

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité : Energies renouvelables en mécanique

Par : Zair Manar & Abdelmoumene Fatima Zohra

Sujet

Optimisation des paramètres de séchage intermittent dans un nouveau séchoir de laboratoire à l'aide de la méthode des surfaces de réponses (MSR).

Soutenu publiquement, le 25 /06 /2025 , devant le jury composé de :

M/ KORTI Nabil	Prof	Université de Tlemcen	Président
M/ GUELLIL Hocine	MCA	Université de Tlemcen	Examinateur
Mme/ MOSTEFAOUI Amina	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
M/BENSEDDIK Abdelouahab	Prof	URAER- Ghardaïa	Encadreur

M/KHERRAFI Mohammed Abdebassit Dr
M/ SAIM Rachid Prof

Université de Tlemcen Encadreur
Université de Tlemcen Encadreur

Année universitaire : 2024 / 2025

Remerciements

Le présent travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de Master académique en énergies renouvelables, spécialité mécanique, au sein du département de génie mécanique. Il a été mené au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER) de Ghardaïa.

Nous remercions Allah, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé le courage, la détermination et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude au **Professeur Abdelouahab BENSEDDIK** ainsi qu'au **Professeur Daoud DJAMEL** pour leurs conseils avisés et leur soutien tout au long de la supervision de ce travail. Leur disponibilité constante, leurs multiples conseils et leur encadrement bienveillant ont été d'un apport précieux. Nous leur exprimons nos remerciements les plus sincères.

Nous adressons également nos vifs remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, ainsi que pour leurs observations pertinentes et enrichissantes.

Nos sincères remerciements vont à toute l'équipe de recherche en énergies renouvelables de l'URAER, dont la collaboration a été à la fois enrichissante et stimulante. Nous sommes reconnaissants d'avoir eu l'opportunité de travailler à leurs côtés.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance au doctorant **Issam HASRANE** pour son aide précieuse. Il nous a généreusement consacré de son temps et de son expertise, et ses contributions ont été déterminantes dans l'avancement de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à **Dr KHERRAFFI Mohammed** pour son assistance.

Je tiens à remercier chaleureusement **Dr MOSTEFAOUI Amina** et **Professeur SAIM Rachid** pour les efforts qu'ils ont fournis et leur accompagnement tout au long de cette période de notre projet de fin d'étude.

Enfin, nos remerciements les plus sincères s'adressent à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicace

À ceux qui, par leur amour, leur patience et leur foi en moi, ont rendu ce chemin possible...

À mon père, qui ne parle pas souvent, mais dont le regard dit tout. À sa force tranquille, à ses sacrifices silencieux, et à l'amour qu'il cache derrière chaque geste simple.

À ma mère, dont le sourire me suffit pour tenir debout. Elle est mon abri, mon souffle, celle qui a cru en moi même quand je doutais moi-même. À ses mains fatiguées, à ses prières murmurées... ce travail est pour elle, d'abord.

*À mes sœurs, **Nour** et **Marwa**, qui ont su être des bras tendus, des rires partagés, et parfois un refuge quand le monde devenait trop lourd.*

*À mon frère **Abdelhadi**, mon équilibre discret, celui qui dit peu, mais qui est toujours là, fidèle, solide, constant.*

*À **Manar**, ma complice de route dans cette mémoire, avec qui j'ai affronté les doutes, les longues heures, les questions sans fin... et les petits moments de victoire. Merci d'avoir été là, tout simplement.*

*À mes compagnons de l'université, **Wahiba**, **Amira**, **Houda**, **Rania**, **Mouloud**, **Ilyes**, et tant d'autres... Vous êtes les visages derrière mes plus beaux souvenirs. Merci pour les fous rires, les silences bienveillants, les cafés partagés, les regards qui disent « tu n'es pas seul ».*

*Et à ces âmes belles rencontrées sur le chemin, à **Ghardaïa** : **Houda**, **Wissal**, **Estabrak**, **Mouad**, **Ayoub**, et tous les autres que le hasard m'a offert. Vous m'avez accueilli(e) avec une chaleur que je n'oublierai jamais. Grâce à vous, une ville est devenue un cœur.*

À tous ceux qui m'ont soutenu(e), encouragé(e), écouté(e), même sans comprendre ce que je traversais... cette mémoire porte vos noms en filigrane.

Merci, de tout cœur. Ce n'est pas qu'un projet universitaire — c'est un morceau de moi, écrit avec vous.

Dédicace

Je dédie ce travail humblement :

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leur soutien moral et leurs prières incessantes. Sans eux, je ne serais pas celle que je suis aujourd'hui.

À mes frères et sœurs, pour leur affection, leur patience et leurs encouragements tout au long de ce parcours.

À mes enseignants et encadrants, pour leur accompagnement, leurs conseils précieux et leur disponibilité.

À mes amis fidèles, qui m'ont soutenue dans les moments difficiles et ont partagé avec moi cette belle aventure.

Enfin, à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce mémoire.

Manar

ملخص

تركز هذه الدراسة التجريبية على تحسين عملية التجفيف المتقطع للمنتجات الزراعية (البطاطس، الكوسة، والتفاح) من خلال الحفاظ على درجة حرارة ثابتة عند 50°C مع تغيير منهجي لسرعة الهواء (0.5-3 م/ث) ونسبة التقطيع (2-15). تم تنفيذ تصميم تجريبي دقيق لمدة 10 ايام باستخدام عينات موحدة (معدة مسبقاً ومقطعة بشكل متجانس) في مجفف مخبري. الهدف الرئيسي هو التحديد العلمي للقيم المثلى لسرعة الهواء ونسبة التقطيع التي تقلل بشكل متزامن زمن التجفيف والاستهلاك الطاقوي. توفر النتائج معايير حاسمة لتصميم مجفف شمسي صناعي يجمع بين الكفاءة الطاقوية والحفاظ على جودة المنتج

الكلمات المفتاحية: التجفيف المتقطع، التحسين المعيارى، سرعة الهواء، نسبة التقطيع، الكفاءة الطاقوية، مجفف مختبر طريقة سطح الاستجابة

Résumé

Cette étude expérimentale se concentre sur l'optimisation du procédé de séchage intermittent appliqué à des produits agricoles (pommes de terre, courgettes et pommes), en maintenant une température constante de 50 °C, tout en faisant varier de manière systématique la vitesse de l'air x_1 (0.5 à 3 m/s) ainsi que le taux d'intermittence x_2 (2 à 15min). Un plan d'expériences rigoureux a été mis en œuvre sur une période de 10 jours, utilisant des échantillons standardisés (prétraités et découpés de manière uniforme) dans un séchoir de laboratoire. L'objectif principal de cette recherche est de déterminer de façon scientifique les valeurs optimales de la vitesse de l'air et du taux d'intermittence permettant de minimiser simultanément le temps de séchage et la

consommation énergétique. Les résultats obtenus fournissent des paramètres déterminants pour le dimensionnement optimal d'un séchoir solaire industriel, alliant performance énergétique et préservation de la qualité des produits.

Mots-clés : Séchage intermittent, optimisation paramétrique, vitesse d'air, taux d'intermittence, efficacité énergétique, séchoir de laboratoire, MSR.

Abstract

This experimental study focuses on optimizing intermittent drying for agricultural products (potatoes, zucchinis, and apples) by maintaining a constant temperature of 50°C while systematically varying air velocity (0.5-3 m/s) and intermittency ratio (2-15min). A rigorous 10-day experimental design was implemented using standardized samples (uniformly pretreated and cut) in a laboratory dryer. The primary objective was to scientifically determine the optimal air velocity and intermittency values that simultaneously minimize drying time and energy consumption. The results provide critical parameters for designing an industrial solar dryer that combines energy efficiency with product quality preservation.

Keywords : Intermittent drying, parametric optimization, air velocity, intermittency ratio, energy efficiency, laboratory dryer, MSR.

Table des matières

Introduction générale	2
Chapitre 1 : Généralités sur le séchage	
1.1. Introduction	5
1.2. Généralités sur le séchage.....	5
1.2.1. Historique	5
1.2.2. Définitions de séchage	6
1.2.3. Objectif de séchage.....	6
1.2.4. Principe de séchage.....	6
1.3. Processus de séchage.....	6
1.3.1. Par conduction ou contacts	6
1.3.2. Par convection forcée ou à l'étuve	7
1.3.3. Par les rayonnements	7
1.3.4. Séchage diélectrique	7

1.3.5.	La lyophilisation	8
1.4.	Méthode de séchage	9
1.4.1.	Séchage à l'air libre	9
1.4.2.	Séchage infrarouge	9
1.4.3.	Séchage par micro-ondes.....	10
1.4.4.	Séchage par atomisation.....	10
1.4.5.	Séchage au soleil	11
1.4.6.	Séchage intermittent.....	12
1.4.6.1.	Classification des séchages intermittents.....	13
1.4.6.2.	Défférents modes d'intermittence	13
1.4.6.2.1.	Par paliers :.....	14
1.4.6.2.2.	Marche et arrêt (On/Off) :.....	14
1.4.6.2.3.	Variation aléatoire	14
1.4.6.3.	Aspects qualitatifs du séchage intermittent.....	14
1.4.6.3.1.	Qualité nutritionnelle.....	15
1.4.6.3.2.	Qualité des couleurs.....	15
1.4.6.3.3.	Changements physiques.....	16
1.4.6.4.	Modélisation du séchage par intermittence.....	16

Chapitre 2 : Recherche bibliographique

2.1.	Introduction	19
2.2.	Revue des travaux antérieurs sur le séchage intermittent.....	19
2.3.	Conclusion.....	31

Chapitre 3 : Matériaux et méthodes

3.1.	Description du prototype de séchage.....	Error! Bookmark not defined.
3.2.	Appareil de mesure.....	Error! Bookmark not defined.
3.2.1.	Mesure de la température	Error! Bookmark not defined.
3.2.2.	Mesure de la vitesse du flux d'air	Error! Bookmark not defined.
3.2.3.	Mesure de consommation énergétique	Error! Bookmark not defined.
3.2.4.	Mesure de masse.....	Error! Bookmark not defined.
3.3.	Équipement de laboratoire URAER	Error! Bookmark not defined.
3.3.1.	Étude de séchage à l'étuve.....	Error! Bookmark not defined.
3.3.2.	Dessiccateur	Error! Bookmark not defined.
3.3.3.	Sachets plastiques scellés.....	Error! Bookmark not defined.
3.4.	Choix des produits et préparation des échantillons.....	Error! Bookmark not defined.
3.4.1.	Choix des produits.....	Error! Bookmark not defined.

3.4.2. Prétraitement des échantillons.....	Error! Bookmark not defined.
3.5. Procédure de séchage.....	Error! Bookmark not defined.
3.6. Mesure de la teneur en eau.....	Error! Bookmark not defined.
3.7. Plan d'expérience.....	Error! Bookmark not defined.
3.8. Statgraphics	Error! Bookmark not defined.
3.9. Modélisation par la méthode des surfaces de réponse.....	Error! Bookmark not defined.
3.10. Conclusion	Error! Bookmark not defined.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.1. Introduction	Error! Bookmark not defined.
4.2. Effets de la vitesse de l'air et du rapport d'intermittence sur le temps de séchage et la consommation d'énergie.....	Error! Bookmark not defined.
4.3. Résultats des produits.....	Error! Bookmark not defined.
4.3.1. Résultat de produits de pomme de terre.....	Error! Bookmark not defined.
4.3.1.1. Résultats d'optimisation pour une teneur en eau jusqu'à de 50%.....	Error! Bookmark not defined.
4.3.1.1.1. Energie comme réponse.....	Error! Bookmark not defined.
4.3.1.1.2. Temps comme réponse.....	Error! Bookmark not defined.
4.3.1.2. Résultats d'optimisation pour une teneur en eau finale de 19 %....	Error! Bookmark not defined.
4.3.1.2.1. Energie comme réponse.....	Error! Bookmark not defined.
4.3.1.2.2. Temps comme réponse.....	Error! Bookmark not defined.
4.4. Validation.....	Error! Bookmark not defined.
4.5. Conclusion.....	Error! Bookmark not defined.
Conclusion générale	70
Références bibliographique	71

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Etuve de séchage.	7
Figure 1.2. Séchage à diélectrique.....	8
Figure 1.3. Processus de lyophilisation [5].....	8
Figure 1.4. Séchage à l'air libre.....	9
Figure 1.5. Séchage par infrarouge.	10
Figure 1.6. Séchage par micro-ondes.	10
Figure 1.7. Séchage par infrarouge.	11
Figure 1.8. Image de séchage de l'abricot sous le soleil.....	11
Figure 1.9. Image de séchage de tomate sous le soleil.....	12
Figure 1.10. Distribution de la température du produit durant le séchage pour un profil de température cyclique.	12
Figure 1.11. Système de classification général pour le séchage intermittent. [7]	13
Figure 1.12. Approche de modélisation du séchage intermittent. [16]	17

Chapitre 2

Figure 2.1. Schéma d'un système de séchage en laboratoire : (a) unité de bullage ; (b) Chauffe-eau ; (c) désembueur ; (d) chauffe-air ; (e) plénum d'air d'entrée ; (f) température de l'eau Contrôleur de température ; (g) contrôleur de température de l'air.	20
Figure 2.2. riz paddy (riz long et riz rond).....	20
Figure 2.3. Schéma d'un séchoir à pompe à chaleur.	21
Figure 2.4. Ganoderma tsugae.	21
Figure 2.5. Schéma du séchoir industriel à yerba maté.	22
Figure 2.6. Yerba maté.	22
Figure 2.7. Séchage convectif intermittent du poivron vert.	23
Figure 2.8. Séchage intermittent de la mangue dans un séchoir à convection forcée.	23
Figure 2.9. Tranches de carottes séchées.	24
Figure 2.10. Système de séchage par pompe à chaleur intermittent avec disposition pour toutes les variations possibles.	25
Figure 2.11. Expériences de séchage ont été réalisées à l'aide d'un petit séchoir commercial, (HT mini, Innotech Ingenieurgesellschaft mbH, Altdorf, Allemagne) à un débit d'air constant de 0,6 m/s.....	26
Figure 2.12. Sécheur à air convectif à l'échelle du laboratoire de l'INAT. [26]	27
Figure 2.13. Coings.	27
Figure 2.14. Développé une installation expérimentale de SAHPD pour le séchage intermittent. [29].....	28
Figure 2.15. Optimisation des conditions de séchage du piment chili dans un séchoir à plateaux : Analyse des surfaces de réponse et des attributs de qualité.....	29
Figure 2.16. Câpres.....	30
Figure 2.17. Schéma du processus de séchage des câpres.	30

Chapitre 3

Figure 3.1. Prototypes de séchoir à air chaud.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.2. A) Thermocouple Type K. B) Relais Solid-state type FQFER. C) Boîte de commande.	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.3. Anémomètre (EMC-9400SD).....	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.4. Compteur énergétique.	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.5. Balance analytique.	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.6. Etuve de séchage.	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.7. Dessiccateur.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.8. Sachets plastiques scellés.	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.9. Produits choisi pour le séchage.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.10. Prétraitement avant le séchage.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 3.11. Préparation des échantillons.....	Error! Bookmark not defined.

