

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail - Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE / SCIENCES,
TECHNOLOGIE ET GEOSCIENCES
(CRFD/STG)

UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALE PHYSIQUE ET APPLICATIONS

E-mail : crfd_stg@uy1.uninet.cm

Site web: www.uv1researchstg.cm



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POSTGRADUATE SCHOOL OF SCIENCE,
TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES
(CRFD/STG)

DOCTORATE RESEARCH UNIT FOR
PHYSICS AND APPLICATIONS

E-mail : crfd_stg@uy1.uninet.cm

Web site: www.uv1researchstg.cm

LABORATOIRE D'ENERGIE, DES SYSTEMES ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES

ENERGY LABORATORY, ELECTRICALS AND ELECTRONICS SYSTEMS

SIMULATION NUMERIQUE
BIDIMENSIONNELLE DU SECHAGE DANS UN
SECHOIR SOLAIRE

*Mémoire rédigé et présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master of
Science en Physique*

Spécialité : Energie, systèmes électriques et électroniques

Option : Energie et Environnement

Par

LELE DIMITRI DOUGLAS

Matricule : 15R2017

Licencié en Physique

Sous la direction de :

Pascalin TIAM KAPEN (*Maître de Conférences*)

IUT-FV / Université de DSCHANG

Et

NOUAYOU Robert (*Professeur*)

Université de YAOUNDE I

Année 2023



Dédicace

Je dédie ce mémoire à

La mémoire de mon feu tuteur, Mr TCHIKAM Etienne

Ma tutrice, Mme NOUYOU Francesca Epse TCHIKAM

Mon père M.YOUMBI Jean

Ma mère Mme KOMBOU Yvette Epse YOUMBI

Remerciements

Que grâce et honneur soient rendus au Seigneur DIEU, père tout-puissant qui m'a été d'une aide inestimable dans le cadre de la réalisation de ce travail. Ma gratitude va aussi à l'endroit :

*De mes directeurs de mémoire le Pr. **Pascalin TIAM KAPEN** enseignant à l'IUT-FV, Université de DSCHANG et le Pr. **NOUAYOU Robert** , enseignant à l'Université de YAOUNDE I pour la confiance placée en moi en acceptant de diriger ce travail, la pertinence du thème proposé et pour leurs multiples conseils, motivations et aides dans le processus de mon initiation à la recherche. J'ai appris énormément à vos côtés.

*Des **honoraux membres du jury** qui auront la tâche d'apprécier ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements et de mon profond respect.

*De mon chef de laboratoire le Pr. **SIMO Elie**, pour la formation de qualité qu'il a mise à ma disposition.

*De mes **Enseignants de l'Université de Yaoundé I**, en particulier ceux du Département de Physique pour ma formation académique.

*De ma famille pour le soutien moral, financier et matériel qu'elle a eu à faire jusqu'ici pour ma réussite académique. Je pense particulièrement à mon papa **YOUMBI JEAN**, ma maman **KOUMBOU Yvette**, à mon feu tuteur papa **TCHIKAM Etienne**, à ma tutrice maman **NOUYOU Francesca** , à mes frères, mes sœurs et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

*De mes amis **DJOHOU Franc Lumière**, **TAMWA Daniel**, **THUIDO Aimé**, **NANTHOUANG Gervais**, **NJOCK Emilienne**.

* De mes camarades de promotion pour leur formidable esprit d'équipe. Je pense particulièrement à **DJEI-PANG Stéphane** , **KAMGA Hugues Lionel**, **KAMGA NYAMSI Leonnel**, **KANA BOUGO Mariene Lovella**, **NOUADJE MEKEMTIE Favelle**, **TAHOUEGOUI Duplex**.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Liste des abréviations	viii
Résumé	ix
Abstract	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
1 REVUE DE LITTÉRATURE	4
1.1 Introduction	4
1.2 Généralités sur leséchage	4
1.2.1 Définition	4
1.2.2 Historique	4
1.2.3 But du séchage	9
1.2.4 Principe de séchage [12]	9
1.2.5 Domaines d'utilisations	9
1.2.6 Modes de séchage	10
1.2.7 Différents modes de séchage	12
1.2.8 Cinétique de séchage	13
1.2.9 Caractéristiques de l'air de séchage	14
1.2.10 Les séchoirs solaires	15
1.3 Conclusion	19
2 MATERIEL ET METHODES	20
2.1 Introduction	20
2.2 Rappel sur les différents modes de transfert thermique	20
2.2.1 Transfert thermique par conduction	20
2.2.2 Transfert thermique par convection	21
2.2.3 Transfert thermique par rayonnement	21
2.3 Description et dimension physique du modèle de séchage utilisé	21

2.4	Principe de fonctionnement du système de séchage	22
2.5	Modélisation mathématiques	22
2.5.1	Bilan thermique au niveau du capteur solaire	23
2.5.2	Bilan thermique au niveau de la chambre de séchage	26
2.5.3	Le taux de transfert de chaleur entre la paroi interne et la paroi externe	27
2.6	Modélisation numérique.	28
2.6.1	Equation physique	28
2.6.2	Conditions aux limites	29
2.7	Présentation du logiciel de simulation	29
2.8	Conclusion	34
3	RESULTATS ET DISCUSSIONS	35
3.1	Introduction	35
3.2	Paramètres utilisés pour la simulation	35
3.3	Méthodologie :	35
3.4	Présentation des différents profils de températures obtenues aux différentes heures :	36
3.4.1	Graphes de la répartition de la température à l'entrée du capteur	36
3.4.2	Graphes de la répartition de la température à l'entrée de la chambre de séchage	38
3.4.3	Graphes de la répartition de la température à la sortie de la chambre de séchage	41
3.5	Conclusion	43
	Bibliographie	46

Table des figures

1.1	Schéma descriptif du dispositif utilisé Boulemtafes and Semmar 1999 [6]	5
1.2	Schéma descriptif du séchoir utilisé dans la référence [7]	6
1.3	Séchoir solaire avec capteur solaire multi-passe incliné et un lit profond [8]	7
1.4	Séchoir solaire indirect multi-plateaux avec capteur solaire plan [9]	7
1.5	Deux types de séchoirs utilisés dans l'étude de (Benkhelfellah, El mokretar et al. 2005) [6]	8
1.6	Schéma descriptif d'un séchoir solaire avec stockage thermique [10]	8
1.7	Présentation schématique d'un produit humide [12].	9
1.8	courbe caractéristique de la période de séchage [24]	14
1.9	classification des types de séchoirs solaires [29]	16
1.10	Séchoirs solaires directs simples et principe d'un séchoir solaire direct [31]	17
1.11	Séchoirs solaires indirects et principe d'un séchoir solaire indirect [34]	17
1.12	Séchoirs solaires mixte et principe d'un séchoir solaire mixte [37]	18
1.13	SSéchoir solaire hybride [37]	18
2.1	séchoir solaire utilisé	22
2.2	Schéma représentatif du bilan thermique du capteur solaire [42]	23
2.3	Lancement du logiciel.	30
2.4	Fenêtre de création d'un nouveau modèle.	30
2.5	Choix de la dimension de travail.	30
2.6	Choix de la Physique.	31
2.7	Choix du régime d'étude.	31
2.8	Création de la géométrie du modèle	31
2.9	Spécification des matériaux adéquats au modèle.	32
2.10	Définition des champs physiques.	32
2.11	Etape de maillage du séchoir solaire.	33
2.12	Affichage du résultat.	33
3.1	Répartitions des lignes de coupes de références.	36
3.2	profil de température de 9h à 12h	37
3.3	profil de température de 13h à 16h.	37
3.4	profil du rayonnement solaire sur 24h	38
3.5	Profil de température de 9h à 12h	39

3.6	profil de température de 13h à 16h.	39
3.7	profil du rayonnement solaire 24h.	40
3.8	profil de température de 9h à 12h	41
3.9	profil de température de 13h à 16h.	41
3.10	profil rayonnement solaire sur 24h.	42

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Nomenclature

A : Surface, m^2

C : Rapport de concentration

C_p : Capacité thermique spécifique, $J/(Kg \cdot K)$

G : Irradiation solaire, W/m^2

h : Coefficient de transfert de chaleur

I : Courant électrique, A

P : Puissance de sortie, W

T : Température, K

V : Tension électrique, Volt

v : Volume, m^3

w : Vitesse du vent, m/s

Q : Flux de chaleur, W

\vec{q} : Flux surfacique, W/m^2

\vec{j} : Flux de charge, Volt/m

\vec{E} : Champ électrique, Volt/m

\overrightarrow{grad} : Gradient, K

σ_{SB} : Constante de Stefan-Boltzmann, $m^{-2}K^{-4}$

Abréviations

EVA : Acétate de vinyle éthyle

TPT : Tedlar polyester tedlar

PV : Photovoltaïque

PV-TEG : Photovoltaïque-générateur thermoélectrique

TE : Thermoélectrique

TEG : Générateur thermoélectrique

Bi_2Te_3 : Bismuth telluride

PCM : Matériaux à changement de phase

Symboles grecs

α : Coefficient de Seebeck, V/K

τ : Transmissivité,

η : Rendement

σ : Conductivité électrique, S/m

γ : Coefficient de température, K^{-1}

ρ : Masse volumique, Kg/m^3

ε : Emissivité

α : Coefficient d'absorption

π : Coefficient de Peltier, Volt

k : Conductivité thermique, W/(m.k)

Indices

a : Ambiante

c : Cold

conv : Convectif

den : Densité

en : Energétique

ex : Exergétique

h : Hot

L : Load

Opt : Optique

max : Maximale

Rad : Radiation

Ref : Référence

Sky : Ciel

S : Soleil

RÉSUMÉ

La conception d'un système de séchage solaire des aliments est cruciale pour les performances de séchage des aliments. Afin d'utiliser efficacement le soleil, l'utilisation des capteurs solaires à air chaud augmente progressivement dans les systèmes de séchage. La modélisation de la distribution de la température, pression et de la vitesse de l'air de séchage dans la chambre de séchage est un facteur très important pour la conception d'un séchoir. L'objectif de notre travail consiste à bien comprendre le mécanisme physique de l'opération de séchage qui est entre autres qu'un transfert de chaleur et d'un écoulement laminaire. Dans l'analyse numérique, la température et la vitesse de l'air ont été définies comme variables dans les conditions initiales et aux limites. Des équations mathématiques représentant les bilans énergétiques dans le capteur solaire et la chambre de séchage ont été utilisées pour la modélisation. Le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS a été utilisé pour la modélisation en 2-D du séchoir permettant obtention des valeurs de température, de la vitesse de l'air de séchage à différent endroit du séchoir solaire et aux différentes heures.

