REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Yahia Farès Médéa

Faculté de technologie

Département de génie mécanique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master en génie mécanique

Spécialité : Energétique

Thème :

Etude d'un séchoir solaire fonctionnant par capteur solaire

Préparé par :

LAKHDARI CHAIMA**.**

MAHAMMEDI HABIBA**.**

Dirigé par :

Dr KRIBY SALIHA**.**

Pr Mounir ZIRARI.

PROMOTION 2023/2024

Remerciement :

Nous remercions beaucoup dieu de nous avoir accordé le succès dans la réalisation de ce travail.

Comme Je remercie le directeur de la faculté de génie mécanique le professeur :

MOUNIR ZIRARI pour avoir fourni Les conseils et instructions pour arriver là où nous en sommes aujourd'hui.

Je tiens aussi à remercier vivement mon encadreur, KRIBY Saliha Pour m'avoir dirigé tout le long de ce travail et ses remarques qui m'ont beaucoup aidé.

Enfin je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin,

A la réalisation de ce mémoire de fin d'étude ainsi que tous mes amies qui nous ont soutenu durant ce travail.



Dédicace :

*Celui qui a dit que j'étais à elle *compris**

Le voyage n'a pas été court et il ne devrait pas l'être. Le rêve n'était pas proche et le chemin n'était pas semé d'embûches, mais je l'ai fait.

Louange à Dieu pour l'amour et les remerciements, grâce auxquels je suis ici aujourd'hui face à un rêve tant attendu qui est devenu une réalité dont je suis fier

A mon ange pur et ma force après Dieu, ma mère, ma première supportrice, et à celui qui m'a soutenu et donné sans limites, mon père, je te dédie cette œuvre qui sans tes sacrifices n'aurait pas existé.

Je dédie également ce travail à mes frères Ibrahim, Abdul Karim, Saeeda et Samira.

Je n'oublie pas non plus mes amis

Je n'oublie pas non plus mes amis rencontrés sur le campus.

LAKHDARI CHAIMA



Dédicace :

A celui dont le front était couvert de sueur et à celui qui m'a appris que le succès ne vient qu'avec patience et détermination.

A la lumière qui à éclaire mon chemin et à la lampe dont la lumière ne s'éteint jamais dans mon cœur à cause du sacrifice du précieux. Et le précieux, et d'on j'ai tiré ma force et mon estime de moi-même. Mon cher père que dieu ait pitié de lui et l'admette dans son spacieux paradis à celui qui a mis le paradis sous ses pieds et m'a facile. L'adversité qui a toujours souhaite ouvrir les yeux, en un jour comme celui-ci ma chère mère sur ceux avec qui j'ai renforcé mon soutien car c'étaient des sources auxquelles je buvais mes frères et sœurs et leurs précieux enfants.

MAHAMMEDI HABIBA



Liste de figure :

CHAPITRE I :

Figure I.1 : Diagramme psychrométrique……P9

Figure I.2 : Variation de teneur en humidité à base sèche avec base humide [12] ……P10

Figure I .3 : Adsorption typique isotherme montrant la boucle hystérésis [17] ……P15

Figure I .4 : Représentation schématique d'un solide humide [25] ……P19

Figure I .5 : Courbes de vitesse de séchage [29] ……P20

Figure I.6 : Taux de séchage pour les produits hygroscopiques et les produits non hygroscopiques [30]. ……P21

Figure I .7 : Schéma d'une configuration de chambre de séchage pour le transport de flux et de chaleur/masse simulation avec (i) un seul plateau et (ii) deux plateaux disposés côte à côte (L'Aminatou et coll. 2010) [42] ……P25

Figure I .8 : Ns en fonction de la température sans dimension θ o du fluide à la sortie du capteur solaire, pour différentes températures maximales sans dimension θ max de la plaque collectrice (L'Aminatou et al. 2012) [43] ……P26

Figure I.9 : Zone de collecte du capteur solaire à air à tubes sous vide (AC) et nombre de tubes en fonction de la vitesse de l'air de séchage (u). [43] ……P26

CHAPITRE II :

Figure II.1 : Principe de fonctionnement des séchoirs solaires directs, indirects et mixtes [50] ……P31

Figure II .2 : Classification des systèmes de séchage solaire [50] ……P32

Figure II.3 : Conceptions typiques de séchoirs à énergie solaire. [52] ……P32

Figure II .4 : Convection naturelle séchoir solaire [50]……P34

Figure II .5 : Un type de serre solaire à circulation naturelle sèche-énergie [49]…P34

Figure II.6 : Sécheur solaire à convection forcée [55]……P35

Figure II.7 : Une grange solaire à toit transparent à convection forcée……P36

Figure II .8 : Caractéristiques d'un séchoir à armoire à énergie solaire active typique……P38

Figure II. 9 : Diagrammes schématiques de séchoir solaire de type boîte. (1) Chambre de séchage. (2) Cheminée pour assurer une circulation d'air adéquate (3) Porte d'accès transparente. (4) Plateaux en maille plastique (5) Aérien absorbeur……p40

absorbeur……P40

Figure II.10 : Un séchoir solaire à chambre ventilée par le vent[49]……p41

Figure II .11 : Séchoir en serre à circulation naturelle [49] …… P41

Figure II.12 : Séchoir solaire passif sous tente en polyéthylène [49]……P42

Figure II.13 : Séchoir tunnel solaire : (1) entrée d'air, (2) ventilateur, (3) module solaire, (4) capteur solaire, (5) côté métallique cadre, (6) sortie du collecteur, (7) support en bois, (8) filet en plastique, (9) structure de toit pour supportant le couvercle en plastique, (10) structure de base pour supporter le tunnel de séchage, (11) barre de roulement, (12) sortie du tunnel de séchage (Bala et al. 2003)……P44

Figure II. 14 : Un séchoir solaire actif à collecteur de toit [49]……P45

CHAPITER III :

Figure III .1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS……P53

Figure III .2 : configuration topologique de base du séchoir étudie……P56

Figure III .3 : configuration topologique d'optimisée du séchoir étudie……P56

Figure III .4 : Maillage des configurations étudiées : (A) a une seule entrée ; (B) : a deux entrées……P59

Figure III .5 : Champs de vitesse : A) avec une seule entrée d'air, B) avec deux entrées d'air……P60

Figure III .6 : Champs de température pour l'air sécheur : A) avec une seule entrée d'air, B) avec deux entrées d'air……P62

Figure III.7 Champs de température de la vapeur : A) avec une seule entrée d'air, B) avec deux entrées d'air……P63

Figure III .8 : Evolution de la température de l'air en fonction de temps pour la première configuration……P64

Figure III .9 : Courbe modifié de la température de l'air du modèle de séchoir solaire indirect on fonction de temps……P64

Figure III .10 : évolution de la température de l'air en deux positions pour la deuxième configuration……P65

Figure III .11 : variation de la température de vapeur en fonction de temps pour la première configuration……P66

Figure III .12 : variation de la température de vapeur en fonction de temps pour la deuxième configuration……P67

Figure III. 13 : Température de vapeur en fonction du temps pour la première configuration……P68

Figure III .15 : Température de vapeur en fonction du temps pour la deuxième configuration……P69

Liste de tableaux :

CHAPITRE I :

Tableau 1 : Valeurs d'a_w favorables pour le développement microbien. [13]……P11

Tableau I.2 : Teneur en humidité initiale et finale de certains produits agricoles [15]……P12

CHAPITERE II :

Tableau II.1 : avantages et inconvénients des différents types de séchoirs solaires……..P39

CHAPITERE III :

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques des tomates fraîches……P52

Symbole	Désignation	Unité
L	Longueur de la surface convective	m
H	Le Coefficient de transfert de chaleur	W.m-2. K-1
Pr	Numéro de Prandtl de l'air	/
$C_{b,j}$	Concentration d'humidité à la surface de la tranche	/
C_i	Concentration d'humidité de l'air	/
$kc_{,i}$	Coefficient de transfert de masse	/
Re	Nombre de Reynolds de l'air	/
Sc	Numéro de Schmidt	/
ρ	Densité du solide	Kg /m^3.
Cp	Capacité thermique spécifique du solide	J/kg. K.
T	Température	K°
Q	Énergie générée dans le volume de contrôle	J
K	Conductivité thermique du matériau	W/m.K.
η	Efficacité thermique	%
μ	Viscosité	Kg.m-1.s-1
p	Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'aliment.	Pas
pw	Pression partielle de vapeur d'eau	Pas

Sommaire :

Introduction générale

CHAPITERE I : Concepts fondamentaux du séchage

I .1 Introduction…… 01

I.2. L'activité de l'eau ……..05

I.3. Propriétés de l'air sécheur…….. 06

I.3.1 Températures sèches et humides…….. 06

I.3.2 Température du point de rosée…… 07

I.3.3 Humidité spécifique et humidité relative…… 07

I.3.4 Le diagramme psychrométrique…….. 08

I.4.1 Teneur en humidité…….. 09

I.4.1.1 Teneur en eau base sèche ou humide..…… 09

I.4.1.2. Taux d'humidité idéal pour les aliments……10

I.4.1.3. Méthodes de mesure……11

I.4.3 Isothermes de sorption…… 13

I.4.3.1 Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau……13

I.4.3.2 Phénomène d'hystérésis…… 14

I.4.3.3 Modèles des isotherme sorptions……15

I.5 Mécanisme de séchage…… 17

I.5 .1 Transferts de chaleur par convection…… 17

I.5 .1.1 Principes physiques du séchage……..... 17

I.5 .2 Cinétique de séchage…… 18

I.5 .2.1 Migration de l'humidité……..18

I.5 .2.2Phases de Séchage…… 19

I.6. Taux de Séchage…….. 21

I.6.1. Définition du taux de séchage…….. 21

I .6.2. Facteurs influençant le taux de séchage…….. 23

I.6.2.1. L'influence de l'humidité ambiante sur le taux de séchage ……23

I.6.2.2. L'effet de la température sur le taux de séchage…….... 23

I.6.2.3. L'impact de la circulation d'air sur le taux de séchage…… 23

I.6.2.4. L'importance de la taille et de la forme des matériaux sur le taux de séchage……...24

I.6. 3. Les méthodes pour améliorer le taux de séchage……24

I.7 Revue bibliographique sur le séchage solaire…….....…. 24

I.8 Conclusion……. 26

CHAPITERE II **:** SYSTEMES des séchoirs solaires

II.1. Introduction…… 29

II.2. Mode de fonctionnement d'un séchoir solaire…….. 30

II.3. Classification des séchoirs solaires……..…. 31

II. 3.1. Séchoirs solaires à convection naturelle……. 33

II .3.2 Séchoirs solaires à convection forcée……. 34

II.3.3 Séchoirs solaires hybrides……. 35

II. 3.4 Séchoir solaire active de type intégré……..…. 37

II. 3.4.1 Séchoirs solaires directs……. 37

II.3.5 Séchoirs solaires indirects…… 38

II. 3.6 Séchoirs solaires à mode mixte……. 38

II.4. Séchoirs solaires les plus typiques utilisés en agriculture…….. 39

II.4.1 Séchoirs solaires à doubles passages multiples…….. 39

II. 4.2 Séchoirs de type armoire et boîte…… 39

II.4.3 Séchoirs à chambre…… 40

II.4.4 Séchoirs à effet de serre…… 41

II.4.5 Séchoirs sous tente en polyéthylène…… 42

II.4.6 Tunnels de séchage…… 43

II.4.7 Séchoirs internes……44

II . 5 Analyse énergétique des séchoirs……45

II.5.1 Facteur d'utilisation de la chaleur (HUF)…… 46

II .5.2 Coefficient de performance (COP)…… 47

II .5.3 Efficacité du séchage (DE)…… 47

II.6. Conclusion…….. 47

CHAPITERE III : résolution numérique et résultats discussion

III.1. INTRODUCTION…… 50

III.2. Propriétés du matériau ……50

III.3. Modèle mathématique ……51

III.3.1. Présentation du code de calcul numérique ……..51

III.3-2 Formulation mathématique du problème ……52

III.4. Simulation numérique ……. 53

III.4.1 Définition du problème…….. 53

III.4.2 -Conditions aux limites……..55

III.4.3- Maillage et discrétisation……. 55

III.5. Résultats et discussion……57

III.5. 1. Champ de vitesse……..57

III.5. 2. Champ de température. ……58

III.5. 2.1 Température de l'air sécheur……58

III .5. 2.2 Température de la vapeur……60

III.5. 3. Profil de température……61

III.5. 3.1. Distribution de la température de l'air……61

III.5. 3.2. Distribution de la température de la vapeur……63

III.6. Conclusion……66

CONCLUSION GENERALE……71

ملخص :

في هذه الدراسة، تم إجراء عملية تجفيف شرائح الطماطم. تم تحديد خصائص هواء التجفيف (درجة الحرارة والرطوبة النسبية والسرعة) بانتظام كدالة للوقت من أجل تحسين المجففات الشمسية غير المباشرة المستخدمة في هذه العملية. كان الهدف الرئيسي هو تسليط الضوء على تأثير الأشكال الطوبولوجية للمجففات على كفاءة التجفيف. وللقيام بذلك، قمنا بدراسة سلوك الهواء في تكوينين مختلفين، الأول منهما يحتوي على مدخل واحد للهواء المجفف والثاني يحتوي على مدخلين للهواء. في هذا التحليل العددي، تم ضبط درجة حرارة هواء التجفيف وسرعته كمتغير في الظروف الأولية والحدودية. تم حل معادلات Navier-Stokesعددياً باستخدام طريقة العناصر المحدودة عبر كود .ANSYS APDLباستخدام نهج ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD)، أتاحت المحاكاة العددية تحديد توزيع درجة الحرارة ومحتوى الماء والسرعة لكل تكوين تمت دراسته. أظهرت النتائج أن إضافة مدخل هواء ثانٍ إلى غرفة التجفيف يهدف إلى توفير توزيع أكثر توازنًا للحرارة، وبالتالي ضمان تجفيف أكثر تجانسًا. من المحتمل أن يؤدي هذا التعديل إلى تحسين كفاءة المجففات الشمسية بشكل كبير من خلال تحسين توزيع الحرارة. في هذا التكوين الأمثل للمجفف الشمسي غير المباشر، تتراوح درجة حرارة الهواء بين 46 و59 درجة مئوية وسرعة هواء التجفيف تتراوح بين 0.3 و0.8 م/ث.

الكلمات المفتاحية: المجفف الشمسي غير المباشر، الطوبولوجيا، المحاكاة العددية، عقود الفروقات

Résume :

Dans cette étude, un processus de séchage de tranches de tomates a été réalisé. Les caractéristiques de l'air de séchage (température, humidité relative et vitesse) ont été régulièrement définies en fonction du temps pour améliorer les séchoirs solaires non directs utilisés dans ce processus. L'objectif principal était de mettre en lumière l'impact des formes topologiques des séchoirs sur l'efficacité du séchage. Pour ce faire, nous avons étudié le comportement de l'air dans deux configurations différentes, l'une avec une seule entrée d'air de séchage et l'autre avec deux entrées d'air. Dans cette analyse numérique, la température de l'air de séchage et sa vitesse ont été ajustées en tant que variables dans les conditions initiales et limites. Les équations de Navier-Stokes ont été résolues numériquement en utilisant la méthode des éléments finis à travers le code ANSYS APDL. En utilisant l'approche de la dynamique des fluides numérique (CFD), la simulation numérique a permis de déterminer la distribution de la température, de la teneur en eau et de la vitesse pour chaque configuration étudiée. Les résultats ont montré que l'ajout d'une deuxième entrée d'air dans la chambre de séchage vise à fournir une distribution de chaleur plus équilibrée, garantissant ainsi un séchage plus uniforme. Cette modification pourrait potentiellement améliorer considérablement l'efficacité des séchoirs solaires en améliorant la distribution de la chaleur. Dans cette configuration optimale du séchoir solaire non direct, la température de l'air varie entre 46 et 59 degrés Celsius et la vitesse de l'air de séchage varie entre 0,3 et 0,8 m/s.

Mots-clés : Séchoir solaire non direct, topologie, simulation numérique, méthodes aux différences finies

Abstract :

AspecIn this study, a drying process for tomato slices was conducted. The characteristics of the drying air (temperature, relative humidity, and velocity) were regularly adjusted over time to enhance the performance of indirect solar dryers used in this process. The main objective was to shed light on the impact of the topological shapes of the dryers on drying efficiency. To achieve this, the airflow behavior was studied in two different configurations, one with a single inlet for drying air and the other with two air inlets. In this numerical analysis, the drying air temperature and velocity were adjusted as variables in the initial and boundary conditions. The Navier-Stokes equations were numerically solved using the finite element method via ANSYS APDL code. Using computational fluid dynamics (CFD) approach, the numerical simulation enabled the determination of temperature distribution, moisture content, and velocity for each studied configuration. The results showed that adding a second air inlet to the drying chamber aimed to provide a more balanced heat distribution, thus ensuring more uniform drying. This modification could potentially significantly improve the efficiency of solar dryers by enhancing heat distribution. In this optimal configuration of the indirect solar dryer, the air temperature ranges between 46 and 59 degrees Celsius, and the drying air velocity ranges between 0.3 and 0.8 m/s.

Keywords: Indirect solar dryer, topology, numerical simulation, finite difference methode.

Introduction générale :

Au vu de l'augmentation de la population mondiale et donc de nos besoins alimentaires, la conservation des produits agricoles et la réduction des pertes post-récolte sont essentielles pour la sécurité alimentaire. Le séchage solaire est en cours pratique depuis des siècles pour conserver différents types de produits agricoles. En raison de progrès de la science et de la technologie, nous avons développé des produits peu coûteux et dispositifs de séchage solaire efficaces pour sécher différents produits agricoles et marins utilisant l'énergie solaire. En utilisant un séchoir solaire, la quantité d'humidité peut être réduite énormément, préservant ainsi les produits plus longtemps. Cela réduit le produit le gaspillage et améliore la productivité des agriculteurs. Beaucoup des scientifiques ont étudié la modélisation de séchage solaire des produits agricoles et il y a également simulation des études sur les séchoirs solaires (directs, indirects) [1,2]. Pour utiliser librement, l'énergie renouvelable et non polluante comme source principale fournie par le soleil, l'introduction des séchoirs solaires dans les pays en voie de développement peuvent réduire des pertes de récoltes et améliorer sensiblement, la qualité du produit sec comparé aux méthodes traditionnelles de séchage.

L'Algérie possède un des plus importants gisements solaires au monde. Quantitativement, le Sahara algérien enregistre des temps d'insolation pouvant atteindre 3900 heures par an [3]. 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 que plusieurs études ont déjà montré sa performance.

La méthode traditionnelle de séchage des produits agricoles consiste à les exposer au soleil ou à l'air libre. Cette méthode, appelée séchage naturel ou séchage à l'air, est

faible compte tenu des nombreux problèmes, parmi ces derniers on cite : difficulté de commander le processus de séchage correctement, coût de main d'œuvre élevé, nécessité des zones vastes, infection par des insectes et autres corps étrangers. Les aliments placés à l'air libre sont facilement contaminés. Par conséquent, l'une des principales raisons pour lesquelles le séchage au soleil n'est pas facile à réaliser avec de plus grandes quantités d'aliments est que le contrôle et la surveillance deviennent de plus en plus difficiles avec l'augmentation des quantités d'aliments. Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, à l'exemple des séchoirs solaires. Un séchoir solaire consiste à accumuler l'énergie du soleil à l'intérieur d'un dispositif de collecte de la chaleur, puis à créer un flux d'air chaud par convection naturelle ou forcée. L'énergie solaire est renouvelable et illimitée mais elle est aussi intermittente, elle dépend du lieu, l'heure du jour, la saison et les conditions météorologiques. Cela pose un problème majeur pour les séchoirs solaires, c'est la discontinuité du fonctionnement du séchoir solaire durant les heures non ensoleillées. Par conséquent, il est nécessaire d'intégrer une unité de stockage thermique dans le séchoir solaire pour palier à cet handicape.

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.

Ces dernières années, les nombreuses tentatives ont été faites pour développer le séchage solaire principalement pour préserver les produits agricoles. Des systèmes de séchage solaire doivent être correctement conçus pour répondre à des exigences de séchage particulier, de récoltes spécifiques, et pour donner l'exécution satisfaisante en ce qui concerne le besoin en énergie. Ce travail contribue à l'amélioration des connaissances dans le domaine du séchage solaire des produits agroalimentaire, il consiste a une simulation numérique de comportement dynamique et thermique de l'écoulement d'air au sein d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle

contenant un capteur solaire, d'une chambre de séchage et une unité de stockage thermique.

Le présent travail comporte quatre chapitres :

- Le premier chapitre présent une étude bibliographique consacrée au séchage solaire, ces différents modes et les notions théoriques de base pour la compréhension de ce processus (mécanisme et cinétique de séchage) suivit par 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 donne une revue bibliographique succincte et récente apportée sur les séchoirs solaires et les différentes technologies utilisées pour améliorer ses performances dynamiques et thermique.
- Le troisième chapitre présente le problème physique étudié, sa modélisation, les conditions aux limites et climatiques et la résolution numérique et concerne la présentation et discussion des résultats obtenus.

En fin dans la conclusion, on donne un résumé de l'essentiel des résultats obtenus ainsi que les perspectives.

CHAPITERE I

Concepts fondamentaux du séchage

I .1 Introduction :

Le séchage est l'un des moyens couramment utilisé pour la préservation des aliments en général et des fruits et légumes en particulier [4]. Le séchage solaire, une méthode de préservation alimentaire exploitant l'énergie du soleil pour abaisser la teneur en eau dans les aliments et augmenter leur durée de conservation [5,6]. Cette méthode est une alternative écologique et économique pour la déshydratation des aliments, L'un des principaux avantages de l'utilisation d'un séchoir solaire par rapport aux méthodes de séchage traditionnelles est l'amélioration de la qualité alimentaire et la réduction de la consommation d'énergie en contribuant à la protection de l'environnement. Ce processus utilise principalement le chauffage convectif, où l'air chauffé circule sur le produit pour provoquer l'évaporation, et le système peut augmenter significativement la puissance évaporatoire réelle de l'air ambiant, réduisant ainsi le temps de séchage [7]. Ces dernières années, les pertes post-récolte de produits alimentaires et agricoles ont été réduits grâce aux méthodes de conservation avancées. Ce chapitre aborde les concepts fondamentaux du séchage de tels comme l'activité de l'eau et son importance, les propriétés importantes de l'air et du produit, mécanisme de séchage, courbes de séchage et indicateurs de performance du séchoir. Le des connaissances fondamentales en séchage permettront de mieux comprendre systèmes de séchage.

I.2. L'activité de l'eau :

La plupart des légumes frais, fruits et produits alimentaires que nous consommons contiennent 80 à 99 % d'eau et ne sont à l'abri des détériorations biochimiques, enzymatiques et microbiennes [8]. La principale raison derrière cela est la présence de l'eau dans l'aliment, cette disponibilité de l'eau peut être quantifiée par un paramètre qui s'appelle l'activité de l'eau. Connaître les informations sur la disponibilité de l'eau pour les besoins microbiens, enzymatiques ou l'activité chimique aide à prédire la stabilité et le contrôle de l'eau activité visant à prolonger la durée de conservation. Normalement les matières alimentaires qui ont une teneur élevée en humidité sont très sujettes à la détérioration. En milieu humide produits, la présence d'eau peut être observée sous deux formes : soit de l'eau libre, soit de l'eau liée. La teneur en eau libre participe aux réactions chimiques et processus biologiques, qui

détériorent principalement la qualité des aliments. L'activité de l'eau dans un produit humide influence beaucoup les réactions chimiques (enzymatiques et réactions non enzymatiques) et favorise la croissance de micro-organismes tels comme les bactéries, les moisissures, les levures et les champignons [9]. Cette activité de l'eau dans un produit peut être contrôlé soit en réduisant la teneur en humidité, soit en ajoutant des produits chimiques (sels, sucres) et glycérol) qui contrôlent la teneur en eau disponible pour la réaction.

L'activité de l'eau, a_w, peut être défini comme le rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau juste au-dessus de la pression produit à celle de la pression partielle de l'eau pure à la même température. Elle augmente avec l'augmentation de la température et de la pression. Normalement, sa valeur varie de 0 à 1. L'activité de l'eau a_w peut également être exprimée comme suit **[10]** où :

$$a_w = \frac{p}{p_0} \qquad \text{(I.1)}$$

P : pression partielle de la vapeur d'eau dans l'aliment.

