RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ BATNA -1-

INSTITUT DES SCIENCES VÉTÉRINAIRES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES

DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE ALIMENTAIRE

MÉMOIRE

De fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

En

Génie des procédés Alimentaires

Présenté par : **Mr. SIABDALLAH Nourelislam**

THÈME

AMÉLIORATION DES PERFORMANCES D'UN SÉCHOIR SOLAIRE DES PRODUITS AGROALIMENTAIRES

Soutenu publiquement le : ***20 / 06 / 2017***

Devant le jury composé de :

Pr. ZITOUNI Bariza	**Université Batna 1**	**Président**
Pr. FAHLOUL Djamel	**Université Batna 1**	**Rapporteur**
Pr. BENMOUSSA Hocine	**Université Batna 2**	**Examinateur**
Dr. MADANI Hakim	**Université Batna 2**	**Examinateur**
Dr. LAHBARI Miloud	**Université Batna 2**	**Invité**

2016 / 2017

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ BATNA -1-

INSTITUT DES SCIENCES VÉTÉRINAIRES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE ALIMENTAIRE

MÉMOIRE

De fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

En

Génie des procédés Alimentaires

Présenté par : **Mr. SIABDALLAH Nourelislam**

THÈME

AMÉLIORATION DES PERFORMANCES D'UN SÉCHOIR SOLAIRE DES PRODUITS AGROALIMENTAIRES

2016 / 2017

Remerciements

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

A Monsieur le Professeur FAHLOUL Djamel, pour m'avoir suivi durant mon travail dans le cadre de ce mémoire de Magister, pour ses conseils précieux, pour sa disponibilité et la compétence de son encadrement.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements au Professeur Zitouni Bariza, à l'université de Batna -1-, pour l'intérêt porté à mon travail, sa disponibilité, ses conseils précieux.

Je remercie également, Docteur LAHBARI Miloud Maître de conférences à l'université de Batna-2-, pour sont aide, ses conseils dans le domaine expérimental, ainsi que ses encouragements.

Mes remerciements chaleureux aux membres de jury le Professeur BENMOUSSA Hocine et le docteur MADANI Hakim, d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Mon profond remerciement s'adresse aussi aux membres du labouratoire de recherche sciences des aliments (LSA).

Dédicaces

Grâce à Dieu tout puissant, je dédie ce modeste travail à tout les personnes qui m'ont aidé de prés ou de loin à la réalisation de ce travail plus particulièrement :

- *A mes très chers parents, à mon père décédé (Pitié d'Allah sur lui), tout mon respect et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et orientations dans ma vie,*
- *A mes très chers frères, et sœurs,*
- *A toute ma famille,*
- *A tous mes enseignants,*
- *A tous mes amis.*

A tous ceux qui me sont chers et à ceux qui ont contribué à ma formation.

ملخص

لدراسة وتحسين عملية التجفيف الشمسي، تم تطوير مجفف شمسي بنظام الحمل الحرارى الطبيعي وتحسين أدائه على مستوى مخبر علوم الأغذية. مع دراسة تأثير سرعة الهواء (1، 1.5 و 2 م / ث)، درجة حرارة الهواء (50، 65 و 70 درجة مئوية)، جزء الهواء المعاد تدويره (تصل إلى 90٪)؛ فضلا عن تأثير المعالجة الاولية على نوعية السبانخ المجففة. ثم يتم التحقق من صحة النموذج الرقمي وذلك بفضل تحقيق دراسة تجريبية. ثم مقارنة النتائج التجريبية لدراسة التجفيف مع النتائج النظرية للتحقق من صحة النتائج التي تنبأ بها المحاكاة الرقمية.

وتشير منحنيات التجفيف التي تم الحصول عليها إلى أن تجفيف السبانخ يتم بطريقة موحدة ومتجانسة تقريبا على مستوى جميع الاطباق في وضع التجفيف بنظام الحمل الحراري القسري. يتم تقليص مدة التجفيف يصل إلى 24٪ بفضل رفع درجة الحرارة من 50 الى 70 درجة مئوية، و كذلك برفع في جزء الهواء المعاد تدويرها (يصل إلى 90٪). و يعمل هذا الاخير على خفض استهلاك الطاقة بنسبة 70,7٪. فيما يتعلق بجودة المنتج الذي تم تجفيفه، المعالجة الاولية تحافظ على المنتج أثناء التجفيف ويقلل من فقدان الجودة الحسية. وبعد ذلك قورنت النتائج التجريبية لدراسة التجفيف مع النتائج النظرية للتحقق من صحة النتائج التي تنبأ بها المحاكاة الرقمية. يبدو أن نموذج ميدلي هو الاكثر تكيفا لوصف حركية التجفيف الحراري الشمسي للسبانخ.

الكلمات المفتاحية: التجفيف بالطاقة الشمسية، المنتج المجفف، نقل الحرارة، الأداء، الرطوبة، السبانخ، نقل الكتلة.

Résumé

Afin d'étudier et d'améliorer le procédé de séchage solaire, un séchoir solaire à convection naturelle a été développé et sa performance améliorée au niveau du laboratoire des sciences des aliments (LSA). L'effet de la vitesse de l'air (1, 1.5 et 2 m/s), de la température de l'air (50, 65, 70 °C) et de la fraction d'air recyclé (jusqu'à 90%), a été étudié ; Ainsi que l'effet du prétraitement sur la qualité des épinards à sécher.

Les courbes de séchage obtenues montrent que, le séchage des épinards se fait d'une façon presque uniforme et homogène au niveau de toutes les claies dans le mode de séchage à convection forcée. La durée de séchage est réduite de 24% en augmentant la température de 50 à 70°C, ainsi que par élévation de la fraction de l'air asséchant recyclé (jusqu'à 90 %). Ce dernier permet aussi de réduire la consommation énergétique de 70,7%. En ce qui concerne la qualité des produits à sécher, le prétraitement préserve le produit pendant le séchage et réduit les pertes de la qualité organoleptique. Les résultats expérimentaux de l'étude du séchage ont ensuite été confrontés aux résultats théoriques pour valider les résultats prédits par la simulation numérique. Elle montre que le modèle de Midilli et al., est le plus approprié pour la description des cinétiques de séchage solaire convectif en couches minces des épinards.

Mots clés : *Séchage solaire, produit séché, transfert de chaleur, performance, humidité, épinard, transfert de masse.*

Abstract

In order to study and to improve the solar process of drying, a solar drier with natural convection was developed and its performance improved with the level of the laboratory of sciences of food (LSA). The effect the air velocity (1, 1.5 and 2 m/s), of the temperature of the air (50, 65.70 °C) and of the fraction of recycled air (up to 90%), was to study; As well as the effect of the pretreatment on the quality of spinaches to dry. The validation of the developed model is then carried out thanks to the realization of an experimental study. The experimental results of the study of drying were then confronted with the theoretical results to validate the results predicted by the digital simulation.

The curves of drying obtained show that, the drying of spinaches is done in an almost uniform and homogeneous way on the level of all the trays in the mode of drying to forced convection. The duration of drying is reduced by 24% by increasing the temperature of 50 with 70°C, like by rise in the fraction of the recycled draining air (up to 90%). This last also makes it possible to reduce the energy consumption by 70.7%. With regard to product quality to be dried, the pretreatment preserves the product during drying and reduces the losses of organoleptic quality. The experimental results of the study of drying were then confronted with the theoretical results to validate the results predicted by the digital simulation. It shows that the model of Midilli and al., is adapted the most for the description of the kinetics of convectif solar drying in thin layers of spinaches.

Keywords: *Solar drying, dried product, transfer of heat, performance, moisture, spinach, transfer mass.*

NOTATIONS

Symboles	Désignations	Unités
χ^2	Ki-carrée	
μ_f	Viscosité cinématique	Kg/(m.s)
A	Surface d'échange	m^2
A_w	Activité de l'eau	
C_m	Fraction massique	
Cp	Chaleur spécifique	J/Kg.K
D_f	Coefficient de diffusion	m^2/s
-dx/dt	Vitesse de séchage du produit	Kg eau / (Kg (Ms).s)
F	Facteur de forme	
F_e	Facteur d'émission	
g	Accélération de pesanteur	m/s^2
Gr	Nombre de Grashof	
H_a	Humidité absolue	Kg eau / Kg (Ms)
H_{as}	Humidité absolue de saturation	Kg eau / Kg (Ms)
h_c	Coefficient de convection thermique	W/ (m^2.K)
H_{eq}	Humidité relative d'équilibre	Kg eau / Kg (Ms)
H_r	Humidité relative	Kg eau / Kg (Ms)
I_G	Flux global incident	W/m^2
J	Flux massique surfacique	Kg / (m^2.s)
k, n	Constantes d'Henderson	
k_f	Perméabilité intrinsèque	m^2
$m_{a.s}$	Masse d'air sec	Kg
m_h	Distance optique atmosphérique	
M_h	Masse humide du produit	Kg
M_S	Masse sèche du produit	Kg
M_T	Masse totale	Kg
$m_{v.e}$	Masse de la vapeur d'eau	Kg
n'	Nombre de couche adsorbé	
Nu	Nombre de Nusselt	
P	Pression totale	Pascal

P_C	Partie comestible	Kg
P_m	Tension de vapeur	Pascal
P_s	Pression de saturation	Pascal
Q	Débit volumique	m^3/s
r^2	Coefficient de corrélation	
S	Surface	m^2
T	Température	K
t	Temps	S
T_H	Température humide	K
T_r	Température de rosé	K
U	Vitesse de l'air	m/s
V	Volume	m^3
X_{eq}	Humidité d'équilibre	Kg eau / Kg (Ms)
X_f	Teneur en eau finale	Kg eau / Kg (Ms)
X_h	Teneur en eau base humide	Kg eau / Kg (Mh)
X_{lim}	Teneur en eau limite	Kg eau / Kg (Ms)
X_r	Teneur en eau réduite	Kg eau / Kg (Ms)
X_s	Teneur en eau base sèche	Kg eau/ Kg (Ms)
α_a	Facteur d'absorption	
B	Coefficient de dilatation	m/s^2
δ	Épaisseur de couche limite	µm
ΔE	Distance de couleur	
E	Porosité volumique	
ε	Émissivité	
η	Rendement	
λ	Longueur d'onde	µm
λ_c	Conductivité thermique	W/ (m.K)
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
ρ_r	Facteur de réflexion	
σ_s	Constante de stefan	$W/ (m^2 K^4)$
τ_t	Facteur de transmission	
Φ_a	Flux absorbant	W
φ_d	Flux diffuse	W
φ_g	Flux globale	W

Φ_p	Flux perdue	W
Φ_s	Flux stockée	W
Φ_u	Flux utilise	W
Ψ	Degré de saturation	%

INDICES

a	L'air dans la couche limite
p	Produit (les feuilles des épinards)
∞	L'air asséchant
0	Initiale
éq	Équilibre
s	Saturation
c	Consommable

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Diagramme de l'air humide 5
Figure 1.2. Séchage de solide par entraînement. 7
Figure 1.3. Cinétique de séchage X= f(t) 10
Figure 1.4. Cinétique de séchage dx/dt = f(t) 10
Figure 1.5. Cinétique de séchage dx/dt = f(X) 10
Figure 1.6. Différents séchoirs conventionnels 12
Figure 2.1. Description du solide humide 18
Figure 2.2. Volume de contrôle microscopique. 19
Figure 2.3. Volume de contrôle macroscopique 19
Figure 2.4. Différents types d'eau dans le matériau 20
Figure 2.5. Isotherme de sorption 22
Figure 2.6. Effet des différents prétraitements sur la vitesse de déshydratation osmotique (a) et l'acceptabilité du goût par le consommateur (b) 29
Figure 3.1. Différents systèmes du séchage solaire 33
Figure 3.2. Séchage solaire à l'air libre 34
Figure 3.3. Différentes conception du séchoir solaire 35
Figure 3.4. Séchoir solaire direct 36
Figure 3.5. Séchoir solaire coffre 37
Figure 3.6. Séchoir solaire intégral à convection naturelle 37
Figure 3.7. Séchoir solaire cabane à convection naturelle 38
Figure 3.8. Séchoir solaire indirect 39
Figure 3.9. Séchoir solaire mixte (a) mode active, (b) mode passive 39
Figure 3.10. Séchoir solaire hybride (solaire – gaz) 40
Figure 3.11. Séchoir solaire hybride (solaire-électrique) 41
Figure 3.12. Capteur solaire plan à air. 43
Figure 3.13. Différents types du capteur solaire à air selon leurs modes d'écoulement 44
Figure 4.1. Séchoir solaire indirect passif. 48
Figure 4.2. Capteur solaire à air 48
Figure 4.3. Unité de séchage. 49
Figure 4.4. Pyranomètre 50

Figure 4.5. Appareil de mesure de température au cœur de produit..... 50
Figure 4.6. Anémomètre..... 51
Figure 4.7. Appareil de mesure de l'humidité relative et de température de l'air..... 51
Figure 4.8. Balance de précision ±0,1 g..... 51
Figure 4.9. Dessiccateur..... 52
Figure 4.10. Colorimétrie..... 52
Figure 4.11. Feuilles des épinards (Spinacia oleracea)..... 53
Figure 4.12. Feuille de l'épinard avant et après découpage. 56
Figure 4.13. Ventilateur turbine..... 58
Figure 4.14. Appoint électrique avec trois résistances de 2250 W. 58
Figure 4.15. Schéma représentant les coordonnées de Hunter des différentes couleurs 61
Figure 5.1. Variation des conditions ambiantes au cours du temps de la journée de l'expérience. 63
Figure 5.2. Évolution de la température de l'air asséchant au niveau du capteur du séchoir solaire existant. 64
Figure 5.3. Évolution de la température et de l'humidité relative de l'air dans la chambre du séchoir solaire existant. 65
Figure 5.4. Teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour les trois claies (1, 2 et 3) dans le séchoir solaire à convection naturelle. 66
Figure 5.5. Vitesse de séchage des épinards en fonction de la teneur en eau réduite pour les trois claies (1, 2 et 3) dans le séchoir solaire à convection naturelle. 66
Figure 5.6. Évolution de la température au cœur des épinards séchés dans le séchoir solaire à convection naturelle. 67
Figure 5.7. Teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour différentes valeurs de vitesse (1, 1.5 et 2m/s) de l'air asséchant. 68
Figure 5.8. Vitesse de séchage des épinards en fonction de la teneur en eau pour différentes vitesses d'air asséchant (1, 1.5 et 2m/s) dans le séchage à convection forcé..... 68
Figure 5.9. Teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour les deux claies (1 et 2) dans les deux modes de séchage solaire naturel et forcé. 69
Figure 5.10. Teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour différentes valeurs de température de l'air asséchant pour une vitesse fixe de 1 m.s $^{-1}$..... 71
Figure 5.11. Vitesse de séchage des épinards en fonction de la teneur en eau pour différentes valeurs de température de l'air asséchant pour une vitesse de l'air fixe de 1 m.s $^{-1}$. 71

Figure 5.12. Teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour différentes valeurs de température de l'air asséchant pour une vitesse de l'air fixe de 1.5 m.s $^{-1}$..... 72
Figure 5.13. Vitesse de séchage des épinards en fonction de la teneur en eau pour différentes valeurs de température de l'air asséchant pour une vitesse d'air fixe de 1.5 m.s^{-1}. 72
Figure 5.14. Teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour différentes valeurs de température de l'air asséchant pour une vitesse de l'air fixe de 2 m.s $^{-1}$..... 73
Figure 5.15. Vitesse de séchage des épinards en fonction de la teneur en eau pour différentes valeurs de température de l'air asséchant pour une vitesse d'air fixe de 2 m.s^{-1}. . 73
Figure 5.16. Évolution de température de l'air dans le capteur du séchoir solaire hybride. 74
Figure 5.17. Évolution de la température et de l'humidité relative de l'air dans la chambre du séchoir solaire hybride. 74
Figure 5.18. Évolution de la température à l'intérieure des feuilles de l'épinard séché dans le séchoir solaire hybride. 75
Figure 5.19. Teneur en eau des épinards séchés en fonction de temps pour différentes fractions de l'air recyclé (0%, 50%, 90%). 76
Figure 5.20. Vitesse de séchage solaire des épinards à convection naturel en fonction de la teneur en eau pour différentes fractions de l'air recyclé (0, 50 et 90%). 76
Figure 5.21. Teneur en eau des épinards séchés en fonction de temps pour différentes fractions de l'air recyclé (0, 50 et 90%) pour une vitesse de l'air fixe 1 m/s..... 77
Figure 5.22. Vitesse de séchage des épinards en fonction de la teneur en eau pour différentes fractions de l'air recyclé (0, 50 et 90%) pour une vitesse de l'air fixe 1 m/s..... 77
Figure 5.23. Évolution de la température de l'air au niveau du capteur d'un séchoir solaire à convection naturel en fonction de temps avec système de recyclage de l'air. 78
Figure 5.24. Évolution de la température et de l'humidité relative dans la chambre de séchage en fonction de temps avec système de recyclage de l'air. 78
Figure 5.25. Teneur en eau réduite des épinards traités et non traités en fonction du temps de séchage. 79
Figure 5.26. Vitesse de séchage des épinards traités et non traités en fonction de la teneur en eau réduite. 79
Figure 5.27. Épinards avant et après le séchage. 80
Figure 5.28. Changement de couleur des épinards pour différentes méthodes de séchage (A, B, C, D) par rapport à la couleur de l'état frais. 83

Figure 5.29. Variation de l'indice de la qualité des épinards pour différentes méthodes du séchage. 84
Figure 5.30. Teneur en eau réduite prédite par le modèle de Midilli *et al.*, en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale des épinards. 86
Figure 5.31. Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale des épinards pour Ta = 50°C, et Va = 1,5 m/s..... 87
Figure 5.32. Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale des épinards pour Ta = 65°C, et Va = 1,5 m/s..... 88
Figure 5.33. Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale des épinards pour Ta = 70°C, et Va = 1,5 m/s..... 88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Modèles des courbes de sorption, désorption..... 24
Tableau 2.2. Modèles mathématiques utilisés pour décrire la cinétique de séchage à couche mince 30
Tableau 3.1. Avantages et inconvénients des différents types des séchoirs solaires. 41
Tableau 5.1. Caractéristiques physicochimiques des épinards fraiches et sèches. 80
Tableau 5.2. Partie comestible des épinards. 81
Tableau 5.3. Modélisation de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage des épinards pour T= 65°C, et V= 1.5 m/s. 85

Sommaire

LISTE DES FIGURES 11

LISTE DES TABLEAUX 15

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

1. GÉNÉRALITÉS SUR LE SÉCHAGE 3

1.1. Séchage 3

1.2. Modes de séchage 3

1.2.1. Ébullition 3

1.2.2. Entraînement 3

1.3. Air de séchage 4

1.3.1. Humidité absolue 4

1.3.2. Humidité relative 4

1.3.3. Température de l'air 6

1.3.4. Enthalpie de l'air humide 6

1.4. Mécanisme de séchage 6

1.4.1. Transfert par conduction 7

1.4.2. Transfert par convection 8

1.4.3. Transfert par rayonnement 8

1.4.4. Transfert de matière 9

1.5. Cinétique du séchage 9

1.6. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage 11

1.6.1. Influence de la température de l'air. 11

1.6.2. Influence de la vitesse de l'air 12

1.6.3. Influence de l'humidité de l'air 12

1.7. Différents procédés du séchage 12

1.7.1. Séchage convectif à l'air chaud 13

1.7.2. Lyophilisation 13

1.7.3. Séchage par micro-ondes 13
1.7.4. Séchage sous vide 14
1.7.5. Déshydratation osmotique 14
1.7.6. Séchage solaire 14
1.8. Domaines d'utilisation du procédé de séchage 15
2. SECHAGE SOLAIRE DES PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES 17
2.1. Séchage des produits alimentaires 17
2.2. Produits alimentaires humides 18
2.2.1. Caractéristiques d'un produit alimentaire 18
2.2.2. État de l'eau dans un produit 19
2.2.3. Teneur en eau du produit 20
2.2.4. Activité de l'eau et isotherme de sorption 21
2.3. Altérations des produits alimentaires 24
2.3.1. Altération des produits après récolte 24
2.3.2. Action du séchage sur la qualité du produit alimentaire 25
2.4. Prétraitements appliqués avant le procédé de séchage 26
2.4.1. Prétraitements thermiques 27
2.4.2. Prétraitements chimiques 27
2.4.3. Prétraitements mécaniques 27
2.4.4. Prétraitements enzymatiques 28
2.4.5. Prétraitements à froid 28
2.5. Modélisation mathématique des transferts lors du séchage 29
2.5.1. Classification des modèles de séchage 29
2.5.2. Modélisation des courbes d'humidité réduites 30
3. SÉCHOIRS SOLAIRES 32
3.1. Classification des systèmes du séchage solaire 32
3.1.1. Séchage solaire à l'air libre 33
3.1.2. Séchoir solaire contrôlé 34

3.1.3. Avantages et inconvénients des différents types des séchoirs solaires 41
3.2. Capteur solaire plan 42
3.2.1. Éléments constituants d'un capteur solaire 43
3.2.2. Différents types de capteurs solaires plans 44
3.2.3. Paramètres de la fonctionnalité du capteur 45
3.2.4. Bilan thermique d'un capteur solaire 46
3.2.5. Performance thermique d'un capteur solaire 46
4. MATÉRIELS ET MÉTHODES 47
4.1. Matériels 47
4.1.1. Séchoir solaire 47
1.1.2. Instruments de mesure 50
1.1.3. Produit alimentaire à sécher 52
1.2. Méthodes expérimentales 56
1.2.1. Évaluation de performance du séchoir solaire existant 57
1.2.2. Séries des améliorations sur le séchoir solaire 57
1.2.3. Caractérisation physico-chimique du produit séché 59
1.3. Analyse numérique des résultats expérimentaux 62
1.3.1. Détermination de la courbe caractéristique de séchage 62
1.3.2. Validation du modèle numérique 62
5. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 63
5.1. Conditions expérimentales 63
5.2. Évaluation du séchoir solaire existant 64
5.2.1. Évolution de la température du séchoir solaire 64
5.2.2. Essais de séchage des épinards dans le séchoir solaire existant 65
5.2.3. Évolution de la température du produit au cours du séchage 66
5.3. Évaluation du séchoir solaire amélioré 67
5.3.1. Effet de la ventilation sur la cinétique de séchage 67
5.3.2. Effet de la température sur la cinétique de séchage 69

5.3.3. Effet du recyclage de l'air sur la cinétique de séchage 75
5.3.4. Pesée continue 78
5.3.5. Effet du prétraitement sur la cinétique de séchage solaire 79
5.4. Évolution de la qualité du produit séché 80
5.4.1. Caractéristiques physico-chimiques des épinards..... 80
5.5. Modélisation mathématique des cinétiques de séchage 84
5.5.1. Teneur en eau réduite 84
5.5.2. Courbe caractéristique du séchage 86
5.5.3. Validation du modèle 88
CONCLUSION ET PERSPECTIVES 89
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 91
ANNEXE I..... 114
ANNEXE II 114

Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les produits alimentaires sont généralement des milieux hétérogènes et rapidement périssables vu leurs richesses en eau. Les biologistes ont constaté qu'en ramenant la teneur en humidité des produits agroalimentaires entre 10 et 20 %, les bactéries, les champignons et les enzymes sont presque tous neutralisés.

Le développement des transformations post-récoltes des produits agricoles dans les pays en développement tient une place importante dans la réduction des pertes constatées entre la récolte et la mise à disposition des produits aux consommateurs. En effet, ces pertes sont estimées en moyenne à 25% pour les céréales et à plus de 50% pour les fruits, les légumes et les tubercules .

Parmi les procédés de stabilisation ou de transformation des produits agricoles, le séchage est très pratiqué pour différentes raisons parmi lesquelles, sa simplicité et son coût relativement bas. Le séchage est l'une des plus anciennes opérations unitaires qui permet la conservation des aliments par l'élimination partielle ou totale d'eau. Les produits séchés peuvent être conservés pendant plusieurs mois. En plus, un produit séché pèse environ 1/6 du produit alimentaire frais. Ils n'ont pas besoin d'équipement spécial pour le stockage et sont faciles à transporter. Le séchage direct au soleil est la méthode la plus utilisée dans la plupart des pays en voie de développement ; l'inconvénient lié au séchage ouvert au soleil qui est un séchage insuffisant, est la décoloration par le rayonnement UV et la contamination par la poussière, par les matériaux étrangers, par les insectes et micro-organismes. L'utilisation des divers séchoirs solaires a été développée pour surmonter les problèmes du séchage ouvert du soleil.

Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, ou les séchoirs solaires. Ce dernier correctement conçu peut alléger les inconvénients liés au séchage ouvert du soleil, et les qualités du produit final peuvent être améliorées. Dans les pays développés, de nombreux travaux ont conduit à une maîtrise du procédé de séchage, et de la conception de séchoirs permettant ainsi de réduire les durées de séchage, d'améliorer la qualité des produits séchés, et d'éliminer les pertes liées au mauvais séchage des produits. Ces travaux ont été également réalisés tant au niveau des séchoirs

, qu'au niveau du procédé de séchage

Mais, force est de constater que la pratique du séchage est restée fortement traditionnelle.

Notre travail vise à améliorer la conception et la performance d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle. Afin de réduire le temps et le cout de séchage et préserver la qualité organoleptique des produits à sécher.

Le plan d'organisation du présent mémoire s'articule autour de trois parties décrites comme suit :

La première partie présente l'étude bibliographique portant sur les recherches effectuées dans le domaine de séchage, en particulier les notions générales sur le séchage, la théorie du séchage en présentant les différentes lois fondamentales, les phénomènes physiques internes et externes au produit solide, et l'étude des différents types d'appareillage de séchoirs solaires et leurs constitutions.

La deuxième partie aborde le dispositif expérimental utilisé pour suivre les améliorations insérées sur le séchoir solaire existant, ainsi que les instruments de mesure (Température, Humidité et Vitesse d'air.), et les essais de séchage effectuées sur des produits alimentaires.

La troisième partie présente les résultats expérimentaux obtenus à partir des séries d'expériences faites sur le séchoir. La qualité du produit final aux différentes conditions opératoires a été évaluée en tenant compte des critères de qualités organoleptiques.

Enfin le travail termine par une conclusion qui englobe une synthèse générale de l'étude.

Chapitre I

Généralités Sur Le séchage

1. GÉNÉRALITÉS SUR LE SÉCHAGE

1.1. Séchage

Le séchage est une opération consistant à retirer une partie du solvant d'un corps, par vaporisation de ce solvant, le produit final dit « sec » étant obtenu sous une forme solide de taille variable, éventuellement de « solide divisé » ou de poudre. Le produit passe ainsi d'un état initial dit « humide », selon le cas solide ou liquide, jusqu'à un état final dit « solide sec », même s'il contient encore une teneur en eau (ou solvant) résiduelle ; Le solvant considéré est le plus souvent l'eau, les mêmes principes pouvant s'appliquer à d'autres solvants. Le séchage est une opération de « séparation thermique », dans le sens qu'il faut fournir l'énergie de vaporisation du solvant, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur. En séchage, on devra donc s'intéresser à la fois aux transferts de matière et de chaleur couplés.

Diverses techniques existent pour séparer l'eau d'un produit, qui ne supposent pas forcément sa vaporisation, pressage, égouttage, essorage centrifuge, etc..., et qu'on appellera d'une façon générale «déshydratation». Le séchage est donc une technique particulière de déshydratation, le terme de séchage étant réservé au cas de la séparation par vaporisation du solvant

1.2. Modes de séchage

Parmi les techniques d'élimination d'eau par voie thermique, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire par évaporation l'eau d'un produit ; des procédés par ébullition et des procédés par entraînement

1.2.1. Ébullition

Le produit est porté à la température telle que la pression de vapeur d'eau du produit devient égale à la pression totale ambiante régnant dans le séchoir. La température du liquide est donc déterminée par la pression d'ébullition (par exemple 100°C pour l'eau à $1{,}013 \times 10^5$ Pa)

1.2.2. Entraînement

L'énergie est apportée par un gaz vecteur en mouvement, généralement de l'air chaud. Ce gaz est conditionné de manière à ce que sa température soit supérieure à celle du produit, et la pression de vapeur d'eau **P** dans le produit est supérieure à la pression partielle d'eau **p** dans l'atmosphère qui l'environne. Il y a séchage par entraînement, si **Pt** est la pression totale

régnant dans l'installation, vérifié l'inégalité : **p < P < Pt**. Il s'agit en fait d'un transfert de masse par gradient de pression de vapeur d'eau

Ces deux mécanismes peuvent se succéder au cours d'une opération de séchage ou coexister dans un produit à un moment donné

1.3. Air de séchage

Le séchage par évaporation d'eau du produit constitue le procédé le plus commun quand on parle de séchage. Il comporte le séchage par ébullition et le séchage par entraînement.

Dans les séchoirs par entraînement, les produits sont placés dans un courant d'air chaud et sec dont la pression de vapeur est inférieure à celle du produit. L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est apportée par l'air chaud qui par la même occasion sert de vecteur pour évacuer l'eau évaporée. L'eau est évaporée sous l'effet du gradient de pression partielle en eau, sans atteindre sa température d'ébullition.

