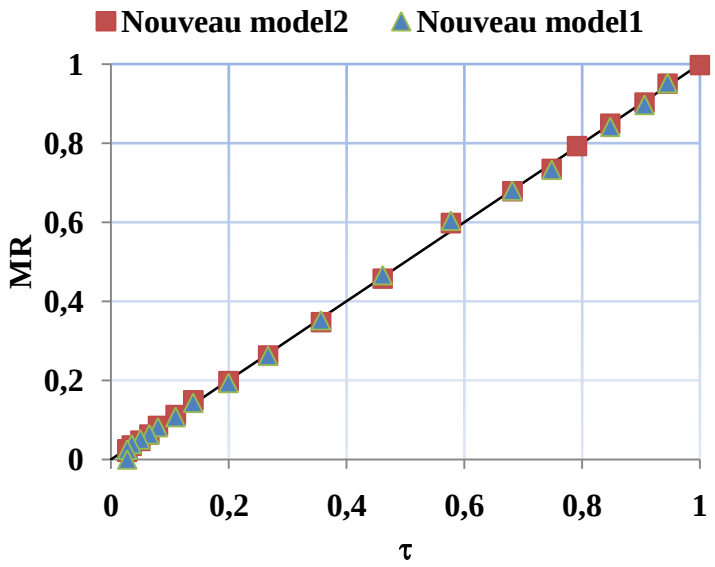


Figure V.8 : *Variation du rapport d'humidité prévue des deux nouveaux modèles avec le rapport d'humidité expérimentale*

Pour la comparaison, nous avons utilisé une installation linéaire des deux nouveaux modèles ; équation en ligne droite :

$$MR_{pre} = A^* MR_{exp} + B \quad (V.1)$$

Quand A=1 and B=0 nous aurons un match parfait entre expérimental et prédit MR.

$$MR_{pre} = MR_{exp} \quad (V.2)$$

Le coefficient de corrélation, l'erreur absolue moyenne et les deux constantes A et B sont présentés dans le tableau V.4.

La comparaison des résultats des deux nouveaux modèles montre que l'équation du nouveau modèle2 correspond le mieux, en prenant en compte le coefficient de corrélation (r^2) et les deux constantes A et B.

Tableau V.4 : *Comparaison entre les deux meilleurs nouveaux model*

Modèles	***A***	***B***	r^2	***RMSE* (%)**
Nouveau modèle1	1,0038	-0,0031	0,9991	1,0289
Nouveau modèle2	1,0004	-0,0004	0,9996	0,7053

V.4.2 Déchets de Pommes

V.4.2.1 Séchage à l'air libre

Les résultats des paramètres du modèle, le coefficient de corrélation et le chi-carré réduit concernant le séchage des déchets de pommes à l'air libre sont présentées dans le tableau V.5.

Tableau V.5 : *Séchage des déchets de la pomme à l'air libre*

Modèles	**Paramètres des modèles**	r^2	χ^2
Nouveau modèle1	A_1= 0,21722, k_1= 0,05163, n= 0,22517, A_2= -0,52015, k_2= 1,53331, m= 2,19149	0,99612	0,00043
Nouveau modèle2	A_1= 1,00089, k_1= -0,2937, n= 1,07129, A_2= 0,04333, k_2= -23,0509, m= 0,50783, p= 0,15363	0,99867	0,00015
Nouveau modèle3	A_1= 1,0377, k_1= -10,8934, n= 0,74305	0,9928	0,00071
Nouveau modèle4	A_1= 2,55736, k_1= 0,04856, n= 88,5128, k_2= 2,4973E-9, m= 0,0003	0,9772	0,00243
Nouveau modèle5	A_1= 0,80608, k_1= 2,92, n= 2,874, A_2= 0,46622, k_2= -273,228, m= -0,15653	0,99558	0,00043
Page	k_1= 0,3429, n= 0,7439	0,98932	0,00096
Midilli-Kucuk	A_1= 1,03127, k_1= 0,36069, n= 0,80306, A_2= 0,00447	0,9963	0,00036
Logarithmic	A_1= 0,86868, k_1= 0,32714, A_2= 0,11574	0,99505	0,00046
Verma et al.	A_1= 0,3373, k_1= 0,07536, A_2= 0,46935	0,99809	1,8E-4
Henderson and Pabis	A_1= 0,92959, k_1= 0,21461	0,9681	0,00288
Two term	A_1= 0,35883, k_1= 0,07974, A_2= 0,65306, k_2= 0,49904	0,99822	0,00017
Lewis	k_1= 0,24017	0,95921	0,00356
Wang and Singh	A_1= -0,16044, A_2= 0,00655	0,88461	0,01041
Approximation of diffusion	A_1= 127313,1759, k_1= 0,24017, A_2= 1	0,95921	0,00381
Two term exponential	A_1= 0,99855, k_1= 0,21722	0,95329	0,00422
Modified Henderson and Pabis	A_1= 0,00019, k_1= -0,23792, k_2= 0,6186, A_2= 0,52415, k_3= 0,39462, A_3= 0,0910	0,99726	0,00028

D'après ces résultats, les donnés expérimentales correspondent convenablement au nouveau modèle2, Two term et au Verma *al*., justifiés par des valeurs supérieures du coefficient de corrélation (r^2) soit : 0,99867, 0,99822 et 0,99809 respectivement et des faibles valeurs de l'erreur chi-carré réduit (χ^2) soit : 0,00015, 0,00017 et 1,8E-4 respectivement. Le nouveau

modèle2 est le meilleur pour caractériser les données de séchage des déchets de pommes séchés au soleil.

La figure V.9 montre l'évaluation des variations du rapport d'humidité en fonction du temps de séchage avec le nouveau modèle2 le plus adapté avec les données expérimentales de séchage au soleil des déchets de pommes. On voit un bon ajustement entre les deux courbes expérimentale et prévue.

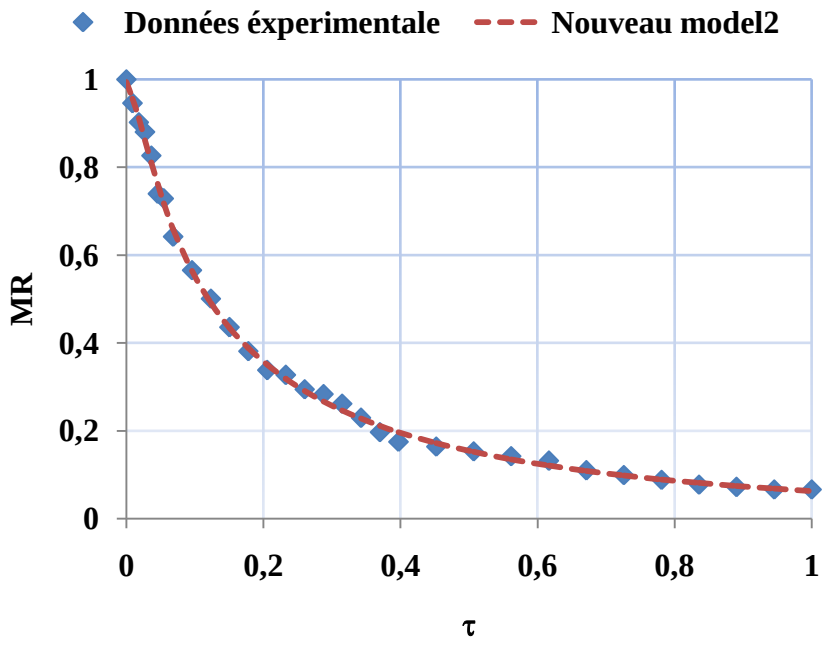


Figure V.9 : *Variation du rapport d'humidité avec le nouveau modèle2 pour le séchage des déchets de pommes à l'air libre.*

V.4.2.2 Séchage dans le séchoir serre solaire

Les valeurs des paramètres du modèle, le coefficient de corrélation et le chi-carré réduit concernant le séchage des déchets de pommes dans le séchoir serre solaire sont indiquées dans le tableau V.6.

Les données expérimentales correspondent parfaitement au nouveau modèle2 qui montre une valeur supérieure du coefficient de corrélation (r^2) (0,99922) et une valeur inferieurs de l'erreur chi-carré réduit (χ^2) (0,00015) par rapport aux autres modèles, qui présente des valeurs du coefficient de corrélation (r^2) varient de 0,99042 à 0,99888 et des valeurs de l'erreur chi-carré réduit (χ^2) varient de 0,00016 à 0,00116. Donc, le nouveau modèle2 est le meilleur pour définir les données de séchage des déchets de pommes séchés dans le séchoir serre solaire.

Tableau V.6 : *Séchage des déchets de la pomme dans le séchoir serre solaire*

Modèle	**Paramètres des modèles**	r^2	χ^2
Nouveau modèle1	A_1= 0,10552, k_1= 3,05129, n= 0,59787, A_2= 0,06686, k_2= 6,12048, m= 17,3655	0,99795	0,00036
Nouveau modèle2	A_1= 1,04029, k_1= -0,45313, n= 8,73311, A_2= 0,15406, k_2= -13,10311, m= 0,77430, p= 0,32096	0,99922	0,00015
Nouveau modèle3	A_1= 1,03366, k_1= -0,61244, n= 1,86874	0,99361	0,00092
Nouveau modèle4	A_1= 2,78886, k_1= 0,8191, n= 3,37157, k_2= -2,3258E-8, m= -9,4214E-8	0,99428	0,00093
Nouveau modèle5	A_1= 0,6537, k_1= 3,22222, n= 0,93966, A_2= 0,95683, k_2= 0,84054, m= -0,80111	0,99042	0,00080
Page	k_1= 0,37607, n= 1,15449	0,99606	0,00051
Midilli-Kucuk	A_1= 0,99706, k_1= 0,37535, n= 1,27222, A_2= 0,00829	0,99888	0,00016
Logarithmic	A_1= 1,05258, k_1= 0,45195, A_2= -0,00223	0,99432	0,00078
Verma et al.	A_1= 1,14315, k_1= 0,4976, A_2= 3,01617	0,99755	0,00034
Henderson and Pabis	A_1= 1,05107, k_1= 0,45452	0,99432	0,00074
Two term	A_1= 0,52553, k_1= 0,45452, A_2= 0,52553, k_2= 0,45452	0,99432	0,00083
Lewis	k_1= 0,42593	0,99055	0,00116
Wang and Singh	A_1= -0,33015, A_2= 0,02865	0,99363	0,00083
Approximation of diffusion	A_1= -340891, k_1= 0,29803, A_2= 1	0,99189	0,00111
Two term exponential	A_1= 1,71805, k_1= 0,58915	0,99605	0,00051
Modified Henderson and Pabis	A_1= 0,35035, k_1= 0,45452, k_2= 0,35036, A_2= 0,45452, k_3= 0,35036, A_3= 0,45452	0,99432	0,00095

La variation du rapport d'humidité prévue par rapport au rapport d'humidité expérimentale de pommes séchés dans le séchoir serre solaire est illustrée à la figure V.10. Toutes les données des deux nouveaux modèles autour de la droite indiquent un bon accord entre la valeur de rapport d'humidité expérimentale et prévue.

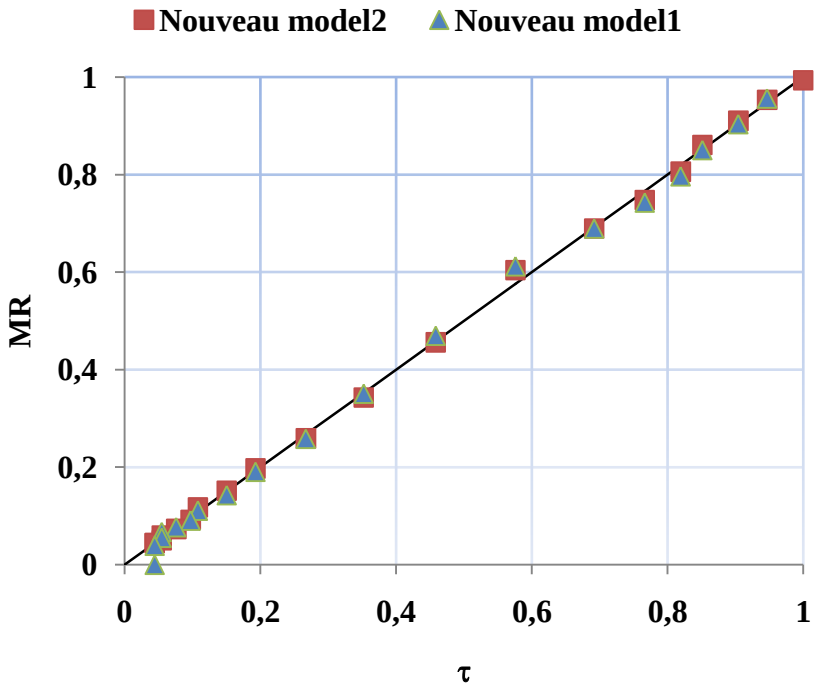


Figure V.10 : *Variation du rapport d'humidité prévue des deux nouveaux modèles avec le rapport d'humidité expérimentale de pommes séchés dans le séchoir serre solaire.*

Le tableau V.7 présente le coefficient de corrélation, l'erreur absolue moyenne et les deux constantes A et B des deux nouveaux modèles.

La comparaison d'après une installation linéaire entre les résultats des deux nouveaux modèles affirme que l'équation du nouveau modèle2 correspond le mieux, en prenant en compte le coefficient de corrélation r^2 et les deux constantes A et B.

Tableau V.7 : *Comparaison entre les deux meilleurs nouveaux model*

Modèles	A	B	r^2	RMSE (%)
Nouveau modèle1	1,006	-0,0048	0,9979	1,5782
Nouveau modèle2	0,9991	0,0004	0,9992	0,9739

V.4.3 Déchets d'Oranges

V.4.3.1 Séchage à l'air libre

Les valeurs résultantes des paramètres du modèle, le coefficient de corrélation et le chi-carré réduit concernant le séchage des déchets d'oranges à l'air libre sont indiquées dans le tableau V.8.

Tableau V.8 : *Séchage des déchets d'oranges à l'air libre*

Modèles	**Paramètres des modèles**	r^2	χ^2
Nouveau modèle1	A_1= 0,11432, k_1= 0,06085, n= 0,14867, A_2= -0,48425, k_2= 1,73647, m= 2,43373	0,99789	0,00021
Nouveau modèle2	A_1= 333450, k_1= 12,9311, n= 1,03318, A_2= 1,77606, k_2= 1,38681, m= 1,5041, p= 14,7063	0,99944	0,00005
Nouveau modèle3	A_1= 333450, k_1= -15,2568, n= 0,78583	0,99496	0,00046
Nouveau modèle4	A_1= 2,74391, k_1= -6,33316, n= -1,86465, k_2= -0,00178, m= -700,539	0,99917	0,00008
Nouveau modèle5	A_1= 0,75664, k_1= 0,00152, n= 7671,85, A_2= 0,65004, k_2= 0,03446, m= -29,9929	0,99930	0,00007
Page	k_1= 0,48119, n= 0,71507	0,99208	0,00074
Midilli-Kucuk	A_1= 1,02838, k_1= 0,50628, n= 0,74992, A_2= 0,00296	0,99667	0,00031
Logarithmic	A_1= 0,87537, k_1= 0,4418, A_2= 0,08433	0,99305	0,00063
Verma et al.	A_1= 0,32202, k_1= 0,11033, A_2= 0,70713	0,99940	0,00006
Henderson and Pabis	A_1= 0,90885, k_1= 0,31193	0,97000	0,00263
Two term	A_1= 0,32163, k_1= 0,11022, A_2= 0,678, k_2= 0,70611	0,99940	0,00006
Lewis	k_1= 0,36333	0,95835	0,00354
Wang and Singh	A_1= -0,18269, A_2= 0,00779	0,75016	0,02194
Approximation of diffusion	A_1= 173723, k_1= 0,36328, A_2= 1	0,95835	0,00379
Two term exponential	A_1= 0,24513, k_1= 1,10645	0,98231	0,00155
Modified Henderson and Pabis	A_1= 0,19628, k_1= 0,93956, k_2= 0,4973, A_2= 0,61436, k_3= 0,30745, A_3= 0,30745	0,99931	0,00007

Les résultats indiqués dans le tableau V.8 montrent que la plupart des modèles présentant un bon ajustement avec les données expérimentales des déchets d'oranges séchés à l'air libre ((r^2) supérieures à 0,99).

On a constaté que le nouveau modèle2, le modèle de Two term et le modèle de Verma et *al*., présentent les valeurs les plus élevées du coefficient de corrélation (r^2) soit : 0,99944, 0,99940 et 0,99940 respectivement et les valeurs les plus faibles de l'erreur chi-carré réduit(χ^2) soit : 0,00005, 0,00006 et 0,00006 respectivement. Parmi les 5 nouveaux modèles proposés le nouveau modèle5 donne aussi des valeurs acceptables de (r^2) et (χ^2), par rapport aux autres nouveaux modèles.