Chapitre 4

Figure 4.1. Les produits après séchage.	Error! Bookmark not defined.
Figure 4.2. Diagramme de Pareto des effets uniformes de la consommation d'énergie en fonction de l'interaction des variables.	Error! Bookmark not defined.
Figure 4.3. Variation de la consommation d'énergie en fonction de vitesse et temps ON.	Error! Bookmark not defined.
Figure 4.4. Variation de temps ON en fonction de vitesse.	Error! Bookmark not defined.
Figure 4.5. Diagramme de Pareto des effets uniformes du temps de séchage en fonction de l'interaction des variables.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 4.6. Variation de Temps en fonction de vitesse et temps ON.....	Error! Bookmark not defined.

Figure 4.7. Variation du temps de séchage en fonction de la vitesse. Error! Bookmark not defined.

Figure 4.8. Diagramme de Pareto des effets uniformes de la consommation d'énergie en fonction de l'interaction des variables. Error! Bookmark not defined.

Figure 4.9. Variation de la consommation d'énergie en fonction de vitesse et temps ON. Error! Bookmark not defined.

Figure 4.10. Variation de temps ON en fonction de vitesse..... Error! Bookmark not defined.

Figure 4.11. Diagramme de Pareto des effets uniformes du temps de séchage en fonction de l'interaction des variables..... Error! Bookmark not defined.

Figure 4.12. Variation de Temps en fonction de vitesse et temps ON..... Error! Bookmark not defined.

Figure 4.13. Variation du temps de séchage en fonction de la vitesse..... Error! Bookmark not defined.

Liste des tableaux

Chapitre 3

Tableau 3.1. Variables indépendantes et leurs niveaux dans le plan composite central (CCD).....	43
--	-----------

Tableau 3.2. Matrice du plan composite central (CCD) et les réponses obtenues à partir des tests expérimentaux	44
---	-----------

Chapitre 4

Tableau 4.1. Matrice du plan composite central (CCD) et les réponses obtenues à partir des tests expérimentaux	48
Tableau 4.2. Analyse de la variance pour l'énergie pour pomme de terre	49
Tableau 4.3. Coefficient de régression l'énergie pour pomme de terre	52
Tableau 4.4. Analyse de la variance pour les temps pour pomme de terre	53
Tableau 4.5. Coefficient de régression pour les temps pour pomme de terre	56
Tableau 4.6. Valeurs de réponse l'optimum	57
Tableau 4.7. Matrice du plan composite central (CCD) et les réponses obtenues à partir des tests expérimentaux	57
Tableau 4.8. Analyse de la variance pour l'énergie pour pomme de terre	58
Tableau 4.9. Coefficient de régression l'énergie pour pomme de terre	61
Tableau 4.10. Analyse de la variance pour les temps pour pomme de terre	62
Tableau 4.11. Coefficient de régression pour les temps pour pomme de terre	65
Tableau 4.12. Valeurs de réponse l'optimum	66
Tableau 4.13. Validation du modèle à 50%	67
Tableau 4.14. Validation du modèle à 19%	67

Nomenclature

Symboles	Signification	Unité
<i>a, b, k</i>	Constante	

ir	Taux d'intermittence	
m (Finale)	Masse de l'échantillon après avoir été placé dans le four	g
m (Initial)	Masse de l'échantillon après le processus de séchage	g
Me	Teneur en humidité absolue initiale sur base sèche	kg d'eau/kg base humide
Mo	Teneur en humidité initiale	Kg d'eau/kg de base sèche
MR	Taux d'humidité	Kg d'eau/kg de base sèche
MR exp	Teneur en humidité déterminée expérimentalement	Kg d'eau/kg de matière sèche
MR pre	Teneur en humidité prédite	Kg d'eau/kg de matière sèche
Mt	Teneur en humidité absolue à l'instant t sur une base humide	kg eau/kg MS
n	Nombre de constantes utilisées dans le modèle	
N	Nombre de courses expérimentales	
n_0	Nombre de points centraux	
R^2	Coefficient de détermination	
T	Température	K
t	Temps	s
V	Vitesse	m/s
W	Teneur en humidité sur une base humide	kg d'eau/kg base humide
Y	Variable dépendante prédite	
Y_1	Temps prévu	min
Y_2	Energie prédite	kwh

Lettres grecs :

Symboles	Signification
Δ	variation
ΔE	couleur générale
α	variable
χ^2	minimum du khi carré réduit

Abréviations :

Abréviations	Signification
ANN	Réseaux de neurones artificiels
ISAD	Intervalle de départ de l'accessibilité Séchage
MER	Le taux d'extraction d'humidité
RSM	Méthodologie des surfaces de réponse
SCI	Indice de fissuration par contrainte
SEC	La consommation énergétique spécifique
SMER	Le taux spécifique d'extraction d'humidité
TI	Indice de tempérage

Introduction Générale

Introduction générale

La technique de déshydratation des produits alimentaires est une méthode cruciale et fréquemment utilisée dans le processus de transformation alimentaire. Du fait d'une transformation inadéquate et tardive, environ un tiers de la production alimentaire mondiale se perd chaque année.

Le séchage figure parmi les méthodes principales de conservation de nombreux aliments. Il représente fréquemment l'ultime étape (traditionnellement après le processus d'évaporation) dans la fabrication d'un produit. C'est une méthode de séparation thermique destinée à supprimer entièrement ou en partie un liquide présent sur un objet considéré comme « humide » par la vaporisation de ce solvant.

Le produit final est considéré comme « sec », bien qu'il renferme encore une humidité résiduelle. Des études approfondies sur le séchage des biomatériaux indiquent que le séchage intermittent offre de nombreux avantages. Cela évite la surchauffe et la destruction des biomatériaux séchés, tout en limitant la consommation d'énergie thermique, ce qui améliore l'efficacité énergétique du processus de séchage.

Le séchage intermittent est souvent considéré comme une option alternative aux méthodes de séchage continu. En permettant au produit de faire des pauses de temps en temps, le processus de séchage peut être rendu plus uniforme et moins susceptible de provoquer un dessèchement excessif, ce qui peut entraîner une augmentation des rendements et une meilleure qualité du produit.

L'objectif principal de cette étude est de :

1. Optimisation des conditions de séchage : Identifier les paramètres optimaux (température, vitesse de l'air, temps de repos) afin d'améliorer l'efficacité énergétique et préserver la qualité des produits séchés.
2. Modélisation et prédiction : Développer un modèle mathématique basé sur la méthode des surfaces de réponses (MSR) pour prédire la cinétique de séchage, la diffusivité massique et la consommation énergétique.
3. Expérimentation et validation : Réaliser des essais avec un séchoir intermittent de laboratoire pour analyser les interactions entre les paramètres et valider les résultats obtenus par modélisation.
4. Réduction de la consommation énergétique : Explorer l'impact du séchage intermittent sur l'optimisation des ressources énergétiques tout en garantissant une qualité optimale des produits séchés.

Cette étude est organisée en une introduction générale, 4 chapitres détaillés et une conclusion générale. Le présent travail comporte quatre chapitres :

Introduction générale

Le premier chapitre, discutera des généralités de la technologie de séchage et introduira le séchage intermittent technique de séchage et ses applications.

Le deuxième chapitre, présentera une revue de la littérature des études antérieures sur le séchage intermittent.

Le troisième chapitre, est dédié à présenter les matériaux utilisés pour réaliser le séchage. Expériences ainsi que les méthodes suivies pour démontrer l'effet de différents séchages paramètres sur le temps de séchage et la consommation d'énergie.

Le quatrième chapitre, sera consacré à l'analyse des résultats obtenus à l'aide du logiciel statgraphics, afin de mettre en évidence l'influence des différents paramètres du séchage.

Enfin, une conclusion générale rapporte les principaux résultats obtenus au cours de cette étude.

Chapitre 1 : Généralités sur le séchage

1.1. Introduction

Le séchage est un processus par lequel on retire l'eau associée, c'est-à-dire celle qui ne peut être ôtée par une méthode mécanique. Le processus de séchage se réalise donc via l'évaporation, qui exige l'établissement d'une différence de température entre la surface externe des particules ou amas format la boue et leur centre.

Les processus de séchage intermittents sont une nouvelle approche du séchage des matériaux, qui utilise une entrée de chaleur variable dans le temps pour correspondre à la cinétique de séchage du matériau en cours de séchage. Cela est particulièrement important pour les matériaux sensibles à la chaleur comme les aliments, les produits pharmaceutiques et les médicaments à base de plantes. L'apport de chaleur intermittent est bénéfique uniquement pour les matériaux qui sèchent principalement pendant la période de taux de chute, où la diffusion interne de la chaleur et de l'humidité contrôle le taux de séchage global. Les périodes où peu ou pas de chaleur est fournie pour le séchage permettent la période de tempéragement nécessaire pour que l'humidité et la chaleur se diffusent à l'intérieur du matériau. L'approvisionnement intermittent en chaleur entraîne une réduction de l'utilisation de l'énergie thermique et de la masse d'air utilisée dans le séchage convectif, ce qui conduit à une efficacité thermique supérieure. La qualité du produit, telle que la couleur et la teneur en acide ascorbique, est généralement supérieure à celle obtenue avec un approvisionnement continu en chaleur. Cependant, dans certains cas, il peut y avoir une augmentation nominale du temps de séchage. [1]

1.2. Généralités sur le séchage

1.2.1. Historique

Le séchage est une méthode très ancienne employée pour conserver les produits agricoles et alimentaires (tels que les céréales, les graines, les fourrages, la viande et le poisson séchés, le jambon, les figues, les noix, le tabac, etc.), pour fabriquer des matériaux (comme les briques de terre sèche, la céramique, la poterie non cuite, le bois, ...), ainsi que pour traiter les textiles (lavage, teinture...) et les peaux. Dans le cadre de ces applications conventionnelles, on recourt souvent au séchage par air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » qui nécessite un apport d'énergie n'étant qu'une méthode complémentaire offrant une plus grande constance face aux fluctuations climatiques, ou bien introduisant de nouveaux services (comme le lait en poudre ou le café « instantané », les pâtes alimentaires sèches à longue durée de conservation, etc.).[2]

1.2.2. Définitions de séchage

C'est une opération unitaire qui a pour but d'éliminer par vaporisation l'eau qui imprègne un produit (liquide ou solide) afin de le transformer en produit solide sec dont l'humidité résiduelle est très faible. Cette élimination peut être réalisée soit : par évaporation à l'évaporation et entraînement à l'aide d'un gaz. Cette opération est endothermique et nécessite donc l'apport d'énergie thermique. Le séchage est un processus visant à réduire l'activité du liquide contenu dans un produit, jusqu'à atteindre un niveau en dessous duquel les réactions enzymatiques et d'oxydation sont freinées, ainsi que la prolifération des microorganismes. [3]

1.2.3. Objectif de séchage

Le séchage est considéré comme une méthode de conservation des aliments, qui vise à :

- Éliminer l'eau des aliments.
- Empêcher la reproduction et la croissance des bactérienne.
- Réduisez les coûts de transport, d'emballage, de stockage et d'emballage.
- Maintenir et améliorer les bonnes propriétés du matériau.

1.2.4. Principe de séchage

Pour sécher un produit, il suffit de le soumettre à un courant d'air suffisamment chaud et sec. Il se produit un transfert de chaleur et d'humidité entre cet air et le produit humide. L'air chaud transfère une portion de sa chaleur au produit, ce qui crée une pression partielle en eau à sa surface qui dépasse celle de la pression partielle d'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Ce changement de pression provoque un transfert de matière depuis la surface du solide vers l'air de séchage. Ainsi, deux éléments essentiels sont à surveiller pour maîtriser les procédés de séchage :

- Le transfert de chaleur pour générer la chaleur latente nécessaire à la vaporisation.
- L'extraction de l'eau ou de la vapeur d'eau du produit humide est réalisée grâce au mouvement de celle-ci à travers celui-ci.

