



Université SAAD DAHLEB, BLIDA-1
Faculté de Technologie
Département des Énergies Renouvelables

Par ELFRAIHI Radjaa

Mémoire pour obtenir le diplôme de master en conversion thermique

Thème :

ETUDE PARAMETRIQUES DE SECHAGE SOLAIRE DES VEGETAUX LOCAUX

Soutenu devant le jury composé de :

Monsieur MERZOUK.M	Professeur a USDB	Président
Madame KHELALFA.E.N	Maitre de conférence	Encadreur
Monsieur KACI.K	MAA	Examineur

Septembre 2020

Remercîment

Après avoir rendu grâce à Dieu le tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadreur Docteur. N.E KHELALFA d'avoir accepté de diriger cette thèse en y apportant tous les moyens nécessaires et les aides qui m'ont permis de mener à terme ce travail malgré qu'il n'a pas été possible de compléter par les expériences pour raison de la pandémie du Covid 19. Je lui suis aussi reconnaissantes de ses conseils, sa grande patience et pour l'attention portée à mon travail .

Sans oublier de remercier mes enseignants du département des énergies renouvelables pour leurs efforts et abnégations déployés lors de ma formation.

Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, Le respect, la reconnaissance...
Aussi, c'est tout simplement que*

Je dédie cette thèse

A MA TRES CHERE MERE

Tu représentes pour moi le symbole de la source inépuisable, de tendresse, de patience, de sacrifice et d'amour. Toutes mes années d'études depuis la maternelle jusqu'à ce jour ne pouvaient être pour moi un succès sans tes bénédictions. Ta fille aura toujours besoin de ces bénédictions. Tu n'as pas cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime.

A MON TRES CHER PERE

Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes sont-elles ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Tu as su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Tes conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Ta patience sans fin, ta compréhension et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter.

A tous ceux et celles qui me sont chers et que j'ai omis involontairement de citer.

A MA CHERE SOEUR

Qui m'aider dans la réalisation de mon travail et qui m'as fait appris beaucoup de choses sur le domaine de développement web, qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Le professeur LYES BENNAMOUN

je tiens à lui exprimer mes remerciements pour son aide scientifique incessante. Je lui exprime ma profonde gratitude.

Table des matières

Remercîment.....	a
Dédicace.....	b
Table des matières	c
Résumé.....	h
Table des figures.....	i
Liste des tableaux.....	j
Nomenclature.....	k
Introduction générale.....	1
 CHAPITRE I : état de l’art	
I.1 introduction :	4
I.2 Etat de l’art.....	4
I.3 Conclusion:.....	11
 CHAPITRE II: étude bibliographique sur le séchage solaire	
II.1 Le séchage :	12
II.1.1 Définition du séchage	12
II.1.2 Le séchage et l’énergie.....	13
II.1.3 Les domaines d’utilisations.....	13
II.1.4 Terminologie sur le séchage :	13
a) Teneur en eau.....	14
a.1 Teneur en eau à base sèche ou humidité absolue d’un solide.....	14
a.2 Teneur en eau à base humide ou humidité relative d’un solide.....	14
b) Taux d'humidité a l'équilibre.....	14
c) Hygroscopicité.....	15
II.2 Comportement d'un solide mouillé en présence d'un gaz	15
II.3 Grandeurs caractéristiques des gaz humide.....	16
II.3.1 Humidité absolue d’un gaz	16
II.3.2 Degré de saturation	17
II.3.3 Humidité relative	17

II.3.4	Point de rosée	18
II.3.5	Température de bulbe humide.....	18
II.4	Caractéristique d'un solide poreux	18
II.4.1	Porosité volumique d'un produit	18
II.4.2	Compacité d'un produit	19
II.5	Répartition de l'eau dans le matériau.....	20
II.5.1	Loi de Fick	20
II.5.2	Loi de Darcy	21
II.6	Théories descriptives du phénomène de séchage	21
II.6.1	Théorie de Lewis (1921)	21
II.6.2	Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929)	21
II.6.3	Théorie capillaire (modèle de Hougen) (1937).....	22
II.6.4	Théorie de Krishner (1938).....	22
II.6.5	Modèle de Luikov (1934)	22
II.6.6	Théorie de Philip et De Vries (1957).....	23
II.6.7	Théorie Whitaker (1977).....	24
II.7	Mécanisme de séchage	26
II.8	Différents modes de séchage.....	27
II.8.1	Séchage par conduction	27
II.8.2	Séchage par convection.....	27
II.8.3	Séchage par rayonnement	27
a)	Séchage par micro-onde.....	28
b)	La lyophilisation	28
II.8.4	Séchage solaire.....	28
II.9	Le transfert de matière.....	29
II.10	Transfert d'eau en séchage	29
II.11	Description physique de la cinétique du séchage	29
II.11.1	Phase transitoire (AB).....	31
II.11.2	Phase à vitesse de séchage constante (BC)	31
II.11.3	Phase à vitesse de séchage décroissante (CD)	32
II.12	Les séchoirs solaires	32
II.12.1	Classifications des séchoirs industriels	32
a)	Propriétés physiques de la matière.....	32
b)	Méthode d'approvisionnement en énergie	32
c)	La gamme de la température.....	32

d) La façon de repartitions de la nourriture.....	32
d.1) Séchage en couche mince.....	32
d.2) Séchage en couche épaisse.....	32
II.13 Les différents types des séchoirs solaires	33
II.13.1 Les séchoirs naturels	33
II.13.2 Les séchoirs solaires directs	33
a) Types de séchoirs directs.....	34
a.1 La boîte de séchage ou séchoir coffre	35
a.2 Le séchoir intégral à convection naturelle	36
a.3 Le séchoir cabane	36
II.13.3 Les séchoirs solaires indirects.....	36
a) Types de capteur.....	36
a.1 Les capteurs plans.....	37
a.2 Les capteurs concentrateurs	38
b) Type du séchoir indirect	38
b.1 Le séchoir armoire	38
b.2 Le séchoir solaire coquillage	39
II.13.4 Les séchoirs hybrides	40
a) Type des séchoirs hybrides.....	40
a.1 Séchoir hybride à convection forcée	40
a.2 Le séchoir hybride solaire - gaz	41
a.3 Description technique	41
II.13.5 Les séchoirs mixtes	42
II.14 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage.....	44
II.14.1 Influence de la température de l'air	44
II.14.2 Influence de la vitesse de l'air	44
II.14.3 Influence de l'humidité de l'air	44
II.15 Qualité des produits séchés.....	45
II.15.1 Modification biochimique.....	45
II.15.2 Pertes d'arôme	45
II.15.3 Pertes de la couleur du produit.....	45
II.15.4 Modifications physiques et mécaniques des produits séchés	45
II.15.5 La qualité nutritive	46
II.15.6 La qualité sensorielle	46

II.15.7	La capacité de réhydratations.....	46
II.16	Modélisation mathématique de la cinétique de séchage solaire.....	47
II.16.1	Courbe caractéristique du séchage.....	47
II.17	Différents modèles mathématiques de la cinétique de séchage.....	48
II.17.2	Paramètres statistiques utilisés.....	50
CHAPITRE III: informatisation des concepts découverts		
III.1	Analyse et conception.....	52
III.1.1	Conception.....	52
III.1.2	Collecte de l'information.....	55
a)	Evolution du coût.....	54
a.1	Coût total annualisé.....	55
a.2	Coût annualisé de fonctionnement.....	55
b)	Etude paramétrique.....	55
b.1	Le séchage dans différents séchoirs.....	57
b.2	L'influence de l'épaisseur des tranches sur la teneur en eau en fonction du temps..	58
b.3	Comparaison entre le séchage dans les différentes régions du pays.....	58
III.1.3	Les histogrammes.....	60
III.2	Réalisation et implémentation de l'interface.....	60
III.2.1	Outils et technologies utilisées:.....	60
III.2.2	Prototype de l'interface « vue global de site ».....	61
a)	Page d'inscription.....	60
b)	Page de connexion.....	61
c)	Dashboard.....	62
d)	Page d'aide.....	63
e)	Table de la base des données.....	64
CHAPITRE IV: discussions et commentaire		
IV.1	La table des paramètres optimaux:.....	66
IV.2	Temps de séchage restant :.....	68
IV.3	Charts (graphiques):.....	69
IV.3.1	Comparaison entre le séchage en convection forcée, naturelle et en mode hybride	69
IV.4	Comparaison entre le séchage dans la région nord d'Algérie, hauts plateaux et celle du sud :	71
IV.4.1	Effet d'épaisseur des tranches :.....	72
IV.4.2	histogramme.....	74

IV.4.3 Carte du calcul des coûts:	75
Conclusion générale	75
Annexes.....	87

Résumé

Ce présent travail consiste d'une étude paramétrique de séchage solaire de végétaux locaux qui était traduite et délivrée à travers un site web (ou un Dashboard) . La réalisation de ce travail est basé sur les études déjà effectuées pour la collecte de données. Le site qu'on a réalisé présente des différentes fonctionnalités comme la visualisation des graphes qui montre l'effet de quelques paramètres sur la cinétique du séchage ainsi qu'il donne accès à une base de données sur paramètres optimaux de séchage solaire comme la température et la vitesse de l'air asséchant....,de plus des cartes de calcul de temps restant et du coût d'investissement .Tout ça représente un système d'aider à la décision pour un utilisateur par rapport son étude .

mots clés : étude paramétriques, séchage solaire, végétaux, Dashboard, site web, système d'aider à la décision, une base de données, paramètres optimaux, la température, la vitesse de l'air asséchant.

Abstract

This work represents a parametric study on solar drying of local fruit and vegetables compiled into a web application that aims to show the most prominent parameters studied., in order to accomplish this study we had to work with available existing data. The website that we have created presents different functionalities such as the visualization of charts that shows the effect of some parameters on the drying kinetics as well as providing an access to a database of optimal solar drying parameters such as drying temperature, air velocity .etc , as well as visualizing drying time and investment cost in hopes of making a decision support system for various users.

key words : parametric study , solar drying, fruit and vegetables, website, optimal parameters , temperature, database, air velocity.

ملخص

هذا العمل عبارة عن دراسة للعوامل المؤثرة على التجفيف الشمسي الخضر والفواكه المحلية. حيث اننا اعتمدنا على دراسات سابقة للتجفيف الشمسي وعليه جمعنا المعلومات اللازمة، وقمنا بتكوين قاعدة بيانات قدمناها للمستعمل على شكل موقع الكتروني. حيث يضم عدد من الرسومات البيانية توضح تأثير هذه العوامل على مدة التجفيف اضافة الى بعض الاعدادات التي تسهل بعض المهام للمستخدم (كحساب تكلفة الاستثمار و الوقت المتبقي لإنهاء عملية التجفيف) ، كل هذا يمثل نظام دعم للقرار المستخدم فيما يتعلق بدراسته.

الكلمات المفتاحية: التجفيف الشمسي، الخضر و الفواكه المحلية، قاعدة بيانات، نظام دعم للقرار، موقع الكتروني.

Table des figures

Figure 1: Isotherme d'équilibre.....	16
Figure 2 : Volume de contrôle microscopique.....	19
Figure 3: Volume de contrôle macroscopique.....	19
Figure 4 : Les différents types d'eau dans le matériau.....	20
Figure 5 : Volume élémentaire représentatif dans un milieu poreux	24
Figure 6 : Courbe de séchage $X= f(t)$	30
Figure 7: Courbe de séchage $dX/dt= f(t)$	30
Figure 8 : Courbe de séchage $dn_s/dt= f(n_s)$	31
Figure 9: schéma du séchage solaire en plein air.....	33
Figure 10 : schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle.....	34
Figure 11: schéma d'un séchoir solaire direct à convection forcée.....	35
Figure 12 : Le séchoir solaire coffre « schéma ».....	35
Figure 13: Le séchoir solaire coffre	36
Figure 14: séchoir solaire indirect.....	37
Figure 15: Schéma d'un capteur plan à air.....	38
Figure 16: Schéma simple d'un capteur solaire concentrateur.....	38
Figure 17: séchoir solaire indirecte type cabane.....	39
Figure 18: Le séchoir solaire coquillage « schéma ».....	39
Figure 19 : Le séchoir solaire coquillage.....	40
Figure 20 : séchoir solaire hybride à convection forcée.....	41
Figure 21: Séchoir solaire hybride solaire-gaz.....	42
Figure 22: Séchoir solaire à circulation naturelle-type 1.....	43
Figure 23: Séchoir solaire à circulation naturelle-type 2-	44
Figure 24 : vue globale sur la page d'inscription.....	62
Figure 25 : vue globale sur la page de connexion.....	62
Figure 26 : :vu globale sur le Dashboard 1.....	63
Figure 27 :vu globale sur le Dashboard 2.....	63
Figure 28:vu global sur la page d'aide « explication du fonctionnalités du site »	64
Figure 29:vu global sur la page d'aide « informatisation du l'utilisateur ».....	64
Figure 30 : vu globale sur la base de données	65
Figure 31: exemple de la table « les paramètres optimaux pour le séchage solaire de la pomme».....	68
Figure 32 : la carte du temps restant.....	68
Figure 33 : l'évolution de la teneur en eau en base sèche par rapport au temps des 03 prototypes.....	70
Figure 34 : le séchage solaire dans différente région du pays.....	71
Figure 35 : effet de l'épaisseur sur le sechage d'un produit.....	73
Figure 36 : histogrammes de prix de vente en DA de quelques produits.....	75
Figure 37 : carte de calcul du coût.....	75

Liste des tableaux

Tableau 1: autre modèles mathématiques pour décrire la cinétique de séchage.	50
Tableau 2 : données économique.	56
Tableau 3 : données divers.	56
Tableau 4 : prix d'achat/ vente de trois produit.	56
Tableau 5 : résultats expérimentaux.	57
Tableau 6 : effet de l'épaisseur sur le séchage de la pomme de terre.	58
Tableau 7 : séchage de la pomme de terre région du nord «Bousmail ».....	58
Tableau 8 : séchage de la pomme de terre région des hauts plateaux « Constantine ».....	59
Tableau 9 : le séchage solaire de la pomme de terre au sud Algérien « Ouargla ».....	59
Tableau 10 : Le prix de vente des produits séchés les plus demandé au marché.....	60
Tableau 11 : quelques travaux de séchage de la pomme de terre	72

Nomenclature

Lettre	Signification	Unité
Ψ	Degré de saturation	[%]
ε	La porosité volumique	/
μ_f	viscosité cinématique	[kg/(m.s)]
ρ_f	Masse volumique	[kg/m ³]
ρ_s	Masse volumique de la phase solide	[kg/m ³]
φ	Facteur tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit.	
ε_1	Emissivité du produit.	/
ε_2	Emissivité de l'émetteur	/
ϕ_{cnd}	Le flux conductif	[W]
ϕ_{cnv}	Le flux convectif	[W]
ϕ_{rad}	Le flux radiatif	[W]
χ^2	ki-carré	/
λ	Conductivité thermique de la pellicule de produit	[W/m.K]
A_2	Surface de l'émetteur infrarouge	[m ²]
C	Compacité	[m ² /m ³]
C_s	Chaleur spécifique du substrat	[J/kg.C]
d	diamètre de la bille	[m]
d_f	degré de liberté de régression du modèle	/
D	Coefficient de diffusion massique	[m ² /s]
D_f	Coefficient de diffusion	[m ² /s]
D_L	coefficient de diffusion du liquide	[m ² /s]
D_V	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau	[m ² /s]
D_{LT}	Coefficient de thermo-migration du liquide	[m ² /s]
D_{VT}	Coefficient de thermo-migration de vapeur	[m ² /s]
D_m	coefficient de diffusion totale	[m ² /s]
D_T	Diffusivité thermique	[m ² /s]

D_{eff}	Coefficient de diffusion effectif de l'humidité dans le solide	$[m^2/s]$
e	épaisseur	$[m]$
f	vitesse de séchage normée	$[-]$
h	Le coefficient d'échange par convection	$[W/m^2.K]$
H_r	Humidité relative d'un gaz	$\%$
H_{eq}	Humidité d'un gaz à l'équilibre	$[g/m^3]$
H_a	Humidité absolue d'un gaz	$[g/m^3]$
H_{as}	Humidité absolue de saturation	$[kg\ eau / kg\ (air\ sec)]$
J_L	Flux masse surfacique du liquide	$[kg/m^2.s]$
J_V	Flux masse surfacique de la vapeur d'eau	$[kg/m^2.s]$
k_f	Perméabilité intrinsèque	$[m^2]$
K_G	Coefficient global de transfert de matière	$[s/m]$
L	Épaisseur de la tranche mince du produit	$[m]$
L_V	Chaleur latente de vaporisation	$[J/kg]$
M_h	Masse humide	$[kg]$
M_s	Masse sèche	$[kg]$
M_a	Masse du gaz	$[kg]$
M_e	Masse de l'eau	$[kg]$
MR	Le ratio d'humidité ou teneur en eau réduite	$/$
n	Nombre des constantes de chaque modèle.	$/$
$n_{s,e}$	Taux d'humidité à l'équilibre en fin de séchage	$\%MS$
$n_{s,cr}$	Teneur en eau critique.	$[kg\ eau / kg\ (MS)]$
$n_{s,0}$	Teneur en eau initial du produit.	$[kg\ eau / kg\ (MS)]$
N	Nombre de point expérimentaux	$/$
P	Pression totale	$[P_a]$
P_v	Pression partielle	$[P_a]$
P_s	Pression de saturation	$[P_a]$
P_m	Tension de vapeur	$[P_a]$
r	coefficient de corrélation	$/$
t	Temps de séchage	$[s]$
T_1	Température de la source émettrice	$[K]$
T_2	Température du produit	$[K]$

$T_a - T_s$	L'écart entre la température de l'air de séchage et la température superficielle du produit à sécher	[K]
T_r	Température de point de rosé	[°K]
V	Le volume	[m ³]
x	Longueur	[m]
X	Teneur en eau à base sèche	[kg eau / kg (MS)]
X_r	Teneur en eau (base humide)	[kg d'eau/kg de (MH)]
$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t$	Vitesse de séchage à l'instant t	[%Ms.min ⁻¹]
$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_I$	Vitesse de séchage de la phase I	[%Ms.min ⁻¹]
$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0$	Vitesse initiale de séchage	[%Ms.min ⁻¹]

Introduction générale :

Aujourd'hui, l'un des principaux défis mondiaux est de pouvoir assurer la sécurité alimentaire d'une population mondiale en croissance (80 millions d'habitants par an). Selon les études, autour de 12,9 % de la population mondiale est aujourd'hui sous-alimentées [1]. À l'horizon 2050, la population mondiale atteindra les 9,8 milliards d'habitants (soit une augmentation de 30 % [2]) qui va renforcer le déséquilibre alimentaire. Il existe visiblement deux moyens directs pour résoudre le problème:

1. Augmenter la production alimentaire en apportant plus de superficie cultivée, avec de nouvelles méthodes mécanisées de l'agriculture.

2. Réduire la demande alimentaire en réduisant la croissance démographique.

La troisième alternative qui est tout aussi importante mais qui ne reçoit pas l'attention voulue est la réduction de la perte de nourriture pendant et après la récolte. Chaque année et partout dans le monde, des quantités massives de nourriture sont perdues en raison de la détérioration et des infestations [3]. Dans certains pays d'Afrique, des Caraïbes et du Pacifique, où les conditions météorologiques tropicales et les infrastructures peu développées contribuent au problème, le gaspillage peut atteindre en moyenne 40 à 50% [4]. De toute évidence, l'un des principaux moyens de renforcer la sécurité alimentaire consiste à réduire ces pertes. Plusieurs solutions sont proposées pour pallier ce handicap tel que la congélation, la culture sous serre et la conservation par séchage.

Ce dernier s'avère une solution simple, sûre et adéquate pour le stockage d'un grand nombre de produits. Avec le développement culturel et industriel, le séchage mécanique artificiel commence à se pratiquer de plus en plus ces dernières années. Ce processus est connu comme un processus énergivore et coûteux, il représente 10 à 15 % de la consommation totale d'énergie industrielle mondiale [3], ce qui augmente en fin de compte le coût du produit. L'utilisation de l'énergie solaire gratuite devrait réduire le coût du processus de séchage tout en produisant la même qualité de produit séché que le séchage mécanique, c'est une alternative importante et viable en particulier dans les pays en voie de développement comme l'Algérie.

L'Algérie possède un des plus importants gisements solaires au monde. La durée d'ensoleillement atteint en moyenne 2500 heures par an sur une très grande partie de son territoire. En effet, le potentiel solaire total de l'Algérie est estimé à 169 440 TWh par an ce qui représente 5000 fois la consommation annuelle nationale d'électricité et environ 60 fois l'énergie consommée par la communauté européenne [5] [6]. Cette quantité d'énergie devrait être bien utilisée dans plusieurs applications thermiques comme le chauffage des habitats et le séchage qui est une opération nécessaire dans plusieurs processus (agroalimentaire, matériaux de construction, bois, ...). Il y a donc un intérêt pratique considérable dans l'étude scientifique des séchoirs solaires. Ces études ont déjà montré que les séchoirs solaires sont pratiques, faciles à manipuler et possèdent une très bonne performance. Les séchoirs solaires sont généralement classés en mode direct, indirect et mixte. La circulation d'air à travers le séchoir est assurée soit naturelle ou forcée (avec un ventilateur). Les séchoirs solaires à convection naturelle sont généralement inefficaces, car la circulation de l'air est assez faible. Certaines études ont révélé que l'utilisation des cheminées solaires (CS) peut améliorer l'écoulement d'air (débit et vitesse) à travers le séchoir solaire. Cette technique est devenue le moteur thermique réel dans la plupart des séchoirs solaires à convection naturelle. La limitation majeure de l'utilisation des séchoirs solaires vient de la nature discontinue de l'énergie solaire. Cette dernière est un apport

énergétique dont l'intensité dépend du lieu, l'heure du jour, la saison et les conditions météorologiques. En conséquence, il est souvent nécessaire d'intégrer un système de stockage ou un apport électrique pour réduire les effets de la discontinuité et améliorer l'efficacité des séchoirs solaires. De plus on doit assurer aussi la connaissance des paramètres influençant le processus de séchage

Pour bien maîtriser une opération de séchage il faut pouvoir maîtriser les trois paramètres fondamentaux :

- Température.
- Humidité.
- Vitesse de l'air asséchant.

Il faut prendre l'opération de séchage en vitesse c'est-à-dire pouvoir sécher rapidement pour éviter le pourrissement du produit mais pas trop vite une croûte risque alors de se former en surface empêchant l'eau de sortir ; ni à trop haute température le produit se dénature et noircit. Il faut prendre aussi en considération les propriétés et les caractéristiques du produit à sécher. "Sécher est devenu beaucoup plus un art qu'une science !"

En fait la philosophie générale est la suivante: compte tenu des conditions météorologiques et des contraintes biologiques du produit à sécher, **Quelle est l'installation solaire qui séchera une production donnée dans les meilleurs délais et à moindre coût tout en gardant les propriétés organoleptiques du produit?**

De plus la question qui se pose automatiquement est : **Quelles sont les conditions optimales pour le séchage solaire d'un produit agroalimentaire donné spécifiquement un végétal?**

Le présent travail est structuré en quatre chapitres précédés d'une introduction générale et suivis d'une conclusion qui englobe l'essentiel des résultats obtenus.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique relative aux travaux effectués, cette dernière englobe des travaux théoriques et expérimentaux sur le séchage solaire de produits agroalimentaires.

Le deuxième chapitre comporte deux parties, dans la première nous présentons un aperçu général sur le séchage solaire ainsi que les différents types des séchoirs et les paramètres aérothermiques influençant le processus de séchage, la deuxième partie étant une explication sur la réalisation de la courbe caractéristique du séchage et les différents modèles mathématique qui caractérisent la cinétique du séchage.

Le troisième chapitre est réservé pour parler sur la méthodologie de l'informatisation des concepts retenus sur le séchage solaire des produits agroalimentaires.

Le quatrième chapitre concerne la présentation et discussion des résultats obtenus.

Enfin, nous terminons par une conclusion qui englobe l'essentiel des principaux résultats obtenus ainsi que quelques perspectives.

L'objectif de notre travail consiste à développer un outil déployé sur le web représentant un portail de recherche sur le module de séchage, apportant d'aide en cas d'une étude paramétrique sur les produits agroalimentaires. L'outil implémente aussi des formules de coûts qui permettent d'étudier la réalisation des investissements dans le domaine du séchage solaire. On donne l'accès à une base des données sur les différents paramètres étudiés, ainsi qu'une interface qui facilite l'obtention des paramètres optimaux de plusieurs produits d'une façon

intuitive et agile. On a appui sur l'aspect d'ergonomie sur notre application facilitant sa manœuvre par n'importe quel utilisateur (chercheur, investisseur)

Chapitre I : Etat de l'art

I.1 Introduction :

Il est clair qu'avant d'entreprendre cette présente étude, il nous a paru utile d'analyser certains travaux (théoriques et expérimentaux) en faisant appel à plusieurs paramètres relatifs au processus et phénomène étudié. Cette analyse vise à améliorer la compréhension des phénomènes qui interagissent et garantit une bonne conduite de la recherche à travers la lecture des exemples spécifiques et diversifiés.

Ce chapitre donne un éventail assez large de l'ensemble des approches théoriques et expérimentales possibles sur les systèmes de séchage solaires de différents produits agro-alimentaires spécifiquement les végétaux .

I.2 Etat de l'art

Les travaux réalisés par plusieurs chercheurs dans le domaine de séchage localement et dans le reste du monde sont classés chronologiquement et par région dans le tableau ci-dessous. La présentation débutera par l'Algérie, l'Asie, l'Afrique et pour finir la Turquie.

Nom et date et lieu /Reference	Produit	Hypothèse Et condition d'essai	Résultat	Modèle mathématique ou empirique	Conclusion
D.MANOU CHE En 2006 A l'Université de Ouargla [7]	Tomate	*Séchoir indirect. *Convection naturelle. *Ep=1cm. *Mt=2,980kg. *X initial =92,3% *T de l'essai entre 40-70°C *V=0,5m/s Comparaison entre Séchage solaire direct et Séchage solaire indirect.	*17h pour avoir teneur final= 13%. *Diminution de teneur en eau avec augmentation de la température du produit augmente jusqu'à 46°C en (jours3). *augmentation de vitesse du séchage au premier jour et diminution au 2-3jours avec des perturbations. *18h pour avoir teneur final =13% avec un séchoir direct.	/	*Température d'air asséchant dépend essentiellement de la qualité du capteur et l'éclairement solaire. *Evaporation d'eau du produit importante pour 1j puis elle est de moins en moins rapide (2-3j) *Séchage solaire indirect. abaisse le temps de sechage .