À travers les résultats discutés, nous pouvons conclure que le nouveau modèle2 est le meilleur pour caractériser les données de séchage des déchets de d'oranges séchés au soleil.

L'évaluation des variations du rapport d'humidité en fonction du temps de séchage avec le nouveau modèle2 le plus adapté avec les données expérimentales de séchage au soleil des déchets de pommes est présentée par la figure V.11. Cette figure montre une bonne adaptation entre les deux courbes.

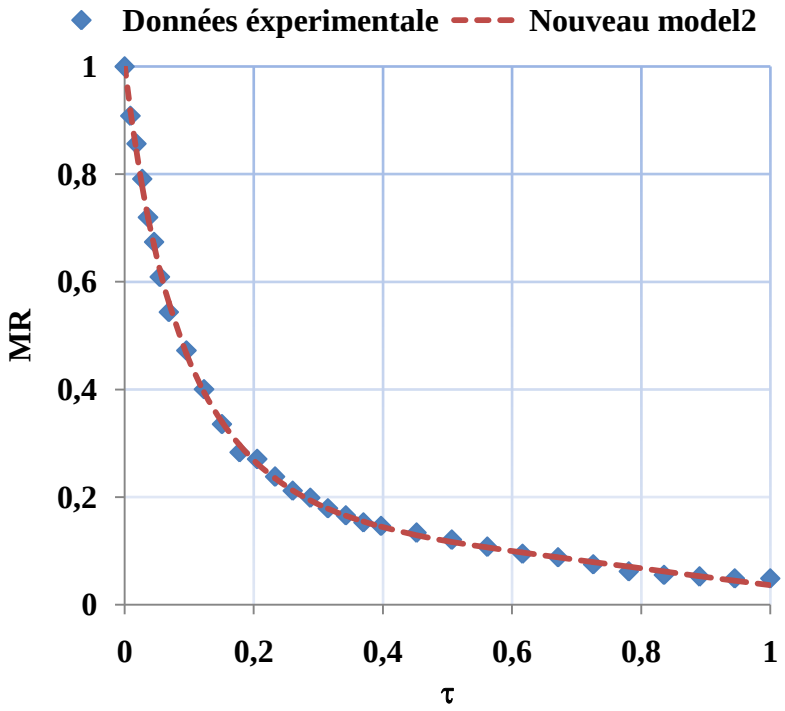


Figure V.11 : *Variation du rapport d'humidité avec le nouveau modèle2 pour le séchage des déchets d'oranges à l'air libre.*

V.4.3.2 Séchage dans le séchoir serre solaire

Les valeurs des paramètres du modèle, le coefficient de corrélation et le chi-carré réduit obtenues pour le séchage des déchets d'oranges dans le séchoir serre solaire sont rapportées dans le tableau V.9.

Les résultats indiqués dans le tableau V.9 montrent que les données expérimentales accordent remarquablement bien au nouveau modèle2, Midilli-Kucuk et au nouveau modèle1, basés sur des valeurs élevées du coefficient de corrélation (r^2) soit : 0,99904, 0,99875 et 0,99875 respectivement et des valeurs faibles de l'erreur chi-carré réduit (χ^2) soit : 0,00016, 0,00018 et 0,00021 respectivement.

Tableau V.9 : *Séchage des déchets d'orange dans le séchoir serre solaire*

Modèles	**paramètres des modèles**	r^2	χ^2
Nouveau modèle1	A_1= 0,08893, k_1= 0,00028, n= 0,08284, A_2= 0,01422, k_2= 4,92836, m= 4,41397	0,99875	0,00021
Nouveau modèle2	A_1= 0,99477, k_1= 4,33672, n= 1,07623, A_2= 1,2457E-18, k_2= -80,18368, m= 1,63838, p= -0,02814	0,99904	0,00016
Nouveau modèle3	A_1= 1,01, k_1= -1,39607, n= 1,652	0,99651	0,00045
Nouveau modèle4	A_1= 2,73347, k_1= 2,6519E-8, n= 0,00003, k_2= -3,31638, m= 1,1283	0,9982	0,00026
Nouveau modèle5	A_1= 0,76836, k_1= 1,26087, n= 2,68877, A_2= 0,63918, k_2= -15,81155, m= 0,36805	0,99816	0,00029
Page	k_1= 0,52933, n= 1,06601	0,99856	0,00018
Midilli-Kucuk	A_1= 0,99234, k_1= 0,52254, n= 1,10213, A_2= 1,10213	0,99875	0,00018
Logarithmic	A_1= 1,02303, k_1= 0,55132, A_2= -0,00752	0,99801	0,00026
Verma et al.	A_1= -1410,760, k_1= 0,54924, A_2= 0,54924	0,9975	0,00033
Henderson and Pabis	A_1= 1,01842, k_1= 0,56313	0,99793	0,00026
Two term	A_1= 0,50921, k_1= 0,56313, A_2= 0,50921, k_2= 0,56313	0,99793	0,00029
(Lewis)	k_1= 0,54971	0,9975	0,00030
Wang and Singh	A_1= -0,38056, A_2= 0,0357	0,98027	0,00247
Approximation of diffusion	A_1= 905836334,03259, k_1= 0,41646, A_2= 1	0,99809	0,00025
Two term exponential	A_1= 1,51284, k_1= 0,66459	0,99850	0,00018
Modified Henderson and Pabis	A_1= 0,33947, k_1= 0,56313, k_2=0,33947, A_2= 0,56313, k_3= 0,33947, A_3= 0,56313	0,99793	0,00033

Le nouveau modèle2 donne des valeurs de (r^2), les plus élevés, et des valeurs de (χ^2), les plus basses par rapport aux autres modèles. Par conséquent, nous pouvons conclure que le nouveau modèle2 est le meilleur pour caractériser les données de séchage des déchets d'oranges séchés dans le séchoir.

La variation du rapport d'humidité prévue par rapport au rapport d'humidité expérimentale d'oranges séchés dans le séchoir serre solaire est illustrée à la figure V.12. Toutes les données des deux nouveaux modèles autour de la droite indiquent un bon accord entre la valeur de *MR* expérimentale et prévue.

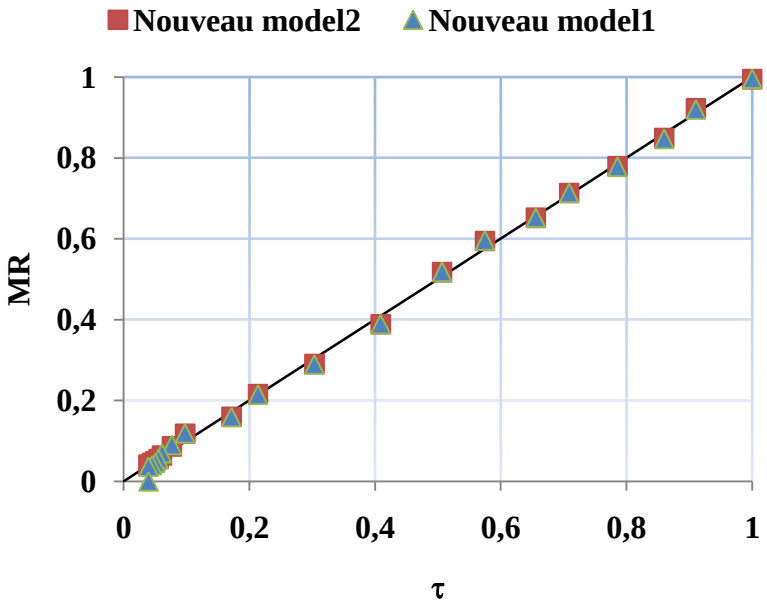


Figure V.12 : *Variation de taux d'humidité prévue des deux nouveaux modèles avec le taux d'humidité expérimentale d'oranges séchés dans le séchoir serre solaire.*

Le tableau V.10 indique les valeurs du coefficient de corrélation, de l'erreur absolue moyenne et de deux constantes A et B des deux nouveaux modèles. Ce tableau présente une comparaison d'après une installation linéaire entre les deux meilleurs nouveaux modèles indiquant un bon ajustement avec les données expérimentales des déchets d'oranges séchés dans la serre.

La comparaison affirme que l'équation du nouveau modèle2 correspond le mieux, en prenant en compte le coefficient de corrélation (r^2) et les deux constantes A et B.

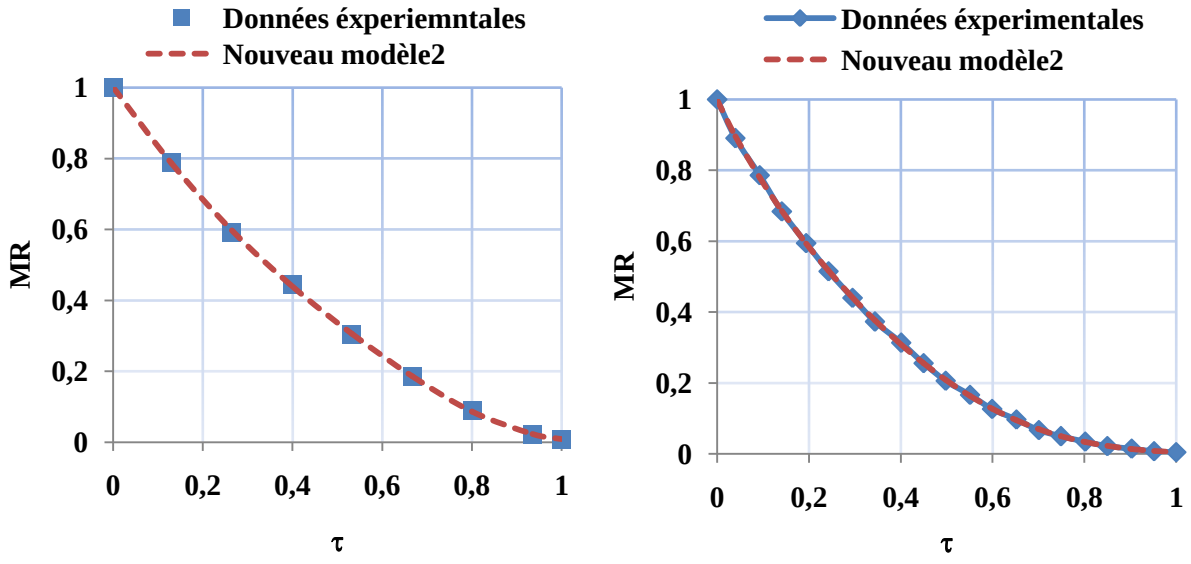
Tableau V.10 : *Comparaison entre les deux meilleurs nouveaux model*

Modèles	A	B	r^2	RMSE (%)
Nouveau modèle1	1,0035	-0,0035	0,9987	1,4258
Nouveau modèle2	0,9975	0,0013	0,999	1,0283

En générale, nous pouvons conclure que Le nouveau modèle2 est le meilleur pour caractériser les données de séchage des déchets de tomates de pommes et d'orange séchées au soleil et dans le séchoir serre solaire.

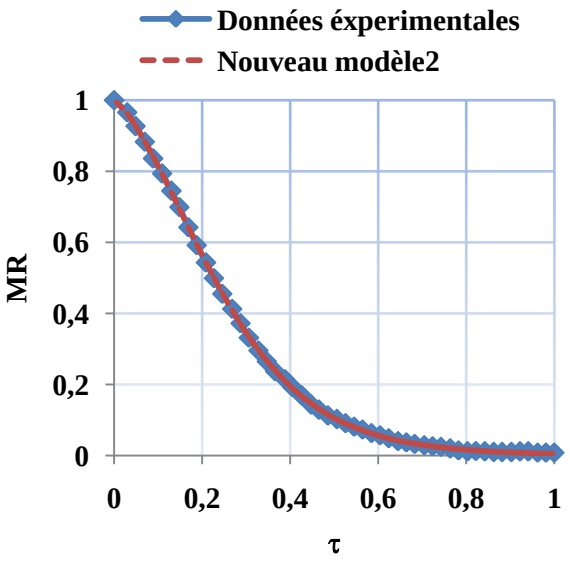
V.5 VALIDATION DU NOUVEAU MODELE2 AVEC DES DONNEES EXPERIMENTALES DE LA LITTERATURE

Le but de cette partie est d'évaluer le nouveau modèle2 qui correspond le mieux aux données de séchage au soleil et dans le séchoir serre des trois déchets agroalimentaires avec d'autres données de séchage expérimentales choisies de la littérature. Ces derniers sont de différents types et structures de produits agroalimentaires (pomme de terre, menthe, déchets de grenade, déchets de carotte, tomates et pourpier).

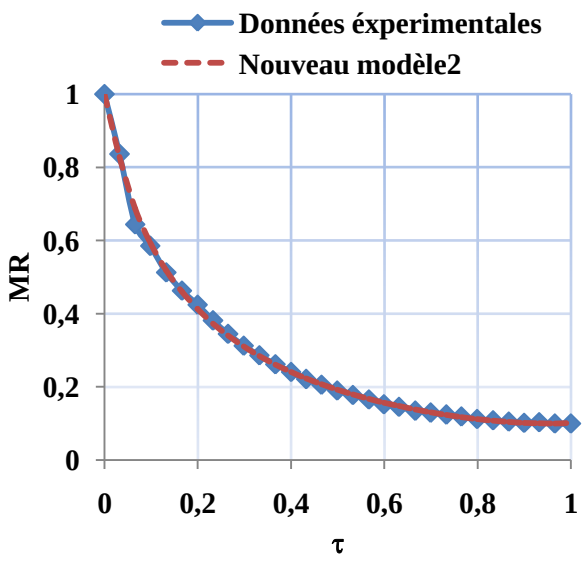


(a) pomme de terre

(b) déchets de grenade



(c) Déchets de carotte



(d) Pourpier

Figure V.13 : *Variation du rapport d'humidité de nouveau modèle N° 2 avec le rapport d'humidité expérimentale de la littérature.*

Selon la figure V.13, le nouveau modèle2 établit un bon accord entre les expériences et les rapports d'humidité prévus.

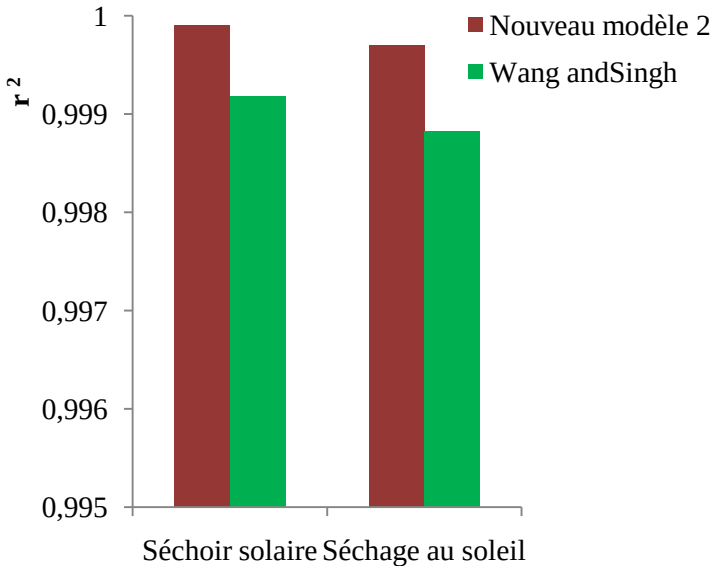


Figure V.14 : *Évaluation des coefficients de corrélation pour deux types de séchage utilisés dans l'étude Akpinar (2010).*

La validation du nouveau modèle2 est vérifiée en comparant les coefficients de corrélation avec le produit de la menthe utilisé dans l'étude Akpinar, 2010, présentés à la figure V.14, le nouveau modèle2 a le coefficient de corrélation le plus élevé.

Une comparaison a été faite entre le nouveau modèle2 et le meilleur modèle trouvé pour chaque produit sélectionné dans la littérature, en utilisant le coefficient de corrélation, le chi-quarré réduit et l'erreur quadratique moyenne sont indiquées dans les tableaux V.11 et V.12. En conséquence, le nouveau modèle2 a une valeur élevée de (r^2) et une valeur faible de (χ^2) et de RMSE par rapport à celles obtenues avec les modèles de Midilli-Kucuk et de Wang et Singh.