1.3. Processus de séchage

1.3.1. Par conduction ou contacts

Cette technique de déshydratation implique de dessécher un produit en le plaçant en contact avec des surfaces réchauffées. Généralement, le séchage s'effectue dans des tambours tournants afin d'assurer une uniformité optimale. On utilise principalement cette technologie dans les processus de dessiccation de l'industrie lourde.

1.3.2. Par convection forcée ou à l'étuve

Le séchage à l'étuve permet de mesurer la mesure de la teneur en humidité d'un échantillon ou matériau peut être effectué par le biais du séchage en étuve. C'est une technique qui permet de mesurer la gravité, plus précisément la thermogravimétrie, qui détermine le contenu en liquides et en substances volatiles en fonction de la masse.



Figure 1.1. Etuve de séchage [4].

1.3.3. Par les rayonnements

Les méthodes de radiations énergétiques (Ultraviolet, Infra-rouge, Haute fréquence, Micro-ondes) permettent d'assurer, lorsque c'est faisable avec le produit, un séchage de très haute qualité et une réduction significative des frais associés à la consommation énergétique [5].

1.3.4. Séchage diélectrique

Le séchage diélectrique est une méthode d'élimination de l'humidité des matériaux qui s'appuie sur l'utilisation de champs électriques. En exposant le matériau à un champ électrique alternatif de haute fréquence, les molécules d'eau qu'il contient sont polarisées et réchauffées, ce qui accélère le processus de séchage. On utilise fréquemment ce procédé dans le secteur de l'agroalimentaire et pour la fabrication de matériaux réactifs à la chaleur.



Figure 1.2. Séchage à diélectrique. [6]

1.3.5. Lyophilisation

La lyophilisation est une technique de déshydratation qui consiste à congeler un produit, puis à en extraire l'eau par sublimation sous vide, sans qu'il ne devienne liquide au préalable. Cette méthode est spécialement conçue pour les substances qui réagissent à la chaleur, telles que les aliments et les médicaments, car elle maintient leurs caractéristiques organoleptiques et nutritionnelles. Malgré une conservation optimale qu'elle offre, la lyophilisation reste un procédé assez lent et onéreux, utilisé principalement en production par lots à cause des conditions de basse pression.

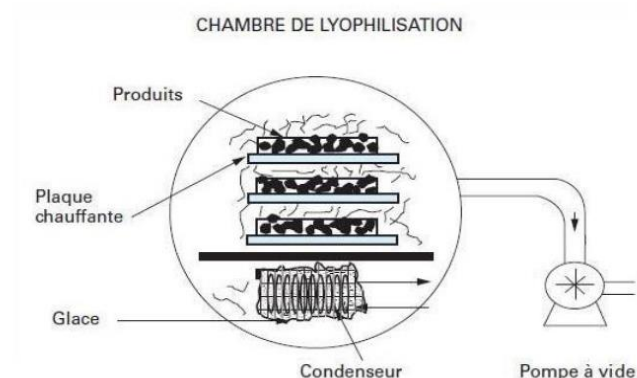


Figure 1.3. Processus de lyophilisation [7].

1.4. Méthodes de séchage

1.4.1. Séchage à l'air libre

Le séchage est l'une des méthodes de conservation des aliments les plus répandues à travers le monde est le séchage, grâce à sa facilité d'application et à la disponibilité généreuse de l'énergie solaire. Ce procédé consiste à étaler les matières premières naturelles sur une surface exposée pendant des jours, sur des intervalles de temps. Elles sont aussi refoulées plusieurs fois vers le soleil, ce qui aide à éliminer l'eau des matières premières naturelles et diminue considérablement la consommation d'eau. La surface cultivée convertit l'énergie qu'elle absorbe en énergie thermique, ce qui élève la température de la culture.



Figure 1.4. Séchage à l'air libre [8].

1.4.2. Séchage infrarouge

L'usage du rayonnement infrarouge à onde courte est prédominant dans les applications de séchage, ce qui offre une densité énergétique importante sur une zone relativement restreinte. Il offre aussi un réchauffement rapide des produits en couches, ce qui caractérise ce séchage comme un chauffage de surface. Par la suite, la chaleur absorbée se diffuse à travers le produit par conduction.



Figure 1.5. Séchage par infrarouge. [9]

1.4.3. Séchage par micro-ondes

Le séchage par micro-ondes est une méthode de séchage basée sur le transfert d'énergie des micro-ondes aux molécules d'eau des matériaux due à leurs propriétés diélectriques. L'interaction des micro-ondes avec le matériau provoque le transfert des ondes dans la profondeur, tandis que l'énergie absorbée par les molécules d'eau conduit à l'évaporation de l'eau. Cette méthode est largement utilisée dans le processus de séchage des encres, peintures et adhésifs sous vide ou séchage de produits pharmaceutiques.

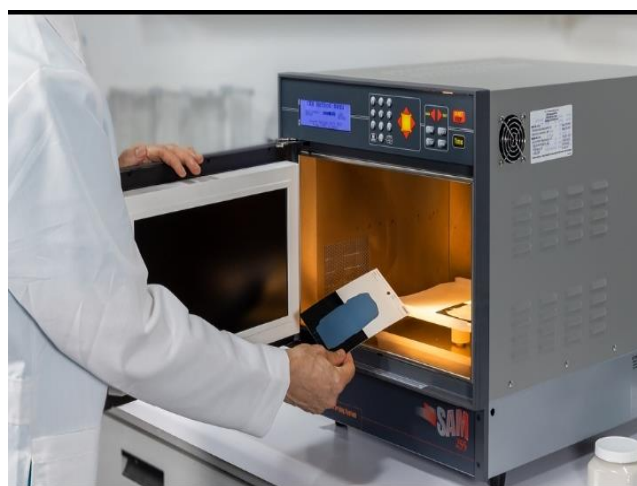


Figure 1.6. Séchage par micro-ondes. [10]

1.4.4. Séchage par atomisation

La technique de séchage par atomisation est un procédé continu qui permet de transformer une solution liquide en poudre en une seule opération. Cette méthode consiste à vaporiser le liquide en

microgouttelettes dans une chambre chauffée, où elles sont immédiatement séchées par un flux de gaz chaud. Cette méthode implique la vaporisation d'un liquide ou d'une suspension en petites gouttes dans un courant d'air chaud, favorisant ainsi un séchage rapide. Applications possibles : production de lait en poudre et production d'engrais.

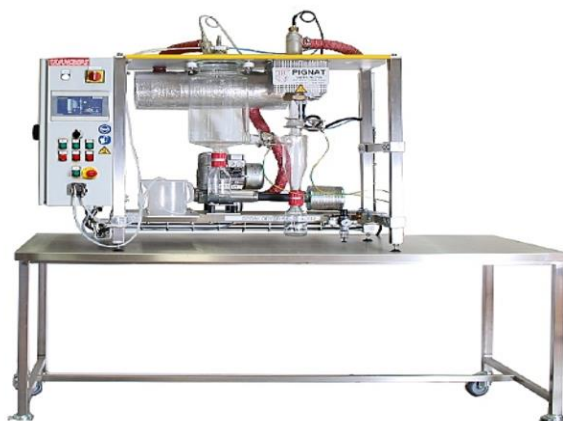


Figure 1.7. Séchage par atomisation. [11]

1.4.5. Séchage au soleil

La méthode de séchage à la lumière du soleil est la technique la plus ancienne et la moins coûteuse. Elle convient parfaitement au séchage des fruits et légumes classiques dans les zones éloignées, tels que les abricots et les tomates, même si elle ne conserve pas toutes les caractéristiques et vitamines du produit. Cette approche exige une grande quantité d'espace et de temps, tout en offrant un contrôle limité du processus.



Figure1.8. Image de séchage de l'abricot sous le soleil. [12]



Figure 1.9. Image de séchage de tomate sous le soleil. [13]

1.4.6. Séchage intermittent

L'approche du séchage intermittent consiste à varier les conditions de séchage au fil du temps. On peut y parvenir en ajustant la température de l'air de séchage, le taux d'humidité, la pression ou même la méthode de fourniture de chaleur.

Séchage intermittent est une technique de dessiccation où les conditions de séchage peuvent être ajustées et maîtrisées au fil du temps. On peut appliquer diverses méthodes d'intermittences, mais la plus répandue consiste à ajuster les conditions de séchage de l'air. Le processus de séchage intermittent est recommandé pour les matériaux susceptibles de se fissurer, et il peut être mis en œuvre de diverses manières comme le mode marche/arrêt, la variation périodique ou encore la variation en rampe. Cette approche se distingue des techniques de séchage continu classiques et optimise le transfert de chaleur et de manière dans le processus de séchage, menant à une augmentation du taux de séchage. [14]

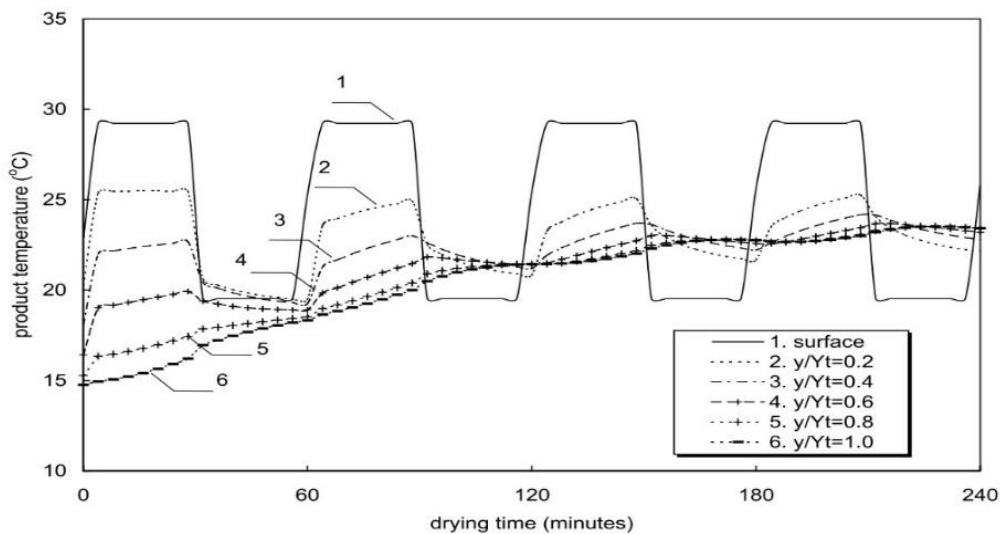


Figure 1.10. Distribution de la température du produit durant le séchage pour un profil de température cyclique. [15]

1.4.6.1. Classification des séchages intermittents

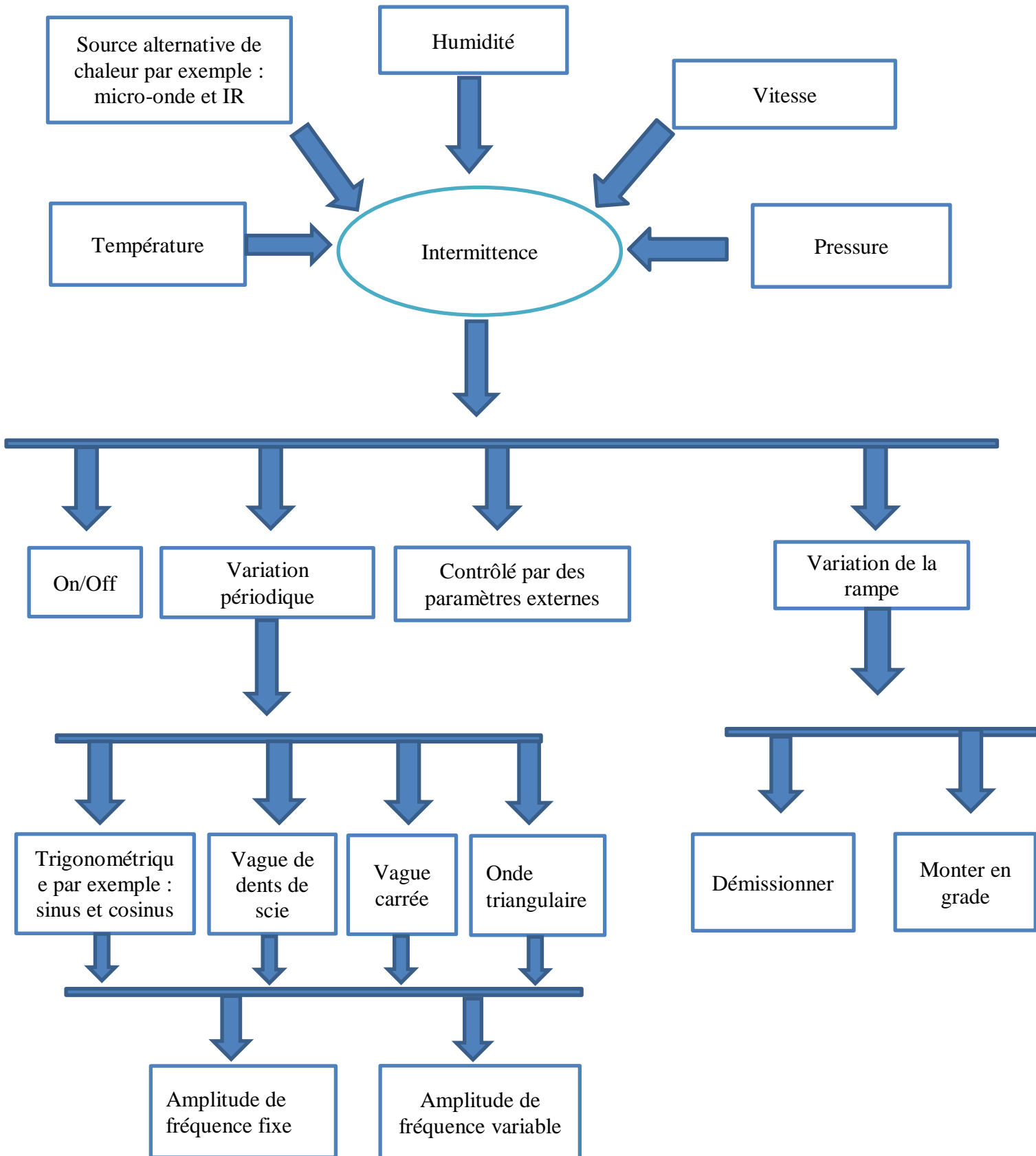


Figure 1.11. Système de classification général pour le séchage intermittent. [16]