Mots clés : : séchoir solaire indirect(SSI), convection naturelle, capteur solaire, cinétique du séchage, Comsol Multiphysics.

ABSTRACT

The design of a solar food drying system is crucial to food drying performance. In order to use the sun efficiently, the use of solar hot air collectors is gradually increasing in drying systems. Modeling the temperature, pressure and velocity distribution of the drying air in the drying chamber is a very important factor for the design of a dryer. The objective of our work is to understand the physical mechanism of the drying operation which is among other things a heat transfers and a laminar flow. In the numerical analysis, temperature and air velocity were defined as variable in the initial and boundary conditions. Mathematical equations representing the energy balances in the solar collector and the drying chamber were used for the modelling. The COMSOL MULTIPHYSICS software was used for the 2-D modeling of the dryer to obtain temperature values, the speed of the drying air at different places in the solar dryer and at different times.

Keywords : indirect solar dryer, natural convection, solar collector, drying kinetics, Comsol Multiphysics.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La sécurité alimentaire et énergétique et la durabilité sont parmi les sujets les plus courants ces derniers temps. Elles impliquent une intervention rapide et efficace dans ces problématiques à l'échelle internationale, afin d'atténuer les dangers, causés par l'accroissement rapide de la population mondiale, l'abaissement des réserves des ressources énergétiques conventionnelles, ainsi que l'effet de l'empreinte du carbone sur l'environnement. La consommation énergétique globale est fortement influencée par le secteur agro-alimentaire. En effet, parmi les secteurs qui consomment une bonne partie de l'énergie mondiale sont les secteurs agro-alimentaires [1], [2].

Par ailleurs, le séchage est une opération nécessaire dans plusieurs processus industriels, par exemples : dans l'industrie agro-alimentaire, pharmaceutique, textile, les matériaux de construction tel que : le béton, bois, céramique . . . c'est aussi un processus qui consomme de l'énergie intensivement. Le séchage solaire des récoltes, fruits et légumes, a été pratiqué partout dans le monde pendant des siècles en plein air du soleil. Il a été employé pour sécher des grains, des viandes et d'autres produits agricoles afin de la consommation. Une grande partie de l'offre du monde en fruits et légumes secs continue à être séchée selon la manière traditionnelle au soleil dans l'ouvert sans aides techniques. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation de séchage normal en plein air du soleil.

La méthode traditionnelle du séchage souffre de maint problème, parmi ces derniers sont le manque de capacité de commander le processus de séchage correctement, incertitude du temps, nécessité des zones vastes, infection par des insectes et autres corps étrangers. Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, ou les séchoirs solaires. Un séchoir solaire correctement conçu peut alléger les inconvénients liés au séchage ouvert du soleil, et les qualités du produit sec (final) peuvent être améliorées [3]. 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) et le comportement de divers légumes et fruits, caractérisé par la cinétique de séchage. Pour utiliser librement, l'énergie renouvelable et non polluante comme source principale fournie par le soleil, la fabrication des séchoirs solaires peuvent réduire des pertes de récoltes et améliorer

sensiblement, la qualité du produit sec comparé aux méthodes traditionnelles de séchage. 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. Plusieurs chercheurs ont développé des modèles de simulation pour les systèmes à convection normale et à convection forcée.

A cet effet, un système d'équations régissant le fonctionnement du séchoir indirect et les différents coefficients d'échange thermique est établi. Le logiciel comsols multiphysics nous a permis de déterminer les performances thermiques du séchoir indirect et d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion, des résultats et en plus d'une conclusion générale. Le présent travail comporte trois chapitres :

Le premier chapitre, se focalise sur la revue de littérature notamment les généralités sur le séchage et les séchoirs.

Le deuxième chapitre est consacré au matériels utilisé et les méthodes notamment le principe de fonctionnement d'un séchoir solaire indirect ainsi que les différentes équations, gouvernant le fonctionnement du système et une simulation au moyen de comsols multiphysics.

Le troisième chapitre présente les différents résultats obtenus, l'influence de certains paramètres thermo- physiques sur le comportement du séchoir et son rendement, avec leur interprétation.

REVUE DE LITTERATURE

1.1 Introduction

Ce chapitre vise à poser les jalons nécessaires pour une bonne compréhension de ce travail. Il est articulé comme suit : Généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques, Différents moyens d'optimiser le rendement des systèmes photovoltaïques, généralités sur les générateurs thermoélectriques et l'état de l'art sur les systèmes PV-TEG.

1.2 Généralités sur leséchage

1.2.1 Définition

Le séchage est une opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation tout ou partie d'un solvant (l'eau) contenu à l'intérieur d'un produit humide (solide ou liquide). Le produit final obtenu étant toujours un solide. Il s'agit d'une technique faisant intervenir des transferts simultanés de chaleur et de masse entre le produit et l'air environnant [4]. En pratique, de nombreux produits alimentaires et biologiques subissent des opérations de séchage lors de leur transformation et/ou de leur conservation. C'est souvent une opération de formulation plus que de fabrication qui intervient avant l'étape de commercialisation et qui contrôle en grande partie la qualité de produit.

1.2.2 Historique

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, viandes et poissons séchés, noix, tabac, etc...), ou pour l'élaboration des matériaux de construction (briques de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois...), ou pour les textiles (lavage, teinture...) et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien

apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [5]. En 1999, Boulemtafes et Semmar [6], ont présentés un travail sur la conception et la réalisation d'un séchoir indirect à vocation agricole destiné au séchage des fruits et légumes. Le séchoir est constitué D'une boîte parallélépipédique, elle est alimentée en air chaud par un capteur solaire plan à air. La partie expérimentale consistera à étudier les caractéristiques de l'air de séchage lorsqu'il arrive dans la boîte de séchage, c'est-à-dire, sa température, son degré d'humidité, sa vitesse et son débit ainsi que leurs évolutions au cours d'une journée caractéristique. Enfin la mise en équation des phénomènes de transfert de chaleur et de masse ayant lieu pendant le séchage, permet de comparer entre théorie.

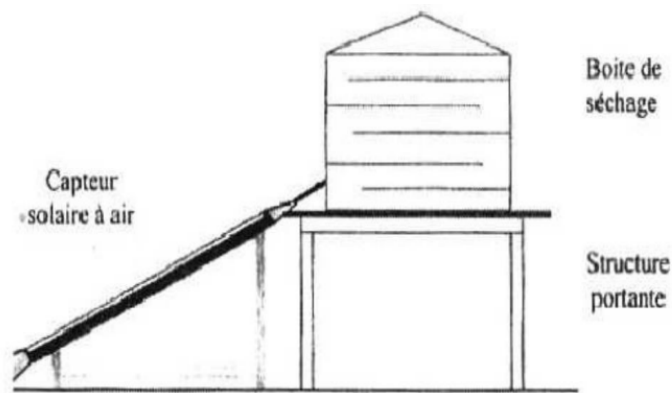


FIGURE 1.1 – Schéma descriptif du dispositif utilisé Boulemtafes and Semmar 1999 [6]

En 2002, Dilip R, Sawhney et al. [7] ont utilisés un séchoir solaire indirect, fonctionnant à convection naturelle, leur séchoir est composé d'un capteur solaire et d'une chambre de séchage. Les résultats obtenus par ce séchoir sont encourageants, dont la température à la sortie varie entre 50 °C et 55 °C. Durant la période d'expérimentation qui s'étale de Mars à Mai, Ils ont observé que le séchage des raisins par ce système prend 04 jours, alors que le séchage traditionnel nécessite une durée allant de 07 à 15 jours.