Po : pression de vapeur saturante de l'eau pure à la même température

I.3. Propriétés de l'air sécheur :

Le processus de séchage est influencé par de nombreux paramètres basés sur le type de séchoir. La plupart des séchoirs utilisés sont des séchoirs à convection plutôt que des séchoirs à conduction. Dans le cas des séchoirs à convection, l'air est chauffé au moyen de n'importe quelle source de chaleur, de l'air chaud sera fourni aux produits humides pour éliminer la teneur en humidité. Cette section traite des propriétés de l'air chaud, qui influ encent sur le processus de séchage.

I.3.1 Températures sèches et humides :

La température de l'air sèche Ts est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec. Si l'ampoule du thermomètre est recouverte d'une mèche ou tissu humide, la température mesurée est appelée température du bulbe humide Th. Dans des conditions d'air saturées, les températures du bulbe humide et du bulbe sec seront être égale, et dans d'autres cas,

la température du bulbe sec est supérieure à la température du bulbe humide température.

I.3.2 Température du point de rosée :

La rosée la température du point est notée Tr. Il s'agit de la température pour laquelle l'air devient saturé pour la pression de vapeur d'eau considérée. Or intervient dans l'expression de l'humidité spécifique, si bien que la température de rosée représenté encore la température de saturation a humidité spécifique.

I 3.3 Humidité spécifique et humidité relative :

L'humidité spécifique de l'air est la masse de vapeur d'eau par unité masse d'air sec dans le mélange de vapeur et d'air. Elle est généralement exprimée en grammes d'eau par kg d'air sec. Elle peut être calculée à partir de la masse de vapeur d'eau mw et de la masse d'air sec ma comme suit :

$$H = \frac{m_w}{m_a} \qquad \text{(I.2)}$$

On écrit encore :

$$H = 0.662\,\frac{p_w}{p_a} = 0.662\,\frac{p_w}{p_{t-p_w}} \qquad \text{(I.3)}$$

pw – pression partielle de vapeur d'eau.

Pa – pression partielle de l'air.

Pt – pression totale du mélange d'air et de vapeur .

L'autre terme important associé à l'humidité est humidité relative notée HR ou ϕ; est définit comme la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air donné par rapport au maximum qu'il pourrait contenir à une température et une pression données, elle varie de 0 à 100%. L'air est sec quand l'humidité relative est inférieure à 35%. L'air est moyennement humide entre 35 et 65%, et l'air est humide à plus de 65% d'humidité relative. À l'intérieur d'un même espace, l'HR varie en fonction des changements de température : elle augmente si la température baisse et diminue si elle s'élève. L'HR est exprimé par :

$$HR = \frac{p_w}{p_{ws}} \times 100 \qquad \text{(I.4)}$$

Où :

pw : pression partielle de vapeur d'eau à une température donnée.

pws :pression partielle de vapeur d'eau à saturation à la même température.

Le degré de saturation de l'air humide ψ est le rapport entre masse de vapeur d'eau dans une unité masse d'air sec en masse de vapeur d'eau dans une unité masse d'air sec lorsque l'air est saturé à même température :

$$\psi = \frac{m_w}{m_{ws}} = \frac{H}{H_s} \qquad \text{(I.5)}$$

I 3.4 Le diagramme psychrométrique :

Le processus de séchage est principalement caractérisé par les propriétés de l'air et de la vapeur d'eau. Grace au diagramme psychrométrique on peut déterminer graphiquement, avec une assez bonne précision, toutes les caractéristiques de l'air en connaissant au moins deux d'entre elles. C'est un diagramme qui représente l'humidité absolue, la température du point de rosée et les volumes spécifiques à la température du bulbe sec. Les températures sèches et les teneurs en humidité par kg d'air sec sont tracés selon les axes horizontal et vertical, respectivement. Les températures du point de rosée sont marquées sur la ligne courbe supérieure, ce qui correspond à 100% d'humidité relative. Cette ligne est connue sous le nom de ligne de saturation, et les lignes d'humidité relative constante en pourcentage sont marquées entre la saturation ligne et la ligne de base du graphique. Les lignes de bulbe humide sont des lignes diagonales inclinées vers la droite faisant un angle de 30 avec l'axe horizontal. Le volume spécifique, c'est-à-dire le volume de mélange air-vapeur d'eau par kg d'air sec, est une autre ligne diagonale plus raide à 60 C. (Figure I.1). Le diagramme psychrométrique a été établi pour une masse d'air sec de 1 kg et une pression atmosphérique souvent égale à la pression atmosphérique normale (101325 Pa), donc pour une altitude de 0 m. Au-delà, il faut apporter des corrections.

Pour le préchauffent de l'air, avant d'entrer au séchoir, le taux d'humidité reste constant et l'humidité relative augmente.

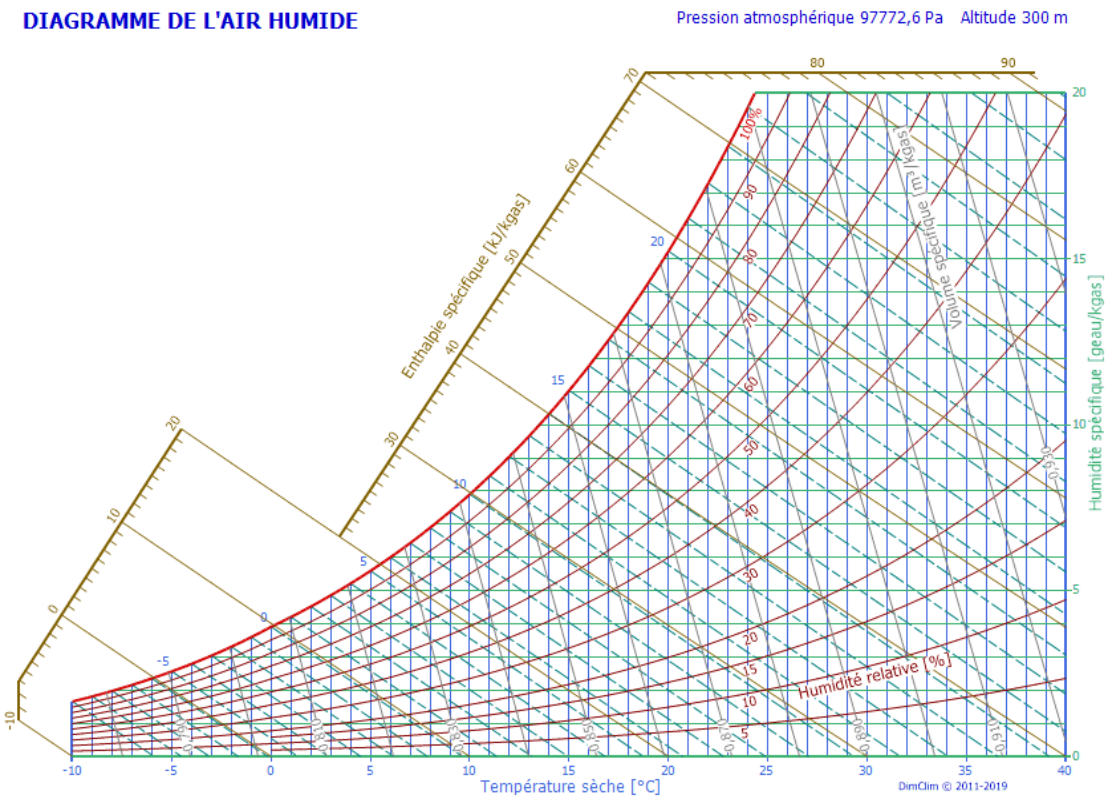


Figure I.1 : Diagramme psychrométrique

I.4. Propriétés importantes du produit humide :

La vitesse de séchage dépend des propriétés de l'air ainsi que des propriétés du produit humide. Cette section traite quelques propriétés du produit qui sont influençant le séchage, comme la teneur en humidité et la teneur en humidité d'équilibre d'un produit.

I 4.1 Teneur en humidité :

I.4.1.1. Teneur en eau base sèche ou humide :

La teneur en eau est une mesure de l'eau totale que contient un aliment, elle est généralement exprimée en pourcentage du poids total. La teneur en eau des aliments est un facteur décisif dans leur apparence, leur goût, leur durée de conservation et finalement leur poids. Le contrôle de l'humidité présente de nombreux avantages dans la production alimentaire, mais l'objectif final est d'améliorer la productivité et de maintenir une qualité optimale du produit, cela peut être exprimé soit par rapport une base humide ou une base sèche. Dans la méthode sur base humide, la teneur en humidité en base humide, noté « m », est calculée comme suit [11].

$$m = \frac{m_w}{m_w + m_d} = \frac{m_w}{m_T}$$ (Kg d'eau/kg du produit) (I.6)

En base sèche, la masse de teneur en humidité par unité de masse de produit sec, désigné par « M », est déterminé comme suit :

$$M = \frac{m_w}{m_d}$$ (Kg d'eau/kg du produit sec) (I.7)

Où m, M, m_d, m_W et m_t sont respectivement : teneur en humidité sur base humide, teneur en humidité sur base sèche, masse de matière sèche dans le produit, masse d'eau dans le produit et masse totale du produit. La teneur en eau peut être exprimée en pourcentage en multipliant la teneur décimale en humidité par 100.

Les deux paramètres m et M peuvent être liées par les relations suivantes [12].

$$M = \frac{m}{1-m}$$ (I.8)

$$m = \frac{M}{1+M}$$ (I.9)

La figure I.2 montre la variation de la teneur en humidité sur base humide avec en ce qui concerne la teneur en humidité sur base sèche.

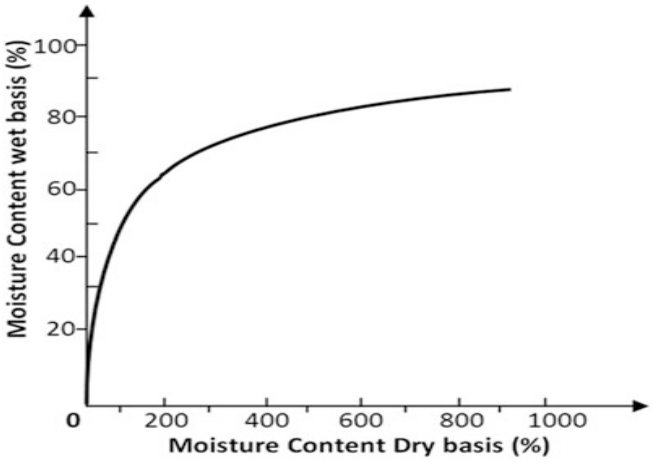


Figure I.2 : Variation de teneur en humidité à base sèche avec base humide [12]

I. 4.1.2. Taux d'humidité idéal pour les aliments :

En fonction de la nature de la teneur en humidité, les matériaux peuvent être regroupés en matériaux hygroscopiques et non hygroscopiques. Dans les matériaux non hygroscopiques, l'eau est présente sous forme libre, appelée parfois eau superficielle parce qu'elle occupe la surface extérieure du produit. Cette eau exerce une pression de vapeur égale à la pression de vapeur saturante à la température considérée. Cette eau pourrait être complètement éliminée par évaporation pendant le processus de séchage, alors que les matériaux hygroscopiques contiennent de l'eau liée qui correspond à l'eau adsorbée à la surface interne du matériau poreux en une ou plusieurs couches (phénomène de physisorption) et à l'eau retenue par capillarité dans les pores les plus fins du matériau. Cette eau, qui correspond à la fraction la plus difficile à évacuer, exerce une pression de vapeur inférieure à la pression de vapeur saturante à la température considérée. Pour cette raison, l'humidité liée restera toujours dans le matériau sous forme d'humidité résiduelle. La plupart des matières alimentaires sont des matériaux hygroscopiques.

Tableau 1 : Valeurs d'a_w favorables pour le développement microbien. [13]

Valeurs a_w	Micro-organismes	Produits alimentaires
1.00-0.95	Pseudomonas, Escherichia, Bacillus, Clostridium…,	Fruits, légumes, viande, poisson, laitage, aliments sucrés ou salés…
0.95-0.91	Salmonella, C. botulinum, moisissures, levures	Fromages (Cheddar), viande fumée, concentrés de jus de fruits…
0.91-0.80	Staphylococcus auteurs, levures (Candida, Torulopsis) et moisissure (Penicillium)	Concentrés de jus de fruits, flans, fromages secs, margarine, aliments sucrés ou salés…
0.80-0.60	Bactéries halophiles, moisissures xérophile, levures osmiophiles	Pates d'amande, fruits confits, miel, nougats, bouillies, fruits secs,
0.60-0.20	Croissance microbienne très faible	Pâtes alimentaires, épices, poudre de lait, fruits secs, céréales, biscuit…

I.4.1.3. Méthodes de mesure :

La quantité d'humidité dans un matériau peut être mesurée par de nombreuses méthodes, ils existent des méthodes gravimétriques, chimiques et physiques.

Les méthodes thermogravimétriques mesurent les variations de la masse d'un échantillon pesé av séchage" fait référence à la perte totale de masse. Une technique d'analyse thermique qui permet de suivre la variation de masse d'un échantillon en fonction du temps, pour une température ou un profil de température donné dans une atmosphère contrôlée. Cette analyse nécessite de connaître 3 données précises : la masse, le temps et la température. La méthode thermogravimétrique est la méthode de référence pour la détermination de l'eau ou des solides totaux dans les aliments. L'analyse nécessite l'emploi d'une étuve ventilée ou d'un four à vide, ainsi que d'un dessiccateur contenant un agent desséchant. Ces méthodes conviennent mieux aux matériaux où l'humidité n'est que faiblement liée au matériau.

Les méthodes chimiques consistent à impliquer une réaction chimique entre un réactif spécifique à l'eau de la réaction est proportionnel à la quantité de réactif consommée. La méthode la plus connue est celle de Karl Fischer [14]. C'est une technique analytique permettant le dosage de la teneur en eau dans un échantillon liquide ou solide par titrage.

Les méthodes physiques utilisent des techniques d'isolement ou les propriétés physiques de l'eau pour analyser la teneur en eau. Ces méthodes de mesure indirectes nécessitent un étalonnage par rapport à un étalon de référence ou une méthode primaire (par exemple, le titrage de Karl Fischer) avant d'être utilisées pour mesurer l'humidité.

Tableau I .2 : Teneur en humidité initiale et finale de certains produits agricoles [15].

Produit alimentaire	Taux d'humidité initiale (%)	Taux d'humidité finale (%)	Température maximum admissible (°C)
Tomates	96	10	60
Oignon	80	4	55
Ananas	80	10	65
Pommes	80	24	70
Pommes de terre	75	7	75
Bananes	80	15	70
Riz	24	11	50
Maïs	35	15	60

I. 4.2. Teneur en humidité à l'équilibre :

Comme décrit précédemment, La migration de l'humidité affecte de manière significative les propriétés physiques et chimiques de l'aliment. Lorsqu'un aliment est exposé à l'air à une température et une humidité relative constantes, le produit gagnera ou perdra de l'humidité jusqu'à atteindre une teneur en humidité en équilibre avec l'air ambiant, on dit que l'humidité relative d'équilibre (HRE) est atteinte. Elle est définie comme l'humidité relative de l'air entourant l'aliment qui est en équilibre avec son environnement. Dans cet état, La pression de vapeur de l'eau dans le produit est égale à la pression partielle du l'air ambiant. Cela veut dire qu'il n'y a pas d'échange net d'humidité entre le matériau et l'air.

$$HRE = \frac{p}{p_0} \times 100 = a_w \times 100 \qquad \text{(I.10)}$$

I. 4.3 Isothermes de sorption :

I. 4.3.1 Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau :

L'activité de l'eau a_w dans un produit alimentaire dépend principalement de sa teneur en eau (M) et de sa température T. La courbe représentant la variation de la teneur en humidité d'équilibre HRE ou l'activité de l'eau avec l'humidité relative du l'air ambiant à une température donnée est appelée :

Isotherme d'adsorption (hydratation), si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.

Isotherme de désorption (déshydratation), si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

Pendant le processus d'adsorption, la pression partielle de vapeur d'eau dans le solide est inférieure à celle de l'air ambiant et vice versa dans le processus de désorption. Cette différence de pression partielle induit la transférer l'humidité de l'air au solide et du solide à l'air. On peut représenter graphiquement la courbe appelée isotherme d'adsorption-désorption, obtenue en portant :

- En abscisse : soit l'a_w, soit l'HRE
- En ordonnée : la teneur en eau du produit exprimée en g d'eau pour 100g de matière sèche (% MS ou M).

Les courbes obtenues lors les processus de désorption et d'adsorption ne sont pas similaires et elles varient d'un produit à l'autre. Les deux courbes sont en général différentes (Figure I.3) car le séchage d'un produit (passage d'$a_w = 1$ à $a_w < 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité irréversibles. Par ailleurs, pour qu'un produit alimentaire puisse se conserver, son activité doit en général être abaissée en- dessous de 0,6, seuil en-dessous duquel les moisissures ne peuvent plus se développer [16]. En séchage, on s'intéresse particulièrement à la courbe de désorption, Elle se compose de trois zones indiquées par A, B et C, qui correspondent à différents mécanismes de liaison de l'eau au solide. (Figure I.3) :

Zone A ($0< a_w <0,2$) : *Constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit* (forces de Van der Waals entre groupements hydrophiles et molécules d'eau). L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant la surface externe et les pores du produit. L'eau est dans un état lié (rigidité, fortes liaisons hydrogènes et la surface). Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée. L'isotherme d'adsorption et la désorption les isothermes sont les mêmes dans cette région en raison de l'adsorption monocouche de l'eau vapeur.

Zone B ($0.2< a_w< 0,6$) : Adsorption des molécules d'hydrogène sur la *monocouche initiale*, ou inclusion de molécules d'eau par capillarité. L'isotherme est linéaire dans cette zone qui est connue comme une zone de transition et les teneurs en eau plus faiblement liés. La pression de vapeur d'eau est inférieure à la pression de saturation à la même température, en raison de son confinement dans des capillaires plus petits. Cette teneur en eau participera aux réactions.

Zone C (a_w> 0,6) : Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau micro-capillaire constitue une phase continue. Dans la région C, la teneur en eau est plus maintenue de manière libre dans des capillaires plus grands qui agissent comme un solvant et sont disponibles pour réactions.

La connaissance de l'isotherme de désorption est essentielle en cas de séchage par entrainement ou le produit est placé dans un courant d'air chaud et sec à une température et humidité relative connues, il nous a permet de calculer la teneur en eau d'équilibre HRE du produit avec l'air sécheur, la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau M du produit en fin de séchage. La valeur de HRE est un paramètre qui apparaît particulièrement dans les modèles permettant de prévoir l'évolution de la teneur en eau d'un produit au cours de son séchage.

I.4.3.2 Phénomène d'hystérésis :

L'analyse de l'isotherme d'adsorption et de désorption montre que les 2 courbes ne sont pas superposées. Pour une teneur en eau donnée, l'équilibre de la désorption s'établit pour des a_w plus faibles que l'équilibre de l'adsorption. C'est le phénomène d'hystérésis, qui ne se manifeste que pour des valeurs d'a_w > 0,2. L'hystérésis s'explique par deux observations :

Les pores des aliments sont en général plus petits en surface qu'en profondeur. La pression de vapeur d'eau nécessaire au remplissage est plus élevée que celle à laquelle les pores se vident ;

L'hystérésis est surtout marquée dans les fruits et les légumes car les sucres de ces aliments forment des solutions sursaturées qui ne précipitent pas lors de la déshydratation.

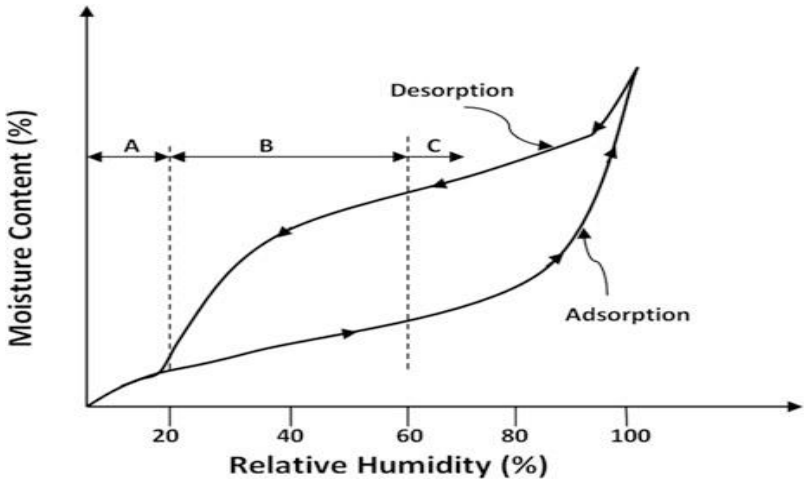


Figure I .3 : Adsorption typique isotherme montrant la boucle hystérésis [17]

I. 4.3.3 Modèles des isothermes sorptions :

La relation entre la teneur en humidité d'un solide M et l'activité de l'eau aw, est expliquée avec de nombreux modèles mathématiques tels que linéaires, non linéaires et modèles de régression. L'isotherme d'adsorption de Langmuir [18] est utilisée pour décrire l'équilibre entre l'adsorbat et le système adsorbant, où l'adsorption de l'adsorbat est limitée à une couche moléculaire au moment où avant qu'une pression relative de l'unité soit atteinte.

$$a_w\left(\frac{1}{M}-\frac{1}{M_m}\right)=\frac{1}{C\cdot M} \qquad \text{(I.11)}$$

L'isotherme de Langmuir est peut-être l'équation la plus importante et la plus largement appliquée pour expliquer l'équilibre d'adsorption. Cependant, les hypothèses qui sous-tendent l'isotherme de Langmuir existent rarement dans les systèmes réels [19]. Dans ce qui suit, on va citer un certain nombre de ces modifications :

L'équation de Brunauer – Emette – Teller (BET) [20] est une modification de l'équation de Langmuir précédente, La théorie (BET) est utilisée pour mesurer la surface de matériaux solides ou poreux. Cela fournit des informations importantes sur leur structure physique, car la surface d'un matériau affecte la façon dont ce solide interagira avec son environnement. C'est une méthode efficace pour calculer la quantité d'eau liée dans les aliments séchés. L'équation peut être appliquée uniquement aux matériaux qui ont une valeur d'activité de l'eau comprise entre 0,05 et 0,45(zone 1et 2) :

$$\frac{a_w}{(1-a_w).M} = \frac{1}{M_m.C} + \frac{C-1}{M_m.C} a_w \quad \text{(I.12)}$$

Où : Mm : teneur en humidité monocouche .C : constante liée à la chaleur nette de sorption

L'équation Guggenheim Anderson et Boer (GAB) est le modèle isotherme le plus largement accepté et représenté. Car il convient à tous les produits alimentaires ayant une activité de l'eau allant de 0,1 à 0,9(toutes les zones). L'équation GAB s'écrit [21].

$$M = \frac{M_m.C_b.Ka_w}{(1-Ka_w)(1-Ka_w+CKa_w)} \quad \text{(I.13)}$$

Où Cb et K sont les paramètres du modèle et sont liés à la température. L'équation isotherme GAB est une extension du modèle BET à deux constantes, et elle prend en compte les propriétés du Sorbet de Potassium (E202) dans la région multicouche et dans le liquide en vrac propriétés grâce à l'introduction d'une troisième constante K.

Équation de Cauris [22] :

$$\ln C = \ln A - r a_w \quad \text{(I.14)}$$

Où A et r sont constants et C'est la concentration en eau.

Équation de Chen et Yang [23] :

$$a_w = \exp[k + a.\exp(bM)] \quad \text{(I.15)}$$

Ce modèle a été développé sur la base de la théorie du séchage où k, a et b sont des constantes.

Équation de Henderson [24] :

$$1 - a_w = \exp^{-(kM^n)} \quad \text{(I.16)}$$

Où k et n sont des constantes.

Équation de Smith [25] :

$$M = a\left[\frac{a_w}{1-a_w}\right]^n \quad \text{(I.17)}$$

Où a et n sont constants

Équation de Smith [26]

$$M = M_b - M_a ln(1 - a_w) \quad \text{(I.18)}$$

Où Mb et Ma sont constants

I.5 Mécanisme de séchage :

Le séchage C'est une opération de séparation thermique qui consiste à éliminer par tout ou une partie d'un liquide imprégnant un produit (liquide ou solide) dit « humide » par vaporisation de ce solvant afin de le transformer en produit solide qualifié de « sec » même s'il contient une humidité résiduelle. Le terme déshydratation a un sens plus restrictif : il ne concerne que l'élimination de l'eau dans un solide ou dans un liquide. Le but du séchage d'un produit alimentaire est de le déshydrater à abaisser sa teneur en eau en-dessous d'une valeur permettant sa conservation à température ambiante. Le séchage a donc pour effet d'alléger le produit. Le mécanisme d'élimination de l'humidité par séchage est impliqué dans deux processus simultanés : le premier est le transfert de chaleur au produit pour le l'évaporation, et deuxièmement le transfert de la masse d'humidité du produit surface à l'air. Pour cette raison, le processus de séchage est appelé simultané opération de transfert de chaleur et de masse.