1.4.6.2. Différents modes d'intermittence

1.4.6.2.1. Par paliers :

De nombreuses recherches ont montré que le séchage intermittent, associé à des profils de température par paliers, pourrait rehausser la qualité du produit. L'analyse des feuilles extérieures de chou a révélé que le procédé de séchage en plusieurs phases optimisait la qualité du produit tout en réduisant la détérioration de celui-ci comparativement à la méthode de séchage sans interruption. [17]

1.4.6.2.2. Marche et arrêt (On/Off) :

Le fonctionnement intermittent du processus de séchage fait référence aux intervalles de temps entre l'opération et le temps d'inactivité durant le séchage par intermittence. Au début du processus de séchage, la chaleur est appliquée au matériau, provoquant l'évaporation de l'humidité qui est ensuite retirée du matériau en question. Par la suite, le système reste au repos, ce qui indique l'absence de séchage et de chauffage. Ainsi, plusieurs chercheurs ont étudié la définition du taux d'intermittence, certains le décrivant comme la proportion du temps actif et du temps inactif du système de séchage. Ce calcul a été réalisé sur la base des économies d'énergie réalisées en pourcentages [18] :

$$I_r = T_{on} / (T_{on} + T_{off}) \quad (1.1)$$

1.4.6.2.3. Variation aléatoire

Dans le cadre du séchage intermittent, la variation aléatoire se rapporte aux fluctuations ou écarts imprévus et non systématiques du processus de séchage. Cela illustre la variabilité intrinsèque qui peut se produire pendant les cycles de séchage intermittent, qui n'est pas dictée par un modèle particulier ou un facteur externe. Le séchage intermittent fait référence à des phases de séchage alternant avec des périodes de pause, comme mentionné précédemment. Lors de chaque cycle, les paramètres de séchage tels que la température, le débit d'air ou la durée peuvent être régulés et maintenus à des valeurs prédéterminées. Néanmoins, des fluctuations aléatoires peuvent toujours survenir au cours de ces cycles, provoquant de petites modifications dans le rythme de séchage, la répartition de l'humidité ou d'autres aspects.

1.4.6.3. Aspects qualitatifs du séchage intermittent

L'altération de la qualité des produits alimentaires est inévitable pendant le processus de séchage. Au cours de la dernière décennie, de nombreuses avancées technologiques ont été réalisées afin de minimiser la dégradation de divers attributs qualitatifs des produits alimentaires séchés. Le séchage intermittent est considéré comme l'une des méthodes les plus efficaces pour atteindre cet

objectif. De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées pour améliorer différents attributs qualitatifs grâce au séchage intermittent. [19]

1.4.6.3.1. Qualité nutritionnelle

On définit la qualité nutritionnelle comme l'importance d'un produit pour la santé physique, le développement, la reproduction et le bien-être psychologique ou émotionnel du consommateur. Cette conception étendue de la qualité nutritionnelle peut être subdivisée en deux aspects. La première est l'impact de la nourriture sur sa matière, c'est-à-dire l'ensemble de ses éléments, des substances bénéfiques et nuisibles, ainsi que ses attributs nutritifs (ou biologiques). Du fait de disparités intrinsèques, allant des variations de sol et de climat aux influences des variétés, des saisons et des méthodes agricoles, les écarts dans les éléments désirables sont moins marqués que dans les éléments non souhaités. Quand ces divergences sont remarquées, la qualité haut de gamme du produit est souvent présente dans les produits bios. Un des bénéfices possibles de l'agriculture biologique pour la production d'aliments sains est la présence plus importante de composés végétaux secondaires bénéfiques dans les cultures biologiques comparativement aux cultures non biologiques. Le second aspect, la qualité nutritionnelle, englobe le sentiment de bien-être (ou d'inconfort) que certains produits alimentaires peuvent susciter chez les consommateurs. Des preuves ont démontré que l'agriculture biologique est plus respectueuse de l'environnement et durable comparée à l'agriculture traditionnelle. D'après ces informations, le bien-être du consommateur découle de la jouissance des aliments bio, ainsi que de la conviction que leur achat, leur consommation et leur appréciation contribuent à l'édification d'un futur meilleur et d'un environnement amélioré. Ces conséquences, y compris leurs impacts sociaux et l'amélioration de la condition animale, pourraient surpasser toute contribution mesurable des régimes alimentaires équilibrés typiques en Occident à la santé nutritionnelle personnelle. [20]

1.4.6.3.2. Qualité des couleurs

La couleur des produits alimentaires est un des éléments déterminants dans le choix des consommateurs. Le choix d'acheter un produit alimentaire spécifique. La couleur se modifie au cours de différents produits alimentaires ont été soumis à une étude sur le séchage intermittent comme la goyave, la banane, la pomme de terre et le ganoderma tsugae. L'étude a porté sur l'impact des techniques de séchage et des formes d'intermittence, telles que l'intensification et l'échelonnement des températures décroissantes, ainsi que du cosinus et du cosinus inverse.

L'équation suivante permet de mesurer les changements de couleur totaux (ΔE) :
De l'équation 1, nous avons

$$\Delta E = \text{racine carrée} (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2) \quad (1.2)$$

Le changement de couleur est influencé différemment par diverses conditions d'air de séchage. [21]

1.4.6.3.3. *Changements physiques*

Effet du séchage intermittent sur d'autres changements physiques tels que Les caractéristiques de fissuration et de réhydratation ont été étudiées expérimentalement. La fissuration est un problème important pour le bois et l'argile séchage outre l'inspection visuelle, la méthode d'émission acoustique.

Elle a été appliquée par Kowalski et Pawłowski [22] pour surveiller les micros et macro fissures développées lors du séchage de l'argile et du bois échantillons. Ils ont conclu que la modification des conditions de séchage au bon moment peut éviter la fracture et donc une bonne qualité de produit peut être obtenue. Ils ont comparé l'intensité des fissures sous température constante, température variable et humidité variable conditions. Ils ont constaté que les échantillons de meilleure qualité étaient obtenus avec une humidité variable et une consommation d'énergie minimale a été obtenue avec des conditions de séchage température d'air variable. Cependant, la stratégie de variation de l'humidité consomme plus d'énergie en raison de la consommation énergétique du déshumidificateur. Par conséquent, l'énergie la consommation doit être soigneusement prise en compte dans le choix des variables condition de séchage par humidité bien que le séchage à humidité variable les conditions ont donné des échantillons de kaolin de meilleure qualité, ce processus n'a pas produit alimentaire non encore testé. Cela donnera probablement de meilleurs résultats attributs structurels des aliments mais peuvent augmenter la consommation d'énergie du processus. [23]

1.4.6.4. *Modélisation du séchage par intermittence*

Il est essentiel de modéliser pour juger de l'impact des paramètres du processus et pour optimiser le procédé de séchage. Le processus de déshydratation des aliments est extrêmement complexe en raison de la complexité de leur structure interne et de leur comportement pendant le séchage. L'introduction d'une forme d'intermittence accroît davantage la complexité. Il est donc extrêmement complexe de modéliser mathématiquement les conditions précises pendant le processus de séchage. Il est évident que certaines suppositions sont nécessaires pour l'élaboration de modèles mathématiques. [24]

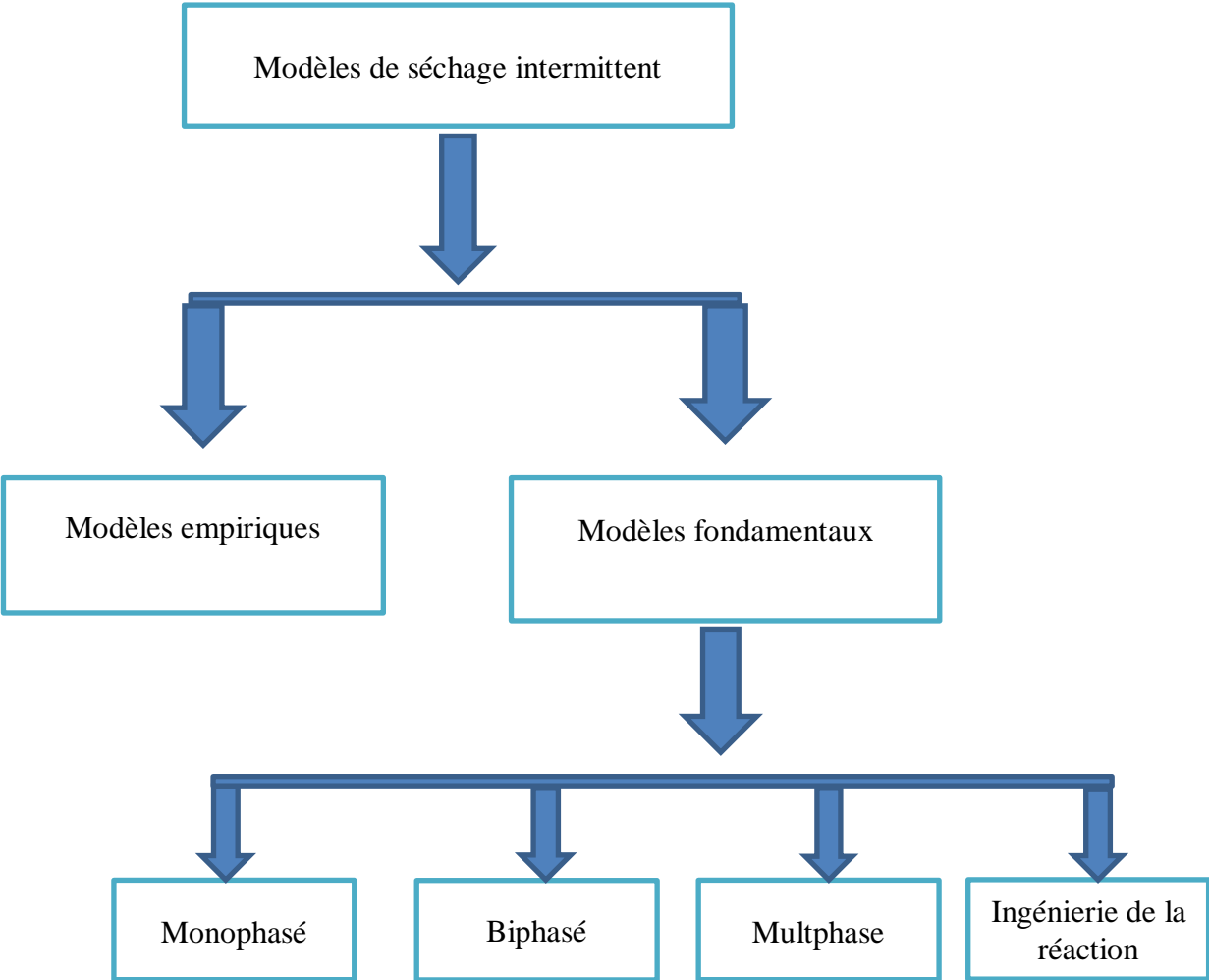


Figure 1.12. Approche de modélisation du séchage intermittent. [25]

Chapitre 2 : Recherche bibliographique

2.1. Introduction

Le séchage est une étape cruciale dans la conservation des produits agroalimentaires, mais il reste une opération énergivore. Face à la nécessité de réduire la consommation énergétique tout en préservant la qualité des produits, le séchage intermittent à l'air chaud a suscité un intérêt croissant dans la recherche. Cette technique, basée sur l'alternance de phases actives et de repos, permettrait d'optimiser le processus de séchage en limitant les pertes nutritionnelles, physiques et chimiques. Dans cette partie, nous présentons une synthèse des travaux récents portant sur l'impact de cette méthode, en mettant en évidence les approches explorées, les résultats obtenus, ainsi que les pistes d'optimisation identifiées pour différents types de produits agricoles.