<p>D.MANOU CHE En 2006 A l'Université de Ouargla [7]</p>	<p>Feuille de menthe</p>	<p>*Séchoir indirect. *Convection naturelle. *premier essai : masse initial =100g/claies *T=30-60°C *Vair asséchant=0,74m/s *teneur en eau initial = 78%</p>	<p>*t=135min pour avoir une teneur en eau final =14% *influence de masse initiale moins importante de celle de température d'air asséchant. *un séchage uniforme sur toutes les claies.</p>	<p>/</p>	<p>*La durée de séchage dépend de la masse initial, température et la vitesse de l'air asséchant. *Pour augmenter la vitesse de l'air il faut réduire la surface et hauteur de la chambre de séchage. *Seulement la phase de ralentissement dans la courbe de séchage.</p>
<p>N.CHALAL En 2007 [8]</p>	<p>abricot</p>	<p>*Séchoir mixte incliné de 30°+ un appoint. *Ciel clair. *Ta=25.</p>	<p>*Pour T=60°C teneur final = 7,25% dans 12h de séchage dans la première claie. *La température du fruit ne doit pas dépasser la valeur de 65 °C pour éviter sa détérioration.</p>	<p>*modèle logarith mique</p>	<p>*L'augmentation de la température permet de donner plus de chaleur au fruit, donc plus d'évaporation d'eau du fruit.</p>
<p>MS.BOUG HALI En 2010 A (LENREZA / Ouargla). [9]</p>	<p>Tomate</p>	<p>*séchoir indirect. *Essai 1 : convection forcée.. *Essai 2 : convection naturelle. *Essai 3 : convection forcée + appoint *Tessai= 50, 65 et 75°C. *Épaisseur = 1, 1.5 et 2cm. *V_{air}: 1, 1,5 et 2 m/s. *période : 11/2007.</p>	<p>*Pour V_{air}=2m/s et T=50, 65,70°C le t= 14h, 9h et 6.5h *Pour T=50°C et V=1,1.5, 2m/s t=14h, 12h et 11h *pour T=65° et V=1.5m/s X_f=0.13. *L'augmentation de vitesse de 1 à 2m/s et de température de l'air asséchant de 50 à 75°C engendre une augmentation de la vitesse de séchage au début de l'opération de séchage. *Une diminution du temps de séchage à environ 33,33% dans le cas de la tomate prétraitée.</p>	<p>*Midilli et al</p>	<p>* Le séchage à convection forcé est mieux maîtrisé que celui à convection naturelle. *Une forte influence de la température par rapport à la vitesse de l'air. *La tomate séchée à 60°C se réhydrate mieux. *Temps de séchage diminue avec la diminution Ep *Seulement la phase décroissante.</p>

<p>N. LAHAMRI EN 2012 A l'Université de Batna .</p> <p>[10]</p>	Tomate	<p>*Séchoir sous Vide Jouan Ev100</p> <p>*Séchoir solaire a convection naturelle et Séchoir solaire a convection forcé à V=1m/s.</p> <p>*Séchage à l'air libre à Ta=22°C</p> <p>*93.19 g d'eau /100g de tomate.</p> <p>*Morceaux cubiques d'épaisseur 5 ± 1 mm</p> <p>*Période : juin 2009.</p>	<p>*t=22h,25h,45h pour Séchoir solaire a convection forcé , Séchoir solaire a convection naturelle et Séchage a l'air libre .</p> <p>* Séchoir sous Vide pour P=20mm Hg et T=60,70et80°C le t =170,150et 125min.</p>	*Midilli et al. et de Page	<p>* Séchage solaire a convection forcé et Séchage sous Vide à T=50 °C et P=20 cm Hg sont les meilleures méthodes de séchage.</p> <p>* Par l'augmentation de T et la diminution de P on obtenir des durées de séchage courtes.</p>
<p>Y.NASRIE EN 2015 A Université de Constantine</p>	Pomme de terre	<p>*Séchage indirect.</p> <p>*Convection forcée.</p> <p>*Période : 07/2014</p> <p>*Vair = 0.2m/s</p> <p>*Température initial =300°K</p> <p>*Epaisseur produit =10mm</p> <p>*Diamètre du produit =50mm</p> <p>*Charge 3kg.</p>	<p>*Dans les claies 1,5et10 T_{air}-asséchant=345,318et303 °k qui diminue a fur et à mesure et Cependant T_{produit} augmente jusqu'à : T_{produit} = 310.5°K,310°K ,309.5°K</p>	*modèle logarithmique de P.P. Tripathy , Subodh Kumar	<p>* T_{air} asséchant représente le paramètre le plus important agissant sur la cinétique du séchage.</p>
ASIE					
<p>PANGAVHANE et al . En INDE [11]</p>	Raisins	<p>*Séchoir solaire direct.</p> <p>*Convection naturelle.</p>	<p>*Efficacité du collecteur de ce séchoir solaire en convection naturelle est 0,26 pour un débit d'air de 0,0126 kg/s et 0,65 pour un débit d'air de 0,0246 kg/s.</p> <p>* temps de séchage est de 7à15jours pour séchage solaire a l'air libre cependant 4jours dans le Séchoir solaire direct en convection naturelle.</p> <p>*Température moyenne dans le séchoir est de 50à60°C.</p>	/	<p>*Le débit d'air de séchage a augmenté avec l'augmentation de la température ambiante.</p> <p>*Des raisins secs de meilleure qualité dans séchoir solaire en convection naturelle.</p> <p>*Temps de séchage est réduit de 43% par</p>

					rapport au séchage au soleil ouvert.
EI-SEBALI et al. En 2002 En INDE [12]	Figue	*Séchoir solaire indirect. *Convection forcée. *Essai 1 : produit à l'état normal *Essai 2 : produit prétraité et coupé en tranche.	*Teneur en eau diminue jusqu'à une valeur d'humidité finale après 32 h pour l'essai 1 et 12h pour essai 2.	/	*Le traitement chimique avant le séchage diminue le temps de séchage. *La dimension du produit est un facteur d'influence principal dans le séchage solaire .
RUSLAN et al En 2003 En MALESIE [13]	Thé	*Séchoir solaire hybride.	*L'énergie solaire contribue est de 42,6 kWh ce qui fait que La contribution d'énergie auxiliaire est de 17,6 kWh pour maintenir une Température optimal de 50°C pour avoir un temps de séchage minimum t=6h.	/	*L'énergie solaire contribue environ 70,2% de l'énergie nécessaire.
PRAKSH et al. En 2004 En INDE [14]	Carotte	*Séchoir solaire direct.	*Un temps de séchage élève de 10h	/	*Un faible taux de réhydratation en raison d'un rétrécissement plus important des échantillons séchés par séchoir solaire.
SARSAVADIA EN 2007 EN INDE [15]	Oignon	*Séchoir solaire hybride. *Teneur en eau initial =86%	*Pour une température de 60°C on obtient une teneur en eau final =7% dans une période de 5h.	/	*Des économies maximales d'énergie totale peuvent être obtenues jusqu'à 70,7% avec le recyclage de l'air d'échappement chaud.

HOSSAIN et al. En 2007 En INDE [16]	Piments	*Essai 1 : séchoir solaire direct type tunnel en convection forcée. *Essai 2: Séchage à l'air libre *Ta=25°C. *Charge initial 20kg.	*L'élévation de la température d'air dans le séchoir jusqu'à 50 °C. *Le produit garde ça qualité dans le séchoir tunnel. *Le temps de séchage est de 9h pour séchage solaire direct et 25h pour séchage a l'air libre.	/	*L'utilisation de ce séchoir a entraîné une réduction considérable du temps de séchage par rapport à celui du séchage solaire a l'air libre.
MOHANR AJ et al. EN 2008 EN INDE [17]	Copra	*Séchoir indirect *Convection forcée	*Teneur en eau diminue d'environ 52% à 8% et 10% en 82 h pour les plateaux en bas et en haut respectivement. *Température max de l'air de séchage enregistrée pendant les heures de pointe du soleil était de 63 °C *Température moyenne de l'air environ 31°C.	/	*Ce séchage est plus adapté pour les cas à petit échelle *Environ 75% de coprah de haute qualité pourraient être produits
MOHANR AJ et al. En 2009 En INDE [18]	Piments	*Séchoir solaire indirect. *Convection forcée. *Système avec stockage thermique pendant les heures ensoleillées *teneur en eau initial de 72,8%. *Charge initial 50 kg .	*Teneur final = 9,2 et 9,7 % dans les plateaux inférieur et supérieur. *L'efficacité thermique du séchoir solaire est 21%.	/	*L'intégration du stockage thermique prolonge le temps de séchage jusqu'à 4 h/j et maintient une température d'air presque constante.

AFRIQUE

MADHLOP A et al. En 2002 En Camerone [19]	Mangue	*Séchoir solaire indirecte. *Convection naturelle. *Produit coupé en tranche.	*Pour T=31,7-40,1 °C la teneur en eau diminue jusqu'une valeur finale de 13% pendant 20 h.	/	*Le temps de séchage peut être diminué jusqu'au 10h avec l'utilisation d'un ventilateur.
EL-BELTAGY En 2007 En Égypte [20]	Fraise	*Séchoir solaire indirect. *Convection naturelle.	*Pour une température de 47°C le temps de séchage et de 5h.	/	*Par le séchage solaire indirect en obtient des fraise séchée de bonne qualité.
MS. TOUATI En 2008 A Maroc [21]	Feuilles de menthe	*Séchoir indirect *Convection forcée *Sans stockage ni recyclage d'air *Ta est de 25à 35°C *%Humidité d'air = 42% à 56%. *Tessai= 40à50°C *Débit de l'air est de 100à200m ³ /h *Période : juillet/2006	*Pour T=50°C et $qm=0,0592\text{kg/s}$ le temps de séchage égal à 270min et teneur final =0.15kgH ₂ O/Kg MS *La vitesse de séchage augmente avec l'augmentation de Température et donc avec la diminution de teneur en eau .	*Midilli-Kucuk	*Le produit ne représente pas de phases 1 et 2 dans la courbe de séchage. * L'influence du débit d'air, est moins importante que celle de la température de séchage.
B.Kamenan En 2017 Au Côte d'Ivoire. [22]	Fèves de cacao	*Séchoir solaire indirect *Convection forcée *Mode autonome *Tessai= 30 ,45,60°C.	*Pour activité en eau de 0.41 et T=30,40.60°C la teneur en eau d'équilibre égal à 0.09, 0.06 , 0.05 kg d'eau/kg MS *Diminution rapide de la teneur en eau jusqu'à 0.233 kg eau/kg MS après cette valeur la vitesse de séchage diminue.	*GAB	*Le séchage des fèves de cacao se déroule en deux phases (rapides et lentes) *Le retrait volumique diminue avec la diminution de la teneur en eau. *La diffusivité effective de l'humidité diminue lorsque la teneur en eau diminue.

Izaora Mwamba et al EN 2018 Au Congo [23]	Mangue	<p>*Deux techniques de séchage (solaire direct et par étuve) Teneur en eau initial égal à 81% Température d'essai :20à41°C pour le solaire T=50°C fixé et contrôler (Séchage électrique) Masse initial=248g</p>	<p>*Pour le séchage solaire à T= 41°C humidité finale 14,17%±0,01 dans une période de 24h . *Pour le séchage électrique à T=50°C teneur en eau final égal à 10.5% dans un temps de 8h.</p>	/	<p>*La méthode de séchage solaire au vu des résultats obtenus s'avère être celle qui booste le plus les propriétés nutritionnelles de la mangue.</p>
NGONE FALL BEYE et al. En 2019 SENEGAL [24]	Oignons	<p>*Séchage Sous Vide et Séchage solaire type serre. *Pour séchage sous vide la température d'air asséchant est de 65 à 70°C . *Pour séchage solaire type serre température d'air asséchant égal à 40°C en convection naturelle. *Deux variétés d'oignons</p>	<p>*Pour teneur en eau final est de 8% avec t=5,4h et t=6,5h pour 1ere et 2eme variétés. *Pour séchage solaire type serre teneur en eau final est de 8à10% t=10a12h pour les deux variétés</p>	*Varma	<p>*Le séchage sous vide réduit jusqu'à 50% du temps de séchage. *Un ventilateur peut être utilisé à fin d'améliore le séchage solaire type serre.</p>
TURQUIE					
Inci Türk Togrul et al En 2000 En Turquie [25]	Abricot	<p>*Essai 1 : séchage en plein air *Essai 2 : séchage solaire indirect convection forcée avec capteur à concentrateur conique. * Température d'air asséchant 50 à 80 °C et un débit=50, 60 et 70 kg/h. * Période : Juin à Août 2000.</p>	<p>*Le temps de séchage est de 68-78 h dans un séchoir solaire, cependant est de 112 h en plein air.</p>	*Modèle logarithmique	<p>*Les abricots sèchent 2 fois plus vite dans un séchoir solaire qu'à l'air libre.</p>
Ebru Kavak Akpinar EN 2002 En Turquie [26]	Pomme de terre pomme Potiron	<p>* séchoir cyclone *Tair=60 à 80 °C. *Vair= 1 à 1.5 m/s.</p>	<p>* Pour V=1.5m/s et T=60,70et80°C le temps de séchage est de 250,220,170min pour des fraction d'humidité de =0.09,0.07,0.05 .</p>	*Midilli Kucuk	<p>* L'augmentation de température et de vitesse de l'air engendre une diminution de temps de séchage .</p>

İnci Türk Toğrul, Dursun Pehlivan En 2002 [27]	Raisin, Pêches, Figues, Prunes Abricot	*Séchage naturel. *Eclairage solaire de 0.72 MJ/m ² h à 2.93 MJ/m ² h. *Ta=27°C à 43 °C. *Traitement des abricots avec NaOH ET SO ₂	*Temps de séchage est =3000 et 4000min pour abricot traité et les non traité avec teneur final =10% *Pour les pêches t=3000min *Pour figue =6000 *Pour prunes t=6000 *Pour raisins t=7000min Avec teneur final =20%.	*Modèle modifié de Henders on et Pabis Modelé de Verma	*Que la phase de chute. *Traitement chimique des produits diminue le temps de séchage.
---	--	--	---	--	--

I.3 Conclusion:

A travers cette étude bibliographique qui regroupe les différents travaux réalisés par des chercheurs dans le domaine de séchage, on a pu constater les remarques suivantes :

- Le séchage solaire indirect et le séchage hybride sont les meilleures méthodes de séchage des produits agro-alimentaire afin d'avoir un produit final de bonne qualité
- Le séchage solaire indirect à convection forcée est mieux que celui à convection naturelle.
- Une élévation de la température de séchage entraîne toujours une diminution de la teneur d'eau du produit, une augmentation de l'humidité de l'air de sortie du séchoir et une diminution du temps de séchage. Ceci confirme que la température de séchage est un paramètre important pour les transferts internes de l'eau pour la plupart des produits agroalimentaires
- La température de l'air asséchant est le paramètre le plus important agissant sur la cinétique du séchage, et elle a une forte influence par rapport à celle de la vitesse de l'air.
- L'intégration du stockage solide dans le séchoir prolonge le temps de séchage.
- le prétraitement chimique des produits agro-alimentaire diminue considérablement le temps de séchage.

Chapitre II : Etude bibliographique sur le séchage solaire.

Partie 01 :

Le séchage est une opération qui permet d'extraire plus ou moins une partie de l'eau présente dans un matériau. C'est l'un des procédés les plus anciens utilisés pour la conservation des denrées agro-alimentaires.

Cette partie est consacrée à quelques rappels sur les principes du séchage et à la présentation des principaux modèles de séchage.

II.1 Le séchage :

II.1.1 Définition du séchage

Le séchage est une technique de purification visant à débarrasser un mélange homogène ou hétérogène d'un constituant liquide. Sécher un produit consiste à apporter l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau du produit (chaleur latente de vaporisation), puis à évacuer la vapeur formée. Le but d'une telle opération est, soit de rendre à une substance traitée ses qualités mécaniques ou physico-chimiques initiales, soit de faciliter son stockage et sa conservation.

Il existe plusieurs procédés de séchage : les procédés mécaniques (presse, décantation ou centrifugation), les procédés physico-chimiques (adsorption, absorption, réfrigération et séchage par évaporation). Ce dernier consiste à transférer le liquide à éliminer dans la phase gazeuse qui le baigne.

Le changement de phase exige un apport de chaleur assez considérable. Il peut être direct (chauffage par échangeur, par effet joule, par radiations infrarouges ou par courants de haute fréquence) ou bien c'est la phase gazeuse elle-même qui assure l'apport de chaleur nécessaire (air chaud).

Le séchage par évaporation est un processus très complexe qui fait intervenir un double transfert, le premier est un transfert de chaleur destiné à réduire la teneur en eau dans le produit et le second est un transfert de masse qui implique un déplacement du fluide de l'intérieur du produit vers sa surface. Ces deux transferts exigent un apport de chaleur considérable, d'où l'intérêt d'utiliser une source de chaleur renouvelable. C'est le cas des séchoirs solaires. [28]

Selon Bonazzi, C., E. Dumoulin, et al. [29], l'utilisation du séchage dans les industries agro-alimentaires a de multiples buts :

- Accroître la durée de conservation des produits (viandes, poissons, fruits, graines, pâtes, épices, thé, champignons, ...).
- Stabiliser les produits agricoles (maïs, riz, lait, ...) et amortir le caractère saisonnier de certaines activités.
- Transformer les produits par des réactions biochimiques ou biologiques (produits de salaison, touraillage du malt, ...).

- Stabiliser des coproduits industriels pour l'alimentation animale (pulpes de sucrerie ou d'amidonnerie, drêches de brasserie, farines de viande et de poisson, lactosérum, ...)
- Produire des ingrédients ou des additifs pour une seconde transformation, également appelés produits alimentaires intermédiaires (PAI). Ce sont par exemple des légumes pour les potages, des oignons pour la charcuterie, des fruits pour la pâtisserie, des épaississants, arômes et des colorants.

II.1.2 Le séchage et l'énergie

Afin de sécher un produit, liquide ou solide, il faut fournir de la chaleur, de l'énergie, globalement on considère que les opérations de séchage consomment environ 15 % de l'énergie industrielle dans les pays développés. Cette part est importante et il faut essayer de trouver les moyens d'optimiser les procédés, dans une démarche économique mais aussi écologique. Toutes les parties d'un même produit n'ont pas le même comportement vis à vis de l'eau. Cela varie aussi d'un produit à l'autre, suivant sa composition biochimique : certaines structures ou molécules retiennent l'eau plus que d'autres. Lorsque le produit est très humide, l'eau qu'il contient est qualifiée de "libre" et lors du séchage, l'eau libre se comporte comme de l'eau pure. Il suffit pour la vaporiser d'environ 2250 kJ/kg. Lorsque le produit est plus sec, l'eau est davantage retenue par celui-ci et on la qualifie de "liée". L'évaporation de cette eau est plus difficile et demande plus d'énergie. Au cours du séchage c'est d'abord l'eau libre qui va être évaporée, puis l'eau de plus en plus liée : aussi la quantité d'énergie nécessaire pour vaporiser la même quantité d'eau augmente au cours du séchage [30].

II.1.3 Les domaines d'utilisations

Industrie agroalimentaire : une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage, et ce dernier peut être une étape nécessaire à la production du produit ou un rôle dans la conservation de l'aliment. On peut citer par exemple :

- La viande fumée : saucisson...
- Les fromages : séchage dans une ambiance contrôlée.
- Le sucre cristallisé : est obtenu par évaporation.
- Les légumes (pois, poivron...) et fruits secs (pruneaux, raisins, abricots, figes...)
- Les jus de fruits sont préparés à partir d'un concentré obtenu par vaporisation
- Café, cacao, riz et autres céréales, feuilles de thé, épice, certains biscuits apéritifs

Actuellement, il existe plus de 200 types de séchoirs industriels dans le secteur alimentaire.

- Industrie papetière : dans ce type d'industrie, 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 et industrie céramique : par exemple (les briques, le carrelage, les assiettes, les bols et les plats).
- La biotechnologie et l'industrie pharmaceutique : Comme la fabrication de la levure en poudre, des antibiotiques et le séchage de principes actifs sous forme de poudre avant pastillage. [31]

II.1.4 Terminologie sur le séchage :

a) Teneur en eau

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage on distingue :

a.1 Teneur en eau à base sèche ou humidité absolue d'un solide

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche (MS). [32], [33], [34]

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (1)$$

Ou

$$X = \left(\frac{M_{eau}}{M_s} \right) * 100 \quad (2)$$

Où :

X : Teneur en eau à base sèche, [kg eau / kg (MS)], ou par [%MS]

M_h : Masse humide [kg].

M_s : Masse sèche [kg].

M_{eau} : Masse d'eau [kg].

a.2 Teneur en eau à base humide ou humidité relative d'un solide

L'humidité relative X_r d'un solide appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide (MH). [32], [33], [34]

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (3)$$

Ou

$$X_r = \left(\frac{M_{eau}}{M_{total\ du\ produit}} \right) * 100 \quad (4)$$

X_r : exprimée en [kg d'eau/kg de matière humide] ou par %MH

b) Taux d'humidité à l'équilibre

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température. [35]

c) Hygroscopicité

Après égouttage, la présence d'humidité dans un solide, se manifeste par une certaine tension de vapeur P_m qui est fonction de la nature du liquide, de celle du solide et de la température. La valeur de cette tension de vapeur permet de distinguer deux grandes catégories de solides.

- Lorsque le liquide adhère à la surface externe d'un solide, il est retenu par des forces superficielles peu intenses : la tension de vapeur P_m du liquide n'est alors fonction que de la température et elle est égale à la tension maximale de la vapeur du liquide à température considérée.
La rétention du liquide par adsorption à l'intérieur des pores, met en jeu des forces capillaires d'autant plus intenses que les interstices sont plus fins. Dans le cas de gros capillaires, l'humidité n'est retenue que faiblement. Au cours du séchage, qui s'effectue par évaporation du liquide superficiel, ce dernier est peu à peu remplacé par du liquide provenant des interstices du solide; il en résulte que la tension de vapeur P_m du liquide est, ici encore, égale à la tension maximale du liquide pour la température où l'on se trouve. **Un solide se comportant de cette manière n'est pas hygroscopique.**
- Lorsque les pores présentés par le solide sont extrêmement fins, les forces capillaires sont intenses et peuvent retenir en profondeur de notables quantités d'humidité. Dans un tel cas, la tension de vapeur P_m du liquide est inférieure à sa tension maximale à la même température, et **le solide est dit hygroscopique** (charbon actif par exemple). [32], [33], [34]

II.2 Comportement d'un solide mouillé en présence d'un gaz

Considérons un solide mouillé, d'humidité X , soumis à l'action d'un courant gazeux constant, renfermant sous forme vapeur, une certaine quantité du liquide associé au solide. Sous pression constante, et une température déterminée, le mélange gazeux est caractérisé par son humidité relative H_r qui est le quotient de la pression partielle de la vapeur dans le mélange à la même température par la pression de saturation P_s .

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (5)$$

Si la tension de vapeur P_m (pression de vapeur à la surface mouillée) du liquide associé au solide est différente de P_v il s'établit entre deux phases en présence, un transfert de matière tendant vers un état d'équilibre qui est atteint lorsque $P_v = P_m$.

- Si $P_v > P_m$ ce transfert d'humidité s'effectue de l'atmosphère gazeuse vers le solide et correspond à un phénomène d'adsorption, c'est-à-dire à un mouillage du solide.
- Si $P_v < P_m$ le transfert de matière s'effectue du solide vers la phase gazeuse et correspond à une **désorption, c'est-à-dire à un séchage du solide.**
- Lorsque $P_v = P_m$ l'état d'équilibre est atteint et il n'y a pas de transfert de matière : pour une température donnée, la pression restant constante, à chaque valeur de l'humidité relative H_r de l'atmosphère correspondant une valeur de l'humidité à l'équilibre X_{eq} du solide, et on peut construire une isotherme d'équilibre, relative au solide considéré.

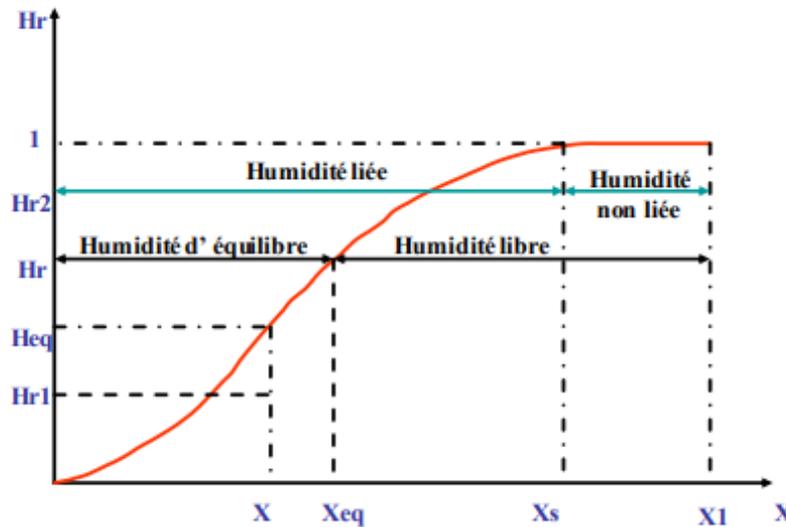


Figure 1: Isotherme d'équilibre.

On voit sur la figure ci-dessus, que l'humidité X d'un solide ne peut être en équilibre qu'avec une atmosphère dont l'humidité relative est H_{eq} . Si l'humidité relative de l'atmosphère est :

- $H_{r1} < H_{eq}$ il y'a désorption c'est-à-dire séchage du solide.
- $H_{r2} > H_{eq}$ il y'a adsorption c'est-à-dire mouillage.

Soit X_s est l'humidité d'un solide en équilibre avec une atmosphère saturée en humidité ($H_r = 1$).

Si un solide d'humidité $X_1 > X_{eq}$ est soumis à un courant gazeux constant, d'humidité relative, il perd son humidité jusqu'à ce que celle-ci devienne égale à X_{eq} qui est l'humidité à l'équilibre du solide correspondant à H_r . Un séjour, même prolongé dans cette atmosphère ne diminue pas son humidité au-dessous de X_{eq} . La différence $X_1 - X_{eq}$ représente l'humidité libre qui seule peut être évaporée.

Lorsque l'humidité d'un solide est inférieure à X_s , elle exerce une pression de vapeur inférieure à celle du liquide pur à la même température ; elle est appelée humidité liée au solide, elle consiste au liquide contenu dans les capillaires fins ou en solution retenu dans les parois cellulaires du solide, ou adsorbé à la surface du solide. Si au contraire, l'humidité du solide est supérieure à X_s , elle est appelée humidité non liée : la tension de vapeur qu'elle exerce est celle du liquide pur à la température où l'on opère. Cette humidité peut se lire sur le diagramme, elle est égale à $X_1 - X_s$. [32], [33], [34]

II.3 Grandeurs caractéristiques des gaz humide

II.3.1 Humidité absolue d'un gaz

On appelle humidité absolue ou spécifique, ou teneur en humidité, ou plus simplement humidité d'un gaz, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par H_a est donnée par la relation suivante [32], [33], [34]

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad (6)$$

Où :

H_a : Humidité absolue.

M_a : Masse du gaz [kg].

M_e : Masse de l'eau [kg].

Si on considère P la pression totale du mélange de gaz et de vapeur, on peut écrire dans le cas de l'air humide :

$$H_a = \frac{18}{29} \left(\frac{P}{P-P_v} \right) = 0.62 \left(\frac{P}{P-P_v} \right) \quad (7)$$

Où :

P : Pression totale [pascal].

P_v : Pression partielle de la vapeur [pascal].

II.3.2 Degré de saturation

Soit H_a la valeur de l'humidité d'un gaz pour une certaine température et H_{as} la valeur de l'humidité correspondant à l'état de saturation pour la même température; on appelle degré de saturation d'un gaz, le rapport [32], [33], [34]

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (8)$$

Où :

Ψ : Degré de saturation [%].

H_{as} : Humidité absolue de saturation [kg eau / kg (as)].

H_a : Humidité absolue [kg eau / kg (as)].

Dans le cas où P_v et P_s sont tous deux assez petits devant P (cas de l'air humide sous la pression atmosphérique et pour des températures peu élevées), on peut écrire :

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} = \frac{P_v}{P_s} \quad (9)$$

Avec :

P_s : Pression de saturation [pascal].

II.3.3 Humidité relative

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température. [32], [33], [34]

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (10)$$

II.3.4 Point de rosée

Dans un mélange de gaz et de vapeur, la pression de saturation de la vapeur est constante si la température ne varie pas. Quand on refroidit ce mélange sous pression totale constante, la pression partielle de la vapeur demeure inchangée mais par contre, la tension maximale P_s de la vapeur diminue, tant que cette tension maximale P_s est supérieure à la pression partielle P_v de la vapeur dans le mélange, la vapeur reste sèche et l'humidité (absolue) du gaz reste constante. Pour une certaine température T_r , la tension maximale P_s devient égale à la pression partielle P_v . La vapeur devient saturante et les premières traces de phase condensée (liquide généralement) apparaissent à cette température T_r : on donne le nom de point de rosée. A la température T_r on a donc $H_r=1$, un refroidissement au-dessous de T_r provoque une condensation de la vapeur (brouillard) et par la suite une diminution de l'humidité du gaz. [32], [33], [34]

II.3.5 Température de bulbe humide

L'évaporation d'un liquide est un phénomène endothermique. Si l'opération est réalisée adiabatiquement (c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'extérieur) sous l'action d'un courant de gaz non saturé en vapeur du liquide en cause, la chaleur nécessaire à l'opération ne peut provenir que du système lui-même.