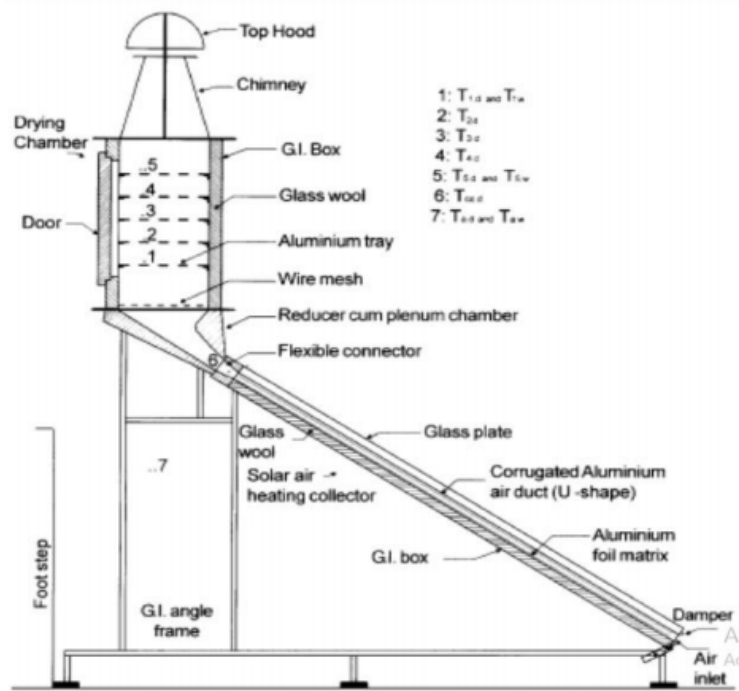


FIGURE 1.2 – Schéma descriptif du séchoir utilisé dans la référence [7]

En 2004, une étude expérimentale de Dilip jain et al [8] présente un modèle analytique en régime transitoire avec stockage thermique pour le séchage du riz. L'étude se compose d'un capteur solaire plan à air incliné avec double vitrage et un réflecteur sur l'armoire de séchoir, les graviers de granite, placés sous la plaque absorbante, sont utilisés et considérés comme matière de stockage (Figure 3). Cette étude paramétrique a été effectuée sous les conditions climatiques de Delhi pour une journée du mois d'Octobre, et cela dans le but d'étudier l'influence de l'angle d'inclinaison, la longueur et la largeur de collecteur et aussi le débit massique sur la température du grain. Ils ont observé que la teneur en humidité du lit diminue avec le temps de la journée. Ils ont conclu aussi que le taux de séchage et l'humidité de l'air augmentent avec l'augmentation de la profondeur du lit de séchage.

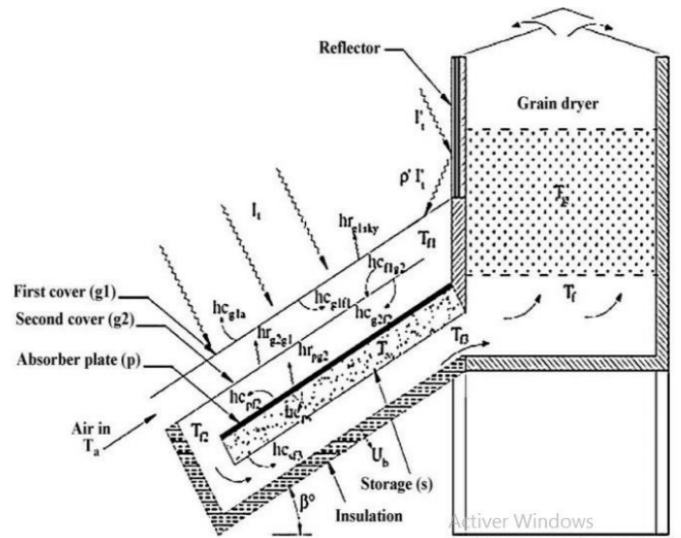


FIGURE 1.3 – Séchoir solaire avec capteur solaire multi-passe incliné et un lit profond [8]

En 2005, Dilip Jain [9] a présenté une analyse périodique du séchage d’agriculture multi plateaux muni d’un capteur solaire (figure 4), sous les mêmes conditions climatiques de l’étude précédente. Il a observé que la teneur en humidité de la récolte diminue avec le temps de séchage de la journée. Il a révélé également que l’efficacité thermique de séchage augmente avec l’augmentation de masse de l’agricole.

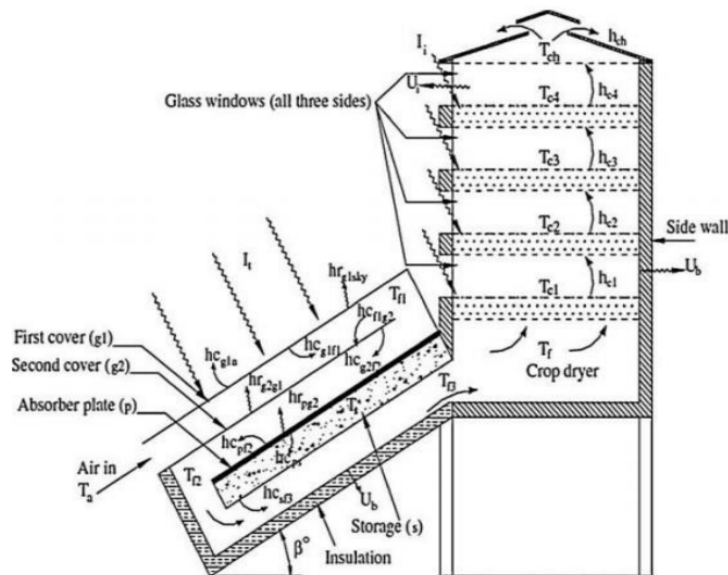


FIGURE 1.4 – Séchoir solaire indirect multi-plateaux avec capteur solaire plan [9]

En 2005 l’étude de Benkhelfellah, El mokretar [6] est consacré à la comparaison entre le séchage des produits agro-alimentaires dans un séchoir direct et indirect. Dans leur travail, ils ont entrepris l’étude du bilan d’énergie des modèles expérimentaux des séchoirs solaires

de type direct et indirect, afin d'en déterminer la cinétique de séchage de produits agroalimentaires, compte tenu des conditions ambiantes du site donné. La figure 5 montre les deux types de séchoirs utilisés dans cette étude.



FIGURE 1.5 – Deux types de séchoirs utilisés dans l'étude de (Benkhelfellah, El mokretar et al. 2005) [6]

En 2007, Dilip. Jain [10], a développé un nouveau type de séchoir à convection naturelle avec une unité de stockage thermique pour assurer l'air chaud pendant la période non ensoleillée. Ce type se compose d'un réchauffeur d'air plat, relié avec réflecteur de forme polygonale pour refléter le maximum du rayonnement solaire incident (Figure 6). Ce système est destiné pour le séchage de l'oignon, avec une capacité de 90 kg.

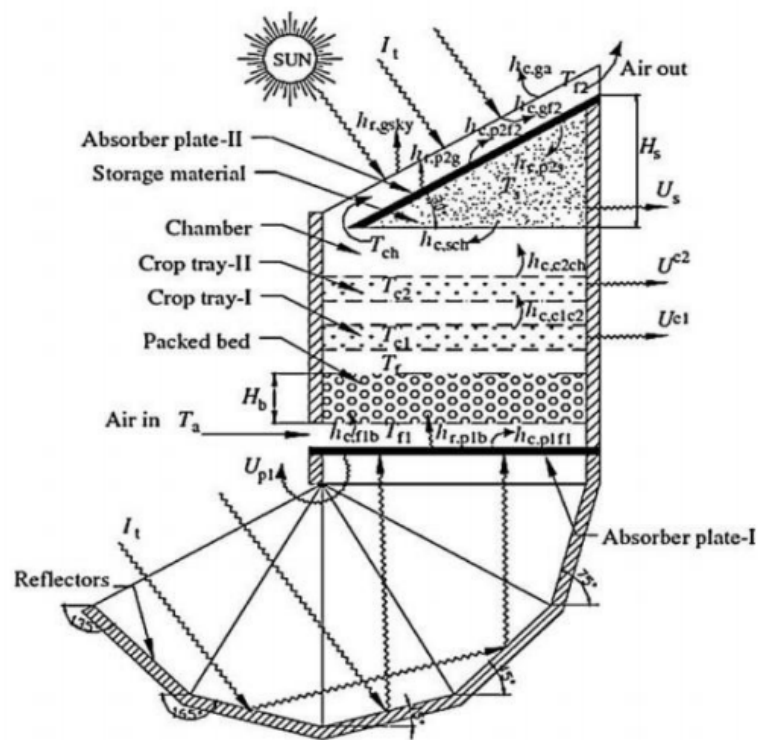


FIGURE 1.6 – Schéma descriptif d'un séchoir solaire avec stockage thermique [10]

1.2.3 But du séchage

Le but du séchage consiste à diminuer la teneur en eau des produits agroalimentaires jusqu'à une valeur résiduelle inhibant le développement de tous les micro-organismes. Cette valeur permet de stocker les produits dans les conditions ambiantes [11].

1.2.4 Principe de séchage [12]

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

Le transfert de chaleur pour fournir la chaleur latente de vaporisation nécessaire ;

Le transfert de masse ou mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide pour l'extraire des produits. Un produit humide peut se représenter schématiquement comme sur la Figure I.5. Le solide a un film d'eau adhérant à sa surface externe par des forces superficielles

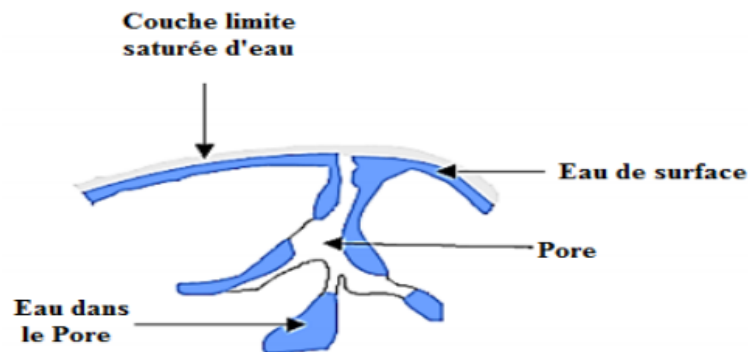


FIGURE 1.7 – Présentation schématique d'un produit humide [12].