I.5 .1 Transferts de chaleur par convection :

I.5 .1.1 Principes physiques du séchage :

La vaporisation du solvant contenu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit. Cependant, dans la plupart des cas, la vaporisation est effectuée en utilisant une source d'énergie extérieure au produit. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur : convection - conduction – rayonnement. Ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre

eux. Pour le séchage par convection, Il est courant de faire une distinction entre séchage par ébullition et séchage par entraînement [27].

— pour le séchage par ébullition, la pression de vapeur du solvant est égale à la pression régnant dans le sécheur. 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) ;

— pour le séchage par entraînement, l'air chaud ou le gaz est soufflé sur la surface du produit et le la chaleur est transférée au produit. Cette chaleur augmente la température du produit et l'humidité s'évapore sous forme de vapeur, ce qui augmente la pression de vapeur du produit. Dans ces conditions, la pression de vapeur du produit est supérieure à la pression de vapeur de l'air ambiant. Cette différence de pression provoque l'évaporation de l'humidité de la surface du produit vers l'air.

Le séchage par entraînement est le moyen de séchage le plus universel, tous produits et secteurs alimentaires confondus (lait, œuf, charcuterie, céréales et produits végétaux, fruits, etc..).

I.5 .1.2 Séchage par entrainement :

Le mode de séchage par entrainement représente plus de 85% des séchoirs industriels (Muju dar, 2000) et est largement utilisé dans le secteur agroalimentaire. Ce mode de séchage est plus répandu et fait l'objet de notre étude. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques. Ce type de transfert obéit à l'équation suivante :

$$Q = h_c A(T_a - T_s) \qquad \text{(I.18)}$$

Avec Q (W) quantité de chaleur transférée par unité de temps, A (m^2) surface d'échange, $(T_a - T_s)$ en (K) : écart entre la température de l'air sécheur et la température superficielle du produit à sécher, h_c ($W \cdot m{-}2 \cdot K{-}1$) coefficient d'échange par convection.

I .5 .2 Cinétique de séchage :

I.5 .2.1 Migration de l'humidité :

Lors du processus de séchage, le transfert d'humidité s'effectue à deux endroits :

1. **Transfert de masse externe** – Évaporation de l'humidité de la surface du produit. Vers l'air ambiant
2. **Transfert de masse interne** – Mouvement de l'humidité de l'intérieur vers la surface.

Le mouvement de l'humidité (transfert de masse) de la surface du produit vers l'air se produit en raison de la différence de pression de vapeur entre eux. Le transfert de masse externe s'effectue soit par convection, soit par diffusion, soit par les deux. Cependant, le mouvement de l'humidité de l'intérieur vers la surface est provoqué par de nombreux phénomènes comme l'écoulement capillaire, l'écoulement provoqué par la vaporisation et la condensation, écoulement par gravité et écoulement provoqué par différence de température, diffusion de vapeur et diffusion de pression. Le taux d'élimination de l'humidité de la surface dépend sur les paramètres externes de l'air convectif comme la température, le débit d'air, l'humidité relative ainsi que la surface de contact du produit avec l'air et méthode de prétraitement.

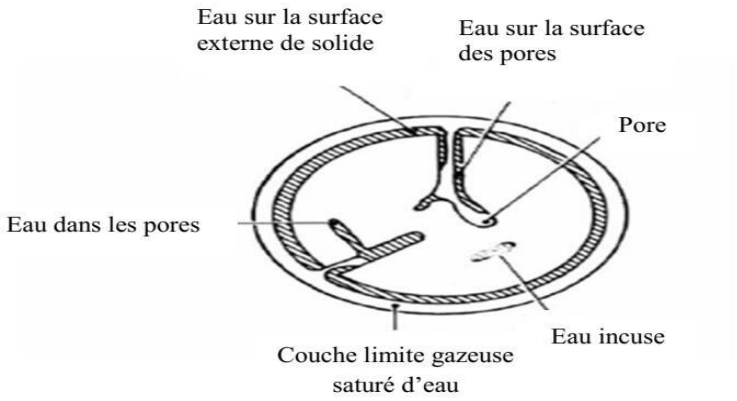


Figure I.4 : Représentation schématique d'un solide humide [25].

La cinétique de séchage est une composante importante du processus de séchage dans diverses industries, notamment l'agroalimentaire, elle décrit la vitesse à laquelle l'humidité est retirée d'un matériau et est influencée par de nombreux facteurs tels que les propriétés du matériau, les conditions de séchage et les caractéristiques de l'équipement utilisé.

I. 5 .2.2Phases de Séchage :

Les très grandes variabilités et diversités des produits alimentaires et biologiques laissent envisager que le meilleur moyen de caractériser le comportement d'un produit alimentaire au cours du séchage consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage. Dans le cas d'un produit solide séché par entraînement, l'expérience de base consiste à placer le produit dans un courant d'air chaud et sec et à enregistrer l'évolution de sa masse au cours du temps, par des pesées à intervalles de temps réguliers. Les courbes théoriques, obtenues pour des produits non hygroscopiques et peu déformables comme, par exemple, la cellulose, permettent classiquement de distinguer trois périodes (Figure I. 4) :

Une période à vitesse décroissante (AB) : C'est la phase de mise en température du produit, Le matériau est chauffé jusqu'à ce que toute sa masse atteigne la température de séchage désirée. Cette période disparaît pratiquement lorsque le produit se présente sous forme de particules ou de feuilles.

Une période à vitesse constante (BC) : qui correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, l'activité de l'eau a_w dans le produit en surface reste proche de 1, et le séchage est contrôlé par les transferts externes. La surface du matériau reste saturée, et l'eau s'évapore à une vitesse constante, principalement influencée par les conditions extérieures. Pendant toute cette période, la température du produit est uniforme et égale (par définition) à la température du thermomètre humide (T_h) de l'air sécheur. À la fin de cette période, la teneur en eau critique du produit peut être déterminée. Une période à vitesse décroissante (CD) où la surface du produit passe sous la limite supérieure du domaine hygroscopique, l'a_w en surface du produit est inférieure à 1 et les transferts internes de matière deviennent limitant. La température du produit augmente à partir de sa surface. La teneur en eau base sèche du produit diminue jusqu'à atteindre une valeur limite (X_{lim} ou HRE) qui dépend des conditions de l'air de séchage (température et humidité relative).

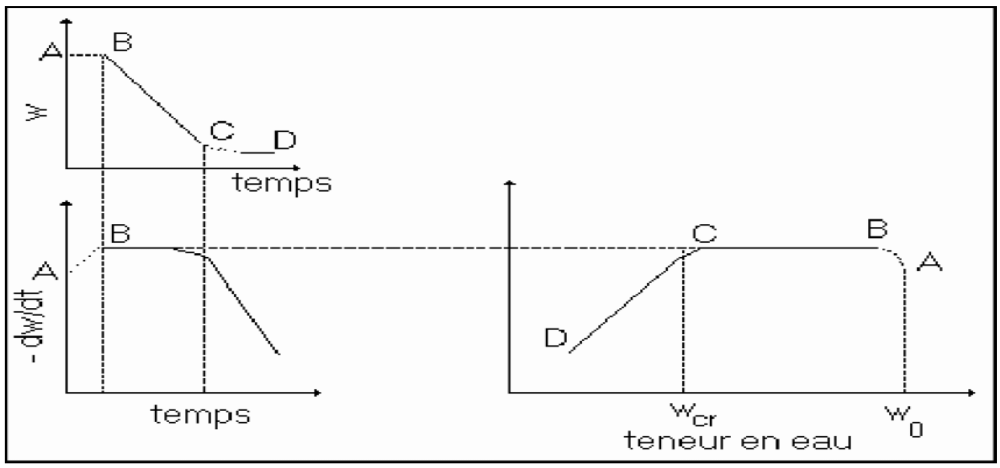


Figure I .5 : Courbes de vitesse de séchage [29].

La courbe de taux de séchage pour les conditions hygroscopiques et les matériaux non hygroscopiques est présentée dans la figure **I** 5. La période de séchage à vitesse constante pour les deux matériaux se termine à teneur en humidité critique et la période *à* vitesse décroissante commence. Dans cette période : le taux de séchage pour les matériaux non hygroscopiques, se poursuit jusqu'à ce qu'il atteigne une teneur en humidité nulle tandis que pour les matériaux hygroscopiques, jusqu'à ce qu'ils atteignent la teneur en humidité d'équilibre.

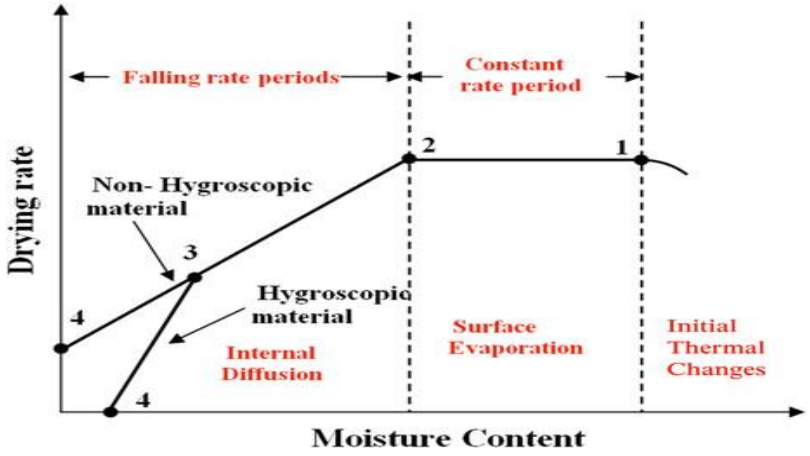


Figure I 6 : Taux de séchage pour les produits hygroscopiques et les produits non hygroscopiques [30]

I. 6. Taux de Séchage :

I .1.6 Définition du taux de séchage :

Le taux de séchage fait référence à la vitesse à laquelle un matériau perd son humidité lorsqu'il est exposé à l'air. Il s'agit d'un paramètre essentiel dans de nombreux secteurs industriels, tels que l'agroalimentaire, la chimie, la construction ou encore l'électronique. Ce taux de séchage dépend de plusieurs facteurs clés que nous allons examiner en détail. Le taux de séchage joue un rôle crucial dans de nombreux processus de production. Une maîtrise de ce paramètre permet notamment :

1. D'optimiser les coûts de production en réduisant les temps de séchage.
2. D'améliorer la qualité des produits finis en évitant les défauts liés à un séchage inadéquat.
3. De respecter les normes et réglementations en vigueur concernant l'humidité résiduelle.
4. D'augmenter la productivité et la flexibilité des lignes de production.

Comprendre et contrôler les facteurs influençant le taux de séchage est donc primordial pour toute entreprise souhaitant rester compétitive et efficace.

Le taux de séchage peut être exprimé en fonction de coefficient de transfert de masse coefficient et celle de transfert de chaleur respectivement par les équations suivantes [31].

$$\frac{dM}{dt} = \frac{Ah_D}{R_v T_{abs}}(P_{vwb} - P_{v\infty}) \qquad \text{(I .19)}$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{Ah_c}{L}(P_{\infty} - P_{wb}) \qquad \text{(I. 20)}$$

Où :

A :la surface du produit, **hd** : coefficient de transfert de masse, **hc** – coefficient de transfert de chaleur par convection, L – chaleur latente de vaporisation de l'eau,

P_{vwb} : la pression de vapeur de l'eau dans l'air à la température T1, **P_{v1}** :la pression de vapeur de l'eau à la surface du matériau, **T_{wb}** : la température humide de l'air

Le temps de séchage **tc** pour une période de séchage constante est donné par

$$t_c = \int_{M_e}^{M_0} \frac{R_v T_{abs} dM}{A h_D (P_{vwb} - P_{v\infty})} = \int_{M_e}^{M_0} \frac{L dM}{A h_c (T_\infty - T_{wb})} \quad \text{(I.21)}$$

Pendant la période de séchage à vitesse de séchage constante, les forces motrices (T_∞ -T_{wb}) et (P_{vwb} -$P_{v\infty}$) sont constants et alors l'équation devient :

$$t_c = \frac{(M_0 - M_e) R_v T_{abs} dM}{A h_D (P_{vwb} - P_{v\infty})} = \frac{L(M_0 - M_e)}{A h_c (T_\infty - T_{wb})} \quad \text{(I.22)}$$

Le transfert d'humidité pendant le séchage peut être décrit à l'aide d'un modèle du premier ordre, comme mentionné ci-dessous :

$$-\frac{dM}{dt} = k(M - M_e) \quad \text{(I.23)}$$

Où :

M : teneur en humidité du matériau (base sèche) pendant le séchage (kg d'eau/kg de matières sèches), **Me** : teneur en humidité d'équilibre du matériau séché (kg d'eau/kg de matières sèches), **k** : taux de séchage (min 1), **t** : temps de séchage (min).

Le taux de séchage de tout matériau est déterminé comme la pente du taux de chute courbe de séchage. À t = 0, la teneur en humidité du matériau sera égale à l'humidité initiale contenu (c'est-à-dire M = Mi). L'équation ci-dessus est intégrée pour obtenir l'expression suivante pour l'humidité contenu au temps « t » et M_t :

$$M_t = M_e - (M_e - M_i)e^{-kt} \quad \text{(I.24)}$$

Cette équation est réécrite comme

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = e^{-kt} \quad \text{(I..25)}$$

I. .6.2. Facteurs influençant le taux de séchage :

Plusieurs éléments clés ont une influence directe sur le taux de séchage des matériaux. Examinons chacun d'entre eux en détail :

I.6.2.1. L'influence de l'humidité ambiante sur le taux de séchage :

L'humidité de l'air environnant joue un rôle essentiel dans le processus de séchage. Plus l'air ambiant est sec, plus le taux de séchage sera élevé. En effet, l'air sec a une plus grande capacité d'absorber l'humidité du matériau, facilitant ainsi l'évaporation.

À l'inverse, un air humide ralentira considérablement le séchage, car l'air sera déjà saturé en vapeur d'eau. Il est donc primordial de contrôler et de réguler l'humidité de l'air dans les zones de séchage afin d'optimiser les performances. Des systèmes de déshumidification ou de ventilation peuvent être mis en place à cet effet.

I.6.2.2. L'effet de la température sur le taux de séchage :

La température de l'air ambiant a également une influence majeure sur le taux de séchage. Plus la température est élevée, plus l'évaporation de l'humidité sera rapide. En effet, la chaleur apporte l'énergie nécessaire pour transformer l'eau en vapeur, accélérant ainsi le processus de séchage. Cependant, il faut veiller à ne pas dépasser certaines températures critiques qui pourraient endommager les matériaux ou altérer leurs propriétés. Un équilibre doit donc être trouvé entre une température suffisamment élevée pour un séchage efficace et des limites acceptables pour préserver l'intégrité des produits.

I.6.2.3. L'impact de la circulation d'air sur le taux de séchage :

La circulation de l'air autour du matériau à sécher joue également un rôle essentiel. Un flux d'air constant permet de renouveler l'air en contact avec le produit, favorisant ainsi l'évaporation de l'humidité. Plus la vitesse de l'air sera élevée, plus le taux de séchage sera important. Différentes techniques peuvent être utilisées pour optimiser la circulation de l'air, comme l'installation de ventilateurs, de systèmes de soufflage ou encore de systèmes d'aspiration. Il est également possible d'ajuster la direction et la turbulence de l'air pour obtenir les meilleurs résultats.

I.6.2.4. L'importance de la taille et de la forme des matériaux sur le taux de séchage :

La surface d'échange entre le matériau et l'air ambiant est un facteur clé dans le processus de séchage. Plus la surface exposée sera importante, plus le taux de séchage sera élevé. Ainsi, la taille et la forme des matériaux auront un impact significatif.

Par exemple, des produits fins, minces ou poreux sécheront plus rapidement que des pièces plus volumineuses ou compactes. Il est donc essentiel de prendre en compte ces paramètres lors de la conception des produits ou du choix des procédés de séchage.

I.*6. 3. Les méthodes pour améliorer le taux de séchage :*

Afin d'optimiser le taux de séchage de vos matériaux, plusieurs approches peuvent être envisagées :

1. Contrôle de l'humidité ambiante : Installer des systèmes de déshumidification ou de ventilation pour maintenir un air sec dans la zone de séchage.
2. Régulation de la température : Utiliser des systèmes de chauffage ou de refroidissement pour atteindre la température optimale.
3. Optimisation de la circulation d'air : Concevoir des systèmes de soufflage ou d'aspiration permettant un flux d'air constant et efficace.
4. Adaptation de la taille et de la forme des matériaux : Privilégier des formes et des dimensions favorisant une meilleure exposition à l'air.
5. Utilisation de technologies de séchage avancées : Envisager l'emploi de techniques telles que le séchage par micro-ondes, le séchage par infrarouge ou le séchage sous vide pour des résultats optimisés.

I.7. Revue bibliographique sur le séchage solaire :

Le séchage solaire est une technologie prometteuse pour la conservation des produits agricoles. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser cette méthode et maximiser ses avantages. Dès la préhistoire, les hommes utilisaient l'énergie solaire pour sécher une grande variété d'aliments. Le séchage par le vent a été combiné au rayonnement solaire pour améliorer le processus de séchage. (Belessiotiset Delyannis 2011) [32]. Les produits agricoles séchés par la méthode traditionnelle en l'exposant au soleil à l'air libre, sont contaminés par la poussière et les insectes et subissent des pertes par les rongeurs, les oiseaux et autres animaux (Janjai et Bala 2012) [33]. De plus, un tel séchage dans des conditions inappropriées les conditions climatiques entraînent des pertes en quantité et en qualité du produit final On estime que dans les pays en développement, les pertes après récolte sont de 20 à 50 % (Tembo et al. 2008) [34] et de près de 10 à 40 % des produits récoltées n'atteignent jamais les consommateurs finaux en raison des pertes post-récolte tout au long de la chaîne d'approvisionnement (Esper et Mühlberg 1998). [35]

Les avantages des séchoirs solaires ont déjà été rapportés dans la littérature par de nombreux chercheurs (Karathanos et Belessiotis 1997 ; Bala et al. 2003 ; Hossain et Bala 2007) [36-38]. Patil et Gawande (2016) ont présenté une étude examen des systèmes de séchage des serres à tunnel solaire tandis que Prakash et Kumar (2013) [12] ont donné un aperçu historique et des tendances récentes des systèmes de séchage solaire et de Prakash. Et coll. (2016) [39] ont passé en revue diverses techniques de modélisation pour les séchoirs solaires. Jamal Eddine et Ray (2010) [40] ont présenté un examen complet de la situation actuelle littérature sur l'utilisation des modèles CFD dans les applications de séchage industrielles et à l'échelle du laboratoire. Basant sur la méthode des volumes finis, Lamnatou et al. (2010) [41] ont fait une analyse sur les deux phénomènes : transfert de chaleur et transfert de masse lors du séchage par convection d'un solide poreux, en tenant compte l'effet de l'épaisseur de la dalle sur le transfert de chaleur/de masse. Le modèle de séchage développé considéré comme un domaine de simulation, englobant à la fois le solide humide et le flux d'air dans la chambre.

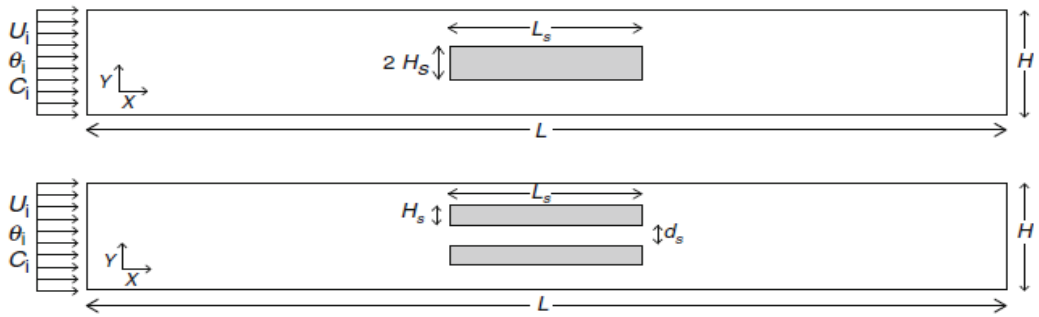


Figure I.7 : Schéma d'une configuration de chambre de séchage pour le transport de flux et de chaleur/masse simulation avec (i) un seul plateau et (ii) deux plateaux disposés côte à côte (Lamnatou et coll. 2010) [42]

Torres-Reyes et al. (2001, 2002) Ont appliqué la deuxième loi de thermodynamique pour les systèmes solaires de séchage utilisant les quantités énergétiques du processus de séchage, en calculant l'entropie d'équilibre pour la température maximale de la plaque collectrice, connue sous le nom de température soleil-air (Torres-Reyes 2001). L'analyse a été appliquée au séchage de pommes pour trois vitesses d'air différentes (0,3 ; 0,6 ; 0,9 m/s), et les résultats montrent que

l'augmentation de la vitesse de l'air entraîne une diminution de nombre de Nuselt Ns. La valeur minimale de Ns correspond aux conditions de fonctionnement souhaitables.

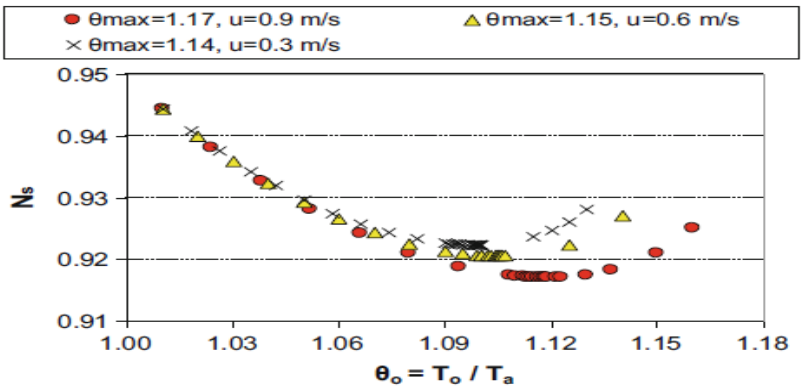


Figure I.8 : Ns en fonction de la température sans dimension θ o du fluide à la sortie du capteur solaire, pour différentes températures maximales sans dimension θ max de la plaque collectrice (Lamnatou et al. 2012) [43].

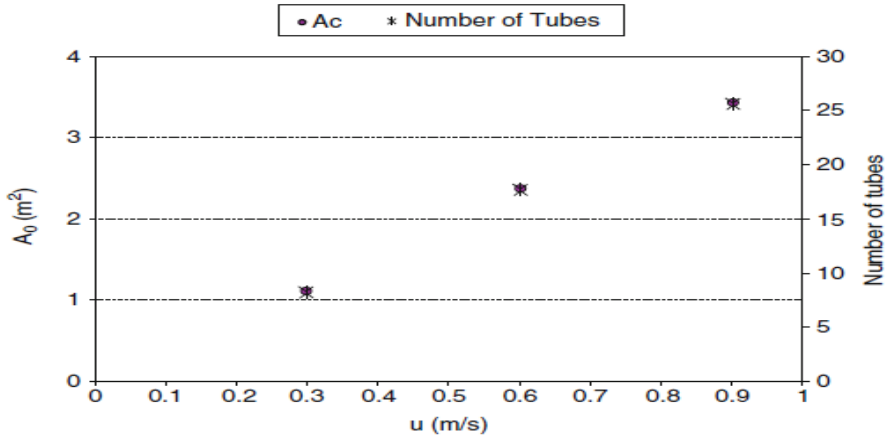


Figure I .9 : Zone de collecte du capteur solaire à air à tubes sous vide (Ac) et nombre de tubes en fonction de la vitesse de l'air de séchage (u) [43].

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, les théories fondamentales du processus de séchage sont abordées. La croissance de micro-organismes et réactions chimiques participant à la détérioration des produits alimentaires. La qualité d'un produit dépend principalement de l'activité de l'eau. Cette dernière peut être réduite en supprimant

la teneur en eau disponible par le processus de séchage. La cinétique de séchage explique la dégradation de la teneur en humidité du matériau et la variation de sa température moyenne en fonction du temps pendant le séchage, tandis que la dynamique de séchage décrit les changements dans les profils de température et d'humidité du corps tout au long du séchage. Les connaissances en cinétique de séchage d'un produit peuvent être appliquées au calcul de la quantité d'humidité évaporée, le temps de séchage, la consommation d'énergie et autres paramètres associés qui sont des paramètres très importants pour la conception et la simulation de séchoir. De plus, la cinétique de séchage explique complètement les propriétés de transport telles que le transfert de masse, diffusion d'humidité, transfert de chaleur, etc. impliqués dans le séchage.