Tableau V.11 : *Résultats obtenus à partir du nouveau modèle2 pour les produits de la littérature*

Référence	**Product**		**Modèle**	**Paramètres**	**r^2**	**χ^2**	**RMSE (%)**
Boughali et al., [226]	Pomme de terre T=65°C		Nouveau modèle2	A1= 1,0003, k1= 2,0533, n=1,0568, A2=3,5E-6, k2=-10,397, m=0,5583, p=24,347	0,99993	3E-5	0,28
			Midilli-Kucuk	/	0,9995	1 E-4	/
Kavak Akpinar, [262]	Mente	Au soleil	Nouveau modèle2	A1= 0,9948, k1= 5,3452, n=1,3227, A2=1,02E-26, k2=-112,6, m=0,9891, p=-0,0226	0,9997	6 E-5	0,55
			Wang and Singh	a=-1,21E-4, b=3,26E-9	0,99883	3,5 E-4	1,74
		Séchoir solaire	Nouveau modèle2	A1= 1,0010, k1= 2,2310, n=1,1963, A2=1,9E-7, k2=-150,56, m=3,9322, p=0,0148	0,9999	9 E-5	0,33
			Wang and Singh	a=-1,08E-4, b=2,89E-9	0,99918	2,4 E-4	1,36
Kara et Doymaz [263]	Déchets de grenades T=60°C		Nouveau modèle2	A1= 1,0641, k1= 2,4997, n=0,9732, A2=8885,4, k2=-398,3, m=3,2124, p=0,0070	0,99992	1E-5	0,27
			Midilli-Kucuk	A_1=-0,9881, k= 0,0036, A_1=1,2044, k= -0,00013	0,9992	8,7E-5	3,57
Kumar et al., [129]	Déchets de carotte T=60°C		Nouveau modèle2	A1= 1,0010, k1= 1,9451, n=1,1949, A2=3,5E-7, k2=-16,975, m=0,1513, p=1,5016	0,99994	7,4E-6	0,25
			Hii, Law & Cloke	a =9,3716, k =0,0089, n=1,2286, c=−8,3781, g=0,0095	0,99992	8,2E-6	0,27

Tableau V.12 : *Résultats obtenus à partir du nouveau modèle2 pour les produits de la littérature avec différents vitesse de l'air et différents traitements*

Référence	**Product**		**Modèle**	**Paramètres**	**r^2**	**χ^2**	**RMSE (%)**
Ben Mariem et Ben Mabrouk, [264]	Tomate T=50°C	V= 1m/s	Nouveau modèle2	A1= 1,1099, k1= 0,4509, n=9,9694, A2=1,6106, k2=-25,191, m=0,9044, p=0,1055	0,99996	4,4 E-6	0,19
			Two Term	K1=9,1E-4, k2=0,0033, a=0,0899, b=0,9164	0,99994	1,8 E-5	0,43
		V= 2m/s	Nouveau modèle2	A1= 1,0025, k1= 1,9603, n=0,8464, A2=6,6E-11, k2=-27,148, m=0,0983, p=0,2408	0,99995	5,8 E-6	0,21
			Two Term	K1=0,0101, k2=0,0037, a=0,2366, b=0,7664	0,99967	5,8 E-6	0,24
		V= 3m/s	Nouveau modèle2	A1= 1,0004, k1= 1,3332, n=0,6445, A2=2,4E-14, k2=-29,326, m=0,0579, p=12,305	0,9997	5 E-5	0,24
			Two Term	K1=0,0101, k2=0,0037, a=0,2366, b=0,7664	0,99967	5,1 E-5	0,71
İsmail et al., [265]	Pourpier	Naturel	Nouveau modèle2	A1= 1,000, k1= -0,2926, n=7,9989, A2=0,0004, k2=-165,7, m=0,5944, p=0,01656	0,99964	2E-5	0,4
			Aghbashlo et al.	k1 = 0,2065, k2 = 0,1255	09995	2,9E-5	0,52
		Blanchi	Nouveau modèle2	A1=1,3314, k1= -6,4694, n=2,2742, A2=317,65, k2=-173,15, m=1,4883, p=0,0500	0,99805	5,9E-4	1,33
			Aghbashlo et al.	k1 = 0,3770, k2 = 0,0095	0,9932	1,2E-3	3,2
		Salé	Nouveau modèle2	A1=1,4796, k1= -3,6012, n=1,8861, A2=56180, k2=-162,51, m=1,0959, p=0,03604	0,99944	5E-5	0,58
			Aghbashlo et al.	k1 = 0,2096, k2 = 0,0717	0,9952	5,2E-4	2,18

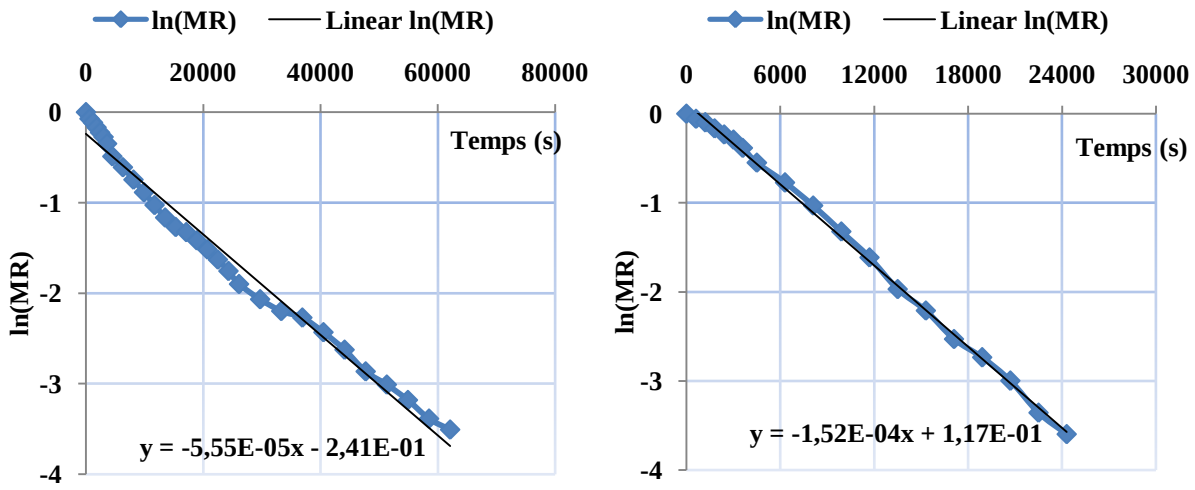
Les données obtenues, présentées dans les tableaux V.11 et V.12 confirment que le nouveau modèle est universel et permet également de décrire les courbes de séchage de différents produits agricoles.

V.6 CALCUL DU COEFFICIENT DE DIFFUSION EFFECTIF

Les courbes de la vitesse de séchage des trois déchets agroalimentaires pour les deux méthodes de séchage sont caractérisées par la présence d'une seule phase, la phase de ralentissement (c), ce qui signifie que le mécanisme principal du mouvement de l'humidité pendant le séchage est supposé être une diffusion [266,45].

V.6.1 Déchets de tomates

Le coefficient de diffusion a été calculé en utilisant la loi de Fick. La figure V.15 (a) et (b) montre le coefficient de diffusivité effectif en fonction du temps des déchets de tomates séchés au soleil et dans le séchoir serre solaire respectivement.



(a) Air libre *(b) Séchoir serre solaire*

Figure V.15 : *Variation du Ln(MR) au fil du temps (déchets de tomates).*

V.6.1.1 Calcul avec ajustement linéaire

La figure V.15 (a) et (b) montre la variation de la ligne de pente ln (MR) en fonction du temps, les valeurs obtenues de la pente β, sont égales à 5,55 E-5 pour le séchage à l'air libre et 1,52E-4 pour le séchage dans le séchoir. Le coefficient de diffusion effectif D_{eff} a été calculé à l'aide de l'équation II.31, pour les déchets de tomates séchés au soleil la valeur de la diffusivité effective est égale à 1,40E-10 m²/s et pour ceux qui ont été séchés dans le séchoir serre elle est égale à 3,85E-10 m²/s.

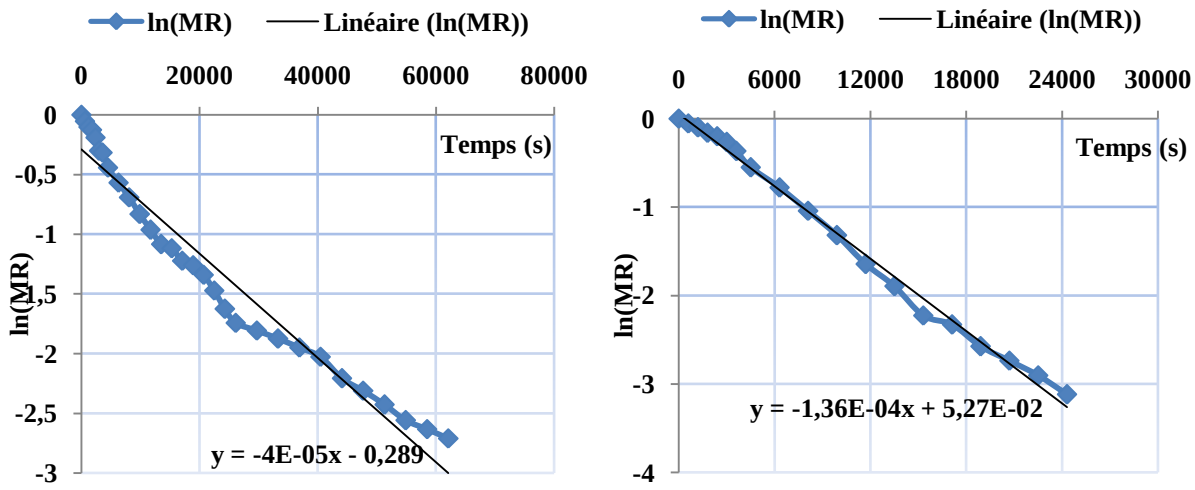
V.6.1.2 Calcul en utilisant la pente entre de 2 points de mesure

En raison de la variation de la température de séchage au cours du temps, il sera préférable de calculer D_{eff} à partir de 2 points de mesure. Le calcul de la pente a été effectué entre 2 points consécutives de mesure de la teneur en eau, ensuite la moyenne D_{meff} a été calculée et comparée à D_{eff} obtenue par l'ajustement linéaire.

En utilisant la méthode de pentes entre deux points, la valeur moyenne de la diffusivité effective de l'humidité D_{meff} obtenue pour les déchets de tomates séchés au soleil est révélée être 1,72E-10 m^2/s et pour ceux qui ont été séchés dans le séchoir serre elle est égale à 3,54E-10 m^2/s.

V.6.2 Déchets de pommes

La figure V.16 (a) et (b) montre le coefficient de diffusivité effectif en fonction du temps des déchets de pommes séchés au soleil et dans le séchoir serre solaire respectivement.



(a) Air libre *(b) Séchoir serre solaire*

Figure V.16 : *Variation du Ln(MR) au fil du temps (déchets de pommes).*

V.6.2.1 Calcul avec ajustement linéaire

Les valeurs obtenues de β, sont égales à 4 E-5 et 1,36 E-4. Les déchets de pommes séchés au soleil ont une valeur de la diffusivité effective égale à 1,27E-10 m^2/s.et pour ceux qui ont été séchés dans le séchoir serre la diffusivité effective est égale à 3,44E-10 m^2/s.

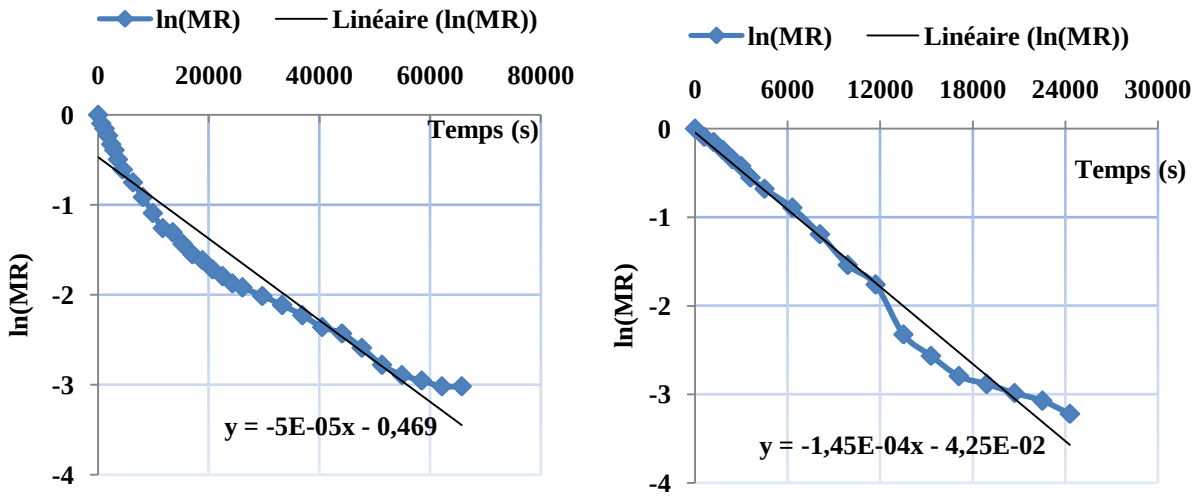
V.6.2.2 Calcul en utilisant la pente entre de 2 points de mesure

En utilisant la méthode de pentes entre deux points successive, la valeur moyenne de la diffusivité effective de l'humidité D_{meff} obtenue pour les déchets de pommes séchés dans le

séchoir serre est égale à 3,16E-10 m^2/s et elle est égale à 2,16E-10 m^2/s. pour ceux qui ont été séchés dans le séchoir serre.

V.6.3 Déchets d'oranges

La figure V.17 (a) et (b) montre le coefficient de diffusivité effectif en fonction du temps des déchets d'oranges séchés au soleil et dans le séchoir serre solaire respectivement.



(a) Air libre *(b) Séchoir serre solaire*

Figure V.17 : *Variation du Ln(MR) au fil du temps (déchets d'orange).*

V.6.3.1 Calcul avec ajustement linéaire

β obtenue est égale à 5E-5 pour le séchage à l'air libre et elle est égale à 1,45E-4 pour le séchage dans le séchoir. Les valeurs de la diffusivité effective sont égales à 1,27E-10 et 3,67E-10 m^2/s, pour les déchets d'oranges séchés au soleil et dans le séchoir serre respectivement.

V.6.3.2 Calcul en utilisant la pente entre de 2 points de mesure

En utilisant la méthode de pentes entre deux points successive, les valeurs moyennes de la diffusivité effective de l'humidité D_{meff} obtenues pour les déchets d'oranges séchés au soleil et séchés dans le séchoir serre sont révélées être de 1,73E-10 et 3,48E-10 m^2/s. respectivement.

Le tableau V.13 contient les valeurs du coefficient de diffusion obtenues à partir des deux méthodes de calcule pour tous les déchets séchés à l'air libre et dans le séchoir serre solaire.

Tableau V.13 : *Valeurs effectives du coefficient de diffusion*

Méthode de séchage	Déchets	Ajustement linéaire D_{eff} (m^2/s)	La pente à partir de 2 points D_{meff} (m^2/s)
L'air libre	Déchets de tomates	1,40E-10	1,72E-10
	Déchets de pommes	1,27E-10	2,16E-10
	Déchets d'oranges	1,27E-10	1,73E-10
Séchoir serre solaire	Déchets de tomates	3,85E-10	3,54E-10
	Déchets de pommes	3,44E-10	3,16E-10
	Déchets d'oranges	3,67E-10	3,48E-10

D'après les résultats obtenus, on remarque que les valeurs moyennes de la diffusivité effective de l'humidité D_{meff} obtenues par la méthode de la pente à partir de 2 points de tous les déchets séchés à l'air libre et dans le séchoir serre solaire, sont proches aux valeurs de la diffusivité effective de l'humidité D_{eff} obtenues par la méthode de l'ajustement linéaire.

Les valeurs de D_{eff} et D_{meff} obtenues correspondent bien à celles obtenues par Karatanos [267], G. P. Sharma [268] pour les produits agroalimentaires et par Sacilik et *al.*, pour des tranches de tomates séchées au soleil [269]. En effet, la majorité des produits agricoles ont un D_{eff} compris entre E-12 et E-8 (m^2/s) [270].

Des valeurs de diffusivité plus élevées pour les déchets séchés au séchoir par rapport aux déchets séchés au soleil qui ont été pratiquement observées. L'augmentation de la température conduit à l'augmentation du coefficient de diffusion effectif, ce phénomène est noté par Abdelghani Koukouch et *al.* [271].

V.7 CALCUL DE L'ENERGIE D'ACTIVATION

L'énergie d'activation a été calculée à partir de la pente du graphique d'Arrhenius, le logarithme naturel de la valeur obtenue à partir de la diffusion effective $ln\ (D_{eff})$ en fonction de l'inverse de la température $(1 / T)$.

Pour activer la diffusion d'humidité, l'obstacle d'énergie d'activation doit être éliminé. Il faut donc utiliser des températures élevées pour augmenter le taux de séchage en augmentant la diffusion d'humidité. Les valeurs de l'énergie d'activation obtenue pour les sous produit séchés dans le séchoir serre varient entre 50,6 et 66,5 (kJ / mole) et pour les sous produit séchés au soleil sont entre 105 et 153 (kJ / mole) (tableau V.14).

L'énergie d'activation des déchets séchés dans le séchoir serre se situent bien dans la plage des valeurs d'énergie d'activation obtenues par Zogzas qui varient de 12,7 à 110 (kJ /

mole) [272]. Les valeurs de l'énergie d'activation des déchets séchés au soleil obtenues sont élevées en raison de l'humidité relative élevées de l'air (climat côtier)

Tableau V.14 : *Valeurs de l'énergie d'activation*

Méthode de séchage	**Déchets**	**Ea (** kJ/mole)
L'air libre	Déchets de tomates	153
	Déchets de pommes	114
	Déchets d'oranges	105
Séchoir serre solaire	Déchets de tomates	50,6
	Déchets de pommes	66,5
	Déchets d'oranges	59,8

V.8 CARACTERISATION PHYSICOCHIMIQUES DE POUDRES OBTENUES

Les résultats obtenus pour la composition chimique des déchets des de pommes, d'oranges et de tomates sont rapportés par le tableau V.15.