1.2.5 Domaines d'utilisations

Si le séchage consomme autant d'énergie c'est qu'il intervient dans de nombreuses industries. Les produits concernés nous touchent souvent de près dans la vie de tous les jours.

Le choix d'une opération de séchage peut être effectué pour diverses raisons [13] :

- La viande fumée : saucisson, jambon... ;
- Les fromages : séchage dans une ambiance contrôlée ;
- Le sucre cristallisé est obtenu par évaporation ; entière du procédé.

- Les légumes (pois, poivron. . .) et fruits secs (pruneaux, raisins, abricots, figes. . .);
- Les jus de fruits sont préparés à partir d'un concentré obtenu par vaporisation ;
- Café, cacao, riz et autres céréales, feuilles de thé, épice, certains biscuits apéritifs.

Industrie agroalimentaire

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage, et ce dernier peut être une étape nécessaire à la production du produit ou un rôle dans la conservation de l'aliment [14]. On peut citer par exemple :

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

Industrie papetière

Le papier est obtenu par séchage de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés. [15]

Industrie du bois

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

Bouchons et lièges

Afin de garantir le meilleur vieillissement des vins, une attention toute particulière est portée à la qualité des bouchons de liège. Au cours de leur fabrication l'opération de séchage doit être parfaitement maîtrisée, au risque de donner un goût de moisi au vin.

L'industrie pharmaceutique

Comme la fabrication de la levure en poudre, des antibiotiques et le séchage de principes actifs sous forme de poudre avant pastillage [16].

1.2.6 Modes de séchage

Le mode de séchage se base sur deux types de transfert :

- Le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer ;

- Le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface, puis le passage en phase gazeuse. La vitesse de séchage est directement liée à la vitesse de ces deux phénomènes.

séchage mécanique

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation,). Certains processus de pré concentration et de pré séchage peuvent se réaliser sans transfert thermique mais par simple transfert de quantité de mouvement. L'élimination d'eau par voie mécanique se caractérise essentiellement par trois points l'opposant nettement aux techniques faisant appel aux transferts de chaleur [17].

séchage chimique

C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants (osmotique) (chlorure de calcium...) pour extraire l'eau [17].

séchage Thermique

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une « activation » de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur. Les deux transferts se déroulent en une phase interne et une phase externe [18] :

- Transfert de chaleur externe, de la source de chaleur vers la surface de produit.
- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le cœur de produit.
- Transfert de masse interne, du cœur vers la surface de produit.
- Transfert de masse externe de la surface de produit vers le milieu extérieur.

Le séchage thermique se divise lui-même en deux types :

Le séchage par ébullition : Le séchage par ébullition a lieu lorsque le flux thermique transféré au produit est très intense à cause d'un écart de température très élevé entre la source chaude et le produit (par conduction sur une surface chaude, séchoirs cylindres...etc.), dans toutes ces conditions la température du produit atteint un niveau tel que la pression de vapeur d'eau de ce produit est égale ou dépasse la pression totale ambiante [19].

Séchage par entraînement : Lorsqu'un produit humide est placé dans un courant de gaz (air le plus souvent) suffisamment chaud et sec, il s'établit un écart de température et de pression partielle tel que : Le gaz apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à la vaporisation et l'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau. La vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit dans le milieu ambiant et elle est ensuite entraînée par le gaz [19].

1.2.7 Différents modes de séchage

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

Séchage par conduction [20]

Dans ce mode de séchage, L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée.

Séchage par convection [21]

En séchage industriel, il s'agit probablement du mode de séchage le plus courant. 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 fibres ou de plaques, pour un séchage par convection, les échanges de chaleur et de masse entre le produit à sécher et l'air de séchage sont déterminés par les coefficients de transfert à la surface, qui dépendent des caractéristiques de l'air La convection est un mode de transfert rapide.

- Si le mouvement de fluide est renforcé par un travail mécanique « artificiel » (ventilation, agitation, pompage d'un fluide), on parle de « convection forcée ».
- Si au contraire, le mouvement du fluide, n'est dû qu'à des courants thermiques ou des mouvements ascensionnels d'ébullition, la convection est dite « naturelle ».

Séchage par rayonnement [21]

Ce mode est destiné aux produits en plaque (carton, viande), ou en fibre (tissu, papier), mais aussi aux produits granulaires de faibles épaisseurs (cigarettes). L'énergie est apportée aux produits à sécher par des ondes électromagnétiques (rayonnement), soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge.

Transfert de matière : Le transfert de masse joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base, telles que le séchage. Dans ces opérations physiques, la résistance au transfert de masse constitue le facteur limitant, quoique le transfert de chaleur et le flux du fluide soient impliqués dans le conditionnement et la conservation où le transfert d'humidité, vapeurs, gaz et composés aromatique, influent sur la qualité de l'aliment. Les difficultés d'application des théories de transfert de masse, dans les processus de transformation des aliments, résultent des structures physiques complexes et de la composition chimique des

denrées alimentaires qui varient pour une même denrée et change pendant la transformation. Il est à noter que la migration de l'eau (liquide ou vapeur) peut également s'effectuer par « filtration » à travers le produit poreux sous l'action d'une différence de pression entre l'intérieur et la surface.

Transfert d'eau : Le séchage peut être décrit comme un transfert d'eau couplé à un transfert de chaleur dans un matériau poreux non saturé. Dans les produits biologiques le transfert interne d'eau est souvent le phénomène limitant. La taille des pores et la distribution des rayons des pores dans le matériau influent sur le caractère hygroscopique du produit (plus les pores sont petits, plus le caractère hygroscopique est marqué). La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique de source extérieure au produit à sécher. Simultanément se produit la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau. Les difficultés sont plus complexes dans les aliments solides plus que dans les liquides.

Séchage solaire [21]

Il s'agit simplement de chauffer le produit par le rayonnement solaire direct (séchage direct) ou par l'intermédiaire d'un capteur solaire qui sert à capter et/ou concentrer le rayonnement solaire afin d'augmenter la température de l'air (séchage indirect). Ce mode de séchage est plus utilisé dans le domaine agro-alimentaire.

1.2.8 Cinétique de séchage

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (température, hygrométrie, vitesse de l'air asséchant). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps. Tous les travaux de séchage montrent que les courbes de la vitesse de séchage en fonction du temps se distinguent suivant la nature du produit Figure I.9. Mais d'une manière générale, on remarque que l'allure de séchage décompose en trois périodes principales [23] :

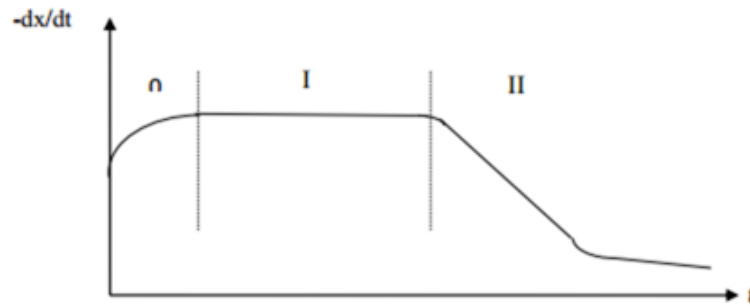


FIGURE 1.8 – courbe caractéristique de la période de séchage [24]

phase 0 : période transitoire Période de mise en température : Dans cette période, L'humidité du produit varie mais pas sensiblement et leur température varie (croît ou décroît) jusqu'à la température humide [23].

phase I : Période à vitesse de séchage constante. Dans cette période, la vitesse de séchage reste à peu près constante pour la plupart des produits. L'humidité se déplace vers la surface à l'état liquide principalement sous l'effet de la température de bulbe humide ; l'activité de l'eau à la surface du produit.

phase II : Période à vitesse de séchage décroissante. Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit. Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage. Le ralentissement de la vitesse de séchage est dû aux contraintes de la migration de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface.

1.2.9 Caractéristiques de l'air de séchage

Humidité

Humidité absolue : On appelle humidité absolue ou spécifique, ou teneur en humidité, ou plus simplement humidité d'un gaz, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par H_a est donnée par la relation suivante [25] :

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad (1.1)$$

où H_a Humidité absolue, M_e la masse de l'eau et M_a la masse de l'air sèche.

Humidité relative La vapeur d'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur si $P_S(T) \leq P_V$, on définit alors l'humidité relative ou degré hygrométrique H_r de l'air par la relation [26] :

$$H_r = \frac{P_V}{P_S(T)} \quad (1.2)$$

où H_r Humidité relative, P_v la pression partielle de la vapeur dans le mélange (Pa) et $P_s(T)$ la pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température (Pa).

Température

Température sèche : On nomme température sèche d'un gaz la température indiquée par une sonde de température placée dans le courant gazeux. Il s'agit de la température d'un gaz au sens Courant [27].

Température humide du gaz : On nomme température humide (ou température de bulbe humide) la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans le courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. Il faut retenir que la température humide est la température prise par un solide humide durant la phase à vitesse constante d'un séchage par entraînement [27]

Vitesse : On appelle vitesse de séchage la masse de liquide évaporée pendant l'unité de temps travers une surface unitaire d'évaporation. Cette vitesse est donnée par [28] :

$$\frac{q_v}{A} = -\frac{m_s}{A} \frac{dH}{d\tau} \quad (1.3)$$

où

- * q_v flux massique de vapeur(kg/s),
- * m_s masse du solide sec(kg),
- * A surface à travers laquelle se produit l'évaporation(m²),
- * $\frac{dH}{d\tau}$ variation de l'humidité du solide avec le temps.