Si la température initiale du liquide est supérieure à la température du gaz, la chaleur nécessaire à l'évaporation est fournie par le liquide dont la température s'abaisse. Mais on observe généralement que cette dernière température se stabilise à une valeur inférieure à celle du gaz; c'est le gaz qui cède alors au liquide, en se refroidissant, une partie de chaleur sensible. Le liquide s'évapore et la vapeur formée se mélange au gaz.

A la diminution de chaleur sensible du gaz correspondant à son humidité et un abaissement de température qui reste toujours supérieur à celle du liquide. Nous supposons que la température (bulbe sec) et l'humidité initiales du gaz provoquant l'opération ne changent pas de façon appréciable. Après un certain temps, il s'établit un régime stationnaire, ce qui signifie que la température demeure constante en tous les points du système, car il n'y a eu ces points, ni accumulation ni diminution de chaleur, la chaleur sensible cédée par le gaz ne sert alors qu'à l'évaporation du liquide. Lorsque l'état stationnaire est atteint, la température du liquide en un point de sa surface libre est dite température de bulbe humide. [32], [33], [34]

II.4 Caractéristique d'un solide poreux

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 thermophysiques particulières. L'évolution de la teneur en eau des produits peut générer des déformations et/ou des retraites et donc une modification des structures poreuses qui rejillira sur les caractéristiques de séchage par un ralentissement et même un blocage des transferts (croulage, 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. [32], [33], [34]

II.4.1 Porosité volumique d'un produit

La porosité volumique ε est définie par :

$$\varepsilon = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume apparent du produit}} \quad (11)$$

Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent vaut donc $1 - \varepsilon$

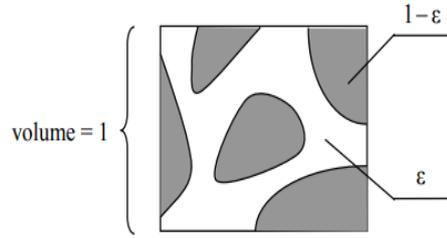


Figure 2 : Volume de contrôle microscopique. [32]

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas. La définition est équivalente. [32], [33], [34]

$$\varepsilon = \frac{\text{volumes de l'amas} - \text{volumes du produit}}{\text{volume de l'amas}} \quad (12)$$

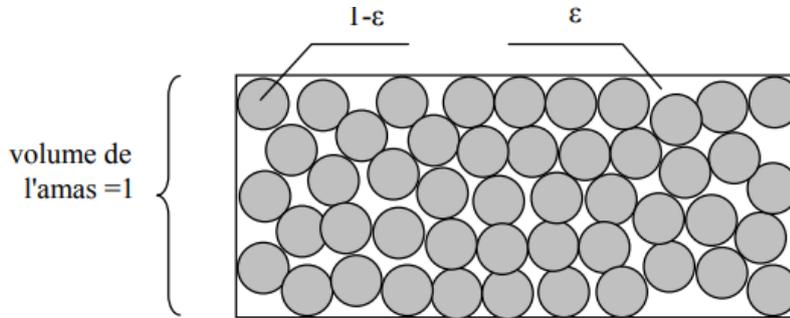


Figure 3: Volume de contrôle macroscopique. [32]

II.4.2 Compacité d'un produit

Les échanges convectifs, à toutes les échelles, demandent de quantifier la surface d'échange A contenue dans le volume V dans lequel on caractérise les transferts. Le rapport entre ces deux grandeurs constitue la compacité. [32], [33], [34]

$$C = \frac{A}{V} \quad (13)$$

Où :

C : Compacité [m^2 / m^3].

A : Surface d'échange [m^2].

V : Le volume [m^3].

A l'échelle du produit, la surface d'échange est la surface extérieure dite surface exposée. Pour des volumes classiques (bille de diamètre d , produit plat d'épaisseur) nous trouvons :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Bille : } C = \frac{6}{d} \\ \text{produit plat (2 faces) : } C = \frac{2}{e} \\ \text{produit plat (1 face) : } C = \frac{1}{e} \end{array} \right. \quad (14)$$

Pour le cas d'un amas de produit, la porosité ε de l'amas intervient soit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Amas de billes : } C = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} \\ \text{Amas de produits plats (2 faces): } C = \frac{2(1-\varepsilon)}{e} \end{array} \right\} \quad (15)$$

II.5 Répartition de l'eau dans le matériau

L'eau présente dans un matériau peut se présenter sous trois états : eau libre (eau capillaire), eau liée (eau adsorbée) et vapeur d'eau. L'eau libre remplit la majeure partie des vides de la structure, elle est piégée sous forme liquide par des forces d'origine capillaire; la quantité maximale d'eau libre est directement liée à la porosité du milieu (ε). L'eau liée est adsorbée sur et dans les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants. Elle aussi liée à la taille des pores qui indique la proportion eau liée/eau libre dans le matériau (un produit constitué de "petits pores" aura, à l'échelle macroscopique, un caractère hygroscopique plus marqué que s'il était constitué de "gros pores". La vapeur d'eau mélangée à l'air sec (mélange parfait) occupe les espaces vides non saturés d'eau liquide. [32], [33], [34]

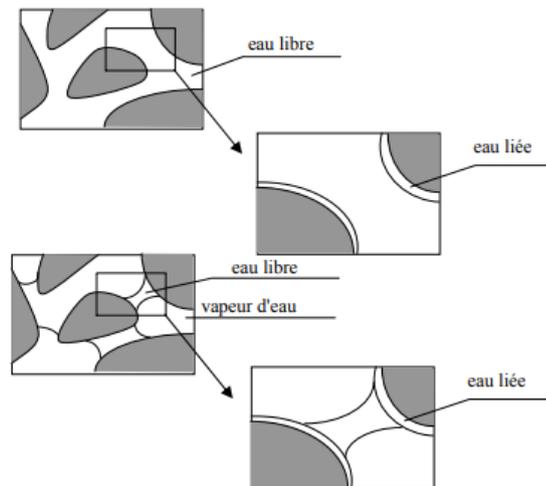


Figure 4 : Les différents types d'eau dans le matériau. [32]

II.5.1 Loi de Fick

La loi de Fick caractérisée la diffusion moléculaire d'un fluide de masse volumique ρ_f dans un milieu, elle exprime un flux massique surfacique. Le paramètre pertinent du milieu est D le coefficient de diffusion moléculaire : [32], [33], [34]

$$J_c = -\rho_f D_f \frac{dC_m}{dx} \quad (16)$$

Où :

J_c : Flux massique surfacique [$kg/(m^2 \cdot s)$].

ρ_f : Masse volumique [kg/m^3].

D_f : Coefficient de diffusion [m^2/s].

C_m : Fraction massique.

II.5.2 Loi de Darcy

La loi de Darcy caractérisée la diffusion d'un fluide de masse volumique ρ_f et de viscosité dynamique μ_f dans un milieu poreux, elle exprime un flux massique surfacique, le paramètre pertinent du milieu est k_f la perméabilité intrinsèque. [32], [33], [34]

$$J_s = -\rho_f \frac{k_f}{\mu_f} \frac{dC_m}{dx} \quad (17)$$

Avec :

J_s : Flux massique surfacique [$kg/(m^2 \cdot s)$].

k_f : Perméabilité intrinsèque [m^2].

μ_f : viscosité cinématique [$kg/(m \cdot s)$].

II.6 Théories descriptives du phénomène de séchage

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le phénomène de séchage, qui permet d'étudier le transfert de masse et de chaleur dans un produit. Ces approches théoriques peuvent être classifiées comme suit:

II.6.1 Théorie de Lewis (1921)

Initiateur des premiers travaux scientifiques sur le séchage, il caractérise le phénomène de séchage par deux processus indépendants [36]:

- Diffusion de l'intérieur du produit vers la surface (diffusion liquide).
- Evaporation à la surface.

II.6.2 Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929)

Cette théorie suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du solide est gouverné par la loi de Fick, qui traduit le phénomène de migration de la vapeur d'eau du milieu de forte concentration d'eau vers le milieu de faible concentration d'eau [37]. Autrement dit, du sein de la matière à sécher vers sa surface. Puis à la surface on assiste à l'évaporation due à un apport énergétique extérieur. Cette théorie donne satisfaction pour le séchage des aliments et des grains, ce qui n'est pas le cas pour les autres produits. Elle est critiquée pour sa faible représentation des phénomènes physiques, en la simple différence de concentration et de négliger par exemple le gradient de température dans le solide, ou de mettre le coefficient de diffusion constant, ce qui n'est pas valable pour tous les produits. [38], [39]

$$\frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (18)$$

Avec :

D : Coefficient de diffusion massique.

$\frac{\partial C}{\partial x}$: Gradient de concentration.

II.6.3 Théorie capillaire (modèle de Hougén) (1937)

Cette théorie repose sur le fait que le mouvement de l'eau dans les pores résulte d'un potentiel de succion, dont le mécanisme a notamment été étudié par Jurin. Lorsqu'on place un capillaire dans une cuve remplie d'eau, on observe une élévation du liquide dans le tube par rapport au niveau de la cuve. Cette théorie est appliquée à des produits poreux ou à des produits granulaires. Ceaglske et Hougén démontrent que pour le séchage d'un solide granulaire, l'écoulement de l'eau est entièrement dû aux forces capillaires, et totalement indépendantes de la concentration Krisher de sa part démontre que la première période du séchage est contrôlée par la capillarité, ce qui est confirmé expérimentalement par Gorling sur la pomme de terre. [38], [39], [40]

II.6.4 Théorie de Krisher (1938)

Krisher introduit une nouvelle théorie qui suppose que l'humidité peut se déplacer par une combinaison de transport capillaire pour la phase liquide et diffusif pour celle vapeur [41].

$$J_L = -D_L \rho_L \text{grad } X \quad (19)$$

$$J_V = -D_V \rho_V \text{grad } P_V \quad (20)$$

Avec :

D_L et D_V respectivement coefficient de diffusion du liquide et de la vapeur d'eau en $[m^2/s]$.

J_L : Flux masse surfacique du liquide $[kg/m^2 \cdot s]$.

J_V : Flux masse surfacique de la vapeur d'eau $[kg/m^2 \cdot s]$.

ρ_L : Masse volumique de la phase liquide $[kg/m]$.

ρ_V : Masse volumique de la phase vapeur $[kg/m]$.

P_V : Pression de la vapeur d'eau dans l'air $[Pa]$.

II.6.5 Modèle de Luikov (1934)

Luikov met en évidence le phénomène de thermo diffusion et établit qu'un gradient de température contribue à la migration d'humidité dans un milieu .Il propose un formalisme mathématique qui suppose que les flux de diffusion de vapeur et de liquide soient le fait d'un gradient de concentration totale et d'un gradient de température.

$$J_L = -D_L \rho_S \text{grad } X - -D_{LT} \rho_S \text{grad } T \quad (21)$$

$$J_V = -D_V \rho_S \text{grad } X - -D_{VT} \rho_S \text{grad } T \quad (22)$$

Avec :

ρ_S : Masse volumique de la phase solide $[kg/m^3]$.

D_{LT} : Coefficient de thermo-migration du liquide $[m^2/s]$.

D_{VT} : Coefficient de thermo-migration de vapeur $[m^2/s]$.

Ce système d'équation est complété par les bilans d'énergie et de masse comportant un terme de changement de phase. m (Quantité d'eau qui s'évapore par unité de volume et de temps à l'intérieur du milieu) tel que:

$$m = \tau \rho_S \frac{dX}{dt} \quad (23)$$

Où

m : Taux de changement de phase [kg/s].

τ est un facteur adimensionnel caractérisant la résistance à la diffusion de vapeur dans le matériau. τ tend vers 0 au début du séchage quand la migration d'humidité est essentiellement liquide et tend vers 1 à la fin du séchage quand la migration d'humidité est essentiellement vapeur. Le système d'équation devient alors [42]

$$\frac{dX}{dt} = \text{div}[D_m (\text{grad}X + \delta_S \text{grad}T)] \quad (24)$$

$$\frac{c_S \rho_S \partial T}{\partial t} = \text{div}[D_T (\text{grad}X) - L_V \tau \rho_S \frac{dX}{dt}] \quad (25)$$

$D_m = D_V + D_L$: coefficient de diffusion totale [m^2/s].

$\delta_S = \frac{D_{VT} + D_{LT}}{D_V + D_L}$: Coefficient de thermo-migration.

c_S : Chaleur spécifique du substrat [$J/kg.C$].

L_V : Chaleur latente de vaporisation [J/kg].

D_T : Diffusivité thermique [m^2/s].

ρ_S : Masse volumique de la phase solide [kg/m^3]

L'inconvénient de ce modèle c'est que le facteur τ est très difficile à déterminer expérimentalement. [42]

II.6.6 Théorie de Philip et De Vries (1957)

Le séchage se traduit par une combinaison de gradient de température et d'humidité en tenant compte en plus de l'effet de la pesanteur, modèle illustré à partir d'étude sur les transferts de chaleur et de masse au niveau des sols. [43]

$$\frac{dX}{dt} = \text{div} \left[D_M \text{grad}X + D_T \text{grad}T - \frac{\rho_L}{\rho_S} K \right] \quad (26)$$

$$\frac{\rho_c \partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda^* \text{grad}T) + \rho_L L_V (D_{MV} \text{grad}X + D_{TV} \text{grad}T) \quad (27)$$

D_M : Coefficient de diffusion massique isotherme [m^2/s].

D_T : Coefficient de diffusion massique non isotherme [m^2/s].

D_{MV} : Coefficient de diffusion isotherme de la vapeur [m^2/s].

D_{TV} : Coefficient de diffusion non isotherme de la vapeur [m^2/s].

K : Conductivité hydraulique du milieu [W/m^2K].

λ^* : Conductivité thermique apparente [$W/m^2 K$].

ρ_L : Masse volumique de la phase liquide [kg/m].

ρ_c : Capacité calorifique équivalente [$J/m^3 K$].

L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0° C [J/kg].

II.6.7 Théorie Whitaker (1977)

Le formalisme de Whitaker [44] est basé sur une "macroscopisation" des équations physiques relative à l'état microscopique de chaque phase présente dans le milieu poreux. Ce modèle utilise la technique de prise de moyenne sur un volume élémentaire représentatif (V.E.R) ; concept qui permet de passer d'un milieu discontinu à un milieu continu fictif avec des grandeurs physiques moyennes Soit une grandeur physique Φ_i associée à la phase i présente dans le milieu poreux On définit la valeur moyenne de cette grandeur par :

$$\Phi = \frac{1}{V} \int_V \Phi_i dV \quad (28)$$

Compte tenu de la morphologie des milieux poreux, Whitaker applique les équations de continuité, quantité de mouvement et d'énergie aux trois phases liquide, solide et gazeuse dans un volume élémentaire représentatif. Les systèmes d'équation obtenus sont complétés par les relations thermodynamiques appliquées à la phase gazeuse.

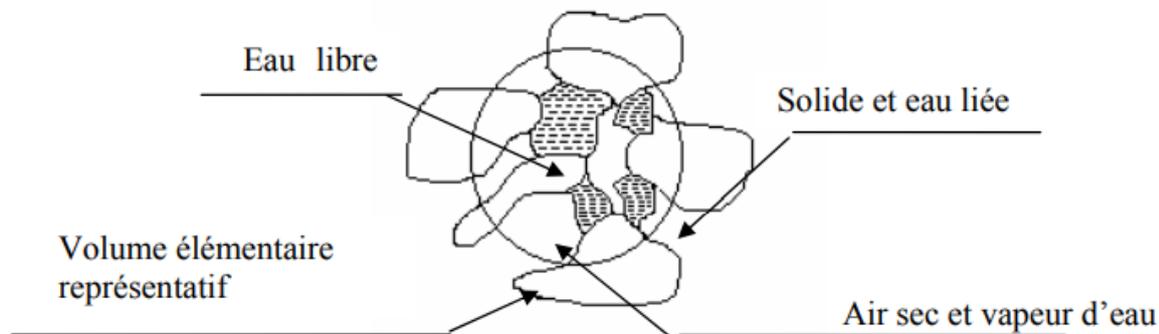


Figure 5 Volume élémentaire représentatif dans un milieu poreux.[32]

L'opération de séchage modifie l'ensemble des propriétés des produits agroalimentaires où le transport de l'eau (liquide ou vapeur) et les composés volatils sont gouvernés par un mécanisme de diffusion moléculaire.

En réalité plusieurs modèles de transfert d'humidité dans **la phase de séchage décroissante sont proposés dans la littérature, cependant le modèle diffusif est généralement le plus adapté**, bien que le mécanisme réel de transfert d'humidité n'est pas totalement maîtrisé. Ce modèle diffusif est utilisé pour adapter les données de séchage de plusieurs produits biologiques [45] [46]. La diffusion de l'humidité dans les couches minces de tomate et d'autres produits agroalimentaires peut être calculée à partir des données expérimentales de séchage en utilisant la seconde loi de Fick énoncée comme suit:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (29)$$

Où :

X : Humidité absolue [kg eau /kg matière sèche].

t : Temps [s].

D_{eff} : Coefficient de diffusion effectif de l'humidité dans le solide [m^2/s].

x : Longueur [m].

La solution de cette équation développée par Crank 1975 [47] (**peut être appliquée aux tranches minces d'un produit agroalimentaire pour plusieurs épaisseurs**), en supposant que la distribution initiale de l'humidité est uniforme, coefficient de diffusion et température constants et l'effet de rétrécissement négligeable. **Le ratio d'humidité MR des tranches minces du produit peut être déterminé par l'expression ci-dessous.** [48] [49] [50]

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (30)$$

Où :

D_{eff} : La diffusivité effective [m^2/s].

L : Épaisseur de la tranche mince du produit, $n=1, 2, 3, \dots$ etc. représente le nombre des termes de la série.

Pour les longues périodes de séchage t et pour des épaisseurs d'échantillons L très petit, les termes dans la sommation de la série ci-dessus correspondant à $n > 1$ sont relativement petits; à cet effet l'équation (30) peut être simplifiée au premier terme de la série seulement. Le ratio d'humidité MR peut être réduit à $\frac{X}{X_0}$ à cause de la valeur de X_e qui est relativement petite devant X et X_0 .

En introduisant le logarithme aux deux membres de l'équation (30), on obtient l'équation ci-dessous.

$$\ln\left(\frac{X}{X_0}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 L^2} \quad (31)$$

Le coefficient effectif de diffusion est déterminé en traçant le graphe donnant les valeurs expérimentales de $\ln\left(\frac{X}{X_0}\right)$ en fonction du temps de séchage t ; le graphe ainsi tracé nous donne une droite de pente $-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}$. Connaissant la pente du graphe et l'épaisseur de la tranche du produit, on peut calculer le coefficient de diffusion effectif.

Cette étude peut être considérée comme le point de départ de nouvelles et modernes théories, puisqu'elle donne une très bonne concordance avec les résultats expérimentaux. [51]

II.7 Mécanisme de séchage

Parmi les techniques d'élimination d'eau par voie thermique, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire l'eau d'un produit; des procédés par ébullition et des procédés par entraînement. [52] , [53].

- Par 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). [52] , [53].
- Par 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'entourne [52] , [53]. Il y'a un séchage par entraînement, si P_t est la pression totale régnant dans l'installation, vérifié l'inégalité : $p < P < P_t$. 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.

Pour sécher un produit, il faut le ventiler par de l'air suffisamment chaud et sec. Un échange de chaleur et d'humidité se produit entre cet air et le produit humide. L'air chaud transmet une partie de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface du solide vers l'air de séchage. Il existe donc deux facteurs importants pour contrôler les processus de séchage:

- Le transfert de chaleur pour fournir la chaleur latente de vaporisation nécessaire.
- Le mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide.

Au contact de l'air chaud, l'eau de la surface externe du produit va être évacuée sous l'effet du gradient de pression entre l'air et le produit. L'eau à l'état liquide va migrer de l'intérieur du produit vers cette périphérie séchée. Au cours de cette migration, des poches d'air apparaissent pour remplacer les pertes en eau. Au cours du séchage, la diffusion de cellule à cellule sera de plus en plus freinée par les cellules qui auront tendance à retenir leur eau. Les derniers points d'humidité seront donc plus difficiles à retirer que les premiers. L'eau libre sera entièrement évaporée à l'exception de l'eau fortement retenue. Le produit rentre en équilibre hygrométrique avec son environnement ; ce qui correspond à la fin du séchage.

Bien sécher, c'est pouvoir maîtriser trois paramètres fondamentaux:

- **L'énergie thermique apportée** qui chauffe le produit et provoque la migration de l'eau vers la surface et sa transformation en vapeur d'eau.
- **La capacité de l'air environnant** (appelé aussi air d'entraînement) à absorber la vapeur d'eau dégagée par le produit. Cette capacité dépend du pourcentage de vapeur d'eau déjà contenue dans l'air avant son arrivée dans le séchoir et de la température à laquelle il a été porté;
- **La vitesse de cet air** au niveau du produit qui, surtout en début de séchage, doit être élevée (jusqu'à une certaine limite) de manière à accélérer l'entraînement de la vapeur d'eau.

Il faut pouvoir **sécher suffisamment rapidement** (pour éviter le pourrissement du produit) **mais pas trop vite** (une croûte risque alors de se former en surface) à trop haute température (le produit se dénature, noircit).

II.8 Différents modes de séchage

L'opération de séchage peut se faire de plusieurs façons. Le critère de classification le plus utilisé repose sur le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur. [54]

II.8.1 Séchage par conduction

Le produit à sécher est mis en contact direct avec une paroi solide chaude où l'échange de chaleur se fait par contact entre la surface de la paroi chaude et le produit. Ce mode de séchage est très utilisé dans l'industrie du textile et de la papeterie. Le flux thermique dans ce mode de transfert est donné par la relation

$$\phi_{cnd} = \lambda A \frac{dT}{dx} \quad (32)$$

Avec:

λ : Conductivité thermique de la pellicule de produit [$W/m.K$].

A : La surface d'échange [m^2].

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

II.8.2 Séchage par convection

On envoie sur le produit à sécher un flux d'air chaud. Il s'établit spontanément entre ce produit et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que :

- Un transfert de chaleur de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.
- Un transfert d'eau en sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air.

Ce mode de séchage représente plus de 85 % des séchoirs industriels [55] et est très utilisé dans le domaine agro-alimentaire. Ce type de transfert utilise l'équation suivante :

$$\phi_{cnv} = hA(Ta - Ts) \quad (33)$$

Où :

ϕ_{cnv} : La quantité de chaleur transférée par unité du temps [W].

h : Le coefficient d'échange par convection [$W/m^2.K$].

A : La surface d'échange [m^2].

$Ta - Ts$: L'écart entre la température de l'air de séchage et la température superficielle du produit à sécher [K].

II.8.3 Séchage par rayonnement

Un rayonnement infrarouge est appliqué sur le produit. Il permet un chauffage rapide des produits en couches minces ($500\mu m$). La génération du rayonnement se fait soit par des

dispositifs électroniques (micro-ondes) soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. Ce mode est très appliqué dans l'industrie des peintures et des pellicules photographiques. La quantité de chaleur transmise au produit par unité du temps par ce mode de transfert est donnée par :

Où :

$$\phi_{rad} = A_1 C \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \varphi \quad (34)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (35)$$

A_1 : Surface du corps recevant le rayonnement. [m^2].

A_2 : Surface de l'émetteur infrarouge [m^2].

T_1 : Température de la source émettrice [K].

T_2 : Température du produit [K].

ε_1 : Emissivité du produit.

ε_2 : Emissivité de l'émetteur.

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

a) Séchage par micro-ondes

Les ondes pénètrent dans les matériaux et subissent une atténuation de puissance liée au transfert. Avec des micro-ondes, on peut sécher à des épaisseurs plus importantes qu'avec l'infrarouge.

b) La lyophilisation

La lyophilisation combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation de cristaux de glace c'est-à-dire un passage direct de l'état solide (glace) à l'état vapeur. Cette dernière est ensuite enlevée de la chambre de séchage par des pompes à vide mécaniques ou des éjecteurs à jet de vapeur.

II.8.4 Séchage solaire

Il s'agit simplement de chauffer le produit par le rayonnement solaire direct (séchage direct) ou par l'intermédiaire d'un capteur solaire qui sert à capter et/ou concentrer le rayonnement solaire afin d'augmenter la température de l'air (séchage indirect). Ce mode de séchage est plus utilisé dans le domaine agro-alimentaire. Les différents modes de séchage cités ci-dessus, à l'exception du séchage solaire, sont de grands consommateurs d'énergie (10-15 % de la consommation d'énergie industrielle mondiale [56]). De plus, ces processus sont difficiles à réaliser notamment dans les zones rurales où l'alimentation en sources d'énergie (l'électricité, gaz...) est souvent difficile. Donc l'utilisation de l'énergie solaire gratuite est utile et permet de réduire le coût du processus notamment dans les pays en développement.

II.9 Le transfert de matière

Le transfert de masse joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base, telles que le séchage. Dans ces opérations physiques, la résistance au transfert de masse constitue le facteur limitant, quoique le transfert de chaleur et le flux du fluide soient impliqués dans le conditionnement et la conservation où le transfert d'humidité, vapeurs, gaz et composés aromatique, influent sur la qualité de l'aliment. [57]

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. [57] Il est à noter que la migration de l'eau (liquide ou vapeur) peut également s'effectuer par « filtration » à travers le produit poreux sous l'action d'une différence de pression entre l'intérieur et la surface. [58]

II.10 Transfert d'eau en séchage

Les corps à sécher sont constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière. [59]. Le séchage peut être décrit comme un transfert d'eau couplé à un transfert de chaleur, dans un matériau poreux non saturé. Dans les produits biologiques le transfert interne d'eau est souvent le phénomène limitant. La taille des pores et la distribution des rayons des pores dans le produit, influent sur le caractère hygroscopique du produit (plus les pores sont petits, plus le caractère hygroscopique est important). [58]

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique de source extérieure au produit à sécher, qui provoque la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau [60]. Les difficultés sont plus complexes dans les aliments solides que dans les liquides. Le transfert de masse implique un transfert d'une variété de composants avec la phase et en interphase par diffusion moléculaire naturelle ou par convection forcée. La masse est transférée par gradient de concentration ou de pression partielle. [58]

II.11 Description physique de la cinétique du séchage

Les caractéristiques du séchage d'un produit ont une meilleure description lorsqu'elles sont représentées par des courbes. L'une des plus intéressantes et indispensable représentation est de l'humidité du produit X (teneur en eau) en fonction du temps t , ou encore la vitesse du séchage $\frac{dX}{dt}$ en fonction du temps t . Ces courbes de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent). Krisher a proposé un autre mode de représentation; c'est la vitesse de séchage $\frac{dX}{dt}$ en fonction de l'humidité X . Ces trois types de représentation, mettent en évidence l'existence de plusieurs phases, pendant le déroulement du séchage. Toutes ne sont pas systématiquement observables. Dans le cas où elles sont identifiables, on distingue : [38]

- La phase transitoire de mise en température du produit à sécher (AB).

- La phase à vitesse de séchage constante (BC).
- la phase à vitesse de séchage décroissante (CD).

C: est le point critique du séchage.