2.2. Revue des travaux antérieurs sur le séchage intermittent

Renjie Dong et al. [26] ont mené une étude pour mieux comprendre la répartition de l'humidité à l'intérieur des grains de riz pendant le processus de séchage avec tempéragement. Ils ont réalisé un séchage intermittent sur deux variétés de riz paddy (riz long et riz rond), puis ont estimé la distribution de l'humidité dans les grains à l'aide d'un modèle simplifié basé sur une forme sphérique. L'objectif était d'évaluer la précision de ce modèle dans la simulation des phases de séchage et de repos (tempéragement). Les résultats ont montré que des gradients d'humidité se formaient pendant les phases de séchage, mais qu'ils diminuaient fortement dès le début de la période de repos, avant de continuer à décroître plus lentement. Par exemple, une température de 50 °C pendant 120 minutes permettait d'éliminer environ 80 % de ces gradients créés pendant le séchage.

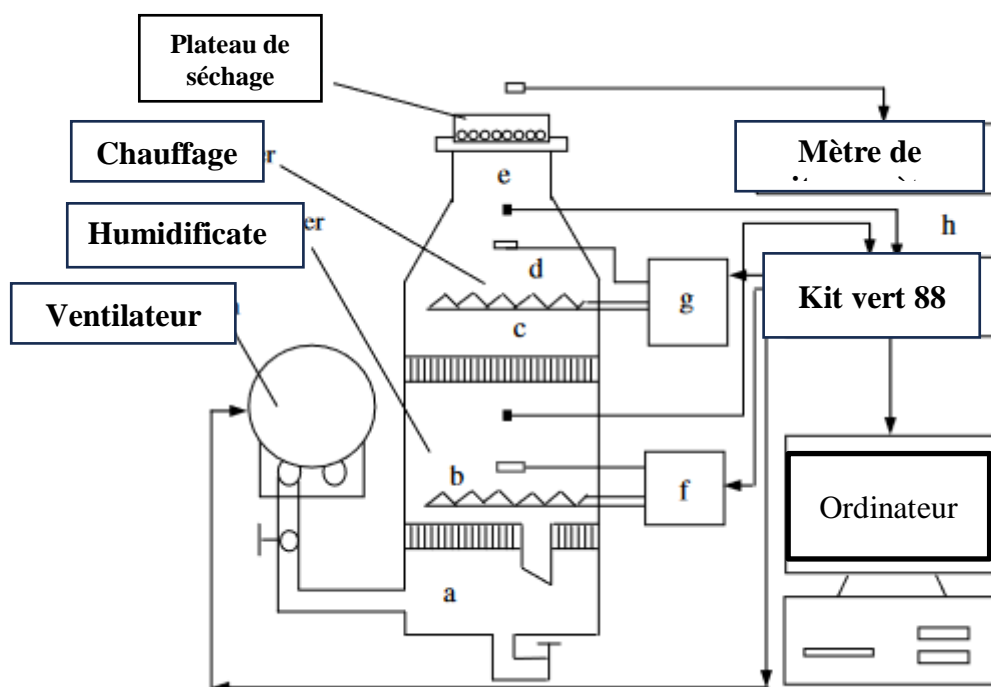


Figure 2.1. Schéma d'un système de séchage en laboratoire : (a) unité de bullage ; (b) Chauffe-eau ; (c) désembueur ; (d) chauffe-air ; (e) plénum d'air d'entrée ; (f) température de l'eau Contrôleur de température ; (g) contrôleur de température de l'air. [26]



Figure 2.2. Riz paddy (riz long et riz rond [26])

Chin, Siew Kian et al, [27] ont examiné le séchage intermittent de *Ganoderma tsugae* par pompe à chaleur. Ils ont constaté que cette méthode réduisait le temps de séchage effectif par rapport au séchage continu. Cependant, une diminution de l'intermittence (de 0,67 à 0,2) a entraîné une conservation plus faible des polysaccharides solubles dans l'eau.

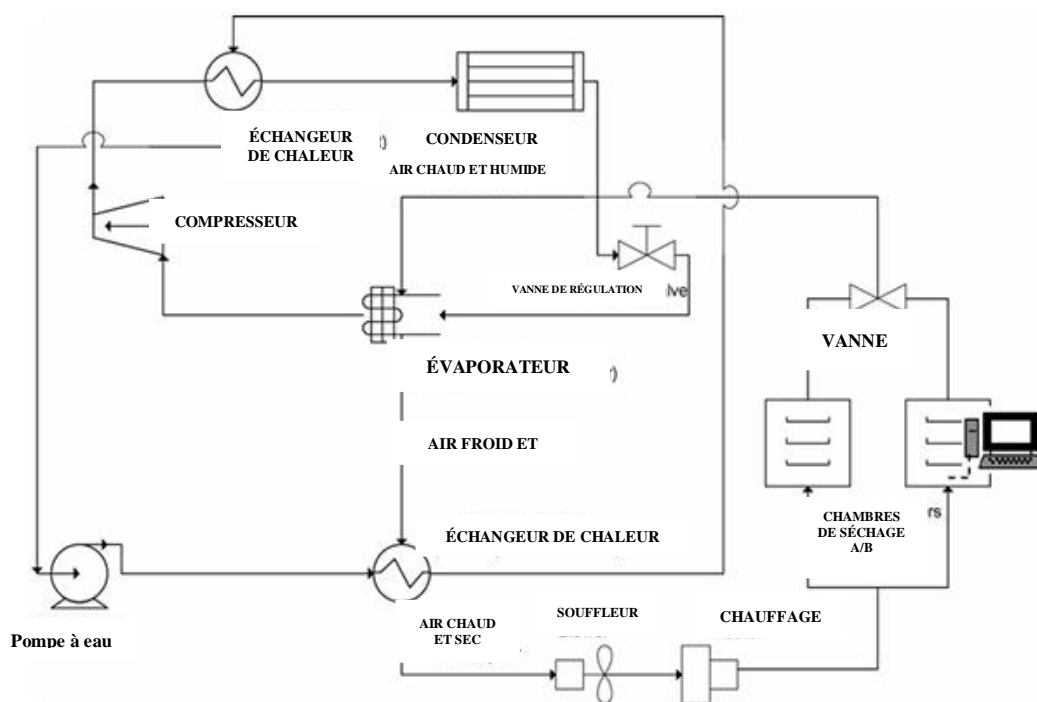


Figure 2.3. Schéma d'un séchoir à pompe à chaleur [27].



Figure 2.4. *Ganoderma tsugae* [27].

Holowaty, Santiago A et al, [28] ont évalué la réduction de la consommation d'énergie lors du séchage des branches de yerba maté (thé maté) en appliquant des périodes de tempérag. Ils ont développé et validé un modèle empirique pour décrire la variation de l'humidité en fonction du temps et de la température. Les meilleurs résultats ont été obtenus en appliquant de la chaleur pendant 15 minutes, suivies d'une période de tempérag de 15 minutes, puis d'une application continue de chaleur. Cette méthode a permis une réduction de 10 % de la consommation d'énergie.

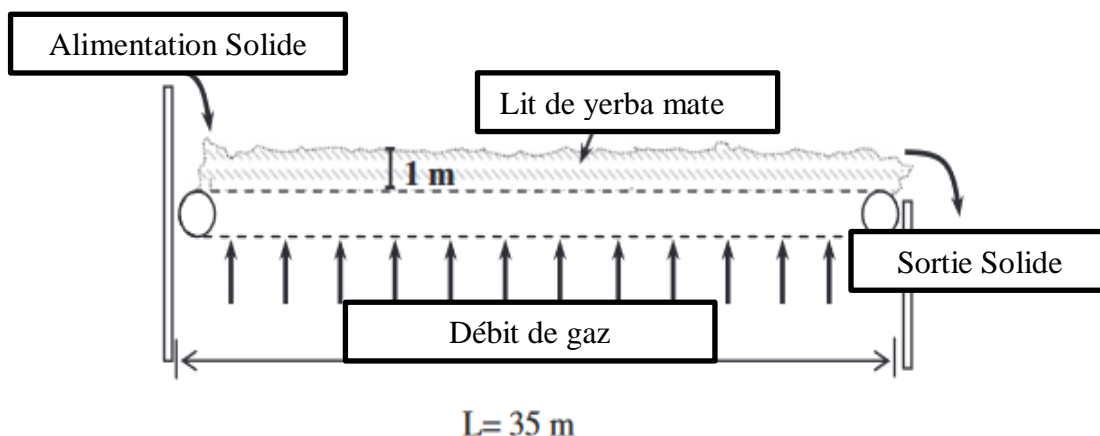


Figure 2.5. Schéma du séchoir industriel à yerba mat [28].



Figure 2.6. Yerba maté [28]

Szadzińska, Jadwiga et al [29] Les chercheurs ont étudié l'influence du séchage convectif intermittent sur la cinétique, la consommation d'énergie et la qualité du poivron vert. Ils ont réalisé des tests de séchage à air chaud à deux températures constantes (70 °C et 50 °C). Les résultats ont montré qu'une température plus élevée réduisait le temps de séchage mais altérait la qualité (couleur et nutriments). Le séchage intermittent, avec des cycles de chauffage et de refroidissement, a permis d'uniformiser l'humidité et d'améliorer l'efficacité et la qualité du produit.

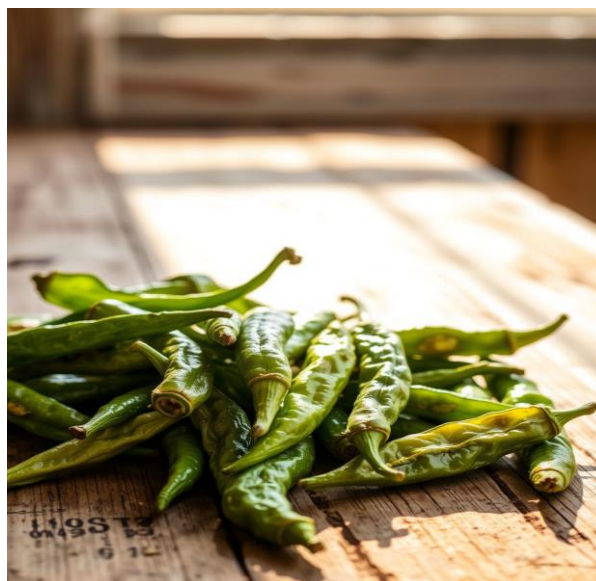


Figure 2.7. Séchage convectif intermittent du poivron vert [29].

Tetang Fokane Abraham et al [30], ont étudié le séchage intermittent de la mangue dans un séchoir à convection forcée. Ce mode alterne une heure à température chaude (40°C, 50°C ou 60°C) et une heure à température ambiante. Comparé au séchage continu, il offre une meilleure vitesse de séchage pour une même température et vitesse d'air. La perte en eau est rapide en début de cycle, puis devient presque stable pendant les phases à température ambiante.



Figure 2.8. Séchage intermittent de la mangue dans un séchoir à convection forcée [30].

Ibrahim Doymaz et al, [31] ont étudié l'influence de la température (50 à 70 °C), de l'épaisseur des tranches et des prétraitements sur le séchage convectif de carottes. La température a eu l'impact le plus marqué sur le temps de séchage, la réhydratation et la couleur. Le modèle a le mieux décrit la cinétique de séchage, et la diffusivité de l'humidité variait entre

$3,46 \times 10^{-10}$ et $1,02 \times 10^{-9}$ m²/s. L'énergie d'activation diffère selon les traitements, atteignant jusqu'à 43,42 kJ/mol.



Figure 2.9. Tranches de carottes séchées [31].

Nghia Duc Pham et al [32] Les chercheurs ont souligné que le séchage intermittent, en modulant les conditions comme la température, l'humidité ou la vitesse de l'air, permet d'améliorer la qualité des aliments végétaux par rapport aux méthodes conventionnelles. Cette technique limite les défauts tels que le durcissement de surface ou la perte nutritionnelle. L'article présente une revue des effets du séchage intermittent sur les propriétés physiques, chimiques et nutritionnelles des aliments, ainsi que l'impact des prétraitements. Il met en avant la nécessité de modèles adaptés pour prédire et optimiser la qualité des produits séchés.

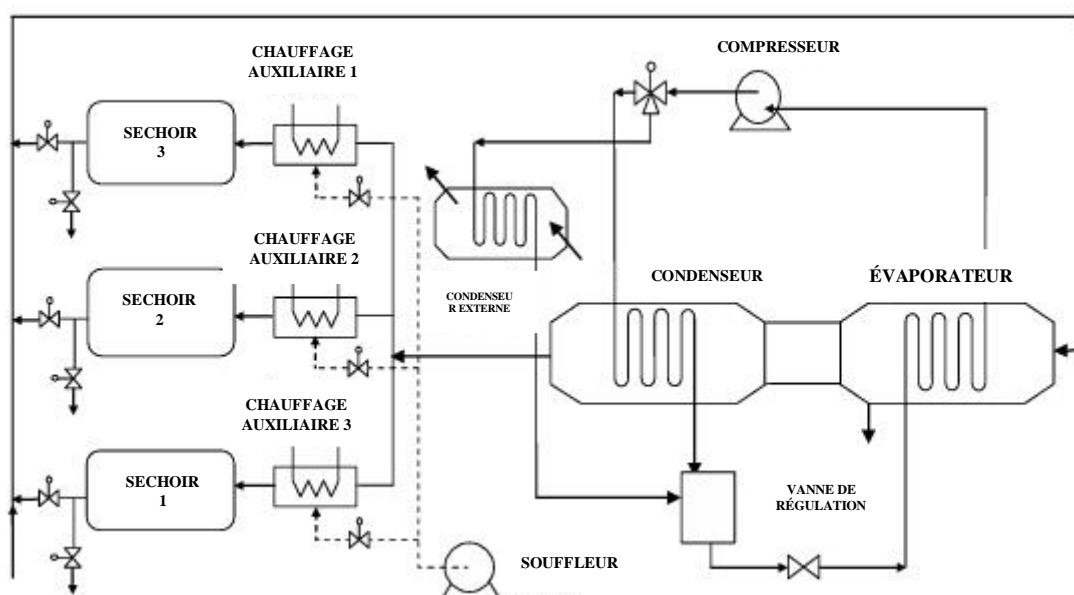


Figure 2.10. *Système de séchage par pompe à chaleur intermittente avec disposition pour toutes les variations possibles [32].*

Ali Ghasemi et al, [33] Les chercheurs ont étudié le séchage intermittent multi-étapes du riz brut en évaluant la fissuration (SCI), le tempéage (TI) et la durée totale du procédé pour les variétés. Ils ont déterminé que des cycles de 40 minutes de séchage suivis de 200 minutes (Hashemi) et 160 minutes (Koohsar) de tempéage à 60 °C étaient optimaux pour limiter les fissures. Le modèle mathématique utilisé a confirmé ces résultats, montrant que le TI et la simulation de l'humidité de surface pouvaient prédire efficacement le temps de tempéage nécessaire.