La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont à savoir : La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit; la température, l'humidité et la vitesse du gaz sécheur; les conditions de mise en contact des deux phases ainsi que du mode de transfert de la chaleur.

1.2.10 Les séchoirs solaires

Le séchage solaire est souvent différencié du séchage à l'air libre par l'utilisation d'équipements (cabinet de séchage, capteur solaire ...) pour capter le rayonnement solaire afin d'exploiter l'énergie reçu pour le séchage.

Classification des types de séchoirs solaires

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de fonctionnement en plusieurs catégories présentées dans la figure 3

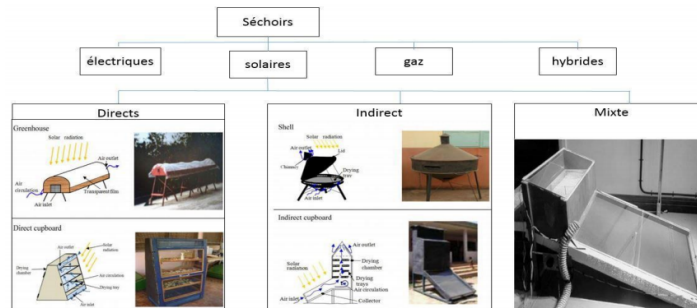


FIGURE 1.9 – classification des types de séchoirs solaires [29]

Types de séchoirs solaires

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories [30] :

Les séchoirs solaires directs : Dans ce type de séchoirs, les rayons solaires frappent directement les produits. Et d’après la figure 4 le séchoir solaire direct se compose d’une seule pièce qui fait office à la fois d’une chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d’absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d’autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles). Néanmoins l’interaction directe « rayonnement solaire – produit » engendre la dégradation de la qualité du produit et la destruction des nutriments [31]. Leurs avantages est qu’ils ont des Grandes possibilités de conception, et n’ont pas besoin de main-d’œuvre qualifié ; pour ce qui est des inconvénients, ils ont une Faible circulation de l’air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure, Fragilité des matières en polyéthylène qu’il faut changer régulièrement, dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, décoloration [32] et Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l’exposition au soleil à la destruction des nutriments [33].

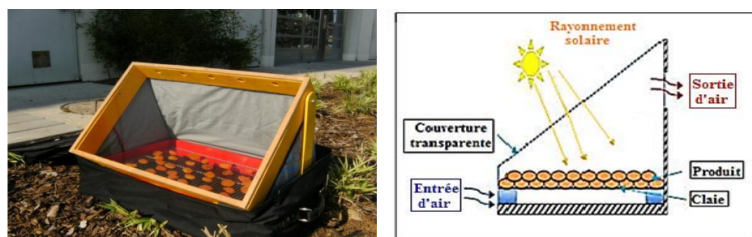


FIGURE 1.10 – Séchoirs solaires directs simples et principe d'un séchoir solaire direct [31]

Les séchoirs solaires indirects : Dans les séchoirs solaires indirects, les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont même mis à l'abri de la lumière entraînant une meilleure préservation des qualités nutritionnelles de l'aliment. Les séchoirs indirects se composent essentiellement de deux parties : un capteur solaire et une chambre de séchage figure 5. Le capteur solaire est généralement un module à part qui se fixe sur la chambre de séchage pendant l'exposition au soleil et dont l'inclinaison a pour but de maximiser le captage de l'énergie solaire. Il est constitué d'une surface vitrée située au-dessus et d'une surface absorbante, généralement peinte en noir. L'air est d'abord chauffé dans le capteur solaire, puis conduit dans la chambre de séchage où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours de l'air de séchage. Les séchoirs solaires indirects présentent les avantages que le produit n'est pas exposé directement au soleil, Possibilité de construire ce type des séchoirs localement, avec un coût réduit [35], leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles [35], Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C). Pour ce qui est des inconvénients, rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir, fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

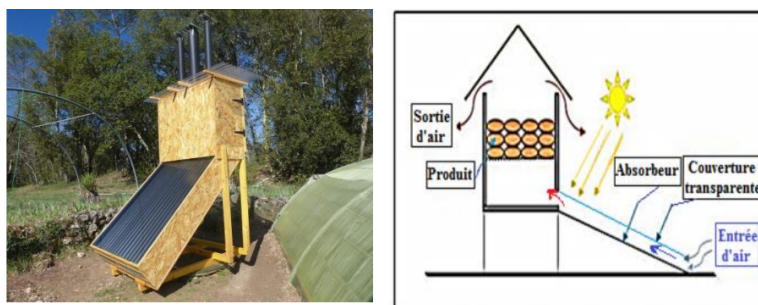


FIGURE 1.11 – Séchoirs solaires indirects et principe d'un séchoir solaire indirect [34]

les séchoirs mixtes : Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ces séchoirs, la chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée

du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air préchauffé dans des capteurs [37].

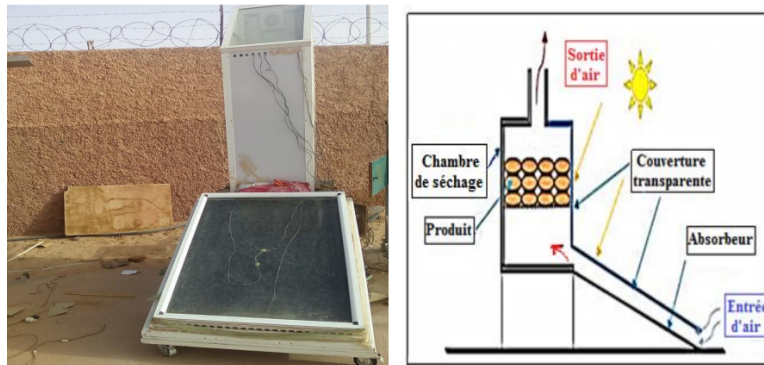


FIGURE 1.12 – Séchoirs solaires mixte et principe d'un séchoir solaire mixte [37]

Les séchoirs hybrides : Ces séchoirs utilisent une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation. L'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir [37] : Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois ; dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet tout simplement de préchauffer l'air. Les avantages de ce type de séchoir est qu'il a un affranchissement par rapport aux conditions climatiques, une forte augmentation de la production par rapport aux autres types des séchoirs Solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin et présente un meilleur contrôle du séchage [38]. Pour ce qui est des inconvénients, Coût de production et d'investissement élevé, Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange, Personnel qualifié pour la maintenance.



FIGURE 1.13 – SSéchoir solaire hybride [37]

1.3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de connaître les applications de l'énergie solaire thermique de façon générale et de comprendre en particulier le principe de fonctionnement des séchoirs solaires, d'avoir une idée générale sur l'évolution des méthodes de séchage solaire à travers les études précédentes et les différents types des séchoirs solaires avec leurs avantages et leurs inconvénients

MATERIEL ET METHODES

2.1 Introduction

La simulation numérique nous offre la possibilité de concevoir un modèle, en intégrant toutes les caractéristiques, et de regarder le comportement du système modélisé C'est un procédé selon lequel on exécute un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler un phénomène physique, comme le profil de température à l'intérieur du séchoir solaire. Dans cette partie, un modèle mathématique et numérique a été développé. Le modèle numérique est développé via la méthode des éléments finis dans le but de simuler le comportement du séchoir solaire indirect à convection naturelle dans les conditions réelles. Celui-ci prend en compte le changement de température, la vitesse du fluide(vent) et la pression dans le séchoir. C'est donc le couplage de plusieurs phénomènes physiques donc la résolution sera faite par le logiciel COMSOL Multiphysics.

2.2 Rappel sur les différents modes de transfert thermique

Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid. On distingue trois modes de transferts thermiques :

2.2.1 Transfert thermique par conduction

Le processus de transfert de chaleur par conduction s'appuie sur un milieu matériel sans mouvement de matière et est dû à des phénomènes physiques microscopiques (agitation des atomes ou des molécules, flux d'électrons libres etc). Il peut être vu comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques vers les particules les moins énergétiques, dû aux collisions entre les particules . La théorie de la conduction repose sur la loi de Fourier avec pour forme générale :

$$\vec{\phi} = -\lambda \vec{\nabla} T \text{ en } \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (2.1)$$

Le signe ”-” intervenant dans cette loi traduit le fait que le flux de chaleur circule des zones chaudes vers les zones froides (dans le sens opposé au gradient de température). Le coefficient de proportionnalité λ est la conductivité thermique, en W/m/K. La conductivité thermique dépend de la nature du corps considéré et dépend généralement de la température. Elle traduit la capacité d’un matériau à transporter la chaleur par conduction.

2.2.2 Transfert thermique par convection

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton qui stipule que la densité de flux de chaleur échangé entre une paroi solide et un fluide en écoulement est proportionnelle à l’écart de température qui lui a donné naissance du point de vue du solide (flux entrant dans le fluide ou sortant du solide)

$$\phi = hs(T_p - T_\infty) \quad (2.2)$$

où h est une grandeur positive appelée coefficient d’échange convectif en $\frac{W}{m^2.K}$. Ce coefficient dépend de nombreux paramètres (fluide, type d’écoulement, état de surface,...) et est donc extrêmement difficile à quantifier précisément.