Dans le cas idéal où toute l'énergie nécessaire à la vaporisation est apportée par convection à partir de l'air chaud, et s'il n'y a pas de perte de chaleur, le séchage est dit isenthalpique. Dans le cas où d'autres modes d'apport de chaleur se combinent à la convection dans le cas du séchage par entraînement, le séchage est alors non isenthalpique.

L'air de séchage est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Les grandeurs sont rapportées en kg d'air sec, associé à Y kg de vapeur d'eau

Les importantes grandeurs caractérisant l'air humide sont représentées dans le diagramme de l'air humide (**Figure 1.1**) et définirent comme suit :

1.3.1. Humidité absolue

Appelée aussi humidité spécifique, ou teneur en eau (X); représentant le rapport de la masse de la vapeur d'eau ($m_{v.e}$) contenue dans un volume V de l'air humide sur la masse d'air sec ($m_{a.s}$) contenue dans ce même volume

$$X = \frac{m_{v.e}}{m_{a.s}} \tag{1.1}$$

1.3.2. Humidité relative

L'humidité relative (φ) est le rapport entre la pression de la vapeur d'eau dans l'air (P_V) sur la pression de saturation ($P_{S,\theta}$) de cette vapeur d'eau à la température θ.

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{s.\theta}} \tag{1.2}$$

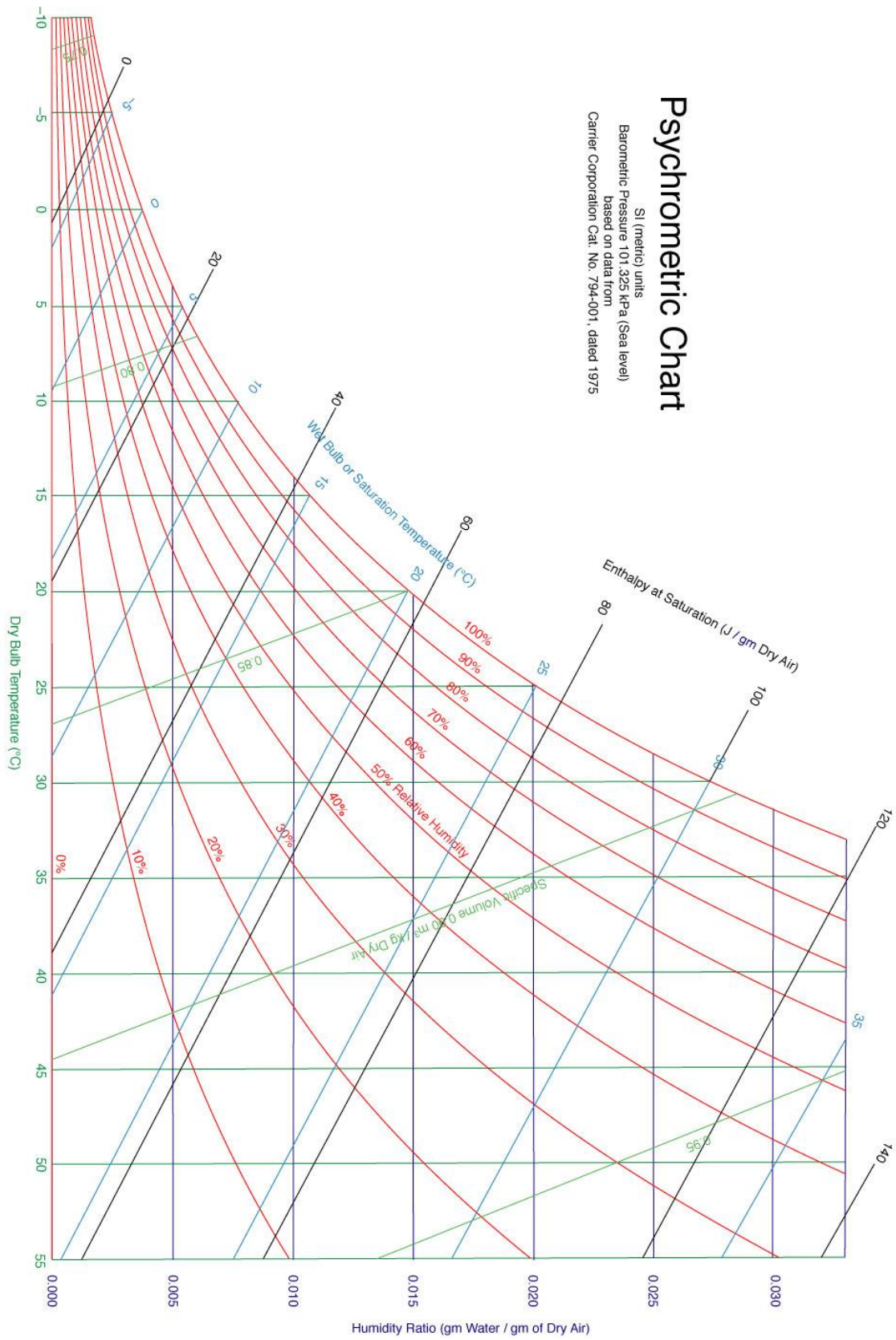


Figure 1.1. Diagramme de l'air humide

En pratique, on utilise beaucoup plus l'humidité absolue (X) que la pression P_V. Par conséquent, on donne le rapport entre l'humidité absolue (X) de l'air pour une certaine température et X_S humidité absolue correspondante à l'état de saturation pour la même température ; rapport appelée degré de saturation Ψ

$$\psi = \frac{X}{X_S} \tag{1.3}$$

1.3.3. Température de l'air

On nomme température sèche T de l'air ou d'un gaz la température indiquée par une sonde de température nue placée dans le courant d'air ou de gaz. La température humide T_H (ou température de bulbe humide) c'est la température indiquée par le thermomètre lorsqu'on couvre le bulbe du thermomètre avec une mèche humide (imprégnée d'eau liquide ex : tissu, coton, ...)

La différence ($T-T_H$) représente l'humidité relative de l'air :

- Elle est égale à zéro si l'air est saturé en vapeur d'eau c'est-à-dire φ=100%. Donc, pas d'évaporation possible.
- Elle augmente avec la différence [$P_S(\theta) - P_V$] qui est le terme moteur du transfert de masse.

1.3.4. Enthalpie de l'air humide

L'enthalpie de l'air humide définit le contenu énergétique de cet air. L'enthalpie notée H de 1kg d'air sec associe à Y kg de vapeur d'eau à θ ºC représente la quantité de chaleur à fournir à ce mélange sous une pression constante pour l'amener de la température de référence 0 ºC à la température de θ °C. Les états de référence à considérer sont l'eau liquide et le gaz sec à 0ºC. L'enthalpie de l'air humide H est la somme de l'enthalpie de l'air et de l'enthalpie de l'eau

$$H = cp_a\theta + Y(L_v + cp_e\theta) \tag{1.4}$$

Où :

Cp_a et **Cp_e** sont respectivement les chaleurs massiques de l'air et de l'eau à l'état gazeux et **L_v** la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0 ºC.

1.4. Mécanisme de séchage

Le séchage fait appel à trois modes de transfert de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement, ainsi que le transfert de matière. Ceux-ci sont utilisés seuls ou

combinés entre eux Les deux transferts se dédoublent en une phase externe et une phase interne

- Transfert de chaleur de la source de chaleur vers la surface du produit ;
- Transfert de chaleur interne de la surface vers le cœur du produit ;
- Transfert de masse interne du cœur vers la surface du produit ;
- Transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu vecteur de la vapeur d'eau.

En séchage par entrainement à l'air chaud, c'est l'air à la fois qui apporte la chaleur et emporte la vapeur (**Figure 1.2**).

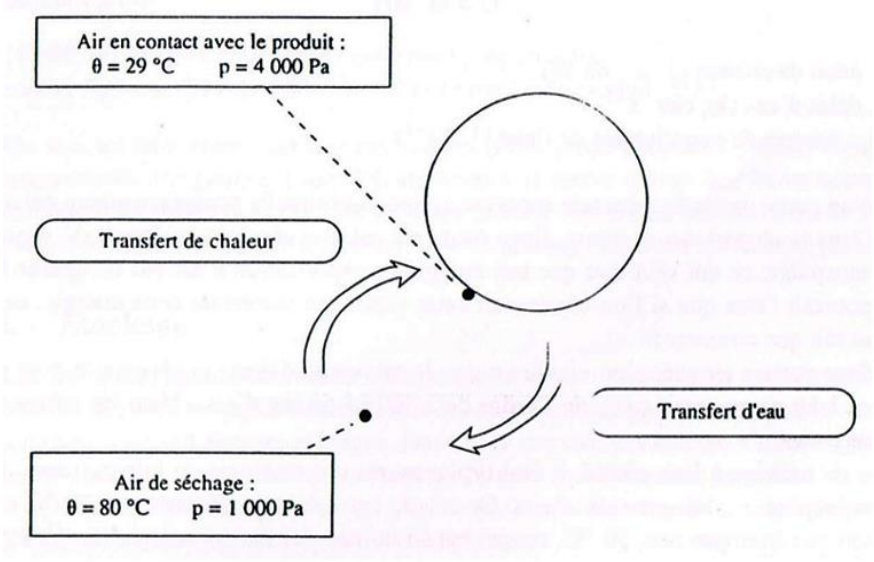


Figure 1.2. Séchage de solide par entraînement

1.4.1. Transfert par conduction

La conduction est la transmission de la chaleur dans la matière par vibration moléculaire. Elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement

Le flux transmis par conduction (en **watts**) s'exprime alors par la **loi de Fourier :**

$$\phi = -\lambda_c . S \frac{dT}{dX} \tag{1.5}$$

Soit :

Φ : Flux de chaleur (W).

$\boldsymbol{\lambda_c}$: Conductivité thermique (W/m.K).

S : Surface (m^2).

1.4.2. Transfert par convection

Le transfert de chaleur par convection est complexe, car il résulte de la superposition de deux phénomènes :

• Conduction entre les particules de fluide qui se rencontrent ;

• Mélange de ces particules par suite du mouvement d'ensemble du fluide.

Si ce mouvement n'est provoqué que par les seules différences de températures (donc de densité), la convection est dite **libre ou naturelle**. Si ce mouvement résulte d'une action mécanique (pompe, ventilateur, etc.), la convection est dite **forcée**.

Le transfert par convection est régie par la **loi de Newton** qui stipule que le flux de chaleur transmis est proportionnel à l'écart entre la température $\mathbf{T_1}$ du corps solide qui reçoit ou transmet de la chaleur et la température $\mathbf{T_2}$ du liquide ou du gaz qui transmet ou reçoit cette chaleur Le flux transmis par convection en (**W**) s'exprime alors par l'équation fondamentale suivante :

$$\phi = h_c.S(T_2 - T_1) \tag{1.6}$$

Avec :

$\mathbf{h_c}$: Coefficient de convection thermique ($W/m^2.K$) ;

S : Surface d'échange considérée (m^2) ;

$\mathbf{T_1}$: Température la plus chaude (paroi ou fluide en °C) ;

$\mathbf{T_2}$: Température la plus froide (fluide ou paroi en °C).

1.4.3. Transfert par rayonnement

L'énergie est apportée aux produits à sécher par des ondes électromagnétiques (rayonnement), soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. Les sources chaudes émettrices peuvent être des émetteurs au gaz combustible, des émetteurs électriques, ou le soleil La quantité de chaleur Q (en watts) transmise au produit à sécher par unité de temps est définie par la **loi de Stephan Boltzmann** :

$$\phi = \sigma.S.T^4 \tag{1.7}$$

Avec :

Φ : Puissance totale émise ($W.m^{-2}$) ;

T : Température de la source émettrice (K) ;

S : Surface émettant le rayonnement (m^2) ;

σ : Constante de Stefan = $\mathbf{5,6703\ 10^{-8}}$ ($W.m^{-2}.K^{-4}$).

1.4.4. Transfert de matière

1.4.4.1. Transfert interne

L'eau migre de l'intérieur vers la surface du produit sous l'action de divers mécanismes qui peuvent se combiner. Il est généralement admis que le transport capillaire est l'un des mécanismes fondamentaux dans les produits poreux riches en eau.

Dans les produits alimentaires, on préfère souvent attribuer le transport d'eau à une diffusion d'eau liquide sous l'effet du gradient de concentration. L'évolution de teneur en eau s'exprime en fonction du gradient de teneur en eau et d'une diffusivité globale qui regroupe les différents phénomènes de transport, dans une loi analogue à la seconde **loi de Fick** :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{app}.\nabla^2 X \tag{1.8}$$

Avec :

$\mathbf{D_{app}}$: « diffusivité apparente » (exprimée en m^2/s) qui, le plus souvent, varie avec la température et la teneur en eau du produit et est affectée par la rétraction de la matrice solide.

Cette relation est souvent appliquée pour interpréter globalement les transferts de matière, tout en sachant qu'elle n'est pas correcte du point de vue phénoménologique. Dans les aliments, D_{app} varie entre 10^{-12} et 10^{-7} m^2/s ; sa prédiction nécessite des données expérimentales et varie beaucoup d'un auteur à l'autre, selon le type d'expériences réalisées et la méthode d'estimation choisie

1.4.4.2. Transfert externe

Au cours d'un séchage par entraînement, la vapeur d'eau est éliminée de la surface du produit par convection.

Les difficultés d'application des théories de transfert de masse, dans les processus de transformation des aliments, résultent des structures physiques complexes et de la composition chimique des denrées alimentaires qui varient pour une même denrée et change pendant la transformation

1.5. Cinétique du séchage

La cinétique de séchage permet de caractériser le comportement d'un produit au séchage. Elle est déterminée expérimentalement en plaçant dans un air dont les caractéristiques sont bien maîtrisées, un produit et mesurer l'évolution de sa masse à intervalle de temps régulier

L'allure de la perte en eau du produit au cours du séchage est décrite à partir de trois types de courbes :

- Teneur en eau en base sèche ou humide (X) en fonction du temps (t) (**Figure 1.3**) ;
- Vitesse de séchage $\frac{dX}{dt}$ en fonction du temps (t) (**Figure 1.4**) ;
- Vitesse de séchage $\frac{dX}{dt}$ en fonction de la teneur en eau (X) (**Figure 1.5**).

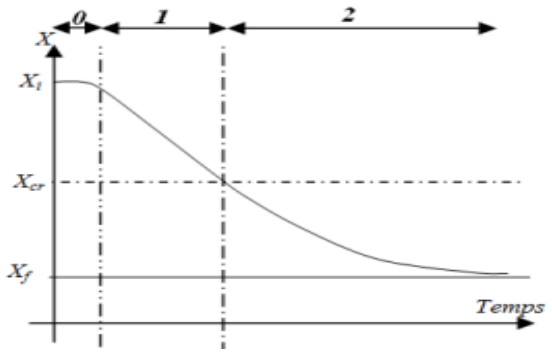


Figure 1.3. Cinétique de séchage X= f(t)

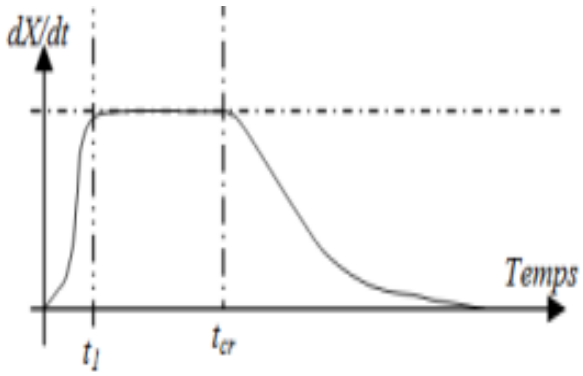


Figure 1.4. Cinétique de séchage dx/dt = f(t)

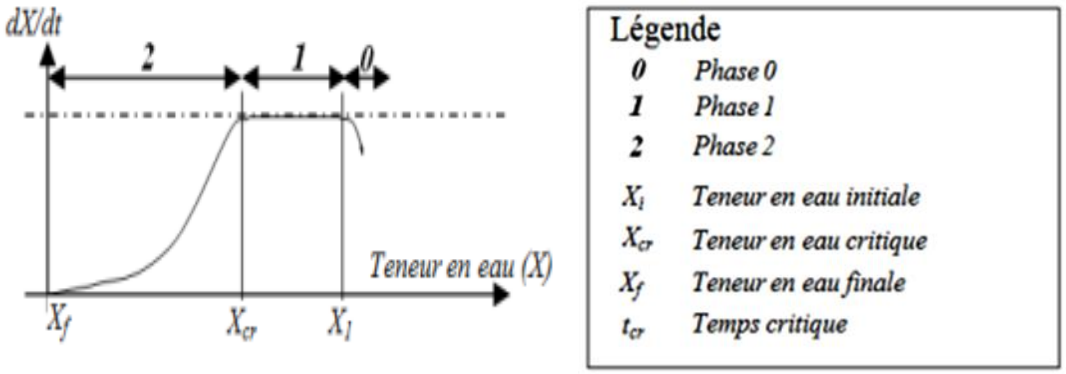


Figure 1.5. Cinétique de séchage dx/dt = f(X)

Ces trois types de représentation, mettent en évidence l'existence de trois phases, pendant le déroulement du séchage. Toutes ne sont pas systématiquement observables. Dans le cas où elles sont identifiables, on distingue :

- **Phase (0) mise en température**

Elle disparaît pratiquement lorsque le produit se présente sous forme de particules ou de feuilles. Quand le produit est introduit dans le séchoir, il est généralement froid, ce qui fait que sa pression de vapeur d'eau en surface P_s est basse. Il en résulte que le débit de matière est faible. Par contre, l'écart de température entre l'air et le produit est élevé et le débit d'énergie thermique est important. L'excès de chaleur apporté par l'air échauffe le produit, ce qui accroît aussi rapidement la pression de vapeur d'eau en surface (P_s), jusqu'à ce que le bilan d'énergie s'équilibre. Si, au contraire, le produit est trop chaud, il se refroidit de la même manière à cause du déficit énergétique

- **Phase (1) de séchage à vitesse constante**

Correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, son activité (A_w) reste proche de 1 et le séchage est contrôlé par les transferts externes. Pendant toute cette période, la température du produit est sensiblement égale à la température humide de l'air. La fin de cette phase permet de définir la teneur en eau critique du produit

- **Phase (2) de séchage à vitesse décroissante**

Où l'activité de l'eau baisse et les transferts internes deviennent limitant. La température du produit croit à partir de la surface. La teneur en eau diminue jusqu'à atteindre la teneur en eau limite (X_{lim}) qui dépend des caractéristiques de l'air de séchage (Température et humidité relative). X_{lim} se déduit de l'isotherme de désorption à la température (T)

1.6. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

1.6.1. Influence de la température de l'air.

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croit avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la

température de l'air élevée. Par conséquent, les conductivités de l'eau dans le produit deviennent importantes

1.6.2. Influence de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible

1.6.3. Influence de l'humidité de l'air

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits, il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente

1.7. Différents procédés du séchage

Le choix de procédure de séchage pour un produit alimentaire particulier dépend principalement du type de produit, quantité et type d'humidité, cinétique de séchage, sensibilité à la chaleur, structure physique du matériel à sécher, conditions de qualité d'un aliment sec, et beaucoup d'autres facteurs. Les séchoirs sont généralement classifiés et basés sur le mode du transfert de chaleur (Conduction, Convection, ou Rayonnement) et du mode de fonctionnement (continue ou/et discontinue) La figure **1.6** représente diverses techniques de séchage pour les produits agricoles, ce classement est basé sur la nature physique des produits humides à sécher.

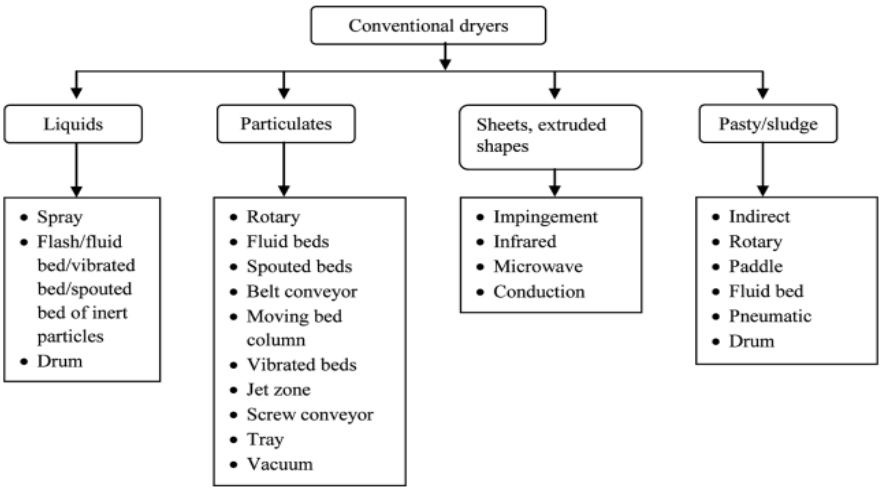


Figure 1.6. Différents séchoirs conventionnels

1.7.1. Séchage convectif à l'air chaud

Ce procédé consiste à mettre le produit en contact avec un courant d'air chaud, durant lequel l'eau s'évapore et le produit se déshydrate jusqu'à atteindre l'équilibre avec l'air. On distingue 200 types de séchoirs disponibles en commerce (séchoir à lit fluidisé, séchoir tunnel, séchoir à plateaux, séchoir à tambour conductif, séchoir convectif partiellement solaire...), ils varient selon la forme physique du produit alimentaire à sécher, la qualité désirée des produits finis, le mode de transfert thermique

Cependant, cette méthode lorsqu'elle est menée à hautes températures (50-100°C) et pour de longues durées, risque de dégrader la qualité du produit fini très négativement, par exemple par modification de la forme et de la texture, par détérioration du goût, de la couleur et du contenu nutritif du produit, comme les acides gras, les caroténoïdes et les anthocyanines qui sont très sensibles aux températures élevées

1.7.2. Lyophilisation

La lyophilisation permet d'abaisser la teneur en eau du produit par sublimation sous vide dans les conditions de températures inférieures à 0° C, avec une basse pression de vapeur (moins de 600 Pa) et un apport d'énergie de 2800 J/g glace. L'eau se transforme de l'état de glace à l'état vapeur causé par la différence de pression de vapeur à la surface du produit Cela permet d'augmenter la durée de vie des aliments en préservant les valeurs nutritives et la qualité des produits finis (rétention d'arômes, couleur, structure et texture)

1.7.3. Séchage par micro-ondes

L'application des micro-ondes dans le séchage des produits agricoles présente plusieurs avantages, notamment la réduction du temps de séchage, la distribution égale, rapide et efficace de l'énergie dans le produit et la formation des caractéristiques appropriées du produit sec, dues à l'augmentation de la température à cœur et non à la surface Parmi les autres avantages résultant du séchage par micro-ondes, on cite la réduction de la perte de composants hydrosolubles, l'économie de l'énergie et la préservation de certains paramètres de qualité comme la couleur du produit séché

Par contre, le séchage par micro-ondes a quelques inconvénients tels que le chauffage du produit par une puissance élevée, aussi le surplus de chauffage peut entraîner

des altérations de la texture qui sera associé à des dommages physiques telles que la carbonisation, la brûlure et le noircissement des surfaces ou l'obtention d'une saveur désagréable du produit fini

1.7.4. Séchage sous vide

Le séchage sous vide peut remplacer le séchage conventionnel à l'air chaud. Le vide dans la chambre de séchage (étuve) réduit la concentration en vapeur d'eau sur la surface des produits. En outre, il abaisse le point d'ébullition d'eau à l'intérieur des produits, par conséquent l'eau s'évapore rapidement à une température moins élevée. D'ailleurs, l'absence d'air pendant la déshydratation réduit l'oxydation et améliore la couleur, la texture et la saveur des produits secs

1.7.5. Déshydratation osmotique

C'est une technique utile appliquée le plus souvent aux légumes, aux fruits, aux poissons et aux produits carnés. Elle consiste à immerger le produit dans une solution hypertonique pendant une période donnée, menant à une perte de l'eau par les membranes des cellules dans le milieu extracellulaire, tandis que le soluté (sucre ou sel) entre dans le produit. La vitesse du processus osmotique peut varier selon la concentration de la solution osmotique, la température du produit et sa surface spécifique. La déshydratation osmotique diminue la quantité d'eau initiale jusqu'environ 50%, réduit le poids et le volume du produit (rétrécissement), et améliore les caractéristiques organoleptiques (goût, couleur) des produits finis

1.7.6. Séchage solaire

L'énergie solaire est utilisée pour sécher les produits agricoles (piments, plantes médicinales et aromatiques, cacao et café), nécessite un ensoleillement suffisant

Le séchage solaire à l'air libre est la méthode ancestrale utilisée jusqu'au jour d'aujourd'hui, consistant á étaler en plein air les produits á sécher et chauffés directement par les rayonnements solaires. C'est une technique facile et pas coûteuse, néanmoins elle peut causer des pertes importantes. Pour améliorer ces techniques traditionnelles, les professionnels se sont orientés vers le séchage artificiel en développant plusieurs prototypes de séchoirs solaires.

1.8. Domaines d'utilisation du procédé de séchage

Si le séchage consomme autant d'énergie c'est qu'il intervient dans de nombreuses industries. Les produits concernés nous touchent souvent de près dans la vie de tous les jours. Le choix d'une opération de séchage peut être effectué pour diverses raisons

- Le produit humide se conserve mal.
- Le liquide doit être enlevé pour le déroulement de la suite du procédé.
- L'enlèvement de l'eau donne la texture et structure finale du produit et constitue une étape à part entière du procédé.
- Le coût du transport est plus élevé en présence de liquide.

➢ **Industrie papetière**

Le papier est obtenu par séchage de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés.

➢ **Industrie du bois**

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans les conditions correctes, sinon on s'expose à des changements de taille et de forme du bois.

➢ **Matériaux de construction**

Briques, Carrelages,…

➢ **Industrie de céramique**

Assiettes, bols, plats…

➢ **La biotechnologie et l'industrie pharmaceutique**

Levure en poudre.

➢ **Industrie agroalimentaire**

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage. Le séchage peut être une étape nécessaire à la production du produit ou un rôle dans la conservation de l'aliment. Il existe plus de 200 types de séchoirs industriels dans le secteur alimentaire. On peut citer par exemple :

- Les pâtes alimentaires.

- La viande fumée : saucisson, jambon…
- Le sucre cristallisé est obtenu par évaporation.
- Les légumes (pois,…) et fruits secs (pruneaux, raisins, abricots…).
- Les biscuits apéritifs sont produits par séchage à l'air chaud à partir d'une pâte de maïs.
- Les jus de fruits sont préparés à partir d'un concentré obtenu par vaporisation.
- La conservation de beaucoup de types de grains ou de végétaux est assurée par le séchage : café, cacao, riz et autres céréales, feuilles de thé, épices…
- Produits en poudre : cacao, lait,…

Chapitre II

Séchage des Produits agroalimentaires

2. SECHAGE SOLAIRE DES PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES

Introduction

Le séchage des produits alimentaires a fait l'objet de très nombreuses recherches sur divers produits. Le noix de coco les carottes les dattes , la pomme de terre , la tomate la pomme , etc.

De nombreux modèles mathématiques empiriques ont été élaborés pour rendre compte de la cinétique de séchage en couche mince des produits végétaux et cela pour divers produits.

Tels que : le poivre vert, le haricot et la courge verte ; les abricots ; l'Eucalyptus globulus ; la menthe, la verveine et la sauge Pistache ; fruit du cactus ; carotte, feuilles de menthe, les tranches de potiron et tomate ; les feuilles de Citrus Aur Antium et des tartes d'olives

Les fruits frais (matières premières) sont caractérisés par une teneur en glucides de 12 % (Abricots) et 16 à 20 % (Prunes, Raisins, Figues, Bananes). La déshydratation amène la teneur en glucides à près de 60 à 70 %, teneur proche de celle des confitures. Dans l'ensemble, les constituants vont subir une concentration, sauf ceux qui sont oxydables comme la vitamine C, détruite au cours des traitements. Pour que les produits séchés soient stockés à l'air ambiant, leur teneur en eau doit être inférieure à 35 %

2.1. Séchage des produits alimentaires

C'est un technique de déshydratation a pour but d'éliminer partiellement ou en quasi-totalité l'eau des aliments. Cela alors d'abaisser l'activité de l'eau (A_w) des aliments sachant, qu'est dessous d'une A_w de 0,6 toute multiplication microbienne est impossible.

Très souvent, l'élimination partielle de l'eau est associée avec une teneur élevée en sel ou en sucre permettant d'abaisser plus facilement l'A_w. C'est le cas, par exemple, des fruits secs (qui contiennent moins de 30 % d'eau et près de 70 % de sucre leur conférant ainsi une A_w de 0,6 environ).