Le taux de séchage est un paramètre essentiel à maîtriser dans de nombreux secteurs industriels. En analysant en détail les principaux facteurs qui l'influencent, tels que l'humidité ambiante, la température, la circulation d'air et les caractéristiques des matériaux, il est possible de mettre en place des solutions efficaces pour optimiser ce taux de séchage. Une meilleure compréhension et un contrôle précis de ces différents éléments permettront d'améliorer la qualité des produits, d'optimiser les coûts de production et d'accroître la productivité.

CHAPITRE II :

SYSTEMES DE SECHAGE SOLAIRE

II.1. Introduction :

Le séchage solaire, une méthode de préservation alimentaire exploitant l'énergie du soleil pour réduire l'humidité dans les aliments et augmenter leur durée de conservation, présente des avantages notables par rapport aux méthodes de séchage traditionnelles, tels que l'amélioration de la qualité alimentaire, une efficacité accrue, une consommation de carburant réduite et un impact environnemental moindre [45]. Ce processus utilise principalement le chauffage convectif, où l'air chauffé circule sur le produit pour provoquer l'évaporation, et le système peut augmenter significativement la puissance évaporatoire réelle de l'air ambiant, réduisant ainsi le temps de séchage de 30% à 70% [46-47].

Un séchoir, aussi appelé déshydrateur solaire, il s'agit d'un appareil simple qui utilise l'énergie solaire pour chauffer l'air, qui passe ensuite à travers une chambre de séchage séparée où l'humidité du produit en cours de séchage est éliminée. Le séchoir solaire se compose d'un capteur solaire, d'un système de circulation d'air et d'une chambre de séchage séparée. Le capteur solaire absorbe l'énergie solaire, chauffant l'air qui circule ensuite dans la chambre de séchage. L'air chauffé absorbe l'humidité du produit et le sèche.

L'objectif d'un séchoir est de fournit au produit une quantité de chaleur plus que ce qui est disponible dans les conditions ambiantes, en augmentant ainsi la pression de vapeur de l'humidité retenue dans la culture et en diminuant considérablement l'humidité relative de l'air de séchage et augmentant ainsi son transport d'humidité capacité et assurant une teneur en humidité d'équilibre suffisamment basse [48].

Deux des groupes génériques de séchoirs à énergie solaire peuvent être identifiés, à savoir l'énergie solaire passive ou à circulation naturelle les séchoirs et les séchoirs à énergie solaire à convection active ou forcée (souvent appelés séchoirs solaires hybrides). Le processus de séchage pourrait impliquer le passage d'air préchauffé à travers le produit dans une chambre fermée et sombre ou par exposition directe du produit au rayonnement solaire ou par une combinaison des deux [49]. Trois sous-

groupes de ceux-ci peuvent également être identifié, à savoir le type en mode direct, le type en mode indirect et le type en mode mixte.

II.2. Mode de fonctionnement d'un séchoir solaire :

Le fonctionnement d'un séchoir solaire est relativement simple : l'énergie solaire réchauffe l'air qui circule dans la chambre de séchage, provoquant l'évaporation de l'humidité des produits. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que les produits atteignent le niveau de séchage souhaité. Dans les systèmes de séchage solaire, l'énergie solaire pourrait être utilisée soit comme source unique de chaleur ou comme source de chaleur supplémentaire. Le flux d'air est généré par convection naturelle ou forcée qui est assurée par des équipements supplémentaires (ventilateur).

Un séchoir solaire est un dispositif conçu pour faciliter et optimiser le processus de séchage solaire. Il se compose généralement des éléments suivants :

1. **Chambre de séchage** : C'est l'espace où les produits sont placés pour être séchés. Elle est généralement fabriquée à partir de matériaux isolants pour retenir la chaleur.
2. **Collecteur solaire** : C'est la partie du séchoir solaire qui capte l'énergie solaire et la transforme en chaleur. Il peut s'agir de panneaux solaires, de surfaces noires absorbantes ou d'autres dispositifs de captage de la chaleur solaire.
3. **Système de ventilation** : Un ventilateur ou un système de convection naturelle fait circuler l'air chaud à travers la chambre de séchage, accélérant ainsi l'évaporation de l'humidité.
4. **Régulateur de température et d'humidité** : Des capteurs et des mécanismes de contrôle permettent de maintenir des conditions optimales de température et d'humidité dans la chambre de séchage.
5. **Système d'évacuation de l'air humide** : L'air chaud et humide est évacué de la chambre de séchage pour permettre l'entrée d'air sec.

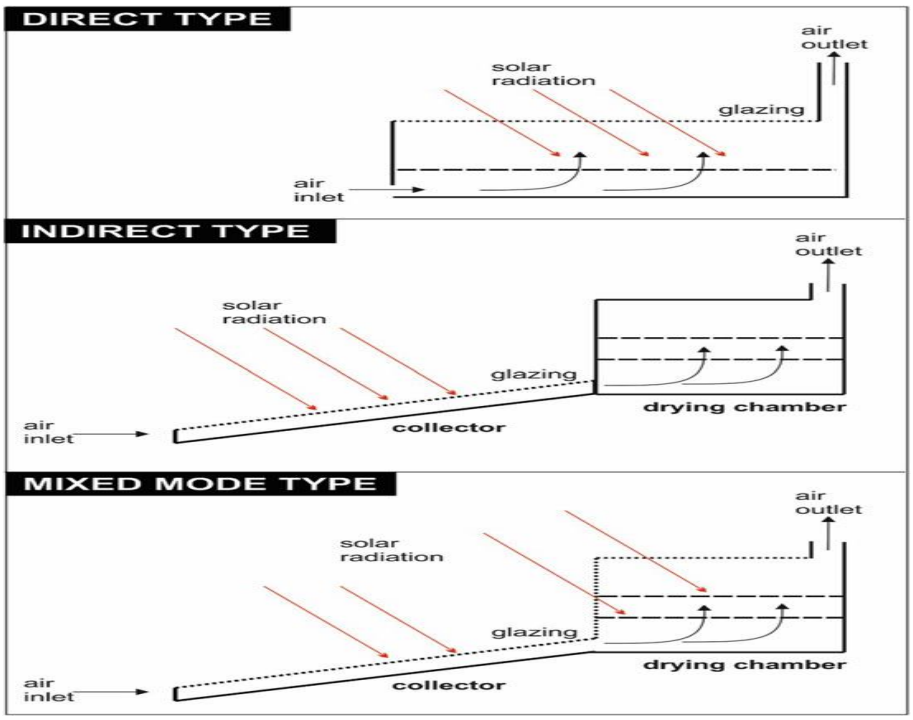


Figure II.1 : Principe de fonctionnement des séchoirs solaires directs, indirects et mixtes [50]

II.3. Classification des séchoirs solaires :

Les séchoirs solaires peuvent être classés en deux grandes catégories [51].

- Systèmes de séchage actifs à énergie solaire (dont la plupart des types sont souvent appelés systèmes solaires hybrides) séchoirs).
- Systèmes de séchage passifs à l'énergie solaire (appelés classiquement séchage solaire à circulation naturelle) systèmes).

Il existe de nombreux modèles de séchoirs développés pour différents objectifs de séchage des produits agricoles en fonction des besoins de l'utilisateur final et du niveau technologique disponible. Trois sous-classes distinctes de systèmes de séchage solaire actif ou passif peuvent être identifiées (qui varient principalement dans la disposition de conception des composants du système et le mode d'utilisation de la chaleur solaire, à savoir [51].

- Séchoirs solaires de type intégré.
- Séchoirs solaires de type distribué.
- Séchoirs solaires à mode mixte.

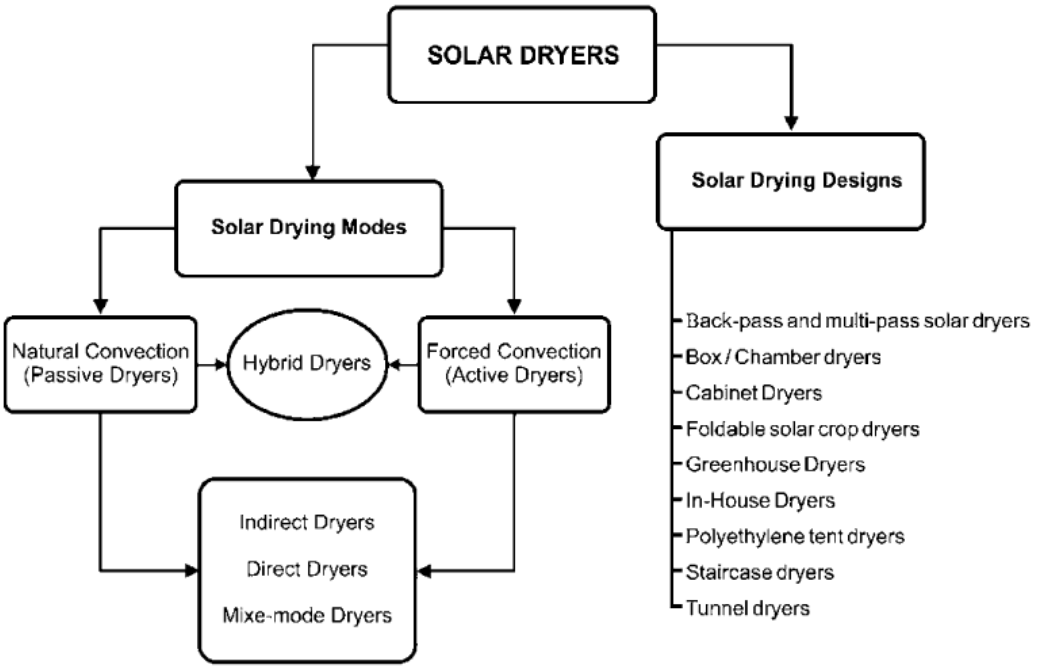


Figure II.2 : Classification des systèmes de séchage solaire [50].

Les principales caractéristiques des conceptions typiques des différentes classes de séchoirs à énergie solaire sont illustrées sur la figure II.3.

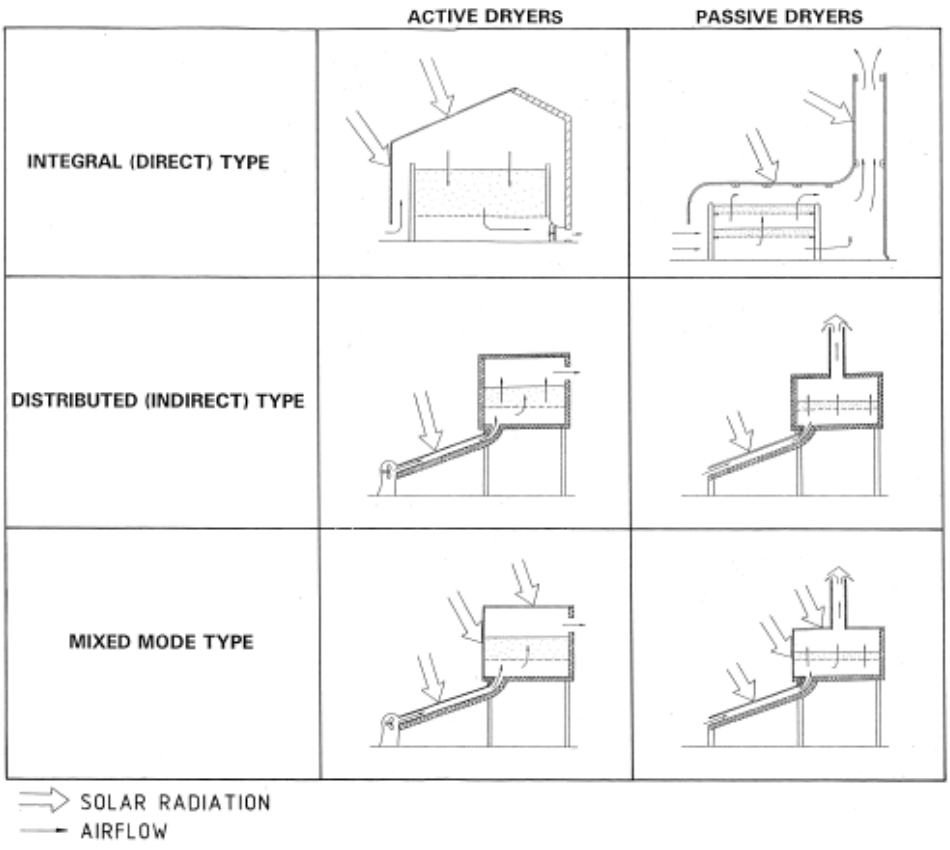


Figure II.3 : Conceptions typiques de séchoirs à énergie solaire [52].

II.3.1. Séchoirs solaires à convection naturelle :

Les séchoirs solaires à convection naturelle (passif) dépendent entièrement de l'énergie solaire pour leur fonctionnement. Dans de tels systèmes, l'air est chauffé par le soleil et circule naturellement par la force de flottabilité ou par la pression du vent, ou une combinaison des deux. Un séchoir solaire à convection naturelle (Figure II.4) se compose des éléments principaux suivants unités : un capteur solaire de chauffage à air, une chambre de séchage et une cheminée. Passif le séchage des récoltes est une pratique courante dans de nombreux pays en développement, en particulier dans les petites exploitations agricoles. Ils sont généralement peu coûteux, construit avec des matériaux disponibles localement et indépendant du réseau électrique. Les séchoirs solaires à circulation naturelle semblent être l'option la plus intéressante pour une utilisation dans les zones rurales isolées. Ce type de séchoirs solaire possèdes des avantages qui leur permettent de rivaliser économiquement avec les techniques traditionnelles de séchage sont :

- Ils occupent une petite superficie de terre pour sécher des quantités similaires de récoltes qui auraient été séché traditionnellement sur de grandes superficies en plein air ;
- Ils donnent une quantité et une qualité relativement élevées de cultures sèches car les champignons, les insectes et Il est peu probable que les rongeurs infestent la récolte pendant le séchage ;
- La période de séchage est raccourcie par rapport au séchage à l'air libre, atteignant ainsi des taux de séchage plus élevés débit de produits ;
- Une protection est accordée à la récolte contre les averses soudaines de pluie ; et viabilité commerciale, c'est-à-dire leurs coûts d'investissement et de maintenance relativement faibles en raison de l'utilisation de main d'œuvre indigène et de matériaux de construction facilement disponibles.

De nombreux types de séchoirs solaires passifs ont été conçus et développés en différentes régions du monde. Ces séchoirs varient en fonction des capacités de rendement et des caractéristiques techniques [53].

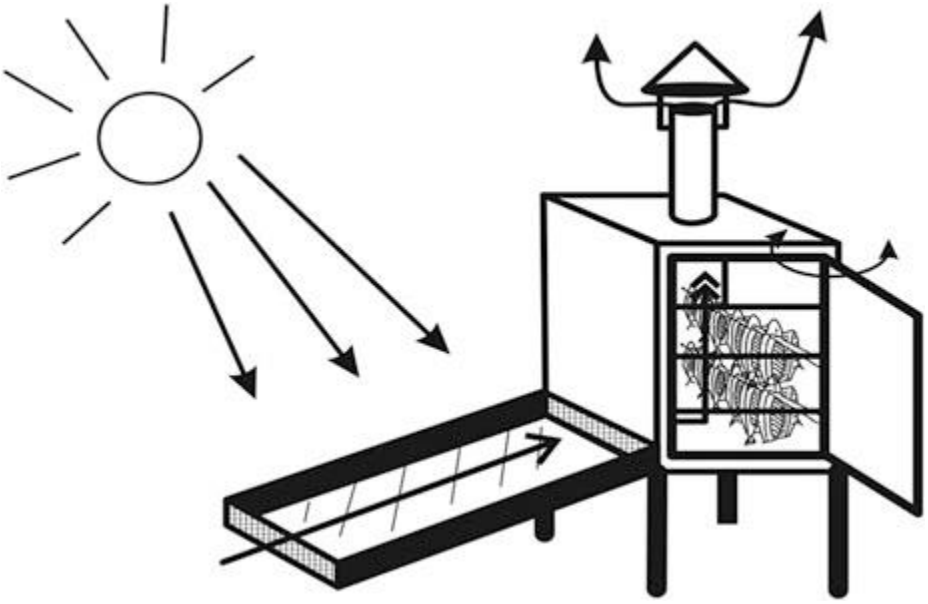


Figure II .4 : Convection naturelle séchoir solaire [50].

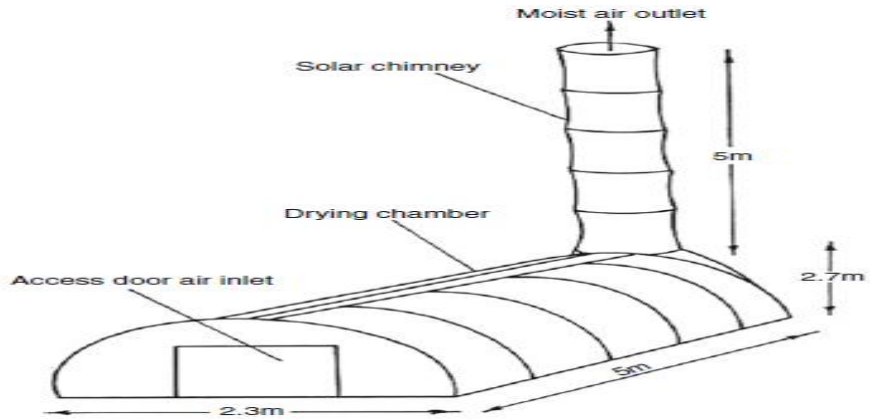


Figure II .5 : Un type de serre solaire à circulation naturelle sèche-énergie [49].

II. 3.2 Séchoirs solaires à convection forcée :

Un séchoir solaire à convection forcée (actif) typique dépend de l'énergie solaire car source de chaleur principale et utilise des ventilateurs pour assurer la circulation de l'air dans la chambre de séchage. L'ajout d'un ventilateur améliore l'écoulement de l'air et donne un séchage beaucoup plus élevé taux par rapport à ceux obtenus par les séchoirs à convection naturelle. Le ventilateur peut être fonctionné par un module photovoltaïque indépendant du réseau électrique [54]. Un séchoir solaire à convection forcée est constitué par : un capteur solaire pour chauffer l'air, une chambre de séchage, et un ventilateur ou une pompe pour assurer la circulation de

l'air de séchage. Les séchoirs solaires actifs sont principalement utilisé à des fins commerciales et pour des opérations de séchage à grande échelle où ils ont le potentiel de compléter les systèmes conventionnels de séchage des combustibles fossiles car ils peuvent réduire considérablement la consommation globale d'énergie et les coûts de séchage.

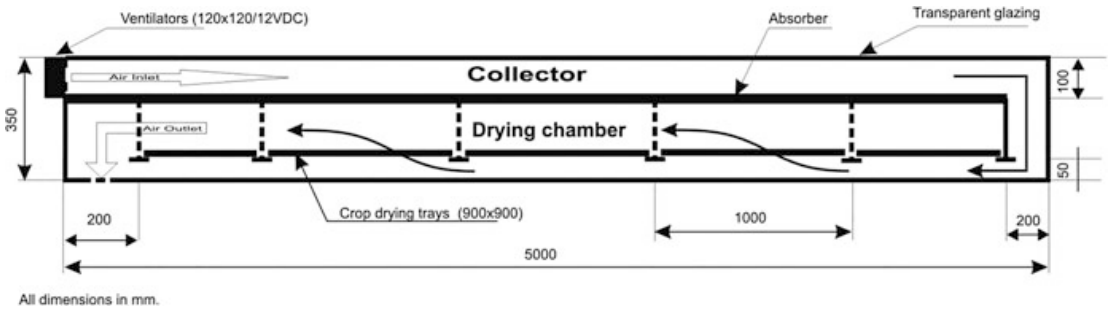


Figure II.6 : Sécheur solaire à convection forcée [55].

Les séchoirs solaires actifs conviennent au séchage des produits agricoles à plus forte teneur en humidité. De nombreuses études ont fait état de séchoirs solaires équipés de ventilateurs actionnés électriquement et utilisé pour différents types de cultures telles que le riz paddy, les fruits et légumes. Les séchoirs solaires commerciaux à convection forcée sont souvent équipés de contrôleurs de température pour maintenir les niveaux de température de séchage sûrs [56].

Généralement, l'efficacité globale des séchoirs à convection forcée est supérieure à celle des séchoirs solaires passifs. La valeur globale mesurée l'efficacité du séchage était de 24,04 % et de 11,52 % pour la convection forcée et naturelle séchoir solaire à convection, respectivement. Cela signifie que l'efficacité globale du séchoir était plus de deux fois plus élevé dans le cas d'un séchoir à convection forcée [56]. Janjai et Bala (2012) [57] ont rapporté que le débit quotidien du séchoir à convection forcée était 3 fois et 14 fois supérieur à celui du séchoir naturel séchage par convection et à l'air libre, respectivement. En outre, 225 kg de paddy ont été séchés quotidiennement d'une teneur en humidité d'environ 21 % à moins de 14 % par une bonne journée ensoleillée.

II.3.3 Séchoirs solaires hybrides :

Les systèmes de séchage solaire actifs ne dépendent que partiellement de l'énergie solaire. Ils utilisent l'énergie solaire et/ou systèmes de chauffage électriques ou à combustibles fossiles et ventilateurs et/ou pompes motorisés pour l'air circulation. Tous les séchoirs solaires actifs sont donc, de par leur application, des séchoirs à convection forcée. Un séchoir solaire actif typique dépend uniquement de l'énergie solaire comme source de chaleur, mais emploie ventilateurs et/ou pompes motorisés pour la circulation forcée de l'air de séchage. Ces types de séchoirs solaires actifs qui intègrent des déshydrateurs pour un le chauffage sont communément appelés « séchoirs solaires hybrides ». Les séchoirs solaires hybrides utilisent l'énergie solaire avec des systèmes de chauffage et des ventilateurs électriques ou à combustibles fossiles supplémentaires pour garantir circulation d'air. Généralement, les séchoirs solaires hybrides fonctionnent en convection forcée. S'ils sont suffisamment chauds, l'air de séchage chauffé par l'énergie solaire pourrait être utilisé directement pour le processus de séchage ; sinon, le déshydrateur fonctionnant au combustible fossile est utilisé pour atteindre les valeurs requises de températures de séchage (par exemple, pendant la nuit ou pendant les périodes de faible ensoleillement comme les saisons des pluies). Un séchoir hybride typique se compose d'un capteur solaire, d'une chambre de séchage, d'un ventilateur pour assurer l'air circulation et source de chaleur auxiliaire généralement exploitée par une source d'énergie fossile comme le GPL.

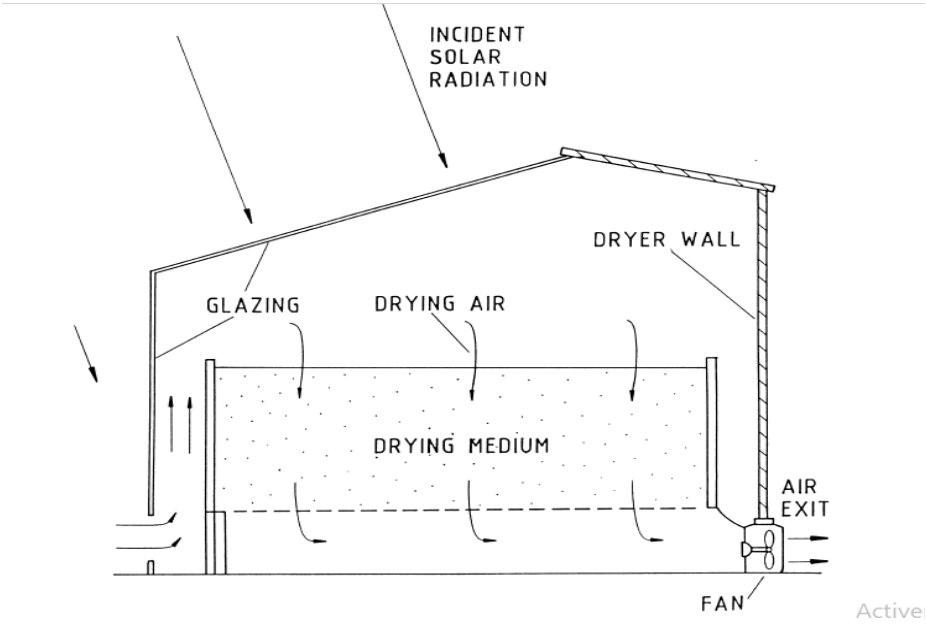


Figure II .7 : Une grange solaire à toit transparent à convection forcée.