2.2.3 Transfert thermique par rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps à des températures différentes séparés par du vide ou un milieu semi-transparent se produit par l’intermédiaire d’ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Stephan-Boltzmann (1884).

$$\phi = \varepsilon\sigma(T_p^4 - T_c^4) \quad (2.3)$$

avec ε l’émissivité du corps ($0 < \varepsilon < 1$) et la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,65 * 10^{-8} \frac{W}{m^2.K^4}$)

2.3 Description et dimension physique du modèle de séchage utilisé

Le système étudié présenté sur la figure 2.1 est un séchoir solaire indirect à convection naturelle(SSICN), constitué des éléments suivants :

Une unité de production d’air chaud : Ce capteur est constitué d’un caisson en bois, et couvert de haut par un verre transparent laissant passer le rayonnement solaire absorbé par la plaque noire. La performance du capteur solaire varie considérablement au cours d’une

journée.

Une chambre de séchage : Construite en bois, Cette chambre de séchage est munie d'une ouverture en haut permettant l'évacuation de l'air humide.

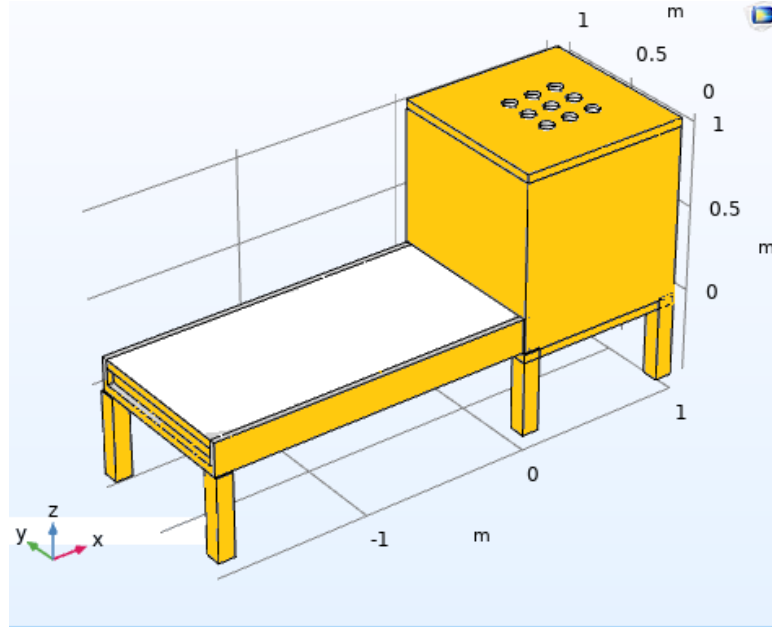


FIGURE 2.1 – séchoir solaire utilisé

Les dimensions des différentes pièces constituant le séchoir sont représentées dans le tableau suivant :

2.4 Principe de fonctionnement du système de séchage

L'air frais capté de l'extérieur circule dans le capteur solaire plan par convection naturelle, il est chauffé avant d'arriver à l'entrée de la chambre de séchage, puis il continue son chemin à travers la claie. Enfin l'air asséchant est évacué vers l'extérieur à travers la cheminée [39].

2.5 Modélisation mathématiques

Le modèle mathématique qui représente les différents phénomènes dans la chambre de séchage et le capteur solaire, a été établi en considérant les bilans énergétiques.

2.5.1 Bilan thermique au niveau du capteur solaire

Le bilan thermique s'écrivant simplement pendant un intervalle de temps dt sous la forme suivante :

$$E_{sorties} - E_{entrées} + E_{stockées} = 0 \quad (2.4)$$

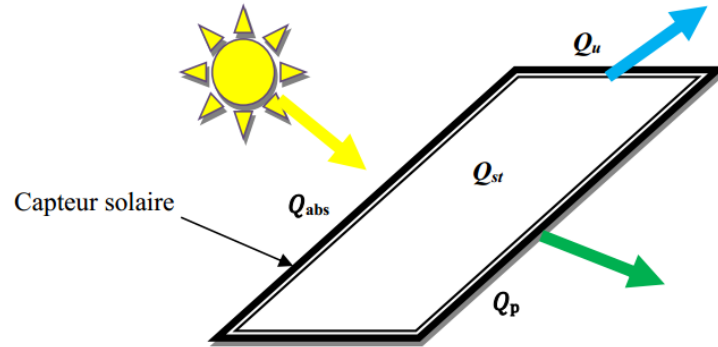


FIGURE 2.2 – Schéma représentatif du bilan thermique du capteur solaire [42]

On peut exprimer, de façon générale, le bilan thermique d'un capteur solaire par l'équation suivante rapportée à l'unité de surface [42] :

$$Q_u + Q_p - Q_{abs} + Q_{st} = 0 \quad (2.5)$$

$Q_{st} = 0$ car dans le cas du régime thermique permanent et pour les capteurs à air, la quantité d'énergie stockée dans les différentes parties de capteur est négligeable, ce qui conduit à :

$$Q_u + Q_p - Q_{abs} = 0 \quad (2.6)$$

Avec * Q_{abs} flux solaire absorbé(W);

* Q_u flux utile transmis au fluide caloporteur(W);

* Q_p flux perdu vers le milieu extérieur(W);

* Q_{st} flux stocké dans le capteur(W).

flux stocké

Le flux stocké ou l'accroissement d'énergie dans le capteur s'écrit :

$$Q_{st} = M_f C_f \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

Avec

* M_f Masse en fluide du capteur(kg);

- * C_f chaleur latente ;
- * T Température moyenne du capteur(K) ;
- * t Temps(S).

flux absorbé

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$Q_{abs} = \tau_{cs}\alpha_{ps}GS \quad (2.8)$$

Avec

- * τ_{cs} Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire ;
- * α_{ps} Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire ;
- * G Flux solaire absorbé par la surface exposée au soleil(W/m²) ;
- * S Surface de la paroi absorbante (m²).

flux utile

Dans le cas où le fluide caloporteur ne subit pas de changement d'état, le flux utile s'écrit :

$$Q_u = mC_p(T_{fs} - T_{fe}) \quad (2.9)$$

Avec

- * T_{fs} Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur(K) ;
- * T_{fe} Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur(K) ;
- * m Débit massique (kg/s).
- * C_p Chaleur massique de l'air (J/Kg. K).

flux perdu

$$Q_p = h_pS(T_{pm} - T_{am}) \quad (2.10)$$

Avec

- * h_p Coefficient global de pertes du capteur ;
- * T_{pm} Température moyenne de la paroi absorbante(K) ;
- * S Surface de la paroi absorbante(m²) ;
- * T_{am} Température ambiante(K).

Dans le cas d'un capteur plan, la température moyenne T_{pm} peut en première approximation être calculée par :

$$T_{pm} = \frac{3T_{fs} + T_{fe}}{4} + \nabla T \quad (2.11)$$

Où ∇T est l'écart de température.

rendement d'un capteur solaire

Les rendements d'un capteur sont définis par rapport au flux solaire incident de la manière suivante [43] :

Le rendement global :

$$\eta = \frac{Q_u}{G} \quad (2.12)$$

Le rendement interne :

$$\eta_i = \frac{Q_u}{Q_{st}} \quad (2.13)$$

Le rendement radiatif :

$$\eta_o = \frac{Q_{st}}{G} \quad (2.14)$$

On définit également des rendements moyens sur une période donnée (jour, mois, année). Pour ce faire, on intègre la relation du bilan (6) sur une période choisie [44] :

$$\int_0^t Q_{abs} = \int_0^t Q_u + \int_0^t Q_p \quad (2.15)$$

On définit alors les rendements global , interne i et radiatif o moyens du capteur sur la période considérée respectivement par :

$$\eta = \frac{Q_u}{\int_0^t GS dt} \quad (2.16)$$

$$\eta_i = \frac{Q_u}{Q_{st}} \quad (2.17)$$

$$\eta_o = \frac{Q_{st}}{\int_0^t GS dt} \quad (2.18)$$

Ces rendements sont à considérer lors d'un calcul de dimensionnement d'un capteur solaire. Il ne faut pas les confondre avec les rendements instantanés qui sont toujours plus élevés (un rendement journalier moyen tient compte du refroidissement nocturne par exemple)

[44].

2.5.2 Bilan thermique au niveau de la chambre de séchage

Le bilan énergétique à l'intérieur du séchoir peut s'écrire comme suit [45] :

$$Q_{\text{int}} = Q_{a-pi} + Q_{pe-pi} \quad (2.19)$$

Avec Q_{int} , Q_{a-pi} , Q_{pe-pi} qui sont respectivement, Taux d'accumulation de l'énergie thermique dans la paroi interne(W); Taux de transfert de chaleur par convection entre la paroi interne et l'air asséchant(W); Taux de transfert de chaleur entre la paroi interne et la paroi externe(W).

Le taux d'accumulation de l'énergie thermique dans la paroi interne

Il est écrit comme suit :

$$Q_{\text{int}} = m_{pi} C_{P_{pi}} \frac{dT_{pi}}{dt} \quad (2.20)$$

Avec Q_{int} , m_{pi} , $C_{P_{pi}}$, $\frac{dT_{pi}}{dt}$ qui sont respectivement Taux d'accumulation de l'énergie thermique dans la paroi interne; Masse de la paroi interne (kg); Capacité calorifique massique de paroi interne (J / kg. K); Température de la paroi interne (K).

Le taux de transfert de chaleur par convection entre la paroi interne et l'air asséchant

On le définit par :

$$Q_{a-pi} = h_{a-pi} S_p (T_a - T_{pi}) \quad (2.21)$$

Avec h_{a-pi} , S_p , T_a , $T_a - T_{pi}$ qui sont respectivement Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et la paroi interne (W / m². K); Surface des parois du séchoir (m²); Température ambiante (K); Température de la paroi interne (K).