De plus, l'élimination quasi totale de l'eau permet une conservation encore plus longue. Ainsi, les produits très déshydratés contiennent au maximum 5 % d'eau : c'est le cas, par exemple, du lait en poudre dont l'A_w est de 0,2

2.2. Produits alimentaires humides

Avant le séchage, un produit humide peut se présenter schématiquement (**Figure 2.1**), Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles.

Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est à dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température.

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses

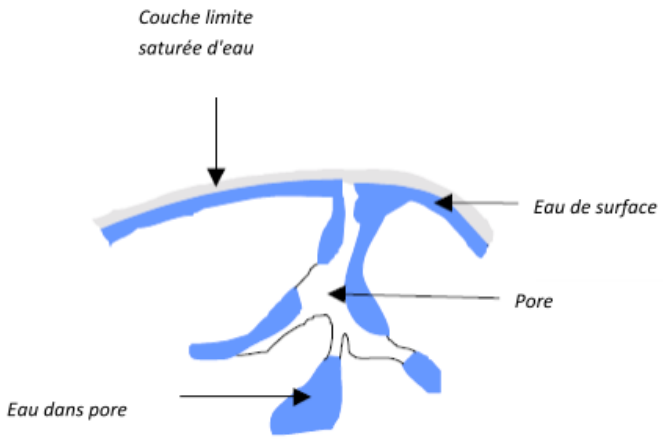


Figure 2.1. Description du solide humide

2.2.1. Caractéristiques d'un produit alimentaire

La caractéristique du solide est liée à la taille des pores ou des canaux poreux, cette taille va conférer au matériau des caractéristiques mécaniques et thermo physiques particulières.

L'évolution de la teneur en eau des produits peut générer des déformations et/ou des retraits et donc une modification des structures poreuses qui rejaillira sur les caractéristiques de séchage par un ralentissement et même un blocage des transferts (croutage, mais aussi bouchage par entraînement de soluté).

Il est nécessaire de bien connaître l'état du produit à sécher, au cours de séchage, pour infléchir les contraintes liées à l'environnement séchant et pour permettre au produit d'arriver au bout de l'opération tout en ayant gardé ses qualités.

2.2.1.1. Porosité volumique d'un produit

La porosité volumique **ε** (**Figure 2.2**) est définie par :

$$\varepsilon = \frac{volume\,du\ pores}{volume\,apparent\,de\ produit} \tag{2.1}$$

Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent du produit vaut donc (**1- ε)**

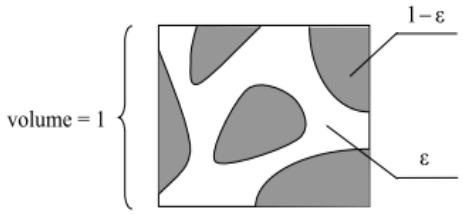


Figure 2.2. Volume de contrôle microscopique.

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (**Figure 2.3**)

$$\varepsilon = \frac{volume\,de\,l'amas - volume\,du\ produit}{volume\,de\,l'amas} \tag{2.2}$$

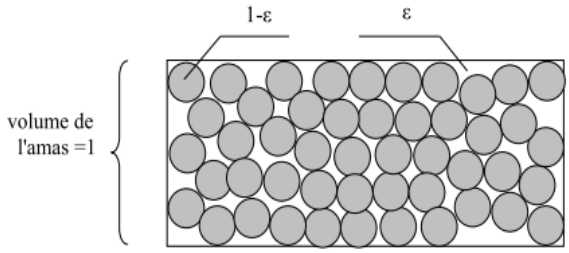


Figure 2.3. Volume de contrôle macroscopique

2.2.2. État de l'eau dans un produit

La nature des liaisons entre l'eau et la matière organique dans le produit, permet de distinguer trois types de liaison (**Figure 2.4**)

- Lorsque l'eau est liée chimiquement au produit par association moléculaire, ou s'insère dans un réseau cristallin, on dit qu'elle est fortement liée. Le produit est dit hydraté. Cette eau d'hydratation (ou eau de constitution) ne peut être extraite du produit qu'en le détruisant.

- L'eau peut être liée au produit par des forces d'attraction de surface, d'origine moléculaire de type Van der Waals. La force de rétention diminue vers l'extérieur du produit. On dit alors que l'eau est retenue par osmose et peut jouer le rôle de solvant. On parle d'eau liée et son activité (A_w) est inférieure à 1. Le corps est dit hygroscopique
- Lorsque la tension de vapeur est égale à la tension de saturation, l'eau dans le produit est qualifiée d'eau libre. Cette eau se comporte comme l'eau pure à l'air libre ; son activité est égale à 1. Le corps est dit non hygroscopique.

Le séchage consiste à éliminer du produit la totalité de l'eau libre et une grande partie de l'eau liée. La nature des liaisons entre l'eau et le matériau influence le procédé de séchage et la qualité du produit sec.

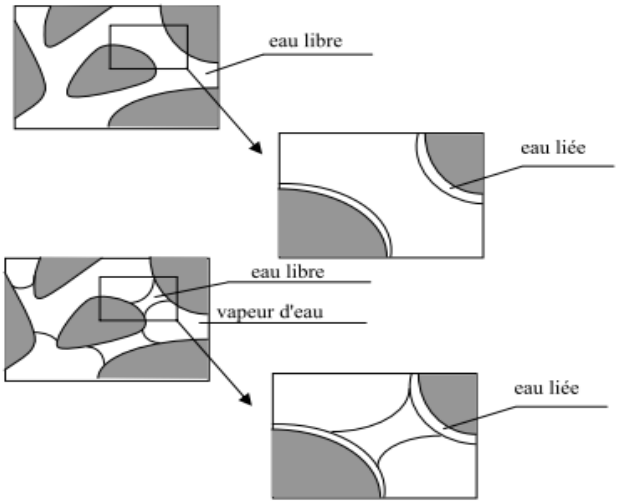


Figure 2.4. Différents types d'eau dans le matériau

2.2.3. Teneur en eau du produit

L'état d'hydratation d'un produit est caractérisé par sa teneur en eau définie par les relations suivantes. Soit m la masse d'un corps humide contenant une masse m_e d'eau et m_s de matière sèche

L'humidité absolue du produit encore appelée taux d'humidité ou teneur en eau base sèche, est définie par la relation :

$$X = \frac{m_e}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \tag{2.3}$$

On définit l'humidité relative du produit ou titre en eau (exprimé en pourcentage) ou teneur en eau base humide par le rapport exprimé par :

$$X_{bh} = \frac{m_e}{m_e + m_s} = \frac{m - m_s}{m} \tag{2.4}$$

2.2.4. Activité de l'eau et isotherme de sorption

2.2.4.1. Activité de l'eau dans le produit

L'activité de l'eau dans le produit (A_w) est une grandeur très liée à l'humidité du produit. Elle exprime pour, une température donnée et par rapport à l'eau pure prise comme état de référence, la variation du potentiel chimique de l'eau absorbée contenue dans le produit.

En d'autres termes l'activité de l'eau est le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit (P_m) et la pression de vapeur de l'air saturé (P_s)

$$A_w = \frac{P_m}{P_s} \tag{2.5}$$

Si le produit est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure, il n'y a pas d'échange d'eau et le gradient de pression de vapeur entre le produit et l'air s'annule ($P_m = P_v$), donc on peut écrire :

$$A_w = \frac{P_m}{P_s} = H_r \tag{2.6}$$

Ainsi à l'équilibre hygroscopique, l'activité de l'eau dans le produit est identique à l'humidité relative de l'air

2.2.4.2. Isothermes de sorption

Les isothermes de sorption permettant de déterminer la répartition et l'intensité de liaison de l'eau, ainsi que sa disponibilité fonctionnelle dans les substances biochimiques et biologiques alimentaires. En effet, les groupes polaires des macromolécules, notamment ceux des protéines et des glucides créent à la surface de celles-ci, un champ de forces électrostatiques, responsable de l'adsorption des molécules d'eau en équilibre avec celle dont l'agitation thermique crée la pression de vapeur d'eau dans l'atmosphère environnante

Dans chaque opération de séchage, il y a un équilibre d'humidité air-produit que nous devons prendre en compte. Cet équilibre ou plus exactement valeur de l'humidité d'équilibre diffère d'un produit à l'autre. En pratique l'humidité d'équilibre est déterminée par les isothermes de sorption du produit La détermination des isothermes de sorption est une étape indispensable dans l'étude du séchage

du fait qu'elle permet de déterminer la teneur en eau finale à atteindre à la sortie du séchoir en offrant des informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique du produit à sécher.

L'isotherme de sorption est une courbe qui dépend de la température et qui est le rapport de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} du produit étudié en fonction de l'humidité relative de l'atmosphère qui l'entoure (**Figure 2.5**). Ces courbes peuvent éventuellement différer l'une de l'autre, bien qu'on soit à la même valeur de l'humidité relative H_r et une température donnée

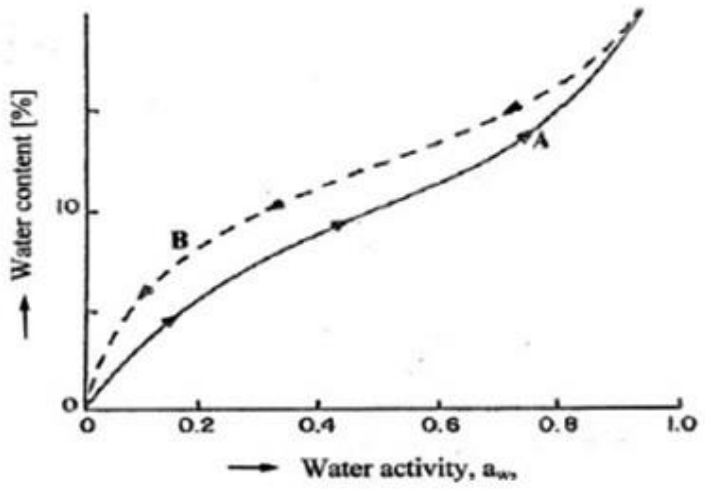


Figure 2.5. Isotherme de sorption, (**A**) Sorption, (**B**) Désorption d'un produit alimentaire

Les isothermes d'adsorptions/ désorption se composent de trois zones, chaque zone correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit

- **Zone 1 ($A_w < 0.3$)** : correspond à l'eau "fortement liée" dite aussi eau de constitution. L'eau est intimement liée aux composantes biochimiques par des liaisons covalentes ; cette eau n'est pratiquement pas disponible comme solvant ou réactif et correspond à la première couche (monocouche) qui entoure la matière sèche d'aliment.
- **Zone 2 ($0.3< A_w <0.7$)** : correspond à l'eau "faiblement liée", sous forme de couche polymoléculaire (multicouche) recouvrant partiellement la surface du substrat sec.
- **Zone 3 ($A_w > 0.7$)** : correspond à " l'eau libre" ou " l'eau liquide" qui n'est retenue à la surface du substrat sec que par des liaisons hydrogènes. Cette eau est disponible tant comme solvant que réactif. C'est uniquement sous cette forme que l'eau est utilisée par les micro-organismes et peut permettre les réactions enzymatiques.

2.2.4.3. Modèles mathématiques des isothermes de sorption

De nombreux modèles empiriques, semi-empiriques ou théoriques ont été proposés pour décrire le comportement des courbes de sorption/désorption déterminées expérimentalement.

Ces modèles permettent de représenter les courbes d'activité de l'eau en fonction de la teneur en eau (et parfois de la température) pour étudier la cinétique d'une réaction chimique ou un phénomène physico-chimique, en fonction de la température et de l'activité de l'eau (ou de la teneur en eau). Un certain nombre d'équations mathématiques ont été proposées pour décrire les phénomènes de sorption, mais seules les équations **BET** et **GAB** sont largement utilisés par les chercheurs

2.2.4.3.1. Model de BET

Le modèle BET est intéressant pour l'étude de la partie des courbes relative aux faibles activités d'eau ($0,05<A_w<0,45$) À l'origine, ce modèle correspond à l'adsorption physique de gaz interne sur des surfaces solides. Défini par l'équation suivent :

$$X = \frac{X_m C_{BET} a_w}{(1-a_w)(1+(C_{BET}-1)a_w)} \tag{2.7}$$

Où : Le coefficient $\mathbf{C_{BET}}$ est un paramètre ajustable, $\mathbf{X_m}$ correspond à la teneur en eau pour une monocouche absorbée.

2.2.4.3.2. Modèle de GAB

Le modèle GAB, a trois paramètres, considéré comme une extension du modèle BET, permet de bien représenter les courbes de sorption jusqu'à une activité d'eau de 0.99

$$X = \frac{X_m C K a_w}{(1-K\,a_w)(1-K\,a_w-C\,K\,a_w)} \tag{2.8}$$

Où : $\mathbf{X_m}$ est la teneur en eau correspondant à la monocouche, **C** et **K** sont des paramètres dépendant de la température.

De nombreux modèles existent comme ceux proposés par **Halsey**, **Oswin**, **Henderson** (**Tableau 2.1**). Ils sont mieux appropriés pour certains produits mais n'apportent pas de solution idéale couvrant tout le domaine

Tableau 2.1. Modèles des courbes de sorption, désorption

Modèle	**Equation**
Oswin	$X_{eq}=(A+BT)(a_w/1-a_w)^c$
Halsey	$X_{eq}= \exp[-\exp(A+BT)/X_{eq}{}^c]$
Henderson	$1-a_w=\exp[-K.(T+n).\ X_{eq}{}^c]$
Chung-Pfost	$a_w=\exp[(-A/(T+B)).\exp(-CX_{eq})]$
Langmuir	$X_{eq}= 1/[A+B.a_w{}^{c-1}]$
Peleg	$X_{eq}=A.a_w{}^{K1}+B.a_w{}^{K2}$

2.3. Altérations des produits alimentaires

2.3.1. Altération des produits après récolte

La récolte des produits provoque une dégénérescence des tissus et donc des problèmes de conservation. Des réactions se produisent suite aux modifications physiologiques des tissus altérant la qualité des produits avant et pendant le séchage Il s'agit des altérations microbiennes, des réactions d'oxydation des lipides, destruction des vitamines, dénaturation des protéines, des réactions de **Maillard** (brunissement non enzymatique) et des réactions de brunissement enzymatique. La compréhension de ces phénomènes guide le choix des traitements d'appoint suivant le type de produit.

Parmi les réactions des altérations biochimiques : oxydation et dégradation des lipides, brunissement enzymatique et réaction de Maillard ou brunissement non enzymatique.

2.3.1.1. Oxydation des lipides

Cette réaction concerne essentiellement les produits à forte teneur en lipides. Elle réduit considérablement la qualité nutritionnelle de l'aliment en lui donnant un goût de rance. Elle est favorisée par une forte teneur en lipides insaturés, de basses températures, une activité de l'eau supérieure à 0,5 et par l'oxygène et la lumière

La conduite du séchage à haute température et à l'abri de la lumière, limite l'oxydation des lipides. Cependant, le risque de croûtage et de brunissement sont plus élevés à haute température.

2.3.1.2. Brunissement enzymatique

Cette réaction est indésirable à cause de la couleur brune qu'elle donne au produit. Elle concerne essentiellement les fruits et les légumes et peut intervenir dans les premières minutes

de séchage. Elle est favorisée par l'oxygène, un pH entre 5 et 7 et l'épluchage du produit

2.3.1.3. Réactions de Maillard

Elles interviennent sous l'action des traitements thermiques et sont caractérisées par l'apparition de pigments bruns ou noirs et des modifications de goût, d'odeur et aussi de la qualité nutritive des aliments. Si en fonction des habitudes culinaires, ce brunissement est parfois recherché, il peut dans certains cas rendre inconsommables les produits. Elles sont favorisées par de fortes teneurs en glucides, en protéines, en acide ascorbique, par une activité en eau inférieure à 0.7, un pH compris entre 1 et 7 et par l'action de métaux comme le fer, le cuivre. L'anhydride sulfurique et les basses températures de séchage permettent de ralentir cette réaction

2.3.1.4. Action des micro-organismes

Les micro-organismes se développent rapidement à des températures de 20°C à 50°C, pour une activité d'eau 0,8. Les conditions de séchage mal contrôlées, peuvent donner un terrain favorable au développement de micro-organismes. C'est pour cette raison qu'il faut au niveau du séchage :

- Éviter que l'air de sortie du séchoir soit trop humide (> 80%), cela indiquerait qu'une partie au moins du produit se situe à une humidité propice au développement microbien ;
- Atteindre assez rapidement une faible activité de l'eau dans le produit, mais il faut faire attention d'éviter le croûtage du produit et aussi la dégradation de la couleur et du goût qui surviennent aux températures élevées

2.3.2. Action du séchage sur la qualité du produit alimentaire

2.3.2.1. Croûtage

Le croûtage est un phénomène intervenant en début de la phase 2 du séchage et qui affecte la qualité et la texture du produit séché. Il est dû à la capacité limitée de diffusion de l'eau dans le produit. Si le pouvoir évaporatoire de l'air est élevé, l'eau s'évapore plus vite à la surface du produit qu'à l'intérieur. La surface sèche et se durcit, empêchant la diffusion ultérieure de l'eau contenue dans le produit. Le comportement du produit au séchage sera alors semblable à celui qu'il a en phase finale, sans que l'humidité du produit ait véritablement baissée. Le croûtage est un phénomène à éviter, qui peut intervenir rapidement

au bout de quelques minutes selon les produits. Il est favorisé par une humidité de l'air faible au niveau du produit, une vitesse de circulation de l'air élevée et une forte épaisseur du produit

Outre les effets majeurs que nous venons de voir, on peut aussi citer : les pertes de composés aromatiques, la perte de vitamines (limitée par un séchage indirect), et la perte de couleur de produit, etc.

2.3.2.2. Pertes d'arôme

Le séchage est un procédé de séparation basé sur la volatilité. Par conséquent, l'eau contenue dans le produit à sécher ne sera pas éliminée toute seule, mais avec tout autre produit volatil existant également dans le produit. Dans la plupart des cas, il s'agit des arômes contenus dans les produits biologiques destinés à l'alimentation par exemple la menthe.

Bouverat-Bernier a montré que lors du séchage à température constante inférieure ou égale à 55°C, les pertes en essences (arômes) sont de l'ordre de 5%.

2.3.2.3. Pertes des couleurs

L'étude de noircissement des feuilles de certaines plantes pendant le séchage a révélé que la couleur verte de ces feuilles est maintenue à condition que le séchage s'effectue à une température inférieure ou égale à 55°C

Pour éviter ces dégradations du produit au cours du séchage, il convient de mener une bonne conception du séchoir à utiliser et un bon choix des méthodes de séchage.

2.4. Prétraitements appliqués avant le procédé de séchage

Un prétraitement est une action préparatoire ou un traitement préalable porté sur le produit avant sa déshydratation ou sa transformation et qui a pour intérêt soit de conserver la qualité du produit et ses propriétés, d'inhiber la croissance des micro-organismes, d'inactiver les enzymes de brunissement, de diminuer la perte des molécules actives et aussi pour augmenter la vitesse de séchage. Il y a plusieurs méthodes de prétraitement utilisées, qui incluent des méthodes physiques ou chimiques ainsi que l'application des divers champs d'énergie pour atteindre les changements attendus dans le produit séché, aussi la déshydratation osmotique est une technique de prétraitement couramment utilisée pour les fruits et les légumes, implique la diffusion de l'eau de la matière alimentaire vers une solution osmotique

2.4.1. Prétraitements thermiques

- **Blanchiment**

C'est un prétraitement à la vapeur d'eau utilisé souvent pour les végétaux (légumes), il consiste à passer le produit dans une atmosphère de vapeur à 95-100°C pendant quelques secondes ou minutes, ou bien faire immerger directement le produit 1 à 2 min dans un bain d'eau chaud mais à condition que ce dernier n'atteint pas la température d'ébullition.

Ce traitement thermique a pour objectif d'inactiver les enzymes endogènes des fruits (polyphénoloxidase, péroxydase et glycosidase), de limiter les réactions de brunissement enzymatique, de réduire la contamination bactérienne et les résidus de pesticides, d'éliminer les gaz occlus dans les tissus et les arômes indésirables, de même elle facilite l'ouverture des tissus cellulaires afin d'accélérer le procédé de séchage et le ramollissement des végétaux pour faciliter leur conditionnement. Le blanchiment provoque des pertes de substances solubles (protéines, sucres, certains éléments minéraux) et il induit aussi la perte des substances thermolabiles, comme les vitamines (notamment la vitamine C), qui sont détruites sous l'effet de la chaleur

2.4.2. Prétraitements chimiques

Certains types de produits alimentaires sensibles aux traitements de blanchiment car leurs tissus sont très délicats et fines. Ainsi, des traitements chimiques (addition des solvants organiques et immersion des fruits dans des solutions chimiques acides ou alcalines) peuvent être employés afin de fragiliser la cuticule, de minimiser la durée du séchage et d'inhiber le développement de microbes pathogènes. L'efficacité d'une telle méthode dépend du type et de la sensibilité du produit vis à vis du traitement appliquée, de la simplicité, de la durée du processus et de son coût. L'immersion des produits dans des solutions de méthyle ester et d'acétate d'éthyle ou dans des solutions alcalines de NaOH et de K_2CO_3 à haute température, favorise un meilleur taux d'élimination de l'eau dans les canneberges et les bleuets

2.4.3. Prétraitements mécaniques

Le prétraitement mécanique pourrait remplacer ou compléter le prétraitement chimique, parce que les consommateurs refusent les fruits traités chimiquement. Ces méthodes peuvent se faire par enlèvement de la cuticule de façon mécanique par abrasion et/ou frottement de la surface de la peau des fruits , par sa perforation par une aiguille

, et par découpage les fruits en des petits morceaux sous différentes formes. Ces traitements sont utilisés afin d'augmenter la perméabilité du fruit à l'eau et la surface d'échange, ainsi que pour atteindre une bonne acceptabilité gustative

2.4.4. Prétraitements enzymatiques

Certains traitements enzymatiques peuvent aussi être appliqués avant le séchage des produits alimentaires, pour hydrolyser la couche des pectines de l'épiderme et les parois cellulosiques des cellules épidermiques, pour faciliter la diffusion de l'eau contenue dans les cellules végétales internes vers l'extérieur. Parmi les enzymes qui s'utilisent pour cette sorte de traitement, on peut citer la cellulase, la cutinase et la pectinase.

2.4.5. Prétraitements à froid

La préservation des fruits par congélation peut causer des changements de la texture aboutissant aux ramollissements des tissus Ainsi, la qualité des fruits congelées/décongelées dépend de plusieurs facteurs tel que le type de fruit, son stade de maturation, la qualité de la matière première et le temps écoulé entre la récolte et le début du procédé de préservation Ce léger choc thermique (-40°C, +4°C) entraine de légères modifications de la perméabilité de la cuticule cireuse de l'épiderme du fruit, qui peuvent être suffisantes pour augmenter le taux de séchage, sans besoin d'appliquer d'autres procédés plus sévères Le coût peut être un facteur limitant à ce processus. En comparant le processus de congélation rapide à très basse température (-196°C dans l'azote liquide), avec les processus de congélations lentes à (-20°C), on constate que la congélation rapide conserve mieux les structures cellulaires locales

* Une étude faite par **Grabowski *et al.*** sur l'impact des différents prétraitements avant la déshydratation osmotique de la canneberge ont montré que la plupart des prétraitements thermiques soient efficaces pour accélérer le taux de déshydratation et amélioré la qualité des produits séché (**Figure 2.6a)**, l'impact du prétraitement sur l'acceptabilité du produit par le consommateur (**Figure 2.6b**).

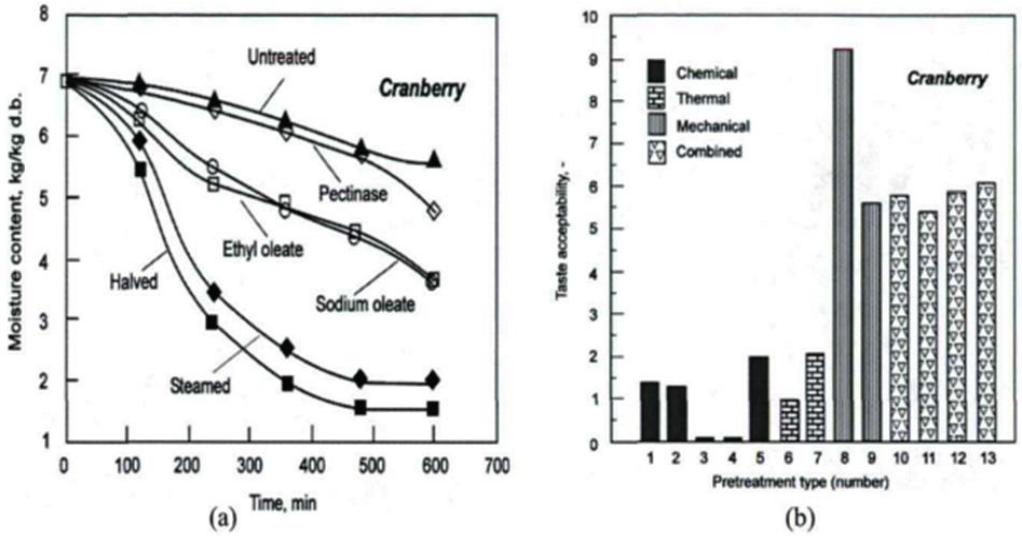


Figure 2.6. Effet des différents prétraitements sur la vitesse de déshydratation osmotique (a) et l'acceptabilité du goût par le consommateur (b)

2.5. Modélisation mathématique des transferts lors du séchage

2.5.1. Classification des modèles de séchage

Les modèles mathématiques de séchage sont classés en trois types :

2.5.1.1. Modèles empiriques

Ces modèles sont basés sur l'expérimentation pour la détermination des paramètres de séchage. Toutefois, l'utilisation de ces modèles est limitée car chacun d'eux est spécifique au type de produit et aux conditions expérimentales de son séchage. Les modèles ne sont donc pas extrapolables au-delà des limites de l'expérience

2.5.1.2. Modèles diffusifs

Ces modèles ont constitué le point de départ de la théorie de séchage, sont basés sur la loi de **Fick**. Cette dernière décrit l'origine des mouvements moléculaires par l'équation suivante :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D.\nabla X) \qquad (2.9)$$

Avec :

D : Coefficient de diffusion de l'eau dans le produit qui est fonction de l'humidité (**m^2/s**).

X : Teneur en eau du produit (**Kg d'eau/ Kg de Ms**).

t : le temps (**s**).

Sherwood (**1929)** a été le premier à avoir utilisé les modèles diffusifs dans le cas monodimensionnel. En supposant la diffusivité massique constante, l'équation précédente devient :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial X^2} \tag{2.10}$$

2.5.1.3. Modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse

Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse sont les modèles qui détaillent le plus finement les différents phénomènes mis en jeu au cours du séchage.

Ils permettent de séparer les phénomènes de transport internes en utilisant tout un ensemble d'équations de conservation de masse et de chaleur Les travaux de ont utilisé ce type de modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse.

2.5.2. Modélisation des courbes d'humidité réduites

Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour prédire l'humidité absolue réduite ou teneur en eau réduite d'un produit en couche mince $\mathbf{X_r=X/X_0}$ en fonction du temps de séchage (**Tableau 2.2**).

Tableau 2.2. Modèles mathématiques utilisés pour décrire la cinétique de séchage à couche mince

Modèle	**Expression du modèle**
Newton	$X^* = \exp(-kt)$
Page	$X^* = \exp(-kt^n)$
Modified Page	$X^* = \exp(-(kt)^n)$
Henderson et Pabis	$X^* = a \exp(-kt)$
Logarithmique	$X^* = a \exp(-kt) + c$
Tow-term	$X^* = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$
Tow-term exponential	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
Wang et Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$
Approximation de la diffusion	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
Verma *et al.*	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
Midilli *et al.*	$X^* = a \exp(-kt^n) + bt$

Le modèle approprié à la description de l'allure de l'humidité absolue réduite d'un produit est choisi selon les paramètres statistiques suivants

- Coefficient de corrélation ($\mathbf{r^2}$) élevé (tendant vers **1**)
- Ki-carrée (χ^2) réduite minimale (tendant vers **0**).

Ces paramètres statistiques sont définis par :

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X^*_{pre,i} - \bar{X}^*_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^{n} (X^*_{\exp,i} - \bar{X}^*_{pre,i})^2} \tag{2.11}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X^*_{\exp,i} - X^*_{pre,i})^2}{N - n} \tag{2.12}$$

Où :

$\mathbf{X^*_{exp,i}}$: représente la i^{eme} humidité absolue réduite expérimentale.

$\mathbf{X^*_{pre,i}}$: représente la i^{eme} humidité prédite selon le modèle approprié

N : est le nombre de points expérimentaux

n : désigne le nombre de constante du modèle étudié.

Chapitre III

Séchoirs solaires

3. SÉCHOIRS SOLAIRES

Introduction

Le développement des énergies renouvelables et tout particulièrement l'énergie solaire a été envisagée sérieusement après 1973 car c'est une solution qui intègre les différentes problématiques liées au séchage à savoir de nécessaires économies d'énergie, une limitation de la pollution, une réponse à la dispersion géographique des lieux de séchage, une simplicité des techniques mises en œuvre

Cela démontre l'importance des études sur le séchage solaire pour parvenir à proposer des séchoirs qui puissent assurer une continuité dans la disponibilité de produits alimentaires de qualité, voir une certaine baisse des prix par une disponibilité plus importante dans le temps. Le séchage des produits agricoles représente donc une réponse valide au problème de la production saisonnière qui crée des excès dans certains périodes de l'année et des carences dans les autres.