R. Md Saleh et al, [34] Les chercheurs ont évalué l'impact du séchage intermittent sur la cinétique de séchage et la qualité des carottes biologiques à 60 °C et 70 °C. Un tempéage à 30 % d'humidité a permis une meilleure rétention des caroténoïdes, une couleur plus stable et une bonne réhydratation, tout en réduisant le temps de séchage et la consommation énergétique. Les meilleures conditions ont été obtenues à 60 °C avec un tempéage de 3 heures à 30 % d'humidité.



Figure 2.11. Expériences de séchage ont été réalisées à l'aide d'un petit séchoir commercial, (HT mini, Innotech Ingenieurgesellschaft mbH, Altdorf, Allemagne) à un débit d'air constant de 0,6 m/s. [34]

Wafa Hajji et al, [35] Les chercheurs ont mis au point une nouvelle méthode de séchage appelée ISAD (Interval Starting Accessibility Drying) pour résoudre le problème de la consommation énergétique élevée des techniques de séchage traditionnelles. L'ISAD consiste à exposer brièvement les échantillons alimentaires à un jet d'air chaud au début du processus de séchage, suivi de courtes périodes de tempérage. Dans cette étude, des coings ont été séchés à 40 °C avec différentes vitesses d'air (2, 3,5 et 5 m/s), une durée de séchage active de 15 secondes, et des périodes de tempérage allant de 1 à 5 minutes. Les résultats ont montré que l'ISAD réduisait le temps de séchage effectif d'environ 89 % par rapport aux méthodes de séchage conventionnelles, tout en atteignant la même teneur en eau finale, ce qui a permis une réduction significative de la consommation d'énergie. Cette étude a démontré que l'ISAD est une technique prometteuse pour améliorer l'efficacité des processus de séchage des fruits et pourrait être largement appliquée dans l'industrie alimentaire.



Figure 2.12. Sécheur à air convectif à l'échelle du laboratoire de l'INAT. [35]



Figure 2.13. Coings. [35]

Wei-Peng Zhang et al [36] Les chercheurs ont examiné les stratégies de contrôle de l'humidité relative (HR) pour le séchage à air chaud. Ils ont souligné que l'humidité relative (HR) influence significativement le transfert de chaleur et de masse pendant le séchage. Une HR élevée en début de séchage, suivie d'une réduction progressive, améliore l'efficacité et réduit le durcissement de surface. Cette stratégie est particulièrement adaptée aux matériaux dont les valeurs dans les modèles de Wei bull et Bi-Di sont supérieures à 1 et 0,1, respectivement. Un contrôle automatique de l'HR basé sur la température du matériau peut optimiser l'efficacité et la qualité du séchage.

Mojtaba Nosrat et al, [37] Des chercheurs ont étudié le séchage intermittent multi-étapes du riz brut dans un séchoir à lit vibrant assisté par infrarouge. En faisant varier l'intensité FIR, la température de l'air, la durée de séchage et le ratio de tempérage, ils ont analysé l'humidité, les fissures et la consommation énergétique. Ils ont identifié un gradient critique d'humidité de 10 %

d.b. mm^{-1} , recommandant de le respecter pour éviter les fissures. Le traitement optimal comprenait une FIR de 1000 W/m^2 , $40 \text{ }^\circ\text{C}$ d'air, 30 minutes de séchage et un ratio de tempérage de 4.

Akhilesh Singh et al, [38] Les chercheurs ont développé et utilisé un séchoir à pompe à chaleur assisté par énergie solaire pour étudier les effets de différents ratios d'intermittence sur les performances énergétiques, exégétiques et économiques lors du séchage de chips de radis. L'expérience a été menée en utilisant le réfrigérant futuriste R1234yf. Le processus de séchage a été réalisé de manière intermittente, et la durée totale de séchage (période active + période inactive) a été variée pour évaluer son impact sur l'efficacité de séchage (DE), l'efficacité énergétique, le taux d'extraction d'humidité (MER) et le taux spécifique d'extraction d'humidité (SMER).

Les résultats ont montré que le séchage intermittent entraînait des valeurs plus élevées de MER et de SMER par rapport au séchage continu, et que ces valeurs augmentaient avec la diminution du ratio d'intermittence. L'analyse économique a révélé qu'un ratio d'intermittence plus faible conduisait à une période de récupération plus courte. De plus, le séchage intermittent s'est avéré bien supérieur au séchage continu en termes d'amélioration du taux spécifique d'extraction d'humidité et de l'efficacité énergétique, tout en réduisant les coûts de séchage. Cette étude démontre que le séchage intermittent avec un séchoir à pompe à chaleur solaire est une approche prometteuse pour le séchage efficace de chips alimentaires.

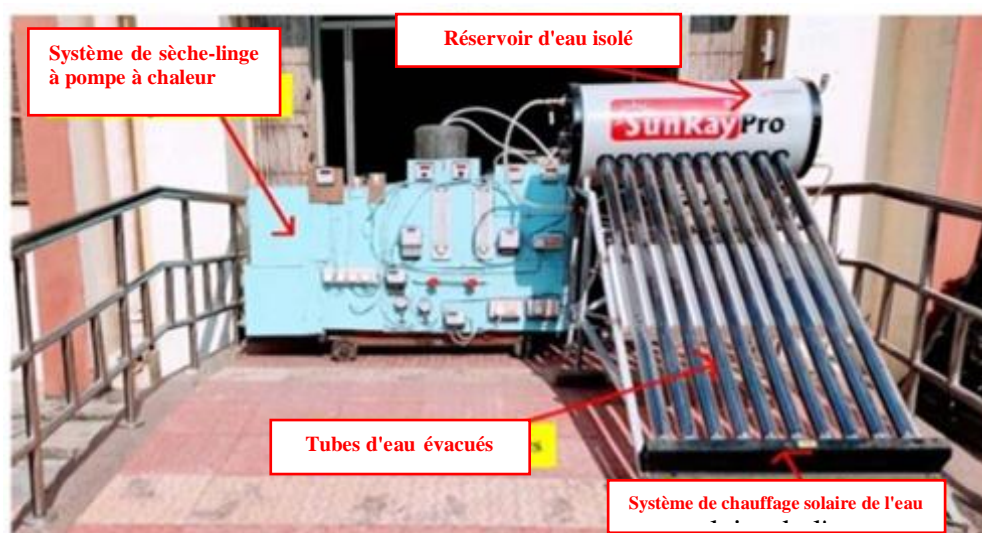


Figure 2.14. Développé une installation expérimentale de SAHPD pour le séchage intermittent. [38]

F Ajuebor et al, [39] Les chercheurs ont étudié l'impact de la température, de la vitesse de l'air, de l'humidité relative et du temps de séchage sur la qualité du piment chili séché en utilisant un plan d'expérience à quatre facteurs. Les résultats ont montré que le temps de séchage et la température de l'air influençaient fortement les attributs de qualité, notamment la teneur en humidité, en protéines et en glucides, ainsi que la charge microbienne. Le modèle de Page a bien décrit la cinétique de séchage, et les conditions optimales identifiées pour un piment chili séché de haute qualité étaient une température de 61,59 °C, une vitesse de 0,70 m/s, une humidité relative de 68,39 % et un temps de séchage de 729,63 minutes.

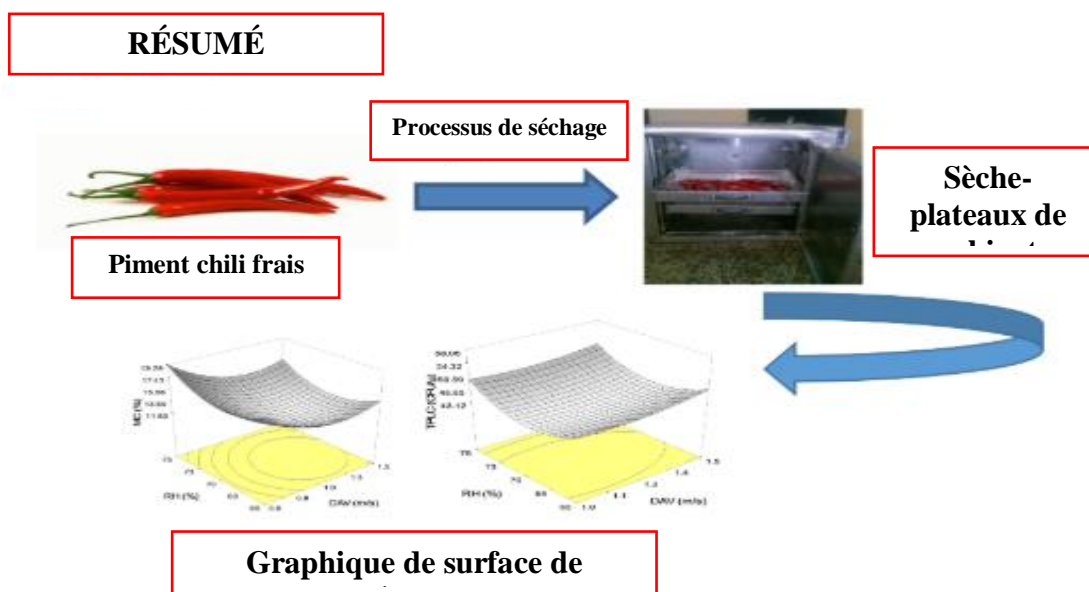


Figure 2.15. Optimisation des conditions de séchage du piment chili dans un séchoir à plateaux : Analyse des surfaces de réponse et des attributs de qualité [39].

Hasan Demir et al, [40] Les chercheurs ont comparé trois méthodes de séchage des câpres (convection, vide, fenêtre réfractive) avec un prétraitement par ultrasons, en optimisant la consommation énergétique spécifique (SEC). Les tests ont été réalisés à 50, 60 et 70 °C jusqu'à une perte de poids de 89,5 %, avec mesure précise de la consommation électrique. Les modèles ANN (Artificial Neural Networks) a surpassé la méthode RSM (Response Surface Methodology) en précision ($R^2 > 0,97$), permettant d'identifier les conditions optimales de séchage les plus économes en énergie.



Figure 2.16 : Câpres [39].

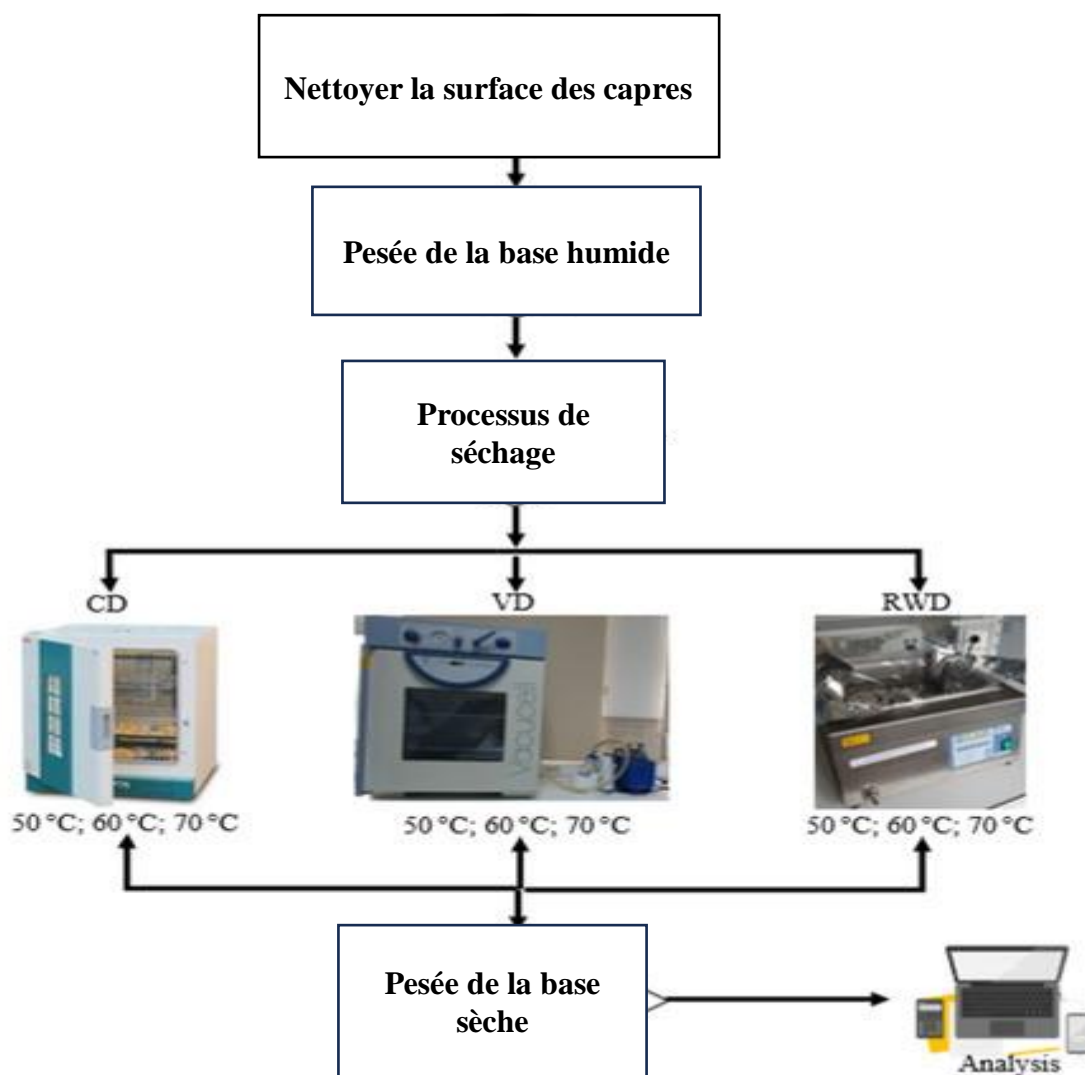


Figure 2.17. Schéma du processus de séchage des câpres [39].