Le taux de transfert de chaleur entre la paroi interne et la paroi externe

On le définit par :

$$Q_{pe-pi} = h_{pe-pi} S_p (T_{pe} - T_{pi}) \quad (2.22)$$

Avec h_{pe-pi} , S_p , T_{pe} , $T_{pe} - T_{pi}$ qui sont respectivement Coefficient d'échange thermique par convection entre la paroi externe et la paroi interne (W / m². K); Surface des parois du séchoir (m²); Température externe (K); Température de la paroi interne (K).

2.5.3 Le taux de transfert de chaleur entre la paroi interne et la paroi externe

Au niveau du capteur

Calcul du coefficient par conduction à travers la vitre [46]

$$h_{cv} = \frac{\lambda_v}{e_v}$$

$$h_{cv} = \frac{\lambda_v}{e_v} \quad (2.23)$$

Avec : h_{cv} , λ_v , e_v qui sont respectivement, Coefficient d'échange thermique par conduction à travers la vitre (W / m². K); Conductivité thermique de la vitre (W/m. K); Epaisseur de la vitre (m).

Calcul du coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant, ainsi l'isolant et l'air ambiant , [47], [24].

$$h_{vv} = 5.67 + 3.86v \quad (2.24)$$

Avec h_{vv} , v qui sont Coefficient d'échange thermique par convection à travers la vitre et l'air ambiant (W / m². K) et La vitesse du vent (m/s).

Calcul du coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le ciel [24]

$$h_{v-c} = \sigma \varepsilon_v (T_c + T_{ve})(T_c^2 + T_{ve}^2) \quad (2.25)$$

La température du ciel est donnée par :

$$T_c = 0.0552T_a^{1.5} \quad (2.26)$$

Au niveau de la chambre de séchage

Le coefficient par convection au sein de la chambre de séchage peut être obtenu si l'on connaît le nombre de Nusselt.

Le coefficient par convection entre la paroi interne du séchoir et l'air asséchant [24], [48].

$$h_{pi-ach} = \frac{Nu_{pi} \lambda_{air}}{D_H} \quad (2.27)$$

$$D_H = \frac{4S}{2(l_{arg} + prof)} \quad (2.28)$$

$$Nu_{pi} = 0.023 Re_{pi}^{0.8} Pr^{0.33} \quad (2.29)$$

$$Re_{pi} = \frac{UD_H\rho_{ah}}{\mu_{ah}} \quad (2.30)$$

$$Pr = \frac{\mu_{air}C_{p_{air}}}{\lambda_{air}} \quad (2.31)$$

Avec h_{pi-ach} , Nu_{pi} , D_H , Re_{pi} , U , ρ_{ah} , μ_{ah} , Pr , μ_{air} , $C_{p_{air}}$, λ_{air} sont respectivement coefficient de transfert de chaleur par convection entre la paroi interne et l'air asséchant (W/m². K); Nombre de Nusselt de la paroi interne; Diamètre hydraulique(m); Nombre de Reynolds de la paroi interne; Vitesse moyenne du fluide (m/s); masse volumique de l'air humide, Viscosité dynamique (kg/m. s), Nombre de Prandtl, Viscosité dynamique de l'air (kg/m. s), Capacité calorifique de l'air (J/kg. K), Conductivité thermique de l'air (W/m. K).

2.6 Modélisation numérique.

2.6.1 Equation physique

Le modèle physique modélisant la répartition de la chaleur, de la vitesse du fluide et de la pression dans le séchoir solaire est le couplage de deux physiques : thermique et fluide. L'équation de transfert de la chaleur couplée aux équations de Navier-Stokes modélise la transmission de la chaleur par convection dans le fluide ainsi que la variation de la vitesse du fluide et de la pression.

L'écoulement du fluide non isotherme est modélisé par les équations suivantes :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho (u \nabla) u = \nabla \left[-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3}\mu(\nabla u)I) \right] + \rho g \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (2.33)$$

Avec U , μ , P , g , ρ sont respectivement Vitesse d'écoulement(m/s); Viscosité dynamique (Pa. s); Pression (Pa); La gravité I d'ordre 3, la masse volumique de l'air .

Dans ce cas-ci, la masse volumique de l'air est donnée par la loi des gaz parfaits suivante :

$$pV = nRT \quad (2.34)$$

Où $\rho = \frac{MP}{RT}$; avec M , R , T respectivement Masse molaire (kg /mol), Constante des gaz parfaits (8.3145 J/K.mol), Température (K).

L'écoulement du fluide non isotherme est modélisé par les équations suivantes :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T + \nabla q = 0 \quad (2.35)$$

Où $q = -k\nabla T$, avec q , K , C_p respectivement Source de chaleur fournie par le capteur solaire, Conductivité thermique du capteur (W/m. K), : Capacité calorifique à pression constante (J/Kg. K).

2.6.2 Conditions aux limites

- La vitesse de l'air à l'entrée est égale à 0,6m/s ;
- La circulation d'air à l'intérieur de séchoir est supposé laminaire, suivant deux axes (2D) ;
- Le régime d'écoulement est temporel ;
- L'air est supposé incompressible ;
- Les propriétés thermo-physiques de l'air dépendent de la pression et de la température
- La température ambiante est la même autour du séchoir ;
- Un flux de chaleur convectif (rayonnement UV entrant dans le modèle) et appliqué sur la vitre extérieure par interpolation :
- Les autres surfaces extérieures sont isolées thermiquement ; comme nous présente la figure suivante :

2.7 Présentation du logiciel de simulation

COMSOL Multiphysics est un logiciel développé par la méthode des éléments finis et permettant de résoudre des systèmes d'équations différentielles. Ce logiciel de simulation numérique est capable de simuler quasiment tous les phénomènes physiques et de nombreuses applications (électriques, mécaniques ou chimiques). Le problème peut être résolu aussi bien en régime stationnaire qu'en régime temporel. Il est à noter que ce travail a été élaboré avec la version 5.6 de Comsol Multiphysics



FIGURE 2.3 – Lancement du logiciel.

Les étapes de résolution d'un problème physique dans COMSOL sont les suivantes :

* **Création d'un nouveau modèle** : On peut configurer un modèle guidé par l'assistant du modèle ou démarrer à partir d'un modèle vierge comme illustré sur la figure 2.5 qui représente la première fenêtre apparaissant après le lancement du logiciel COMSOL.

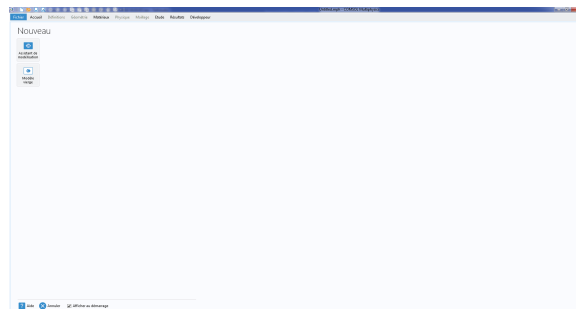


FIGURE 2.4 – Fenêtre de création d'un nouveau modèle.

Après la création du modèle, il faut choisir sa dimension d'espace, là le logiciel COMSOL propose des études en 3D, 2D, Axisymétrique 2D, 1D, Axisymétrique 1D ou 0D comme illustré sur la figure 2.6.

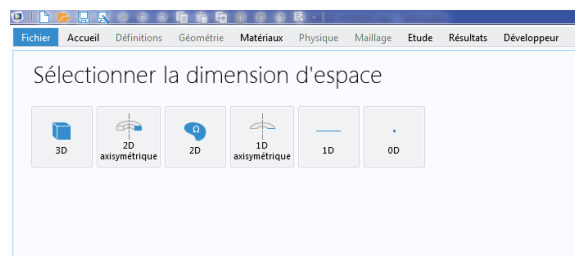


FIGURE 2.5 – Choix de la dimension de travail.

* **Choix de la Physique** : Dans cette étape, on choisit le type de champ physique du modèle (physique).

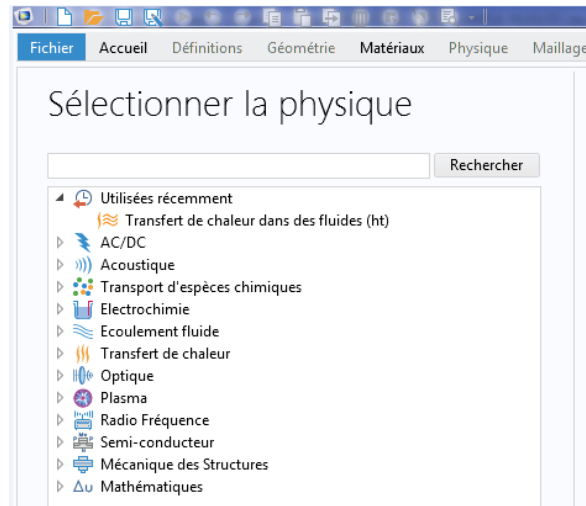


FIGURE 2.6 – Choix de la Physique.

* **Choix du régime d'étude** : Le choix de type d'étude est nécessaire car elle spécifie le solveur (ou l'ensemble de solveurs) qui sera utilisé dans le calcul. Deux choix se présentent pour l'étude prédéfinie à savoir, le régime stationnaire et temporel (figure 2.7). En effet, l'étude stationnaire est utilisée lorsque les variables de terrain ne changent pas avec le temps. Dans notre cas une étude stationnaire a été utilisée.