Plusieurs chercheurs ont présenté un examen complet des diverses conceptions, des détails de construction et des principes opérationnels de large variété de conceptions des systèmes de séchage à l'énergie solaire

Plusieurs études ont été faites dans les pays tropiques et sub-tropiques pour développer les séchoirs solaires des produits agricoles. Fondamentalement, il y a quatre types de séchoirs solaires ; (1) séchoirs solaires directs, (2) séchoirs solaires indirects, (3) séchoirs mode mixte et (4) séchoirs solaires hybrides

3.1. Classification des systèmes du séchage solaire

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de fonctionnement en plusieurs catégories présentées dans la figure (**3.1**):

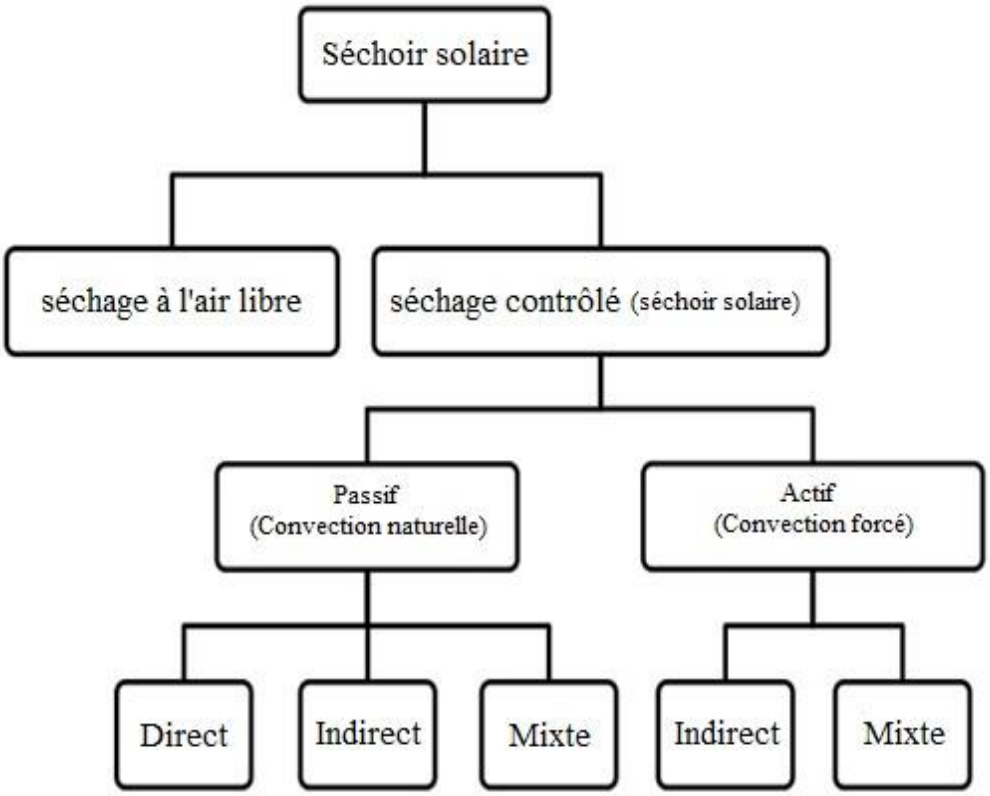


Figure 3.1. Différents systèmes du séchage solaire

3.1.1. Séchage solaire à l'air libre

Ils utilisent directement le soleil et l'air (traditionnellement), où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé même au sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant (**Figure 3.2**).

Ce type séchage est très bon marché, mais nécessite une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher.

Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation. C'est une technique facile et pas coûteuse. Mais il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussières)

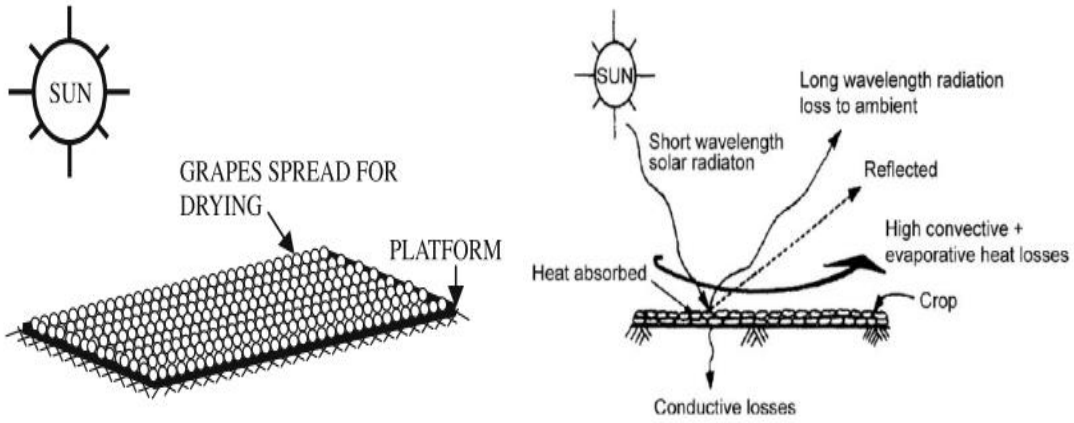


Figure 3.2. Séchage solaire à l'air libre

3.1.2. Séchoir solaire contrôlé

Pour améliorer ces techniques traditionnelles, les professionnels se sont orientés vers le séchage artificiel en développant plusieurs prototypes de séchoirs solaires.

Les systèmes de séchage à énergie solaire sont classés principalement selon leurs modes de chauffage et la façon en la quels la chaleur solaire est utilisée

De façon générale, ils peuvent être classés dans deux groupes principaux, à savoir :

- Systèmes de séchage à énergie solaire actif (souvent appelés les séchoirs solaires hybrides) ;
- Systèmes de séchage à énergie solaire passif.

Trois sous classes distinctes des systèmes de séchage solaires actifs ou passifs peuvent être identifiées (selon le type du séchoir et le mode d'utilisation de l'énergie solaire), sont présentées dans la figure **3.3** à savoir :

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

Selon Il y a une autre sous classe de système de séchage solaire c'est :

- Séchoirs solaires hybrides.

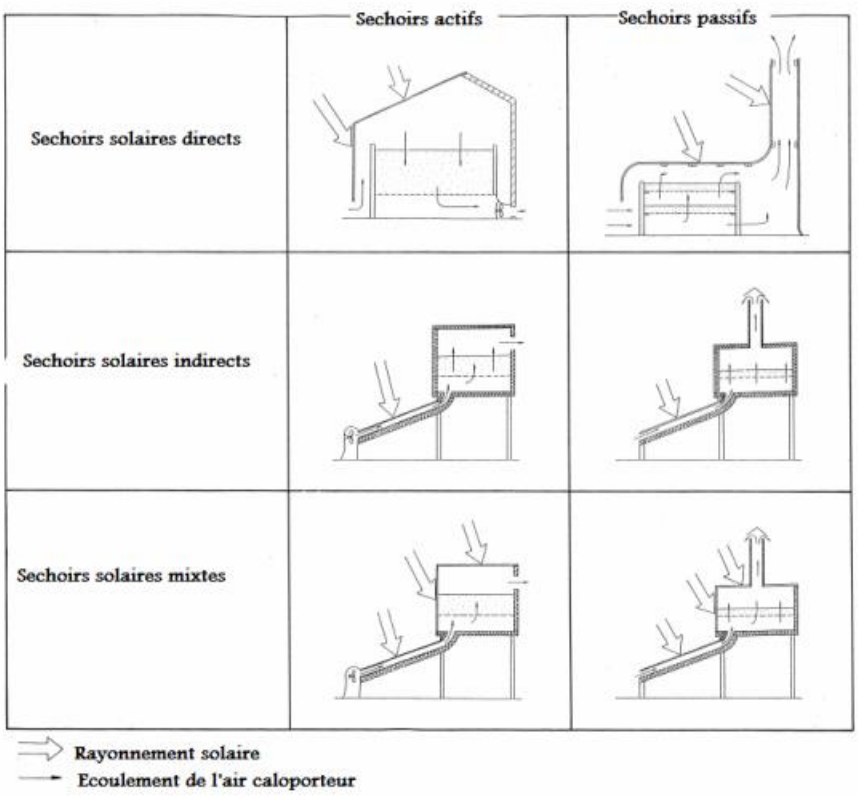


Figure 3.3. Différentes conception du séchoir solaire

3.1.2.1. Séchoir solaire passif

Le séchage par convection naturelle utilise l'énergie solaire, qui chauffe l'air caloporteur, et lui donne une capacité supplémentaire d'accueil de vapeur d'eau. Cet air chauffé a tendance à monter vers le haut et sort par une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits à sécher. L'écoulement de l'air asséchant se fait par effet de cheminée. L'énergie solaire seule en assure le fonctionnement, ces séchoirs sont particulièrement adaptés aux régions éloignées de toute sorte de distribution d'énergie. L'un des inconvénients de ce type de séchoir est le risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes

3.1.2.2. Séchoir solaire actif

Le fluide asséchant est forcé par un ventilateur, ce qui permet une augmentation du pouvoir évaporateur du séchoir. Généralement, la convection forcée l'emporte largement sur la convection naturelle qui ne permet pas encore, étant donné l'état des recherches en cette matière, de contrôler le déroulement du séchage. Cette classe de séchoir solaire permet un

meilleur contrôle de l'opération de séchage et une bonne amélioration du temps de séchage par rapport au séchoir passif, car l'air asséchant est évacué en vitesse et d'une façon continue.

Néanmoins ce type de séchoir a pour inconvénient : un coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, nécessité d'approvisionnement local en électricité conventionnelle ou photovoltaïque pour faire fonctionner le ventilateur

3.1.2.3. Séchoir solaire direct

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct (**Figure 3.4**) se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chères comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles).

Néanmoins l'interaction directe du rayonnement solaire sur le produit engendre la dégradation de la qualité du produit et la destruction des nutriments

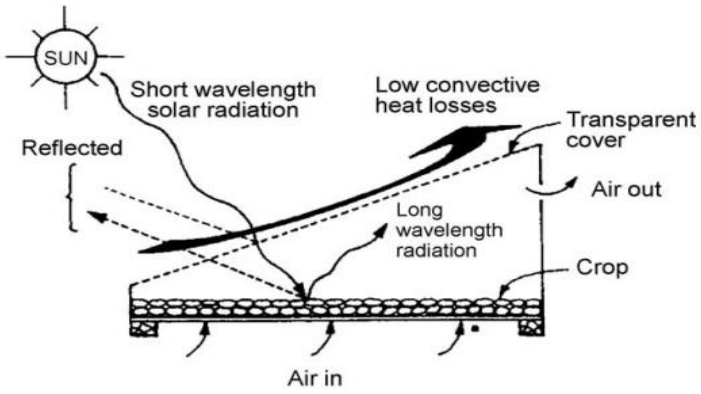


Figure 3.4. Séchoir solaire direct

3.1.2.3.1. Types des séchoirs directs

- **La boite de séchage ou séchoir coffre**

Le séchoir à coffre est un simple séchoir facile à construire par les artisans, en utilisant des matériaux disponibles localement, il est destiné généralement pour la préservation des fruits, légumes, poissons et de la viande

Dans le séchoir coffre, l'air pénètre par les orifices percés par le fond du caisson (**Figure 3.5**), et s'échappe par des trous situés dans la partie haute de chaque côté. Le fond de la boite

ainsi que les parois sont peints en noir pour mieux capter le rayonnement solaire. Une feuille de plastique ou une plaque de verre sert de toit, une porte dans le panneau arrière permet de régler la température.

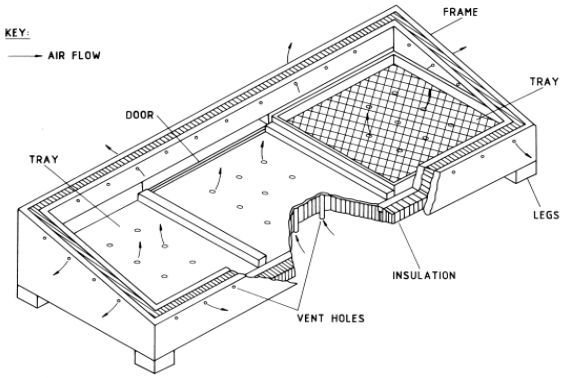


Figure 3.5. Séchoir solaire coffre

- **Le séchoir intégral à convection naturelle**

Le séchoir intégral (**figure 3.6**) est un séchoir direct dont le produit est placé dans une chambre de séchage avec des parois transparentes, le rayonnement solaire empiète directement sur le produit. L'exposition directe au rayonnement solaire augmente la maturation appropriée de couleur des fruits verdâtres, et permettant la décomposition de la chlorophylle dans le tissu Le séchoir est équipé par une cheminée solaire qui peut être utilisée pour augmenter la force de flottabilité imposée au courant d'air et donc fournir un flux important d'air et une vitesse de séchage plus grande.

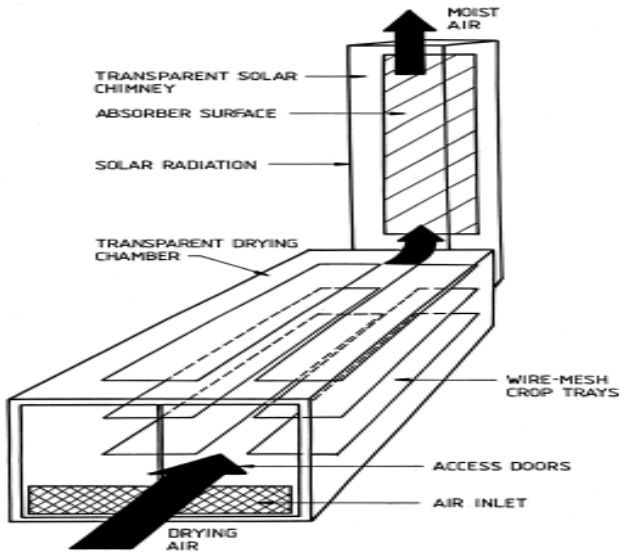


Figure 3.6. Séchoir solaire intégral à convection naturelle

- **Séchoir cabane**

Les produits sont placés dans le séchoir sur des claies surélevées du sol (**Figure 3.7**). La toile de plastique ou en vitre permet de capter l'énergie solaire, une porte permet d'entrer dans la tente et de garnir les claies, une sortie d'air est aménagée dans la partie supérieure. Ce type de séchoir est caractérisé par une meilleure protection contre les insectes, équipement démontable à la saison des pluies et une simple construction et fonctionnement. Parmi les inconvénients de ce séchoir : le coût est assez important, la nécessité d'une grande surface de polyéthylène et la prise au vent qui rend ces modèles fragiles si l'emplacement est mal choisi.

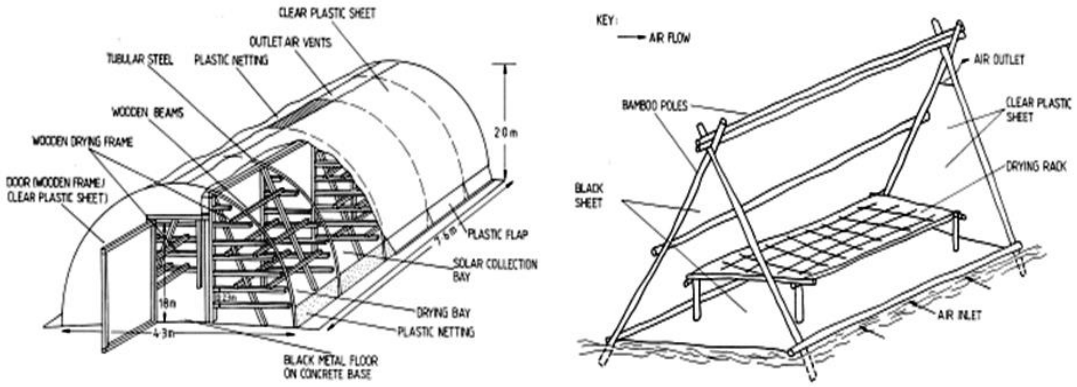


Figure 3.7. Séchoir solaire cabane à convection naturelle

3.1.2.4. Séchoir solaire indirect

Le séchoir solaire indirect (**Figure 3.8**) se compose essentiellement de deux parties: en amont un insolateur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur où l'air asséchant est chauffé et monte par convection naturelle ou forcée jusqu'à la chambre de séchage contenant les produits à sécher où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours du fluide caloporteur. Ce dernier sort vers l'extérieur de la chambre de dessiccation par le biais d'une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits. Ces systèmes possédant des insolateurs plans en amont sont plus performants et plus répandus que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : couleur, propriétés organoleptiques, valeur nutritive….etc. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits agroalimentaires.

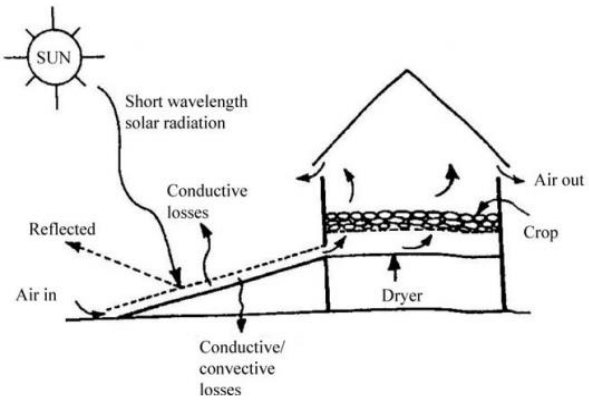


Figure 3.8. Séchoir solaire indirect

3.1.2.5. Séchoir solaire mixte

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoir (**Figure 3.9**), l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage **(Ekechukwu et Norton, 1999a)**.

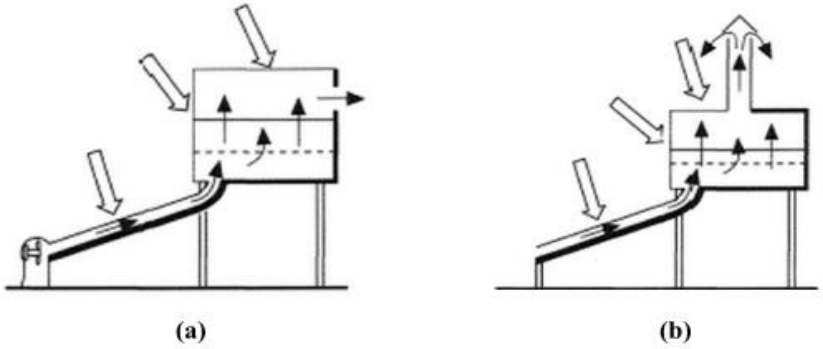


Figure 3.9. Séchoir solaire mixte (a) mode active, (b) mode passive

3.1.2.6. Séchoir solaire hybride

Les systèmes de séchage solaires actifs utilisent les systèmes de chauffage à énergie solaire et/ou électriques ou par combustible fossile et les ventilateurs et/ou les pompes motorisés pour la circulation d'air L'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir :

- L'énergie d'appoint permet de maintenir une température constante à l'intérieur du séchoir quelles que soient les conditions climatiques. Dans ce cas, l'énergie solaire devient secondaire, elle permet de préchauffer l'air.

- Le ventilateur assure la circulation de l'air. Ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir à une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

Les séchoirs solaires hybrides sont plus performants que les séchoirs solaires passifs, car ils peuvent fonctionner par temps couvert ou pendant la nuit. Néanmoins ce type de séchoir a pour inconvénient : un coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, nécessité d'approvisionnement local en électricité, gaz, pièce de rechange et demande un personnel qualifié pour la maintenance.

3.1.2.6.1. Types des séchoirs solaires hybride

- **Séchoir solaire hybride (solaire-gaz)**

Le collecteur solaire permet de préchauffer l'air. Si la température est insuffisante, un brûleur à gaz se déclenche pour obtenir la température désirée (**figure 3.10**). Les produits peuvent donc sécher quelques soient les conditions climatiques.

Le brûleur à gaz permet d'obtenir la température nécessaire pour sécher correctement les produits quelques soient les conditions climatiques.

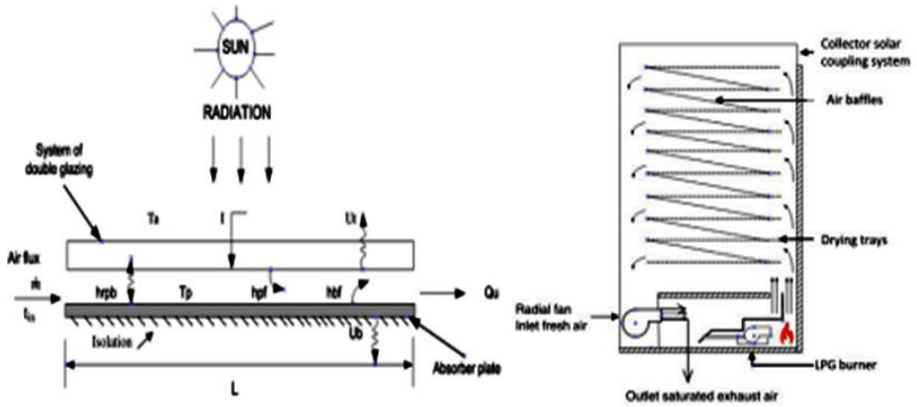
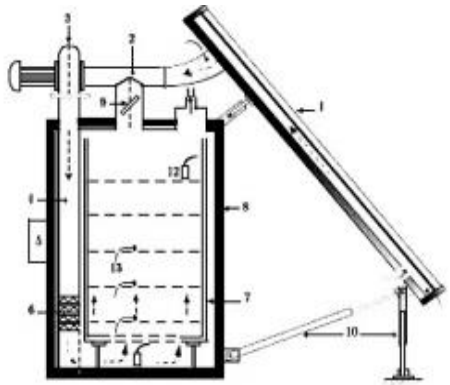


Figure 3.10. Séchoir solaire hybride (solaire – gaz)

- **Séchoir solaire hybride (solaire - électrique)**

L'air est aspiré de l'intérieur de la chambre de séchage par un ventilateur, passe dans un capteur solaire. L'air réchauffé arrive à l'entrée de la chambre de séchage et avant de traverser la claie l'air est chauffé par une résistance électrique alimentée par les panneaux solaires réseau qui fournit, en cas de besoin, un appoint en énergie permettant d'assurer une température de séchage fixe et réglable.



(1) Insolateur, (2) Conduite de ventilation, (3) Ventilateur, (4) Conduit d'aspiration,
(5) Boîte de commande, (6) Appoint électrique, (7) Etages, (8) Armoire de séchage,
(9) Volet d'air, (10) Entrée d'air, (11) Sortie d'air, (12) Sonde d'humidité, (13) Thermocouple

Figure 3.11. Séchoir solaire hybride (solaire-électrique)

3.1.3. Avantages et inconvénients des différents types des séchoirs solaires

Le tableau **3.1** présente les avantages et les inconvénients des différents types des séchoirs solaires.

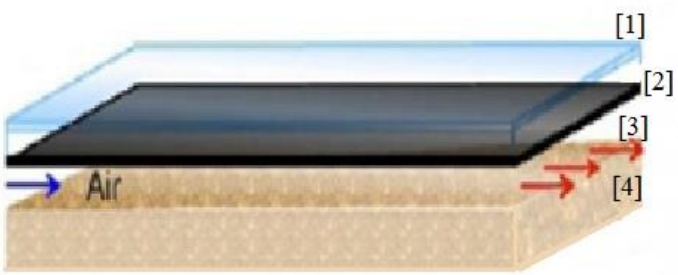
Tableau 3.1. Avantages et inconvénients des différents types des séchoirs solaires.

Séchoir	Avantages	Inconvénients
Séchage solaire à l'air libre	• Procédé simple et non coûteux • N'exige ni matériel ni main d'œuvre qualifiée • Source d'énergie solaire gratuite et non polluante • Pas de dépense d'énergie • Séchage doux grâce à l'alternance jour et nuit • Peu de changement de couleur	• Une longue durée de séchage (possibilité de moisissure). • Altération de la qualité du produit par le rayonnement solaire. • L'efficacité du processus est faible compte tenu des nombreux aléas (météorologie, constituants du produit • Sensibles aux rayonnements ultraviolets, insectes, rongeurs, perte de vitamine…etc.).
Séchoir solaire direct	• Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel. • Pas besoin de main-d'œuvre	• Petite capacité son utilisation est limitée aux applications à échelle réduite. • Décoloration de récolte due à l'exposition directe au rayonnement

	qualifié. • Grandes possibilités de conception	solaire. •Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments • Condensation d'humidité à l'intérieur des couvertures en verre réduisant son transitivité • Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risque de moisissure.
Séchoir solaire indirect	• Mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : (couleur, propriétés, organoleptiques, valeur nutritive. • Fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.	• Coût important. • Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
Séchoir solaire hybride	• Affranchissement par rapport aux conditions climatiques. • Meilleur contrôle du séchage. • Forte augmentation de la production par rapport aux autres types des séchoirs solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.	• Le coût de production et d'investissement relativement élevé. • Nécessité d'approvisionnement local en électricité, gaz, pièce de rechange. • Demande un personnel qualifié pour la maintenance.

3.2. Capteur solaire plan

Le capteur solaire est un type d'échangeur de chaleur particulier qui transforme l'énergie solaire rayonnante en chaleur (**Figure 3.12**). La conception du capteur dépendra de la quantité d'énergie demandée par le système à chauffer et du fluide caloporteur disponible.



[1]: Couvercle transparent. [2]: Absorbeur noircé.
[3]: Conduite. [4]: Isolant thermique.

Figure 3.12. Capteur solaire plan à air.

3.2.1. Éléments constituants d'un capteur solaire

Les principaux composants des capteurs solaires sont

Couvercle : C'est une plaque qui peut être soit en verre, soit en plexiglas, soit en polycarbonates, mais le verre est le plus souvent utilisé.

Absorbeur : C'est une plaque noire qui absorbe le rayonnement solaire et le transforme en chaleur thermique ; cette plaque doit avoir les caractéristiques suivantes :

- ♦ Bonne conductivité thermique ;
- ♦ Absorbance élevée des rayonnements solaires, basse émissivité.

Les matériaux utilisés comme absorbeur sont : le cuivre, les aciers, l'aluminium ...etc.

Isolant : L'isolant a pour rôle de limiter les déperditions calorifiques. Les matériaux utilisés comme isolant sont :

- ♦ Les isolants non organiques tel que la laine de verre, les cendres de végétaux, le bois.
- ♦ Les isolants organiques tel que la mousse de polyuréthanne.

Fluide caloporteur : Le fluide caloporteur est un moyen de transfert de la chaleur collectée par l'absorbeur à un fluide d'échange thermique appelé fluide de travail. Les fluides caloporteurs utilisés sont :

- ♦ L'air : C'est un fluide gratuit mais il possède une faible capacité calorifique en comparaison avec celle de l'eau.
- ♦ L'eau : Elle possède les avantages suivants : une grande chaleur massique, et une faible viscosité.

3.2.2. Différents types de capteurs solaires plans

Les capteurs solaires plans sont très divers même si leur composition reste approximativement la même. Selon **Al-Ghuol** les capteurs solaires plans sont classés en deux grandes catégories :

- Selon la conception de canal d'air ;
- Selon le mode de l'écoulement de l'air.

3.2.2.1. Classification selon la conception de canal d'air

On distingue trois grandes catégories :

- Capteurs à absorbeur plan.
- Capteurs à absorbeur à ailettes.
- Capteurs à absorbeur perméable.

3.2.2.2. Classification selon l'écoulement d'air

On distingue quatre types de capteur selon leurs modes d'écoulement de l'air **(Figure 3.13)** :

- **Type 1** : L'écoulement de l'air au-dessus de l'absorbeur ;
- **Type 2** : L'écoulement de l'air au-dessous de l'absorbeur ;
- **Type 3** : L'écoulement de l'air aux deux côtés de l'absorbeur de même sens ;
- **Type 4** : L'écoulement de l'air au deux côtés de l'absorbeur au sens contraire.

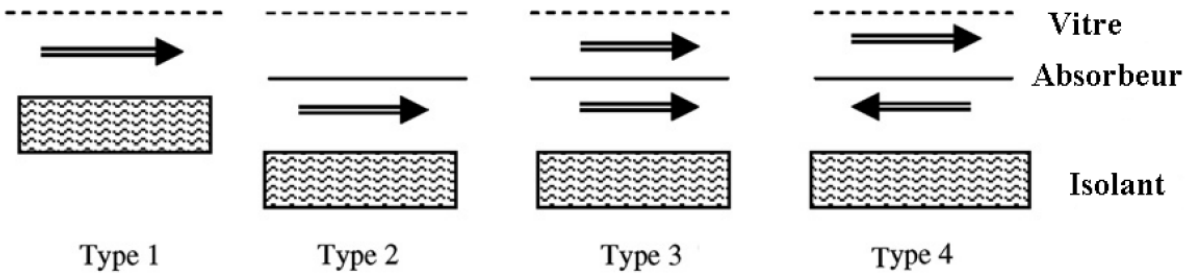


Figure 3.13. Différents types du capteur solaire à air selon leurs modes d'écoulement

3.2.3. Paramètres de la fonctionnalité du capteur

3.2.3.1. Paramètres externes

-Éclairement énergétique dû au rayonnement global, position du soleil, durée d'insolation.