Comme l'ont rapporté les littératures [58], les avantages et inconvénients généraux des séchoirs à convection naturelle et forcée et hybrides pourraient être résumés dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : avantages et inconvénients des différents types de séchoirs solaires

Classification	Avantages	Désavantages
Séchoirs passives	Très simple	Faible capacité
	Faibles coûts d'investissement et de fonctionnement	
Séchoirs actives	Indépendant des conditions climatiques ambiantes	Plus complexe et plus coûteux que séchoirs passives
	Périodes de séchage plus	

	courtes que les séchoirs passifs	
Séchoirs hybrides	Permettre un meilleur contrôle du séchage	Cher et peut entraîner une dépendance au carburant/gaz
	Possibilité de fonctionner sans soleil, réduisant les pertes de produit	
	Peut-être plus rapide que les séchoirs passifs et actifs	

II.3.4. Séchoir solaire active de type intégré :

Il s'agit de modèles de séchage solaire dans lesquels l'unité de collecte d'énergie solaire fait partie intégrante du l'ensemble du système, donc pas de conduit spécial pour canaliser l'air de séchage vers un système de séchage séparé une chambre est nécessaire. Trois conceptions distinctes de séchoirs solaires actifs de type intégré peuvent être identifiées.

II. 3.4.1 Séchoirs solaires directs :

Dans les séchoirs solaires directs, le produit absorbe directement le rayonnement solaire, donc aucun des capteurs solaires séparés sont nécessaires. Ce produit est situé dans une chambre de séchage transparente qui permet la transmission du rayonnement solaire pendant le séchage. Les conceptions pratiquement réalisées incluent des projets commerciaux à grande échelle séchoirs à serre à convection forcée, illustrés sur la Figure II.8 comme dans certains fours solaires pour le séchage du bois [59]. Les séchoirs solaires directs sont généralement plus simples à construire car ils ne nécessitent pas de structures compliquées, telles que collecteurs et conduits de chauffage à air séparés. C'est pourquoi ils sont moins chers que par rapport aux indirects pour une capacité de chargement similaire. Cependant, le potentiel. L'inconvénient du premier est la possibilité de surchauffer localement et relativement.

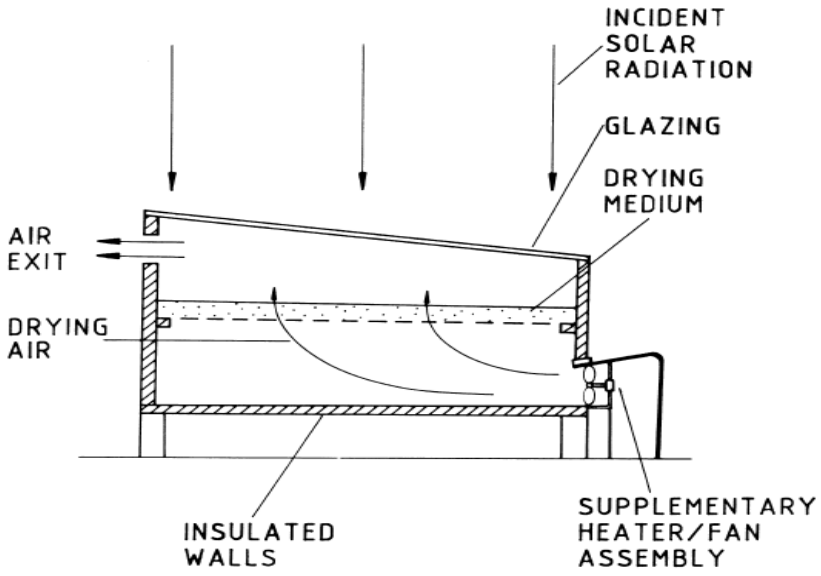


Figure II.8 : Caractéristiques d'un séchoir à armoire à énergie solaire active typique.

II .3.5 Séchoirs solaires indirects :

Dans ce type de séchoirs solaires, le produit est situé dans des plateaux ou des étagères à l'intérieur d'une chambre de séchage fermée et non transparente et chauffés par l'air en circulation, réchauffé lors de son passage à travers un capteur solaire [49] ils sont recommandés pour les produits relativement sensibles comme les herbes, les épices et les fruits où la teneur en vitamine C pourrait être influencée négativement par l'exposition directe du produit au rayonnement solaire. Les séchoirs solaires indirects sont souvent relativement complexes structures nécessitant plus d'investissement en capital en équipement et entraînant un fonctionnement plus important (c'est-à-dire l'entretien) que les unités directes.

II. 3.6 Séchoirs solaires à mode mixte :

Les séchoirs solaires à mode mixte combinent les caractéristiques du type direct (intégral) et des séchoirs solaires de type indirect (distribués). La combinaison du rayonnement solaire incident sur le produit et de l'air préchauffé dans un capteur solaire est utilisée pour le processus de séchage. Un séchoir solaire à mode mixte typique a la même conception que le séchoir distribué (un capteur solaire à air, une chambre de séchage séparée et une cheminée) ; cependant, les parois de la chambre de séchage sont transparentes, le rayonnement solaire va donc directement sur le

produit comme dans le cas des séchoirs directs. Leurs inconvénients proviennent des variations de températures de l'air sortant du collecteur. Ainsi, maintenir des conditions de fonctionnement constantes au sein de la chambre de séchage devient difficile.

II.4. Séchoirs solaires les plus typiques utilisés en agriculture :

II.4.1 Séchoirs solaires à doubles passages multiples :

Ce sont des séchoirs solaires à des capteurs solaires à air à double passage ce qui augmente l'efficacité thermique du collecteur de 10 à 15 % par rapport à aérothermes à passage unique (Sophian et al. 2007) [60]. Jaïn et Jain (2004) [61] ont évalué les performances d'un chauffe-air solaire incliné à plusieurs passages avec stockage thermique pour les applications de séchage en profondeur. Banout et Ehl (2010) et [62] ont développé une nouvelle conception de séchoir solaire à double passage (DPSD) qui a été testé sur le séchage du piment et le séchage des pousses de bambou. Les résultats montrent que l'efficacité globale du séchage était une fois supérieure à celle d'une armoire classique séchoir.

II. 4.2 Séchoirs de type armoire et boîte :

Les séchoirs de type armoire et boîte sont généralement de petites unités conçues pour la conservation des fruits, légumes, poisson et viande en petites exploitations. Ils sont boîtes généralement isolées avec couvercle vitré et trous à la base et dans les parties supérieures des murs du de la chambre. La température à l'intérieur du séchoir augmente en raison de l'accumulation d'énergie. Comme la température dans le sèche-linge augmente, l'air froid entre dans le sèche-linge par leentrées dans le panneau avant et sort du sèche-linge par les sorties en raison du flux d'air de flottabilité. Ce processus a entraîné un flux d'air continu sur la zone de séchage produit. Ce type de séchoir solaire est conçu pour de petites quantités de fruits et légumes de 10 à 15 kg (Janjai et Bala 2012) [62]. Une conception très similaire aux séchoirs à armoire est un séchoir solaire de type boîte. Type de boîte les séchoirs solaires sont souvent conçus comme des séchoirs solaires directs (Figure II. 9).

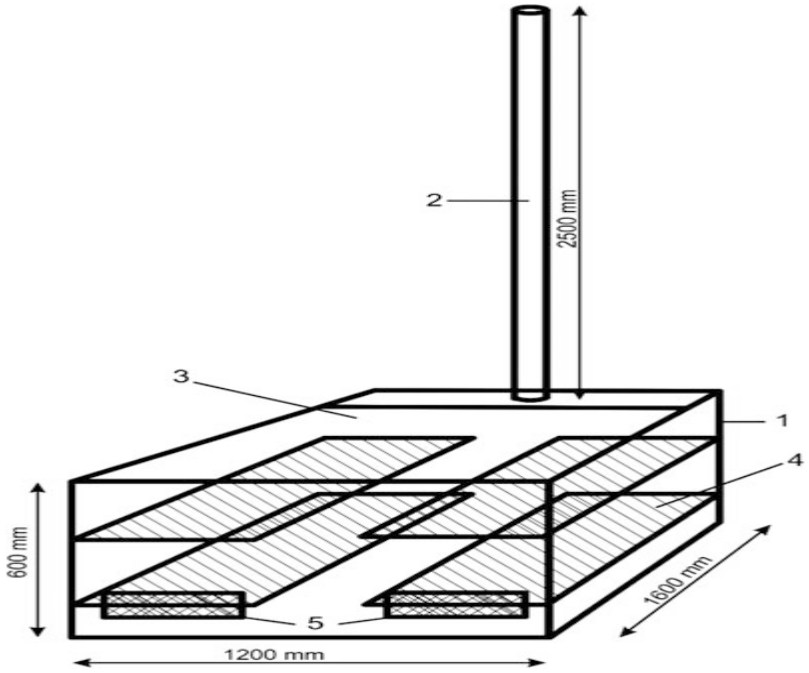


Figure II. 9 : Diagrammes schématiques de séchoir solaire de type boîte. (1) Chambre de séchage. (2) Cheminée pour assurer une circulation d'air adéquate. (3) Porte d'accès transparente. (4) Plateaux entaille plastique. (5) Aérien absorbeur.

II.4.3. Séchoirs à chambre :

Les séchoirs à chambre représentent un groupe assez large de séchoirs solaires où le séchage la chambre est séparée du capteur solaire. Partant de ce fait, ils sont généralement classés comme séchoirs solaires indirects et/ou à mode mixte. Ils pourraient être construits comme séchoirs passifs ou actifs avec une large gamme de capacités allant de la petite à la grande échelle unités. Le représentant d'une application à petite échelle est un système solaire et ventilé par le vent.

Séchoir solaire à mode mixte illustré à la Figure II.10. L'air de séchage est aspiré à travers la chambre de séchage par soufflerie éolienne placée au sommet de la cheminée. Le registre est utilisé pour contrôler la température de séchage et le débit d'air.

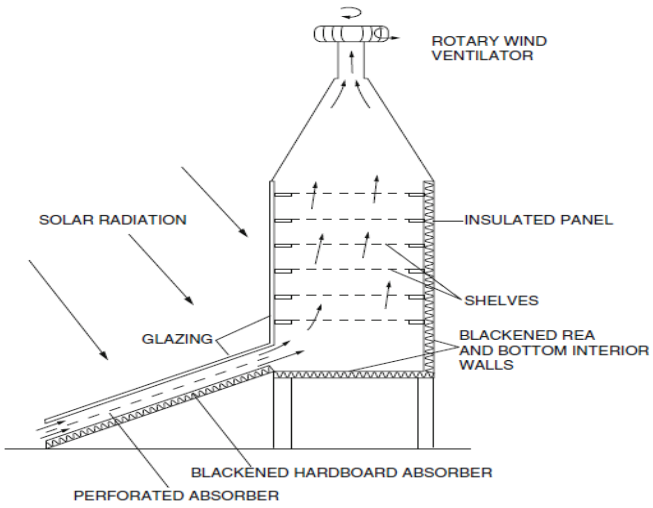


Figure II.10 : Un séchoir solaire à chambre ventilée par le vent [49].

II.4.4 Séchoirs à effet de serre :

Les séchoirs à effet de serre peuvent être classés soit comme séchoirs solaires directs, soit parfois comme séchoirs à mode mixte. Le séchoir à serre est peu coûteux, facile à fabriquer et simple dans la conception. Cela peut être utilisé dans n'importe quelle partie du monde. Basé sur le mode de l'air circulation, les séchoirs à serre sont classés en deux types : (i) séchoir à serre en mode passif (convection naturelle) et (ii) séchoir à serre en mode actif mode (convection forcée) [63].

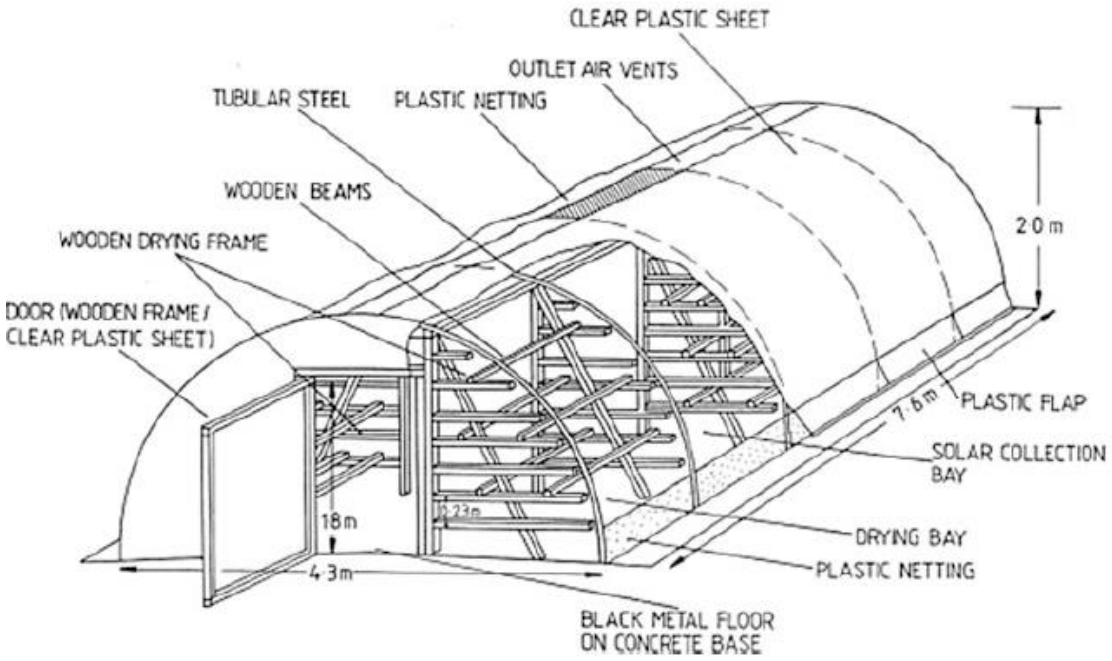


Figure II .11 : Séchoir en serre à circulation naturelle [49].

La conception typique d'un séchoir à serre est présentée sur la Figure II.11 sa configuration originale a été modifiée pour permettre l'utilisation d'une tôle de fer galvanisée noire absorbeur au sol, entrées d'air sur toute la longueur des deux côtés du séchoir, et sorties d'air le long de la partie supérieure du séchoir. Les deux sorties sont équipées de plastique fin filet pour protéger le produit contre les insectes et la poussière. Des auteurs ont étudié le taux d'évaporation dans deux types de séchoirs à effet de serre, système à chambre simple et double de même dimension, la productivité du séchoir à serre à double chambre par rapport à la le séchage à chambre unique a augmenté de 87 % [64].

II.4.5 Séchoirs sous tente en polyéthylène :

Les séchoirs à tente en polyéthylène d'un côté représentent les constructions les plus primitives de séchoirs solaires passifs. Ils sont faciles à construire à partir de matériaux disponibles localement et peu expansif. Son efficacité est limitée par rapport aux séchoirs à convection forcée. Le séchoir à tente en polyéthylène est illustré à la Figure II.12. Il se compose d'un simple cadre en bambou recouvert d'une feuille de polyéthylène transparente du côté tourné vers le soleil. Les autres côtés sont

recouverts d'une feuille de polyéthylène noir qui améliore l'absorption du rayonnement solaire. Les ouvertures au sommet des extrémités servaient d'évacuation de l'humidité l'air [49].

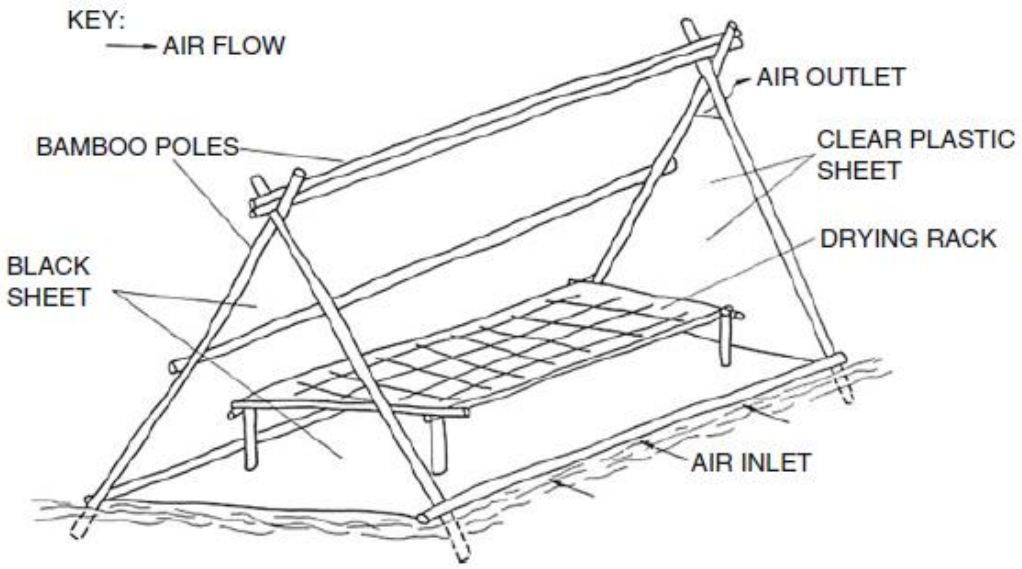


Figure II .12 : Séchoir solaire passif sous tente en polyéthylène [49].

II.4.6 Tunnels de séchage :

Le séchoir tunnel se compose d'un collecteur d'air plat, d'une chambre de séchage tunnel, et de petits ventilateurs pour fournir un flux d'air régulier sur le produit séché (Schirmer et al. 1996) [65]. Ceux-ci sont connectés en série comme le montre la Figure II.13. Une feuille en plastique transparent est utilisée pour recouvrir à la fois le collecteur et la chambre de séchage. Les produits à sécher sont déposés en fine couche sur plateaux en plastique dans la chambre du séchoir tunnel. Pour réduire les pertes de chaleur du séchoir, une laine de verre est utilisée comme matériau isolant. L'ensemble du séchoir tunnel est installé horizontalement sur une plate-forme surélevée. L'air au débit requis est fourni par deux ventilateurs DC actionnés par un panneau photovoltaïque. La puissance nécessaire pour conduire un ventilateur est égale à 14,4 W. Le couvercle transparent est conçu comme un toit en pente pour éviter l'entrée d'eau à l'intérieur du séchoir par temps de pluie. Le rayonnement solaire passe directement à travers la feuille de polyéthylène transparente du collecteur et chauffe l'absorbeur. L'air ambiant est forcé à travers le collecteur. Chaleur transmise de l'absorbeur dans la partie collectrice passe sur le produit dans la chambre et

absorbe l'humidité du matériau séché. Le séchoir était utilisé pour le séchage de nombreux produits agricoles tels que ananas, bananes, jacquiers, viande de poisson et autres. Des auteurs ont rapporté que par rapport à la méthode naturelle de séchage au soleil, le temps de séchage du cacao, du café et la noix de coco pourrait être réduite jusqu'à 40%. De plus, les expériences montrent qu'une quantité adéquate le séchage, qui aboutissait à une teneur en humidité adaptée au stockage, était possible même pendant la saison des pluies [66].

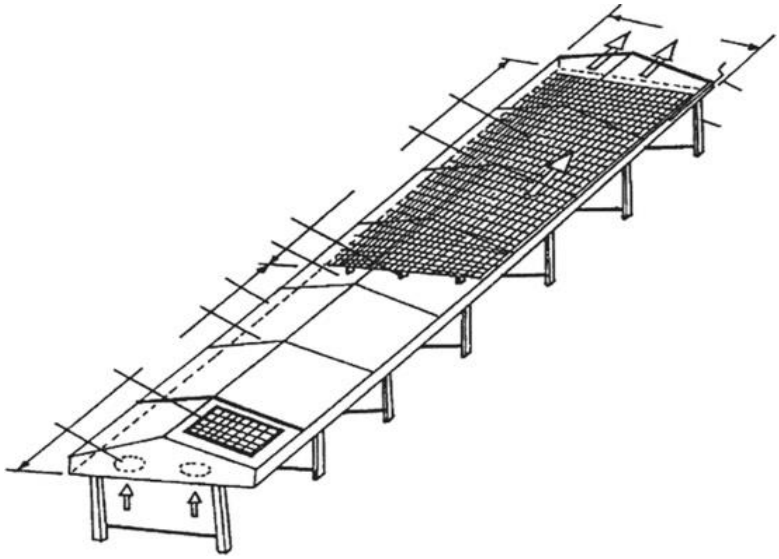


Figure II .13 : Séchoir tunnel solaire : (1) entrée d'air, (2) ventilateur, (3) module solaire, (4) capteur solaire, (5) côté métallique cadre, (6) sortie du collecteur, (7) support en bois, (8) filet en plastique, (9) structure de toit pour supportant le couvercle en plastique, (10) structure de base pour supporter le tunnel de séchage, (11) barre de roulement, (12) sortie du tunnel de séchage (Bala et al. 2003)

II.4.7 Séchoirs internes :

Les séchoirs solaires internes sont généralement construits à grande échelle pour le séchage de produits de plus grande qualité. Ils sont conçus pour les produits agricoles ainsi que pour le séchage du bois. Les principaux composants du séchoir sont un capteur solaire intégré directement au toit du bâtiment et une chambre de séchage équipée d'une soufflante à flux axial actionnée électriquement moteur (220 V, monophasé, 0,373 kW) pour assurer le débit d'air requis. Le séchage La chambre est

reliée au collecteur par un conduit d'air de type T. Un toit intégré Le collecteur d'une superficie totale de 108 m2 est divisé en deux parties dont une partie est face au sud et l'autre partie face au nord.

Les dimensions de la chambre de séchage sont de 1,3 m 2,4 m 0,8 m et elle est placée à l'intérieur du bâtiment. Le séchoir interne a été divisé en une partie avec le séchage chambre et deux autres pièces. Une pièce sert de lieu pour la préparation des produits pour le processus de séchage, et la deuxième pièce est utilisée pour le stockage des produits déshydratés.

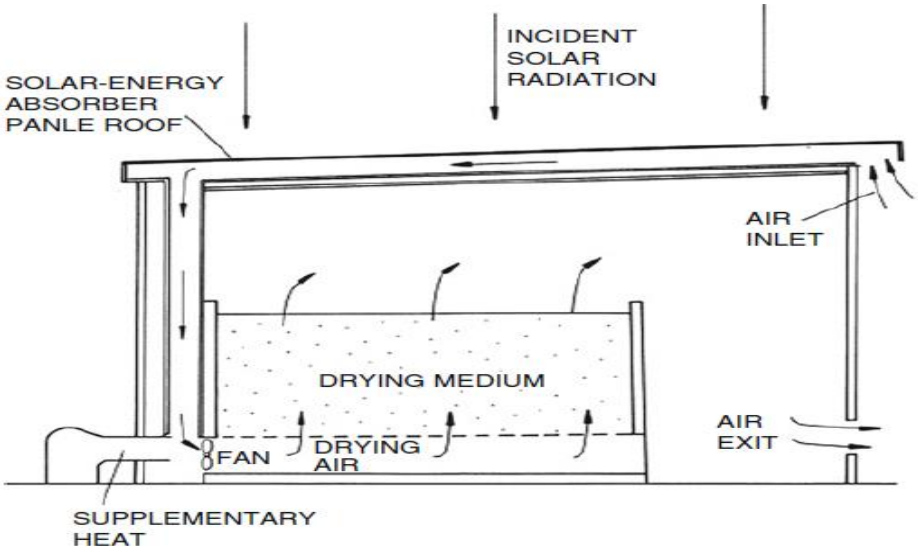


Figure II .14 : Un séchoir solaire actif à collecteur de toit [49].

II. 5. Analyse énergétique des séchoirs :

L'analyse énergétique d'un séchoir est très importante car le séchage est une activité très consommatrice d'énergie. La consommation énergétique industrielle nationale atteint 10 à 25 % pour les procédés de déshydratation thermique dans les pays développés. Les industries de séchage sont soucieuses de réduire la consommation d'énergie pour le processus de séchage, afin de réduire le coût par produit, rivalisant ainsi avec les autres sur le marché mondial.