2.3. *Conclusion*

Les études montrent que le séchage intermittent à l'air chaud est une méthode prometteuse pour réduire la consommation d'énergie tout en préservant la qualité des produits. Les cycles marche-arrêt et les variations de température améliorent l'efficacité énergétique et limitent les dommages thermiques. Toutefois, l'efficacité dépend fortement des caractéristiques du produit et des conditions opératoires. La méthode de surface de réponse (RSM) s'est révélée utile pour modéliser et optimiser ces processus. L'intégration de technologies innovantes comme les ultrasons pourrait encore renforcer les performances du séchage intermittent dans l'industrie agroalimentaire.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail de master s'est inscrit dans le cadre de l'optimisation du séchage intermittent à l'aide d'un nouveau séchoir de laboratoire, en mobilisant la méthode des surfaces de réponse (MSR). L'objectif principal consistait à déterminer les conditions opératoires optimales permettant de garantir une déshydratation efficace de produits alimentaires, tout en minimisant la consommation énergétique et en préservant la qualité physico-chimique et organoleptique du produit final.

Les expérimentations réalisées sur trois matrices végétales - pomme, courgette et pomme de terre - ont permis d'évaluer l'effet de deux facteurs clés en mode intermittent : la vitesse de l'air et la durée d'activation (temps ON). L'adoption d'un plan d'expériences de type composite central a facilité la modélisation du système, l'identification des effets significatifs, ainsi que la prédiction des réponses à l'aide de modèles mathématiques fiables. Les résultats ont clairement montré que la stratégie de séchage intermittent permet d'améliorer significativement la performance énergétique du procédé, tout en limitant les altérations structurales et les pertes en nutriments.

En outre, l'étude a révélé que la modulation cyclique des paramètres de séchage favorise une meilleure gestion des transferts de masse et de chaleur, réduisant ainsi les gradients thermiques internes, les risques de fissuration, ainsi que la dénaturation des composants sensibles. Grâce à l'utilisation de la MSR, des conditions optimales ont pu être établies avec précision, conduisant à une réduction mesurable du temps de séchage et de l'énergie consommée, sans compromettre la qualité du produit.

Les résultats obtenus ouvrent la voie à plusieurs axes de recherche complémentaires. Tout d'abord, une évaluation approfondie des propriétés nutritionnelles et sensorielles post-séchage permettrait d'affiner les modèles de prédiction en intégrant des indicateurs de qualité globaux. Par ailleurs, l'intégration de sources d'énergie renouvelables, notamment le solaire thermique ou photovoltaïque, représenterait un prolongement logique vers une approche plus durable du séchage agroalimentaire.

Il serait également pertinent d'explorer l'automatisation intelligente des cycles de séchage à l'aide de capteurs et d'algorithmes d'intelligence artificielle (IA), dans une logique d'Industrie 4.0. Enfin, l'extension de cette étude à d'autres types de produits à forte valeur ajoutée (herbes médicinales, champignons, fruits tropicaux...) ou aux procédés hybrides (micro-ondes, infrarouges, ultrasons) constituerait un champ de recherche prometteur, tant sur le plan scientifique que technologique.

Références bibliographiques

- [1] Chua, K. J., Mujumdar, A. S., & Chou, S. K. (2003). Intermittent drying of bioproducts – an overview. Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore. (Manuscrit reçu le 8 mars 2002 ; révisé le 2 mai 2003 ; accepté le 3 mai 2003).
- [2] Benseddik, A. (2011). *Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée* (Mémoire de magister). Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen.
- [3] Chalal, N. (2007). *Étude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect* (Mémoire de magister). Université Mentouri-Constantine.
- [4] Biolab. (n.d.). *Étuves de séchage à régulation mécanique*. <https://www.biolab.fr/boutique-biolab/materiel-de-laboratoire-consommables/solutions-de-chauffage/%C3%A9tuves-de-s%C3%A9chage-%C3%A0-r%C3%A9gulation-m%C3%A9canique-detail>
- [5] Chouicha, S. (2010). *Étude expérimentale du séchage solaire des dattes humides et impact sur la qualité* (Mémoire de magister). Université Kasdi Merbah, Ouargla
- [6] Sairem. (n.d.). *The different industrial drying technologies*. <https://www.sairem.com/fr/the-different-industrial-drying-technologies/>
- [7] Dumortier, B. (1997). *Traité du Grand Attracteur*. FeniXX.
- [8] Depositphotos. (n.d.). *Photos d'herbes de séchage*. <https://depositphotos.com/fr/photos/herbes-de-s%C3%A9chage.html>.
- [9] Sairem. (n.d.). *The different industrial drying technologies*. <https://www.sairem.com/fr/the-different-industrial-drying-technologies/>
- [10] CEM. (n.d.). *SAM-255*. <https://cem.com/fr/sam-255>.
- [11] Pignat. (n.d.). *Séchage par atomisation*. <https://pignat.com/product/sechage-par-atomisation/>
- [12] Sairem. (n.d.). *The different industrial drying technologies*. <https://www.sairem.com/fr/the-different-industrial-drying-technologies/>
- [13] 123RF. (n.d.). *Tomates délicieuses Pachino séchage au soleil en Sicile*. https://fr.123rf.com/photo_60789794_tomates-d%C3%A9licieux-pachino-s%C3%A9chage-au-soleil-dans-une-%C3%A9norme-production-en-sicily.html
- [14] Karim, M. A., & Law, C.-L. (2017). *Séchage intermittent et non stationnaire : technologie*. [Éditeur non précisé].
- [15] Ho, J. C., Chou, S. K., Chua, K. J., Mujumdar, A. S., & Hawlader, M. N. A. (2001). Analytical study of cyclic temperature drying: Effect on drying kinetics and product quality. *Journal of Food Engineering*, 31(1–2), 65–75. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00108-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00108-3)
- [16] Kumar, C. et al. (2014). *Journal of Food Engineering*, 121, 48–57.

Références bibliographiques

- [17] Ng, M. X. (2019). *Séchage intermittent à haute température : caractérisation de la qualité du caoutchouc en granulés*.
- [18] Singh, A., Sarkar, J., & Sahoo, R. R. (2022). Expérimentation et analyse de performance d'un séchoir à pompe à chaleur assistée par solaire pour le séchage intermittent de chips alimentaires.
- [19] ScienceDirect. (n.d.). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877413004275>
- [20] PubMed. (n.d.). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15702589/>
- [21] Kumar, C. et al. (2014). *Journal of Food Engineering*, 121, 48–57.
- [22] Kowalski, S. J., & Pawłowski, A. (2011). Effet de la teneur en humidité sur l'émission acoustique pendant le séchage d'échantillons de chêne rouge et de kaolin. *Technologie du séchage*, 29(3), 317–324.
- [23] Kumar, C. et al. (2014). *Journal of Food Engineering*, 121, 48–57.
- [24] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877413004275>
- [25] Kumar, C., Putranto, A., Mahiuddin, M., Saha, S. C., Gu, Y. T., & Karim, M. A. (2017). *Modélisation mathématique du séchage intermittent*.
- [26] Dong, R., Lu, Z., Liu, Z., Nishiyama, Y., & Cao, W. (2009). Moisture distribution in a rice kernel during tempering drying. *Journal of Food Engineering*, 91(1), 126–132.
- [27] Chin, S. K., & Law, C. L. (2010). Product quality and drying characteristics of intermittent heat pump drying of *Ganoderma tsugae* Murrill. *Drying Technology*, 28(12), 1457–1465.
- [28] Holowaty, S. A., Ramallo, L. A., & Schmalko, M. E. (2012). Intermittent drying simulation in a deep bed dryer of yerba maté. *Journal of Food Engineering*, 111(1), 110–114.
- [29] Szadzińska, J., Mierzwa, D., Pawłowski, A., Pashminehazar, R., & Kharaghani, A. (2019). Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot. *Drying Technology*, 38(1), 93–107.
- [30] Ghasemi, A., Sadeghi, M., Hamdami, N., & Mireei, S. A. (2011). Effect of temperature and duration of drying and tempering processes on rough rice fissuring and its phenomenological modeling. *Tulīd va Farāvarī-i Maḥṣūlāt-i Zirāī va Bāghī*, 25(1), 1–11.
- [31] Hajji, W., Bellagha, S., & Allaf, K. (2020). Energy-saving new drying technology: Interval starting accessibility drying (ISAD) used to intensify dehydrofreezing efficiency. *Drying Technology*, 40(2), 284–298. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1788072>
- [32] Saleh, R. M., Kulig, B., Emiliozzi, A., Hensel, O., & Sturm, B. (2020). Impact of critical control-point based intermittent drying on drying kinetics and quality of carrot (*Daucus carota* var. *laguna*). *Thermal Science and Engineering Progress*, 20, 100682. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100682>

Références bibliographiques

- [33] Singh, A., Sarkar, J., & Sahoo, R. R. (2022). Experimentation and performance analysis of solar-assisted heat pump dryer for intermittent drying of food chips. *Journal of Solar Energy Engineering*, 144(2), 021004. <https://doi.org/10.1115/1.4052549>
- [34] Nosrati, M., Zare, D., Nassiri, S. M., Chen, G., & Jafari, A. (2021). Experimental and numerical study of intermittent drying of rough rice in a combined FIR-dryer. *Drying Technology*, 40(10), 1967–1979. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1898418>
- [35] Tetang Fokane, A., Edoun, M., Kuitche, A., & Zeghmati, B. (2014). Étude expérimentale du séchage de la mangue en régime intermittent. Communication présentée au *Colloque International sur les Matériels et l'Énergétique (CIMATEN)*, Ngaoundéré, Cameroun.
- [36] Demir, H., Lončar, B., Pezo, L., Brandić, I., Voća, N., & Yilmaz, F. (2023). Optimization of caper drying using response surface methodology and artificial neural networks for energy efficiency characteristics. *Energies*, 16(4), 1687. <https://doi.org/10.3390/en16041687>
- [37] Doymaz, I., & Demirhan, E. (2015). Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. *Heat and Mass Transfer*, 53, 25–35. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1791-8>
- [38] Nghia, D. P., Ghnimi, S., Abesinghe, A. N. L., Joardder, M. U. H., Petley, T., Muller, S., & Karim, M. A. (2017). Effects of process conditions of intermittent drying on quality of food materials. In A. Karim & C.-L. Law (Eds.), *Intermittent and nonstationary drying technologies: Principles and applications* (pp. 97–122).
- [39] Ajuebor, F., Aworanti, O. A., Agbede, O. O., Agarry, S. E., Afolabi, T. J., & Ogunleye, O. O. (2022). Drying process optimization and modelling the drying kinetics and quality attributes of dried chili pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Trends in Sciences*, 19(17), 5752. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.5752>



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen

Business Model Canvas

BMC

N° de projet : 27

Faculté/Institut : Faculté de technologie

Département : Génie mécanique

Nom du projet : **Optimisation des paramètres de séchage intermittent dans un nouveau séchoir de laboratoire à l'aide de la méthode des surfaces de réponses (MSR).**

Encadrant 1 : Mostefaoui Amina

Encadrant 2 : Benseddik Abdelouahab

Co-encadrant 1 : Saim Rachid

Co-encadrant 2 : Kharrafi Mohammed

Etudiants : Zair Manar

Abdelmoumen Fatima Zohra

Année universitaire : 2024/2025

Business Model Canevas : BMC

1- Proposition de valeur (Value Proposition) القيمة المقترحة

a. Quels problèmes résolvons-nous pour nos clients ?

ما هي المشاكل التي نحلها لعملائنا ?

Nous avons remarqué que de nombreux clients recherchent des alternatives saines et naturelles aux collations, c'est pourquoi je m'efforce de proposer des produits déshydratés sans conservateurs qui peuvent être conservés longtemps sans réfrigération.