Les teneurs en matière sèche des déchets de pommes, oranges et tomate sont élevées et se rapprochent sont respectivement : 74,3, 85,5 et 86,5% pour les déchets séchés dans le séchoir serre et 74,15, 83 et 84,95% pour les déchets séchés au soleil.

On a remarqué que la teneur en matière sèche des déchets séchés dans le séchoir serre solaire est relativement supérieure à celle obtenue pour les déchets séchés au soleil. Ceci est dû à la contamination des échantillons par la poussière et d'autres matériaux étrangers lors du séchage à l'air libre.

Tableau V.15 : *Composition chimique des déchets de pommes, d'oranges et de tomates en % de MS*

Déchets	**MS**	**MO**	**MM**	**MG**	**PB**	**CB**	**Ca**
R. pommes (SAL)	74,15	97,5	2,5	2,61	4,36	7,76	0,26
R. orange (SAL)	83	97,85	2,15	0,41	5,14	9,28	0,58
R. tomate (SAL)	84,95	92,2	7,4	1,33	9,45	6,43	0,40
R. pommes (SSS)	74,3	97,4	2,6	3,09	5,01	8,3	0,29
R. oranges (SSS)	85,5	97,82	2,18	0,48	5,3	10,39	0,59
R. tomates (SSS)	86,5	92,6	7,8	1,48	9,73	7,76	0,42

MS *: matière sèche;* **MO** *: matière organique;* **MG** *: matière grasse;* **MM** *: matière minérale;* **CB** *: cellulose brute;* **PB** *: protéine brute,* **Ca** *: calcium,* **SAL** *: séchage à l'air libre,* **SSS** *: séchage dans le séchoir serre.*

Les taux d'humidité de poudres des déchets séchés au soleil étaient significativement supérieurs à ceux de poudres des déchets séchés dans le séchoir. L'humidité relative de l'air ambiant était systématiquement supérieure à celle du séchoir solaire pendant le séchage [273]. Les déchets séchés contiennent des sucres et de la cellulose qui possèdent des propriétés hygroscopiques et une grande affinité pour l'humidité, permettant d'absorber et de retenir l'humidité de son environnement. Il était difficile d'atteindre une faible teneur en eau souhaitable pour les échantillons séchés au soleil (le séchage au soleil nécessite 3 jours) par rapport à un séchoir solaire qui a présenté des températures élevées et un rapport d'humidité inférieur (le séchage dans le séchoir nécessite 7 heurs).

Les résultats obtenus de la teneur en MS pour les déchets de tomates et les déchets d'oranges sont inferieurs de ceux rapportés par Mirzaei-Aghsaghali et Maheri-Sis [274]; Bambidis and Robinson [164] qui enregistrent 91,3 et 88,0% pour les déchets de tomates et les déchets d'oranges respectivement. Par contre, les résultats obtenus de la teneur en MS pour les déchets de pommes sont proches à celui enregistré par Pirmohammadi *et al.* [141] qui rapportent une valeur de 74,9%.

La teneur en cendres (matière minérale) est significativement faibles pour tous les échantillons, légèrement plus élevée dans les échantillons des déchets séchés dans le séchoir serre solaire (2,6, 2,18 et 7,8%) que dans les échantillons séchés au soleil (2,5, 2,15 et 7,4%), cela pourrait être dû à une faible fermentation associée au séchage au soleil et la détérioration au cours de la croissance des cellules de levure. Ce phénomène est caractérisé par une odeur désagréable observée dans des échantillons séchés au soleil.

De plus, la teneur élevée en cendres pour les échantillons séchés au soleil est dû à la contamination par la poussière et d'autres matériaux exotiques. Dans une étude de Galali et *al*. [275] sur les raisins secs ; des différences significatives ont été observées dans les teneurs en cendres des raisins secs au séchoir solaire (2,95%) et au soleil (12,1%), justifiées par la forte fermentation associée à la sécheresse au soleil. Les déchets de tomates contiennent une teneur élevée en minéraux (7,8 et 7,4%) par rapport aux produits à base de pommes (2,6 et 2,5%) et aux oranges (2,18 et 2,15%). Ces résultats se situent dans l'intervalle des résultats de la littérature indiqués dans les tableaux III.2 et III.3 [163] qui est compris entre 3,4 et 8,4%, mais ils se diffèrent de ceux rapportés par Valizadeh et Sobhanirad [276] qui ont indiqué des valeurs de la matière minérale de 9% et 6% de MS pour les déchets de tomate et de pomme, respectivement. D'après Ventura et *al*. [170], le faible contenu en minéraux des déchets peut être dû à la solubilisation des minéraux durant les différents traitements industriels.

Les poudres étudiées présentent tous des taux élevés en matière organique. La valeur la plus élevée est notée pour les déchets d'oranges et les déchets de pommes.

Besharati *et al.* [277] enregistrent des teneurs en matière organique proches que celles de notre travail, soit : 97.8 et 89,8% de MS respectivement pour les déchets de pommes et les déchets de tomates. La teneur en matière organique des déchets d'orange est supérieure à celle indiquée par Tripodo *et al*., [196] qui notent 88,0% de MS.

Les déchets de tomates pour les deux méthodes de séchage ont la plus haute teneur en protéines (9,73 et 9,45% de MS), par rapport à tous les autres déchets qui sont assez pauvres, leur contenu varie de 4,36 à 5,3% de MS. Cela fait un aliment azoté potentiellement intéressant pour les ruminants. Les déchets de pomme (5,01 et 4,36) enregistrent les valeurs les plus faibles.

Les déchets séchés au soleil contiennent moins de protéine que les déchets séchés dans le séchoir serre solaire.

Le résultat obtenu pour les déchets d'oranges est inferieur à celui rapporté par Tripodo *et al* [196] ; Bambidis et Robinson [164] qui enregistrent un contenu en protéine brut respectivement de 8,6% et 8,5% de MS.

Les déchets de pommes contiennent une teneur en protéines proche à celui noté par Besharati *et al.* [277], qui indiquent un taux estimés à 5,25% de MS. Par contre, Aghajanzadeh-Golshani *et al.* [197] ; Andrieu *et al.* [278] ont rapporté des taux de protéines significativement plus élevés aux nôtres pour les déchets de tomates, soit : 22,17 et 18,9% de MS respectivement.

Les déchets de pomme ont la teneur la plus élevée en matière grasse (3,09 et 2,61% de MS). Les autres déchets ont un pourcentage en MG très faible : (0,48 et 0,41%) pour les déchets d'orange et (1,48 et 1,33%) pour les déchets de tomates.

Les valeurs obtenues pour les trois déchets agro-alimentaires sont inférieures à celles de la littérature [279-281], les différences dans les valeurs obtenues et indiquées par la littérature soient probablement dues aux différents procédés d'extraction de la matière grasse et à la nature des solvants utilisés, ou cela peut être dû à des différences dans la variété des produits utilisés.

Pour ce qui est de la CB, on constate que les résultats obtenus présentent un taux très faible pour tous les déchets qui varie de 6,43 à 10,34%.

Le calcium se retrouve dans les déchets séchés dans le séchoir serre avec des teneurs varient de 0,42 à 0,59% de la MS, ces valeurs sont légèrement supérieures à celles trouvés pour les déchets séchés au soleil qui varient de 0,40 à 0,58% de la MS. Les déchets d'oranges ont la

teneur la plus élevée en calcium (0,59 et 0,58% de MS), ces valeurs sont inferieure à celles trouvées dans la littérature [163]. Les déches de tomates présentent des résultats supérieurs aux résultats trouvés par Monika Knoblich (0,14 et 0,18% de MS) [281] et ils sont proches de la valeur moyenne de la littérature (4,4 g/Kg = 0,44% de MS) indiquée dans le tableau III.2 [163]. Les déches de pommes présentent des résultats supérieurs aux résultats de la littérature indiqués dans le tableau III.3 (de 0,02 à 0,11% de MS) [163].

V.9 CARACTERISATION MICROBIOLOGIQUES

Pour évaluer la sécurité des déchets étudiés et la possibilité de les utiliser comme aliments pour ruminants sans nuire à leur santé, des analyses microbiologiques ont été effectuées sur ces déchets. Les résultats d'analyses microbiologiques pour caractériser l'état sanitaire des poudres obtenues sont présentés dans le tableau V.16.

Les analyses menées dans notre étude permettent de tester un aliment pour savoir s'il est consommable du point de vue microbiologique, c'est-à-dire s'il ne contient pas trop de bactéries successibles de l'altérer comme les levures et les moisissures (qui par leur action peuvent des modifications organoleptiques), s'il peut être conservé selon certaines règles, et s'il ne contient pas des micro-organismes toxinogènes et pathogènes (les Salmonelles et l'E-coli).

D'après les résultats présentés dans le tableau V.16, tous les déchets présentent une qualité microbiologique relativement bonne et sont acceptables du point de vue hygiénique.

Ce qui signifie que le séchage a éliminé une grande partie des germes. Ce qui se remarque par leur absence ou leur forte diminution dans les produits finis. L'activité d'humidité des déchets a été éliminée par le processus du séchage, éliminant ainsi l'atmosphère qui protège les microorganismes vivants [282].

En ce qui concerne les germes aérobies bien que, pour la plupart des espèces, ces bactéries ne soient pas dangereuses pour la santé, leur détection dans les poudres obtenues par les deux méthodes du séchage indique une altération. Elle amoindrit la qualité intrinsèque de la denrée (goût, odeur, aspect). Les déchets séchés dans le séchoir solaire serre sont moins contaminés par les germes aérobies 30°C ceci peut s'expliquer par le faite que les sous produit séchés au soleil sont exposés directement à la poussière et aux insectes.

Le nombre faible des germes aérobies, l'absence de salmonelles, des levures et moisissures révèlent avant tout que le procédé de séchage a été exécuté dans des bonnes conditions hygiènes.

Tableau V.16 : *Analyses microbiologiques des sous-produits de pommes, d'oranges et de tomates en Germes/gr*

Déchets	**G.A (30°C)**	**E.C**	**M**	**L**	**S**
R. pommes (SAL)	4.10^4	0	0	0	ABS
R. orange	2.10^4	0	0	0	ABS
R. tomate	3.10^4	0	0	0	ABS
R. pommes (SSS)	3.10^4	0	0	0	ABS
R. oranges	2.10^4	0	0	0	ABS
R. tomates	2.10^4	0	0	0	ABS
m [283]	10^5	10	10^3	10^3	ABS

GA *: Germes Aérobie à 30°C,* **EC** *: Esherichia coli,* **M** *: Moisissures,* **L** *: Levures,* **S** *: Salmonelles,* **m** *: seuil au dessous duquel le produit est considéré comme étant de qualité satisfaisante,* **ABS** *: absence.*

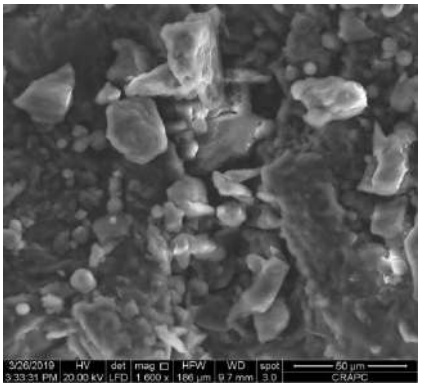
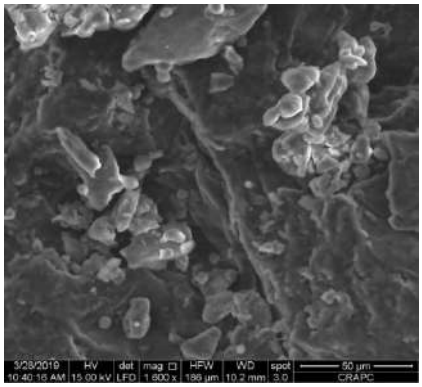
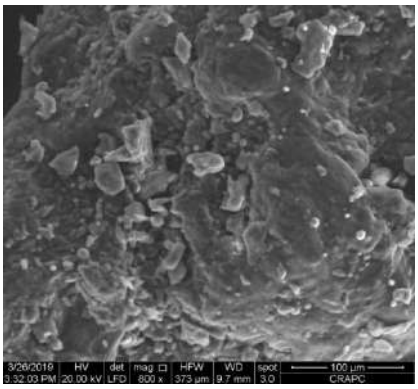
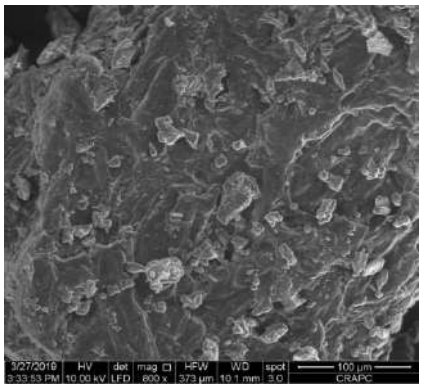
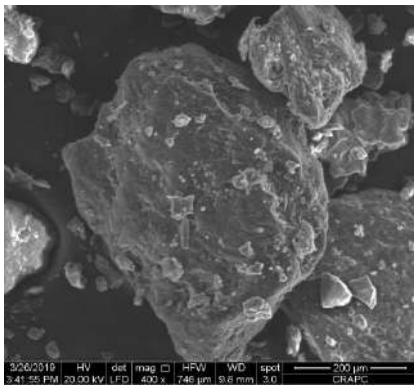
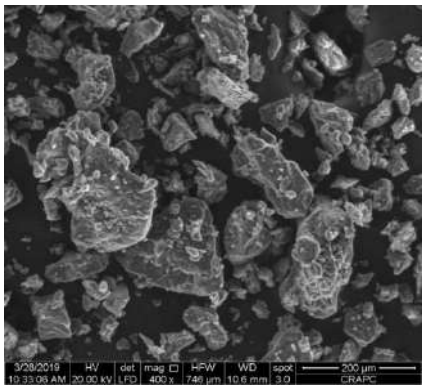
V.10 CARACTERISATION MICROSTRUCTURALE DE POUDRES OBTENUES

Les images de MEB des poudres étudiées ont montré une masse de particules qui sont de type complexe sous forme agglomérée. Elles présentent également une surface composite avec des capillaires de différentes tailles et des motifs géométriques.

D'après les images obtenues par le microscope électronique à balayage, les poudres étudiées semblent être composées de particules relativement irrégulières. De plus, la surface des particules observées parait rugueuse, ceci peut-être probablement dues en raison de la structure poreuse des poudres. En fait, les diverses dimensions particulaires et les distributions granulaires peuvent-être influencées par la composition des poudres [284]. En tant que matériaux biologiques, les poudres étudiées sont composées de nombreuses substances hydrophiles : sucres, protéines, colorants ce qui explique leur structure complexe.