La principale raison de la grande consommation d'énergie dans le séchoir à convection est l'élimination du teneur en humidité du produit en fournissant la chaleur latente de vaporisation. L'analyse de l'aspect énergétique d'un séchoir décrira clairement les endroits où les performances du système pourraient être améliorées. Les économies d'énergie dans n'importe quel processus peuvent être obtenues en réduisant les pertes de chaleur dans ce processus. Les éventuelles pertes de chaleur dans le processus de séchage par convection, peut être regroupé en perte de chaleur avec l'air évacué, perte de chaleur avec le produit, perte de chaleur par rayonnement du séchoir, perte de chaleur due à fuite d'air du séchoir et perte de chaleur due au séchage excessif des produits. Les performances de tout séchoir peuvent être caractérisées par l'efficacité du séchage, la consommation d'énergie spécifique, l'efficacité énergétique et taux d'extraction d'humidité spécifique. L'efficacité énergétique ou thermique d'un séchoir est le rapport de l'énergie nécessaire pour évaporation à l'énergie totale fournie au processus de séchage [67] :

$$\eta = \frac{\text{Énergie d'évaporation}}{\text{Énergie totale fournie}} \qquad \text{(II.1)}$$

Dans le processus de séchage par convection, l'efficacité énergétique peut être estimée par efficacité thermique, si l'air convectif a une faible humidité et une basse température pendant le processus de séchage [67] :

$$\eta_T = \frac{T_{ai} - T_{ae}}{T_{ai} - T_{amb}} \qquad \text{(II.2)}$$

D'après l'équation ci-dessus, il est très clair que l'efficacité énergétique ou thermique dépend des températures d'entrée, de sortie et ambiante de l'air. L'efficacité thermique peut être augmentée en augmentant la température de l'air d'entrée et en atteignant un état saturé à la sortie. Un autre indicateur de performance important d'un système de séchage est le taux d'extraction d'humidité (SMER), qui est la quantité d'eau évaporée par consommation énergétique unitaire. Le SMER est généralement mentionné en kg/kWh [68-69] :

$$SMER = \frac{\text{Masse d'eau extraite}}{Consomation\ totale\ d'énergie} \frac{kg}{k\ Wh} \qquad \text{(II.3)}$$

L'inverse de SMER est la consommation d'énergie spécifique (SEC) est donné par [68-69] :

$$SEC = \frac{Consomation\ totale\ d'energie}{Masse\ d'eau\ extraite}\ \frac{k\ Wh}{kg} \quad \text{(II.4)}$$

La masse d'eau évaporée peut étre calculée comme suit :

$$W_m = \frac{W_0(M_i - M_f)}{100 - M_f} \quad \text{(II.5)}$$

II.5.1 Facteur d'utilisation de la chaleur (HUF) :

Le facteur d'utilisation de la chaleur est le rapport entre la température perdue par l'air pendant le séchage et la température ambiante. Température gagnée par l'air pendant le chauffage [73] :

$$HUF = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_a} \quad \text{(II.6)}$$

II.5.2 Coefficient de performance (COP) :

Le coefficient de performance (COP) est le rapport entre la puissance calorifique utile et le travail correspondant consommé. Il est principalement utilisé pour évaluer les performances de séchoirs à pompe à chaleur [74] :

$$COP = \frac{Q}{W} = \frac{T_2 - T_a}{T_1 - T_a} \quad \text{(II.7)}$$

Le HUF et le COP sont liés comme

$$HUF = 1 - COP \quad \text{(II.8)}$$

II.5.3 Efficacité du séchage (DE) :

Le rapport entre l'humidité relative de sortie et l'humidité relative d'entrée de l'air pendant le processus de séchage est connu sous le nom d'efficacité du séchage [70]. Le séchage est essentiellement un processus d'humidification, et l'efficacité du séchage est plus élevée est préféré :

$$DE = \frac{HR_{ao}}{HR_{ai}} \quad \text{(II.9)}$$

Les performances des unités de séchage peuvent être améliorées en réduisant les pertes de chaleur dans les systèmes. La première étape consiste à concevoir une unité de séchage adaptée à l'application particulière. La sélection appropriée des autres composants comme le chauffage, le séchage chambre, soufflerie ou ventilateur, etc. contribueront également à réduire la consommation d'énergie. La principale méthode d'amélioration de l'efficacité énergétique du système est la chaleur récupération. Les méthodes de récupération de chaleur couramment utilisées dans les industries sont la récupération de chaleur de la sortie du sèche-linge et utilisation de pompes à chaleur.

II.6 Conclusion :

Il n'existe pas de critères simples pour sélectionner un séchoir solaire approprié pour un une région spécifique du monde ou un produit spécifique à sécher. Le classement des systèmes de séchage solaire illustre que les conceptions de séchoirs solaires peuvent être regroupées systématiquement selon la circulation de l'air de séchage vers des séchoirs à convection naturelle et forcée ; selon les modes de fonctionnement des séchoirs directs, indirects et mixtes ; et par leurs sources de chaleur. Les séchoirs solaires les plus typiques pour les produits agricoles basés sur leurs conceptions de construction ont été résumés et évaluées. La sélection finale de Les systèmes de séchage solaire sont généralement basés sur le taux d'insolation disponible, en quelque sorte produit qui sera séché, le débit de production, les coûts opérationnels, ainsi que l'expérience du fabricant. L'étude de cas présentée illustre la possibilité d'utiliser un séchoir solaire à convection forcée pour le séchage de la viande. L'étude apporte une nouvelle connaissance sur le comportement de séchage du processus de séchage en couche mince qui pourrait être important pour une éventuelle transformation industrielle. En termes de cinétique de séchage, une étude montre que la technologie de séchage solaire apporte des résultats compatibles en standard séchoirs fonctionnant à l'électricité.

CHAPITRE III :

Résolution numérique et résultats discussion

III.1. Introduction :

Le présent chapitre s'inscrit dans le cadre de l'optimisation des séchoirs solaires indirects avec pour objectif principal de mettre en évidence l'influence des formes des séchoirs sur la vitesse et le temps de séchage des produits alimentaires, afin de proposer des formes de séchoirs adaptées. On va étudie numériquement par la méthode CFD l'efficacité de deux types de séchoirs indirect : le premier est un séchoir normal avec une seule entrée pour l'air sécheur, le deuxième possède deux entrées d'air. La simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) est essentielle pour prévoir le comportement des fluides dans diverses applications, y compris le séchage solaire. Ce type de simulation aide à prédire le comportement de l'air et de l'humidité dans un séchoir solaire, facilitant ainsi l'optimisation de sa conception pour améliorer l'efficacité et réduire le temps de séchage. Les facteurs pris en compte dans la simulation CFD incluent la température de l'air, la vitesse de l'air, l'humidité et le rayonnement solaire.

III.2. Propriétés du matériau :

Les propriétés de la tomate sont présentées dans le tableau III.1.

Tableau III .1 : Caractéristiques physiques des tomates fraîches.

Propriétés physiques	**Valeur**
Longueur (mm)	53,2 ± 0,57
Largeur (mm)	63,52 ± 0,69
Épaisseur (mm)	67,58 ± 0,89
Teneur en humidité (g d'eau/g db)	15,76 ± 0,38 ou 94 %.
Densité (g/cm3)	1,16 ± 0,23
Matière sèche (g d'eau/g db)	0,951 ± 0,23
Masse (g)	58,52 ± 2,31
Volume (cm3)	156,24 ± 1,08

Les tranches de tomates ont été séchées à partir de 94 % (p.p.) jusqu'à une teneur en humidité finale sûre de 10 % (p.p.) Par un séchoir solaire indirect à convection naturelle.

La température de l'air a été établie à 27, à cette température, il possède les caractéristiques suivantes :

- Densité : 1.18 kg /m^3.
- Viscosité dynamique ; 1.8*10^ (-5) pas.
- Capacité thermique spécifique ; 1005 (J/kg. K).
- Conductivité thermique spécifique ; 0.0257 (W/m.K).

III.3. Modèle mathématique :

III.3.1. Présentation du code de calcul numérique :

Les simulations numériques sont effectuées à l'aide des équations Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). L'approximation de Boussinesq a été utilisée pour la flottabilité thermique. Le code ANSYS Mechanical APDL. C'est un logiciel robuste de dynamique des fluides utilisant la méthode des éléments finis pour analyser l'écoulement des fluides et le transfert de chaleur. Il permet de modéliser divers phénomènes physiques, y compris l'écoulement turbulent, le transport d'espèces et l'écoulement multiphasique.

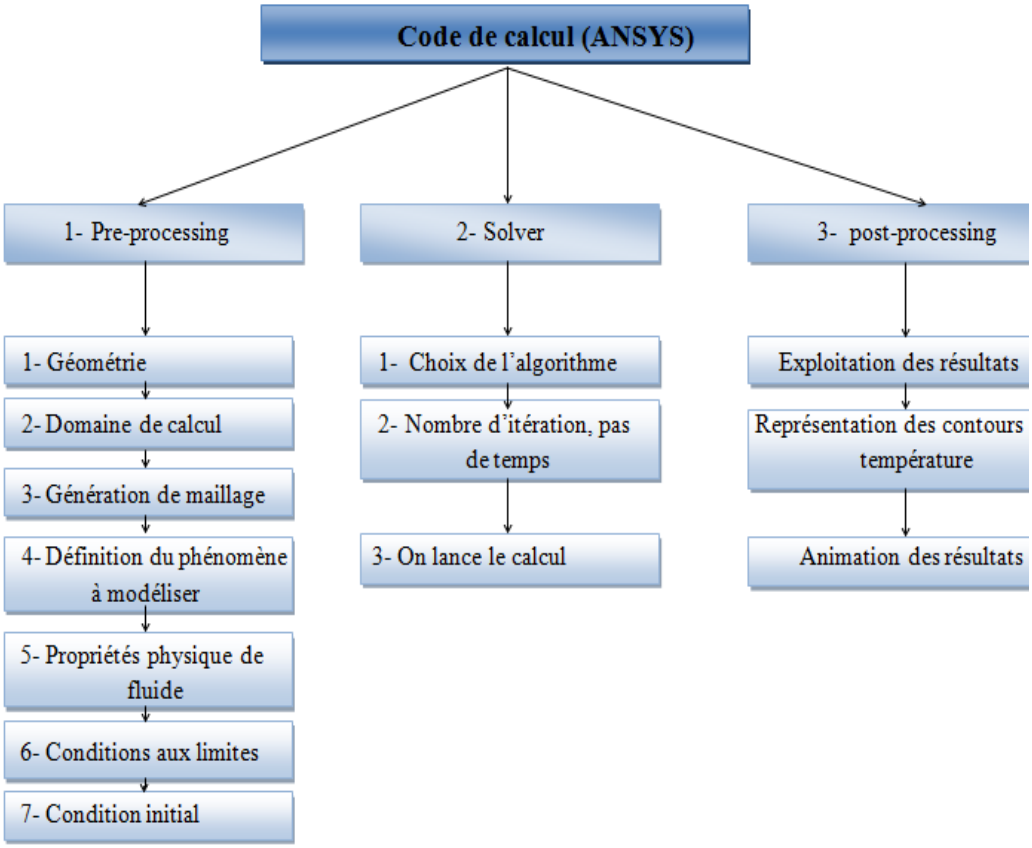


Figure III .1 : Schéma représente le code de calcul d'un logiciel ANSYS.

Le logiciel propose une gamme de modèles de turbulence tels que k-ε, SST et RNG, assurant une modélisation précise des caractéristiques d'écoulement. Une simulation préliminaire avec Ansys Mechanical APDL et FLOTRAN a été effectuée pour évaluer sa pertinence pour cette étude. Les résultats ont été comparés aux données expérimentales d'un système similaire, révélant un bon accord entre les deux. Le logiciel ANSYS calcul par la méthode des éléments finis contient les étapes caractéristique ou blocs fonctionnels décrits sur la figure III.1

III.3.2. Formulation mathématique du problème

Pour un problème bidimensionnel, les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie en régime variable sont données sous une forme générale par :

- **Équation de continuité :**

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

Où $\vec{u}$ est la vitesse du fluide et ρ est la densité de l'air.

- **Équations de conservation de la quantité de mouvement :**

Cette simulation a utilisé l'équation du moment de l'équation de Navier Stokes. Il a été utilisé parce qu'il y avait une vitesse de l'air.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}\nabla \cdot (\rho\vec{u}) + (\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla P + \nabla\bar{\bar{\tau}} + \rho\vec{g} + S_m \qquad \text{(III.2)}$$

- **Équation énergétique**

Cette simulation nécessitait l'entrée d'air chaud à l'intérieur de l'armoire de séchage. Cela signifie que l'équation énergétique doit être activée. L'équation qui exprime le transfert de chaleur dans la tranche de la tomate solide est la suivante.

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_P u.\nabla T + \nabla \cdot (-k\nabla T) = Q \qquad \text{(III.3)}$$

ρ : Densité du solide, **Cp :**Capacité thermique spécifique du solide. **T :** Température

u : Vitesse de l'humidité, **k :**Conductivité thermique du matériau, **Q :** Énergie générée dans le volume de contrôle. Le terme $\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t}$représente l'accumulation d'énergie. Le deuxième terme, qui est $\rho C_P u.\nabla T$ représente le transfert d'énergie dû à la convection dans la tranche de tomate et le troisième terme $\nabla \cdot (-k\nabla T)$ signifie le transfert de chaleur par conduction à travers le volume de contrôle.

- **Transport des espèces diluées :**

L'équation régissant le transport de l'humidité est donnée par :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot J_i + u\nabla c = R_i \qquad \text{(III.4)}$$

$\frac{\partial c}{\partial t}$ Représente la variation de la concentration d'humidité dans le volume de contrôle. $\nabla \cdot J_i$ Signifie le flux d'humidité diffusif tandis que $u\nabla c$ représente le flux d'humidité convectif dans la tranche de la tomate qui est négligé. Ri, qui correspond à la génération

d'humidité dans le volume de contrôle, est également nul. L'équation (III.4) peut être récrite comme :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \qquad \text{(III.5)}$$

III.4. Simulation numérique :

III.4.1 Définition du problème :

Le problème est bidimensionnel, il a été choisi afin de diminue la puissance de calcul. Les interfaces physiques sélectionnées étaient le transfert de chaleur dans les solides et le transport d'espèces diluées. La figure III.2 présente la configuration topologique de base du séchoir utilisé dans ce travail. Dans la deuxième configuration (figure III.3), nous avons procédé l'optimisation du séchoir en ajoutant une deuxième entrée pour l'air. L'écoulement est turbulent : SST et le régime est stationnaire. Basant sur la méthode des éléments finis, un maillage non structuré a été utilisé pour réaliser les simulations numériques. Le schéma de discrétisation utilisé est hybride pour les termes convectifs dans les équations de quantité de mouvement et d'énergie, et pour l'algorithme SIMPLEC pour le couplage pression-vitesse.

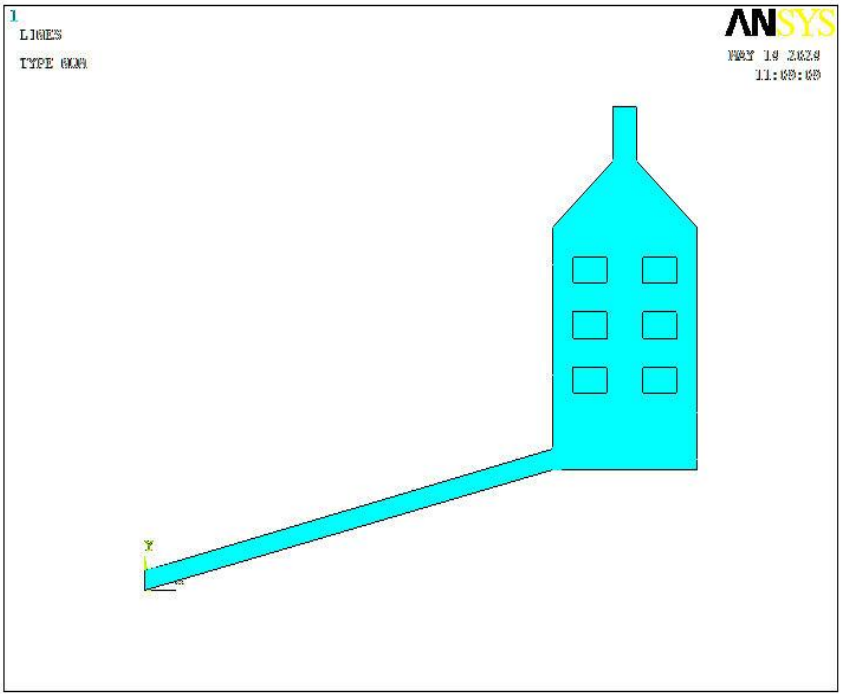


Figure III .2 : configuration topologique de base du séchoir étudie.

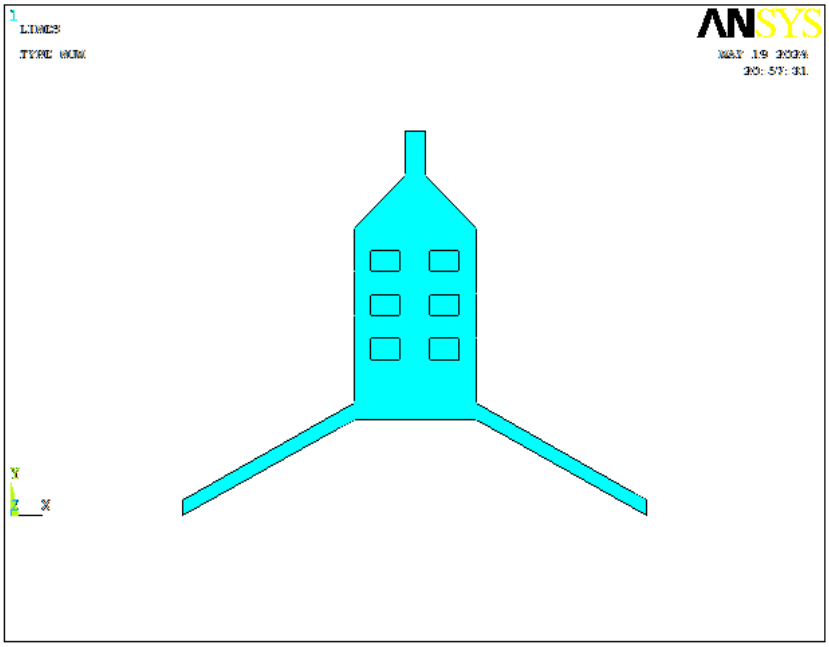


Figure III .3 : Configuration topologique optimisée du séchoir étudie.

III.4.2 Conditions aux limites :

La température de l'air a été établie à 27°C pour chaque séchoir, et la vitesse de séchage de l'air a été établie à 0.3 m/s avec une humidité relative (HR) de l'air de séchage de 17,95 %. Le taux d'humidité initial a base sèche de la tomate variait entre 94 et 94,59 %.

Le flux de chaleur à la frontière considérée après avoir négligé le flux de chaleur par évaporation a été calculé par :

$$-n.q = h(T_{ext} - T) \qquad \text{(III.6)}$$

Dans l'équation (III.6), $n{\cdot}q$ représente le transfert de chaleur dans une direction normale jusqu'à la frontière tandis que h représente pour le coefficient de transfert de chaleur. T_{ext} et T représentent respectivement les températures externe et limite. Le programme calcule les coefficients de transfert de chaleur en fonction du nombre de Reynolds.

$$h = \frac{k}{L}\frac{0.3387 Pr^{1/3} Re^{1/2}}{\left(1+\left(\frac{0.0468}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{1/4}} \qquad \text{(III.7)}$$

Valable pour le nombre de Reynolds ≤ 500 000

Avec : L : Longueur de la surface convective, Pr : Numéro de Prandtl de l'air, Re :Nombre de Reynolds de l'air.

La température de l'air soufflé était de 27°C et la vitesse de 0,3 m/s. Le flux d'humidité à la frontière est défini par l'équation :

$$-n.(-D.\nabla c) = k_{c,i}\left(c_{b,j} - c_i\right) \quad \text{(III.8)}$$

Avec $\mathbf{kc_{,i}}$: coefficient de transfert de masse, $\mathbf{C_{b,j}}$: Concentration d'humidité à la surface de la tranche , $\mathbf{C_i}$: Concentration d'humidité de l'air

Le coefficient de transfert de masse $\mathbf{k_{c,i}}$ est défini par : (Kumar et coll., 2012)

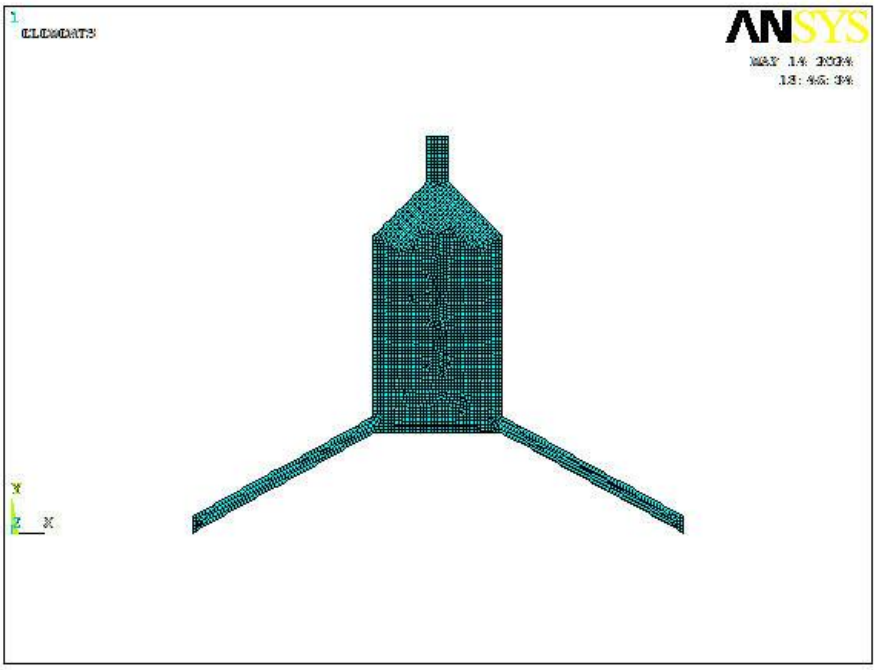
$$k_{c,i} = 0.0296 Re^{0.5} Sc^{0.33} D/a \quad \text{(III.9)}$$

Sc : Numéro de Schmidt, **a** : longueur de surface convective.

III.4.3 Maillage et discrétisation :

Après avoir défini les termes des équations mentionnées ci-dessus et les paramètres associés, le maillage a été réalisé. Un maillage très fin généré par le code de calcul ANSYS APDL a été utilisé pour la simulation. Une minute a été prise comme pas de temps. La figure III.4 montre les maillages des configurations successives étudiées afin de trouver la configuration qui optimise les paramètres de séchage de la tomate. Notre maillage est structuré et uniforme car nous nous sommes intéressés au comportement de l'air dans tout le volume de control. La figure III.4.a montré la première configuration avec une seule entrée d'air. Les figures figure III. 4.b montre la deuxième configuration avec deux entrées.

A:



B :

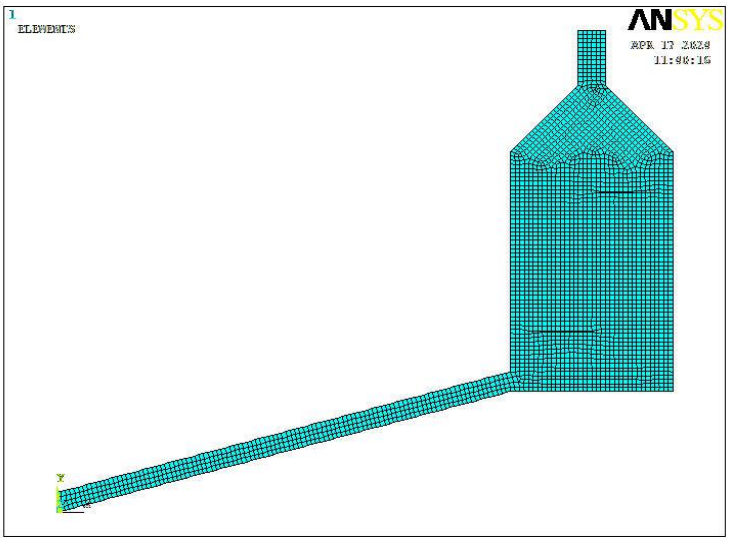


Figure III .4 : Maillage des configurations étudiées : (**A**) a une seule entrée ; (**B**) : a deux entrées.