Les problèmes que nous résolvons pour nos clients :

De leur fournir des produits alimentaires naturels, économiques et faciles à consommer quotidiennement sans avoir besoin de réfrigérateur ou de matières synthétiques.

b. Quels besoins de nos clients satisfont nos produits ou services ?

ما هي الاحتياجات التي يلبها منتجاتنا أو خدماتنا لعملائنا؟

Nous répondons au besoin de collations saines, au bon goût et à haute valeur nutritionnelle, adaptées au régime alimentaire moderne.

c. En quoi notre offre est-elle différente de celle de nos concurrents ?

في ماذا تختلف عروضنا عن تلك التي يقدمها منافسوننا؟

Nous nous sommes concentrés sur le séchage intermittent, ce qui permet de préserver la couleur, le goût et la qualité sans une consommation d'énergie importante par rapport aux méthodes traditionnelles.

d. Quelles est notre proposition unique de valeur ?

ما هو العرض الفريد للقيمة لدينا؟

Produits locaux séchés naturellement, emballés de manière attrayante, respectant la qualité et le goût, et spécialement destinés aux clients à la recherche de santé et de durabilité.

Business Model Canevas : BMC

2- Segments de clients (Customer Segment) انواع العملاء :

a. Quels sont nos clients principaux?

من هم العملاء او الزبائن الرئيسيون ؟

Nos clients principaux sont des individus qui se soucient de l'alimentation saine et des produits locaux, en particulier les familles et les femmes actives.

b. Quels sont les différents segments de clients que nous visons ?

ما هي الفئات المختلفة من العملاء التي تستهدفها؟

Nous visons trois catégories :

1. Le consommateur final via le détail.
2. Magasins d'aliments naturels.
3. Les restaurants et les hôtels à la recherche de produits locaux de qualité.

c. Quels sont les besoins spécifiques de chaque segment de clients?

ما هي الاحتياجات الخاصة لكل فئة من العملاء؟

Le consommateur final recherche la qualité et un prix abordable.

Les magasins recherchent un emballage attrayant et une longue durée de conservation.

Les restaurants ont besoin de produits de qualité constante et faciles à stocker.

d. Comment pouvons-nous catégoriser nos clients en groupes distincts?

كيف يمكن تصنيف عملائنا الى مجموعات مختلفة؟

Nous les classons selon le mode d'achat : consommateur individuel, intermédiaire commercial, acheteur en gros.

3- Relation avec les clients (Consumer Relationships) علاقة مع العملاء :

a. Quel type de relation chaque segment de clients attend il de nous ?

اي نوع من العلاقة يتوقعه كل فئة من العملاء منا؟

Business Model Canevas : BMC

Les clients s'attendent à une communication rapide, à une garantie de qualité, avec des promotions saisonnières.

- b. Comment entretenons-nous actuellement les relations avec nos clients ?

كيف نحافظ حاليًا على العلاقات مع عملائنا؟

Nous communiquons directement par téléphone et via les réseaux sociaux (Facebook et Instagram), et nous suivons régulièrement leurs commentaires.

- c. Comment pouvons-nous améliorer ou personnaliser nos interactions avec nos clients ?

كيف يمكننا تحسين أو تخصيص تفاعلاتنا مع عملائنا؟

Nous prévoyons d'offrir des essais gratuits et une newsletter saisonnière via WhatsApp ou par e-mail, afin de stimuler la fidélité.

4-Canaux de distribution (Channels) قنوات التوزيع :

- a- Par quels canaux nos clients veulent-ils être atteints ?

من خلال أي قنوات يفضل عملائنا أن يتم التواصل معهم؟

Nos clients préfèrent communiquer par téléphone, Facebook et lors des salons locaux.

- b- Quels canaux sont les plus efficaces pour atteindre chaque segment de clients ?

ما هي القنوات الأكثر فعالية للوصول إلى كل فئة من العملاء؟

Pour nous, la vente directe sur les marchés hebdomadaires et les réseaux sociaux a prouvé son efficacité.

- c- Comment pouvons-nous intégrer différents canaux pour améliorer l'expérience clients ?

كيف يمكننا دمج مختلف القنوات لتحسين تجربة العملاء؟

Business Model Canevas : BMC

Nous travaillons sur le développement d'une boutique en ligne simple qui regroupe les commandes avec un service de livraison local.

5-Partenaires clés (Key Partnerships) : الشراكة الرئيسية :

a. Qui sont nos partenaires clés ?

من هم شركاؤنا الرئيسيون؟

Agriculteurs locaux.

Fournisseurs de machines de séchage et d'emballage.

Incubateurs d'entreprises et ANADE.

Techniciens pour aider au développement de la production.

b. Quels sont les partenariats qui nous aident à réduire les coûts, à accéder à de nouvelles ressources ou à améliorer notre proposition de valeur ?

ما هي الشراكات التي تساعدنا على خفض التكاليف أو الوصول إلى موارد جديدة أو تحسين قيمتنا المقترحة؟

Le partenariat avec les agriculteurs garantit les matières premières, et avec les fournisseurs de machines, il réduit les coûts.

c. Comment pouvons-nous aligner nos intérêts avec ceux de nos partenaires ?

كيف يمكننا مزامنة مصالحنا مع تلك لشركائنا؟

Avec des accords clairs et un bénéfice mutuel, en particulier aux étapes de lancement et de distribution.

6-Activités clés (Key Activities) : الأنشطة الرئيسية :

a. Quelles sont les actions principales que nous devons entreprendre pour livrer notre proposition de valeur ?

ما هي الأنشطة الرئيسية التي يجب علينا القيام بها لتقديم قيمتنا المقترحة؟

Acheter et préparer les légumes et les fruits

Mise en œuvre du processus de séchage

L'emballage et le marketing

Business Model Canevas : BMC

- b. Quelles sont les opérations essentielles pour notre entreprise ?

ما هي العمليات الأساسية لشركتنا؟

La surveillance continue du temps et de la température de séchage

Maintenir la propreté et la qualité du produit

Assurer l'efficacité de la distribution

- c. Quelles sont les activités qui créent le plus de valeur pour nos clients ?

ما هي الأنشطة التي تخلق أكبر قيمة لعملائنا؟

Contrôle de la qualité du goût, de la couleur et de l'emballage approprié.

7- Ressources clés (Key resources): الموارد الرئيسية:

- a. Quels sont nos actifs matériels, immatériels et humains essentiels ?

ما هي الأصول المادية وغير المادية والبشرية الأساسية لدينا؟

Machine à sécher

Petit atelier de production

Équipement simple

Connaissances techniques et expérience personnelle

- b. Quels sont les outils, les technologies ou les partenariats dont nous avons besoin pour réussir ?

ما هي الأدوات والتكنولوجيا أو الشراكات التي نحتاجها لتحقيق النجاح؟

Technique de séchage intermittent améliorée, et soutien de programmes de financement nationaux.

- c. Quels sont les principaux avantages concurrentiels de nos ressources ?

ما هي المزايا التنافسية الرئيسية لمواردنا؟

Le contrôle précis du processus, des coûts de production bas, et la flexibilité de production.

Business Model Canevas : BMC

8- Charges et coûts (Coste structure) : التكاليف:

- a. Quels sont les coûts fixes et variables associés à notre modèle économique ?
ما هي التكاليف الثابتة والمتغيرة المرتبطة بنموذجنا الاقتصادي؟

Fixe : achat d'une machine, aménagement de l'atelier.

Variable : matières premières, énergie, emballage.

- b. Quels sont les coûts les plus importants pour notre entreprise ?
ما هي التكاليف الأكثر أهمية لشركتنا؟

Le coût de l'énergie et de l'emballage.

Transport et livraison.

- c. Comment pouvons-nous réduire les coûts ou améliorer l'efficacité de nos opérations ?

كيف يمكننا خفض التكاليف أو تحسين كفاءة عملياتنا?
Amélioration de l'isolation thermique

Utilisation de l'énergie solaire

Réutilisation de la chaleur

9- Revenus (Revenue) : مصادر الدخل:

- a. Quels produits ou services nos clients sont-ils prêts à payer ?
ما هي المنتجات أو الخدمات التي يكون عملاؤنا على استعداد لدفع ثمنها؟

Fruits et légumes secs emballés

Emballages spéciaux pour le thé ou les pâtisseries

- b. Quels sont les différents moyens par lesquels nous pouvons générer des revenus ?



Business Model Canevas : BMC

ما هي الطرق المختلفة التي يمكننا من خلالها تحقيق الدخل؟

Vente au détail (dans les marchés et les magasins).

Vente en gros.

Les commandes saisonnières.

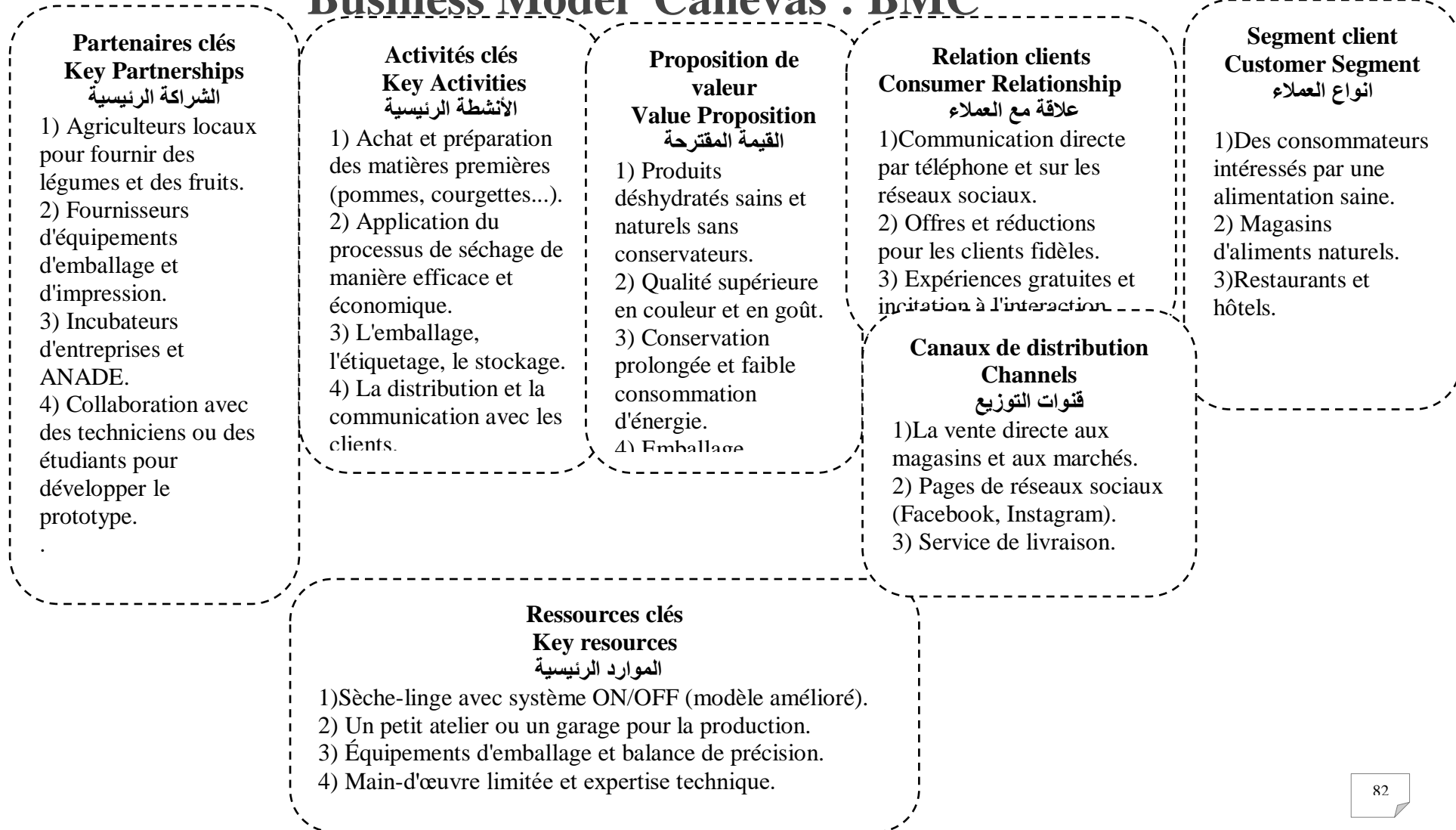
c. Quel est notre modèle de tarification ?

ما هو نموذج التسعير لدينا؟

Nous avons adopté une tarification flexible : vente au kilo ou à l'unité, selon le type de produit.

Business Model Canevas : BMC

Business Model Canevas : BMC





Business Model Canevas : BMC



Coûts Coste structure التكاليف

Coûts fixes		Coûts variables			
Machine de séchages	400 000DA	Achat de matières premières(pomme...)	60 000DA	Marketing,étiquetage et emballage	10 000DA
Outils d'emballage	80 000DA	Electricité	6 000DA	Salaire des ouvriers	30 000DA
Total	480 000DA	Loyer du magasin ou de l'atelier	25 000DA	Marketing en ligne	10 000DA
Total mensuel				141 000DA	

Revenus (Revenue): مصادر الدخل

- 1) Prix de détail : 300 DA par boîte (100 grammes)
- 2) Prix de gros : 250 DA par boîte (100 grammes)
- 3) Nombre de boîtes produites par mois : environ 800 boîtes (selon la capacité de production moyenne)
500 boîtes vendues au détail x 300 DA = 150 000 DA
300 boîtes vendues en gros x 250 DA = 75 000 DA
Total mensuel = 225 000 DA