-Température extérieure sèche et humidité relative.

-Vitesse du vent sur le capteur.

3.2.3.2. Paramètres internes

-Dimension des différentes parties : épaisseur, longueur, largeur.

-Paramètres de position : inclinaison et orientation du capteur.

- **Orientation**

L'angle azimutal est l'angle que fait le plan du capteur par rapport au Sud ; plan du capteur orienté plein sud donc l'angle azimutal égale de 0°.

La performance d'un capteur est liée à son exposition solaire, il s'agit de son orientation optimale plein sud, et de l'absence d'ombre au cours de la journée.

- **Inclinaison**

Afin de bien exploiter le rayonnement solaire, la surface de captage devrait toujours être orientée autant que possible perpendiculairement à ce rayonnement. L'inclinaison peut varier entre 30° et 60° en fonction des saisons, un capteur présentant une faible pente sera très exposé en été lorsque le soleil sera bien haut. Par contre, il sera peu adapté pour un fonctionnement hivernal. L'angle de l'inclinaison idéal de collecteur à midi solaire d'un jour particulier pour un emplacement choisi est calculé par l'équation suivante

$$\beta = (\varphi - \delta) \tag{3.1}$$

L'angle de déclinaison du soleil (δ) en degré est calculé par l'équation de **Cooper** :

$$\delta = 23,45 \sin(360.\frac{284+n}{365}) \tag{3.2}$$

Où :

n : Numéro d'ordre du jour dans l'année, $\mathbf{1 \leq n \leq 365}$;

φ : Latitude du lieu ;

δ : Déclinaison du soleil.

3.2.4. Bilan thermique d'un capteur solaire

Le bilan énergétique par unité de surface du capteur s'écrit :

$$\varphi_a = \varphi_u + \varphi_p + \varphi_s \tag{3.3}$$

Où :

φ_a : Flux solaire absorbé à la surface de l'absorbeur ;

φ_u : Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur ;

φ_p : Puissance perdue par convection et conduction vers l'arrière du capteur et par convection, conduction et rayonnement vers la face avant du capteur ;

φ_s : Puissance stockée sous forme de chaleur dans les différents éléments du capteur lorsque le régime thermique est variable.

3.2.5. Performance thermique d'un capteur solaire

La performance d'un capteur solaire à air est déterminée par son rendement thermique instantané défini par :

$$\eta = \frac{Puissance\,thermique\,utile\ par\ m^2\ du\ capteur}{Flux\,solaire\,incident\,sur\,le\,plan\,du\,capteur} \tag{3.4}$$

Alors :

$$\eta = \frac{\rho.Cp.Q.(Tf - Te)}{IG.Ac} \tag{3.5}$$

Où :

η : Rendement instantané du capteur solaire plan ;

ρ : Masse volumique (Kg/m^3) ; **ρ_{air}** = 1.293 (Kg/m^3) ;

Q : Débit volumique (m^3/s) ;

Cp : Chaleur spécifique (J/Kg.K) ; **Cp_{air}** = 1005 (J/Kg.K) ;

T_f et **T_e** : Température d'entrée et sortie de l'air successive (K) ;

Ac : Surface du capteur (m^2) ;

IG : Flux solaire global incident (W/m^2).

Chapitre IV

Matériels Et Méthodes

4. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Introduction

Selon **Nonhebel** la sélection d'un type de séchoir, représente un compromis entre le coût du séchoir, qualité du produit, temps de séchage et convenance de l'installation et de la manipulation. Les paramètres généralement reportés lors de l'évaluation d'un séchoir se résument comme suit :

- Caractéristiques physiques du séchoir ;
- Performances thermiques ;
- Qualité du produit séché ;
- Coût du séchoir et période d'amortissement.

Dans un premier temps, on s'est basé sur la qualité du produit, pour cela nous avons opté pour les séchoirs solaires indirects qui sont plus performants que les séchoirs directs, car ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment à savoir ; sa couleur, son aspect et sa valeur nutritive. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires. Ainsi, le séchoir solaire actif (hybride) est mieux que le séchoir passif car il présente des paramètres contrôlables (température, vitesse d'air, etc...).

L'objectif de ce travail est de contribuer à améliorer les performances d'un séchoir solaire existant. Toutes les améliorations touchent la plupart des paramètres, pour minimiser la durée de séchage et garder la qualité nutritionnelle et organoleptique des aliments à sécher.

Les méthodes et les matériels utilisés pour réaliser ce travail sont les suivants :

4.1. Matériels

4.1.1. Séchoir solaire

Le séchoir objet de notre étude, est un séchoir solaire indirect à convection naturelle (**Figure 4.1)** réalisé par **Lahbari *et al.*** au niveau du département de mécanique université Batna 2, Algérie. Il est essentiellement constitué deux unités : unité de production de l'air chaud (Capteur solaire) et unité de séchage (Chambre de séchage).

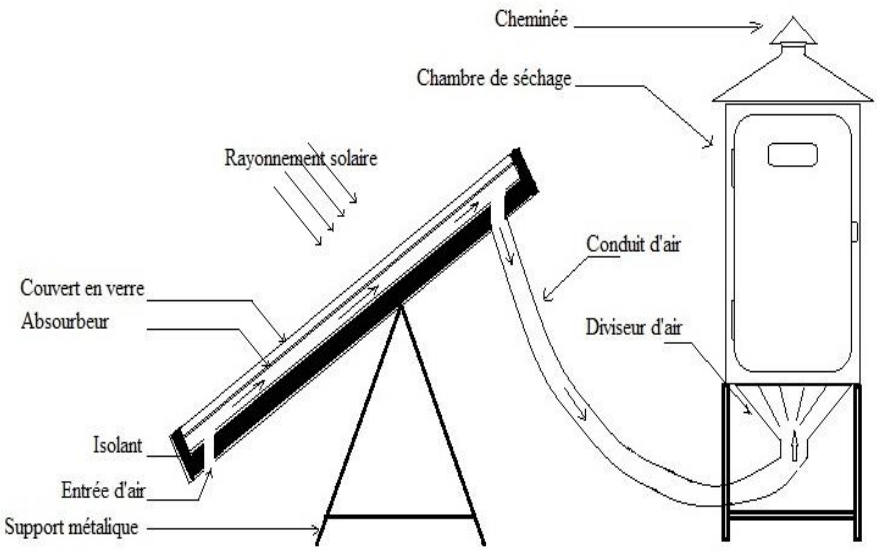


Figure 4.1. Séchoir solaire indirect passif.

1.1.1.1. Capteur solaire

C'est un capteur solaire plan à air (**Figure 4.2**) de simple vitrage et de simple passage de l'air, incliné de 31° (Latitude de la ville de Batna) par rapport au plan horizontal et orienté à plein sud. C'est un coffre en bois de forme parallélépipédique de dimensions 2m x 1m x 0.15 m. Il comporte une tôle en aluminium peinte en noir mate, d'épaisseur 1 mm utilisée comme absorbeur, ce dernier est couvert du haut par un couvert en verre ordinaire d'épaisseur 4 mm, laissant passer le rayonnement solaire, et d'autre coté d'absorbeur passe une lame d'air d'épaisseur 4 cm.

Les côtés latéraux et les parties inférieures sont isolés thermiquement par une couche de laine de verre d'épaisseur 5 cm.

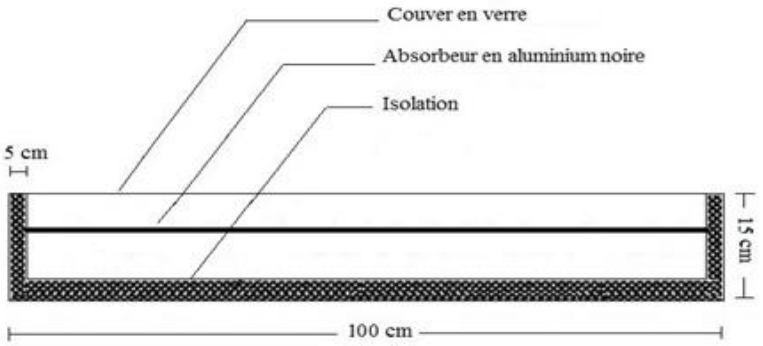


Figure 4.2. Capteur solaire à air.

1.1.1.2. Chambre de séchage

C'est une boite de forme parallélépipédique de dimensions (hauteur = 0.8 m, largeur = 0.6 m et profondeur = 1 m) avec un diffuseur d'air (de forme cellules de miel) au bas de la chambre de dimensions 0.6 x 0.6 x 0.5m **(Figure 4.3**). Les matériaux constituants la chambre de séchage sont à l'extérieur du bois et à l'intérieur de plaque d'aluminium, avec une isolation externe en laine de verre d'épaisseur de 0.05 m, pour minimiser l'échange de chaleur avec le milieu extérieur.

À l'intérieur de cette unité, les produits à sécher sont posés sur des claies en aluminium grillagées de dimensions 0.90 x 0.50 x 0.02 m.

Une cheminée est placée en haut de la chambre pour assurer l'évacuation de l'air utilisé vers l'extérieur.

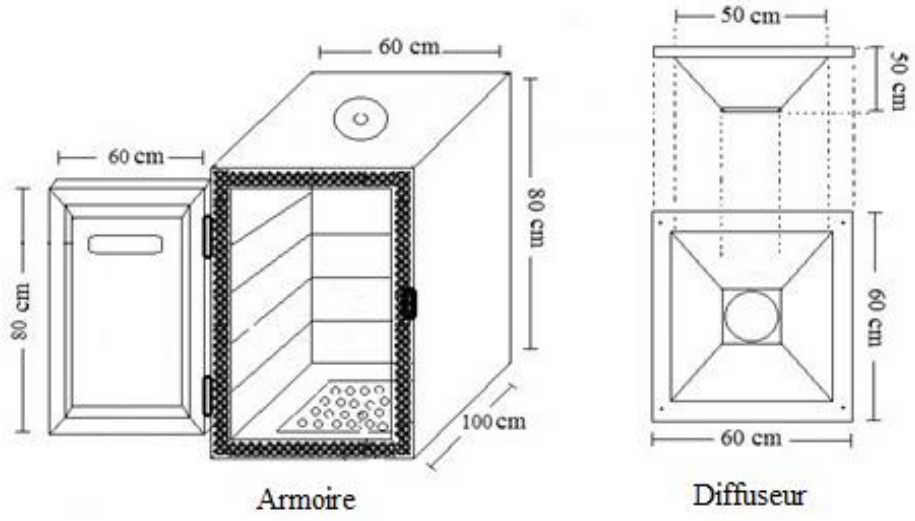


Figure 4.3. Unité de séchage.

1.1.1.3. Fonctionnement du système de séchage

L'air frais provenant de l'extérieur est préalablement chauffé dans le capteur par transfert convectif entre l'absorbeur et l'air. Ce dernier arrive à l'entrée de la chambre de séchage et traverse les claies superposées qui portent le produit à sécher. Enfin l'air asséchant est évacué vers l'extérieur à l'aide d'une cheminée placée à la fin de la chambre de séchage.

1.1.2. Instruments de mesure

1.1.2.1. Mesure du rayonnement solaire

Le rayonnement global reçu sur le plan du capteur est mesuré en W/m^2 à l'aide d'un solarimètre (**BLET, France**) (**Figure 4.4**). Les données sont affiches sur enregistreur à affichage numérique (voir annexe I).

Figure 4.4. Pyranomètre **(BLET, France)**.

1.1.2.2. Mesure de température

La mesure de température s'effectue à l'aide des thermocouples de type k du modèle (**HANNA Checktemp, Australia**) (**Figure 4.5**) dans plusieurs endroits du séchoir solaire : entrée, milieu et sortie du capteur solaire, au niveau des claies de séchage et au cœur du produit à sécher.

Figure 4.5. Appareil de mesure de température au cœur de produit **(HANNA Checktemp, Australia**).

1.1.2.3. Mesure de vitesse de l'air

Les mesures de vitesse et de température de l'air ambiant et de l'air à l'entrée de la chambre de séchage sont effectuées à l'aide d'un anémomètre à affichage numérique (**Lutron AM-4206 Anémomètre, India**) (**Figure 4.6**).

Figure 4.6. Anémomètre (**Lutron AM-4206 Anémomètre, India**).

1.1.2.4. Mesure de l'humidité relative et température de l'air

L'humidité relative de l'air asséchant dans la chambre de séchage est mesurée à l'aide d'un hygromètre type (**DIX-LOG2, France)**. Il enregistre les données instantanées et permet de les afficher sur ordinateur.

Figure 4.7. Appareil de mesure de l'humidité relative et de température de l'air (**DIX-LOG2, France**).

1.1.2.5. Mesure de la perte de masse

La mesure de la perte de masse du produit en fonction du temps est effectuée à l'aide d'une balance de précision ±0.1g (**RADWOG WLC6, Pologne**).

Figure 4.8. Balance de précision ±0,1 g (**RADWOG WLC6, Pologne**).

1.1.2.6. Détermination de l'humidité initiale des produits à sécher

La détermination de l'humidité initiale et la masse sèche du produit est effectuée à l'aide d'un dessiccateur de type **(RADWOG MA 110, Pologne).**

Figure 4.9. Dessiccateur (**RADWOG MA 110, Pologne**).

1.1.2.7. Mesure de couleur

Les changements de couleur durant le processus thermique des produits alimentaires sont mesurés par colorimétrie (**Figure 4.10**) de type (**Konica Minolta CR-10, Japon**).

Figure 4.10. Colorimétrie (**Konica Minolta CR-10, Japon**).

1.1.3. Produit alimentaire à sécher

- **L'épinard (<u>Spinacia oleracea L</u>.)**

Selon l'épinard est une plante herbacée (**Figure 4.11**) annuelle, aujourd'hui cultivée dans toutes les régions tempérées du monde. Il est très reconnaissable par ses longues feuilles vertes, frisées ou plates selon les variétés

L'épinard appartient à la famille des chénopodiacées qui regroupe des légumes cultivés pour la consommation de leur feuilles comme l'épinard, les cardes, ou de leur racine comme la betterave potagère.

Figure 4.11. Feuilles des épinards (Spinacia oleracea)

1.1.3.1. Systématique

Embranchement	Spermaphytes
Sous embranchement	Angiospermes
Classe	Dicotylédones
Famille	Chénopodiaceae
Genre	Spinacia
Espèce	Spinacia oleracea L.
Nom vulgaire français	Epinard
Nom vulgaire anglais	Spinach

Selon l'épinard est une plante dressée, à tige creusée-sillonnée. Ses feuilles alternes, entières, sont pétiolées et sagittées. Les fleurs sont unisexuées. L'épinard forme une rosette foncée, glabre ; parfois gaufrée et à pétiole souvent de même longueur que le limbe

1.1.3.2. Origine de l'épinard

rapportent que l'épinard a été introduit en Europe à partir du VIIIe siècle lors des conquêtes arabes. Utilisé d'abord comme plante médicinale. Cette plante, ramenée en France par Catherine de Médicis, est aussi nommée « herbe de perse ».

L'épinard continuera d'être un légume-feuille très important, nutritif et à rendement élevé dans les climats tempérés d'Europe, d'Amérique du Nord et d'Asie orientale. En Afrique tropicale, sa culture restera cantonnée dans les hautes terres.

1.1.3.3. Variétés de l'épinard

Il existe de nombreuses classifications des cultivars, fondées sur les caractéristiques du fruit et de la feuille.

Une grande division est celle entre cultivars à fruits épineux, également classés comme var. oleracea, et cultivars à fruits ronds, non épineux, classés var. inermis (Moench) Metzg.

- **Variété inermis (moench) Metzg.**, aux fruits ronds et lisses, elle se connait sous le nom d'épinard à graine ronde, épinard rond ou épinard d'été ;

Variété oleracea., connue sous le nom d'épinard piquant ou épinard d'hiver, aux fruits épineux, et dont la plante est plus étendue et a plus de ramification que la var. inermis, qui se plante en printemps ou au début de l'été en vue d'une récolte hâtive. Elle se cultive également à la fin d'été en vue d'une récolte d'automne. La variété oleracea semble en être la forme la plus primitive

Les cultivars sont également groupés en fonction de la couleur de la feuille (vert pâle ou vert foncé) et de sa texture (lisse, semi-lisse et cloquée).

D'après Le choix des variétés cultivés est établi selon la saison de culture et la résistance au mildiou (Maladie des plantes). On trouve des variétés de printemps, à cycle court et résistant à la montée à grain (Boléro, Caventa, Ballet, Taurus), d'automne (Symphonie, Mazark, Pavana, Ttriptik) et d'hiver (Wintra, Geant d'hiver, Imperial)

1.1.3.4. Composition et valeur nutritionnelle

Selon il a constaté qu'à coté de ses qualités gustatives il se caractérise de plus par la haute valeur biologique de protéines qui donnent un index essentiel de 68, considéré comme le plus élevé parmi les légumes-feuilles.

Les feuilles de l'épinard, très riches en cellulose, constituent un aliment efficace contre la constipation. En outre, compte-tenu de leur richesse en fer, en iode et en vitamines **A, B, C** et **D**, ces feuilles sont recommandées en cas d'anémie et possèdent des propriétés activatrices de la sécrétion pancréatique, antirachitiques, hyper glycémiantes et hypotensives. Il peut être utilisé comme reminéralisant, antiscorbutique, tonicardiaque, anti-cancer « balai » des voies digestives

Selon les feuilles regorgent de minéraux et d'oligoéléments : les teneurs en potassium (**529 mg/100 g**) ; en calcium (**104 mg/100 g**) et en magnésium (**58 mg/100 g**) sont impressionnantes, riche en **fer**, et en plus de **P, K, Na, Cl, S**, **Mn, Zn, Cu, I.**

L'épinard contient aussi beaucoup de vitamines : A, B_1, B_2, B_9, B_{12}, C, E, et K. L'épinard est fragile et perd rapidement ses vitamines. Il faut choisir des feuilles sombres, tendres et charnues et éviter les feuilles jaunes, flétries ou trop humides

L'épinard représente les aliments qui contribuent pour une part notable à l'apport en acide folique. L'épinard contient aussi de la chlorophylle, du carotène, des flavonoïdes et bien d'autres antioxydants comme la lutéine et la zéaxantshine. Avec ces composants réunis en un tel cocktail, l'épinard se comporte comme un véritable médicament naturel

1.1.3.5. Conservation de l'épinard

Une fois récolté, l'épinard doit atteindre le marché très rapidement pour être consommé comme légume frais dans les 2-3 jours.

La conservation en atmosphère contrôlée, avec 10 % de CO_2, permet de prévenir le jaunissement pendant une durée qui peut aller jusqu'à 3 semaines à une température de 5°C

- Les techniques de conservation par la chaleur concernent la déshydrations (Séchage), l'appertisation et la cuisson sous vide.

  ont montré que la congélation des épinards à -18°C pendant 6 mois n'a pas modifié de manière significative la teneur en fer, zinc et carotène. Mais la rétention de la vitamine C était inférieure à celle des autres nutriments étudiés. Étant donné la fragilité de l'acide folique, la congélation est le meilleur mode de conservation. Si le seuil de température de -18°C à -20°C est franchi rapidement, les folates ne sont pas plus altérés que les autres vitamines Si la congélation apparaît comme le mode idéal de conservation, il ne faut toutefois pas en conclure que les produits surgelés contiennent

encore l'intégralité des vitamines présentes initialement, car ils ont préalablement subi un blanchiment

1.2. Méthodes expérimentales

La méthodologie des expériences se divise en :

- ✓ Mise en marche du séchoir solaire existant ;
- ✓ Installation des appareils de mesure pour contrôler les paramètres dans des différents endroits ;
- ✓ Faire des essais de séchage sur le séchoir solaire existant ;
- ✓ Améliorations de séchoir solaire existant et tester leur performance dans chaque expérimentation ;
- ✓ Préparation du produit à sécher.

La préparation correcte de l'aliment pour un séchage efficace est comme suit :

A. Pour obtenir un séchage uniforme, il faut que les dimensions et l'épaisseur des tranches soit la plus uniforme possible.

B. Éliminer les impuretés, la boue, et les résidus.

C. Couper et enlever les parties non comestibles.

D. Découper les feuilles de l'épinard de forme carré (**Figure 4.12**) par un moule de dimensions 40x40mm.

E. Déposer les morceaux découpés sur les claies, la masse initiale du produit frais est de 500g par claie.

Figure 4.12. Feuille de l'épinard avant et après découpage.

- ✓ Le suivi de la perte de masse du produit au cours du séchage est assuré par la mesure de masse effectuée à intervalle de temps réguliers de 30 minutes par l'utilisation d'une balance de précision à ±0.1g. La durée de séchage étant le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale souhaitée, à une température inférieure ou égale à la température maximale tolérée par celui-ci. Pour les feuilles de l'épinard étudié, la teneur en humidité finale souhaité est très faible, c'est l'humidité standard de stockage et de commercialisation de l'épinard ; où le développement de tous les micro-organismes est inhibé. Les mesures de température, du rayonnement, et de la vitesse de l'air sont effectuées régulièrement chaque 30 minute.

Le protocole expérimental consiste à réaliser quotidiennement une amélioration sur le séchoir solaire, puis faire un essai de séchage du produit entre 9h et 17h soient huit heures de traitement en continu. La manipulation est arrêtée lorsque la teneur en eau souhaitée est atteinte. Le produit est emballé dans des sacs en plastique sous vide et stocké dans un endroit sec au froid, les résultats sont tracés sous formes de courbes et traitées.

1.2.1. Évaluation de performance du séchoir solaire existant

Dans cette partie, Il s'agit du séchage solaire de l'épinard déposé en couche mince dans le séchoir solaire indirect existant sans amélioration, mesurant les paramètres et étude de la performance initiale.

-Fonctionnement du séchoir à vide pendant 30 min ;

-Vérification de l'homogénéité de la température dans l'unité de séchage ;

-Suivre la perte de poids du produit à sécher dans chaque claie.

1.2.2. Séries des améliorations sur le séchoir solaire

Dans cette partie, faire des améliorations sur le séchoir (voir annexe II), et suivre leur impact sur le séchage solaire des produits agroalimentaires. Les séries expérimentales sont divisées en plusieurs phases :

1.2.2.1. Ajout de la ventilation

Consiste à mettre un ventilateur turbine (centrifugeuse) de type (**NICOTRA**, **Spain**) de 2800 t/min (**Figure 4.13**), à l'entrée du capteur solaire avec régulateur de vitesse qui assure trois différentes vitesses (1, 1.5 et 2m/s) de l'air asséchant dans la chambre de séchage, et un

ventilateur extracteur de type (**SIMBROM, Chine**) de débit volumique 200 m^3/h (Voir annexe I), à la sortie de la chambre pour évacuer l'air humide.

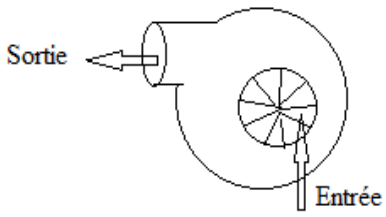


Figure 4.13. Ventilateur turbine**.**

1.2.2.2. Ajout d'un appoint électrique

L'amélioration du processus de séchage solaire par l'ajout d'un appoint électrique (**Figure 4.14**) sur le séchoir solaire indirect à convection forcée. Il est constitué de trois résistances à ailettes de puissance 2250 W, contrôlés par un thermostat numérique de marque (**Love Conrtols 16A, USA**) (voir annexe I), pour stabiliser la température de consigne dans le séchoir en cas d'énergie solaire insuffisants. Les expériences de séchage ont été réalisées à 50, 65 et 70 °C, avec différentes vitesses de l'air de 1, 1.5 et 2m/s.

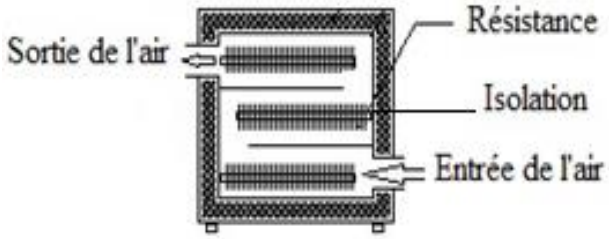


Figure 4.14. Appoint électrique avec trois résistances de 2250 W.

1.2.2.3. Ajout d'un système de recyclage de l'air

Étudier l'Influence du recyclage de l'air asséchant, sur la performance du séchoir solaire indirect naturel et hybride, pour différentes fractions de l'air recyclé (0, 50 et 90%). en reliant la sortie de la chambre de séchage avec l'entrée du capteur solaire.

1.2.2.4. Ajout d'un système de pesée continue du produit à sécher

Mesurer la perte de poids du produit à sécher en continu dans le séchoir solaire sans ouverture de la porte de la chambre du séchage, par l'ajout d'une balance de précision portant les claies avec le produit à sécher.

1.2.2.5. Effet du prétraitement sur le processus du séchage

Étudier l'influence du prétraitement de blanchiment (dans une atmosphère de vapeur à 95-100°C pendant quelques secondes) sur le processus du séchage et essentiellement sur la qualité finale des épinards, avec l'évaluation des paramètres de couleur à l'aide d'un colorimètre.

1.2.3. Caractérisation physico-chimique du produit séché

1.2.3.1. Rendement de la partie comestible

La détermination de la quantité de la partie comestible se fait par élimination des déchets (parties flétrie et corps étrangers) et de la partie jugée non comestible.

Le rendement est exprimé en pourcentage du produit brut (rapport de la masse de la partie comestible PC sur la masse totale MT).

Pour l'épinard la partie comestible est les feuilles seulement.

$$\text{Rendement}_{\%} = (PC / MT) \times 100 \qquad (4.1)$$

1.2.3.2. pH (NF V 05-108, 1970)

Le pH d'une solution des épinards à 4% (4 g de poudre ou des feuilles de l'épinard broyés diluée dans 100 ml d'eau distillée) a été déterminé à l'aide d'un pH mètre de type (**HANNA HI2210, France**) préalablement étalonné.

1.2.3.3. Détermination de l'acidité titrable (NF V 05-101, 1974)

L'acidité titrable est exprimée en grammes d'acide citrique pour 100 g de produit selon l'équation suivante :

$$A_{\%} = \frac{250.V_1.100}{(V_0 \times M \times 10) \times 0.07} = \frac{175.V_1}{V_0 \times M} \qquad (4.2)$$

Soit :

M : Masse, en grammes du produit prélevé.

V_0 : Volume en millilitres de la prise d'essai.

V_1 : Volume en millilitres de la solution d'hydroxyde de sodium à 0,1 N utilisé.

0.07 : Facteur de conversion de l'acidité titrable en équivalent d'acide citrique.

1.2.3.4. Détermination de la teneur en eau (NF V 03-903)

La teneur en eau est déterminée selon la formule suivante :

$$H_{\%} = \frac{(M_1 - M_2)}{P.100} \quad (4.3)$$

Soit :

H % : Humidité ;

M_1 : Masse de la capsule + matière fraîche avant séchage en (g) ;

M_2 : Masse de l'ensemble après séchage dans l'étuve à 105°C (g) ;

P : Masse de la prise d'essai (g).

$$Ms_{\%} = 100 - H\% \quad (4.4)$$

1.2.3.5. Détermination de la teneur en cendres (NF V 05-113, 1972)

La matière organique est calculée selon la formule suivante :

$$MO_{\%} = \frac{(M1 - M2)}{P.100} \quad (4.5)$$

Soit :

MO % : Matière organique ;

M_1 : Masse des capsules + prise d'essai (g) ;

M_2 : Masse des capsules + cendres (g) ;

P : Masse de la prise d'essai (g).

La teneur en cendres (Cd) est calculée selon la formule suivante :

$$Cd_{\%} = 100 - MO\% \quad (4.6)$$

1.2.3.6. Détermination de la teneur en protéines

- **Méthode de kjeldhal (NF V 04-211, 1971)**

La teneur en azote total est déterminée par la formule suivante :

$$N_{\%} = V.0,0014.\frac{100}{M} \quad (4.7)$$

Où :

M : Masse en grammes du produit prélevé ;

V : Volume d'acide sulfurique (0,1N) utilisé pour la neutralisation de l'ammoniac.

La teneur en protéines (**Tp**) est déterminée par la formule suivante :

$$Tp_{\%} = N\%.6,25 \tag{4.8}$$

1.2.3.7. Détermination de la couleur du produit

- **Méthode de colorimétrie**

La quantification des changements de couleur des échantillons traités a été déterminée en utilisant un colorimètre (**CR-10**) permettant l'acquisition des paramètres L, a, b, dans le système Hunter-L a b (**Figure 4.15**).