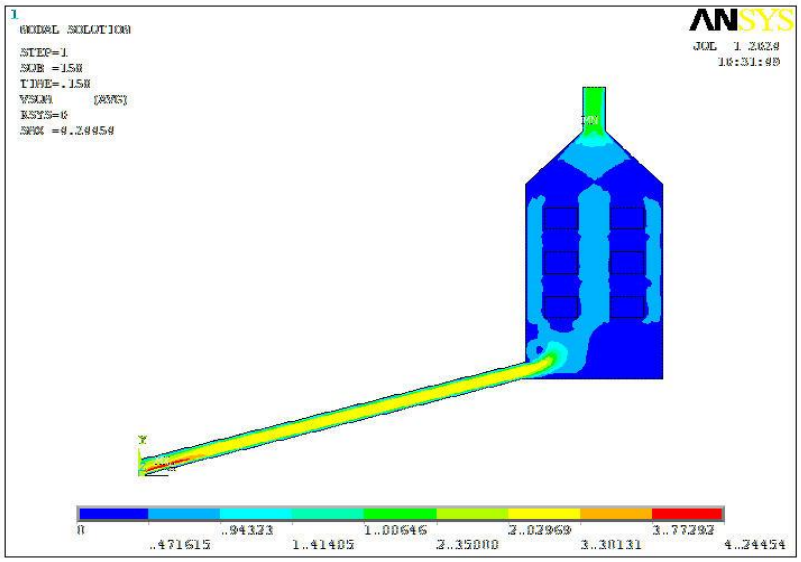
III.5. Résultats et discussion :

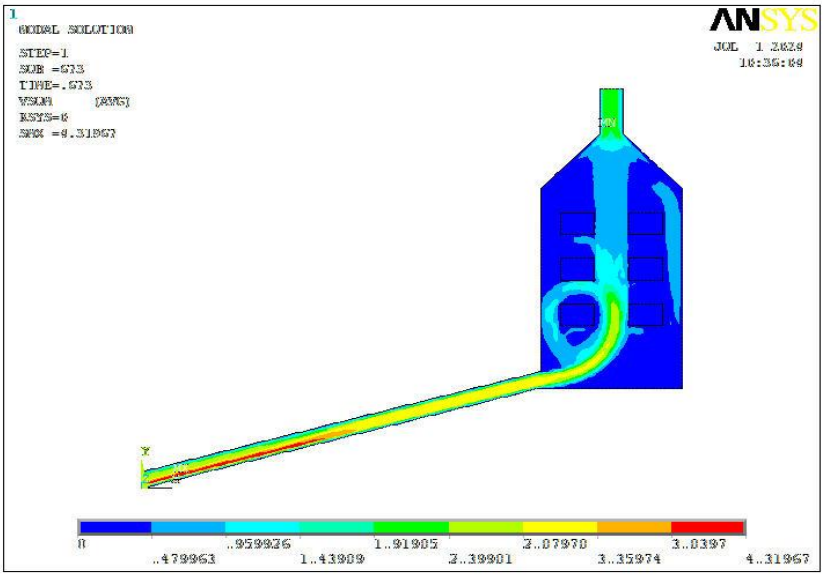
III.5. 1. Champ de vitesse :

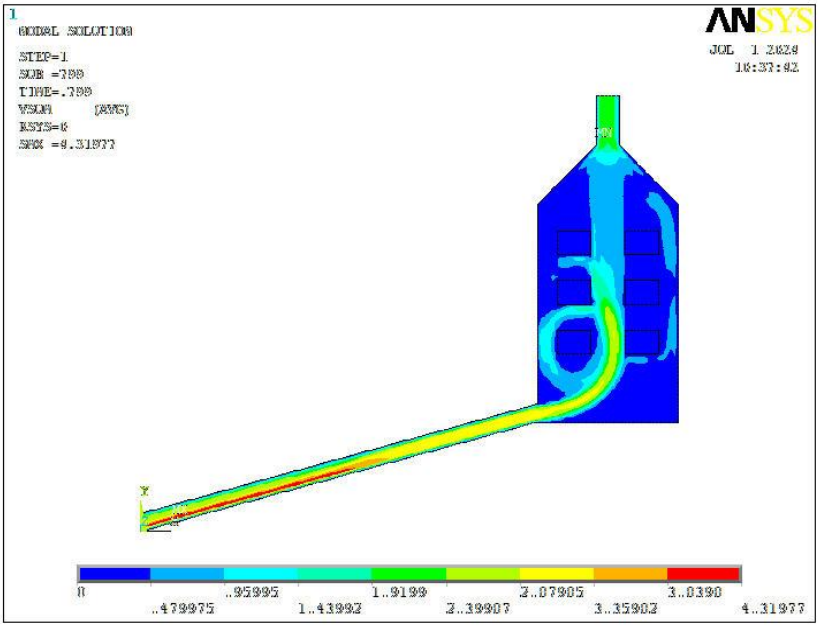
La figure III.5 présente les champs de vitesse dans les deux configurations (a) et (b) selon la Figure III 2. Sur la figure III 5, la distribution de vitesse montre qu'à l'intérieur du séchoir, la vitesse atteint des valeurs de 2.6 m/s. Alors qu'on a constatées des très faibles vitesses dans tout le séchoir, elles varient entre 0,1 et 0,4 m/s au niveau des parois de la chambre de séchage. Une mauvaise répartition des vitesses est observée. Cette répartition de vitesse dans le séchoir ne garantit pas un séchage homogène et de grande qualité en fin d'opération.

La figure III Désignation.5. b montre les champs de vitesse pour le séchoir à deux entrées d'air. Sur cette figure, on constate une vitesse relativement élevée dans la chambre de séchage sa répartition est presque uniforme et homogène car les deux entrées assurent une bonne répartition de l'air dans la chambre de séchage.

A :

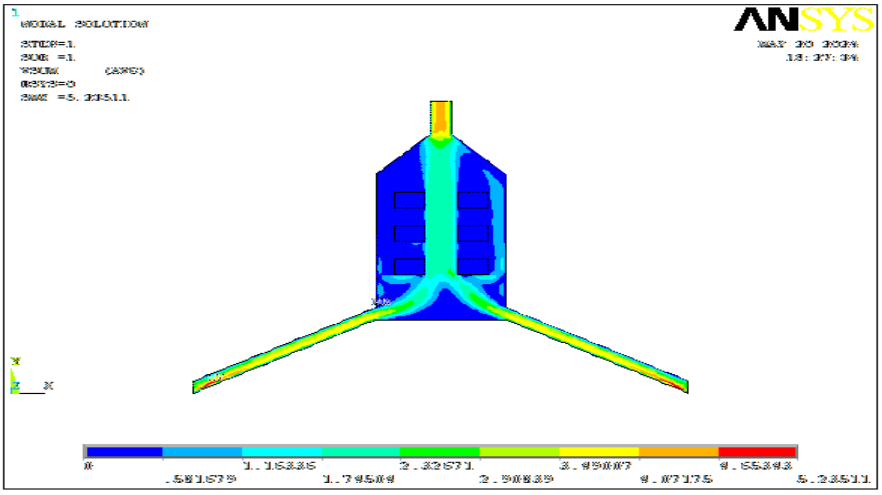






Les champs de vitesse pour le séchoir une seule entrée dans déférents moments.

B :



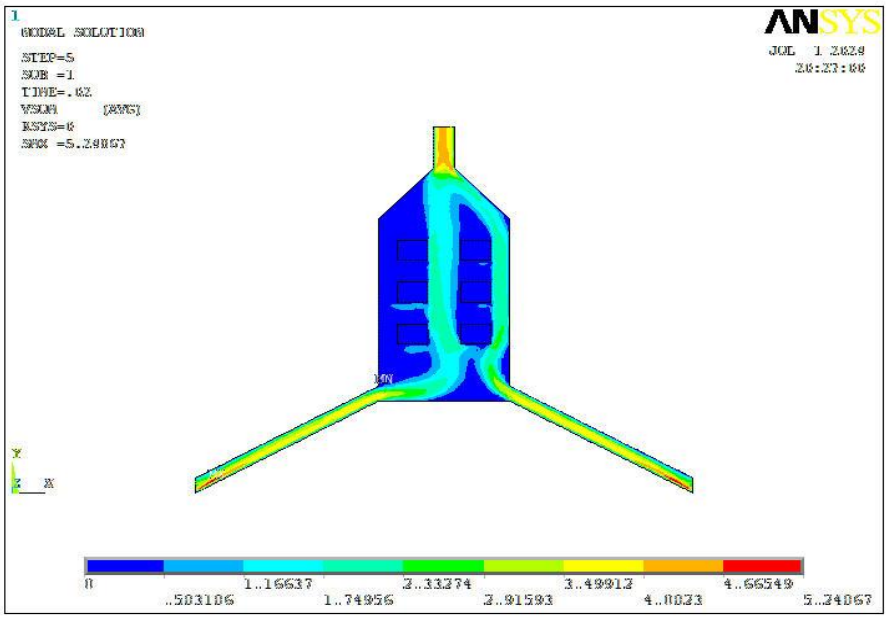


Figure III .5 : Champs de vitesse : A) avec une seule entrée d'air, B) avec deux entrées d'air.

III.5. 2. Champ de température :

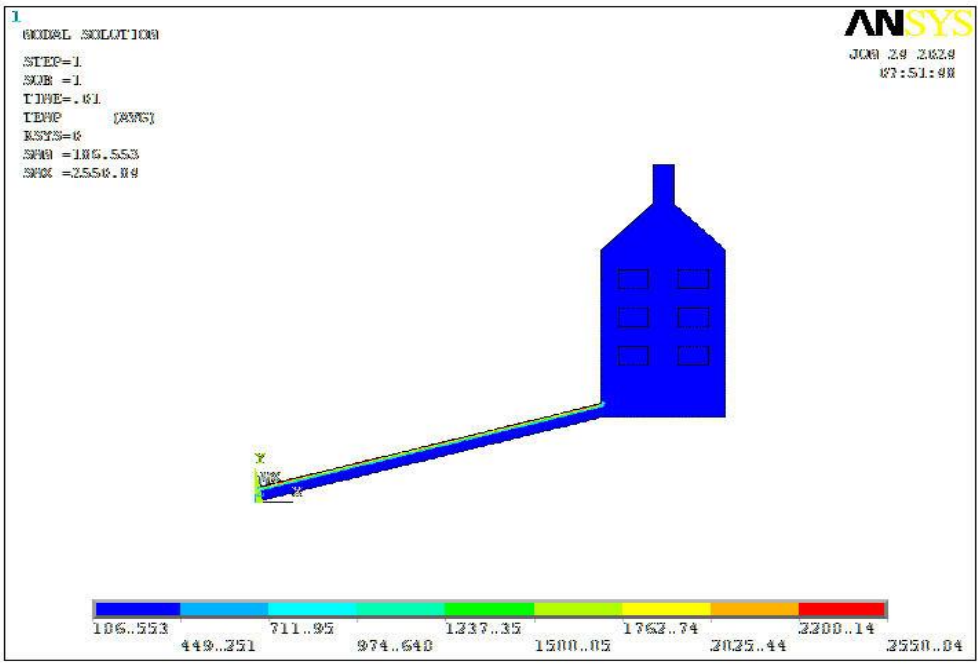
III.5. 2.1 Température de l'air sécheur :

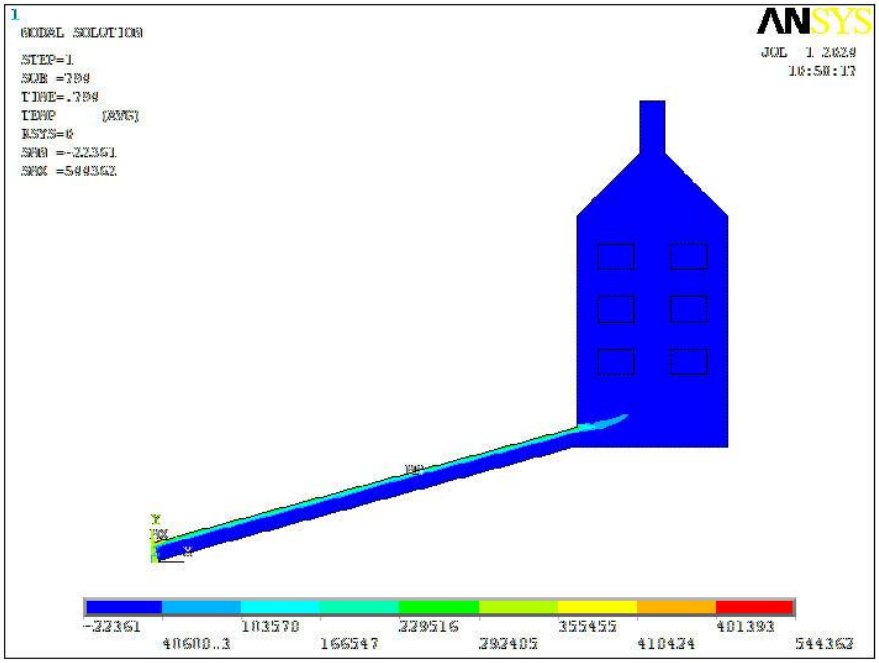
Les champs de température pour les deux configurations sont présentés par la Figure III.6. En effet, sur la Figure III.6.a, on constate que la température augmente progressivement au fur et à mesure que l'air traverse le capteur solaire, la chambre de séchage et la cheminée. On observe sur cette figure, des températures élevées à

l'entrée du collecteur mais qui chutent considérablement au niveau de la chambre de séchage. Ce phénomène peut être justifié par la mauvaise extraction de l'air que fait la cheminée et par la vitesse de l'air en convection naturelle.

Pour la deuxième configuration avec deux entrées d'air figure, on observe une répartition quasi homogène de la température dans le séchoir. La figure III.6. b montre la plage de température de cette configuration .La température dans ce séchoir est comprise entre 46 et 59°C. Elle évolue progressivement et devient quasiment constante vers 53 °C à l'intérieur de la chambre de séchage. La plage de température de séchage des produits alimentaires est généralement comprise entre 30 °C et 80 °C [16], la deuxième configuration que nous proposons se situe dans cette plage de température.

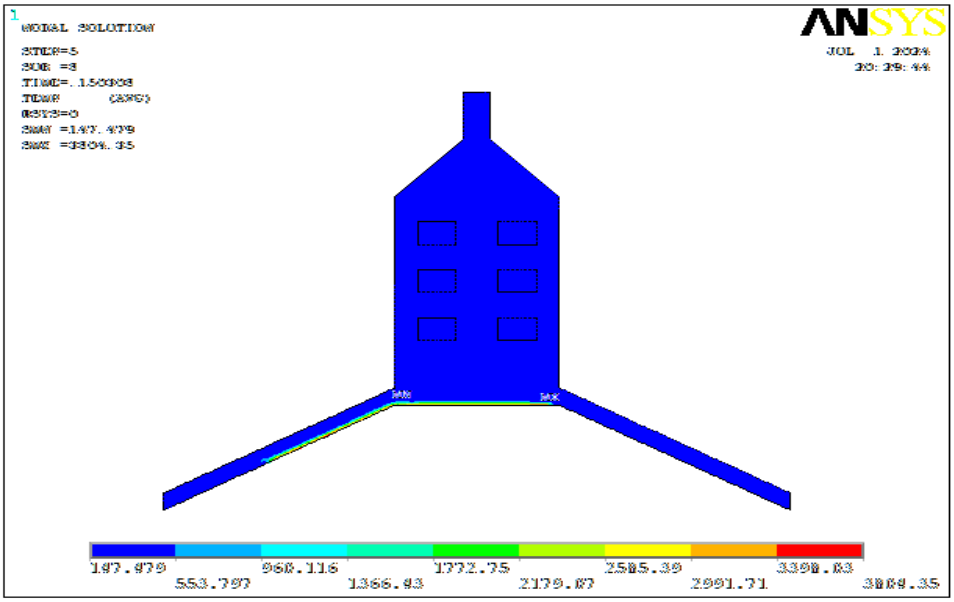
A :





Les champs de températures pour le séchoir une seule entrée dans déférents moments.

B :



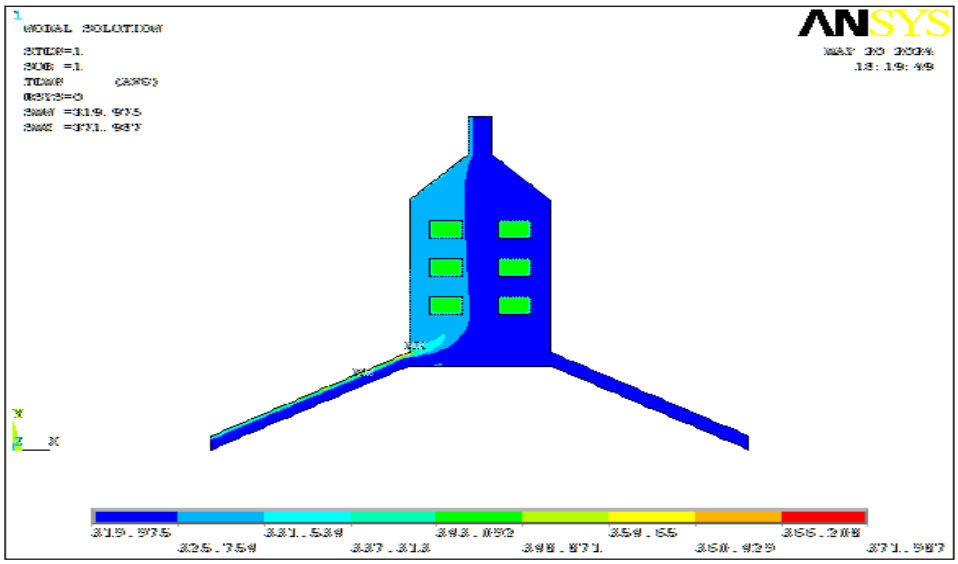
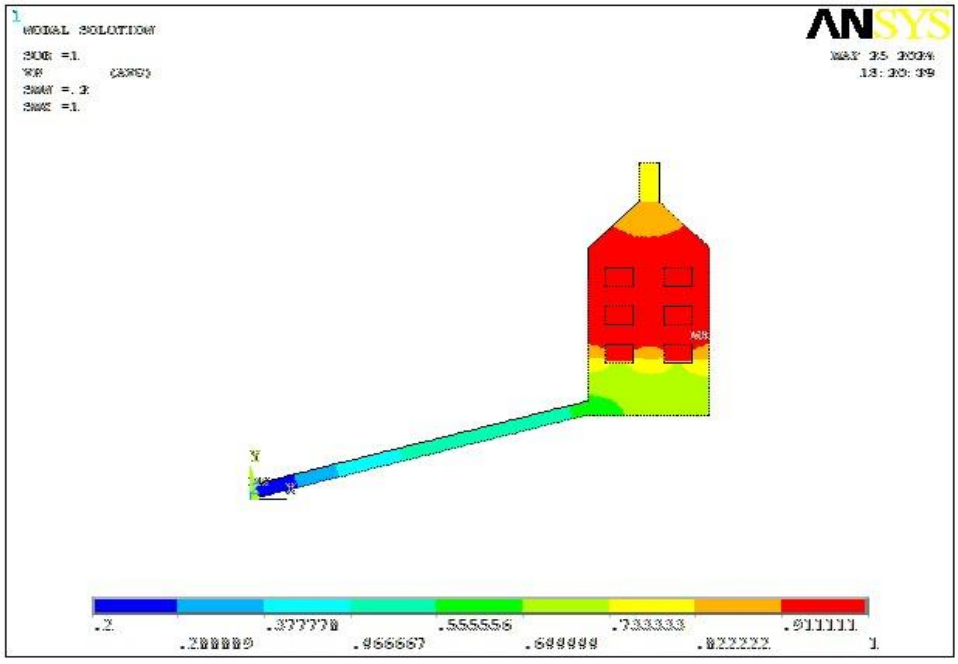


Figure III .6 : Champs de température pour l'air sécheur : A) avec une seule entrée d'air, B) avec deux entrées d'air.

III.5. 2.2 : Température de la vapeur :

A :



B :

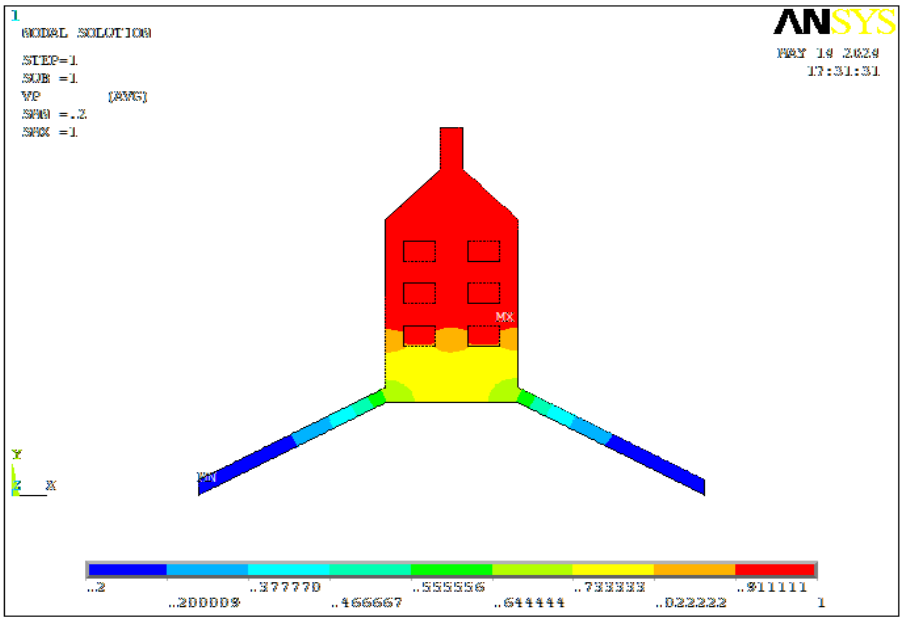


Figure III.7 : Champs de température de la vapeur : A) avec une seule entrée d'air, B) avec deux entrées d'air.

III.5. 3. Profil de température :

III.5. 3.1. Distribution de la température de l'air :

La figure III-8 représente la variation de la température en fonction du temps, comme l'en observe : la température dans le premier mode augmente et cela est dû à une diminution progressive du taux d'humidité. Alors que dans la seconde situation observe une stabilité de la température dans le temps ce qui explique l'efficacité du processus de séchage. Alors, on a observé pour la deuxième configuration, une augmentation rapide de la température, suivie d'une stabilisation totale **(Figure III.9, Figure III.10)**. Cela peut être expliqué par les ajustements géométriques que nous avons effectués, ce qui a permis une distribution optimisée du flux d'air.

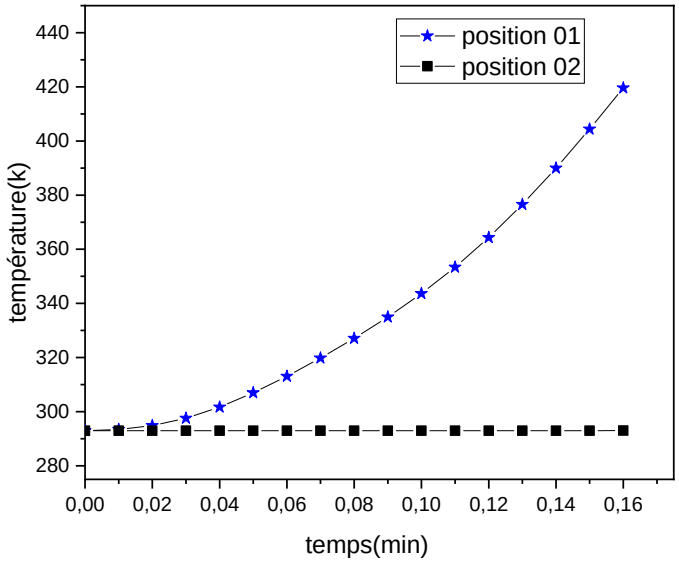


Figure III. 8 : Evolution de la température de l'air en fonction de temps pour la première configuration.

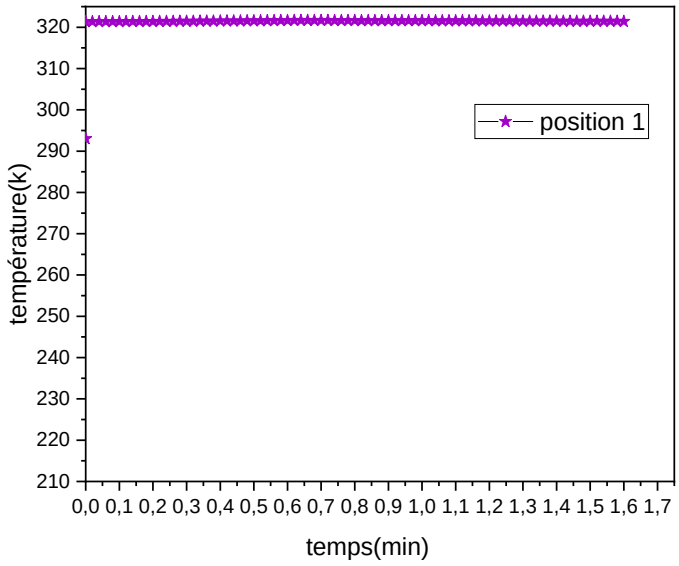


Figure III .9 : Courbe modifié de la température de l'air du modèle de séchoir solaire indirect on fonction de temps.