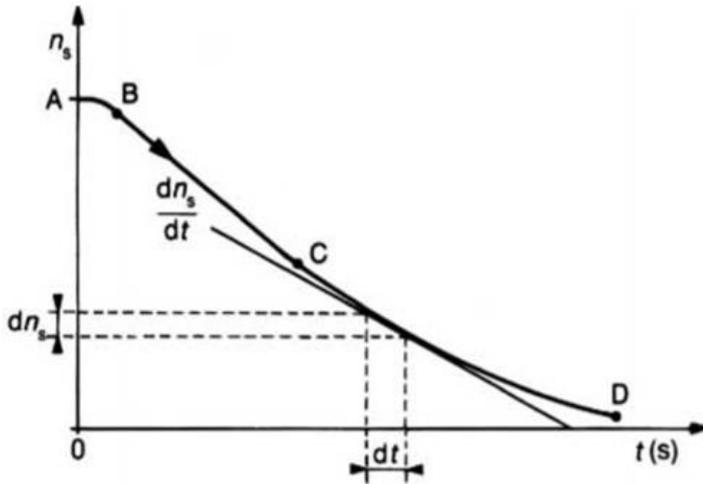


Figure 6 : Courbe de séchage $X=f(t)$.

Où :

n_s : (la teneur en eau X) en [kg d'eau/kg de matière sèche].

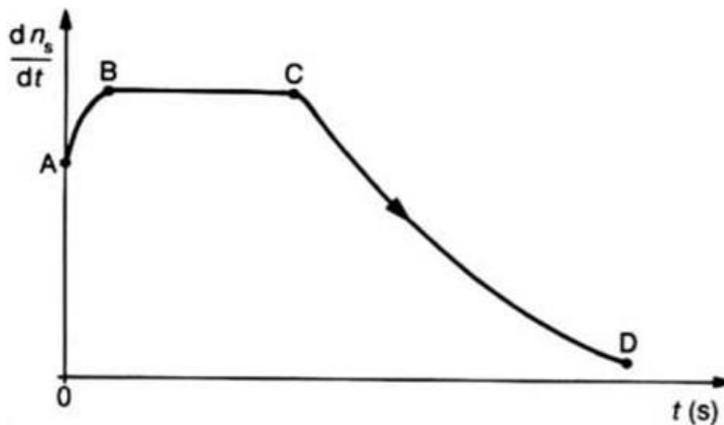


Figure 7: Courbe de séchage $dX/dt=f(t)$.

Où :

$\frac{dn_s}{dt}$: La vitesse de séchage $\frac{dX}{dt}$ en [kg d'eau/ kg matière sèche / seconde]

t : Temps de séchage en s .

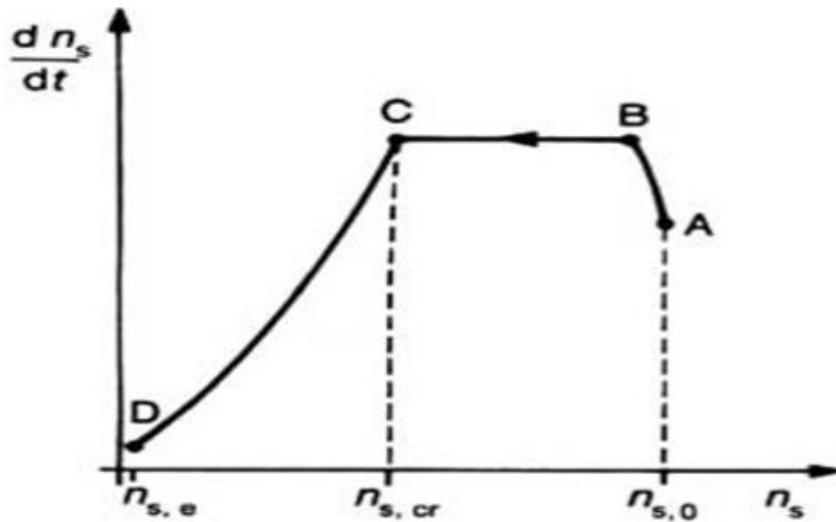


Figure 8 : Courbe de séchage $dn_s/dt = f(n_s)$.

Où :

$n_{s,e}$: Taux d'humidité à l'équilibre en fin de séchage (X_{eq}).

$n_{s,cr}$: Teneur en eau critique X_{cr} .

$n_{s,0}$: Teneur en eau initial du produit.

II.11.1 Phase transitoire (AB)

A: est la valeur initiale de l'humidité. Lorsque le produit, qui a une température et une humidité constante est mis dans le milieu du séchage, le produit ajuste sa température à la température humide, parce que le produit est plus froid que l'air et la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit est faible. Dans ce cas l'air chaud entraîne une élévation de température du produit jusqu'à ce que le transfert de chaleur compense exactement le transfert de matière [61]. Elle n'est pratiquement pas détectée, et n'a pas lieu lors du séchage des produits en particules ou en feuilles.

II.11.2 Phase à vitesse de séchage constante (BC)

Pendant toute la durée de cette phase qui se poursuit jusqu'au point critique, la surface du produit est saturée en eau. Il s'y forme une couche limite, où la pression de vapeur d'eau est quasi égale à celle de l'eau pure dans les mêmes conditions de température et de pression. Cette situation résulte, soit de la présence d'eau en quantité importante à la surface du produit, soit d'une diffusion d'eau, au sein du produit vers sa surface externe, suffisamment rapide. Cette phase est comparable à l'évaporation d'un liquide. La température du produit reste constante et égale à la température dite humide du fluide de séchage. La nature du produit n'intervient pas au cours de cette période, par contre la forme du solide peut influencer sur la vitesse de séchage qui, pendant cette phase [52], [62] est égale à:

$$\frac{dw}{dt} = M \frac{dX}{dt} = K_G A (P_s - P_w) \quad (36)$$

Avec :

M : Masse du produit à sécher [kg].

A : Surface à travers laquelle, s'opère le transfert d'humidité [m^2].

P_s : Pression de vapeur d'eau à la température T et à la surface du produit, pendant la phase à vitesse constante, cette pression est égale à la pression de vapeur saturée à la température du produit ou température humide [P_a].

P_w : Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air [P_a].

K_G : Coefficient global de transfert de matière [s/m].

Cette période s'achève lorsque le produit atteint une teneur en eau appelée, la teneur en eau critique.

II.11.3 Phase à vitesse de séchage décroissante (CD)

C'est la période de ralentissement, à partir de laquelle, la vitesse de séchage met à décroître. La teneur en eau correspondant à la transition entre période BC et CD, est appelée « teneur en eau critique » ou point critique du séchage. Il se crée dans les produits poreux un front d'évaporation se dirigeant progressivement vers l'intérieur de la matière à sécher. La vapeur d'eau ayant un chemin, plus en plus important à parcourir, et pression à la surface du produit diminué, le potentiel d'échange va décroître, et par conséquent, la diminution de la vitesse de séchage. Le flux de chaleur échangé avec l'air n'est plus totalement compensé par la chaleur latente, servant à la vaporisation et on assiste donc à une augmentation de la température du produit. [38]

II.12 Les séchoirs solaires

II.12.1 Classifications des séchoirs industriels

Les séchoirs industriels sont classés selon : [63]

a) Propriétés physiques de la matière

Les propriétés physiques de la matière à sécher (Masse, volume, couleur...) sont le facteur le plus important pour le choix du séchoir.

b) Méthode d'approvisionnement en énergie

Lorsque l'énergie est fournie au produit (transfert de chaleur par convection) par l'air chauffé, le séchoir est classé de type convectif. Si la chaleur est transférée au produit avec un contact direct, le séchoir est classé de type conductif.

c) La gamme de température

Les systèmes de séchage peuvent être classifiés selon la gamme de température de fonctionnement, soit à hautes températures ou à basses températures. Les types de séchoir à hautes températures, sont employés lorsque le produit nécessite un gaz très chaud, et reste en continuité jusqu'à ce que le produit soit séché (le bois par exemple). Pour les types de séchoir à basses températures, ces dernières soient inférieures à 100°C.

d) Mode de répartition des nourritures

d.1 Séchage en couche mince:

Les fruits et légumes sont posés sur des claies, et séchés en couche mince lorsque l'air chaud traverse les produits de bas vers le haut.

d.2 Séchage en couche épaisse:

Ce mode de séchage est généralement utilisé pour les fourrages, les céréales, le café etc. l'air chaud est soufflé dans un amas des produits, reposant sur une grille perforée

II.13 Les différents types des séchoirs solaires

Il y a plusieurs types des séchoirs solaires développés pour servir les divers buts de sécher des produits agroalimentaires selon le besoin local et la disponibilité [64]. On peut classer les séchoirs suivant la façon, dont ils utilisent le rayonnement solaire, en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects, mixte et on peut trouver aussi les séchoirs hybrides.

Note : Un séchoir est dit à convection naturelle si la circulation d'air est assurée par thermosiphon et un séchoir en convection ventilée (forcée) si elle est assurée par une action mécanique. [65]

II.13.1 Les séchoirs naturels

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposés même au sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant. Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessitent 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. Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes de 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).

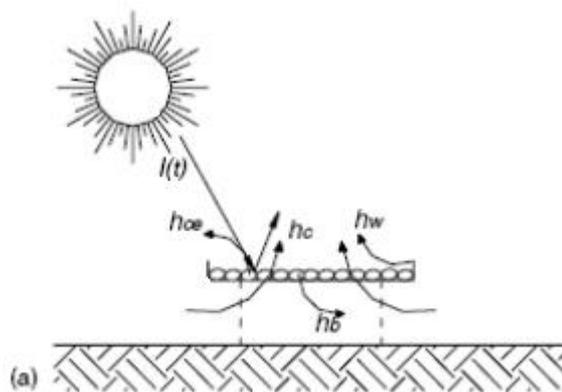


Figure 9: schéma du séchage solaire en plein air. [64]

II.13.2 Les séchoirs solaires directs

Par définition, les rayons du soleil frappent directement les séchoirs. Ce sont des appareils simples et rustiques d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont des clayettes. Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement (effet de cheminée), ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur, du fait de la rusticité des modèles.

Ce type de séchage présente deux avantages :

- Les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes,



Figure 13:Le séchoir solaire coffre [66]

a.2 Le séchoir intégral à convection naturelle

Le séchoir intégral 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 [67]. Pour certaines variétés de raisins et de dattes, l'exposition au rayonnement est considérée essentielle pour le développement de couleur requise dans le produit sec [68]. 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.

a.3 Le séchoir cabane

Le séchoir cabane est caractérisé par une capacité de 35 kg de produit frais pour une surface de 7m² [69]. Les produits sont placés dans le séchoir sur des claies surélevées du sol. La toile de plastique 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.

II.13.3 Les séchoirs solaires indirects

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher. L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur, qui le réchauffent en fonction du débit utilisé.

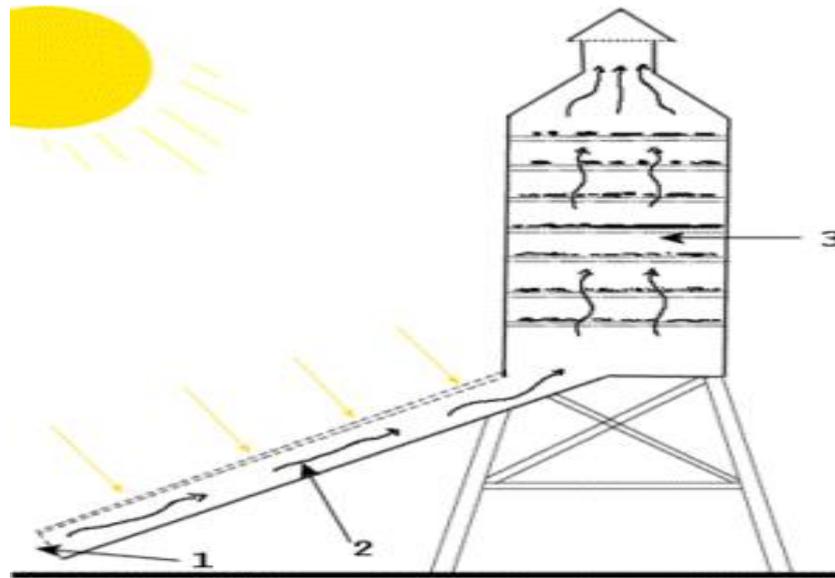


Figure 14: séchoir solaire indirect. [66]

Où :

- Entrée d'air.
- Partie exposée aux rayons du soleil, sous une vitre.
- Claie.
- Cheminée

a) les capteurs solaires

Les capteurs solaires sont des systèmes, qui captent et transforment l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation est obtenue à l'aide des collecteurs thermiques. Il existe deux principaux types de capteurs solaires [70]

- Les capteurs plans
- Les capteurs concentrateurs

a.1 Les capteurs plans

Les capteurs plans absorbent le rayonnement solaire à l'aide d'une plaque noire (absorbeur) et munie de fines conduites destinées au fluide caloporteur. Lorsqu'il traverse les conduites, sa température (liquide ou air) augmente, en raison de la chaleur reçue par la plaque absorbante. Il est constitué d'une couverture transparente (polycarbonate, vitre), qui piège le rayonnement solaire thermique absorbé par la plaque noire qui chauffe les fluides caloporteurs à des températures inférieures à 100°C. [70], [71]

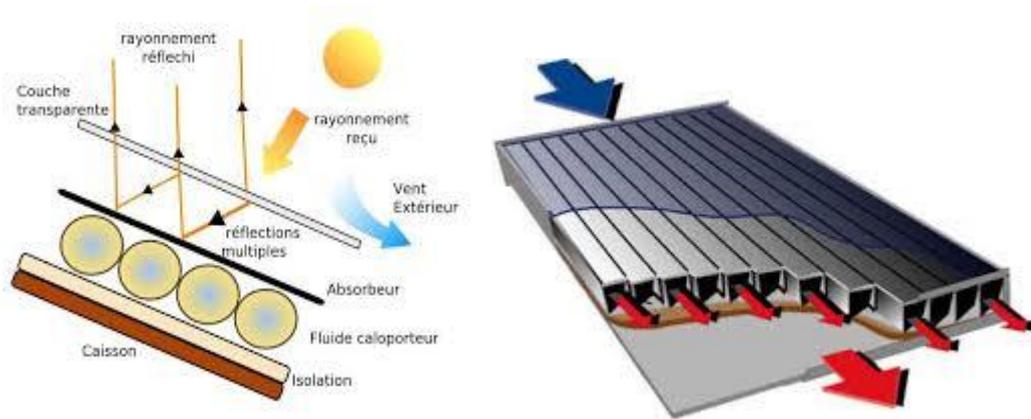


Figure 15: Schéma d'un capteur plan à air [70]

a.2 Les capteurs concentrateurs

Les capteurs solaires plans ne peuvent généralement pas porter les fluides caloporteurs à très hautes températures. C'est pour cela, il est possible d'utiliser des capteurs concentrateurs (Paraboliques) qui concentrent le rayonnement solaire capté sur un tuyau où circule le fluide caloporteur. Cette concentration provoque une augmentation de la température qui peut atteindre plusieurs centaines de degrés Celsius . [70], [71]

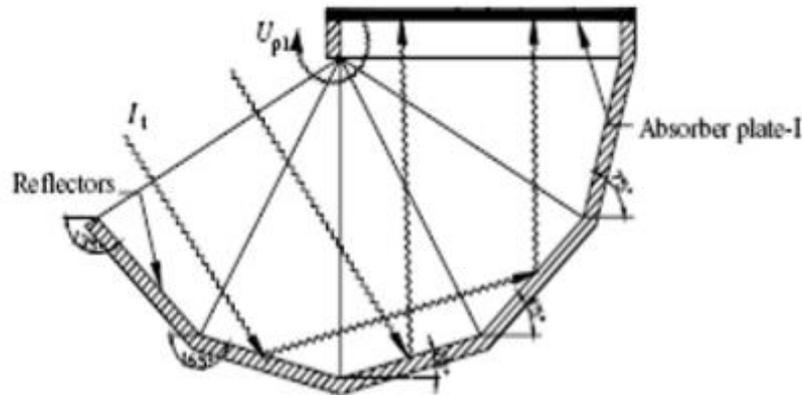


Figure 16: Schéma simple d'un capteur solaire concentrateur. [70]

b) Type du séchoir indirect

b.1 Le séchoir armoire

Le collecteur capte l'énergie solaire. L'air chaud s'élève jusqu'à la chambre de séchage où les produits sont disposés sur des claies superposées. Le séchoir armoire est composé d'un collecteur solaire dont l'intérieur a été noirci et d'une chambre de séchage contenant des claies superposées. Le collecteur est recouvert de feuille de plastique translucide et assure la production de l'air chaud. La chambre de séchage protège les produits du soleil préservant aussi leur qualité.



Figure 17: séchoir solaire indirecte type cabane. [66]

b.2 Le séchoir solaire coquillage

Le séchoir coquillage est un séchoir solaire indirect à convection naturelle, destinée à l'auto consommation et à la vente locale. Il est essentiellement utilisé par les familles, les coopérations et les groupes de femmes. Ce type de séchoir est composé de deux cônes métalliques reliés par une charnière, la tôle peinte en noir assure une bonne captation du rayonnement solaire, des trous perforés dans la tôle inférieure et supérieure permettant la circulation de l'air. L'efficacité du séchoir dépend des conditions climatiques.

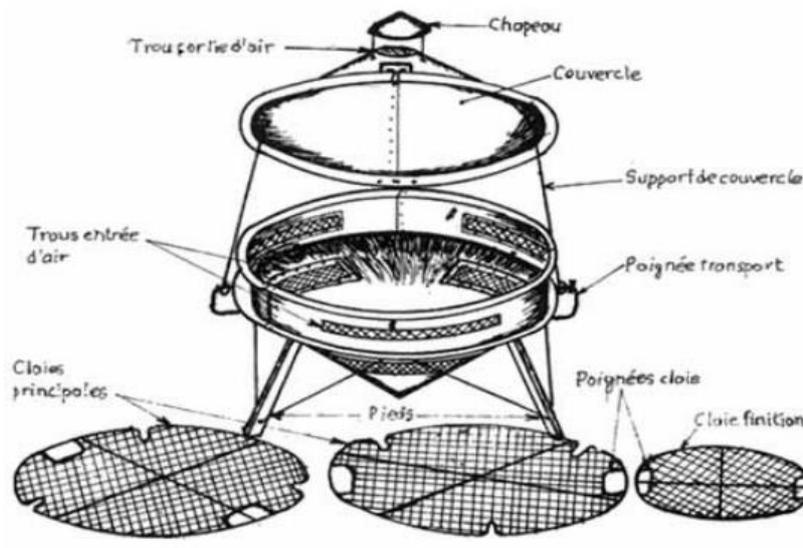


Figure 18: Le séchoir solaire coquillage « schéma ». [66]



Figure 19 : Le séchoir solaire coquillage. [66]

II.13.4 Les séchoirs hybrides

Les recherches se sont orientées vers les séchoirs hybrides utilisant une énergie d'appoint : fuel, électricité, bois, gaz etc. l'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir [69]

- Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet simplement de préchauffer l'air.
- Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

Avantage :

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage. [72]
- Forte augmentation de la production par rapport aux autre type des séchoirs solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

Inconvénients

- Coût de production et d'investissement élevé.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange.
- Personnel qualifié pour la maintenance.

a) Types des séchoirs hybrides

a.1 Séchoir hybride à convection forcée

Principe de fonctionnement : Le toit sert de capteur, un ventilateur assure une circulation importante de l'air permettant de sécher très rapidement les produits. Description technique : L'air est aspiré de l'intérieur par un ventilateur et passe dans un capteur solaire dans le toit. L'air réchauffé arrive dans la chambre de séchage où les fruits sont disposés sur des claies superposées

- **Avantage :**
 - Séchoir très performant.
 - Facilement aménageable dans un bâtiment
- **Inconvénients :**
 - Nécessité de grandes quantités de fruits régulièrement sur l'année pour être rentable.

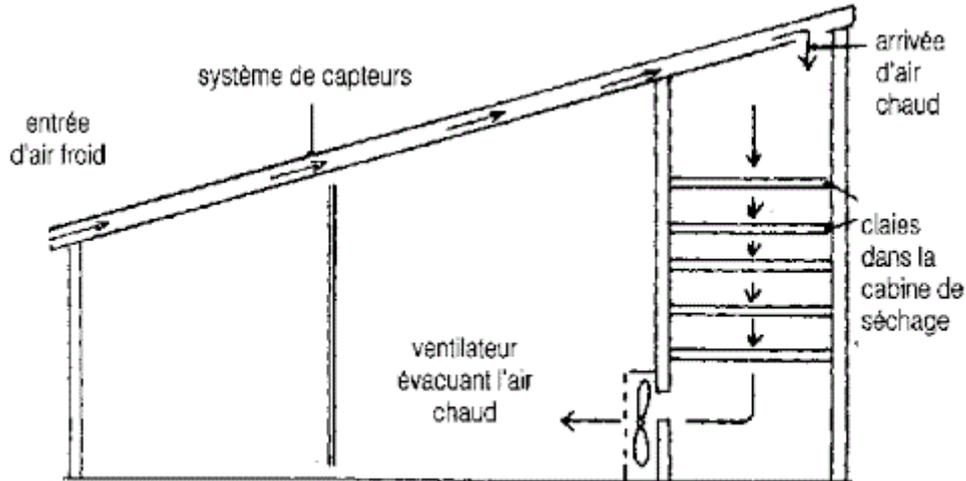


Figure 20 : séchoir solaire hybride à convection forcée. [69]

a.2 Le séchoir hybride solaire - gaz

Principe de fonctionnement : Le collecteur solaire permet de préchauffer l'air. Si la température est insuffisante, un brûleur à gaz se déclenche pour obtenir la température désirée. Les produits peuvent donc sécher quelque soient les conditions climatiques.

a.3 Description technique

La circulation de l'air se fait par convection naturelle du collecteur solaire à l'armoire. Le brûleur à gaz permet d'obtenir la température nécessaire pour sécher correctement les produits quelque soient les conditions climatiques.

- **Avantage :**
 - Séchage rapide et d'excellente qualité.
 - Contrôle de température.
 - Très grande productivité.
- **Inconvénient :**
 - Coût très élevé de l'investissement.
 - Nécessité d'avoir un marché important pour pouvoir écouler les produits.

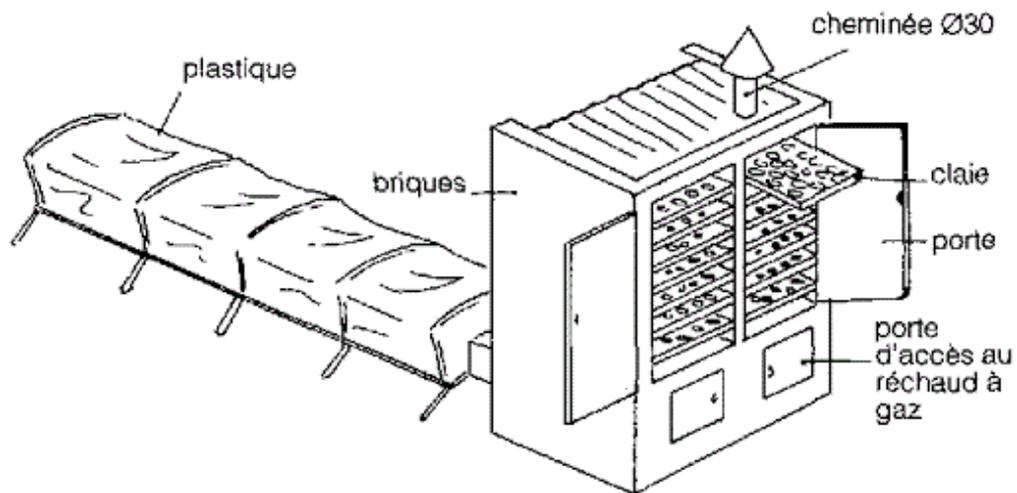


Figure 21: Séchoir solaire hybride solaire-gaz. [69]

II.13.5 Les séchoirs mixtes

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, 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. Un séchoir mixte à circulation naturelle aurait les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage, et une cheminée) mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empète directement sur le produit comme le séchoir intégral. [67]

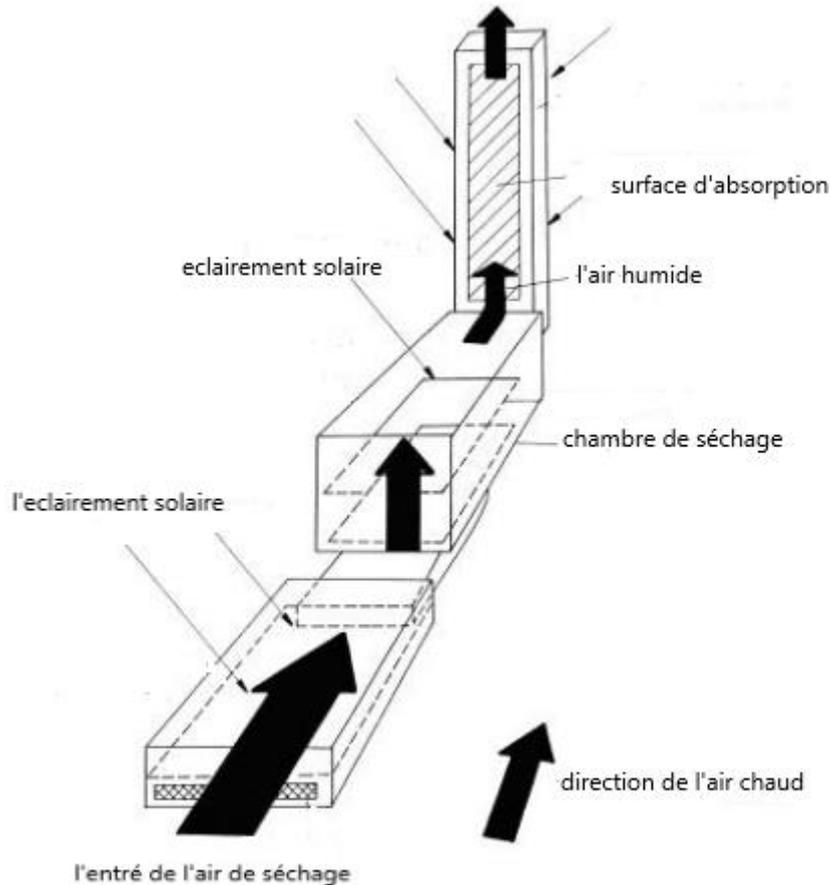


Figure 22: Séchoir solaire à circulation naturelle-type 1. [67]

Une autre conception se compose d'un capteur à air avec une pile de granit (sert le rôle d'un absorbeur et stockage d'énergie) recouvert d'une plaque de verre. La chambre de séchage contenant trois claies superposées, les parois sont des contre-plaqués, la surface supérieure recouverte de verre. La cheminée solaire prend une forme cylindrique, fabriquée avec des feuilles galvanisées équipées d'un chapeau en métal pour conserver hors de la pluie. [67]

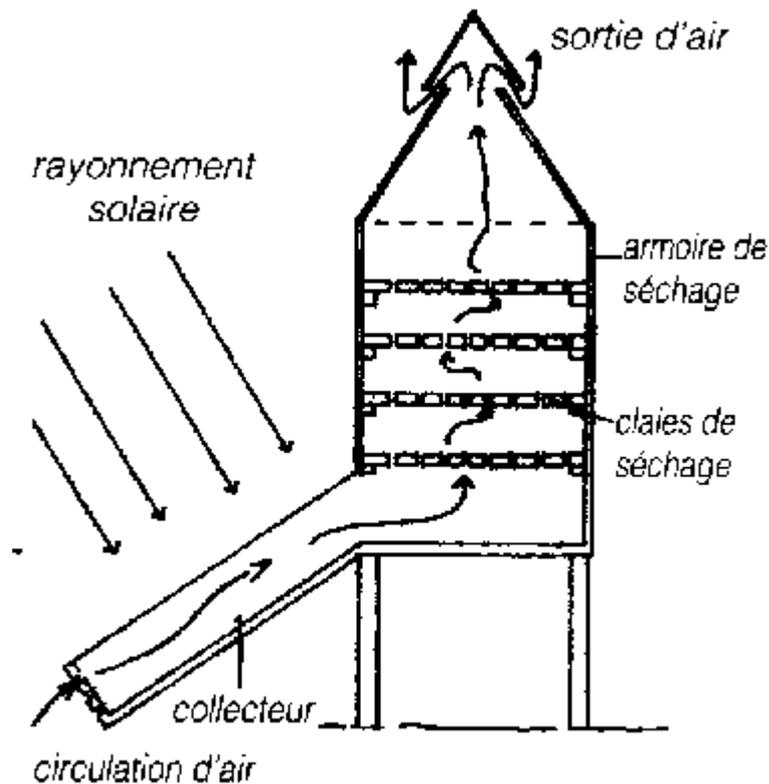


Figure 23: Séchoir solaire à circulation naturelle-type 2- [67]

II.14 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

Les différents paramètres de l'air (température, vitesse, humidité) influent sur le processus de séchage donc sur le temps et la vitesse de séchage des produits.