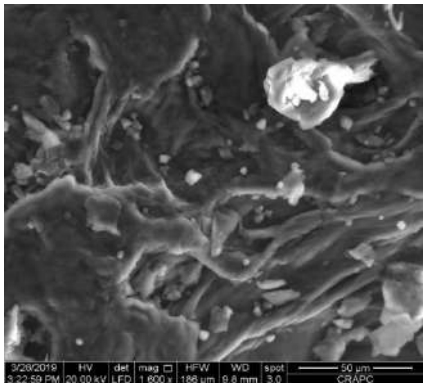
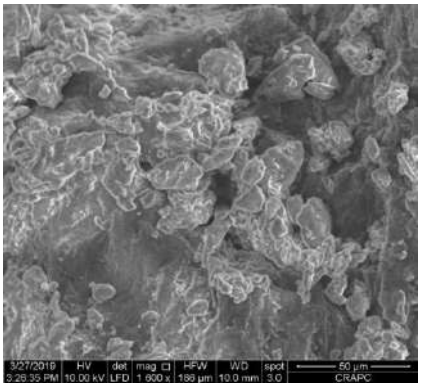
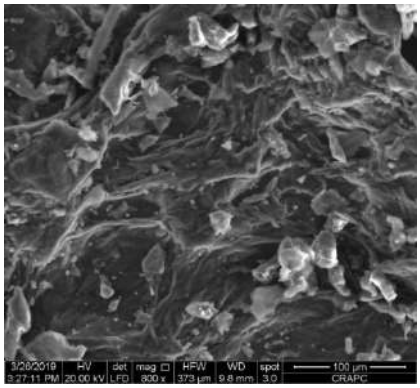
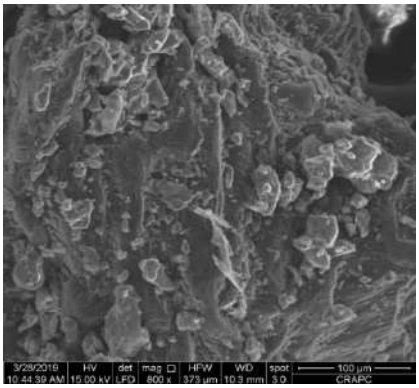
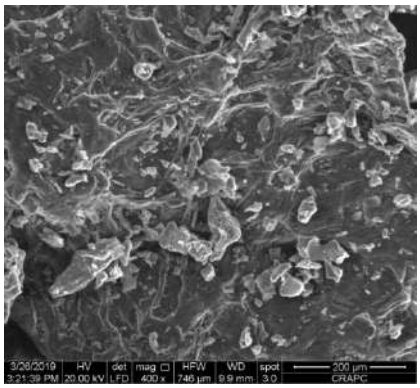
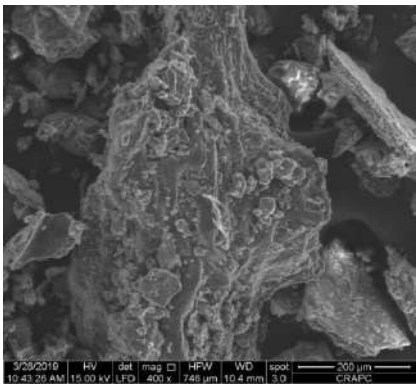
Pour les déchets de pommes, une large variation de la taille globale des particules a été observée. Ces particules étaient aperçues comme de forme irrégulière (les granules d'amidon). Correia et *al.* [285], ont observé que le séchage à 70°C provoque une déformation des granules d'amidon, ils sont devenus plus aplatis et rugueux. Des résultats similaires ont été rapportés par Attanasio et *al.* [286] La température influence de manière significative la morphologie des granules d'amidon. Les Images de MEB avec différents agrandissements concernant la poudre de déchets de pommes séchés au soleil et dans le séchoir sont présentées dans le tableau V.17.

Tableau V.17 : *Images de MEB avec différents agrandissements de la poudre des déchets de pommes séchés*

Agrandissement (μm)	à l'air libre	dans le séchoir serre
x50		
x100		
x200		

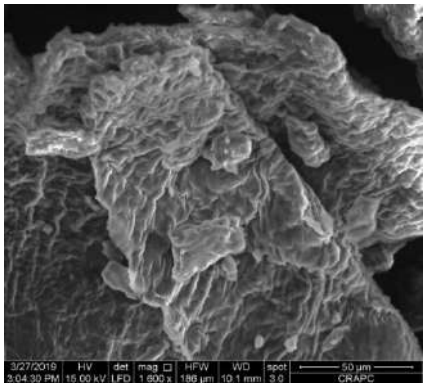
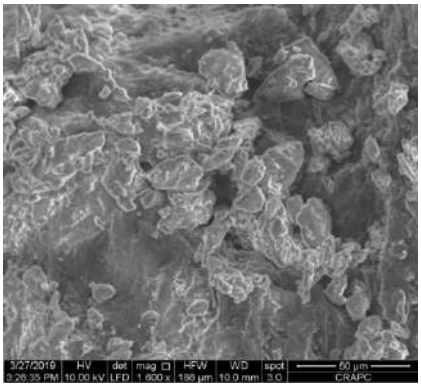
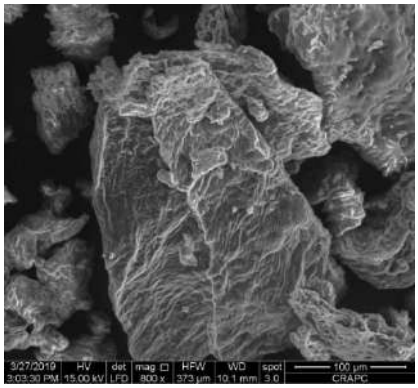
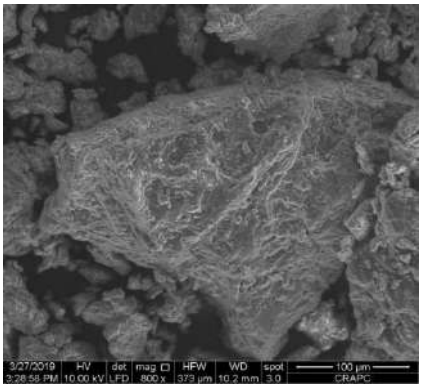
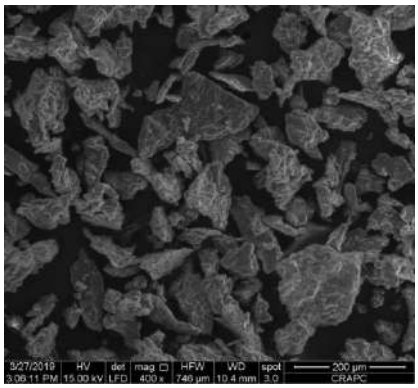
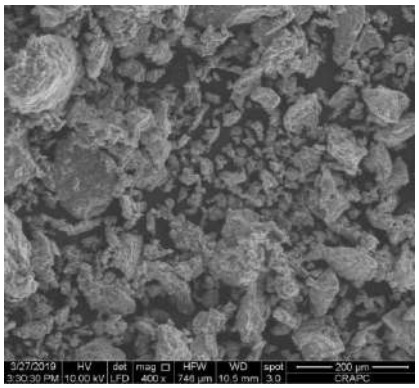
Pour les déchets de tomates et d'oranges, On voit une structure laminaire fibreuse. Le séchage a provoqué le mouvement de l'eau et la déformation de la pectine, le hémicellulose et la cellulose cellulaire. Des résultats similaires ont été trouvés dans des études menées par Sargent et Tortue et Orchard [287,288]. Les Images de MEB avec différents agrandissements concernant les poudres de déchets de tomates et d'orange séchés au soleil et dans le séchoir sont présentées respectivement dans le tableau V.18 et V.19.

Tableau V.18 : *Images de MEB avec différents taille pour la poudre des déchets de tomates séchés*

Agrandi-ssement (µm)	**à l'air libre**	**dans le séchoir serre**
x50		
x100		
x200		

À partir des Images de MEB présentées dans les deux tableaux V.18 et V.19, on voit que la structure de la poudre des déchets d'oranges séchés est plus fibreuse que celle de la poudre de tomates.

Tableau V.19 : *Images de MEB avec différents taille pour la poudre des déchets d'Oranges séchés*

Agrandi-ssement (µm)	**à l'air libre**	**dans le séchoir serre**
x50		
x100		
x200		

Lors de la comparaison de la microstructure des déchets séchés dans le séchoir avec ceux séchés au soleil, il a été constaté que les granules des déchets séchés au soleil présentent une structure superficielle irrégulière (structure amorphe), tandis que la surface des granulés des déchets séchés dans le séchoir serre était recouverte de formes plus régulières.

La déformation structurelle était plus élevée pour les déchets séchés dans le séchoir serre, ce qui peut être dû au taux de diffusion plus élevé résultant de températures élevées pendant le processus de séchage, ce qui a provoqué la fragilisation ou la destruction des surfaces

externes des parois des échantillons. La raison pour laquelle les particules obtenues après le broyage sont plus fines. Une surface de particules fines permettant une structure plus compacte et rigide.

Des résultats similaires ont été rapportés par Askari et *al* [289] pour les échantillons de tomates et par Witrowa-Rajcherta et Rzaca [290], Thuwapanichayanan et *al.*, [291] et Vega-Gálvez et *al*., [292] pour différents produits alimentaires et étaient en accord avec l'effet des températures élevées sur la structure des produits séchés.

V.11 CONCLUSION

Afin de déterminer l'équation la plus appropriée pour la description de la cinétique de séchage solaire des trois déchets agroalimentaires, les données expérimentales étaient équipées de cinq nouvelles à unités indépendantes de mesure et 11 modèles de séchage différents sélectionnés de la littérature. Ces modèles ont été comparés, selon le coefficient de corrélation r^2 et le chi-carré réduit χ^2. Par conséquent, le nouveau modèle2 s'est avéré plus approprié pour la description de la cinétique de séchage solaire des trois déchets. Une évaluation du nouveau modele2 a été réalisée avec des données expérimentales dans la littérature pour le valider. Par conséquent, le nouveau modèle2 caractérise bien les courbes de séchage de différentes variétés de produits agricoles. Le coefficient de diffusivité effectif a varié entre 1,27E-10 et 3,85E-10 m^2/s. Les valeurs de diffusivité des déchets séchés dans le séchoir sont plus élevées par rapport à celles des déchets séchées au soleil, ce qui implique qu'il existe une corrélation directe entre la température et le coefficient de diffusion effectif. Les valeurs de l'énergie d'activation obtenue pour les sous produits séchés dans le séchoir serre varient entre 50,6 et 66,5 (kJ / mole) et pour les sous produits séchés au soleil sont entre 105 et 153 (kJ / mole).

Cette étude a montré que le séchage dans le séchoir solaire convient mieux au traitement des déchets de pommes, de tomates et d'oranges. Le processus du séchage conduit à l'élimination des microorganismes et la stabilisation des déchets agroalimentaires par la réduction de la teneur en eau, ce qui rend toute activité biologique impossible.

Le séchage solaire influe sur la microstructure des déchets et également influe sur sa composition chimique et sa valeur nutritive. La matière sèche, la matière minérale et la matière organique des poudres des déchets sont plus élevés pour ceux séchés dans le séchoir serre solaire.

Conclusion Générale

Dans cette étude, trois déchets agroalimentaires issues de l'industrie de transformations alimentaires, déchets de pommes, déchets de tomates et déchets d'oranges ont été séchés par deux méthodes, séchage au soleil et séchage dans un nouveau séchoir solaires, afin d'atteindre deux objectifs. Le premier objectif est de tester les performances de ce nouveau séchoir solaire en tant que séchoir serre solaire pour le traitement des déchets. Pour cela une étude de la cinétique de séchage au soleil sur trois déchets de tomates, d'oranges et de pommes à été menue et comparée à celle de la cinétique de séchage des mêmes déchets à l'intérieur du nouveau séchoir serre solaire. Le deuxième objectif est de mener plusieurs expériences pour évaluer les six poudres obtenues à partir des déchets de tomates, d'oranges et de pommes séchées au soleil et à l'intérieur de séchoir solaire, afin d'étudier l'effet de méthodes de séchage sur leurs propriétés physiques, physicochimique, microbiologiques et microscopiques. Par conséquent, déterminer la méthode optimale de séchage pour la valorisation des déchets issus de l'industrie de transformations alimentaires qui nous donne des poudres agroalimentaires sèches, saines et nutritives de meilleures qualités à inclure dans le régime alimentaire des ruminants et aussi la contribution à la protection de l'environnement.

Cette étude nous a montré que le séchage dans le séchoir serre solaire convient mieux au traitement des déchets de pommes, de tomates et d'oranges que le séchage au soleil. Le temps requis pour sécher les déchets était comparativement plus court dans le séchoir par rapport au séchage au soleil. Donc le processus du séchage dans le séchoir conduit mieux à l'élimination des microorganismes, stabilisation des déchets agroalimentaire par la réduction de la teneur en eau (les produits perdent de 69,35 à 83,87% de son poids initial), ce qui rend toute activité biologique impossible.

Les teneurs en matière sèche, matière minérale, matière organique, protéine brute, cellulose brute et en calcium des poudres obtenues des trois sous produits sont plus élevées pour ceux séchés dans le séchoir serre solaire.

Le séchage solaire influe sur la microstructure des déchets et également influe sur sa composition chimique et sa valeur nutritive. La surface des granulés des poudres de déchets séchés au séchoir serre était recouverte de formes plus régulières, et des particules fines permettant une structure plus compacte et rigide.

Les sous produits agroalimentaires sont de qualité nutritionnelle appréciable mais variable. De plus, ils s'avèrent tous pauvres en matière azotée, de ce fait, un supplément azoté est indispensable à l'alimentation des ruminants à base de nos déchets. Ils sont particulièrement riches contenu énergétique (lipide) et offrent des possibilités d'utilisation chez plusieurs catégories de ruminants et ils ont peut-être concéderais comme des suppléments énergétiques et minéraux.

Selon les résultats obtenus, il a été constaté que le séchage solaire à l'intérieur du séchoir serre est meilleur que le séchage au soleil. Le séchage solaire est également une étape intermédiaire nécessaire dans le traitement des déchets agroalimentaires destinés à être réutilisés dans l'alimentation animale des ruminants.

Afin de déterminer le modèle le plus appropriée pour la description de la cinétique de processus de séchage des trois déchets par les deux méthodes, les données expérimentales étaient équipées de Cinq nouveaux modèles universels sans dimensions et onze modèles sélectionnés de la littérature. Ces modèles ont été comparés, selon le coefficient de corrélation (r^2) et le chi carré réduit (χ^2). Pour la plupart de ces modèles, les valeurs de (r^2) étaient supérieures à 0,99, indiquant un bon ajustement. Le nouveau modèle2 donne des valeurs de (r^2), les plus élevées et des valeurs de (χ^2), les plus basses par rapport aux autres modèles. Par conséquent, le nouveau modèle2 s'est avéré plus approprié pour la description de la cinétique de séchage solaire des déchets agroalimentaires dans les méthodes de séchage au séchoir solaire et au soleil. Une évaluation du nouveau modele2 a été réalisée avec des données expérimentales dans la littérature pour le valider. Par conséquent, le nouveau modèle2 permet d'être utilisé pour une bonne caractérisation des courbes de séchage de différentes variétés de produits agricoles.

Les courbes de séchage des trois déchets agroalimentaires des deux méthodes de séchage sont caractérisées par la présence d'une seule phase, la phase c, ce qui signifie que le mécanisme principal du mouvement de l'humidité pendant le séchage est la diffusion. La diffusivité de l'humidité était plus élevée dans le séchage au séchoir solaire que dans le séchage au soleil. Le coefficient de diffusivité effective a varié entre 1,27E-10 et 3,85E-10 m^2/s. Les valeurs de l'énergie d'activation obtenue pour les sous produits séchés dans le séchoir serre varient entre

50,6 et 66,5 (kJ / mole) et pour les sous produits séchés au soleil sont entre 105 et 153 (kJ / mole). On a constaté que l'énergie d'activation était plus élevée dans le séchage au soleil que dans le séchage au séchoir solaire. La quantité d'humidité dans l'air, semblent avoir une grande influence sur l'énergie d'activation.

Les perspectives envisageables en prolongement direct de cette thèse sont : poursuite de l'étude sur d'autres produits et déchets agroalimentaires ; l'utilisation de la détente instantanée contrôlée (DIC) en tant qu'opération de décontamination et le couplage avec d'autres processus de séchage ; etc.

Bibliographie

[1] S.H. Adnan Ali, S.H. Omar, H.H. Mohamed, Recycle of Agricultural by-products in industrial and domestic utilization. Arab Organization for Agricultural Development, Khartoum, (2006).

[2] G.H. Shah, F.A Masoodi, Studies on the utilization of wastes from apple processing plants. Indian Food Packer, 48(5) (1994) 47–52.

[3] M. Hernàndez Suàrez, Chemical composition of tomato (Lycopersicon esculentum) from Tenerife, the Canary Islands. Food Chemistry, (2008) 1046–1056.

[4] H. U. ENDREβ, High quality resulting from product integrated environment protection, PIUS. Fruit Processing, 10(7) (2000) 273–276.

[5] P. P. Tripathy, S. Kumar, Influence of sample geometry and rehydration temperature on quality attributes of potato dried under open sun and mixed-mode solar drying. International Journal of Green Energy, 6 (2009) 143–156.

[6] L. Bennamoun, Reviewing the experience of solar drying in Algeria with presentation of the different design aspects of solar dryers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (2011) 3371–3379.

[7] P. Singh, V. Shrivastava, A. Kumar, Recent developments in greenhouse solar drying: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (2018) 3250–3262.

[8] O. Prakash , A. Kumar, Solar greenhouse drying: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29 (2014) 905–910.

[9] M. Condori, L. Saravia, The performance of forced convection greenhouse driers. Renewable Energy, 13 (1998) 453–469.

[10] H.M. Garg, R. Kumar, Studies on semi-cylindrical solar tunnel dryers: thermal performance of collector. Applied Thermal Engineering, 20 (2000) 115–131.

[11] Food waste solar drying articles. http:// www.scholar.google.com. Consulté le 17 juin 2019.

[12] A. Charreau, R. Cavaill. Séchage théorie et pratique Technique de l'Ingénieur, génie des procédés. (1991) 2481–2503.

[13] R.K. Aggarwal, Indirect solar dryer for drying of hill products. Asian journal of agriculture and rural development, 2(2) (2012) 201–205.

[14] S. Vijaya Venkataraman, S. Iniyan, Goic, Ranko, A review of solar drying technologies. Renewable and sustainable energy reviews, 16 (2012) 2653–2670.

[15] J.J Bimbenet, Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire Cahiers du génie

Industriel Alimentaire (G.I.A), Sepaic. Paris 2ème édition (1984) p34.