Où : **L** représente le paramètre d'échelle Noir/blanc, **a** le paramètre d'échelle rouge/vert et **b** le paramètre d'échelle jaune/bleu

Pour chaque prélèvement d'échantillon, les paramètres de couleur de la surface de l'épinard ont été mesurés (cinq mesures par échantillon) puis ramenés à une moyenne.

Le changement de couleur global est alors exprimé par la quantité **ΔE** dite distance de couleur. C'est une valeur simple qui tient compte des différences de **L**, de **a** et de **b** entre un échantillon et un autre échantillon de référence. **ΔE** est calculée en utilisant l'équation suivante

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \tag{4.9}$$

Où : $\mathbf{L_0}$, $\mathbf{a_0}$ et $\mathbf{b_0}$ se rapportent aux valeurs de couleur mesurées pour un échantillon de référence. **L, a** et **b** les coordonnées de Hunter.

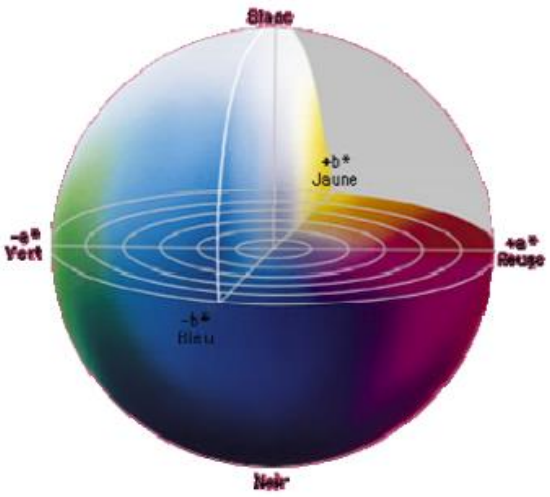


Figure 4.15. Schéma représentant les coordonnées de Hunter des différentes couleurs

1.3. Analyse numérique des résultats expérimentaux

1.3.1. Détermination de la courbe caractéristique de séchage

L'intérêt de cette courbe est important. Il suffit de connaître les valeurs de la teneur initiale en eau et d'équilibre pour pouvoir décrire la cinétique de séchage dans n'importe quelle condition de l'air asséchant. Le principe de la courbe caractéristique de séchage est de réduire l'ensemble des données expérimentales de manière à pouvoir les mettre sous forme utilisable non seulement par l'expérimentateur lui-même, mais aussi par l'ensemble de la communauté scientifique.

La démarche suivie est de normaliser le rapport $\mathbf{(-dX/dt)_t/(-dX/dt)_i}$ dans les mêmes conditions de l'air en fonction de la teneur en eau réduite X_r.

Suite aux différents essais expérimentaux de séchage réalisés dans des conditions opératoires différentes, nous avons établi une corrélation exprimant la vitesse de séchage normée de l'épinard sous forme d'un polynôme $f(X_r)$.

Nous avons utilisé la méthode d'optimisation non linéaire en utilisant le logiciel Origine 8.0 et en traitant tous les points expérimentaux.

1.3.2. Validation du modèle numérique

Cette partie est consacrée à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus pour le produit à sécher (l'épinard), ainsi qu'à la validation de notre modèle numérique.

Cette étape est réalisée à travers une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de la simulation par les modèles de séchage des produits alimentaires (**Newton, page, logarithmique, Henderson, … etc),** mentionnés précédemment dans le tableau **2.2**.

L'objectif recherché ici est de valider les prédictions du modèle numérique concernant l'évolution de la teneur en eau à base sèche des épinards, dans chaque amélioration apportée au séchoir existant.

Chapitre V

Résultats Et Discussions

5. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ces travaux ont été réalisés au laboratoire de sciences des aliments (LSA) université de Batna 1, en collaboration avec le laboratoire d'étude des systèmes énergétiques industriels (LESEI) université de Batna 2, Algérie.

Les résultats des tests réalisés sur le séchoir sont présentés sous forme des courbes de séchage donnant la teneur en eau réduite en fonction du temps, la vitesse de séchage en fonction du temps et la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau.

La performance du séchoir solaire dépend aussi des conditions climatiques de la région, particulièrement la température, l'humidité et l'ensoleillement.

L'humidité initiale mesurée des épinards est d'environ 93,2%, le séchage se produit jusqu'à une humidité finale de 0.2 %. Les expériences de séchage ont été effectuées pendant les périodes (Juin - Juillet 2015) dans les conditions climatiques de Batna en Algérie.

5.1. Conditions expérimentales

Au cours des essais expérimentaux, la température ambiante, la vitesse du vent et l'humidité relative respectivement varient entre 23,0 et 39,9 °C ; 0,9 et 3,6 m/s ; 17,5% et 43,6%. L'irradiante solaire maximale (environ heures à midi) varie entre 843 et 950 W/m^2. La figure **5.1** montre la variation moyenne des conditions ambiantes au cours du temps de la journée pendant les essais expérimentaux effectués.

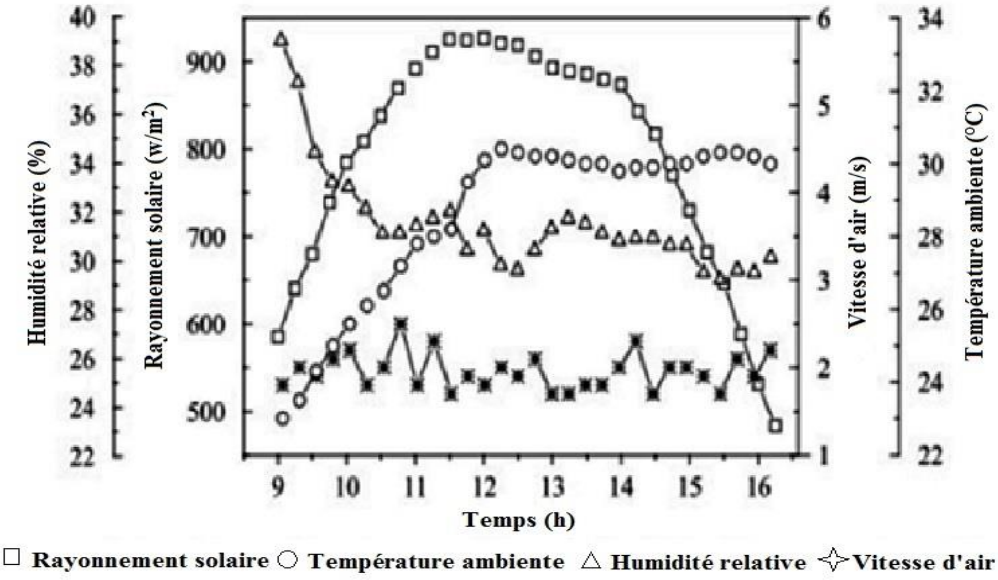


Figure 5.1. Variation des conditions ambiantes au cours du temps de la journée de l'expérience.

5.2. Évaluation du séchoir solaire existant

5.2.1. Évolution de la température du séchoir solaire

- **Capteur solaire**

La figure **5.2** représente l'évolution de la température du capteur solaire, durant la période de l'expérience. Elle représente un écart important de la température de l'entrée et la sortie du capteur solaire. Cette différence de température est dû à l'influence du rayonnement solaire sur l'absorbeur et à l'effet de serre qui en résulte entre l'absorbeur et la vitre, qui joue un rôle important dans l'échauffement de l'air circulant à l'intérieur du capteur et par suite contribuer positivement au bilan thermique du séchoir. L'écart varie de 1 à 35°C au cours de l'expérience, par l'augmentation des rayonnements solaire pour atteindre la valeur maximale à midi, puis diminue à la fin du jour puisque les rayonnements globaux diminuent et attiennent la valeur minimale (530 W/m^2).

Le pic de la température de l'absorbeur a frôlé plus de 80 °C, le 10 juin 2015 à 14 heures. La moyenne des pics journaliers se situent autour de 75 °C. La température du capteur baisse de quelques degrés comparativement à la température ambiante durant la nuit.

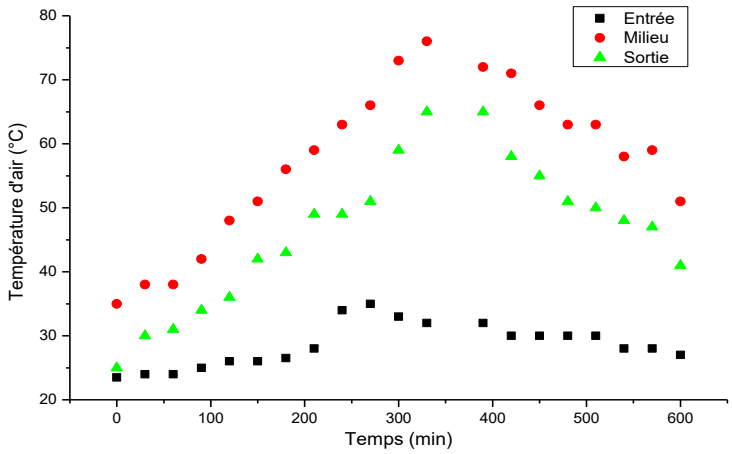


Figure 5.2. Évolution de la température de l'air asséchant au niveau du capteur du séchoir solaire existant.

- **Chambre de séchage**

La figure **5.3** représente l'évolution de la température et l'humidité relative à l'intérieur de la chambre de séchage. On peut voir une augmentation rapide et continue de la température de l'air au début de l'expérience, jusqu'à l'atteindre une position intermédiaire de la température de l'entrée et la sortie du capteur, ce qui explique la consommation d'une quantité

de chaleur pendant l'évaporation de l'eau à partir du produit. Par conséquent la température à l'intérieur n'a pas excédé 50 °C durant le séchage.

La valeur de l'humidité relative présente des fluctuations entre 12% et 20% à l'intérieur de la chambre. On remarque que la variation d'humidité n'est pas importante, la température augmente et l'humidité diminue.

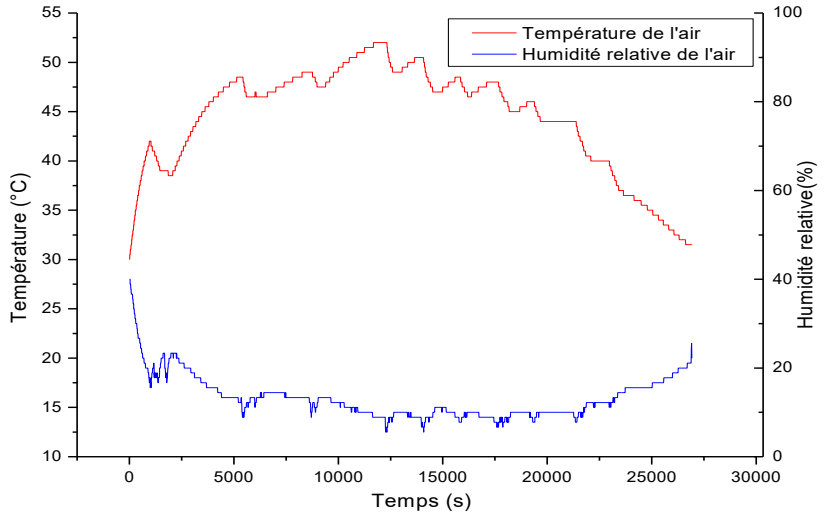


Figure 5.3. Évolution de la température et de l'humidité relative de l'air dans la chambre du séchoir solaire existant.

5.2.2. Essais de séchage des épinards dans le séchoir solaire existant

Les figures **5.4** et **5.5** montrent respectivement la variation de la teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour différentes claies (1, 2 et 3), et la vitesse de séchage dans le séchoir solaire indirect à convection naturel.

Il y a un large écart de la teneur en eau réduit des épinards séché et un décalage important de temps du séchage (1 à 2 heures) dans les trois claies. Le produit séché plus vite dans les premières claies, comparé au produit posé sur les dernières. Ce qui est tout à fait normal, puisqu'au fur et à mesure que l'air avance dans le séchoir, sa température baisse et son humidité relative augmente; autrement dit, la dépense d'énergie thermique occasionnée par l'évaporation de l'eau (le produit humide cède son eau à l'air puisqu'il régit une pression partielle de vapeur d'eau plus faible dans l'air qu'à la surface du produit) s'accompagne d'un refroidissement de l'air. Les résultats obtenus, représentés dans la figure **5.4** sont semblables à ceux obtenus par (**Akpinar, 2006 ; Boughali, 2010 ; Boussalia, 2010**).

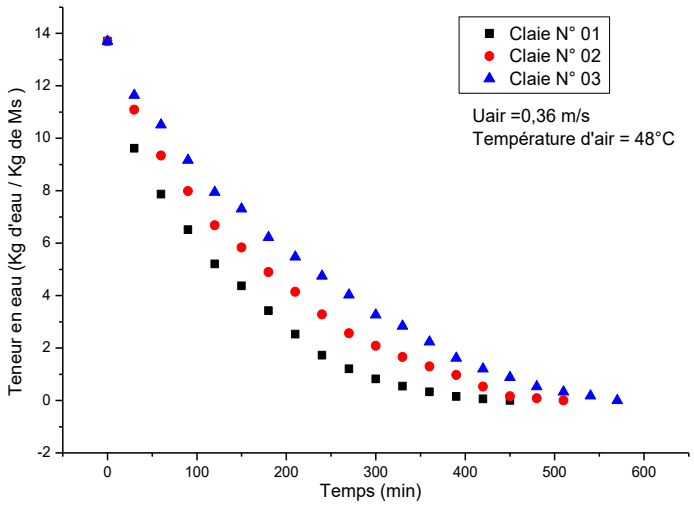


Figure 5.4. Teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour les trois claies (1, 2 et 3) dans le séchoir solaire à convection naturelle.

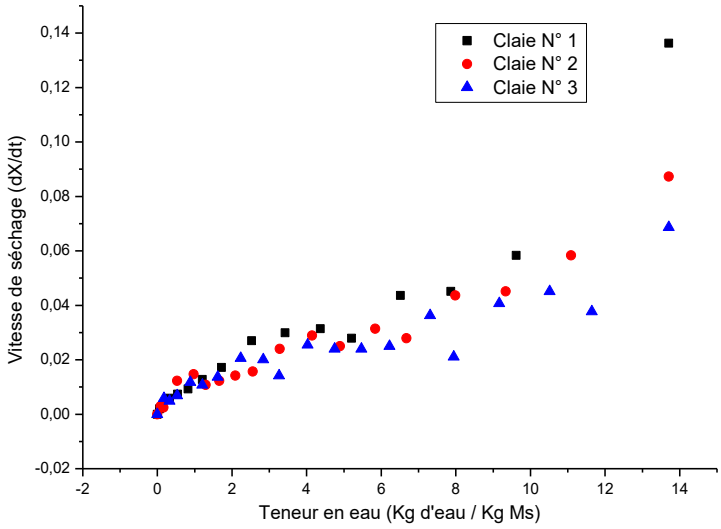


Figure 5.5. Vitesse de séchage des épinards en fonction de la teneur en eau réduite pour les trois claies (1, 2 et 3) dans le séchoir solaire à convection naturelle.

5.2.3. Évolution de la température du produit au cours du séchage

La figure (**5.6**) représente l'évolution de température au cœur de l'épinard séché. Elle augmente à faible vitesse et continue au début de l'expérience, et due à un gradient important de température entre le milieu asséchant et le produit ; la température du produit croit très lentement, ceci à cause de l'extraction difficile des molécules d'eau qui sont liées dans la structure interne du produit.

Enfin, la température du produit croit jusqu'à atteindre la température de l'air asséchant lorsque le produit est complètement séché. Ce qui explique le transfert de chaleur et de masse pendant l'évaporation de l'eau à partir du produit par l'effet convective.

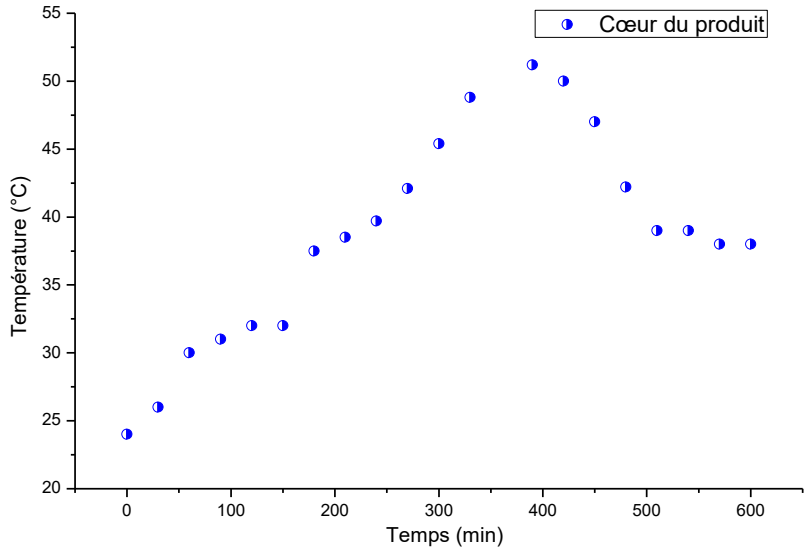


Figure 5.6. Évolution de la température au cœur des épinards séchés dans le séchoir solaire à convection naturelle.

5.3. Évaluation du séchoir solaire amélioré

5.3.1. Effet de la ventilation sur la cinétique de séchage

L'influence de la vitesse de l'air asséchant sur la durée de séchage des épinards a été étudiée. La figure **5.7** montre qu'une élévation de 1 à 2 m/s de la vitesse d'écoulement de l'air fait décroître la durée de séchage des épinards de 150 minutes. Ce qui explique que l'augmentation du débit (vitesse de l'air) favorise les échanges convectifs, entraînant un séchage presque uniforme. Par conséquent, une diminution dans le temps de séchage. Les résultats sont en bonne concordance avec les travaux (**Inci et Dursun, 2002 ; Inci et Dursun, 2003 ; Akpinar, 2006**).

La variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau des épinards est illustrée par la figure **5.8** pour les différentes vitesses de l'air asséchant 1, 1.5, et 2 m/s. Elle représente une augmentation de la vitesse de séchage avec l'augmentation de la vitesse de l'air.

Lors de l'opération de séchage, on observe la présence d'une seule phase de séchage celle de la phase à allure décroissante, l'absence de la phase de mise en température et de la phase de séchage à allure constante. Ce résultat indique probablement que le mécanisme de

diffusion est le mécanisme physique le plus susceptible qui régit le mouvement d'humidité dans ces échantillons. Ces résultats sont conformes aux différents travaux réalisés sur les produits agricoles (**Akanbi *et al.*, 2006 ; Doymaz, 2005 ; Sharma *et al.*, 2005 ; Sacilik *et al.*, 2006).**

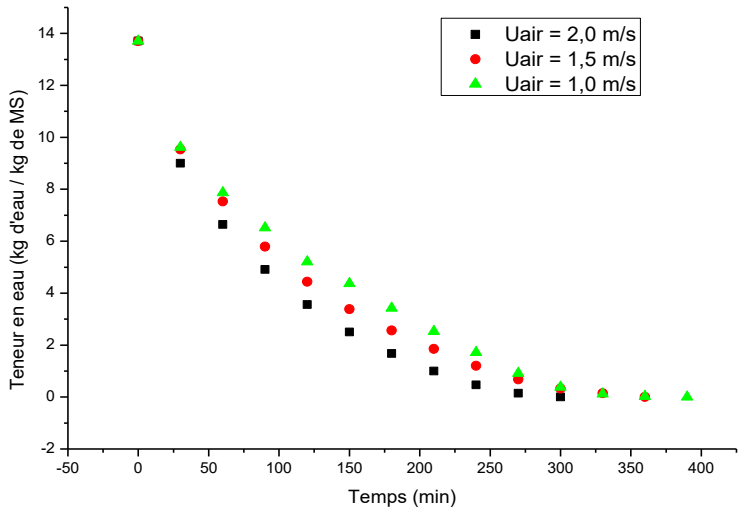


Figure 5.7. Teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour différentes valeurs de vitesse (1, 1.5 et 2m/s) de l'air asséchant.

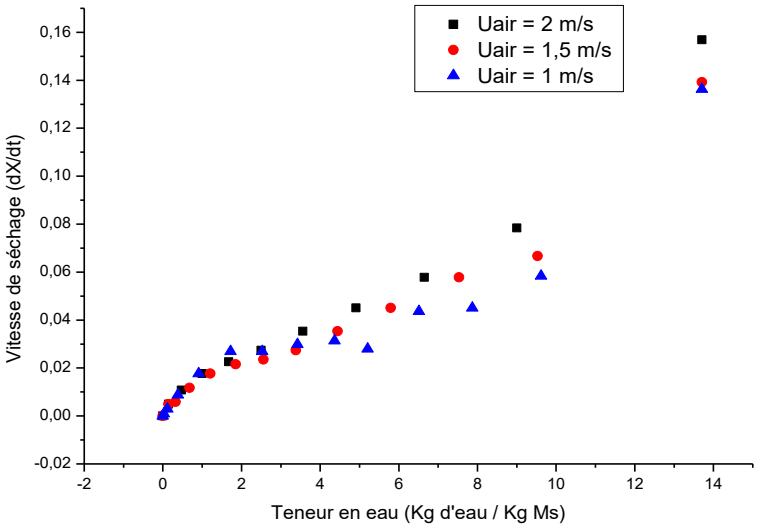


Figure 5.8. Vitesse de séchage des épinards en fonction de la teneur en eau pour différentes vitesses d'air asséchant (1, 1.5 et 2m/s) dans le séchage à convection forcé.

5.3.1.1. Comparaison des deux modes de séchage naturel et forcé

La figure **5.9** représente la variation de la teneur en eau en fonction du temps pour les claies 1 et 2 dans les deux modes de séchage naturel et forcé. On remarque qu'il n'y a pas une

différence entre les teneurs en eau réduit du produit d'une claie à l'autre dans le séchage à convection forcé, par contre pour le séchage à convection naturel il y a un large écart de temps (1h) et de la façon de séchage entre les claies un et deux.

Ce qui signifie que le séchage au mode forcé se fait d'une façon presque uniforme et homogène au niveau de tous les produits des deux claies, par contre pour le séchage à convection naturel ou libre on a remarqué que les échantillons de produits se trouvant aux alentours des claies sont plus ou moins grillés par rapport aux autres cela est dû probablement à la mauvaise circulation de l'air asséchant qui a engendré des zones de chauffes.

Le temps de séchage en convection forcé se trouve réduit par rapport au séchage naturel.

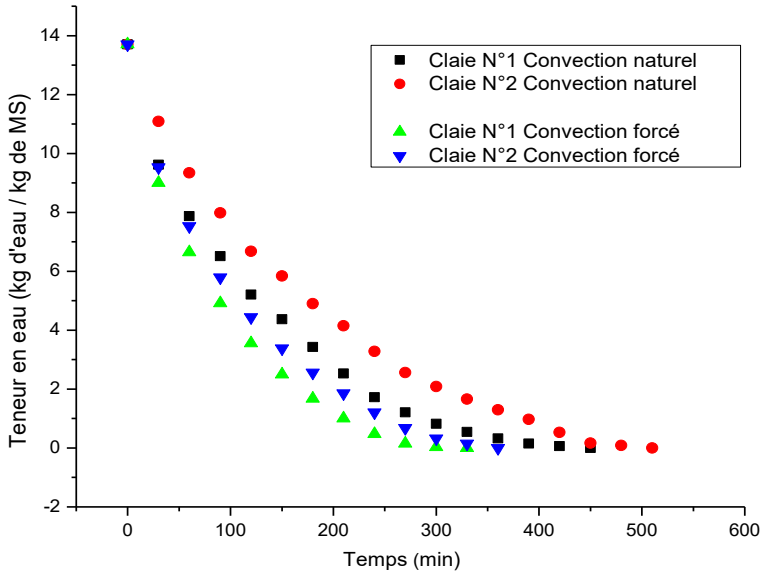


Figure 5.9. Teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour les deux claies (1 et 2) dans les deux modes de séchage solaire naturel et forcé.

5.3.2. Effet de la température sur la cinétique de séchage

Les figures **5.10, 5.12 et 5.14** montrent l'influence de la température de l'air asséchant qui varie de 50°C à 70°C sur la cinétique de séchage en fonction de temps pour divers débits.

L'action simultanée de l'insolation des épinards et d'un préchauffage de l'air par l'appoint électrique provoque une diminution importante du temps de séchage. En effet, l'air asséchant dans ce cas accroît le gradient de concentration de vapeur d'eau entre le produit et le courant d'air, et par conséquent la vitesse de séchage augmente ce qui est montré par les figures **5.11, 5.13 et 5.15.**

Pour une faible température de séchage soit de 50 °C et un débit d'air de 1m/s, le séchage fait presque 6.5 heures de séchage pour atteindre la teneur en eau finale du

produit. Ce temps est réduit à 5 heures si la température est de 70 °C. Cette influence est due à l'augmentation de la pression osmotique de l'eau à l'intérieur du produit qui accéléra la migration de l'eau du produit vers l'extérieur. L'augmentation en température de 50°C à 70°C permet de réduire le temps de séchage de 24%. Ceci est conforme aux résultats présentés par **Vega-Galvez et *al.* (2008)** pour le séchage de paprika rouge, **Kooli *et al.* (2007)** pour le séchage de poivron rouge et **Bennamoun et Belhamri (2003) et Sarsavadia (2007)** pour le séchage de l'oignon.

De même pour la vitesse de l'air caloporteur, l'augmentation de 1 à 2m/s engendre une diminution relative du temps de séchage (Pour la température de 50°C, le temps de séchage est de 6.5h, 6h et 5h, respectivement, pour la vitesse de l'air 1, 1.5 et 2m/s ; par contre pour la température de 70°C il chute d'une manière importante à 5h, 4h et 2h). Cela est dû à l'augmentation du coefficient de transfert de chaleur et de masse entre le produit et l'air asséchant. Cela est dû à la baisse de température du produit (refroidissement) causé par l'augmentation de la vitesse de l'air asséchant d'où une diminution de la pression de la vapeur d'eau ce qui engendre une diminution de l'évaporation de l'eau. On peut conclure par conséquent que, l'effet de la vitesse de l'air asséchant sur le temps de séchage est moindre que l'effet de la température. La température est constaté le facteur le plus influant sur la cinétique de séchage. Ce résultat est confirmé par : (**Lahsasni *et al.*, 2004 ; Babalis et Belessiotis, 2004 ; Kaya *et al.*, 2007 et Maskan *et al.*, 2002)**.

D'après les figures **5.11, 5.13 et 5.15** qui représentent la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau de produit séché, on remarque au début du séchage une migration rapide de l'humidité du produit vers l'extérieur (pente de la courbe très importante au début du processus de séchage), cette pente diminue au fur et à mesure que le temps de séchage augmente.

À faible teneur en eau du produit, les effets de la température et de la vitesse de l'air de séchage sont presque négligeables. Ceci peut être expliqué par le fait que les faibles valeurs de la teneur en eau du produit représentent de faibles quantités d'eau à l'intérieur du produit.

Le meilleur procédé de séchage est l'extraction rapide de l'humidité, pour éviter la formation de la moisissure sur le produit séché. C'est-à-dire le produit moisira avant qu'il ne séchera. Mais pas trop vite, une croûte risque alors de se former en surface empêchant l'eau de sortir, ni à très haute température le produit se dénature et noircit. Il faut prendre en considération les caractéristiques et les propriétés du produit.

On note l'absence de la phase à allure croissante et de la phase à allure constante et la présence unique de la phase à allure décroissante. Ceci est conforme aux résultats

expérimentaux de certains travaux sur le séchage : **Mennouche (2006)** pour le séchage de la tomate, **Benhamou *et al.* (2008)** pour le séchage des feuilles de marjolaine.

Ces résultats montrent que le séchage dans un séchoir de type hybride continu dans les heures non ensoleillées. En plus, la qualité du produit est améliorée pour un débit d'air varié, par rapport au produit qui sèche en continuité, ainsi que l'efficacité thermique atteint 69 %.

Toutefois, les résultats expérimentaux ont montré que la température d'air chaud a un effet significatif sur l'évolution du taux d'humidité contenu dans le produit. Cependant, la vitesse de l'air du séchage a un faible effet ; la température de l'air l'emporte sur sa vitesse (**Akpinar, 2006 ; Madjoudj, 2007**).

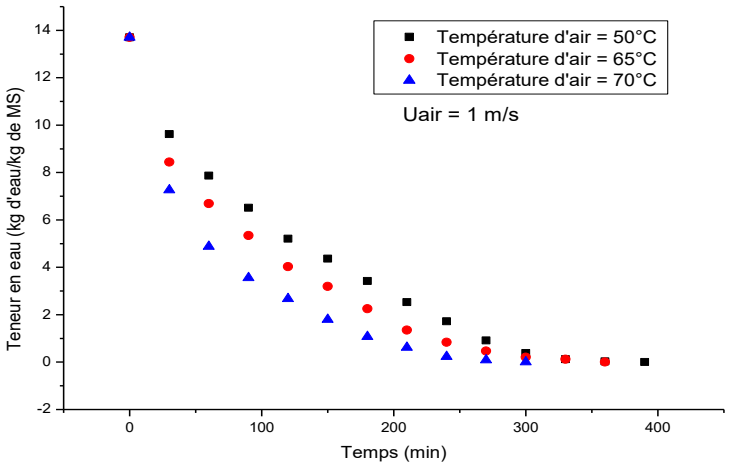


Figure 5.10. Teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour différentes valeurs de température de l'air asséchant pour une vitesse fixe de 1 m.s $^{-1}$.