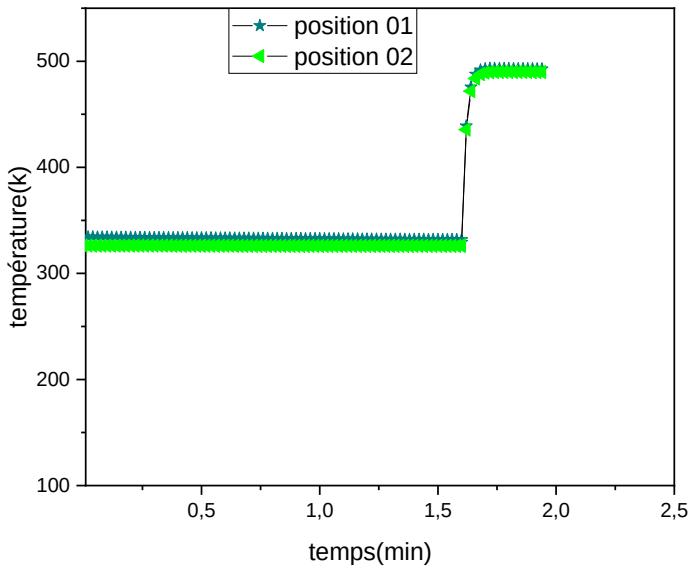


Figure III .10 : évolution de la température de l'air en deux positions pour la deuxième configuration.

III.5. 3.2. Distribution de la température de la vapeur :

Le graphique représente les variations de température de vapeur en fonction du temps pour la première configuration, où l'on observe une diminution progressive suivie d'une augmentation rapide et instantanée de la température. Ceci est dû à la vitesse accrue du flux d'air, entraînant une baisse du taux d'humidité dans l'air autour des tomates.

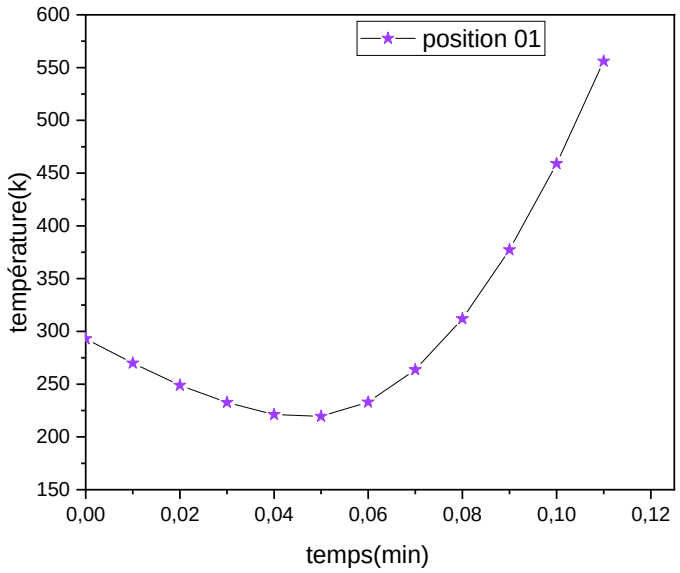


Figure III.11 : variation de la température de vapeur en fonction de temps pour la première configuration.

Pour la deuxième configuration, on observe dans la première situation une stabilité de la température, puis une augmentation rapide en raison d'une augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air **(Figure III.12)** Cela suggère que le système de séchage fournit des conditions de séchage cohérentes et uniformes, garantissant que tous les échantillons de tomates subissant un processus de séchage symétrique. Dans le premier mode, l'augmentation de la température est due à la vitesse du flux d'air ce qui entraine une faible humidité des tomates. Les résultats précédents approuvent la précision du modèle d'étude car ils indiquent un fonctionnement système de séchage solaire où les valeurs de température, de pression et de vitesse du fluide tombent dans l'intervalle de valeur raisonnable.

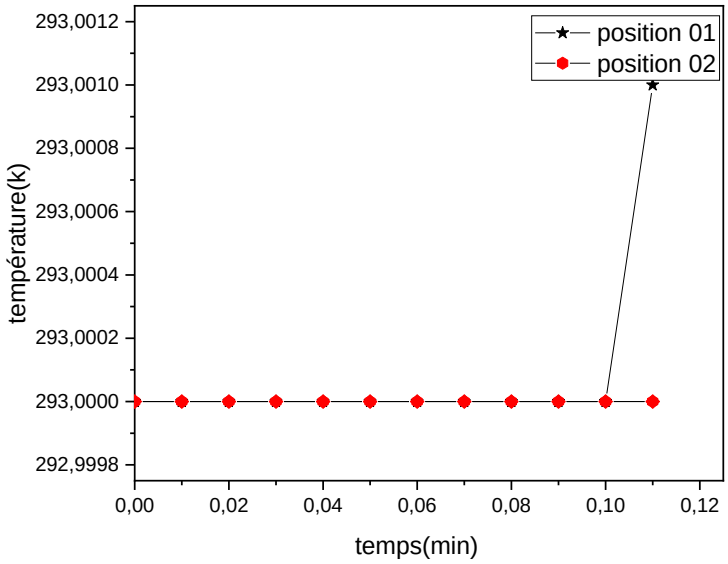


Figure III. 12 : variation de la température de vapeur en fonction de temps pour la deuxième configuration.

La figure suivante représente l'évolution de la température de la vapeur dans la chambre de séchage du premier modèle de séchoir solaire indirect. On fonction temps : nous observons une légère augmentation suivie d'une baisse de température. Ces résultats s'expliquent par le fait que le système solaire élimine efficacement l'humidité des tomates, ce qui entraine l'effet de séchage souhaité tout en réduisant le temps de séchage.

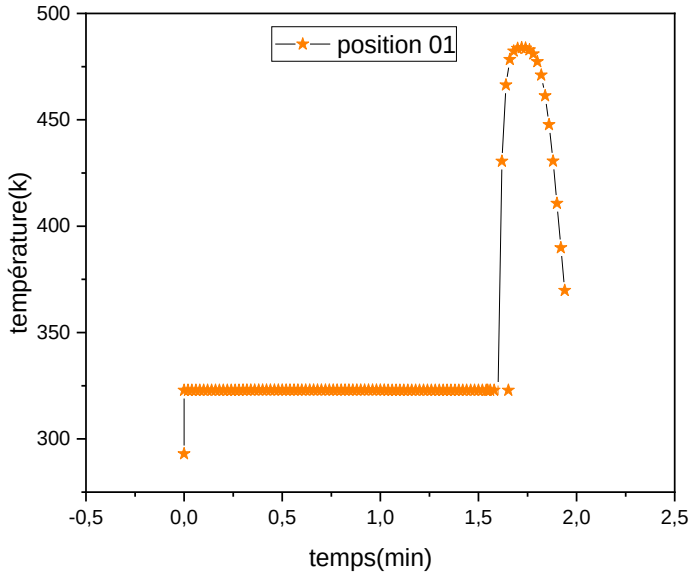


Figure III. 13 : Température de vapeur en fonction du temps pour la première configuration.

Le courbe représente la température de vapeur de modèle de séchoir solaire indirect on fonction de tempes dans deux positions dans le premier cas la température augmente légèrement avant de se stabiliser complètement ; puis elle augmente rapidement avant de se stabilises à nouveau. Dans le deuxième cas ; on observe une stabilité totale de la température suivie d'une augmentation rapide et notable des changements de température. Cela est dû à la capacité et à l'efficacité du système solaire à convertir le rayonnement solaire en chaleur et à l'utiliser dans le processus de séchage.

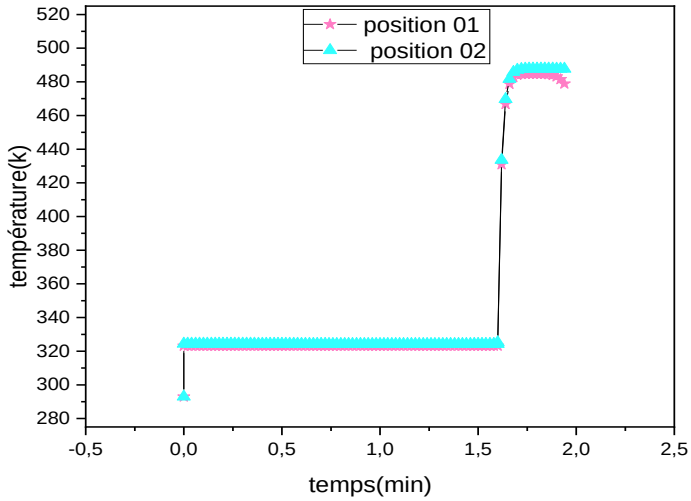


Figure III .15 : Température de vapeur en fonction du temps pour la deuxième configuration.

Au final, nous obtenons une configuration topologique de séchoir qui peut contribuer à optimiser le séchage des produits alimentaires. Cette configuration qui possède deux entrées pour l'air sécheur nous a permet d'obtenir de bons paramètres de séchage tels que la vitesse de l'air et la température. Ainsi, on obtient pour une vitesse de l'air en entrée du séchoir de 0,05 m/s en convection naturelle et une température ambiante de 26 °C, les valeurs suivantes : Une vitesse de l'air de séchage est comprise entre 1.6 et 3.54 m/s dans la chambre de séchage, une température de séchage entre 53 et 61°C. Ces intervalles de températures sont recommandés pour le séchage de la tomate [1

III.6. Conclusion :

L'objectif de ce chapitre était d'inspecter les caractéristiques du séchage des aliments et le processus de séchage des tranches de tomate. Une étude numérique a été faite à l'aide du code de calcul ANSYS APDL. Le processus de séchage a été simulé en utilisant les deux phénomènes de transferts : le transfert de chaleur dans les solides le transport des espèces diluées. La question a été posé c'est quelle est l'influence de la configuration topologique des séchoirs solaires indirects sur la distribution de la température, la variation de vitesse et le temps de séchage des produits alimentaires. Les résultats ont été générés en considérant deux différentes configurations dans la première possède une seule entrée pour l'air sécheur et la deuxième contienne deux entrées d'air. Les résultats montrent en effet que les formes géométriques du séchoir ont une influence très significative sur les paramètres de séchage. L'ajout d'une seconde entrée d'air dans la chambre de séchage vise à assurer une distribution thermique plus homogène, garantissant ainsi un séchage plus uniforme. Cette modification pourrait potentiellement améliorer considérablement l'efficacité des séchoirs solaires en optimisant la répartition de la chaleur.

Conclusions générales :

Le séchage étant une opération unitaire de la technologie des industries agroalimentaires, il en existe plusieurs modes de séchage du plus lent au plus rapide. Le séchage solaire reste le mode de séchage le plus répandu au monde ; avec des variantes de séchage direct et indirect. Cela semble être une avancée passionnante dans le domaine du séchage solaire des produits agricoles, en particulier pour les tomates.

Dans le présent travail, on s'intéresse à l'étude numérique du séchage thermique solaire de la tomate. On a le but d'étudier l'influence de la configuration topologique des séchoirs solaires indirects sur les températures, les vitesses et les temps de séchage des produits alimentaires dont le but d'améliorer les performances thermiques et dynamiques d'un séchoir solaire indirect. L'étude consiste à étudier le comportement de l'air à l'intérieur des séchoirs. L'idée est d'ajouter une deuxième entrée pour l'air sécheur et voir leurs effets sur la vitesse et la température.

L'utilisation de simulations numériques pour améliorer la conception des dispositifs de séchage est une approche très prometteuse. Pour cette étude : la géométrie étudiée ainsi que les conditions aux limites sont réalisées par le code de calcul ANSYS APDL. Les équations de conservation de la masse, de la quantité du mouvement et de l'énergie qui régit le transfert thermique et massique de l'entrée jusqu'à la sortie du séchoir sont résolues numériquement par le même outil numérique.

Les analyses des champs de température et de vitesse pour les deux configurations étudiées par simulation numérique nous ont permis de réaliser une configuration géométrique de séchoir solaire indirect pour optimiser l'efficacité des séchoirs. Les résultats montrent en effet que les formes géométriques du séchoir ont une influence très significative sur les paramètres de séchage. L'ajout d'une seconde entrée d'air dans la chambre de séchage vise à assurer une distribution thermique plus homogène, garantissant ainsi un séchage plus uniforme. Cette modification pourrait potentiellement améliorer considérablement l'efficacité des séchoirs solaires en optimisant la répartition de la chaleur.

D'un point de vue, les résultats de ce travail étant purement théoriques, nous envisageons de faire une étude pratique à travers la réalisation physique du séchoir.

De plus, l'idée d'introduire une couche thermique de gravier ou de modifier l'épaisseur de l'entrée d'air pourrait également être très intéressante pour améliorer encore plus l'efficacité du séchoir.

En perspective, il serait intéressant d'associer dans cette étude, les transferts de masse et de matière entre le produit et l'air, afin d'analyser leur influence sur les différents paramètres de séchage tels que la vitesse et les températures de séchage. En plus, Cette étude ouvre la voie à de nouvelles possibilités d'optimisation des dispositifs de séchage solaire pour une utilisation plus efficace dans le traitement des produits agricoles.

Références Bibliographiques :

[1] Singh, P., & Gaur, M. K. (2020). Review on development, recent advancement and applications of various types of solar dryers. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization,and Environmental Effects, 1-21. https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1806951.

[2] Chavan, A., Vitankar, V., Mujumdar, A., & Thorat, B. (2021). Natural convection and direct type (NCDT) solar dryers: a review. Drying Technology, 39(13), 1969–1990. https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1753065.

[3] Harouadi, F., Mahmah, B., Belhamel, M., Chader, S., M'Raoui, A., & Etievant, C. (2007). Les potentialités d'exploitation d'hydrogène solaire en Algérie dans un cadre euro-maghrébin Partie Ⅰ : Phase d'étude d'opportunité et de faisabilité. Journal of Renewable Energies, 10(2), 181-190.

[4] Li, Z., Raghavan, G. S. V., Wang, N., & Vigneault, C. (2011). Drying rate control in the middle stage of microwave drying. Journal of Food Engineering, 104(2), 234-238.

[5] Alibas, I. (2007). Energy consumation and colour characteristics of nettle leaves during microwave, vacuum and convective drying. Biosystems Engineering, 96(4), 495-502.

[6] Tahmasebi, A., Yu, J., Han, Y., Zhao, H., & Bhattacharya, S. (2014). A kinetic study of microwave and fluidized-bed drying of a Chinese lignite. Chemical Engineering Research and Design, 92(1), 54-65.

[7] Boroze, T. T. E., Azouma, Y. O., Ahanogbe, K., & Barate, M. (2019). Séchage solaire de céréales : cinétiques, évaluations thermo-hygrométrique et énergétique. Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie, *46*, 41-49.

[8] CIOBANU, E. (2010). L'eau–élement essentiel de la vie humaine. GUIDE DE BONNES PRATIQUES, 29.

[9] Ragnarsson, J. O., & Labuza, T. P. (1977). Accelerated shelf-life testing for oxidative rancidity in foods—A review. Food Chemistry, 2(4), 291-308.

[10] Scott, W. J. (1957). Water relations of food spoilage microorganisms. In Advances in food research (Vol. 7, pp. 83-127). Academic Press.

[11] Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. Solar energy, *85*(8), 1665-1691.

[12] Ekechukwu, O. V. (1999). Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. Energy conversion and management, 40(6), 593-613.

[13] Mettouchi, Tamendjari S . (2021). La conservation des aliments. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie Université A /Mira de Bejaia. Algeria.

[14] Scholz, E. (2012). Karl Fischer titration: determination of water. Springer Science & Business Media.

[15] Prakash, O., & Kumar, A. (2013). Historical Review and Recent Trends in Solar Drying Systems. International Journal of Green Energy, 10(7), 690–738.

[16] Jannot, Y. (2003). Isothermes de sorption : modèles et détermination. LEPT-ENSAM, (1-5).

[17] Labuza, T. P. (1975). Sorption phenomena in foods: theoretical and practical aspects. In Theory, determination and control of physical properties of food materials (pp. 197-219). Dordrecht: Springer Netherlands.

[18] Taylor, H. S. (1958). Irving Langmuir, 1881-1957.

[19] Ghaedi, M. (Ed.). (2021). Adsorption: Fundamental processes and applications. Academic press.

[20] Sinha, P., Datar, A., Jeong, C., Deng, X., Chung, Y. G., & Lin, L. C. (2019). Surface area determination of porous materials using the Brunauer–Emmett–Teller (BET) method: limitations and improvements. The Journal of Physical Chemistry C, 123(33), 20195-20209.

[21] Chirife, J., Timmermann, E. O., Iglesias, H. A., & Boquet, R. (1992). Some features of the parameter k of the GAB equation as applied to sorption isotherms of selected food materials. Journal of Food Engineering, 15(1), 75-82.

[22] Caurie, M. (1970). A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods. International Journal of Food Science & Technology, 5(3), 301-307.

[23] Chen, Y. D. et Yang, R. T. (1991). Concentration dependence of surface diffusion and zeolitic diffusion. A.I.Ch.E. Journal, 37(10):1579–1582.

[24] Henderson, S, M. 1952. A basic concept of equilibrium moisture. Agriculture Engineering, 33, 29-32.

[25] Oswin, C. R. (1946). The kinetics of package life. III. The isotherm. Journal of the Society of Chemical Industry, 65(12), 419-421.

[26] Smith, S. E. (1947). The sorption of water vapor by high polymers. Journal of the American Chemical Society, 69(3), 646-651.

[27] André CHARREAU, Roland CAVAILLÉ (1995). Séchage. Théorie et calculs. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés J 2 48023.

[28] Saliha, K. R. I. B. Y. (2020). Chapitre 2 : Comportement du produit à sécher.

[29] Mihoubi, Daoued. (2004). DEHYDRATION OF CLAYS BY COMPRESSION AND DRYING. ASPECTS OF MODELISATION AND SIMULATION.

[30] Hansmann, C. F., Joubert, E., & Britz, T. J. (1998). Dehydration of peaches without sulphur dioxide. Drying technology, 16(1-2), 101-121.

[31] S. D. HOLDSWORTH (2007). Dehydration of food products A review. International journal of Food Science and Technology, 6(4):331 – 370.

[32] Ekechukwu, O. V. (1999). Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. Energy conversion and management, 40(6), 593-613.

[33] Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. Solar energy, 85(8), 1665-1691.

[34] Janjai, S., & Bala, B. K. (2012). Solar drying technology. Food Engineering Reviews, 4, 16-54.

[35] Tembo, G., Brorsen, B. W., Epplin, F. M., & Tostão, E. (2008). Crop input response functions with stochastic plateaus. American Journal of Agricultural Economics, 90(2), 424-434.

[36] Esper, A., & Mühlbauer, W. (1998). Solar drying-an effective means of food preservation. Renewable energy, 15(1-4), 95-100.

[37] Karathanos, V. T., & Belessiotis, V. G. (1997). Sun and artificial air-drying kinetics of some agricultural products. Journal of Food Engineering, 31(1), 35-46.

[38] Bala, B. K., Mondol, M. R. A., Biswas, B. K., Chowdury, B. D., & Janjai, S. J. R. E. (2003). Solar drying of pineapple using solar tunnel drier. Renewable Energy, 28(2), 183-190.

[39] Hossain, M. A., & Bala, B. K. (2007). Drying of hot chilli using solar tunnel drier. Solar energy, 81(1), 85-92.

[40] Prakash, O., Laguri, V., Pandey, A., Kumar, A., & Kumar, A. (2016). Review on various modelling techniques for the solar dryers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 396-417.

[41] Jamaleddine, T. J., & Ray, M. B. (2010). Application of computational fluid dynamics for simulation of drying processes: A review. Drying technology, 28(2), 120-154.

[42] Lamnatou, C., Papanicolaou, E., Belessiotis, V., & Kyriakis, N. (2010). Finite-volume modelling of heat and mass transfer during convective drying of porous bodies–non-conjugate and conjugate formulations involving the aerodynamic effects. Renewable Energy, 35(7), 1391-1402.

[43] Torres-Reyes, E., Navarrete-Gonzalez, J. J., & Ibarra-Salazar, B. A. (2002). Thermodynamic method for designing dryers operated by flat-plate solar collectors. Renewable energy, 26(4), 649-660.

[44] Lamnatou, C., Papanicolaou, E., Belessiotis, V., & Kyriakis, N. (2012). Experimental investigation and thermodynamic performance analysis of a solar dryer using an evacuated-tube air collector. Applied energy, 94, 232-243.

[45] - https://www.solarbrother.com/blog/sechoirs-solaires/

[46] - https://www.calculcee.fr/article/sechage-solaire/

[47] - https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/nabil_bessanane/files/partie-III -cours_solaire_thermique_m1erm.pdf

[48] Ekechukwu OV. Experimental studies of integral-type natural-circulation solar-energy tropical crop dryers. Ph.D. thesis. Cran®eld Institute of Technology, United Kingdom, 1987.

[**49]** O.V. Ekechukwu, B. Norton / Energy Conversion & Management 40 (1999).

[50] Banout, J. (2017). Solar drying systems. Solar drying technology: Concept, design, testing, modeling, economics, and environment, 39-67.

[51] Chouicha, S. Etude des Possibilités de Stabilisations des Conditions Opératoires dans les Séchoirs Solaires Convectifs (Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla).

[52] Bennamoun, L., Reviewing the experience of solar drying in Algeria with presentation of the different design aspects of solar dryers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.15(7): p. 3371-3379.

[53] Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. Renewable and sustainable energy reviews, 14(1), 1-30.

[54] Banout, J., Ehl, P., Havlik, J., Lojka, B., Polesny, Z., & Verner, V. (2011). Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli (Capsicum annum L.). Solar energy, 85(3), 506-515.

[55] Banout, J., Kucerova, I., & Marek, S. (2012). Using a double-pass solar drier for jerky drying. Energy Procedia, 30, 738-744.

[56] BOROZE, T. T. E., AZOUMA, Y. O., MEOT, J. M., DESMORIEUX, H., & Kossi, N. A. P. O. (2009). Intégration des outils du génie industriel dans 1'optimisation de la conception de séchoirs pour les produits agroalimentaires en climat tropical. Sciences Naturelles et Appliquées, 3(1 et 2).

[57] Janjai, S., & Bala, B. K. (2012). Solar drying technology. Food Engineering Reviews, 4, 16-54.

[58] Fudholi, A., Ruslan, M. H., Othman, M. Y., Yahya, M., Supranto, S., Zaharim, A., & Sopian, K. (2010, October). Collector efficiency of the double-pass solar air collectors with fins. In Proceedings of the 9th WSEAS international conference on System science and simulation in engineering (pp. 428-434).

[59] Taylor UJ, Weir AD. Simulation of a solar timber dryer. Solar Energy 1985;34(3):249±55.

[60Othman, M. Y., Yatim, B., Sopian, K., & Bakar, M. N. A. (2007). Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector. Desalination, *209*(1-3), 43-49.

[61] Jaïn, B. (2004). D'images populaires en art brut : la création vagabonde de Pierre Jaïn (1904-1967). Ligeia, 17(53-56), 103.

[62) Banout, J., & Ehl, P. (2010). Using a Double-pass solar drier for drying of bamboo shoots. Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS), *111*(2), 119-127.

Sustainable Energy Reviews, *29*, 905-910.

[64) Condorí, M., & Saravia, L. (1998). The performance of forced convection greenhouse driers. Renewable energy, *13*(4), 453-469.

[65] Jendrossek, D., Schirmer, A., & Schlegel, H. G. (1996). Biodegradation of polyhydroxyalkanoic acids. Applied microbiology and biotechnology, 46, 451-463.

[66] Garg, H. P., & Kumar, R. (2000). Studies on semi-cylindrical solar tunnel dryers: thermal performance of collector. Applied Thermal Engineering, 20(2), 115-131.

[67] Kudra, T. (2012). Energy performance of convective dryers. Drying technology, 30(11-12), 1190-1198.

[68] Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M. H., Ibrahim, A., & Kazem, H. A. (2014). Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. Energy conversion and management, 78, 641-651.

[69] Vijayan, S., Arjunan, T. V., & Kumar, A. (2016). Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter gourd in sensible storage based indirect solar dryer. Innovative food science & emerging technologies, 36, 59-67.

[70] Chauhan, P. S., & Kumar, A. (2016). Performance analysis of greenhouse dryer by using insulated north-wall under natural convection mode. Energy Reports, 2, 107-116.

[63] Prakash, O., & Kumar, A. (2014). Solar greenhouse drying: A review. Renewable and Source : https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.03.076.