[16] J.A. Duffie, W. A. Beckman, Solar energy: Thermal processes, John Wiley, NewYork (1974).

[17] A. Ghazanfari, Experiments on solar drying of Pistachio nuts. AIC science: process or product, 2 (2002) 303–309.

[18] K.S. Ong, Solar dryers in Asia pacific region. Renewable energy, 16 (1999) 779–784.

[19] G. Lewis, M. Randall, Thermodynamics, New-York. Addition-Wesley Publishing Company, (1923).

[20] W. Scott. Water relations of foods spoilage microorganisms. Advances in Food Research, 7 (1957) 83–127.

[21] M. Loncin, Les opérations unitaires du génie chimique. Edition Dunod, Paris, France, (1961).

[22] Jean-jacques Bimbenet, Génie des procèdes alimentaires RIA. édition Dunod, Paris, (2002).

[23] B. Touati, Etude théorique et expérimentale du séchage Solaire des feuilles de la menthe verte (mentha viridis). Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon Ecole Doctorale M.E.G.A (I.N.S.A. de Lyon) Et Universite Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen Faculte des Sciences. Departement de Physique, Algerie (2008).

[24] S. Boughali, Etude et optimisation du sechage solaire des produits agroalimentaires dans les zones arides et désertiques. Thèse de doctorat, Université hadj lakhdar, Batna, Algerie (2010).

[25] O. Kricher, K. Kroll, Technique de séchage, 2 édition de Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstecnik (1963). Springer Verlag Traduite par CETIAT, Orsay (1956).

[26] Jean-jacques Bimbenet. Génie des procèdes alimentaires RIA. Edition Dunod, Paris (2002).

[27] J.P Nadeau, Puiggali J.R., Séchage : des processus physiques aux procèdes industriels. Tec & Doc- Lavoisier, (1995).

[28] M. El Hisse, M. Fournier, Modélisation, identification et simulation d'un séchoir solaire agroalimentaire. Revue de Physique Appliquée, 23 (1988) 1161–1168.

[29] M.K. Krokida, V.T. Karathanos, Z.B. Maroulis, D. Marinos-Kouris, Drying kinetics of some vegetables. Journal of Food Engineering, 59 (4) (2003) 391–403.

[30] M. Kulshreshtha, A. Singh, D. Vipul, Effect of drying conditions on mushroom quality. Journal of Engineering Science and Technology, 4(1) (2009) 90–98.

[31] S. Seiiedlou, H.R. Ghasemzadeh, N. Hamdami, F. Talati, M. Moghaddam, Convective drying of apple: mathematical modeling and determination of some quality parameters. International Journal of Agriculture and Biology, 12 (2010) 171–178.

[32] T.H. Nguyen, Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux. Thèse de doctorat, Université de Bretagne-sud, (2015).

[33] H. Tavakolipour, Drying kinetics of pistachio nuts (Pistacia vera L.). World Applied Sciences Journal, 12(9) (2011) 1639–1646.

[34] A.G. Duzzioni, V.M. Lenton, D.I.S. Silva, M.A.S. Barrozo, Effect of drying kinetics on main bioactive compounds and antioxidant activity of acerola (Malpighia emarginata D.C.) residue. International Journal of Food Science & Technology, 48(5) (2013) 1041-1047.

[35] G. Clemente, A. Frías, N. Sanjuan, J. Benedito, A. Mulet, Influence of air velocity in dehydration of potato cubes. In III European Drying Conference. Euro Drying, Palma, Mallorca, Spain, October 26–28 (2011) 3p.

[36] A. Kaya, O. Aydın, C. Demirtaş, Drying kinetics of red delicious apple. Biosystems Engineering, 96(4) (2007) 517–524.

[37] M. Daguenet, Le séchage solaire théorie et pratique. UNESCO, Paris, (1985).

[38] J. P. Bouverat-Bernier, Optimisation des conditions de séchage de la feuille de menthe poivré. Herba Gallica, 1 (1990) 83–95,

[39] B.B. Odile, Etude des effets d'un traitement thermique sur la qualite (flaveur) de quelques plantes aromatiques : Basilic, Ocimum Basilicum L.; Menthe, Menthe Piperita; Persil, Petroselinum Sativum Hoffm; Estragon, Artemesia Dracunculus L. Thèse de Doctorat, Université de Paris VII, (1991),

[40] A. Charreau, R. Cavaille, Séchage théorie et pratique. Technique de l'Ingénieur, génie des procédés, (1991) 1–23,

[41] J.J. Bimbenet, Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire. Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A), Sepaic, Paris 2ème édition Cité par H. Madjoudj (1984) p34.

[42] P. Dudez, A. Thémelin, M. Reynes, Le séchage solaire petite échelle des fruits et légumes: expériences et procédés. Édition du Gret, Paris, (1996) p157.

[43] İ. Doymaz, Pretreatment effect on sun drying of mulberry fruits (Morus alba L.). Journal of Food Engineering, 65(2) (2004) 205–209.

[44] İ.T. Toğrul, D. Pehlivan, Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. Journal of Food Engineering, 65(3) (2004) 413–425.

[45] T.Y. Tunde-Akintunde, Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. Renewable Energy, 6(8) (2011) 2139–2145.

[46] D.M. Kadam, D.V.K. Samuel, Convective flat plate solar heat collector for Cauliflower drying. Biosystems engineering, 93(2) (2006) 189–198.

[47] A.H. Patel, S.A. Shah, H. Bhargav, Review on solar dryer for grains, vegetables and fruits. IJERT International Journal of Engineering Research & Technology, 2(1) (2013) 4–10.

[48] D. Jain, G. N. Tiwari. Thermal aspects of various crops, Energy, (2003) (28) 37–54.

[49] G.L. Visavale, Principles, Classification and Selection of Solar Dryers. In: Solar Drying: Fundamentals. Applications and Innovations, Singapore, (2012) 1–50.

[50] A. Sharma, C. Chen, N.V. Lan, Solar- drying energy systems: A Review. Renewable and sustainable energy reviews, 13 (2009) 1185–1210.

[51] O. V. Ekechukwn, B. Norton, Review of solar energy systems II: an overview of solar drying technology. Energy Conversion and Management, 40 (1999) 615–655.

[52] O. Prakash, A. Kumar, Historical review and recent trends in solar drying systems. Int J Green Energy, 10 (2013) 690–738.

[53] PS. Chauhan, A. Kumar, B. Gupta, A review on thermal models for greenhouse dryers. Renew Sustain Energy Review, 75 (2016) 548–58.

[54] S. Nayak, G. N. Tiwari, Energy and exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated With a Solar Greenhouse. Energy Build, 40(11) (2008) 2015–2021.

[55] S. Janjai, V. Khamvongsa, B. K. Bala, Development, design, and performance of a pv ventilated greenhouse dryer. International Energy Journal, 8 (2007) 249–58.

[56] S. Janjai, N. Lamlert, P. Intawee, B. Mahayothee, BK. Bala, M. Nagle, J. Müller, Experimental and simulated performance of a pv-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. Solar Energy, 83 (2009) 1550–65.

[57] A. Ganguly, D. Misra, S. Ghosh, Modeling and analysis of solar photovoltaic-electrolyzer-fuel cell hybrid power system integrated with a floriculture greenhouse. Energy Build, 42 (2010) 2036–43.

[58] S. Janjai, A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: development and dissemination. International Journal of Energy Environnement, 3 (2012) 383–98.

[59] J. Kaewkiew, S. Nabnean, S. Janjai, Experimental investigation of the performance of a large-scale greenhouse type solar dryer for drying chilli in Thailand. Procedia Engendering, 32 (2012) 433–9.

[60] S. Nayak, A. Kumar, J. Mishra, G. N. Tiwari, Drying and testing of mint (Mentha piperita) by a hybrid photovoltaic-thermal (PVT)-based greenhouse dryer. Drying Technology, 29 (2011) 1002–9.

[61] O. Prakash, A. Kumar, Performance evaluation of greenhouse dryer with opaque north wall. Heat Mass Transfert, 50 (2014) 493–500.

[62] S. Janjai, C. Phusampao, W. Nilnont, P. Pankaew, Experimental performance and modeling of a greenhouse solar dryer for drying macadamia nuts. International journal of scientific & engineering research, 5 (2014) 1155–61.

[63] S. Nagarajan, M. Premkumar, Analysis of thermal performance in solar dryer. IOSR Journal of mechanical and civil engineering, 11 (2014) 71–4.

[64] A. Fudholi, R. Yendra, D. F. Basri, H. Ruslan Mohd, S. Kamaruzzaman, Energy and exergy analysis of hybrid solar drying system, Contemporary engineering sciences, 9 (2016) 215–23.

[65] S. Tiwari, G. N. Tiwari, I. M. Al-Hela, Performance analysis of photovoltaic–thermal (PVT) mixed mode greenhouse solar dryer. Solar Energy, 133 (2016) 421–8.

[66] M. S. Sevda, N. S. Rathore, Performance evaluation of the semicylindrical solar tunnel dryer for drying handmade paper. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2 (2010) 1–18.

[67] N. S. Rathore, N. L. Panwar, Experimental studies on hemi cylindrical walk-in type solar tunnel dryer for grape drying. Applied Energy, 87 (2010) 2764–7.

[68] P. S. Chauhan, A. Kumar, Heat transfer analysis of north wall insulated greenhouse dryer under natural convection mode. Energy, 118 (2017) 1264–74.

[69] S. Ayyappan, K. Mayilsamy, V. V. Sreenarayanan, Performance improvement studies in a solar greenhouse dryer using sensible heat storage materials. Heat Mass Transf. 52 (2016) 459–67.

[70] O. Prakash, A. Kumar, V. Laguri, Performance of modified greenhouse dryer with thermal energy storage. Energy Reports, 2 (2016) 155–62.

[71] M. Belloulid, H. Hamdi, L. Mandi, N. Ouazzani, Solar greenhouse drying of waste water sludges under arid climate. Waste Biomass- Valorization, 8 (2017) 193–202.

[72] V. P. Sethi, S. Arora, Improvement in greenhouse solar drying using inclined north wall reflection. Solar Energy, 83 (2009) 1472–84.

[73] H. Amadou, Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, (2007).

[74] C.L. Hii, S.V. Jangam, S.P. Ong, A.S. Mujumdar, Solar Drying: Fundamentals,

Applications and Innovations, ISBN International Standard Book Number, 978–981–07–3336–0 (2012).

[75] A. Kumar, G.N. Tiwari, Thermal modeling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery : an experimental validation. Solar Energy, 80 (2006) 1135–44.

[76] D. Jain, G.N. Tiwari, Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection I : Evaluation of convective mass transfer coefficient. Energy Conversion and Management, 45 (2004) 765–783.

[77] J. E. Berinyuy, J. K. Tangka, G. M. Weka Fotso, Enhancing natural convection solar drying of high moisture vegetables with heat storage. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 1(14) (2012) 141–148.

[78] A. Farhat, S.Kooli, , C. Kerkeni, M. Maalej, A. Fadhel, A. Belghith, Validation of a Pepper Drying Model in a Polyethylene Tunnel Greenhouse. International Journal of Thermal Sciences, 43 (2004) 53–58.

[79] P. Gbaha, H. Yobouet Andoh, J. Kouassi Saraka, B. Kaménan Koua, S. Touré, Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow. Renewable Energy, 32 (2007) 1817–1829.

[80] T. Koyuncu, An Investigation on the performance Improvement of greenhouse- type agricultural dryers. Renewable Energy, 31 (2006) 1055–71.

[81] M. A. Hossain, B. K. Bala, Drying of Hot Chilli Using Solar Tunnel Drier. Solar Energy, 81 (2007) 85–92.

[82] S. Kooli, A. Fadhel, A. Farhat, A. Belghith, Drying of red pepper in open sun and greenhouse conditions : Mathematical modeling and experimental validation. Journal of Food Engineering, 55 (2007) 1094–1103.

[83] P. Barnwal, G. N. Tiwari, Grape Drying by Using Hybrid Photovoltaic-Thermal (PV/T) Greenhouse Dryer: An Experimental Study. Solar Energy, 82 (2008) 1131–1144.

[84] S. Janjai, P. Intawee, J. Kaewkiew, C. Sritus, V. Khamvongsa, A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover : modelling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. Renewable Energy, 36 (2011) 1053–1062.

[85] J. Srikiatden, J. S. Roberts, Moisture transfer in solid food materials: a review of mechanisms, models, and measurements. International Journal of Food Properties, 10(4) (2007) 739–777.

[86] L. Remache, A. Belhamri, Modélisation du séchage par convection. Revue des Energies Renouvelables CISM'08 Oum El Bouaghi, (2008) 289–297.

[87] T. K. Sherwood, The drying of solid. Industrial and engineering chemistry, 21 (1929) 12–16.

[88] S. Whitaker, W. T-H Chou, Drying granular porous media: theory and experiment. Drying technology, (1983) 3–33.

[89] V.B.-C. Gustavo, V.-M. Humberto, , Dehydration of foods. Chapman & Hall, New York, (1996) p339.

[90] A. Chareau, R. Cavaillé, Théorie et calculs. Techniques de l'Ingénieur, J2480, (1995) 25p.

[91] B. Zeghmati, Modélisation informatique d'un séchoir a effet de serre pour fruits et legumes. These doctorat, Université de perpignan, (1981).

[92] H. Amir, G.Le Palec, M. Daguenet, Séchage superficiel d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud : Couplage entre les équations de transfert dans le matériau et celles de la couche limite. International Journal of Heat Mass Transfer, 6 (30) (1987) 1149–1158,

[93] A. Hamed, Séchage d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud : Couplage entre les équations de transfert dans le matériau et celles de la couche limite, Application au séchage solaire du bois. Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, (1985).

[94] A. Bennis, Transferts de chaleur et de masse lors du séchage du liège par convection forcée. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad de Marrakech, (1997).

[95] A. Touhami, Etude de séchage d'un cylindre annulaire poreux humide sous l'action d'un courant d'air force dans le conduit central : Couplage entre les équations de Luikov et celles de la couche limite, Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, (1990).

[96] H. Ben Aissia, S. Ben Nasrallah, L. Gharbi, Etude numérique des transferts bidimensionnels de chaleur et de masse lors du séchage convectif des matériaux de construction. JITH, (1993) 512– 518.

[97] L. Bossart, Contribution à l'optimisation du séchage en lit fluidisé. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles. Brussels, (2006).

[98] E. K. Akpinar, Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. Journal of Food Engineering, 73(1) (2006) 75–84.

[99] D. B Brooker, , F. W. Bakker Arkema, C.W. Hall, Drying Cereal Grains. AVI Publishing Company, (1974).

[100] M. Parti, Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers. Journal of Agricultural Engineering Research, 54(4) (1993) 339–352.

[101] M. Özdemir, Y. Onur Devres, The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting, Journal of Food Engineering. 42(4) (1999) 225–233.

[102] S. Pabis, D. S. Jayas, S. Cenkowski, Grain Drying, Theory and Practice. John Wiley and Sons Inc, (1998).

[103] J. L Parry, Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying : A review, Journal of Agricultural Engineering Research, 32(1) (1985) 1–29.

[104] R. B. Keey, Drying principles and practice. Oxford: Pergamon Press, (1972) p 402.

[105] Z. F. ErbayIcier, A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 50(5) (2010) 441–464.

[106] K. Sacilik, A . K. Elicin, The thin layer drying characteristics of organic apple slices. Journal of Food Engineering, 73 (2006) 281–289.

[107] İ. Doymaz, Convective air drying characteristics of thin layer carrots. Journal of Food Engineering, 61(3) (2004) 359–364.

[108] Z. Erbay, F. Icier, A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 5 (50) (2010) 441– 464.

[109] E. K. Akpinar, Y. Bicer, C. Yildiz, Thin layer drying of red pepper. Journal of Food Engineering, 59(1) (2003) 99–104.

[110] İ. T. Toğrul, D, Pehlivan, Modelling of drying kinetics of single apricot. Journal of Food Engineering, 58(1) (2003) 23–32.

[111] J. Shi, Z.Pan, T. H. McHugh, D. Wood, E. Hirschberg, D. Olson, Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. LWT-Food Science and Technology, 41(10) (2008) 1962–1972.

[112] E. Rafiee, S. Keyhani, Evaluation and selection of thin-layer models for drying kinetics of apricot (cv. NASIRY). Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 12(2) (2010) 111–116.

[113] Y. H. Hui, C. Clary, M. M. Farid, O. O. Fasina, A. Noomhorm, J. Welti-Chanes, Food Drying, Science and Technology. DES tech Pub. Inc., PA, USA (2008).

[114] A. Fick, Ueber Diffusion. Annalen der Physik, 170 (1855) 59–86.

[115] K. Allaf, S.Mounir, T. Alaff, Swell-drying : séchage et texturation par DIC des végétaux. Techniques de l'Ingénieur, (2012).

[116] J. Crank, the Mathematics of Diffusion. 2nd Edition, Oxford University Press, 1975.

[117] S. Devahastin, Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying. Exergex Corporation, Canada, (2000).