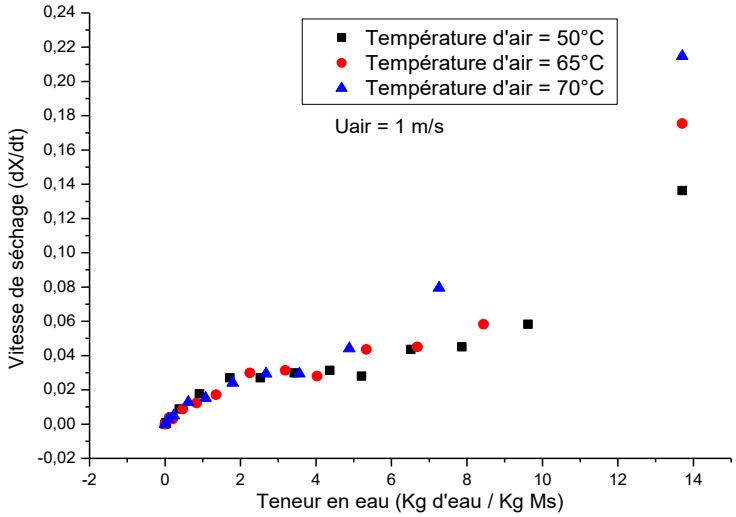


Figure 5.11. Vitesse de séchage des épinards en fonction de la teneur en eau pour différentes valeurs de température de l'air asséchant pour une vitesse de l'air fixe de 1 m.s $^{-1}$.

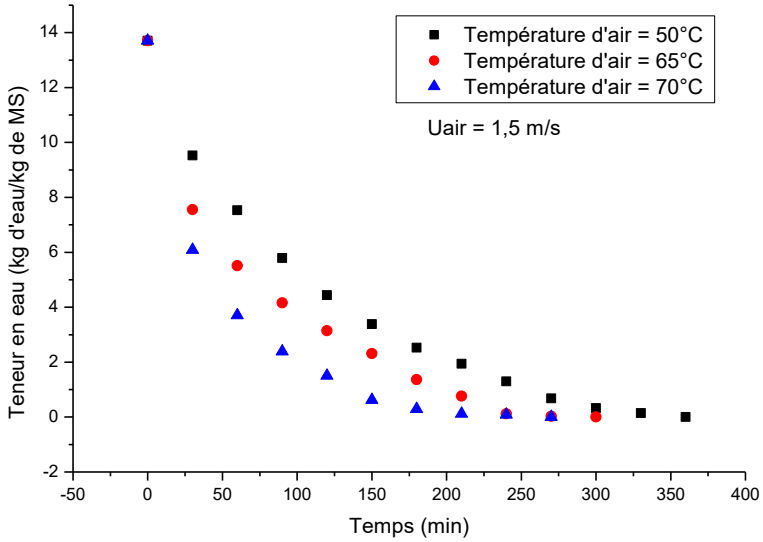


Figure 5.12. Teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour différentes valeurs de température de l'air asséchant pour une vitesse de l'air fixe de 1.5 m.s $^{-1}$.

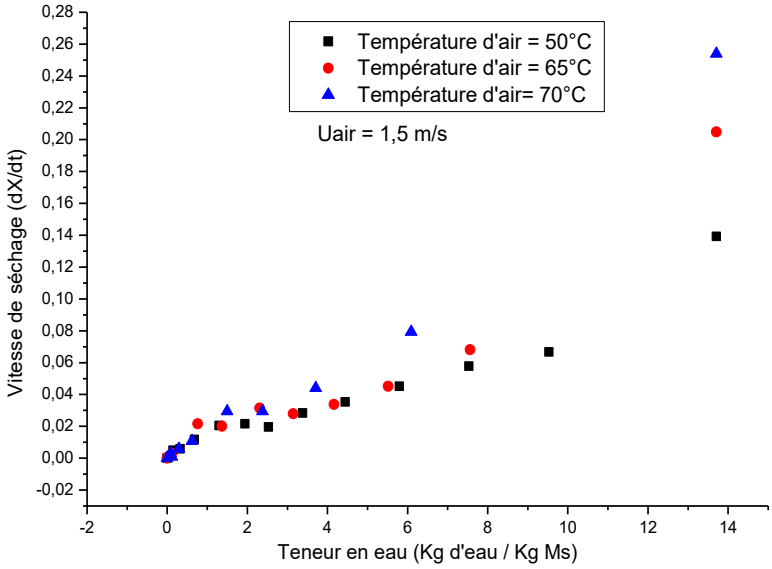


Figure 5.13. Vitesse de séchage des épinards en fonction de la teneur en eau pour différentes valeurs de température de l'air asséchant pour une vitesse d'air fixe de 1.5 m.s^{-1}.

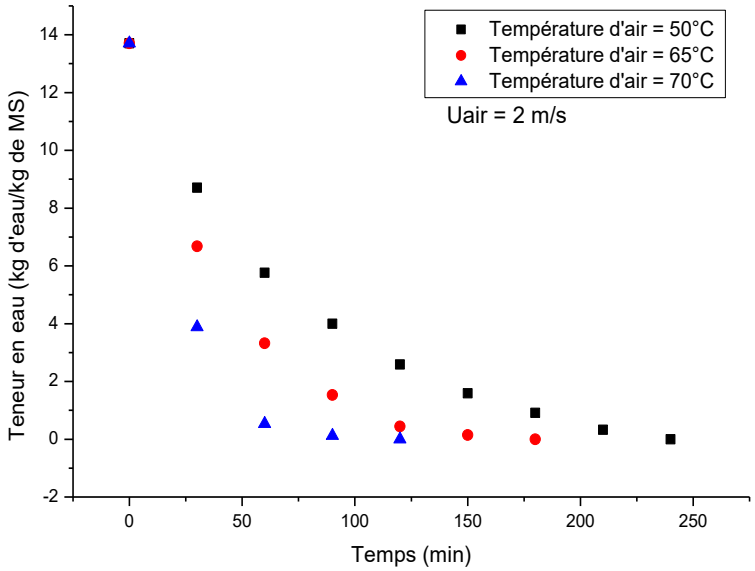


Figure 5.14. Teneur en eau réduite des épinards en fonction du temps pour différentes valeurs de température de l'air asséchant pour une vitesse de l'air fixe de 2 m.s $^{-1}$.

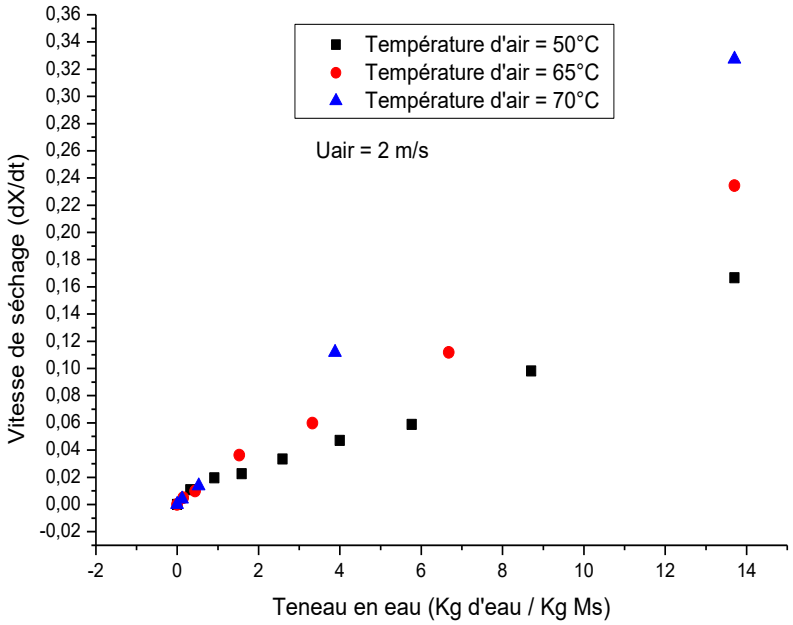


Figure 5.15. Vitesse de séchage des épinards en fonction de la teneur en eau pour différentes valeurs de température de l'air asséchant pour une vitesse d'air fixe de 2 m.s^{-1}.

La figure **5.17** représente l'évolution de la température et l'humidité relative de l'air dans la chambre du séchage du séchoir solaire hybride.

La température de l'air a augmenté jusqu'à atteindre une valeur fixe (la température de consigne dans ce cas 70°C), en raison de l'appoint électrique. Elle stabilise la température dans la chambre pendant la période de séchage et corrige l'écart de la température (de valeur

30 à 40°C) entre la sortie de capteur solaire (**Figure 5.16**) et la température de consigne à l'intérieure de la chambre.

L'humidité relative dans la chambre de séchage est de 30% au début de séchage. Elle diminue jusqu'à une valeur inférieur à 5%, (pente de la courbe très importante au début du processus de séchage). Cette pente diminue au fur et à mesure que le temps de séchage augmente. Ce qui explique l'évaporation et l'évacuation rapide de l'eau des épinards vers l'extérieur de la chambre.

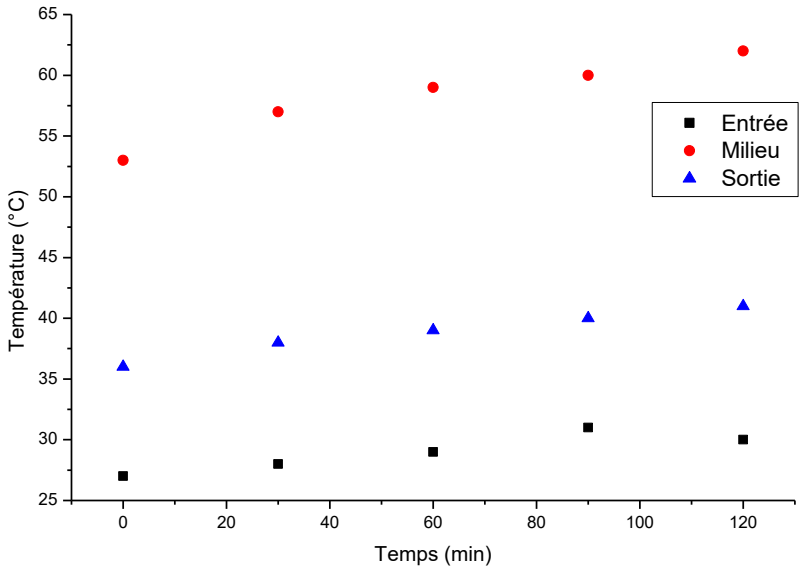


Figure 5.16. Évolution de température de l'air dans le capteur du séchoir solaire hybride.

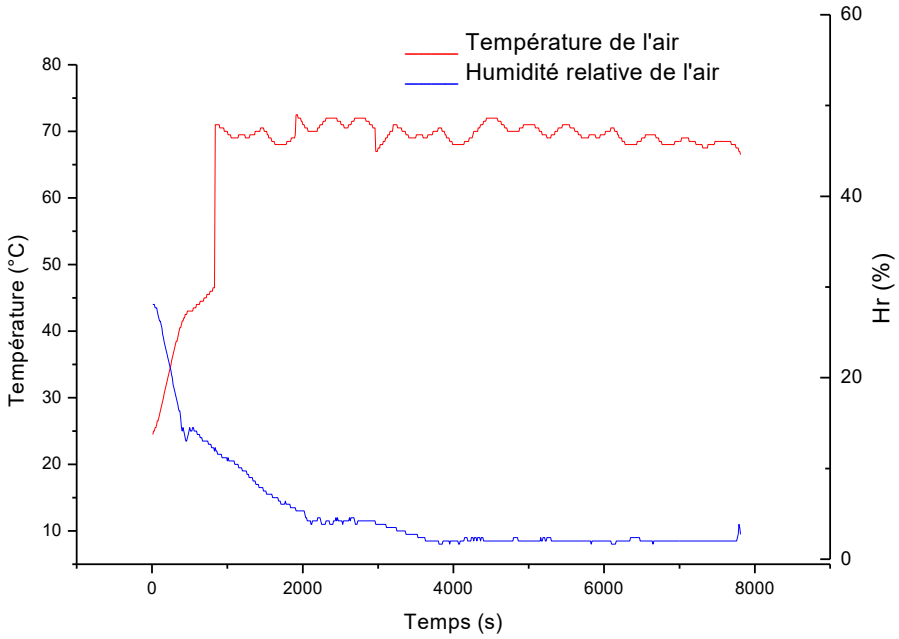


Figure 5.17. Évolution de la température et de l'humidité relative de l'air dans la chambre du séchoir solaire hybride.

5.3.2.1. Évolution de la température au cœur du produit

La figure **5.18** présente la température au cœur des épinards durant le séchage. Elle monte avec une vitesse importante au début de l'expérience, due à un gradient important de température entre le milieu asséchant et le produit, suivi par une diminution à la fin de processus de séchage.

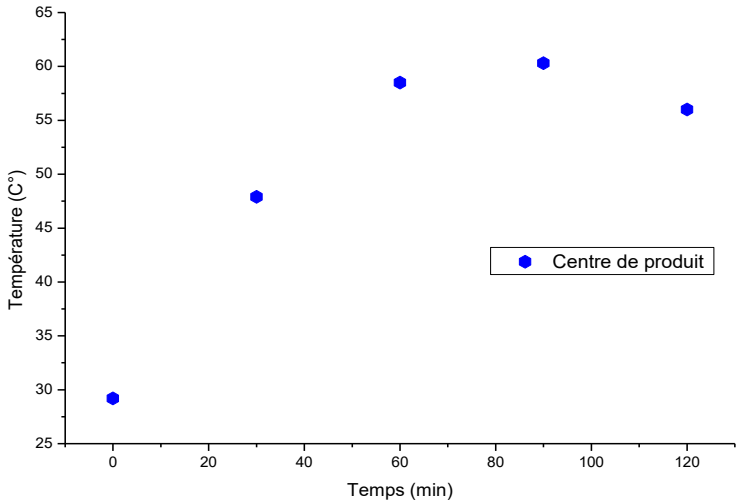


Figure 5.18. Évolution de la température à l'intérieure des feuilles de l'épinard séché dans le séchoir solaire hybride.

5.3.3. Effet du recyclage de l'air sur la cinétique de séchage

Les figures **5.19 et 5.21** montrent la variation de la teneur en eau réduit au cours du temps de séchage pour différentes fractions de l'air recyclé (0, 50 et 90%) dans les deux modes de séchage, a convection naturel et hybride. Il est évidemment observé que la teneur en humidité est réduite plus rapidement. Elles admettent la même allure que les expériences précédentes, mais avec un gain du temps de 2 à 3 heures.

D'après les figures **5.20 et 5.22** la vitesse de séchage augmente avec l'augmentation de la fraction d'air recyclé. Ce résultant est conforme aux travaux expérimentaux des auteurs : pour le séchage de l'oignon, pour séchage solaire des feuilles de menthe verte. Le recyclage de l'air dans le séchoir solaire hybride diminue la consommation de l'énergie électrique, l'économie maximale en énergie totale vas atteindre 70,7%, obtenues avec le recyclage de l'air d'échappement

L'évolution de la température dans le séchoir solaire avec le système de recyclage est illustrée dans les figures **5.23 et 5.24**, elle est presque stable et uniforme dans l'entrée et la sortie du capteur solaire, et de l'ordre de 50 à 65°C.

Dans le capteur solaire, l'air est chauffé sous l'effet des rayonnements solaires, puis se déplace à la chambre de séchage, dans ce dernier l'air perd une partie de la température par l'évaporation de l'eau du produit ; Elle est recyclé dans le capteur solaire, ceci explique la stabilisation de la température de l'air dans le capteur et la chambre de séchage. La figure **5.24** montre l'évolution de l'humidité relative dans la chambre de séchage. Elle augmente avec l'augmentation de la fraction de l'air recyclé

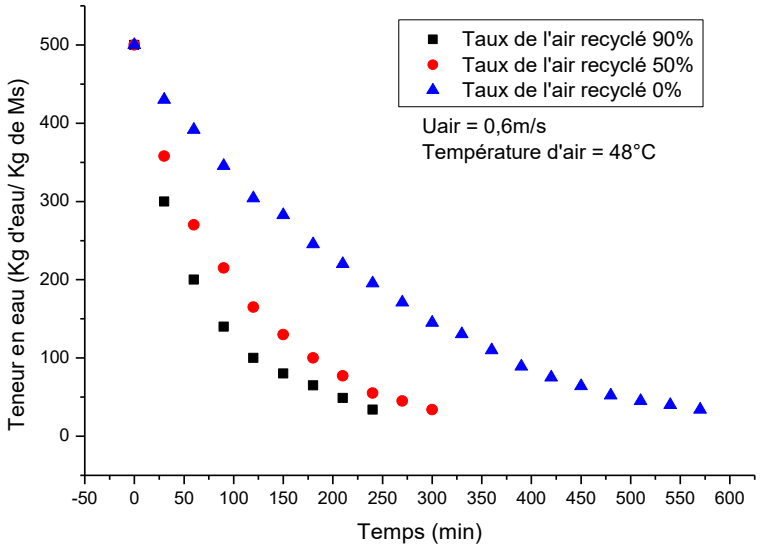


Figure 5.19. Teneur en eau des épinards séchés en fonction de temps pour différentes fractions de l'air recyclé (0%, 50%, 90%).

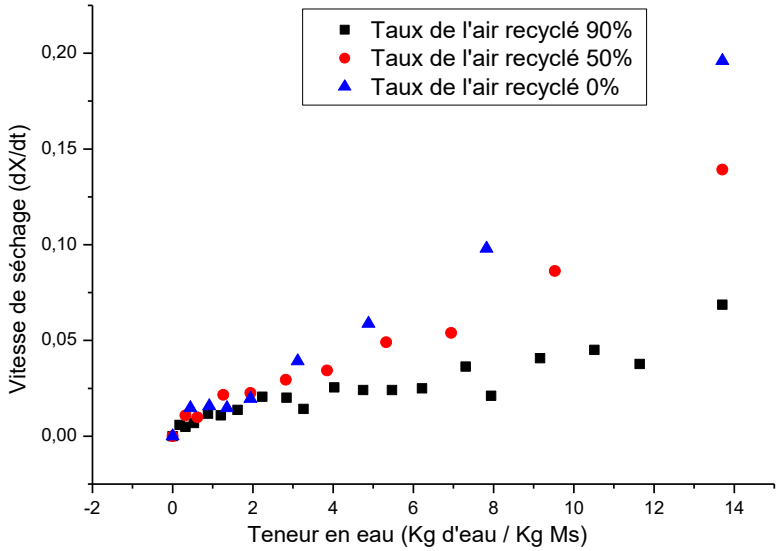


Figure 5.20. Vitesse de séchage solaire des épinards à convection naturel en fonction de la teneur en eau pour différentes fractions de l'air recyclé (0, 50 et 90%).

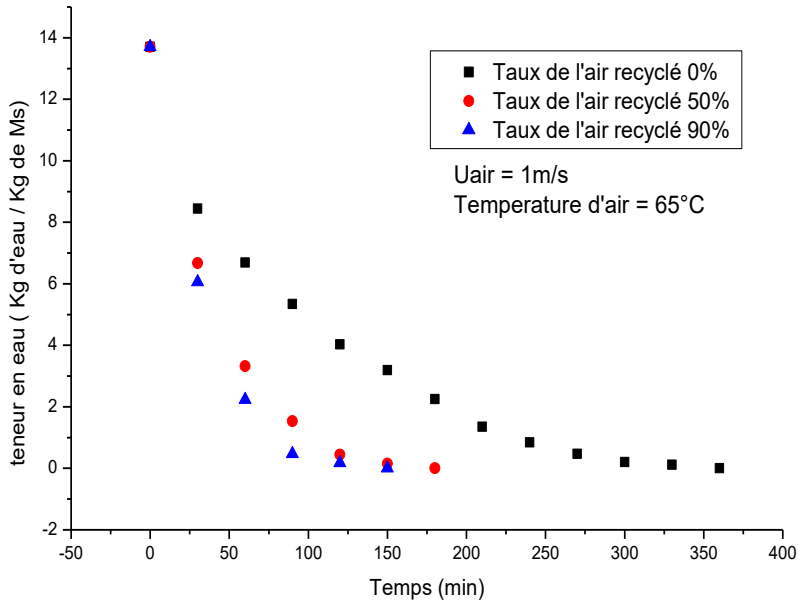


Figure 5.21. Teneur en eau des épinards séchés en fonction de temps pour différentes fractions de l'air recyclé (0, 50 et 90%) pour une vitesse de l'air fixe 1 m/s.

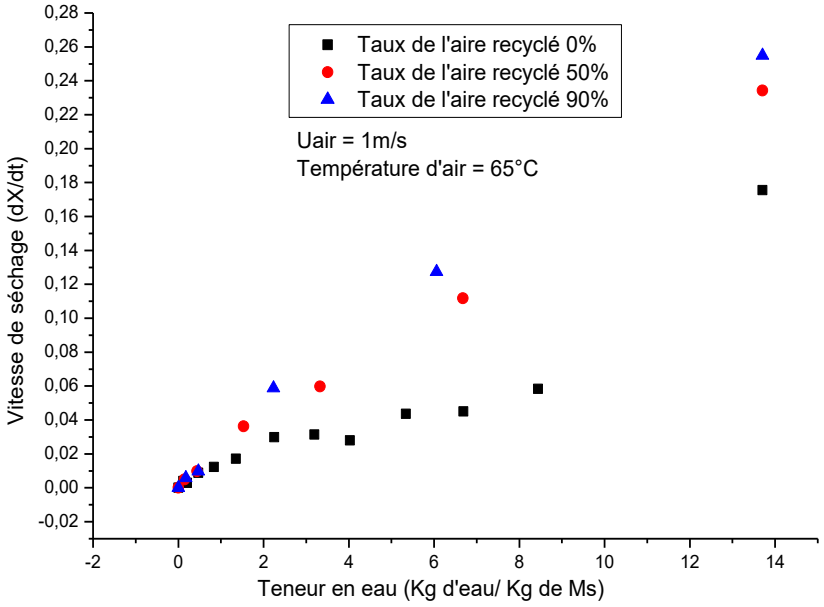


Figure 5.22. Vitesse de séchage des épinards en fonction de la teneur en eau pour différentes fractions de l'air recyclé (0, 50 et 90%) pour une vitesse de l'air fixe 1 m/s.

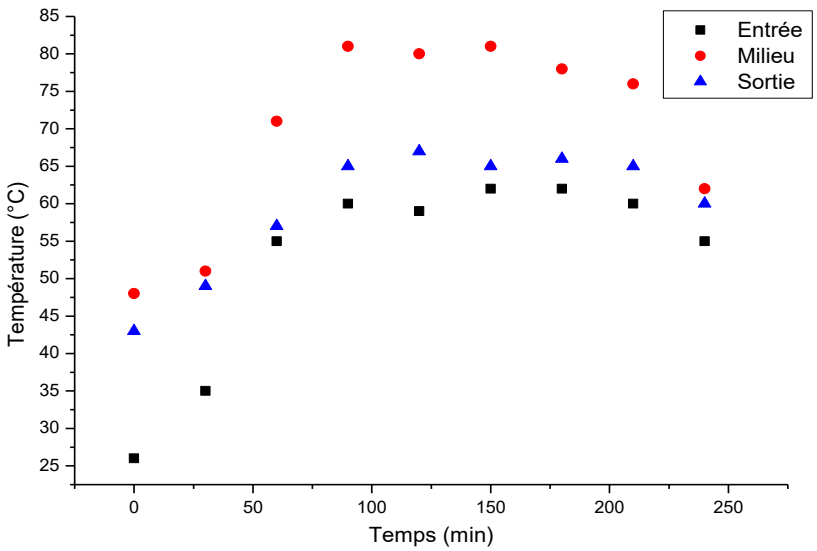


Figure 5.23. Évolution de la température de l'air au niveau du capteur d'un séchoir solaire à convection naturel en fonction de temps avec système de recyclage de l'air.

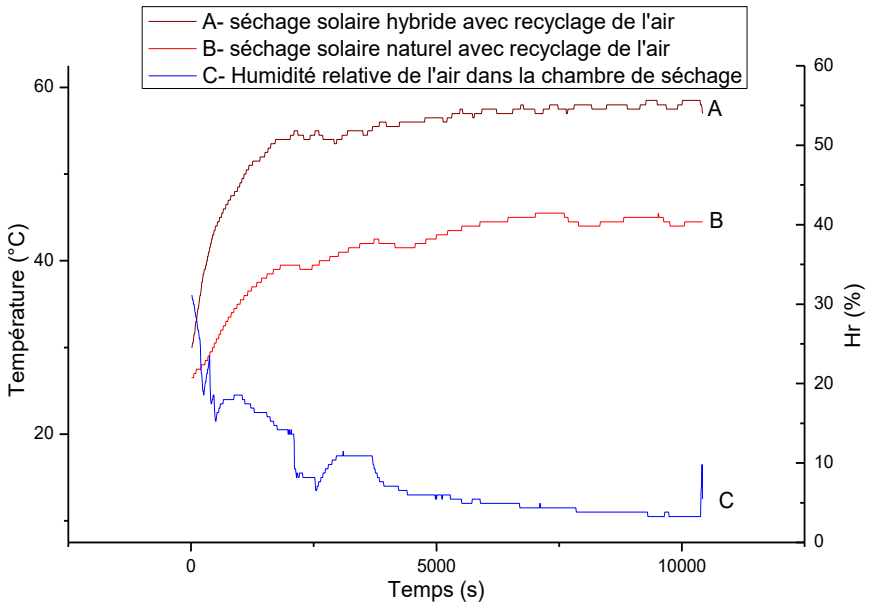


Figure 5.24. Évolution de la température et de l'humidité relative dans la chambre de séchage en fonction de temps avec système de recyclage de l'air.

5.3.4. Pesée continue

Dans ce cas, le pesage instantané des produits à sécher diminue les pertes de chaleur lors de l'ouverture de la porte de la chambre du séchoir et laisse le processus en continu.

5.3.5. Effet du prétraitement sur la cinétique de séchage solaire

L'effet du prétraitement sur la teneur en eau et la cinétique de séchage des épinards est montré sur les figures **5.25 et 5.26**. Dans les conditions de température et de vitesse de l'air asséchant respectivement 65 °C et 1m/s. Le processus de séchage est réalisé dans 250 min pour les épinards non traité et seulement 120 min pour l'épinard traité. Le prétraitement peut diminuer le temps de séchage d'environ 48,23%. Elle augmente la perméabilité des membranes des cellules, pour cela favorise une migration plus rapide de l'eau à la surface du produit, réduit le temps de séchage et maintient la couleur initiale et les arômes du produit pendant le séchage. Ceci est conforme aux résultats expérimentaux de certains auteurs (**Lewicki et al., 2002 ; Doymaz, 2004b ; Boughali, 2010**).

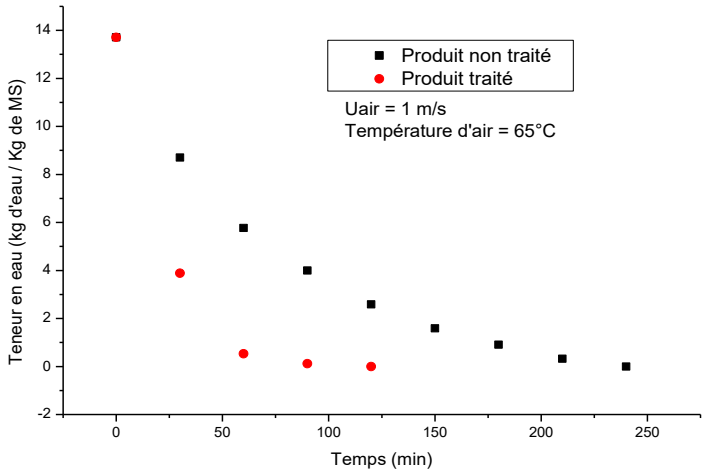


Figure 5.25. Teneur en eau réduite des épinards traités et non traités en fonction du temps de séchage.