II.14.1 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 croît 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 vitesses de diffusion de l'eau dans le produit augmentent avec la température.

II.14.2 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.

II.14.3 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. De même que pour la vitesse de l'air, cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente.

II.15 Qualité des produits séchés

Le séchage des produits agroalimentaires doit être effectué tout en assurant le respect de certaines normes.

II.15.1 Modification biochimique

L'exposition pendant une certaine durée d'un produit biologique à une température de séchage élevée peut provoquer des modifications dans sa composition chimique. Ces modifications, généralement considérées comme indésirables sont nombreuses. Mais les plus importantes sont les suivantes [73]

- réaction de MILLARD : brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides,
- rancissement : oxydations des matières grasses,
- destruction de vitamines : notamment destruction de l' α et du β - carotènes, dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altérant leur pouvoir liant ou moussant,
- réaction enzymatique au cas où les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable : oxydation des polyphénols qui entraîne par exemple un brunissement des produits séchés.

II.15.2 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. [73] Dans la plupart des cas il s'agit des arômes contenus dans les produits biologiques destinés à l'alimentation. Par exemple pour un produit comme la menthe, ont 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%.

II.15.3 Pertes de la couleur du produit

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. [74]

II.15.4 Modifications physiques et mécaniques des produits séchés

Le séchage provoque chez la plupart des produit des altérations physiques et mécaniques caractérisées par :

- La migration des solutés vers la surface conduisant à une accumulation des sucres et d'autres solutés au niveau de la surface du produit. Cette accumulation est pernicieuse à la qualité du produit qui doit être en général consommé réhydraté,
- La fusion et migration des matières grasses,
- La modification de la forme : en règle générale, le départ de l'eau du produit entraîne un effondrement du produit sur lui-même. Toutefois, dans certaines situations, un départ d'eau très rapide et l'existence d'une matrice solide permet d'obtenir un produit de même volume mais d'une structure poreuse.

II.15.5 La qualité nutritive

Ceux-ci incluent des paramètres chimiques tels que le contenu de sucre, l'acide ou la vitamine C ascorbique, le contenu de bêta-carotène, et le contenu d'acidité avant et après le séchage. La vitamine C est infectée par les températures élevées; la qualité nutritive inférieure indique la perte nutritive due aux températures de séchage plus élevées et à de plus longues périodes de séchage; une acidité plus élevée indique la détérioration de qualité due à la fermentation. [75]

II.15.6 La qualité sensorielle

C'est une combinaison de différents sens de conception obtenu dans le choix et la consommation du produit. L'aspect jugé par l'œil, par exemple: couleur, taille, forme, uniformité et absence des déformations. C'est un aspect important dans l'évaluation de la qualité du produit. Le sens du goût est limité à: doux, aigre, salé et amer. La saveur implique les sens du goût, de l'arôme et de la sensation. La perte de saveur en produit sec est souvent due aux pertes volatiles, par la même occasion de la migration de la vapeur d'eau du produit vers l'extérieur. De même les réactions chimiques d'oxydation contribuent à la détérioration de la saveur. [76]

II.15.7 La capacité de réhydratations

Quelques fruits et légumes secs sont consommés après réhydratations. Quand l'eau est ajoutée, le produit regagne sa saveur, arôme, texture et aspects originaux. Cependant, le produit ne reviendra jamais complètement à ses états originaux. Plus il s'approche de ses niveaux originaux d'humidité, meilleur sera sa texture et aspect. Des dommages de tissu dans le produit pendant le processus de séchage affectent la capacité de réhydratations du produit sec. Un prétraitement osmotique s'impose avant de commencer l'opération de séchage qui rendra les parois des cellules plus perméables. Lewicki [77] a proposé une méthode pour calculer les capacités de réhydratations, qui sont basées sur la capacité de matériel sec d'absorber l'eau et de tenir des solubles à l'intérieur de la matrice de produit. Ceci tient compte de la capacité d'absorption d'eau WAC (Water Absorption Capacity) et de la capacité de possession de la matière sèche DHC (Dry matter Holding Capacity), et sont donnés par:

$$WAC = \frac{M_r(100-s_r) - M_d(100-s_d)}{M_0(100-s_0) - M_d(100-s_d)} \quad (37)$$

$$DCH = \frac{M_r \cdot s_r}{M_d \cdot s_d} \quad (38)$$

Où :

M_r : Masse du produit réhydraté en [kg].

M_d : Masse du produit sec en [kg].

M_0 : Masse du produit après le séchage en [kg].

s_r : Contenu de matière réhydraté [%].

s_d : Contenu de matière sec [%].

s_0 : Contenu de matière après le séchage [%].

La capacité de réhydratations (RC) du produit sec est le produit de WAC et de DHC, donné par:

$$RC = WAC.DHC \quad (39)$$

Partie 02

II.16 Modélisation mathématique de la cinétique de séchage solaire

Jusqu'à nos jours les chercheurs travaillent encore sur la modélisation de la cinétique de séchage on s'intéresse par la suite à expliquer cette dernière :

II.16.1 Courbe caractéristique du séchage

Cette méthode consiste à décrire la cinétique de séchage par une équation empirique obtenue par ajustement des courbes expérimentales réalisées. Elle vise à rassembler l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur un produit et pour diverses conditions de l'air asséchant sur une seule courbe dite courbe caractéristique de séchage (CCS) [78]. En premier lieu, il faut déterminer la teneur en eau de la plante pour chaque instant de séchage. Durant toutes les expériences, on fixe la température et le débit d'air asséchant et on suit l'évolution de la masse humide $M_h(t)$ du produit à sécher au cours du temps par mesure de poids sur une balance de précision jusqu'à ce qu'elle devienne stationnaire. On procède ensuite à la déshydratation du produit dans une étuve à 105 °C pendant 24 h pour déterminer sa masse sèche M_s . La teneur en eau en base sèche à un instant t est définie par :

$$X(t) = \frac{M_h(t) - M_s}{M_s} \quad (40)$$

En deuxième lieu, la détermination de la cinétique de séchage se fait par calcul direct de la dérivée de la teneur en eau à partir des points expérimentaux en utilisant des logiciels appropriés. Le principe de la méthode développée par VAN MEEL [79] consiste en une normalisation en représentant le rapport de la vitesse de séchage à un instant t $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t$ à la vitesse de première phase $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_I$ dans les mêmes conditions de l'air en fonction de la teneur en eau réduite $\frac{X(t) - X_e}{X_{cr} - X_e}$. Étant donné la première phase est absente dans le cas des produits agroalimentaires, alors on prend $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_I = \left(-\frac{dX}{dt}\right)_0$ et $X_{cr} = X_0$. Ainsi, la forme générale de la courbe caractéristique de séchage est donnée par $f = f(X^*)$:

$$X^* = \frac{X(t) - X_e}{X_{cr} - X_e} = \frac{X(t) - X_e}{X_0 - X_e} \quad (41)$$

$$f = \frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_I} = \frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0} \quad (42)$$

Avec

X^* : Teneur en eau réduite.

X_{cri} : Teneur en eau critique [%Ms].

X_0 : Teneur en eau initial [%Ms]

$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t$: vitesse de séchage à l'instant t [%Ms. min⁻¹].

f : vitesse de séchage normée [-].

$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_I$: vitesse de séchage de la phase I [%Ms. min⁻¹].

$X(t)$: Teneur en eau à l'instant t [%Ms].

$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0$: vitesse initiale de séchage [%Ms. min⁻¹].

X_e : Teneur en eau d'équilibre [%MS].

La teneur en eau d'équilibre X_e est déterminée à partir des isothermes de désorption du produit [80], [81]. Pour une gamme raisonnable de conditions expérimentales constantes durant le séchage (température, vitesse, humidité de l'air, dimensions du produit à sécher et volume et concentration du conservateur), on cherche à ce que la fonction $f = f(X^*)$ vérifie les propriétés suivantes :

$$\text{Pour } X^* \geq 1 \quad f = 1 \quad (43)$$

$$\text{Pour } 0 \leq X^* \leq 1 \quad 0 \leq f \leq 1 \quad (44)$$

$$\text{Pour } X^* = 0 \quad f = 0 \quad (45)$$

Dans le cas où le produit présente la phase I, la détermination de $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_I$ est assez simple. Elle correspond à la vitesse de la phase à allure constante. D'après les travaux de Bimbenet et al. (1984), on ne peut pas évaluer expérimentalement la valeur de $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0$ dans le cas d'un produit ne présentant pas de phase de séchage à vitesse constante (cas des produits agroalimentaires) [82]. Ainsi, la valeur de la vitesse initiale de séchage est déterminée empiriquement à partir des courbes expérimentales de séchage.

II.17 Différents modèles mathématiques de la cinétique de séchage

La modélisation des courbes de séchage solaire consiste à définir une fonction vérifiant l'équation : $X^* = f(t)$ dite équation caractéristique de séchage. [74] [42, 83]

On relève dans la littérature une abondance de modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes de cinétiques de séchage.

Les diverses équations donnent l'évolution au cours de séchage de la teneur en eau réduite en fonction du temps. Ces équations contiennent des constantes qui sont ajustées pour concorder avec les courbes expérimentales de séchage. Par conséquent, elles sont valables seulement dans le domaine d'étude expérimentale pour lequel elles ont été établies. [84] [85]

Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles mathématiques pour décrire le phénomène de changement d'humidité, et le transfert de chaleur et de masse dans le séchage. Parmi ces modèles et les plus utilisés sont:

II.17.1 Modèle de Lewis (1921)

Le modèle de Lewis est la solution générale de Fick. Ce modèle ne considère que la diffusion basée sur la migration d'humidité. Le modèle simple de Lewis est donné comme suit:

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e) \quad (46)$$

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

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = e^{(-kt)} \quad (47)$$

k : est une constante de séchage, qui dépend de la température, l'humidité absolue et la vitesse de l'air ainsi du diamètre du produit utilisé. Ce modèle a été utilisé par, pour décrire les courbes de séchage.

a) Modèle de Henderson et Pabis (1961)

C'est la solution de la deuxième équation de Fick.

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = A \cdot e^{(-kt)} \quad (48)$$

A et k sont des constantes de séchage Ce modèle a été utilisé par İnci Türk Toğrul, Dursun Pehlivan [86] ,pour estimer le temps de séchage

b) Modèle Page (1949) :

Page a proposé une équation de séchage de la forme suivante:

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = e^{(-kt^n)} \quad (49)$$

k et n sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et de la nature du produit, Ce modèle a été utilisé par N. LAHAMRI . [87]

c) Modèle empirique de Wang Singh (1978) :

Wang Singh a proposé un modèle empirique, pour décrire les caractéristiques de séchage du produit utilisé, suivant l'équation:

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = 1 + at + bt^2 \quad (50)$$

a et b sont des constantes de séchage.

d) Modèle Logarithmique:

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = a \cdot e^{(-kt)} + c \quad (51)$$

k, a et c sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et sa vitesse. Ce modèle a été utilisé par İnci Türk Toğrul, Dursun Pehlivan 2002, İnci Türk Toğrul et al 2000, Y.NASRIE, [88], [89] pour décrire les courbes de séchage.

Le tableau suivant regroupe d'autres équations caractéristiques de séchage trouvées dans la littérature pour décrire la cinétique de séchage solaire en couche mince d'un produit.

Tableau 1: autre modèles mathématiques pour décrire la cinétique de séchage.

Modèle	Expression de la teneur en eau	Référence
Newton	$X^* = e^{(-kt)}$	W. K. Lewis, 1921 [20]
Page modifié I	$X^* = e^{-(kt)^n}$	D. D. Overhults & al., 1973 [22]
Page modifié II	$X^* = e^{((-kt)^n)}$	G. M.White & al., 1981 [23]
Two-term	$X^* = a. e^{(-k_0t)} + b. e^{(-k_1t)}$	S. M. Henderson, 1974 [26]
Two-term exponential	$X^* = a. e^{(-kt)} + (1 - a). e^{(-kat)}$	Y. I Sharaf-Elden, & al., 1980 [27]
Approximation de la diffusion	$X^* = a. e^{(-kt)} + (1 - a). e^{(-kbt)}$	A. S. Kassem, 1998 [29]
Henderson et Pabis modifié	$X^* = a. e^{(-kt)} + b. e^{(-gt)} + c. e^{(-ht)}$	V. T. Karathanos, 1999 [30]
Verma et al.	$X^* = a. e^{(-kt)} + (1 - a). e^{(-gt)}$	L. R. Verma, & al., 1985 [31]
Midilli-Kucuk	$X^* = a. e^{(-kt^n)} + b. t$	A. Midilli, et al., 2002 [32]

II.17.1 Paramètres statistiques utilisés

Le coefficient de corrélation (**r**) est l'un des critères pour analyser la précision de l'équation qui décrit les courbes de séchage. En plus de r, les paramètres statistiques **ki-carré** réduits (χ^2) et l'erreur systématique moyenne **ESM** sont utilisés pour étudier la précision du lissage T. L. Toğrul, & D. Pehlivan, 2003 [90]

Ces paramètres statistiques sont calculés comme suit : -

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(X_{eq\ exp,i} - \bar{X}_{eq\ exp,i}) * (X_{eq\ pre,i} - \bar{X}_{eq\ pre,i})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{eq\ exp,i} - \bar{X}_{eq\ exp,i})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{eq\ pre,i} - \bar{X}_{eq\ pre,i})^2}} \quad (52)$$

Avec :

$$\bar{X}_{eq\ pre,i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{eq\ pre,i}) \quad (53)$$

$$\bar{X}_{eq\ exp,i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{eq\ exp,i}) \quad (54)$$

Et :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{eq\ exp,i} - X_{eq\ pre,i})^2}{d_f} \quad (55)$$

$$ESM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{eq\ exp,i} - X_{eq\ pre,i})^2} \quad (56)$$

Où :

$X_{eq\ exp,i}$: Est la i ème teneur en eau expérimentale d'équilibre.

$X_{eq\ pre,i}$: Est la i ème teneur en eau d'équilibre prédite par chaque modèle.

N : Est le nombre de point expérimentaux et d_f est le degré de liberté de régression du modèle

$d_f = N - n$, Où : n désigne le nombre des constantes de chaque modèle

Chapitre III : Informatisation des concepts découverts

De nos jours l'informatique, étant une science de traitement et de stockage automatique de données. Elle envahit le monde et s'avère bénéfique dans tous les domaines qu'ils soient scientifiques, techniques ou autres. Ce qui a conduit à la création de nouveaux outils d'aide de recherche et d'analyses des données. De ce fait, et dans le cadre du projet de fin d'étude, nous avons pensé de réaliser un outil informatisant les données collectées au cours de notre recherche sur le sujet de séchage solaire des végétaux. Cet outil sera décrit dans ce qui suit.

III.1 Analyse et conception

III.1.1 Conception

a) Expression de besoin

Le système sous la forme **d'une interface** permet à l'utilisateur de :

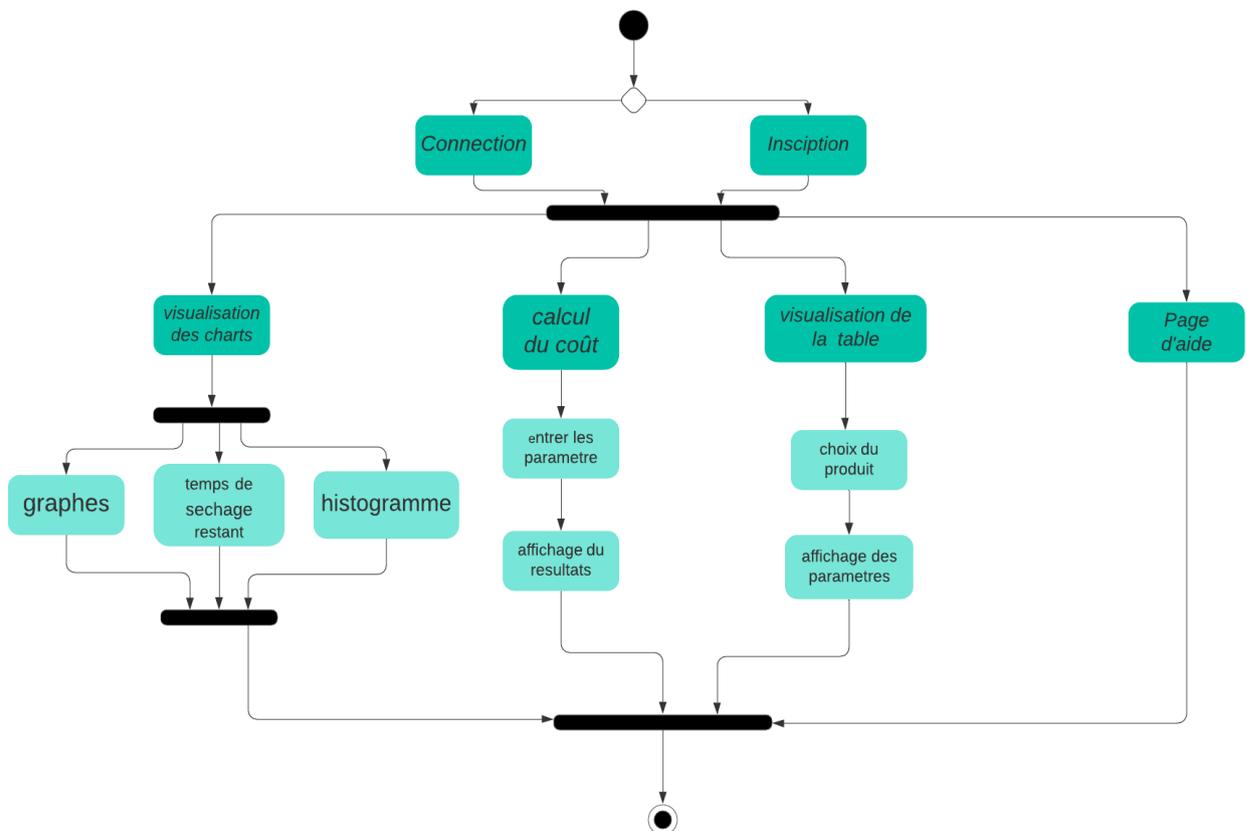
- **Avoir accès à une base de données (BD)** qui contient 25 produits agroalimentaires spécifiquement des végétaux. Cette BD regroupe les paramètres optimaux et les informations utiles aux séchages solaires de ces produits qui sont :
 - La température optimale d'air asséchant.
 - La vitesse optimale d'air asséchant.
 - Le temps approximatif pour le séchage d'une grande production.
 - Le temps de conservation du produit sec.
 - Le taux de séchage d'un produit.
 - Epaisseur optimale pour le séchage d'un produit.
- **Visualiser des graphiques** ou « charts » afin d'avoir une idée sur les différents paramètres influençant le processus de séchage et pour lui aider à prendre une décision par rapport son choix :
 - Un graphe qui représente le séchage indirect de la tomate en trois prototypes différents (convection forcée, convection naturelle et un séchage indirect en convection forcée avec l'utilisation d'appoint électrique ou hybride).
 - Un graphe représentant le séchage solaire de la pomme de terre dans trois régions différentes du pays (nord et hauts plateaux et sud).
 - Un graphe qui représente le séchage de trois « 03 » échantillons de différentes épaisseurs (0.5cm, 1cm et 1.5 cm) de la pomme de terre.
 - Des histogrammes qui représentent le prix de vente des produits les plus demandés au marché local.
- Une autre fonctionnalité qui consiste à **calculer le temps de séchage restant** pour le chaque produit dans notre base de données facilitant la visualisation des données.
- Aussi le **calcul du coût théorique d'investissement** dans séchage solaire destiné aux personnes qui veulent investir dans ce domaine.

b) Acteur du système

Cette interface intéresse deux principaux acteurs qui sont **chercheurs /investisseurs** :

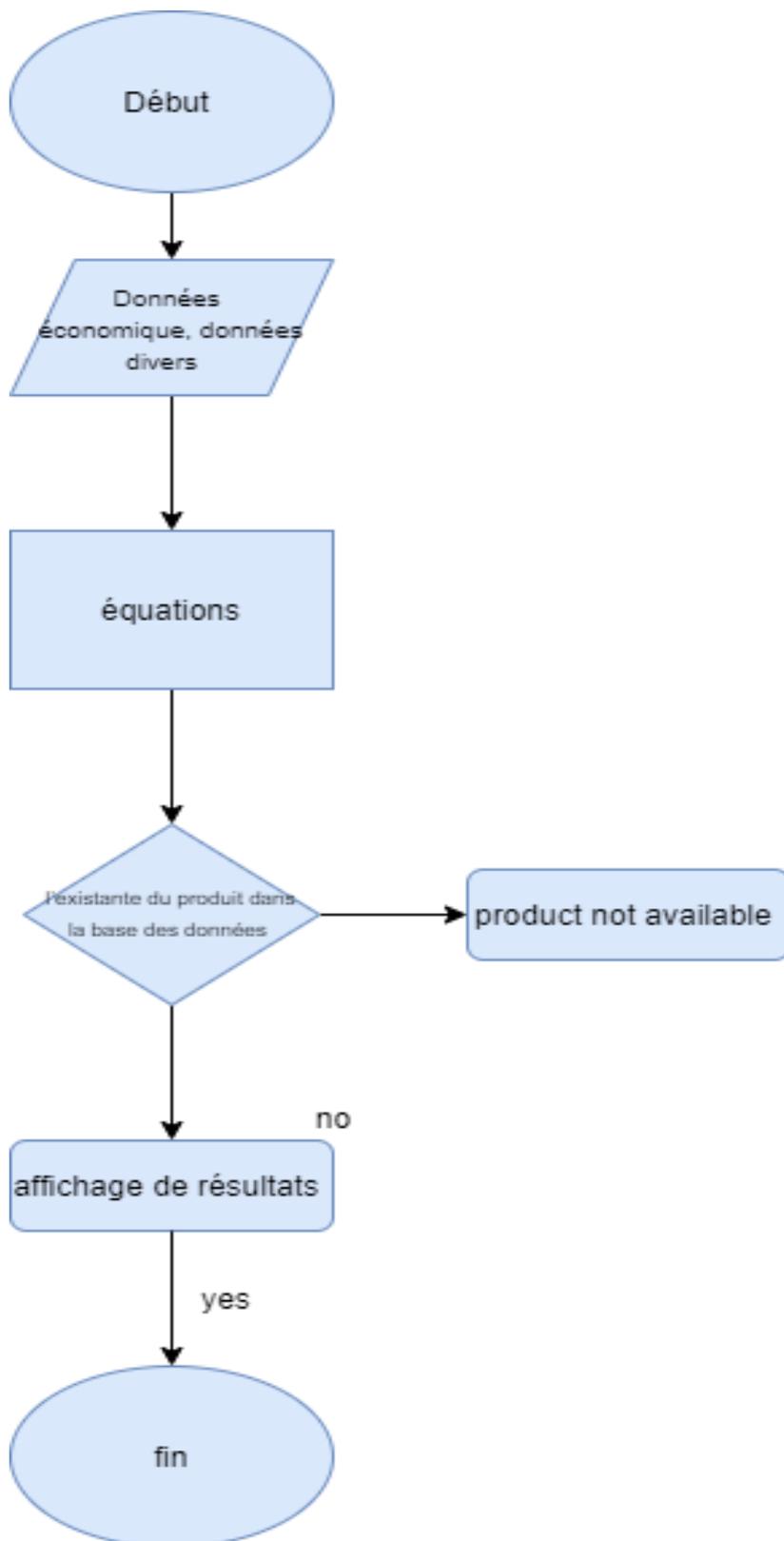
- les chercheurs : vu les obstacles qu'on avait vécus lors notre recherche (due à la pandémie du Covid 19), on a essayé de trouver un moyen pour faciliter la tâche aux futurs chercheurs ou étudiants qui s'intéressent au séchage des végétaux. cet outil donne l'accès à une base de données simplifiée et des cartes faciles à manipuler, de plus des graphes qui représentent l'influence des différents paramètres sur le séchage des aliments.
- les investisseurs « industriels ou agriculteurs » : vu que la pratique courante aujourd'hui veut qu'on rende compte de l'économie d'un système ou d'un procédé par son temps de retour de l'investissement ou un surinvestissement (amortissement) compte tenu des économies réalisées. Ce critère de coût de possession est un critère d'appréciations déterminant pour les industriels et/ ou investisseurs en plus les critères de qualité et du temps de séchage, c'est à cette raison qu'on a essayé de préparer pour l'utilisateur une étude économique valable à tout moment.

c) schéma du plan de site



d) Schéma: organigrammes/module

- Organigramme calcul du coût



:

III.1.2 Collecte de l'information

a) Evaluation du coût

Pour ôter l'eau d'un produit, il faut fournir une certaine quantité d'énergie. Une partie de celle-ci, est utilisée pour approvisionner le ventilateur en électricité et cela a un prix.

De même, la main d'œuvre pour la charge et décharge des produits ainsi que le suivi de l'opération de séchage coûte. Ajouté à cela le prix des produits frais à sécher. L'ensemble de tous ces coûts représentent le prix de fonctionnement du séchoir.

a.1 Coût total annualisé

Le coût total annualisé (C_T) d'un séchoir solaire généralement égale à la somme du coût des matériaux (C_m) et de celui de la main-d'œuvre pour la construction du système de séchage (C_l).

$$C_T = C_m + C_l \quad (1)$$

a.2 Coût annualisé de fonctionnement

Le coût annualisé de fonctionnement (C_{annuel}) est, d'après la méthode d'Audsley et Wheeler [91], égal à la somme des coûts totaux, de maintenance et de fonctionnement :

$$C_{annuel} = [C_T + \sum_{j=1}^N (C_{maint,j} + C_{op,j}) \omega^j] \left[\frac{\omega-1}{\omega(\omega^N-1)} \right] \quad (2)$$

Où :

$C_{maint,j}$: Coût de maintenance pour l'année j. Il est supposé égal à 1% du coût total pour chaque année de fonctionnement,

$C_{op,i}$: Coût de fonctionnement pour l'année j.

N : Nombre d'année de fonctionnement du séchoir.

Avec :

$$\omega = \frac{(100+i_{in})}{(100+i_f)} \quad (3)$$

Où :

i_{in} : Taux d'intérêt [%].

i_f : Taux d'inflation [%].

Le coût de fonctionnement pour la première année se compose de:

$$C_{op,0} = C_{PF}^0 + C_{Mo}^0 \quad (4)$$

C_{PF}^0 , C_{Mo}^0 : Désignent respectivement les coûts d'acquisition des produits frais et de la main d'œuvre pour l'année (0).

- Achat de produits frais :

$$C_{PF}^0 = M_{PF} \times C_{APF}^0 \quad (5)$$

- Coût de la main d'œuvre :

$$C_{MO}^0 = n_j D_c C_{UMO} \quad (6)$$

Avec :

M_{PF} : Poids de produits frais [*kg*].

C_{APF}^0 : Coût d'achat de produits frais [*DA*].

n_j : Nombre de jour de fonctionnement [*jours*].

D_c : Durée de cycle de séchage [*heure*].

C_{UMO} : Coût de main d'œuvre par jour [*DA*].

Prenant le cas **d'un séchoir solaire type serre** [92] [93] :

Tableau 2 : données économique.