[118] H. S. Akhijahani, A. Arabhossein, Accelerating drying processof tomato slices in a PV-assisted solar dryer using a sun tracking system. Renewable Energy, 123 (2018) 428–438.

[119] S. Ben Mabrouk, A. Belghith, Numerical simulation of the drying of deformable material: Evaluation of the diffusion coefficient. Drying Technology, 13(8/9) (1995) 1789–1805.

[120] J. Srikiatden, J.S. Roberts, Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. Journal of Food Engineering, 74 (2006) 143–152.

[121] K. Sacilik, Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (Cucurbita pepo L.). Journal of Food Engineering, 79(1) (2007) 23–30.

[122] A. Vega, E. Uribe, R. Lemus, M. Miranda Hot-air drying characteristics of aloe vera (Aloe barbadensis) and influence of temperature on kinetic parameters. LWT-Food Science Technology, 40 (2007) 1698–707.

[123] M. Aghbashlo, M. H. Kianmehr, H. Samimi-Akhijahani, Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). Energy Conversion and Management, 49(10) (2008) 2865–71.

[124] I. L. Pardeshi, S. Arora, P.A. Borker, Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model. Drying Technology, 27(2) (2009) 288–95.

[125] N. E. Perez, M. E. Schmalko, Convective drying of pumpkin: influence of pretreatment and drying temperature. Journal of Food Processing and Engineering, 32(1) (2009) 88–103.

[126] I. Doymaz, Evaluation of mathematical models for prediction of thin-layer drying of banana slices. International journal of food properties, 13(3) (2010) 486–97.

[127] R. P. F. Guin´e, S. Pinho, M. J. Barroca, Study of the convective drying of pumpkin (Cucurbita maxima). Food Bioprod. Process, 89(4) (2011) 422–8.

[128] H. G. Unal, K. Sacilik, Drying characteristics of hawthorn fruits in a convective hot-air dryer. Journal of food processing and preservation, 35(2) (2011) 272–9.

[129] N. Kumar, B. C. Sarkar, H. K. Sharma, Mathematical modeling of thin-layer hot air drying of carrot pomace. Journal of Food Science and Technology, 49(1) (2012) 33–41.

[130] E. O. Akoy, Experimental characterization and modeling of thin-layer drying of mango

slices. International Food Research Journal, 21(5) (2014) 1911–1917.

[131] D. A. Tzempelikos, A. P. Vouros, A. V. Bardakas, A. E. Filios, D. P Margaris, Case studies on the effect of the air drying conditions on the convective drying of quinces. Case studies thermal engineering, 3 (2014) 79–85.

[132] W. P. Da Silva, A. F. Rodrigues, C. M. D. P. S. Silva, D. S. De Castro, J. P. Gomes, 2015. Comparison between continuous and intermittent drying of whole bananas using empirical and diffusion models to describe the processes. Journal of Food Engineering, 166 (2015) 230–236.

[133] M. Vasić, Z. Radojević Ž. Grbavčić, Calculation of the effective diffusion coefficient during the drying of clay samples. journal of the Serbian Chemical Society, 77(4) (2012) 523–533.

[134] J. Saxena, K. K. Dash. Drying kinetics and moisture diffusivity study of ripe jackfruit. International Food Research Journal, 22(1) (2015) 414–20.

[135] Parlement Européen. Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives (Texte présentant d'intérêt pour l'EEE). Journal Officiel de l'Union européenne, (2008) 3–30.

[136] A. Link, F. Balaguer, A. Goel, Cancer chemoprevention by dietary polyphenols : Promising role for epigenetic. Biochemical Pharmacology, 80 (12) (2010) 1771–1792.

[137] Ademe, Les coproduits d'origine végétale des industries agroalimentaires, Ademe Edition, (2000) p76.

[138] J. Proot, Les technologies propres appliquées aux industries agroalimentaires. Aris. T, Bourgone, (2002) p12.

[139] S. G. Villas-Bôas, E. Esposito, M. M. de Mendonça, Bioconversion of apple pomace into a nutritionally enriched substrate by Candida utilis and Pleurotus ostreatus. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 19(5) (2003) 461–467.

[140] V. K. Joshi, D. K. Sandhu, Preparation and evaluation of an animal feed byproduct produced by solid-state fermentation of apple pomace. Bioresource Technology, 56(2–3) (1996) 251–255.

[141] R. Pirmohammadi, Y. Rouzbehan, K. Rezayazdi, , M. Zahedifar, Chemical composition, digestibility and in situ degradability of dried and ensiled apple pomace and maize silage. Small Ruminant Research, 66(1-3) (2006) 150–155.

[142] C.G. Grigoras, Valorisation des fruits et des sous-produits de l'industrie de transformation des fruits par extraction des composes bioactifs. Agricultural sciences. Université d'Orleans; Université Vasile Alecsandri de Bacau, French, (2012).

[143] S. M. Schaub, J. J. Leonard, Composting: An alternative waste management option for food processing industries. Trends in Food Science & Technology, 7(8) (1996) 263-268.

[144] E. Koller, Traitement des pollutions industrielles. Dunod, Paris, (2009).

[145] O. Stabnikova, J. Y. Wang, H. Bo Ding, H.Joo, Biotransformation of vegetable and fruit processing wastes into yeast biomass enriched with selenium. Bioresource Technology, 96(6) (2005) 747–751.

[146] I. Van Heerden, C. Cronje, S.H. Swart, J. M. Kotze, Microbial, chemical and physicalaspects of citrus waste composting. Bioresource Technology, 81 (2002) 71–76.

[147] H. R. Srilatha, , K. Nand, K. S. Babu, Madhukara, K. Fungal pretreatment of orange processing waste by solid-state fermentation for improved production of methane. Process Biochemistry, (30) (1995) 327–331.

[148] S. Elmaleh, M. B. Defrance, C. Ghommidh, Organic acids oxidation by Candida utilis : application to industrial waste water treatment. Process Biochemistry, 35 (1999) 441–449.

[149] P. S. Nigam , A. Singh, Production of liquid biofuels from renewable resources. Progress in Energy and Combustion Science, 37(1) (2011) 52–68.

[150] K. Vijayaraghavan, D. Ahmad, C. Soning, Bio-hydrogen generation from mixed fruit peel waste using anaerobic contact filter. International Journal of Hydrogen Energy, 32(18) (2007) 4754–4760.

[151] F. J. Callaghan, D. A. J. Wase, K. Thayanithy, C. F. Forster, Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. Biomass and Bioenergy, 22(1) (2002) 71–77.

[152] X. Feng, H. Wang, Y. Wang, X. Wang, J. Huang, Biohydrogen production from apple pomace by anaerobic fermentation with river sludge. International Journal of Hydrogen Energy, 35(7) (2010) 3058–3064.

[153] H. Wang, J. Wang, Z. Fang, X. Wang, H. Bu, Enhanced bio-hydrogen production by anaerobic fermentation of apple pomace with enzyme hydrolysis. International Journal of Hydrogen Energy, 35(15) (2010) 8303–8309.

[154] T. Doi, H. Matsumoto, J. Abe, S. Morita, Application of rice rhizosphere microflora for hydrogen production from apple pomace. International Journal of Hydrogen Energy, 35(14) (2010) 7369–7376.

[155] G. Royer, E. Madieta, R. Symoneaux, F. Jourjon, Preliminary study of the production of apple pomace and quince jelly. LWT-Food Science and Technology, 39(9) (2006) 1022–1025.

[156] S. Bhushan , V. K. Joshi, Baker's yeast production under fed batch culture from apple pomace. Journal of Scientific and Industrial Research, 65 (2006) 72–76.

[157] Citrus: World Markets and Trade. Foreign Agriculture Service, USDA United States, Department of Agriculture, (2010).

[158] B. Göhl, Citrus by-products for animal feed. In: Ruminant nutrition: selected articles from the World Animal Review, FAO (1978).

[159] N. Rihani, Valeur alimentaire des sous-produits des agrumes en alimentation animale, Options méditerranéennes. Série séminaires, 16 (1991) 113–117.

[160] E. Grant, Citrus world. Angus Journal, (2007) 234–23.

[161] B. Göhl, Les aliments du bétail sous les tropiques. FAO, Division de Production et Santé Animale, Roma, Italy 1982.

[162] M.M. Tripodo, F. Mondello, F. Lanuzza, G. Micali, Citrus waste recovery to obtain mucilage and animal feeding, Forum Ware International 1, FORUM WARE, the international journal for Commodity Science and Technology, issued by the German and Austrian Societies of Commodity Science and Technology, Wien, Austria (2008).

[163] Fruits et sous produits. Feedipedia, un programme par l'INRA, le CIRAD, AFZ et de la FAO. http:// www.feedipedia.org. Consulté le 20 octobre 2018.

[164] V.A. Bampidis, P. H Robinson, Citrus by-products as ruminant feeds: A review. Animal Feed Science Technology, 128 (2006) 175–217.

[165] M. Villareal, R. C. Cochran, A. Rojas-Bourrill, O. Murillo, H. Muñoz, M. Poore, Effect of supplementation with pelleted citrus pulp on digestibility and intake in beef cattle fed a tropical grass-based diet (Cynodon nlemfuensis). Animal Feed Science Technology, 125 (2006) 163–173.

[166] R. Crawshaw, Co-product feeds: animal feeds from the food and drinks industries. Nothingham University Press, (2004).

[167] J. D Arthington, W. E. Kunkle, A. M. Martin, Citrus pulp for cattle. Veterinary Clinics Food Animal, 18 (2002) 317–326.

[168] A. Barrios-Urdaneta, M. Fondevila, C. Castrillo, Effect of supplementation with different proportions of barley grain or citrus pulp on the digestive utilization of ammonia-treated straw by sheep. Animal Science, 76 (2003) 309–317.

[169] Tomato News, about the tomato processing industry. Mediterranean Association of the Processing Tomato Industry (AMITOM), (2010).

[170] M. R. Ventura, M. C Pieltin, J. I. R.Castanon, Evaluation of tomato crop by-products as feed for goats. Animal. Feed Science Technology, 154 (2009) 271–275.

[171] M. del Valle, M. Cámara, M. E. Torija, The nutritional and functional potential of tomato by-products, ISHS Acta Horticulturae 758: X International Symposium on the Processing Tomato, (2007).

[172] F. Cotte, , Study of the feeding value of tomato pulp for ruminant. Thèse, Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Thèse 171 (2000) p142.

[173] A. Aghajanzadeh-Golshani, N. Maheri-Sis, A. Mirzaei-Aghsaghali, A. Baradaran-Hasanzadeh, Comparison of nutritional value of tomato pomace and brewer's grain for ruminants using in vitro gas production technique. Asian Journal of Animal and Veterinary Advances, 5 (1) (2010) 43–51.

[174] Poore, Alternative feeds for beef cattle during periods of low forage availability. North Carolina State University, North Carolina Cooperative Extension Service, Department of Animal Science (2008).

[175] R.R. Caluya, R.R. Sair, G.M.R. Recta, B B. Balneg, Tomato pomace as feed for livestock and poultry. Mariano Marco State University, (2003).

[176] N. Denek, A. Can, Feeding value of wet tomato pomace ensiled with wheat straw and wheat grain for Awassi sheep. Small Ruminant Research, 65(3) (2006) 260–265.

[177] R. Safari, R.Valizadeh, F. Efteljaro Shahroudi, A. Tahmasebi, J. Bayat, 2007, Effects of dried and ensiled tomato pomace on dry matter intake, milk yield and composition of dairy cows in Iran. Proceedings of the British Society of Animal Science, (2007) Southport :240.

[178] N. G. Belibasakis, The effect of dried tomato pomace on milk yield and its composition and on some blood plasma biochemical components in the cow. World Review of Animal Production, 25 (3) (1990) 39–42.

[179] C. Yuangklang, K. Vasupen, P. Srenanul, S. Wongsutthavas, J. Mitchaothai, Effect of utilization of dried tomato pomace as roughage source on feed intake, rumen fermentation and blood metabolites in beef cattle. Proceedings of the 44th Kasetsart University Annual Conference, Animals, Veterinary Medicine, (2006)158–166.

[180] C. Yuangklang, K. Vasupen, S. Wongsuthavas, S. Bureenok, P. Panyakaew, A. Alhaidary, H. E. Mohamed, A. C. Beynen, Effect of replacement of soybean meal by dried tomato pomace on rumen fermentation and nitrogen metabolism in beef cattle. Intrnational Journal of Agriculture and Biological Sciences, 5(3) (2010) 256–260.

[181] A. Paryad, M. Rashidi, Effect of yeast (Saccharomyces cerevisiae) on apparent digestibility and nitrogen retention of tomato pomace in shee. Pakistan Journal of Nutrition, 8(3) (2009) 273–278.

[182] T. Baumgärtel, H. Kluth, K. Epperlein, M. Rodehutscord, A note on digestibility and energy value for sheep of different grape pomace. Small Ruminant Research, 67 (2007) 302–306.

[183] D.I. Givens, W.P. Barber, Nutritive value of apple pomace for ruminants, Animal Feed Science and Technology. 16(4) (1987) 311–315.

[184] F. Kafilzadeh, G. Tassoli, A. Maleki, Kinetics of digestion and fermentation of apple pomace from juice and puree making. Research Journal of Biological Science, 3(10) (2008) 1143–1146.

[185] K. Kołodziejczyk, J. Markowski, M. Kosmala, B.Król, W. Płocharski, Apple pomace as a potential source of nutraceutical products. Polish. Journal of Food and Nutrition Sciences, 5 (4 B) (2007) 291–295.

[186] Shalini, R.; Gupta, D. K., Utilization of pomace from apple processing industries: a review. J. Food Sci. Technol., 47 (4) (2010) 365–371

[187] A. M. Leroy, S. Z. Zelter, Recherches sur l'efficacité alimentaire des marcs de pomme fermiers. 1. Etude de la variabilité de composition chimique et de valeur nutritive des marcs de pomme fermiers frais, Annales de zootechnie. INRA/EDP Sciences, 3(1) (1954) 17–27.

[188] M. Wadhwa, M. P. S. Bakshi, H. P. S. Makkar, Utilization of fruit and vegetable wastes as livestock feed and as substrates for generation of other value-added products. FAO (2013).

[189] B. Gullón, E. Falqué, J. L. Alonso, J. C. Parajó, Evaluation of apple pomace as a raw material for alternative applications in food industries. Food Technology and Biotechnology, 45(4) (2007) 426–443.

[190] M. Kennedy, D. List, Y. Lu, L. Y. Foo, R. H. Newman, I. M. Sims, P. J. S. Bain, B. Hamilton, G. Fenton, Apple pomace and products derived from apple pomace : uses, composition and analysis. In : Linskens, H. F.; Jackson, J. F., Modern Methods of Plant Analysis. Analysis of plant waste materials, 20 (1999) 75–113.

[191] S.G. Villas-BÔas, E. Esposito, M. Matos de Mendonça, Bioconversion of Apple pomace into a nutritionally substrate by Candida utilis and Pleurotus ostreatus. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 19 (200) 461–467.

[192] D. Sauvant, D.R. Meschy, D. Mertens, Les composantes de l'acidose ruminale et les effets acidogènes des rations, INRA. Production of Animal, 12 (1999) 49–60.

[193] T. S. Rumsey, K. P. Bovard, J. P. Fontenot, R. R. Oltjen, B. M. Priode, Supplementation of apple pomace with nonprotein nitrogen for gestating beef cows. IV. Pesticide

accumulation. Journal of Animal Science, 45(3) (1977) 543–55.

[194] G. Taasoli, F. Kafilzadeh, Effects of dried and ensiled apple pomace from puree making on performance of finishing lambs. Pakistan Journal of Biological Sciences, 11(2) (2008) 294–297.

[195] X. Alibes, F. Muñoz, J. Rodriguez, Feeding value of apple pomace silage for sheep. Animal Feed Science and Technology, 11(3) (1984) 189–197

[196] M. M. Tripodo, F. Lanuzza, G. Micali, R. Coppolino, F. Nucita, Citrus waste recovery : a new environementally freindly procedure to obtain animal feed. Bioresource Technology, 91 (2004) 111–115.

[197] A. Aghajanzadeh- Golshani, N. Maheri-Sis, A. Mirzaei, A. Baradara-Hasanzadeh, Comparison of Nutritional Value of tomato pomace and brewer's grain for ruminant using in vitro gas production technique. Asian Journal of Animal and Veterinary Advances, (2010) 1–9.

[198] H. Ben Salem, H.P.S. Makkar, A. Nefzaoui. Towards better utilisation of non-conventional feed sources by sheep and goats in some African and Asian countries, Laboratoire des Productions Animales et Fourragères. INRA- Tunisie, (2001) 177–187.

[199] A. Michel Wattiaux, Composition et analyse des aliments. L'Institut Babcock pour la Recherche et le Développement International du Secteur Laitier, Université du Wisconsin à Madison, USA, (1992).

[200] L. Marnay, P.Doligez, C. Trillaud Geyl, Les aliments - L'analyse chimique des fourrages. Les Haras nationaux (2014).