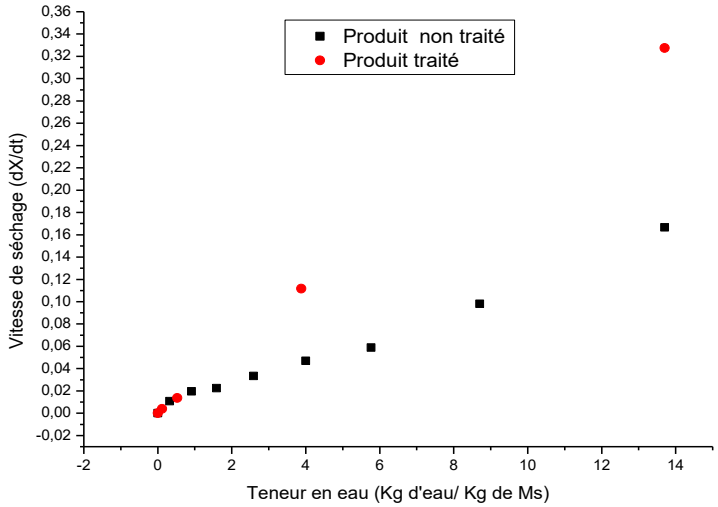


Figure 5.26. Vitesse de séchage des épinards traités et non traités en fonction de la teneur en eau réduite.

5.4. Évolution de la qualité du produit séché

5.4.1. Caractéristiques physico-chimiques des épinards

Il est bien connu que la composition des matières premières influe significativement sur la qualité du produit fini. La figure **5.27** représente les photos des épinards avant et après le séchage. Les résultats de la caractérisation de certains paramètres physico-chimiques des épinards utilisés sont présentés dans le tableau **5.1** en g pour 100g de matière, ce qui nous permet de faire la comparaison des résultats des matières fraiches avec les matières sèches.

La recherche du taux élevé de matière sèche est important car elle est corrélée positivement à la teneur des constituants des aliments, et en particulier aux minéraux et aux vitamines.

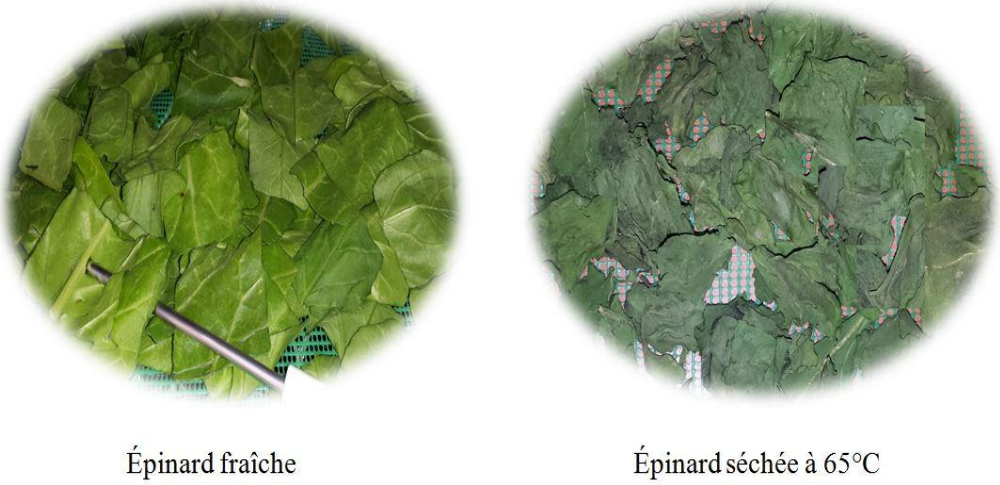


Figure 5.27. Épinards avant et après le séchage.

Tableau 5.1. Caractéristiques physicochimiques des épinards fraiches et sèches.

Paramètres Physico-chimiques	**Matières**	
	Frais (g/100g m_f)	**Sèche** (g/100g m_s)
pH (22°C)	7,6±0,03	6,46±0,02
Acidité titrable (g d'acide citrique / 100g de produit)	1,94±0,41	1,2±0,01
Taux d'Humidité (%)	93,2±0,02	0,2±0,00
Teneur en cendres	2,62±0,01	31.43±0,02
Teneur en protéines	2,27±0,34	19,87±1,76

5.4.1.1. Rendement de la partie comestible

Les résultats de calcul du rendement de l'épinard sont mentionnés dans le tableau **5.2**.

Tableau 5.2. Partie comestible des épinards.

Échantillon	MT (g)	PC (g)	Rendement (%)
Moyenne	972 ± 0.18	375 ± 0.12	38.58

PC : Partie comestible ; **MT** : Masse total tel qu'acheté.

Selon le tableau (**5.2**), les bottes de l'épinard ont un rendement de 38.58 % ± 0,02. Donc la quantité de déchet est plus importante quand seules les feuilles sont considérées comme partie comestible et presque les deux tiers de l'épinard sont jetés.

En fait, quel que soit l'aliment, la quantité de matière comestible est très variable. Elle dépend non seulement de l'aliment lui-même (fraicheur) mais aussi du type d'aliment, degré de maturité et de consommation, et notamment des habitudes alimentaires.

5.4.1.2. Humidité

Les feuilles crues d'épinard sont globalement caractérisées par une forte teneur en eau 93.2±0.02%. Ce qui influence leurs taux de matière sèche (6.8g/100g de m_s).

5.4.1.3. pH

Les résultats obtenus montrent que le pH de l'épinard étudié, se varié entre les valeurs 7.6±0.03 et 6.46±0.02 dans le cas de matière fraiche et de matière sèche respectivement. Caractérisant ainsi l'épinard de bonne qualité. Ce pH est défavorable à la prolifération des bactéries, des levures et des moisissures.

5.4.1.4. Acidité titrable

L'acidité titrable renseigne sur l'état physique des feuilles ainsi que le pH. Notons qu'une forte acidité est souvent associée à une bonne qualité de l'épinard.

En effet, il a été rapporté, que le taux d'acidité de l'épinard est proportionnel à la teneur en eau et donc inversement proportionnel au degré de maturité et la température de séchage.

Dans la présente étude, l'épinard ayant fait l'objet d'analyses présente une acidité titrable qui varie entre 1.94±0.41(g/100g m_f) et 1.2±0.01(g/100g m_s) respectivement à l'état frais et après séchage.

5.4.1.5. Teneur en cendres

Par définition, la teneur en cendres représente la quantité totale en sels minéraux présents dans un échantillon. Nos résultats affirment que, La teneur moyenne en cendres est de 2.62±0.001 (g/100g m_f). D'autre part, la teneur moyenne en cendres est de 31,43 ± 0,002 (g/100g m_s). Ces valeurs de la teneur en cendres est inversement proportionnel à la teneur en eau.

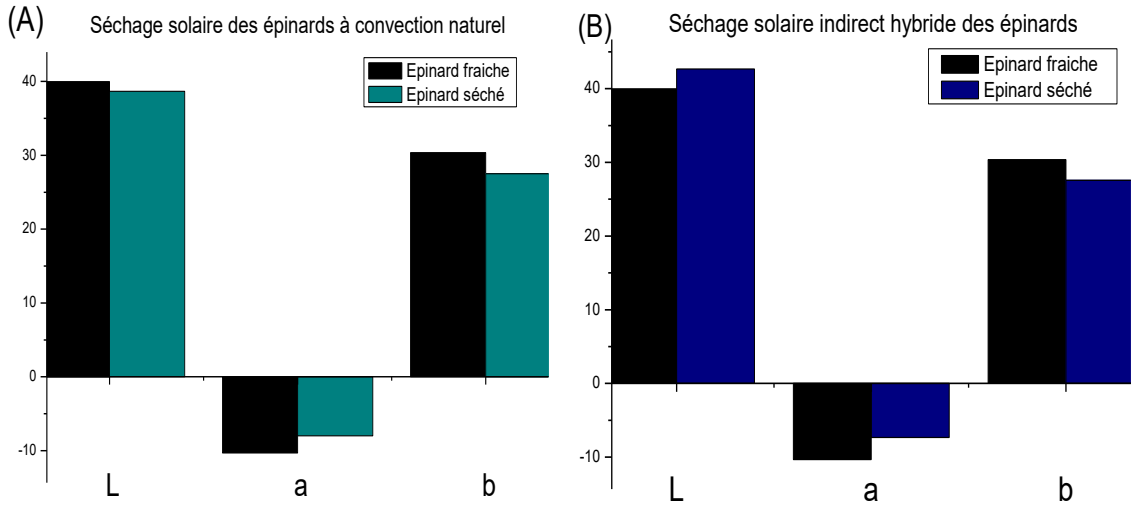
5.4.1.6. Teneur en protéines

Les protéines sont de l'ordre de 2,27±0,34 (g/100g m_f). D'autre part, la teneur moyenne des protéines est de 19,871, ± 1,76 (g/100g ms).

5.4.1.7. Couleur de l'épinard

Afin d'évaluer l'effet du séchage sur l'évolution de la couleur de l'épinard nous avons choisi d'utiliser la distance de couleur ΔE comme paramètre de distinction entre les différents états. À cet effet nous avons utilisé les mesures faites sur l'échantillon initial avant séchage comme référence permettant de calculer la grandeur ΔE à partir de la relation précédente. Les mesures de référence étant les suivantes : **L_0= +39,96 ; a_0= -10,32 ; b_0= +30,36.**

La figure **5.28** présente les résultats des mesures de couleur L, a, b effectuées sur les épinards séchés à 0.34 (kg eau/kg de matière sèche) correspondants aux différents essais de séchage menés dans notre étude, à savoir les améliorations effectuées sur le séchoir solaire.



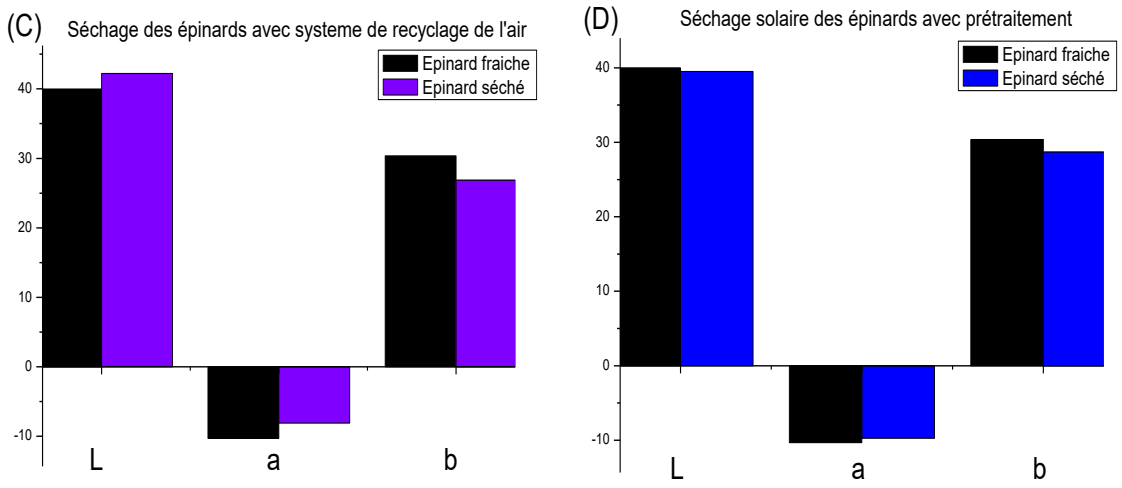


Figure 5.28. Changement de couleur des épinards pour différentes méthodes de séchage (A, B, C, D) par rapport à la couleur de l'état frais.

Afin d'évaluer l'effet du séchage sur le changement de couleur des épinards nous avons choisi d'utiliser la distance de couleur ΔE comme paramètre de comparaison entre les différents états. À cette partie ont utilisé les mesures faites sur l'échantillon initial avant séchage comme référence permettant de calculer la grandeur ΔE à partir de la relation donnée.

Les valeurs ainsi calculées de ΔE sont présentés par la figure **5.29.** Il dépend des plusieurs paramètres physiques (tel que la température) et la durée de l'opération. En effet la différence de couleur la plus grande ΔE = 4.91 dans le cas de séchage solaire hybride a la température très élevée. Par ailleurs la plus petite valeur de différence **ΔE=1.83** a été trouvée dans l'échantillon ayant subi un prétraitement avant le séchage, on trouve que la différence de couleur dans les cas de séchage solaire à convection naturel et le cas de séchage solaire avec recyclage d'air sont respectivement ΔE= 3.91 et ΔE= 4.71. Avec une durée de séchage moyenne de 8.5h. On conclue que le séchage solaire hybride a un effet négatif sur la qualité organoleptique dans le cas de mauvais équilibre de température/ durée de séchage.

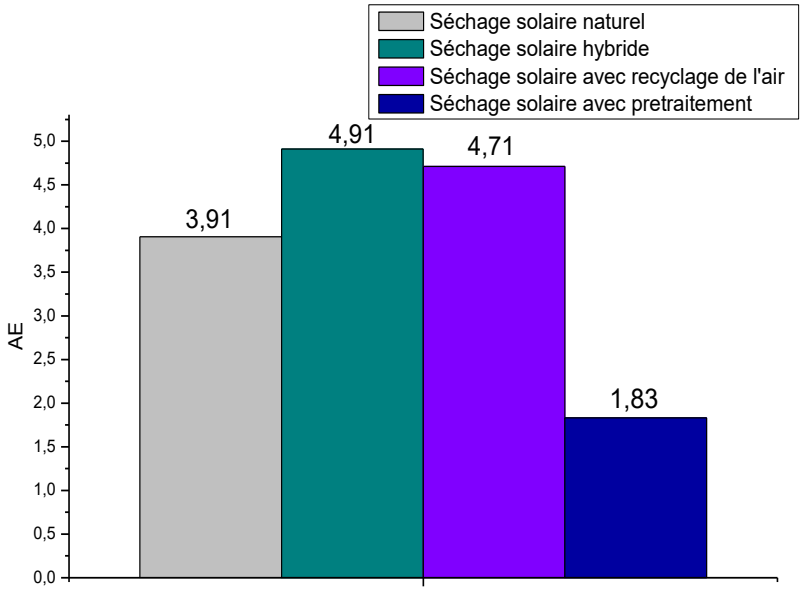


Figure 5.29. Variation de l'indice de la qualité des épinards pour différentes méthodes du séchage.

5.5. Modélisation mathématique des cinétiques de séchage

5.5.1. Teneur en eau réduite

Les résultats expérimentaux de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage ont été adoptés aux modèles empiriques les plus importants, utilisés dans la littérature. Les modèles mathématiques choisis sont indiqués dans le tableau **2.2**.

Les techniques non linéaires de régression permettent d'obtenir les constantes pour chaque modèle, en utilisant le logiciel Origine 8.0. Le meilleur modèle est choisi selon les critères suivants :

- Coefficient de corrélation $\mathbf{R^2}$ élevé.
- ki-carrée $\mathbf{X^2}$ réduit.

Les coefficients de chaque modèle de séchage sont déterminés (**Tableau 5.3)** pour T = 65°C et V = 1,5m/s. Le modèle **Midilli *et al.*,** a montré une bonne corrélation avec les courbes expérimentales avec un R^2 = 0, 99937 et de X^2= 0, 00003.

Tableau 5.3. Modélisation de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage des épinards pour T= 65°C, et V= 1.5 m/s.

Modèle	Expression du modèle	Coefficient	R^2	X^2
Newton	$X^* = \exp(-kt)$	k = 0,00336	0, 99337	0, 00008
Page	$X^* = \exp(-kt^n)$	k = 0,00274 n = 1,03422	0, 98737	0, 00014
Modified Page	$X^* = \exp(-(kt)^n)$	K = 0,00333 n = 1,0362	0, 99411	0, 00005
Henderson et Pabis	$X^* = a\exp(-kt)$	a = 1,0059 k = 0,0039	0, 97231	0, 00006
Logarithmique	$X^* = a\exp(-kt) + c$	a = 1,01188 k = 0,00324 c = -0,01242	0, 94376	0, 00011
Tow-term	$X^* = a\exp(-k_0t) + b\exp(-k_1t)$	a = 0,29673 k_0= 0,00338 b = 0,70915 k_1= 0,00338	0, 91943	0, 00007
Tow-term exponential	$X^* = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	a =0,00336 k = 0,99878	0, 98887	0, 00010
Wang et Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$	a = 0,99507 b = 0,00285	0, 99543	0, 00009
Approximation de la diffusion	$X^* = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$	a= 1,02445 k = 0,95878 b = 0,99507	0, 93522	0, 00012
Verma *et al.*	$X^* = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	a=0,29673 k= 0,92278 g=0,70915	0, 96543	0, 00006
Midilli *et al.*	$X^* = a\exp(-kt^n) + bt$	a=0,29323 k= 0,99568 n=1,04345 b=0,99507	0, 99937	0, 00003

En effet la figure **5.30** montre une bonne concordance entre les teneurs en eau réduites expérimentales et les teneurs en eau réduites calculées par le modèle de Midilli *et al.*

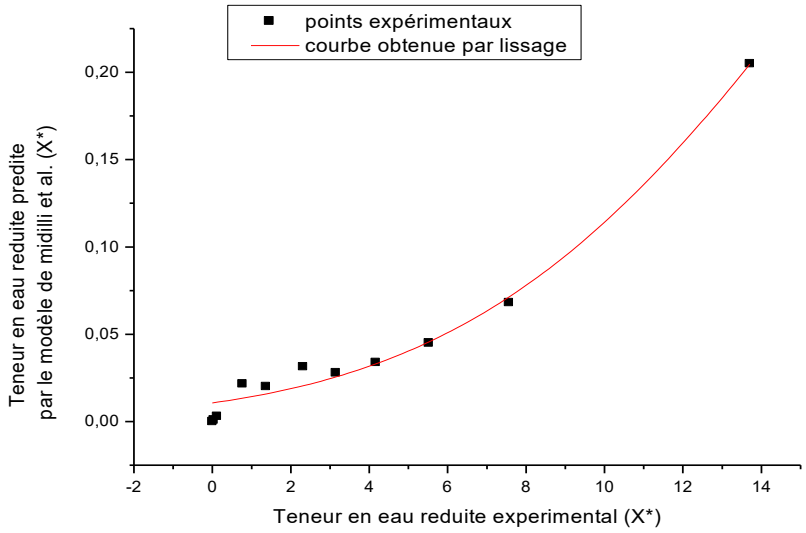


Figure 5.30. Teneur en eau réduite prédite par le modèle de **Midilli *et al.*,** en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale des épinards.

5.5.2. Courbe caractéristique du séchage

Pour pouvoir décrire la cinétique de séchage dans n'importe quelle condition de l'air nous avons utilisé le principe de la courbe caractéristique de séchage. La détermination de la courbe caractéristique correspond à l'expression de la variation d'une vitesse de séchage réduite en fonction d'une teneur en eau réduite X^*. Nous cherchons donc une expression du type :

$$f(X^*) = \frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_I} \qquad (5.1)$$

Avec :

[-dX/dt]t : Vitesse de séchage à un instant t (kg /kg.ms.minute).

[-dX/dt]*I* : Vitesse de séchage (kg /kg.ms.minute) pendant la première phase (la phase à vitesse constante), prise égale à la valeur de vitesse de séchage au point X^* =1.

À partir de nos expériences, nous avons établi la corrélation expérimentale de la vitesse de séchage normée des épinards. L'équation de la courbe caractéristique de séchage des épinards sous forme d'un polynôme d'ordre 3 en fonction X^*:

$$f(X^*) = 0,01542 + 2,3798X^* - 2,9768X^{*2} + 3,2543X^{*3} \quad (5.2)$$

les figures **5.31**, **5.32** et **5.33,** représentent les valeurs expérimentales de teneur en eau réduite des épinards séchage ainsi que la courbe caractéristique obtenue par lissage.

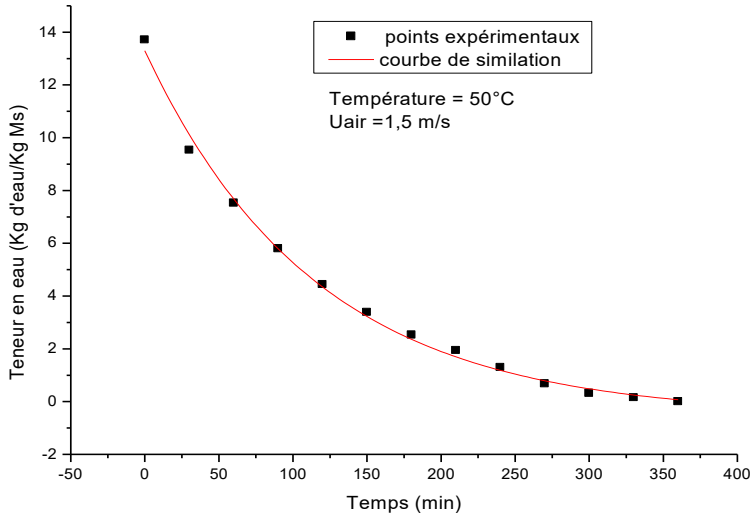


Figure 5.31. Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale des épinards pour Ta = 50°C, et Va = 1,5 m/s.

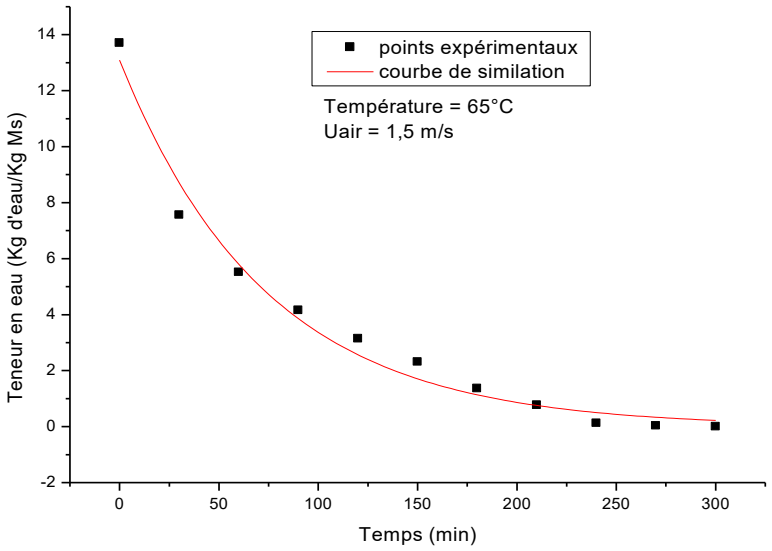


Figure 5.32. Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale des épinards pour Ta = 65°C, et Va = 1,5 m/s.

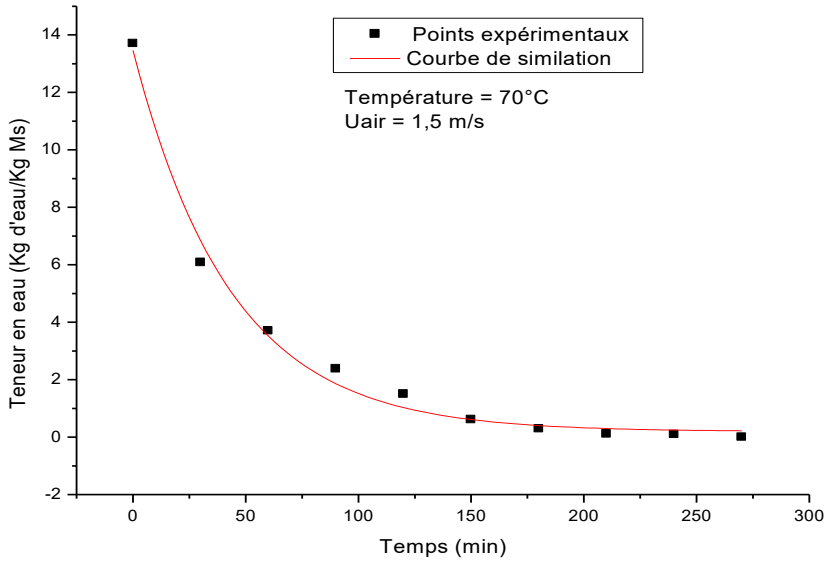


Figure 5.33. Comparaison entre la teneur en eau simulée et la teneur en eau expérimentale des épinards pour Ta = 70°C, et Va = 1,5 m/s.

5.5.3. Validation du modèle

Les courbes obtenues par le modèle de simulation **Midilli *et al.*,** pour les épinards séché présentent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Cependant il existe parfois un écart important entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux.

Conclusion

Et

Perspectives

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail avait comme objectif principal la réalisation d'un séchoir solaire indirect hybride de performance énergétique et thermique optimale. À partir de cet objectif global se découle les objectifs suivants :

- ❖ Mise en marche d'un séchoir solaire indirect à convection naturel et évaluation de son performance ;
- ❖ Améliorations sur le séchoir solaire pour une performance qui répond mieux aux hypothèses de séchage ;
- ❖ Étude de différents échanges énergétiques et thermiques entre les différents éléments du séchoir et le milieu extérieure ;
- ❖ Simulation et validation d'un modèle numérique décrivant le comportement énergétique et thermique du séchoir, pour la prédiction de la cinétique du séchage solaire des produits alimentaires.

Le séchage solaire est un moyen rentable pour la valorisation des produits agroalimentaires, il permet de sauvegarder les éléments nutritionnels du produit. Les séchoirs solaires indirects hybrides sont bien adaptés à ce type de séchage notamment dans les régions arides et semi-arides qui disposent d'un gisement solaire important.

Durant l'opération de séchage nous avons respecté la teneur en humidité finale de produit séché 0,2 % pour les épinards. Cette dernière est la valeur optimale pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses qualités nutritionnelles. Dans cette étude, les expériences de séchage solaire convectif en couches minces de produit à sécher sont effectuées pour plusieurs valeurs de températures et plusieurs valeurs de vitesse de l'air asséchant.

Les courbes expérimentales obtenues pour les épinards ont montré la présence unique de la phase de ralentissement et l'absence de la phase de mise en température du produit ainsi que la phase à allure constante. Le principal facteur qui influe sur les cinétiques de séchage est la température de l'air asséchant.

À l'issue de cette étude des améliorations faites sur le séchoir solaire nous constatons que :

Le séchage se fait d'une façon presque uniforme et homogène au niveau de toutes les claies dans le mode de séchage à convection forcé. Sachant que, l'effet de la vitesse de l'air est moindre en comparaison avec l'effet de la température de l'air.

Ceci est constaté que la température est le facteur le plus influant sur la cinétique de séchage, elle réduit le temps de séchage de 24%, en l'augmentant de 50 à 70°C.

Le recyclage de l'air dans le séchoir solaire hybride, réduit le temps de séchage et la consommation énergétique de 70,7%. En ce qui concerne la qualité des produits à sécher, le prétraitement préserve le produit pendant le séchage et réduit les pertes de la qualité organoleptique.

La validation du modèle développé est ensuite effectuée grâce à la réalisation d'une étude expérimentale. Les données issues des expérimentations sont essentielles pour passer des courbes de vitesse de séchage, aux courbes caractéristiques de séchage. Afin de déterminer la teneur en eau et la vitesse de séchage en fonction du temps du produit ainsi que la courbe caractéristique de séchage pour les températures (50, 65 et 70 °C) et pour les vitesses de l'air asséchant (1, 1.5 et 2 m/s).

L'analyse des résultats expérimentaux en coordonnées réduites $X^*(t)$, pour les épinards est lissée par onze modèles. Elle montre que le modèle de Midilli *et al.,* est le plus approprié pour la description des cinétiques de séchage solaire convectif en couches minces des épinards.

Les résultats expérimentaux de l'étude du séchage ont ensuite été confrontés aux résultats théoriques pour valider les résultats prédits par la simulation numérique. On observe une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats simulés.

Finalement, à travers les résultats obtenus nous recommandons

- Un système de régulation d'humidité à l'intérieur du séchoir soit par condensation ou l'absorption et l'évacuation à l'extérieur.
- Évolution de système du recyclage de l'air.
- Modélisation du couplage de la chambre de séchage avec l'insolateur.
- Application de cette étude pour d'autres produits agro-alimentaires.
- Réarrangement de la source électrique auxiliaire.
- Étude d'un modèle économique pour estimer le coût du séchage solaire.

Références Bibliographiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Siabdallah N., 2017.** Amélioration des performances d'un séchoir solaire des produits agroalimentaires. Mémoire de Magister, Université Batna 1, Algérie.

Annexe

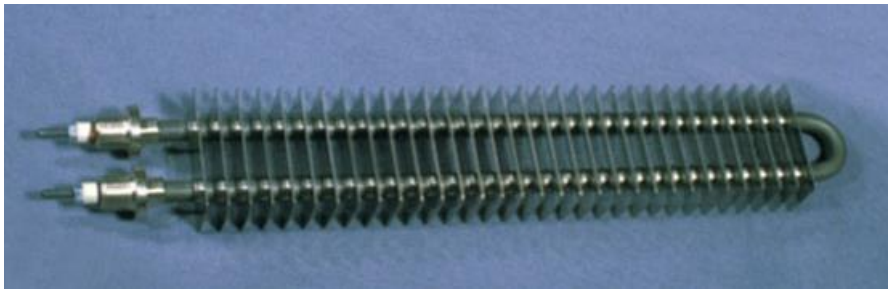
ANNEXE I

Thermostat numérique

Enregistreur solarimètre

Ventilateur centrifugeuse

Ventilateur extracteur



Résistance à ailette

ANNEXE II

Séchoir solaire indirect à convection naturelle

Séchoir solaire indirect à convection forcé

Séchoir solaire indirect avec l'appoint électrique

Séchoir solaire indirect avec système de recyclage de l'air

Épinards séché

Épinards broyé

Épinards séché et conserver sous vide