Coût total du séchoir	150000.00 DA
Coût de maintenance	1% du coût total pour la première année
Coût de main d'œuvre	2000.00 DA/personne/jours
Coût d'électricité (appoint + ventilation)	60000.00 DA/an

Tableau 3 : données divers.

Capacité de séchoir	80kg
Durée d'un cycle de séchage (heurs)	Dépend du produit
Nombre de jours de fonctionnement sur une année (jours)	183
Heure de début des cycles de séchage	Dépend de la saison
Taux d'inflation	5%
Taux d'intérêt	8%

Tableau 4 : prix d'achat/ vente de trois produit.

	Frais	Séché
tomate	40.00 DA/kg	1200.00DA/kg
Pomme de terre	50.00 DA/kg	150.00DA/kg
Pomme	150.00DA/kg	700.00DA/kg

b) Étude paramétrique

Dans cette partie, on s'intéresse à l'étude paramétrique du séchage de certains végétaux et pour différents types de séchoirs.

b.1 Le séchage dans différents séchoirs

On a pris les résultats expérimentaux du séchage solaire de la tomate [9] pour montrer la différence entre ces derniers les tableaux ci-dessous donnent les détails de l'expérience :

Tableau 5 : résultats expérimentaux.

Temps de séchage	Séchoir hybride	Séchoir indirect en convection naturelle	Séchoir indirect en convection forcée
	Humidité absolue en %MS	Humidité absolue en %MS	Humidité absolue en %MS
t=0h	13.10	13.10	13.10
t=30min	12.10	13.90	12.50
t=1h	11.00	12.70	12.00
t=1h30min	9.50	12.00	11.10
t=2h	8.00	11.90	10.80
t=2h30min	7.50	11.50	9.90
t=3h	6.00	11.00	9.40
t=3h30	5.00	10.50	9.00
t=4h	4.00	10.00	8.00
t=4.5h	3.00	9.30	8.50
t=5h	2.50	8.50	6.90
t=5.5h	2.00	7.90	6.50
t=6h	1.70	7.50	5.90
t=6.5h	1.00	7.20	5.10
t=7h	0.50	7.00	5.00
t=7.5h	0.13	6.10	4.50
t=8h	0.13	5.50	4.00
t=8.5h	/	5.30	4.00
t=9h	/	5.20	3.90
t=9.5h	/	5.00	3.80
t=10h	/	4.90	3.00
t=10.5h	/	4.50	2.80
t=11h	/	4.10	2.30
t=11.5h	/	3.90	2.00
t=12h	/	3.20	1.80
t=12.5h	/	2.80	1.10
t=13h	/	2.50	0.90
t=13.5h	/	2.00	0.70
t=14h	/	1.50	0.13
t=14h30	/	1.00	0.13
t=15h	/	0.50	0.13
t=15.5h	/	0.20	/
t=16h	/	0.13	/
t=16h30min	/	0.13	/
t=17h	/	0.13	/

Ces expériences ont été réalisées sur le toit du laboratoire des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (LENREZA), où ils ont séché les rondelles de la tomate

d'une humidité initiale de 93% dans trois prototypes ,le premier est un séchoir indirect en convection naturelle où ni la température ni la vitesse d'air sont contrôlées, le deuxième et en convection forcée où la vitesse de l'air peut être varier selon les besoins, cependant le dernier prototype est mené d'un appoint électrique . Les expériences de séchage ont été exécutées à 65°C avec une épaisseur d'échantillon d'approximativement de 1cm, et pour une vitesse d'air 1m/s pendant la période de l'année la plus défavorable pour le séchage (Novembre). L'opération de séchage est considérée achevée lorsqu'on arrive à l'humidité relative d'équilibre du produit qui est dans ce cas de 11%), valeur de la teneur en eau à base humide où le développement du tout micro-organisme est inhibé. [94]

b.2 L'influence de l'épaisseur des tranches sur la teneur en eau en fonction du temps

Pour montrer l'influence de l'épaisseur du produit on a choisi les résultats expérimentaux de [95] pour le séchage de trois épaisseurs de la pomme de terre.

Tableau 6 : effet de l'épaisseur sur le séchage de la pomme de terre.

Temps de séchage	La teneur en eau pour les différentes températures [kg d'eau/kg ms]		
	Ep=5mm	Ep=10mm	Ep=15mm
t=0min	4.5	4.5	4.5
t=50min	3.7	3.1	3.4
t=100min	2.3	2.3	2.8
t=150min	0.5	1.5	2.3
t=200min	0.2	0.9	1.5
t=250min	0	0.4	1
t=300min	/	0.1	0.9
t=350min	/	0	0.5
t=400min	/	/	0.3
t=500min	/	/	0.1
t=550min	/	/	0

Nouha GAGUI [95] A réalisé une expérience sur les tranches de la pomme de terre afin de connaître le comportement du séchage de ces derniers dans un séchoir solaire indirect à convection forcée équipé d'une résistance électrique de P=1500 kW contrôlée par un thermostat où la vitesse est fixée à 1m/s et la température est de 60°C, l'expérience a été effectuée le mois de mars au laboratoire des énergies nouvelles et renouvelables des zones arides.

b.3 Comparaison entre le séchage dans les différentes régions du pays

Pour cela on a pris aussi les résultats expérimentaux de séchage de la pomme de terre pour 3 différents travaux dans 03 régions du pays :

Tableau 7 : séchage de la pomme de terre région du nord «Bousmail ».

Temps	Nord
	Teneur en eau réduite (sans unité)
t=0h	1.00
t=30min	0.80
t=1h	0.60
t=1h30min	0.40

t=2h	0.30
t=2h30min	0.10
t=3h	0.09
t=3h30	0.09
t=4h	0.00

Pour cette première expérience ils ont séché les rondelles de pomme de terre d'une teneur en eau initiale de 75% pour avoir un produit sec de 10% de teneur en humidité. En utilisant un séchoir solaire indirect composé de deux parties principales; un capteur solaire et une chambre de séchage dont l'air chaud est forcé à l'aide de deux ventilateurs électriques alimentés par un panneau photovoltaïque. La vitesse de l'air était de 1m/s alors que la température moyenne de 50°C dans ce séchoir. Ainsi que l'humidité du produit est évacuée vers l'extérieur via la sortie d'échappement. L'expérience est réalisée en mois de juillet à L'UDES région de Bousmail. [96]

Tableau 8 : séchage de la pomme de terre région des hauts plateaux « Constantine ».

Temps	Haut plateaux
	Teneur en eau réduite
t=0h	1.00
t=1h20min	0.85
t=2h30min	0.75
t=2h40min	0.60
t=3h40min	0.50
t=4h10min	0.30
t=5h20min	0.19
t=5h30min	0.15
t=5h50min	0.10
t=6h50min	0.09
t=8h20min	0.00
t=11h5min	0.00
t=23h50min	0.00

Pour l'étude du comportement du séchage appliqué sur une grande quantité des tranches de la pomme de terre, [97] ont effectué une expérience en mois d'août dans un séchoir solaire indirect dans la région de Constantine. La température moyenne de l'essai était 55°C et une vitesse d'air 1m/s.

Tableau 9 : le séchage solaire de la pomme de terre au sud Algérien « Ouregla ».

Temps	sud
	Teneur en eau réduite (sans unité)
t=0h	1.00
t=30min	0.60
t=1h	0.30
t=1h30min	0.15
t=2h	0.10
t=2h30min	0.09
t=3h	0.00

Afin d'étudier le comportement des pommes de terre [98] ont réalisé cette expérience dans un séchoir hybride (appoint PV) avec une vitesse d'air fixé à 1m/s et une température moyenne de 50°C.

III.1.3 Les histogrammes

Le prix de vente des produits séchés le plus demandés au marché est représenté dans le tableau suivant [99] [100] :

Tableau 10 : Le prix de vente des produits séchés les plus demandé au marché.

Produit	Prix séché /kg
Abricot	1400DA/kg
Raisin	1200 DA/kg
Prunes	800 DA/kg
Tomate	1200DA/kg
Pomme	600DA/kg
figes	600DA/kg

III.2 Réalisation et implémentation de l'interface

Dans cette partie nous verrons les étapes de l'implémentation de notre application web notamment le choix des outils, l'implémentation des modules ainsi que les interfaces graphiques réalisées.

III.2.1 Outils et technologies utilisées:

a) Choix des outils

- **HTML5 : Langage de structuration des pages web**

Le HTML est un langage de balisage des pages Web. Aujourd'hui le HTML est destiné uniquement à représenter la structure d'une page : titres, sous-titres, paragraphes, images, formulaires de saisie, liens hypertextes, etc.



- **CSS : Langage de présentation des pages Web**

Le terme **CSS** est l'acronyme anglais de **Cascading Style Sheets** qui peut se traduire par "feuilles de style en cascade". Le CSS est un langage informatique utilisé sur l'internet pour mettre en forme les fichiers HTML ou XML. Ainsi, les feuilles de style, aussi appelé les fichiers CSS, comprennent du code qui permet de gérer le design d'une page en HTML. (Taille, position sur la page, couleurs, police des caractères, largeur, hauteur, empilement, etc.)

- **JavaScript : Langage de programmation côté utilisateur**

JavaScript est un langage de script orienté objet principalement utilisé dans les pages HTML. A l'opposé des langages serveurs (qui s'exécutent sur le site), JavaScript est exécuté sur l'ordinateur de l'internaute par le navigateur lui-même. Ainsi, ce langage permet



une interaction avec l'utilisateur en fonction de ses actions (lors du passage de la souris au-dessus d'un élément, le redimensionnement de la page...).

- **Bootstrap :**



Bootstrap est un Framework (une librairie) développé par Twitter. Ce dernier utilise les principaux langages de développement web (HTML, CSS & JavaScript). Il s'agit d'un code qui raccourcit différentes fonctionnalités (plugins utilisant la bibliothèque JQuery), permettant au développeur de gagner du temps et de réaliser simplement des codes complexes (animation, carrousel, tableau, histogramme, ...).

- **PHP : Langage de programmation coté serveur**

Le PHP est un langage qui est lu et exécuté sur le serveur où se trouve la page HTML, avant que celle-ci ne soit envoyée au navigateur (l'utilisateur) qui en demande l'affichage. Le code PHP peut être inséré à un endroit précis d'une page, pour compléter le code HTML, CSS, voire JavaScript.



Pourquoi PHP ?

1/ Facilité d'accès : Le PHP est un langage Open Source et qui est donc gratuit d'utilisation avec une documentation complète et également assez simple à apprendre au sens où il ne demande pas de prérequis particuliers.

2/ Le PHP est reconnu et donc supporté internationalement.

3/ Il se distingue par ses performances d'exécution en terme de rapidité ainsi que sa solidité.

4/ Bonne gestion des requêtes SQL .

- **MySQL : Système de gestion de bases de données**



MySQL est un système de base de données, souvent couplé au langage PHP. Ainsi, dans le cas d'un site Web, le langage PHP va établir la connexion à la base de données, puis envoyer le code SQL nécessaire aux opérations sur la base de données. En retour, MySQL va renvoyer des données ou des informations, qui seront traitées par le code PHP.

III.2.2 Prototype de l'interface « vue global de site »

Une présentation générale de notre application web qui est un outil d'aide à la décision par rapport aux différents paramètres de séchage solaires des végétaux :

a) Page d'inscription

Pour accéder au site pour la première fois l'utilisateur doit avoir un compte ce qui fait qu'il doit inscrire.

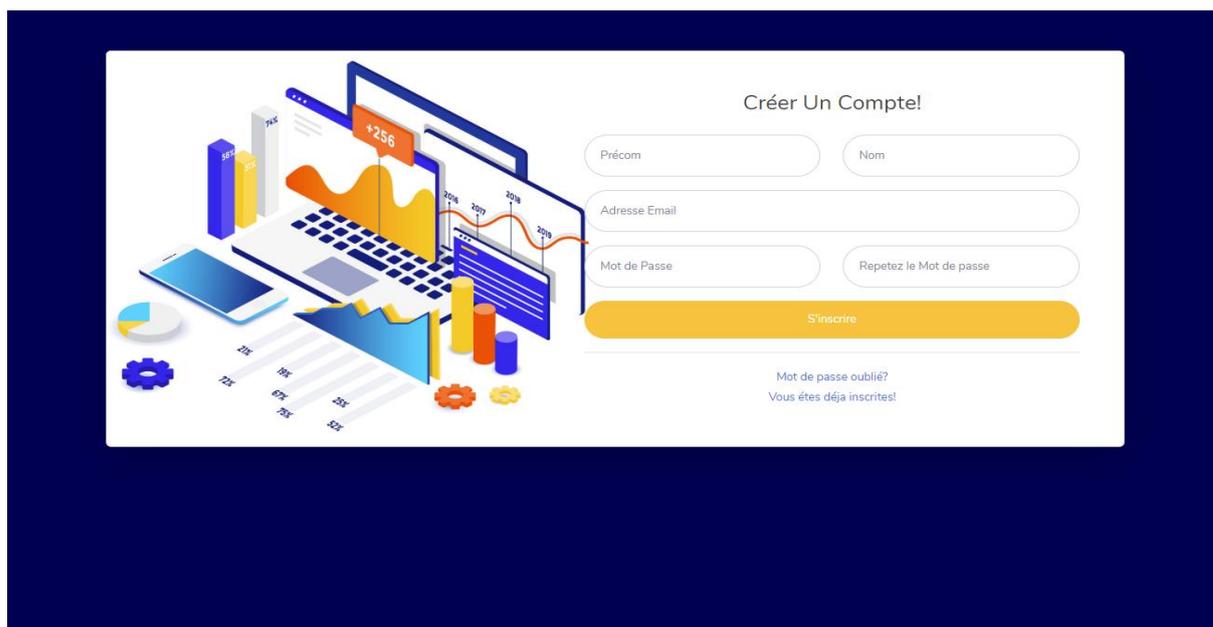


Figure 24 : vue globale sur la page d'inscription.

b) Page de connexion

Afin de réaccéder au site il suffit juste de se connecter.

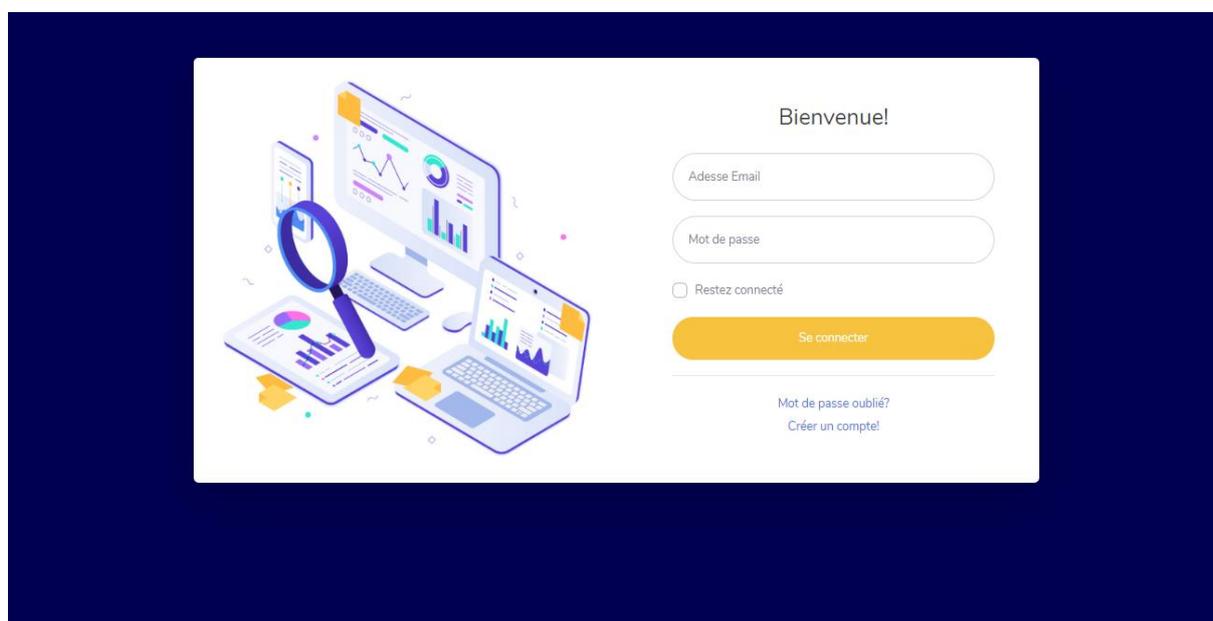


Figure 25 : vue globale sur la page de connexion.

c) Le Dashboard

C'est la page d'accueil de notre site.

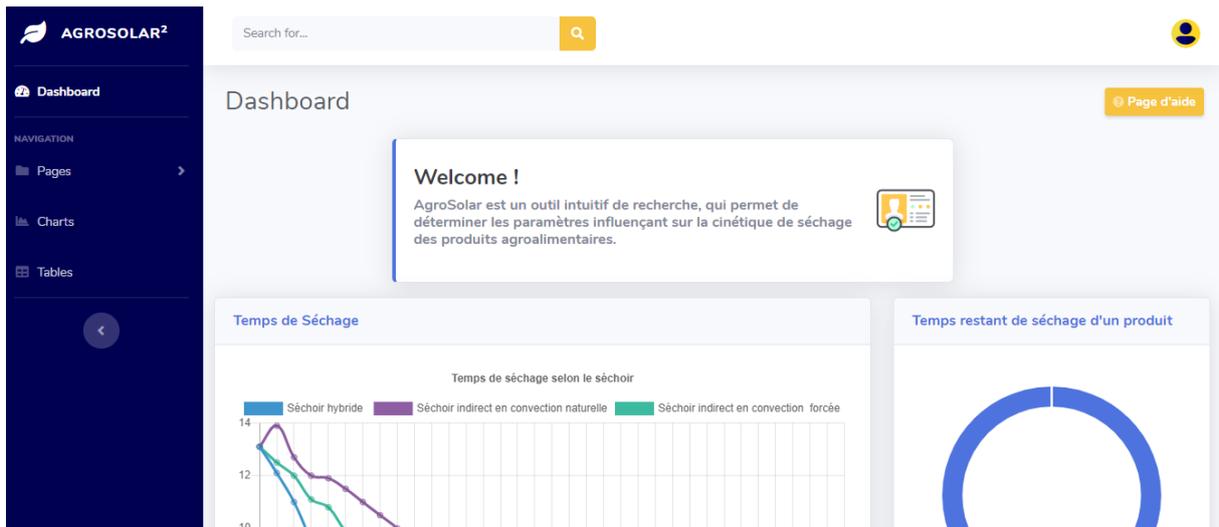


Figure 26 : vue globale sur le Dashboard 1.



Figure 27 : vue globale sur le Dashboard 2.

d) Page d'aide

Cette page contient les différentes cartes pour définir les fonctionnalités du site afin d'aider l'utilisateur à naviguer dans ce dernier, ainsi que des cartes où on a répondu aux questions fréquemment posées sur le séchage solaire.



Figure 28:vu global sur la page d'aide « explication du fonctionnalités du site ».

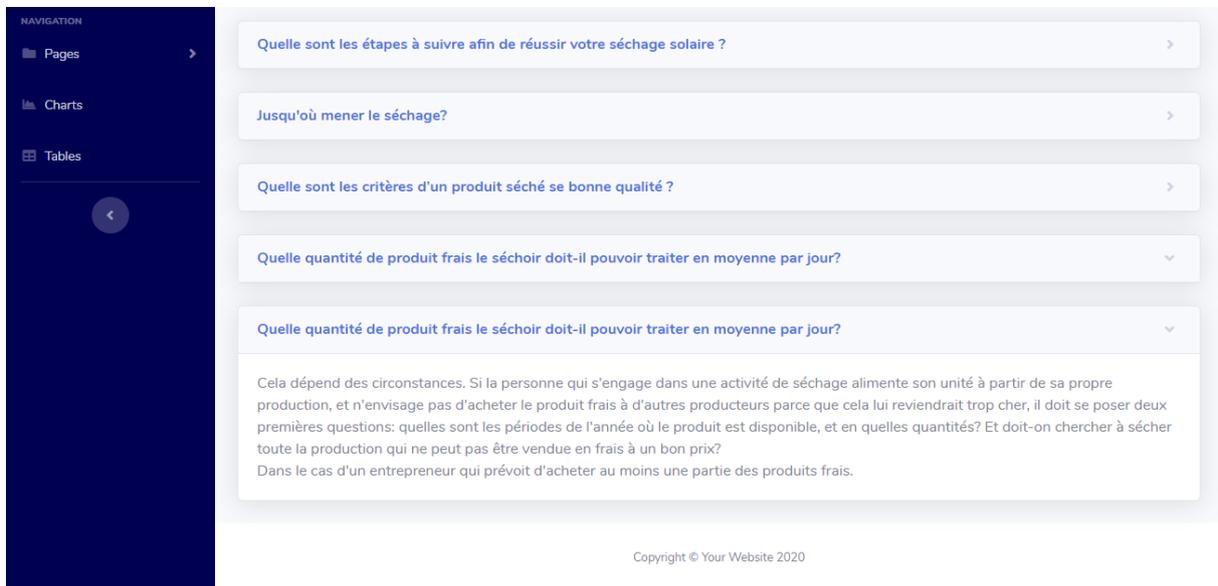


Figure 29:vu global sur la page d'aide « informatisation du l'utilisateur ».

e) Table de la base des données

La table qui représente la base de données.

The screenshot shows the AGROSOLAR² dashboard interface. On the left is a dark blue navigation sidebar with options for Dashboard, Pages, Charts, and Tables. The main content area is titled 'Informations sur les paramètres de séchage' and contains a table of drying parameters. The table has three columns: 'Produit', 'Parametre', and 'valeur'. It lists parameters for Apricots, Pineapples, and Bananas, such as initial and final water content, drying duration, and temperature. A pagination bar at the bottom indicates 'Showing 1 to 10 of 65 entries' and includes navigation buttons for 'Previous', '1', '2', '3', '4', '5', '6', '7', and 'Next'.

Produit	Parametre	valeur
Abricots	Teneur en eau initial :	85%
Abricots	Teneur en eau final :	15-12%
Abricots	Durée de séchage :	72 heures
Abricots	Durée de conservation :	12 mois
Abricots	Durée de séchage :	68 heures
Ananas	Teneur en eau initial :	87%
Ananas	Teneur en eau final:	20-15%
Ananas	Durée de séchage:	jours
Ananas	Température :	60°
Bananes	Teneur en eau initial :	52%

Figure 30 : vue globale sur la base de données .

Chapitre IV : discussions et commentaires

Dans ce chapitre on présente les différentes fonctionnalités de l'interface conçue, et les possibilités de simulations qu'elle permet de réaliser.

IV.1 La table des paramètres optimaux:

Dans cette partie de l'interface on a choisi pour l'utilisateur un ensemble de paramètres optimaux de séchage solaire de quelque produit agroalimentaire. Le choix s'y porter sur différents produits cultivés localement à travers toutes les régions de notre pays ou même des produits importés et cela pour assurer la variété et enrichir la base de données de notre site.

Le choix de ces paramètres est fait sur la base de notre étude bibliographique et à l'aide de notre recherche sur web pour chaque produit. Cette base de données est le fruit d'efforts intenses.

Pour une démonstration de l'utilisation de notre site, prenons plusieurs produits à séché.

❖ Cas de LA TOMATE

La tomate présente une très haute teneur en eau. Son humidité relative initiale peut atteindre 95%. Pour notre base de données, nous avons opté pour une valeur moyenne de 93% afin qu'elle soit la plus proche à la réalité.

En revanche la teneur en eau finale dépend essentiellement du produit fini et de la façon de sa consommation, la valeur recommandée est de 13%.

Lors du séchage à une haute température le produit se dénature et noircit. Il faut prendre en considération les caractéristiques et les propriétés du produit. La température qu'on a choisie pour l'utilisateur est de 65°C qui est considérée comme « la meilleure température » pour sécher ce produit. Les tranches de tomate séchée préservent leurs propriétés organoleptiques, de plus en pensant à la ré-humidification du produit sec lors de son utilisation la tomate séchée à 65°C se réhydrate mieux que celle séchée à d'autres températures.

Le meilleur procédé de séchage est d'extraire l'humidité en vitesse, sinon la moisissure va prendre le dessus du produit c'est-à-dire il moisira avant qu'il ne soit sécher. Cependant la vitesse ne doit pas être trop élevée sinon une croûte risquera de se former en surface empêchant l'eau de sortir. Pour ce produit on a choisi une vitesse optimale d'air asséchant de 1.5m/s.

Sachant que l'effet de la vitesse de l'air est moindre en comparaison avec l'effet de la température. Ceci s'explique aussi par le fait que la température du produit s'abaisse c'est-à-dire un 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 implique une diminution de l'évaporation de l'eau. Cela est confirmé par les travaux suivants [101], [102], [103], [104] ce qui fait que le couple adéquat de séchage de la tomate est 65°C et 1.5m/s. [105]

Le temps de séchage n'est pas une valeur fixe, il dépend de la masse initiale du produit. Sécher des échantillons pour faire une expérience se diffère du séchage d'une grande production, donc le temps de séchage peut varier de quelques heures à quelques journées. Par exemple la durée pour sécher une quantité de 100kg de tomate ne dépasse pas 72h pour y avoir un produit final près à la conservation. Les tomates ne supportent pas un temps de séchage trop long. Au-delà de trois jours dans le séchoir, elles s'oxydent, la couleur devient brune. Pour éviter le noircissement, la seule solution est un temps de séchage très court (pas plus de trois jours). [106]

Le taux de séchage est le rapport entre le poids du produit frais et le poids du produit sec. Pour la tomate ça valeur est égal à 18/1 qui signifie qu'il faut 18 kg de produit prêt à sécher pour obtenir 1 kg de produit sec près à la consommation. Le rendement tient compte des pertes lors de l'épluchage et du parage.

En cas d'un produit séché de bonne qualité la durée de conservation de la tomate séchée égale à 12 mois.

❖ Cas des OIGNONS

Les oignons sont séchés afin de passer d'une teneur en eau initiale de 90% à une valeur finale recommandée de 4%. Aussi on doit mettre en évidence que l'oignon présente un taux de séchage de 10/1.

Vu que la température d'air asséchant représente le paramètre le plus important lors du séchage des aliments et l'augmentation de cette dernière donne une hausse de la chaleur, ce qui provoque une évaporation rapide de l'eau du produit. Toutefois, le séchage à de hautes températures engendre des distractions sensorielles, de la couleur et de la composition chimique du produit. Notre choix s'est porté pour une température de 55°C qui semble être la meilleure pour le séchage des oignons.

En revanche l'augmentation de la vitesse d'air chaud favorise les échanges convectifs, accélérant ainsi le processus de séchage et entraîne un séchage presque uniforme. Ce qui nous a amené à choisir une vitesse de 1.5m/s pour le séchage des oignons. On peut noter aussi qu'à la fin du séchage, les oignons se trouvent dans un état croustillant.

La durée de conservation de ce dernier peut dépasser les 12 mois en cas d'un processus de séchage réussit. [107]

❖ Cas de LA POMME :

La pomme séchée est un produit très consommé par les familles algériennes. Pour le séchage solaire de ce produit on a déterminé les paramètres optimaux. Pour passer d'une teneur initiale de 70% à une teneur en eau finale de 10% à base humide, on doit fournir au produit une température de 60°C avec une vitesse d'air asséchant de 1.5m/s, le temps de séchage peut arriver jusqu'à 48h pour sécher une grande production ce pendant pour quelques kilogrammes on peut avoir le produit final dans une durée qui ne dépasse pas les 9h. La pomme présente un taux de séchage de 2/3 [107] « figure 31 ».

Patates douces	Température :	65°
Petit pois	Débit d'air :	0.7 m/s
Piments	Épaisseur	1cm
Pommes	Teneur en eau initial :	70%
Pommes	Teneur en eau final :	10%,
Pommes	Taux de séchage :	2/3,
Pommes	Durée de séchage :	48 heures
Pommes	Température :	60°
Pommes de terre	Temps de séchage :	jusqu'à 3 jours
Potirons	Teneur en eau initial :	78%

Showing 41 to 50 of 65 entries

Previous 1 2 3 4 5 6 7 Next

Figure 31: exemple de la table « les paramètres optimaux pour le séchage solaire de la pomme».