[201] P.J. Van Soest, R.H. Wine, Use of detergent analysis of fibrous feeds, IV. Determination of plant cell- wall constituents. J. Ass. Off. Anal. Chem., 50 (1967) 50–56.

[202] S. Ampuero, Détermination de la teneur en fibres des aliments pour animaux à ALP. ALP Posieux, (2008) 1–5.

[203] M. Lila, V. Furstoss, L'utilisation de la spectrométrie dans le proche infrarouge pour l'évaluation de la qualité des fourrages. Fourrages, 161 (2000) 69–81.

[204] K.H. Nourris, R.F. Barnes, J.E. Moore, J.S. Shenk , Predicting forage quality by infrared reflectante spectroscopy. Journal of Animal Science, 43 (1967) 889–897.

[205] R. Arhab, Etude de la fermentescibilit in vitro et de la digestibilité in vivo de végétaux des zones arides et de sous produits de l'agronomie saharienne par l'estimation de l'activité métabolique du microbiote ruminal d'ovins. Thèse de Doctorat d'Etat. ISN. Université de Constantine, Algérie (2007).

[206] E. Donefer, P.J. Niemann, E.W. Crampton, L.E. Lioyd, Dry matter disappearance by

enzymzs and aqueous solution to predict the nutritive value of fourages. Journal of Dairy Science, 46 (1963) 965–970.

[207] Tilley J.M.A andTerry R.A. A two stage technique for in vitro digestion of forage crops. Journal British Grassland Society, 18 (1963) 104–111

[208] AMOKRANE Serine, Etude des prétraitements microbiologiques des résidus agro-alimentaires lignocellulosiques en vue de leur valorisation en alimentation animale. Mémoire de magister, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Mentouri Constantine, Algérie (2010).

[209] A P. Singh, V. Shrivastavaa, A. Kumarb, Recent developments in greenhouse solar drying: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (2018) 3250–3262.

[210] E. A. Arinze, G. J. Schoenau, S. Sokhansanj, Design and experimental evaluation of a solar dryer for commercial high quality-hay production. Renewable Energy, 16 (1999) 639–642.

[211] A. Nandakumar, S. Dhanushkodi, K. Panner Selvam, K. Sudhakar , performance study of forced convection solar dryer with reflector. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 9(6) (2018) 784–791.

[212] N. Laskri, O. Hamdaoui, N. Nedjah, Anaerobic digestion of waste organic matter and biogas production. Journal of Clean Energy Technology, 3(3)2015.

[213] S. Marie-Pierre, Méthodes officielles pour l'analyse des boues d'épuration: panorama et analyse comparée des méthodes. Rapport AQUAREF, (2012) p69.

[214] C. Vahlberg, E. Nordell, L. Wiberg, A. Schnürer, , Method for correction of VFA loss in determination of dry matter in biomass. Rapport C SGC (2013) 273.

[215] L.M. Diamente, P.A. Munro, Mathematical modeling of thin layer solar drying of sweet potato slices. Solar Energy, 51 (1993) 271–276.

[216] I. Doymaz, Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples. Food and bioproducts processing, 88 (2010) 124–132.

[217] A. Koukouch, A. Idlimam, M. Asbik, B. Sarh, B. Izrar, A. Bah, O. Ansari, Thermophysical characterization and mathematical modeling of convective solar drying of raw olive pomace. Energy Conversion and Management, 99 (2015) 221–230.

[218] G. Çakmak, C. Yildiz , The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. Food and bioproducts processing, 89 (2011) 103–108.

[219] A.A. El-Sebaii, S.M. Shalaby, Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. Energy Conversion and Management, 74 (2013) 109–116.

[220] N. Boudhrioua, M. Kouhila, N. Kechaou, Experimental and mathematical investigations of convective solar drying of four varieties of olive leaves. Food and bioproducts processing, 86 (2008) 176–184.

[221] E. Akpinar, A. Midilli, Y. Bicer, Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. Energy Conversion and Management, 44 (2003) 1689–1705.

[222] N. A. Akgun, I. Doymaz , Modelling of olive cake thin-layer drying process, Journal of Food Engineering . 68 (2005) 455–461.

[223] I. Doymaz, Sun drying of figs : an experimental study. Journal of Food Engineering, 71 (2005) 403–407.

[224] E.K. Akpinar, Y. Bicer, Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. Energy Conversion and Management, 49 (2008) 1367–1375.

[225] U. Tawon, L. Charoenporn, P. Nattapol, W. Lamul, S. Sirithon, S. Somchart, Thin layer solar drying characteristics of silkworm pupae. Food and bioproducts processing, 88 (2010) 149–160.

[226] S. Boughali, H. Benmoussa, B. Bouchekima, D. Mennouche, H. Bouguettaia, D. Bechki, Crop drying by indirect active hybrid solar–Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. Solar Energy, 83 (2009) 2223–2232.

[227] B. Ameri, S. Hanini, A. Benhamou, D. Chibane, Comparative approach to the performance of direct and indirect solar drying of sludge from sewage plants, experimental and theoretical evaluation. Solar Energy, 159 (2018) 722–732.

[228] A.O.A.C, Official Methods of Analysis, 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, AOAC, Arlington, VA (1990).

[229] Détermination de la teneur en protéines brutes (Aliments des animaux – crème glacée). Agence fédérale pour la Sécurité de la Chaîne alimentaire, 10 (2012).

[230] SOXTHERM® extraction rapide, C. Gerhardt GmbH & Co. KG Cäsariusstr. 97 D-53639 Königswinter, (2012).

[231] H. El knidri, Mise en place et validation des indicateurs de la qualité de cuisson Du soja et du dosage du calcium Dans l'alimentation animale, Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques, Master ST CAC Agiq, Faculté des Sciences et Techniques – Fès, Maroc (2010)

[232] Détermination de la teneur en cellulose brute dans les aliments pour animaux. Agence fédérale pour la Sécurité de la Chaîne alimentaire, 06 (2012)

[233] ISO 833-1, Microbiology of the food chain — Horizontal method for the enumeration of microorganisms, (2013).

[234] ISO 6579-1, Microbiology of the food chain — Horizontal method for the detection, enumeration and serotyping of Salmonell, (2017).

[235] ISO 21527-2, Microbiology of food and animal feeding stuffs — Horizontal method for the enumeration of yeasts and moulds, (2008).

[236] NF V08-060. Microbiologie des aliments. Dénombrement des coliformes thermotolérants par comptage des colonies obtenues à 44°C, (2009).

[237] J. Wilson, Microscopical methods for examining frozen foods, Bald WB. Food Freezing : today and tomorrow. London: Springer, (1991) 97–112.

[238] J.M. Aguilera, D.W. Stanley, K.W. Baker, New dimensions in microstructure of food products. Trends in Food Science and Technology, 11 (2000) 3–9.

[239] P. M. Falcone, A. C. Baiano, L. Mancini, G. Tromba, F. Zanini, M. Del Nobile, Imaging techniques for the study of food microstructure : A review, Taylor SL. Advances in food and nutrition research, 51 (2006) 205–263.

[240] J. M. Aguilera, D.W. Stanley, Examing food microstructure. Microstructural principles of food processing and engineering. 2nd ed. Gaithersburg, Md : Aspen Publishers Inc; (1999) 1–70.

[241] D. N. Holcomb, M. Kalab (Eds.), Studies of food micro-structure. O'Hare: Scanning Electron Microscopy, 1981.

[242] I. Heertje, Microstructural studies in fat research. Food Structure, 12(1) (1993) 77–94.

[243] D. N. Holcomb, Food microstructure-cumulative index. Food Structure, 9(3) (1990) 155–173.

[244] J.A. Sargent, The application of cold stage scanning electron microscopy to food research. Food Microstructure, 7(2) (1988) 123– 135.

[245] B. James, Advances in wet electron microscopy techniques and their application to the study of food structure. Trends in Food Science and Technology, 20 (2009) 114–124.

[246] M. Das Purkayastha, A. Nath, B. Deka, C. Mahanta, Thin layer drying of tomato slices. Journal of Food Science and Technology, (2011) 1–12.

[247] M. Kumar, S. K. Sansaniwal, P. Khatam, Progress in solar dryers for drying various commodities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55 (2016) 346–360.

[248] A. Belghit, M. Kouhila, B. C. Boutaleb, Experimental Study of Drying Kinetics by Forced Convection of Aromatic Plants. Energy Conversion and Management, 41(12) (2000) 1303–1321.

[249] S. Bellagha, E. Amami, A. Farhat, N. Kechaou, Drying Kinetics and Characteristic Drying Curve of Lightly Salted Sardine (Sardinella Aurita). Drying Technology, 20(7) (2002) 1527–1538.

[250] S. Boughali , B. Bouchekima, N. Nadir, D. Mennouche, H. Bouguettaia, D. Bechki, Expérience du séchage solaire dans le Sahara septentrional est algérien. Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger, (2008) 105–110.

[251] E.A. Almuhanna. Utilization of a solar greenhouse as a solar dryer for drying dates under the climatic conditions of the eastern province of Saudi Arabia. Journal of Agricultural Science 2(4) (2012)237–46.

[252] P. Nidhi, A. Verma, Review Paper on Solar Greenhouse Dryer, IOSR. Journal of Mechanical and Civil Engineering. Special Issue - AETM', 16(2) (2016) 43–48.

[253] M. Parti, Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers. Journal of Agricultural Engineering Research, 54(4) (1993) 339–352.

[254] R.B. Keey, Drying principles and practice. Pergamon Press, Oxford, (1972) 402.

[255] M. Özdemir, Y. Onur Devres, The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. Journal of Food Engineering., 42(4) (1999) 225–233.

[256] A. Taheri-Garavand, S. Rafiee, A. Keyhani, Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of tomato influence of air dryer conditions. International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies. 2 (2011) 147–160.

[257] A. Midilli, Determination of pitachio drying behaviour and conditions in solar drying system. International Journal of Energy Research, 25(8) (2001) 715–725.

[258] Z. Wang, J. Sun, X. Liao, F. Chen, G. Zhao, J. Wu, X. Hu, Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. Food Res Int., 40 (2007) 39–46.

[259] I. Doymaz, Sun drying of seedless and seeded grapes. Journal of Food Science and Technology, 9(2) (2012) 4214–20.

[260] R. V. Dandamrongrak, G. Young, R. Mason, Evaluation of pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. Journal of Food Engineering, 55 (2002) 139–146.

[261] I. Hamdi, S. Kooli, A. Elkhadraoui, Z. Azaizia, F. Abdelhamid, A guizani, Experimental study and numerical modeling for drying grapes under solar greenhouse. Renewable Energy, 127 (2018) 936–9460.

[262] E. K. Akpinar, Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun : Modelling, performance analyses. Energy Conversion and Management, 51 (2010) 2407–2418.

[263] C. kara, I. doymaz, Thin layer drying kinetics of by-products from pomegranate juice

processing. Journal of Food Processing and Preservation, 39 (5) (2015) 480–487.

[264] S. Ben Mariem, S. Ben Mabrouk, Drying Characteristics of Tomato Slices and Mathematical Modeling, International Journal of Energy Engineering. 4(2A) (2014) 17–24.

[265] O. İsmail, A.K. Figen, S. Pişkin, Effects of open-air sun drying and pre–treatment on drying characteristics of purslane (Portulaca oleracea L.). Heat Mass Transfer, 51(2015) 807–813.

[266] C.S. Ethmane Kane, A. Jamali, M. Kouhila, A. Mimet, M. Ahachad, Single-Layer Drying Behavior of Mexican Tea Leaves (Chenopodium Ambrosioides) in a Convective Solar Dryer and Mathematical Modeling. Journal of Chemical Engineering Communications, 195(7) (2008) 787–802.

[267] V. T. Karathanos, G. Villalobos, G. D. Saravacos, Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. Journal of Food Science, 55 (1) (1990) 218–223.

[268] G. P. Sharma, S. Prasad, Effective moisture diffusivity of a garlic cloves undergoing microwave convective drying. Journal of food engineering, 65 (2004) 609–617.

[269] K. Sacilik, R.Keskin, A. K. Elicin, Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. Journal of Food Engineering, (2006) 73(3) 231–238.

[270] A. Benhamou, A. Idlimam, A. Lamharrar, B. Benyoucef, M. Kouhila, Diffusivité hydrique et cinétique de séchage solaire en convection forcée des feuilles de marjolaine. Revue des Energies Renouvelables, 11 (2008) 75–85.

[271] A. Koukouch, A. Idlimam, M. Asbik, B. Sarh, B. Izrar, S. Bostyn, A. Bah, O. Ansari, O. Zegaoui, A. Amine, Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste. Renewable Energy, 101 (2017) 5655–74.

[272] N. P. Zogzas, Z. B. Maroulis, D. Marinos-Kouris, Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. Drying technology, 14 (10) (1996) 2225–225.

[273] Tomato: sun dried, dehydrated, spray dried and flavor. ECOM Canada Ingredients. http://ecomcanada.com/tomato.html. Consulté le 4 décembre 2018.

[274] A. Mirzaei- Aghsaghali, N. Maheri- Sis, Nutritive value of some agroindustriel by-product for ruminants- A Review. World Journal of Zoology, 3 (2) (2008) 40–46.

[275] Y. M. Gallali, Y. S. Abujnah, F. K. Bannani,. Preservation of fruits and vegetable using solar dryer : a comparative study of natural and solar drying III; chemical analysis and sensory evaluation data of dried samples (grapes, figs, tomatoes and onions). Renewable

Energy, 12 (2000) 203–212.

[276] R. Valizadeh, S. Sobhanirad. The potential of agro- Industrial by-products as feed sources for livestock in Khosan Razavi providence of Iran. Journal of Animal and Veterinary Advances, 8 (11) (2009) 2375–2379.

[277] M. Besharati, A. Taghizadeh, H. Janmohammadi, G.A. Moghadam, Evaluation of some by-product using in situ and in vitro gas production techniques. American Journal of Animal and Veterinary Science, 3 (1) (2008) 7–12.

[278] J. Andrieu, C. Demarquilly, D. Sauvant Tables des valeurs nutritives des aliments. In : Alimentation des bovins, ovins et caprins, (Eds). INRA, Paris, (1988) 353–443.

[279] M. Megias Dolores, H. Fuenanta, J. Madrid, A. Martinez Fedding value, in vitro digestibility and in vitro gas production of different by-product for ruminant nutrition. Journal of Sciences Food and Agriculture, 82 (2002) 567–572.

[280] J. Martinez, H. Jordan, B. Chongo, N. Hernández, R.M. Pedraza, D. Fontes, Y. Lezcano, N. Cubilas, L. Sarduy, Some nutritive Characteristics of fresh grapefruit (Citrus paradisi cv. Marsh) peel kept in stowage. Cuban Journal of Agricultural Science, 42(1) (2008) 51–59.

[281] K. Monika, A. Brandi, L. David, Analyses of tomato peel and seed byproducts and their use as a source of carotenoids. Journal of Science Food and Agriculture, 85 (2005) 1166–1170.

[282] K. Oteng-Gyang, Introduction à la Microbiologie Alimentaire dans les Pays Chauds. Collection Technique et Documentation. Lavoisier: Paris, (1984) p260.

[283] Spécifications microbiologiques de certaines denrées alimentaires, journal officiel de la république algérienne 57 (1994).

[284] X. Xinde, Y.Shanjing, H. Ning, S.H. Bin, Measurement and influence factors of the flowability of microcapsules with high content β carotene. Chinese Journal of Chemical. Engineering, 15(4) (2007) 579–585.

[285] P. Correia, A. Leito, M.L. Beiro-da-Costa, The effect of drying temperatures on morphological and chemical properties of dried chestnuts flours. Food Engineering, 90 (2009) 325–332.

[286] G. Attanasio, L. Cinquanta, D. Albanese, M. Di Matteo, Effects of drying temperatures on physico-chemical properties of driedand rehydrated chestnuts (Castanea sativa). Food Chemistry, 88 (2004) 583–590.

[287] J.A. Sargent, Low temperature scanning electron microscopy: Advantages and application. Scanning Microscopy, 2 (1988) 835–849.

[288] C. Tortoe, J. Orchard, Microstructural changes of osmotically dehydrated tissues of apple, banana and potato, scanning. 28 (2006) 172–178.

[289] G.R. Askari, Z. Emam-Djomeh, M. Tahmasb, Effect of various drying methods on texture and color of tomato halves. Journal of Texture Studies, 40 (2009) 371–389.

[290] D. Witrowa-Rajcherta, M. Rzaca, Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples. Drying Technology, 27 (2009) 903–909.

[291] R. Thuwapanichayanan, S. Prachayawarakorn, J. Kunwisawa, S. Soponronnarit, Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. LWT–Food Science and Technology, 44 (2011) 1502–1510.

[292] A. Vega-Gálvez, M. Miranda, R. Clavería, I. Quispe, J. Vergara, E. Uribe, H. Paez, K. Di Scala, Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmo-treated jumbo squid (Dosidicus gigas). LWT–Food Science and Technology, 4 (2011) 16–23.