IV.2 Temps de séchage restant :

Sur cette carte on avait l'idée de présenter le temps restant « approximative » pour le processus de séchage d'un produit. Pour ceci l'utilisateur va rentrer un produit à son choix, et le temps de démarrage de son séchage si ce dernier existe dans notre base des données donc le temps restant va s'afficher en couleur bleue (voir figure 32).

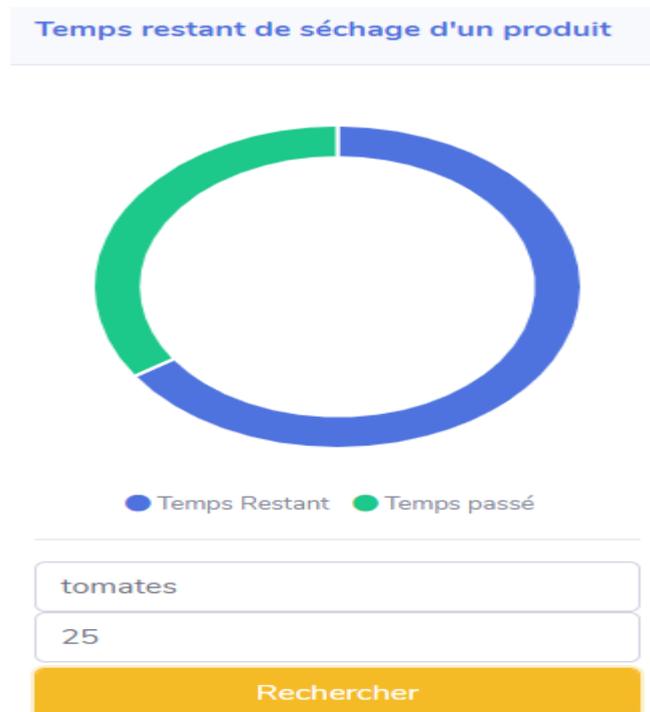


Figure 32 : la carte du temps restant.

IV.3 Charts (graphiques):

Vu que l'étude paramétrique consiste à faire varier des paramètres et d'étudier leur influence, on a essayé dans cette partie de collecter les données expérimentales des travaux déjà réalisés afin de pouvoir faire cette partie.

Le choix de ces paramètres consiste à ce que ces derniers aient une relation directe avec l'opération du séchage et du séchoir utilisé. Parmi ces paramètres citons :

- Le type de séchoir utilisé.
- L'épaisseur de produit.
- La température de l'air chauffé entrant au séchoir.
- L'humidité de l'air dans le séchoir.
- La vitesse d'air chaud dans le séchoir .et d'autres que l'on citera tout au long de cette discussion.

Dans notre interface ces graphes vont aider l'utilisateur à prendre une décision par rapport à la région, l'installation, et les paramètres aérothermiques qu'il va choisir pour son processus de séchage. Notre outil est un outil d'aide à la décision (DSS décision support system).

IV.3.1 Comparaison entre le séchage en convection forcée, naturelle et en mode hybride

Le premier graphe illustre la différence entre le séchage indirect en 03 mode (avec appoint /en convection forcé/ en convection naturelle) on constate que lors de l'utilisation des trois prototypes de séchoirs indirects « figure 33 »:

- Le séchage à convection forcée est mieux maîtrisé que celui à convection naturelle.
- Un décalage important en temps de séchage entre les trois prototypes.
- En mode naturel on ne peut pas maîtriser l'opération de séchage car les conditions de séchage (rayonnement solaire, température, vitesse et humidité changent tout le long de la journée) ce qui fait qu'on est obligé de travailler avec des valeurs moyennes pour approcher des caractéristiques de l'opération de séchage.
- Le séchage hybride donne les meilleurs résultats par rapport aux deux autres installations, il assure un séchage rapide, et le produit garde sa qualité.

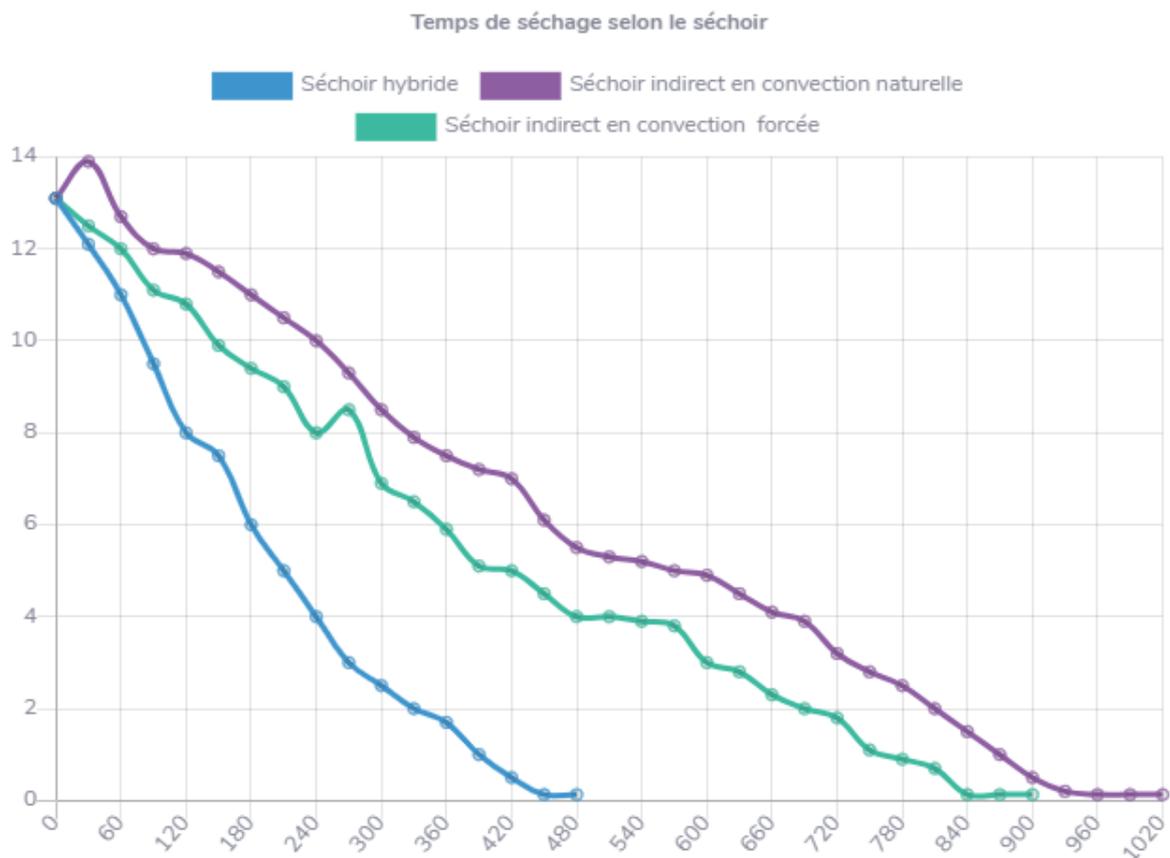


Figure 33 : l'évolution de la teneur en eau en base sèche par rapport au temps des 03 prototypes

Où : l'axes des x est le temps en minute , et l'axes des y est la teneur en eau a base sèche de la tomate .

D'après ces courbes on remarque que le temps de séchage est de 480min ,900min, 1020min respectivement pour le séchage hybride, indirect en convection forcée, indirect en convection naturelle. Ce qui indique que le temps de séchage en convection forcé se trouve réduit par rapport au séchage naturel.

D'après l'allure des courbes (figure 33) 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. Il est beaucoup plus difficile d'extraire l'eau liée que l'eau libre de plus l'évaporation diminue de plus en plus ceci s'explique par le fait que presque la totalité des molécules d'eau libres et liées ont été évaporées et reste que les molécules d'eau liées à la structure même du produit qui ne sont pas concernées par l'opération de séchage

On note aussi d'après la même figure que seule la phase de séchage à allure décroissante est mise en évidence dans ce genre de produit agroalimentaire et l'absence de la phase de mise en température et de la phase de séchage à allure constante et ceci s'explique: par l'absence de l'eau libre à la surface du produit et aussi à la structure de ce dernier.

IV.4 Comparaison entre le séchage dans la région nord d'Algérie, hauts plateaux et celle du sud :

La figure (34) illustre la variation du taux d'humidité des tranches de pomme de terre dans un séchoir solaire indirect pour trois régions différentes en fonction du temps (MR= f(t)).

Pour les trois courbes, le taux d'humidité diminue avec le temps jusqu'à ce qu'il atteigne la teneur en humidité d'équilibre. Le taux diminue plus rapidement lors l'expérience réalisé au sud qu'a nord et aux hauts plateaux, ce qui entraîne une différence de temps de séchage remarquable entre ces expériences, cela est dû aux conditions climatiques durant la journée de l'essai. De même, on peut dire que les conditions de séchage lors des deux premières expériences sont mieux maîtrisés que la troisième. La température de l'air est pratiquement constante lors la première et la seconde expérience ainsi que de la dernières.

Teneur en eau réduite selon la région en Algérie

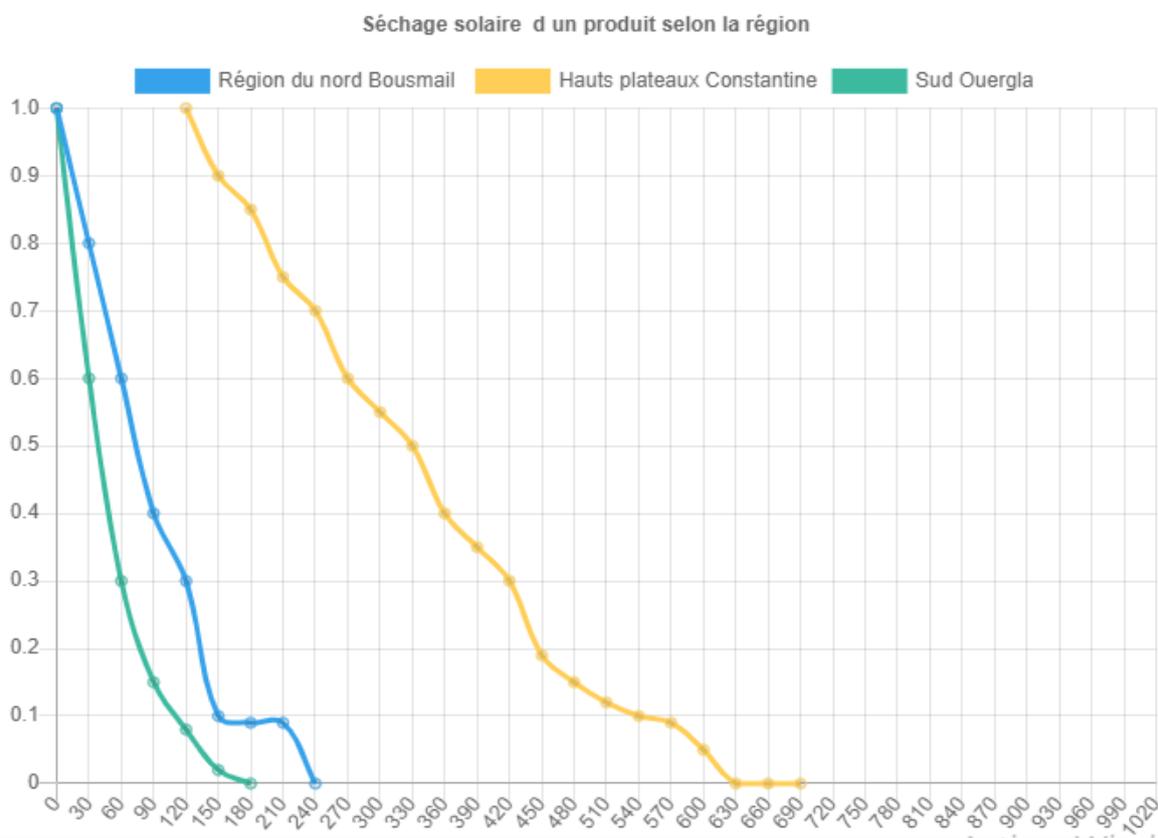


Figure 34 : le séchage solaire dans différente région du pays.

Où : l'axes des x est le temps en minute , et l'axes des y est la teneur en eau réduite de la pomme de terre .

Dans l'article [98] ils ont utilisé le sécheur solaire indirect hybride pour le séchage de la pomme de terre ils ont conclu qu'il a le meilleur temps de séchage et la meilleure température. Toutefois il faut noter que cette étude a été menée dans la région de Ouargla avec un environnement sec alors que les deux autres études ont été menées respectivement à Bou-Ismaïl avec un climat côtier, et à Constantine avec un climat tempéré chaud.

Le tableau suivant donne une comparaison du séchage des pommes de terre de quelques travaux [98]. On remarque que le séchage de la pomme de terre est meilleur dans le sud que dans d'autres régions du pays.

Tableau 11 : quelques travaux de séchage de la pomme de terre

Région	Ville	Type de sécheur	Temps de séchage	T moy
Nord	Bousmail	Indirect	3h45min	55°C
Nord	Bousmail	Mixe	4h45min	57°C
Haut plateaux	Constantine	Indirect	6h12min	50°C
Sud [108]	Ouargla	Indirect+ appoint électrique	3h	60°C
Sud	Ouargla	Hybride (solaire indirect + appoint PV)	2h45min	50°C

On remarque que le séchage solaire est mieux maîtrisé pour un climat sec. L'humidité de l'air représente un paramètre influant sur la cinétique de séchage, l'eau dégagée par évaporation du produit est récupérée par l'air chauffé. L'augmentation de la teneur en humidité de l'air, accroît la pression partielle des vapeurs d'eau dans celui-ci, par conséquent diminue le potentiel d'échange entre l'air et le produit. On a alors étudié les travaux faits afin de voir l'effet de ce paramètre sur la teneur en eau et la durée de séchage du produit. On a trouvé que les études faites sur la menthe, verveine, sauge [109], la pomme de terre [110], manioc, gingembre, gombo et piment [111] ont confirmé l'influence de l'humidité de l'air asséchant sur le processus de séchage.

IV.4.1 Effet d'épaisseur des tranches :

La figure (35) présente l'évolution de la teneur en eau du produit pour les différentes épaisseurs des tranches. On note que l'augmentation d'épaisseur du produit provoque l'augmentation de sa teneur en eau, ce qui fait un trajet plus long à parcourir pour une épaisseur de 1.5 cm et 1cm que dans le cas d'épaisseur de 0.5cm. Les travaux déjà réalisés ont montré que la diminution d'épaisseur du produit conduit à un séchage plus rapide. Cela revient au fait que l'augmentation d'épaisseur entraîne un ralentissement d'évaporation d'eau, ainsi qu'une augmentation du temps de séchage.

Le sechage solaire des tranche de pomme de terre en diffrente episseur

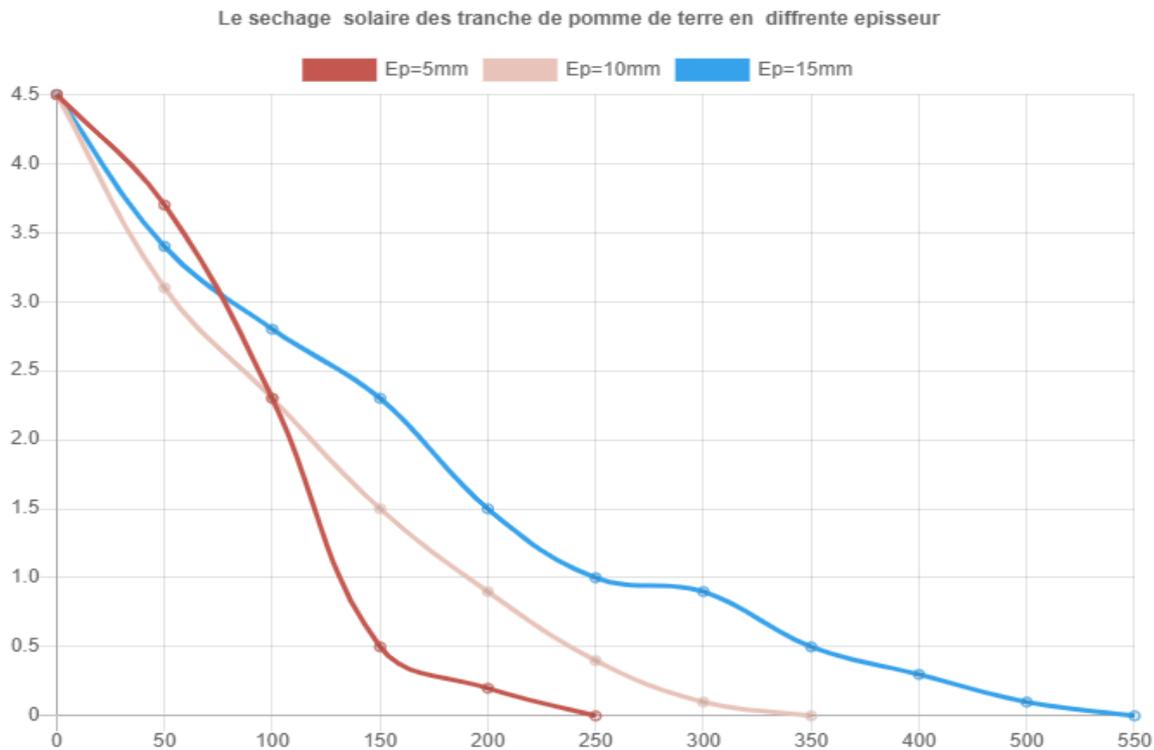


Figure 35 : effet de l'épaisseur sur le séchage d'un produit.

Où : l'axe des x est le temps en minute , et l'axe des y est la teneur en eau a base sèche de pomme de terre .

La figure 35 montre qu'il y a un écart important en cinétique de séchage lorsque l'épaisseur des tranches de pomme de terre prend les valeurs de 0.5, 1 et 1.5 cm et cela est dû au parcours plus long et aux résistances internes au transfert de la matière plus importante pour les épaisseurs de 1.5cm par rapport aux épaisseurs de 1cm.

L'humidité d'équilibre des tranches de la pomme de terre est atteinte après 300min, 350min, et 550min pour les épaisseurs respectives de 0.5, 1 et 1.5cm. En comparant le temps de séchage par rapport à l'épaisseur de 0.5 cm, on remarque une augmentation de temps de séchage de 15% et 80%, respectivement pour les épaisseurs de 1 et 1.5 cm. Cette augmentation du temps de séchage avec l'augmentation de l'épaisseur de tranche était due d'une part à la distance importante que doit parcourir l'humidité pour atteindre la surface du produit et d'autre part à la résistance à la migration de l'humidité de l'intérieur du produit vers sa surface qui est relativement plus importante pour les tranches épaisses ce qui implique une diminution de la vitesse de séchage et par conséquent une augmentation du temps de séchage. Des résultats semblables ont été trouvés par [112], [113], [114]

Comme le graphe précédent on remarque sur celui-là l'absence de la première et la deuxième phase de séchage. Généralement c'est le cas pour tous les produits agroalimentaires .Cela est dû à la structure des produits agricoles et par le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure.

La même allure de la cinétique de séchage des produits agricoles est observée par: [115], [116]

- Pour les tranches minces de tomate [115], [116] [114].
- Pour différents produits végétaux [117] .
- Pour les tranches minces de carotte, [118]
- Pour les figes [118].

Ceci s'explique aussi par le fait que le film d'eau à la surface des produits agroalimentaires est inexistant et que le transfert d'humidité de l'intérieur de ces produits à la surface est effectué par plusieurs mécanismes compliqués (diffusion liquide, diffusion vapeur ou capillarité).

Ces mécanismes changent pendant le processus de séchage [119]. Jusqu'au jour d'aujourd'hui la théorie exacte des mécanismes réels régissant le transfert d'humidité dans la phase de séchage à allure décroissante n'est pas bien connu.

Le plus probable mécanisme qui contrôle le transfert de masse dans les produits agricoles est la diffusion [120]. Ces résultats concordent avec les observations des chercheurs ([121], [122]).

IV.4.2 histogramme

On a trouvé que l'affichage du prix de vente des fruits les plus demandés en Algérie sera intéressant pour l'utilisateur de notre site. Cela va aider à prendre une décision par rapport au produit que l'on souhaite sécher. On doit mentionner que ce dernier se diffère d'une région à une autre, mais on a assuré le choix des prix de vente moyens pour chaque produit (figure 36).

Comparaison de prix des produits les plus demandés dans marché

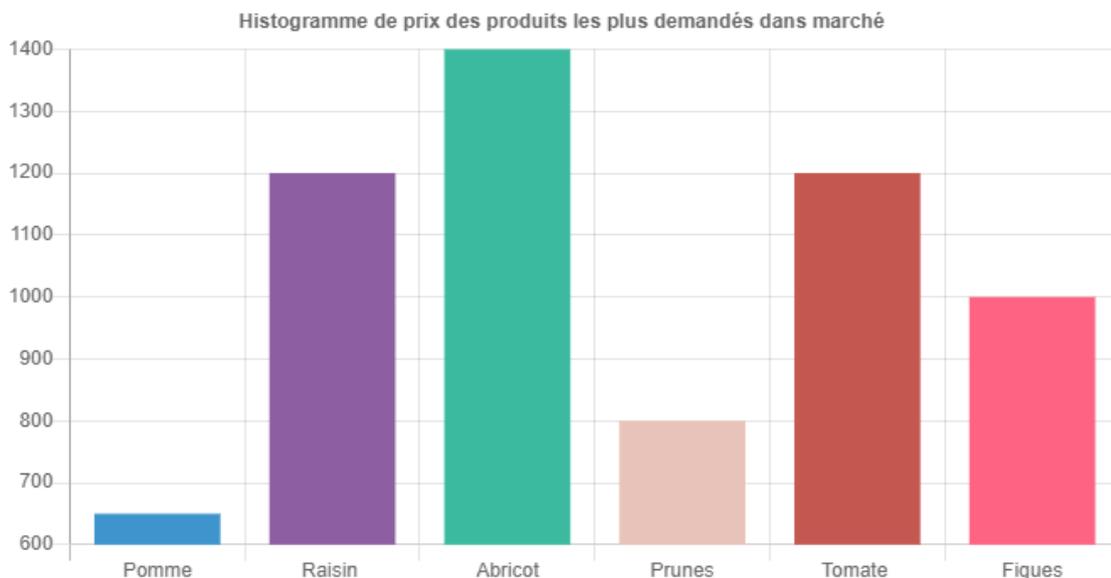


Figure 36 : histogrammes de prix de vente en DA de quelques produits.

IV.4.3 Carte du calcul des coûts:

Pour engager dans un investissement, il est clair qu'un calcul du coût s'impose. C'est pour cela que l'on a essayé de faciliter cette tâche à l'utilisateur de notre site. Ce que nous a amené à une étude économique du séchage des aliments. On utilisant les formules de calcul du coût trouvé dans la littérature et on prenant le cas d'un séchoir solaire type serre de 80kg de capacité, on a réussi à évaluer le coût d'investissement du séchage solaire d'une production donnée de quelque produit de notre base de données.

Un processus simple et facile pour l'utilisateur. Il suffit de choisir le produit et faire rentrer la masse initiale qu'il veut sécher pour que le programme réalise le calcul et la boîte de dialogue avec le coût total apparaisse pour l'utilisateur (figure 37)

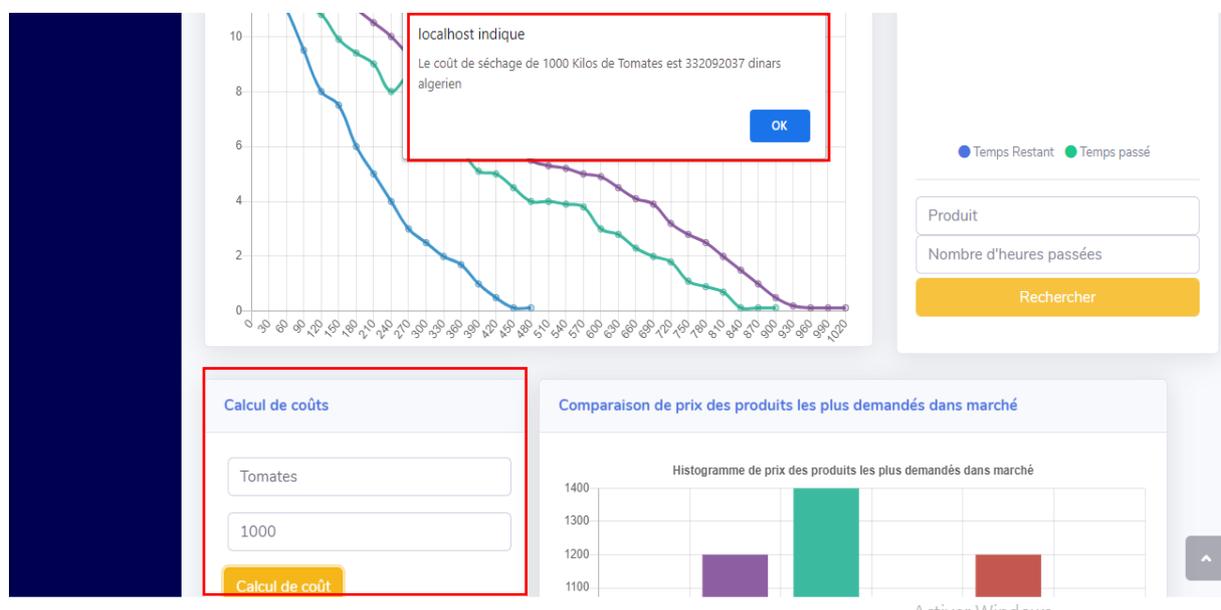


Figure 37 : carte de calcul du coût.

Conclusion générale :

Le séchage est l'un des processus fondamentaux qui permet d'augmenter efficacement le temps de stockage des produits issus de l'industrie agroalimentaire, c'est un procédé très énergivore. Cela, explique le recours à l'utilisation des séchoirs solaires qui connaissent un développement remarquable durant ces dernières années.

Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse constitue une nouvelle contribution dans les études paramétriques de séchage solaire, par la création d'une plateforme qui résume les conditions optimales de séchage des végétaux permettant au séchoir de réduire considérablement l'humidité du produit séché dans un temps relativement court ainsi que l'effet de choix de séchoir et la région de l'opération .

Si les travaux ont été souvent consacrés pour l'étude expérimentale et la modélisation du séchage solaire l'originalité de notre approche consiste à informatiser les concepts et les résultats déjà obtenus pour avoir une interface qui facilite la tâche de recherche au futur pour les prochains travaux du séchage solaire des produits agroalimentaires spécifiquement les végétaux. Notre outil conçu est un outil d'aide à la décision (DSS Décision Support System)

Sur le plan de conception, nous avons établi une collecte d'informations sur les différents végétaux, de même on a consulté les différents articles de recherche d'actualités afin de faire une comparaison et afin de connaître les paramètres les plus influençant durant le processus de séchage solaire.

À l'issue de cette étape nous avons résumé tous ces concepts dans un site sous la forme des graphes et d'une table qui représente notre base des données. De plus d'autres fonctionnalités sont présentes dans notre site, des cartes que nous avons trouvés très utile pour l'utilisateur se sont la carte de calcul du temps restant et la carte de calcul du coût.

Les résultats de travaux précédant et notre étude nous amènent aux conclusions suivantes :

- Le processus du séchage reste difficilement contrôlable puisqu'il dépend en grande partie des conditions météorologiques et climatologiques.
- La durée de séchage dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels on peut citer : la masse le diamètre et l'épaisseur du produit, la vitesse de l'air asséchant, ainsi que sa température.
- L'effet de l'épaisseur du produit est très remarquable .Les tranches de faible épaisseur (5mm) sèche deux fois plus vite que celle qui sont épaisses (15mm) mais comme il est intéressant d'avoir un produit sec de qualité supérieure, on peut confirmer que les échantillons de 5 mm d'épaisseurs ne sont pas de bonne qualité, par contre celles de 10mm et 15mm d'épaisseurs sont d'une meilleure qualité du produit sec.
- Le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température, entre le fluide et le produit, est augmentée. Toutefois la thermo-sensibilité du produit (caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter), limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage. ce qui nous amenait à signaler qu'il y a des limites pour l'utilisation des températures élevées et que chaque produit agroalimentaire à sécher possède une

température limite maximale de séchage ce qui fait que le séchage doit être effectué à des températures optimales

- L'étude cinétique de séchage solaire des végétaux montre la présence unique de la phase de ralentissement (phase C) sur la courbe de séchage, et l'absence de la phase de mise en température du produit et la phase à allure constante cela est typique pour la majorité des produits agroalimentaires)
- Suite à la non-maîtrise de l'opération de séchage au niveau du séchoir à convection naturelle (vitesse d'écoulement et température de l'air asséchant dans le séchoir ne sont pas fixes et changent en longueur de journée suivant les conditions météorologiques.) ce qui engendre un lent et mauvais écoulement dans le séchoir et apparition des zones de chauffe (échantillons se trouvant sur le périphérique de la claie grillée). Ce qui nous a amené à opter pour le séchoir à convection forcée .On peut confirmer alors que le choix du séchoir doit être selon les besoins, ce choix à un effet sur la cinétique de séchage des végétaux.
- L'utilisation d'appoint électrique ou d'autres sources d'énergies renouvelables telle que la biomasse est une obligation pour le séchage industriel sinon on risque d'avoir des pertes au niveau de la production.
- Pour assurer un séchage solaire des légumes et des fruits sous des conditions hygiéniques et sanitaires aux normes nationales et internationales on doit alors assurer le respect des paramètres optimaux que nous avons définis pour chaque élément et ce qui conduise à la meilleure performance du séchoir.
- L'ajout d'un système de régulation d'humidité semble d'être une solution avantageuse en cas de séchage dans les régions humides.
- l'étude économique de séchage pour estimer le coût du séchage solaire d'une production montre l'intérêt d'investir dans ce domaine.

En perspective, nous envisageons d'élargir cette étude à d'autres applications telles que le séchage d'autres produits de structures plus complexes comme la viande (bœuf, des chameaux, des chevaux) et celle du poisson ainsi que d'autres produits locaux à grande production et consommation telle que les dattes locales, le piment, le concombre, le henné.

On compte à déployer le site sur web pour qu'il sera disponible à l'utilisateur.

Nous suggérons une industrialisation des procédures de séchage solaire qui va permettre un développement de l'exportation, ainsi que l'économie nationale. Le but est de généraliser l'utilisation de ces derniers chez les agriculteurs algériens pour l'amélioration de leurs rendements tout en assurant l'abaissement des coûts d'investissement.

On propose le développement du séchage solaire continu par l'utilisation l'appoint biomasse qui représente une solution pour réduire d'un côté le coût d'électricité et d'un autre pour réduire les pertes du produit, aussi l'intégration du stockage solide dans les séchoirs avec nouveaux matériaux de stockage plus performants, comme les matériaux à changement de phase pour stocker la chaleur ou donc améliorer les performances de séchage solaire.

À la fin de notre étude on peut dire que la majorité des auteurs ont étudié les cinétiques de séchage, température de séchage, et d'un degré moindre les paramètres optimaux et le coût de l'opération de séchage chose qui a été mis en exergue dans ce travail.

Référence

Références

- [1] Programme alimentaire mondial, P.a. Faits et chiffres sur la faim. 2018 : <https://fr.wfp.org/faim/faits-et-chiffres>.
- [2] Nations Unies, <https://www.un.org/development/desa/fr/news/population/worldpopulation-prospects-2017.html> . 21 juin 2017, New York.
- [3] Gustafsson, J., et al., The methodology of the FAO study: Global Food Losses and Food Waste-extent, causes and prevention”-FAO, 2011, 2013, SIK Institutet för livsmedel och bioteknik..
- [4] SPORE, Post-harvest management. Adding value to crops. The magazine for agricultural and rural development in ACP countries.<http://spore.cta.int.>, 2011. N° 152.
- [5] Stambouli, A.B., Promotion of renewable energies in Algeria: strategies and perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. 15(2): p. 1169-1181. 6.
- [6] 2010 Survey of Energy Resources World Energy Council , London, 2010.
- [7] Valorisation des produits agro-alimentaires et des plates médicinales par les procédés de séchage solaire Soutenu publiquement le 21 / 06 / 2006 par Djamel Mennouche.
- [8] Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect par N. Chalal1, A. Bellhamri et L. Bennamoun Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger (2008) 117 – 126.
- [9] Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques soutenue par Slimane Boughali le 13/07/2010.
- [10] Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°2 (2012) 285 – 295 Influence des méthodes de séchage sur la qualité des tomates séchées (variété Zahra) N. Lahmari, D. Fahloul* et I. Azani laboratoire Sciences des Aliments, Département de Technologie Alimentaire.
- [11] Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L. (2002a). Review of research and development work on solar dryers for grape drying. Energy Conversion and Management. 43: 45–61..

- [12] Sebaili, A.A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M.R.I., El-Gohary, H.G. (2002). Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. *Energy Conversion & Management*. 43: 2251–66.
- [13] Ruslan, M.H., Othman, M.Y., Yatim, B., Sopian, K., Ali, M.I., Ibrahim, Z. (2003). Photovoltaic assisted solar drying system. In : *Proceeding of the International Symposium on Renewable Energy*. 681–7.
- [14] Prakash, S., Jha, S.K., Datta, N. (2004). Performance Evaluation of Blanched Carrots Dried by Three Different Driers. *Journal of Food Engineering*. 62(3): 305-313.
- [15] Sarsavadia, P.N. (2007). Development of solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion. *Renewable Energy*. 32: 2529–47.
- [16] Hossain, M.A., Bala, B.K. (2007). Drying of hot chilli using solar tunnel drier. *Solar Energy*. 81: 85–92.
- [17] Mohanraj, M Drying of copra in forced convection solar drier. *Biosystems Engineering*. 99 : 604–7.
- [18] Mohanraj, M Drying of chilli in forced convection solar drier. *Biosystems Engineering*. 99 : 604–7.
- [19] Madhlopa, A., Jones, S.A., Saka, J.D.K. (2002). A solar air heater with composite-absorber systems for food dehydration. *Renewable Energy*. 27: 27–37.
- [20] El-Beltagi, A, Gamea, G.R., Essa, A.H.A. (2007). Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*. 78: 456–64.
- [21] B. Touati, ‘Etude Théorique et Expérimentale du Séchage Solaire des Feuilles de la Menthe Verte (*Mentha viridis*)’, Thèse doctorat de l’I.N.S.A, Lyon, et Université de Tlemcen, 2008.
- [22] Séchage des fèves de cacao dans un séchoir solaire indirect à circulation forcée d’air par Kamenan Blaise Koua, Ekoun Paul Magloire, Prosper Gbaha, *Revue du CAMES – Sciences Appliquées et de l’Ingénieur Cames 2017 – Published Online 2017 - <http://publica>*.
- [23] Medcrave MOJ food processing and technology Comparison od two drying methods og mango (oven and solar drying).
- [24] ScienceDirect heliyon Modeling the dehydration kinetics of four onion varieties in an oven and a solar greebhouse by ngoné fall beye & cheikhou kane & al .
- [25] T. Togrul, D. Phelivan, “ Modelling of drying kinetics of single apricot.” , *Journal of Food Engineering*, Volume 58, Issue 1, June 2003, pp. 23–32.

- [26] K. A. Ebru, ‘‘ Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits.’’ , Journal of Food Engineering , Volume 73, Issue 1, March 2006, pp. 75–84.
- [27] I. T. Togrul, D. Phelivan, ‘‘ Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process.’’ , Journal of Food Engineering, Volume 65, Issue 3, December 2004, pp. 413–425 .
- [28] Boulemtafes, A, 2011: "Le séchage solaire des produits agricoles."
- [29] Bonazzi, C., E. Dumoulin, et al., 2008: "Le séchage des produits alimentaires." Industrie Alimentaire Agricole 125(03-04): 12-22.
- [30] Léonard Angélique, 2002: le Séchage. Faculté des Sciences Appliquées, Département de Chimie Appliquée, Laboratoire de Génie Chimique dans le cadre du Printemps des Sciences. <http://www.ulg.ac.be/sciences> Université de Liège – Haute Ecole Charlemagne – Hem.
- [31] Vasseur, 2009 : "Séchage: principes et calcul d'appareils-Séchage convectif par air chaud (partie 1).".
- [32] G. Arditti, "Technologie chimique industrielle, tome III", Edition Eyrolles, Paris, France, (1972).
- [33] W. L. McCabe, J. C. Smith, et P. Harriott, "Unit operation of chemical engineering ", Hill Book Company (1985).
- [34] M. Daguinet, ‘‘ Les séchoirs solaires : Théorie et pratique.’’ , UNISCO, 1985 ;.
- [35] W.K. Lewis, 1921, The rate of drying of solid materials. Journal of Industrial Engineering Chemistry 13, 427-432.
- [36] Bimbenet J.J., (1984) Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A), Sepaic, Paris 2ème édition pp34 Cité par H. Madjoudj.
- [37] Daoued Mihoubi, (2004) Déshydratations d'argile par compression et séchage. Aspects de modélisation et de simulation. Thèse de doctorat, université de Pan et des pays de l'Adour, école doctorale des sciences exactes et de leur application.
- [38] A. Bondil, J. Hrabovsky Isolation thermique, tome , edition Eyrolles Cité par N. Chalal.
- [39] T.K. Sherwood 1929. The drying of solids I and II. Industrial Engineering Chemistry, Volume 21, 12-16 and 976-980.
- [40] O.Krisher, K. Kroll 1963. Technique de sechage, 2eme edition de "Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer Verlag (1956). Traduite par le CETIAT, Orsay France.

- [41] A.V. Luikov, 1977. Heat and Mass Transfer in capillary porous bodies. Pergamon Press London.
- [42] D.A. Devries, 1987. The theory of heat and moisture transfer in porous media. *Journal of Heat and Moisture Transfer* 30, no 7, 1343-1350.
- [43] Whitaker, 1977. Simultaneous heat mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying. *Advances in heat transfer*, Academic Press, New-York volume 13,119-203.
- [44] M. Kouhila, N. Kechaou, M. Othmani, M. Fliyou, S. Lahsani, 2002. Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan eucalyptus globules. *Drying Technology* 20, 2027-2039.
- [45] J.D. Daudin, 1983. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. *Science des Aliments* 3, 1-36.
- [46] J. Crank, 1975. *The mathematics of diffusion*. Oxford University, Press, London.
- [47] E. Akpınar, A. Midilli, Y. Bicer, 2003. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management* 44. 1689-1705.
- [48] M.N.A.Hawladar, M.S.Uddin, J.C.Ho, A.B.W.Teng, 1991. Drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*. 14. 259-268.
- [49] I.Doymaz,2004a. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61, 359-364.
- [50] S. Whitaker. (1980) Heat and mass transfert in granular porous media *Advances in drying I*, Hemisphere publication, pp 23-61.
- [51] Charreau A., Cavaille R. (1991) Séchage théorie et pratique *Technique de l'Ingénieur, génie des procédés*, 2480-1; 2480-23.
- [52] Bimbenet J.J., (1984) Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire *Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A)*, Sepaic, Paris 2ème édition pp34 Cité par H. Madjoudj.
- [53] Belessiotis, V. and E. Delyannis, Solar drying. *Solar Energy*, 2011. 85(8): p. 1665-1691.
- [54] Ekechukwu, O.V. and B. Norton, Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications. *Energy Conversion and Management*, 1999. 40(6): p. 657-667.
- [55] Sharma, A., C.R. Chen, and N. Vu Lan, Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. 13(6): p. 1185-1210.

- [56] T.Koyuncu, "Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications", *Renewable Energy*, Volume 31, Issue 7, June 2006, Pages 1073-1088.
- [57] O. Turgut, N.t Onur, "Three dimensional numerical and experimental study of forced convection heat transfer on solar collector surface.", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 36, Issue 3, March 2009, page 274-279.
- [58] N. Nijegorodov ,P.K. Jain. Author links open the author workspace.K.R.S. Devan., "A graphical method of measuring the performance characteristics of solar.
- [59] S. Youcef-Ali and J.y Desmons, "Numerical and experimental study of a solar equipped with offset rectangular plate fin absorber plate", *Renewable Energy*, Volume 31, Issue 13, October 2006, Pages 2063–2075.
- [60] Daoued Mihoubi, (2004) Déshydratations d'argile par compression et séchage. Aspects de modélisation et de simulation. Thèse de doctorat, université de Pan et des pays de l'Adour, école doctorale des sciences exactes et de leur app.
- [61] Lyes Bennamoun. (2001) Simulation numérique d'un séchoir solaire adaptation au climat local Magister, Université de Mentouri Constantine, Faculté des Sciences, Département de physique.
- [62] Philip A., Schweitzer, (1979) Hand Book of separation techniques for chemical engineers Me Graw Hill Book Company, pp 4-14, 4-183.
- [63] M.V. Ramana Murthy, (2008) A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers *Renewable and sustainable energy reviews RSER-548*; pp 10-548.
- [64] Yves Jannot, (2007) Thermique solaire.
- [65] D. R. Pangavhane, R. L. Sawhney, "Review of research and development work on solar dryers for grape drying ", *Energy Conversion and Management*, 43(45 - 61) - (2002).
- [66] O. V. Ekechukwn, B. Norton, "Review of solar energy systems II : an overview of solar drying technology", *Energy Conversion and Management*, 40 (615 - 655) - (1999).
- [67] P. Dudez, "Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés", Edition du Gret, France (1999).
- [68] Jacques Bernard, (2004) Energie solaire calcul et optimisation Berneoud, France.
- [69] D.K. Edwards (Traduit par Marlot), (1979) Capteurs solaires.
- [70] D. R. Pangavhanc, R. L. Sawhcy and P. N. Sarsavadia, "Design, development and performance testing of new natural convection", *Energy* 27(579-590) (2002)..

- [71] B.-B. Odile, 1991, Etude des effets d'un traitement thermique sur la qualité (flaveur) de quelques plantes aromatiques : Basilic, *Ocimum Basilicum L.* ; Menthe, *Menthe Piperita* ; Persil, *Petroselinum Sativum Hoffm* ; Estragon, *Artemisia Dracunculus L* Thès.
- [72] W. K. Lewis, 1921, The rate of drying of solid, *Ind. Eng. Chem.* 13, 5, pp. 427-432.
- [73] Jean-jacques Bimbenet. 2002. Génie des procédés alimentaires RIA édition Dunod, Paris.
- [74] M.A. Leon, S. Kumar, S.C. Bhattacharya, 2002. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 367-393.
- [75] P. P. Lewicki, Hoa Vu Le, W. 2002. Pomaranska-Lazuka. Effect of pre-treatment on convection drying of tomatoes. *Journal of Food Engineering.* 54. 141-146.
- [76] N. Kechaou, Étude théorique et expérimentale du processus de séchage de produits agro-alimentaires, Thèse de Doctorat d'État, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie, 192 p, 2000.
- [77] D.A. Van Meel, Adiabatic convection batch drying with recirculation of air, *Chemical Engineering Science*, vol. 9, pp. 36-44, 1958.
- [78]] L. LAHNINE, A. IDLIMAM, M. MAHROUZ, M. KOUHILA, H. HANINE, Mesures et modélisation des isothermes d'adsorption comparées de Thym, traité par deux technologies de conservation : rayonnement gamma et thermobiochimique, *Proceedings du 9ème Congrès Francoph.*
- [79] L. LAHNINE, A. IDLIMAM, M. MAHROUZ, M. KOUHILA, H. HANINE, Comparative sorption isotherms of reserved thyme after gamma irradiation and thermal-biochemical treatment, *Proceedings du 3ème Congrès de l'Association Marocaine de Thermique*, Agadir, P31, 2014.
- [80] J.J. Bimbenet, J.D. Daudin, E. Wolf, Air drying kinetics of biological particles, In R. Toei & A.S. Mujumdar (Eds), *Proceedings of the Fourth International Drying Symposium*, Kyoto, Japan, 1984.
- [81] A.V. Luikov, • 1964, Heat and mass transfer in capillary porous bodies, *Advance in Heat Transfer* 1, New York.
- [82] M. Loncin, 1961, Les opérations unitaires du génie chimique, Edition Dunod, Paris, France.
- [83] O. Techasena, & al., 1994, Simulation of Deep Bed Drying of Carrots, *J. Food.* 16, pp. 267-281.

- [84] S. Whitaker, 1977, Simultaneous Heat , Mass, and Momentum Transfer in Porous Media : A theory of drying, in Advances in Heat Transfer 13, academic, New York, pp. 119- 203.
- [85] O. Kricher & K. Kroll, 1963, Technique de séchage, 2e édition de « Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstecnik, Springer Verlag (1956) » Traduite par CETIAT, Orsay.
- [86] M. El Hisse, 1987, Modélisation, identification et simulation d'un séchoir solaire agroalimentaire, Thèse de Doctorat, Université de Perpignan 125p.
- [87] M. El Hisse, 1987, Modélisation, identification et simulation d'un séchoir solaire agroalimentaire, Thèse de Doctorat, Université de Perpignan 125p.
- [88] S. Whitaker, Heat and Mass transfer in granular porous media, in Advances in drying 1, Ed A. S. Mujumdar, Hemisphere Publ. Corp. Washington pp. 23-59.
- [89] Audsley E. et Wheeler J., The annual cost of machinery calculated actual cash flows, J. Agric. Eng. Res., 23 (1978) 189-201.
- [90] S. K. A. F. Aymen ELkhadraoui *, Etude expérimentale de la performance d'un séchoir solaire de type serre:, Laboratoire des Procédés Thermiques, Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie, B.P.95.
- [91] O. Aumporn, Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase., UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA.
- [92] I. Doymaz., 2007. Air drying characteristics of tomatoes. Journal of Food Engineering 78, 1291-1297.
- [93] N. c. e. g. mouniera, modelisation desechage solaire de la pomme de terre et ammelioration du rendement thermique, université de ouregla.
- [94] modeling and compaarative analysis of solar drying behavior of potatoes 2019 A.DJEBLI et al.
- [95] thèse doctorat faisabilité et adaptation des séchoirs solaires au climat local 2018 Par MS MY.NASRI.
- [96] solar drying of sliced potato ,an investigating study 2013 Mlle S.CHOUICHA et al.
- [97] <http://www.dawalger.dz/>.
- [98] <https://www.djazairss.com/>.
- [99] P. S. Madamba, R. H. Driscoll, K. A. Buckle. 1996 The thin-Layer drying characteristics of garlic slices. Journal of Food Engineering. 29. 75-97.

- [100] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam and A. Jamali, 2004. Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel. *Energy*. 29. 211 - 244.
- [101]] S. J. Babalis, V. G. Belessiotis, 2004. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin- layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*. 65. 449-458.
- [102]] A. Kaya, O. Aydin, C. Demirtas, M. Akgun, 2007. An experimental study on the drying kinetics of quince. *Désalination*. 212. 328-343.
- [103] A.O. Olorunda,et al, 1990. Up grading quality of dried tomatoes: effect of drying methods, conditions and pre-drying treatments. *Journal of Science of Food and Agriculture* 52, 447-454.
- [104] p. é. G. 1. Sécher des produits alimentaires. Techniques, Sécher des produits alimentaires. Techniques, procédés, équipements, GRET, 1995.
- [105] B. N. e. B. Zahia, Influence de la température de séchage Solairesur la qualité de la pomme de terre.
- [106] M. kouhila, Etude expérimentale et théorique des cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes médicinales et aromatiques (Menthe, Verveine, Université CadiAyyad de Marrakech, Morocco, 170 p.
- [107] S. YOUCEF-ALI, Etude numérique et expérimentale des séchoirs solaires indirects à convection forcée : Application à la pomme de terre, Thèse de Doctorat Université, 2001.
- [108] C. AHOUANNOU, Etude de Séchage des Produits Agroalimentaires Tropicaux : Cas du manioc, du gingembre, du gombo et du piment, Thèse de Doctorat,, Université Nationale du Benin, 214 p., 2000.
- [109] A. El-Beltagy, G.R. Gamea, A.H. Amer Essa, 2007. Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 78, 456-464...
- [110] M.H. Nguyen, W.E. Price, 2007. Air drying of banana. Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering* 79, 200-207.
- [111] K. Sacilik, A. K. Elicin, 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*. 73. 281 - 289.
- [112] M.N.A.Hawlader, M.S.Uddin, J.C.Ho, A.B.W.Teng, 1991. Drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*. 14. 259-268.
- [113] C. T. Akanbi, R. S. Adeyemi, A. Ojo, 2006. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food Engineering*. 73. 157-163.

- [114] M.K. Krokida, et al. 2003. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food* 59, 391-403.
- [115] I. Doymaz, I. Doymaz, 2005. Sun drying of figs: an experimental study, *Journal of Food Engineering* 71, 403-407.2.
- [116] Z. W. Cui, Z.W. Shi-Ying Xu, Z.W. Da-Wen Sun, 2004. Effect of microwave vacuum drying on the carotenoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of Chinese chive leaves. *Drying Technology* 22 (3), 563-575.
- [117] L.M. Diamante, P.A. Munro, 1993. Mathematical modelling of thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy* 51, 271-276.
- [118] I.T. Togrul, D. Pehlivan, 2004. Modeling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering* 65, 413-425.
- [119] M. K. M. M. A. I. a. A. J. S. Lahsasni, Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel. *Energy*. 29. 211 244., 2004.
- [120] I. Doymaz, 2004b. Pretreatment effect on sun drying kinetics of mulberry fruits. *Journal of Food Engineering* 65, 205-209.
- [121] M.K. Azharul, M.N.A. Hawlader, 2005. Mathematical modeling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, 4914-4925.
- [122] O. Kalawole, Falade, Emmanuel, S. Abbo, 2007. Air drying and rehydration characteristics of date palm fruits. *Journal of Food Engineering* 79, 724-730.

Annexes

DEMARCHE A SUIVRE POUR BIEN MENER UNE OPERATION DE SECHAGE SOLAIRE

Détermination des contraintes du produit

Il faut dégager le genre de produit à sécher, ainsi que ses caractéristiques, afin de bien dimensionner le séchoir et déterminer les conditions opératoires optimales de l'opération de séchage. La construction d'un prototype de séchoir doit tenir compte de plusieurs critères énumérés ci-dessous.

- Nature du produit (fruits, légumes, viandes, céréales, poissons.....) qui nous détermine le type de séchoir et les conditions opératoires.
- La quantité de produit à sécher journalière et la durée de séchage qui conditionne le dimensionnement de l'installation.
- Diminuer l'intervalle entre l'époque de récolte et celle du séchage pour éviter la détérioration du produit par l'air environnant.
- La préparation à effectuer: lavage, égouttage, épluchage, décorticage.....
- Prétraitements: blanchiment, salage, soufrage, trempage dans des solutions caustiques,.....
- Degré de séchage souhaité, plus l'humidité d'équilibre du produit est très basse, plus le temps de séchage est long.
- Les fourchettes des températures requises pour effectuer le séchage. Leur connaissance est indispensable à double titre, d'abord pour choisir le mode de captation du rayonnement solaire, ensuite pour contrôler la conduite du séchage. Si les températures de séchage ne doivent pas dépasser 70°C, les capteurs plans relativement bon marché suffisent pour capter le rayonnement solaire. Au-delà, il faut le concentrer ou employer des surfaces absorbantes sélectives. Il s'agit là des techniques sophistiquées dont le surcoût forcément trop élevé doit être, d'une manière générale, soigneusement étudié et qui, par suite ne conviennent pas à des produits courants. En fait il faut respecter ces valeurs critiques si non le produit se détériora et ne gardera pas ses propriétés organoleptiques.
- Croutage: Il faut éviter le croutage en séchant moins vite à des températures plus ou moins basse pour que l'eau ne reste pas emprisonnée à l'intérieur du produit suite à la fermeture des pores en surface du au croutage.

Caractéristiques du site

Facteurs climatiques

La connaissance du gisement solaire du site pour l'implantation d'un séchoir solaire est une condition nécessaire. Les données relatives à la température et l'humidité de l'air, vitesse du vent sont disponibles au niveau des stations météorologiques; néanmoins, les données relatives aux rayonnements direct, diffus et global généralement ne sont pas disponible au

niveau de ces stations, il faut donc faire appel aux formules empiriques reposant sur le traitement statistique des données météorologiques existantes. Des températures ambiantes trop basses sont de toute évidence une contre-indication à l'implantation d'installations complètement solarisées, le séchage s'effectuant trop lentement, dans ce cas, une autre source de chaleur est nécessaire pour élever la température de sorte que le solaire n'est plus alors qu'un appoint dont il faut étudier la rentabilité avec soin.

Inversement, des températures extérieures trop élevées notamment dans les zones arides exigent que des précautions soient prises pour éviter que la température de l'air asséchant ne dépasse la valeur supportable par le produit. La nécessité d'une ventilation convenable s'impose pour diminuer la température dans le cas du besoin.

Le paramètre degré d'humidité de l'air est important et le séchage ne peut se réaliser avec un air saturé ou contenant plus de 80% d'humidité car son pouvoir évaporatoire est très faible.

La direction et la vitesse des vents dominants sont utiles car ces derniers peuvent réduire le gain de chaleur utile d'un capteur à air solaire ou augmenter les pertes de chaleur de l'enceinte de séchage

L'orientation du séchoir et la localisation des conduits intérieurs d'air doivent être étudiées relativement aux vents dominants. D'autres questions générales peuvent être posées sur certaines commodités du site :

- Existence ou pas de l'électricité dans le site.
- Espace disponible.
- Existence ou pas de combustible pour le chauffage d'appoint.
- Disponibilité ou pas de l'eau pour lavage et prétraitement des produits à sécher
- Matériaux de constructions nécessaires (verre, aluminium, plexiglas, laine de verre.....) existent –ils localement ou peut on leur trouver des substituants locaux ?
- Moyens de stockage, leur capacité, leur emplacement?

Facteurs humains

- Existence ou pas sur place d'une main d'œuvre compétente.
- Intervention de la main d'œuvre locale (artisans, forgerons) pour la construction des petits séchoirs simples et rustiques pour traiter de petite quantité de produit à usage domestique; ou peuvent aussi fabriquer des systèmes de séchage solaire comportant des organes de captation, de stockage, de gestion et de contrôle, capables de traiter des quantités plus importantes et destinées au secteur industriel.

Réalisation du séchoir

- choix du type de séchoir: Le choix du type de séchoir est contrôlé par type de produit à sécher. Pour les produits volumineux les séchoirs serres sont tout indiqués d'un point de vue technico-économique. Si on a des produits à haute valeur commerciale (fruits, légumes, poisson...etc.) les séchoirs tunnels conviennent mieux. Dans tous les cas de figure il est conseillé d'assurer la ventilation par convection forcée afin de pouvoir contrôler le débit de l'air asséchant et par suite sa température. La ventilation par

convection naturelle ne garantissant pas un bon déroulement du séchage, peut convenir, à la rigueur, pour un usage individuel aux exigences réduites. L'utilisation de l'appoint dépend des conditions atmosphériques et de l'objectif du manipulateur est ce qu'il veut sécher d'une façon continue le jour et la nuit, dans ce cas le système d'appoint s'impose, ou seulement pendant le jour?

- Modélisation et simulation du comportement du séchoir en fonction des différents paramètres (débit, température, humidité de l'air,... etc.)
- Construction du séchoir.
- Expérimentation du séchoir à vide et sous charge.
- Ajustement et mise au point du séchoir avec une optimisation technico-économique.