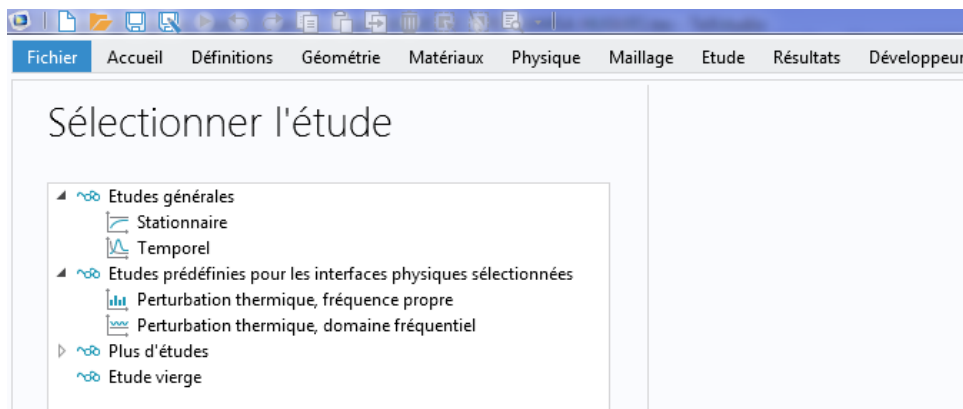


FIGURE 2.7 – Choix du régime d'étude.

* **Création de la géométrie** : Une simulation numérique du système à 2-D a été mise en œuvre en vue de prédire les performances de notre séchoir solaire en conditions réelles. Ici on dessine la géométrie de l'élément à simuler à travers des outils de la rubrique « GEOMETRIE » comme présente la figure17

FIGURE 2.8 – Création de la géométrie du modèle

* **Spécification des matériaux du modèle** : Ici on définit les matériaux utilisés dans

chaque domaine du modèle. Dans le cadre de notre travail la figure 2.9 ci dessous donne les matériaux utilisés.



FIGURE 2.9 – Spécification des matériaux adéquats au modèle.

* **Définition du type de champs physique** : Ici on définit les physiques qui vont être appliquées à notre modèle comme nous présente la figure 18. Dans un premier temps, nous avons implémenté le module Transfert de Chaleur dans les fluides au modèle comme condition physique générale qui définit la base la physique de transfert de chaleur dans l'objet simulé. Deuxièmement nous avons aussi ajouté le module écoulement laminaire responsable du déplacement du fluide (vent) dans le séchoir.

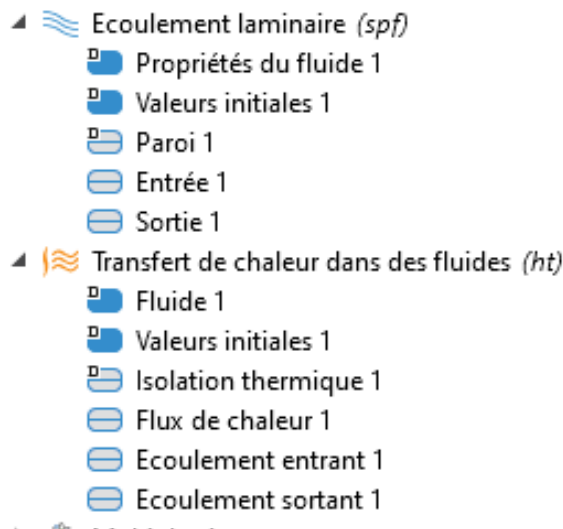


FIGURE 2.10 – Définition des champs physiques.

* **L'étape du maillage** : Cette étape nous permet de vérifier que nous avons correctement modélisé notre système. La figure 20 montre bien le séchoir solaire maillé et ce système comporte des éléments triangulaires. Le pas de temps du solveur temporel est choisi de façon progressive pour éviter le problème de convergence en début de simulation.

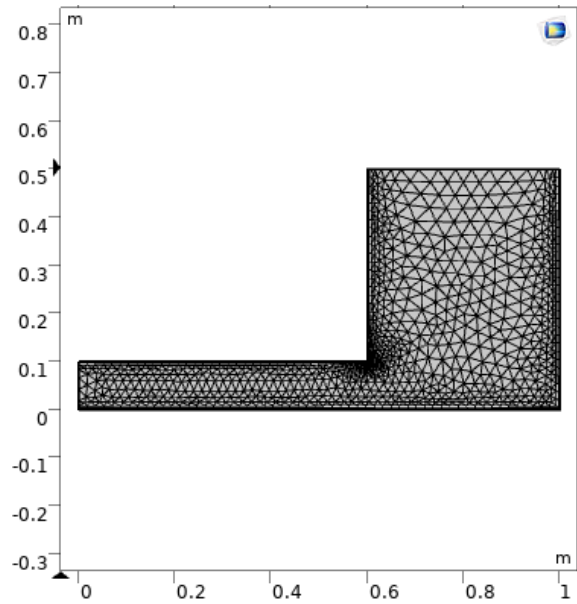


FIGURE 2.11 – Etape de maillage du séchoir solaire.

* **Affichage des résultats** : Cette dernière étape lance le programme de calcul des propriétés physiques recherchées. À partir de la rubrique « Résoudre » nous procédons à la résolution du problème, la figure ci-dessous représente, le résultat de cette simulation. Cet affichage constitue la dernière étape de notre simulation qui est aussi l’affichage des résultats de la simulation (Post-traitement)

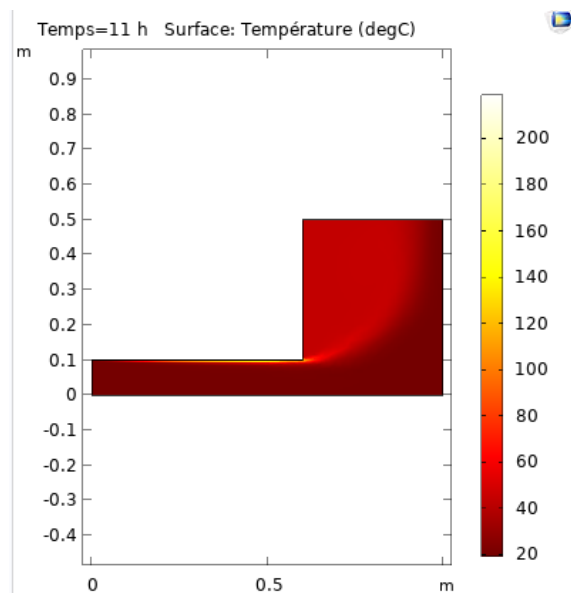


FIGURE 2.12 – Affichage du résultat.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre il était question pour nous de faire une modélisation mathématique suivi d'une modélisation physique et de présenter le logiciel consol, qui nous a permis de résoudre de façon numérique le modèle mathématique proposé. Ce dernier prend en compte la variation temporelle et spatiale des paramètres physiques tels que la température, la pression et la vitesse du fluide dans le séchoir. Dans la suite du travail nous présenterons l'ensemble de nos résultats qui seront simultanément discutés.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation numérique pour un modèle à deux dimensions, il est important de le tester et le valider afin de nous assurer de sa fiabilité. Il nous offre la possibilité de voir la répartition de la température, du champ de vitesse et de la pression dans le séchoir.

3.2 Paramètres utilisés pour la simulation

Le tableau 3.1 ci dessous nous donne les paramètres utilisés lors de la simulation.

TABLE 3.1 – Paramètres utilisés pour la simulation.

Paramètres	valeurs
Conductivité thermique λ	0,024 W/(m·K) K
Viscosité dynamique η_{air}	15
Vitesse du vent u	0,6 m/s
Irradiance solaire G	Int1(interpolation) w/m ²
Température ambiante T_{amb}	293,15 K
Capacité thermique à pression constante C_p	Cp(T) J/(kg.K)
Rapport des chaleurs spécifiques γ_{air}	1,4
Constante Stephan-Boltzmann σ	$5,67 \cdot 10^{-8} m^2 K^{-2}$
Perméabilité relative	1

3.3 Méthodologie :

Afin de mieux visualiser les résultats, nous avons décidé de prendre une multitude de lignes de coupes réparties à travers toute la géométrie pour voir de façon optimale l'évolution des paramètres étudiés à travers toute la surface de la géométrie. Les lignes de coupes sont décrites dans la figure 21 et le tableau :

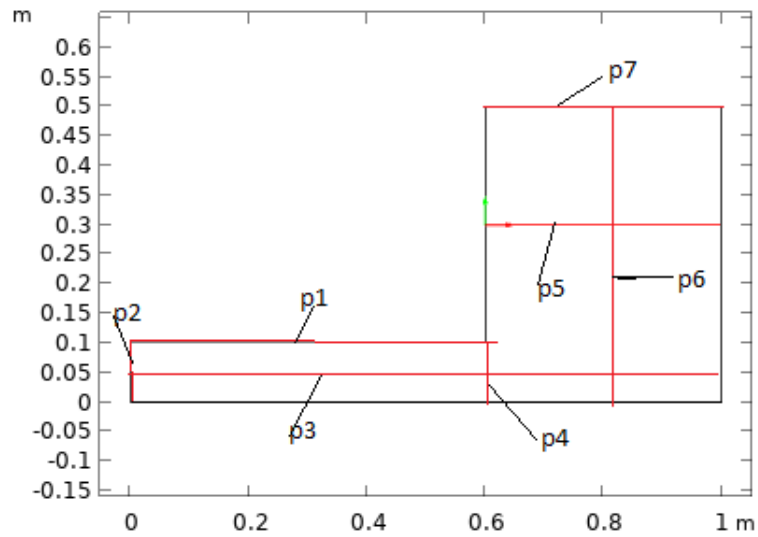


FIGURE 3.1 – Répartitions des lignes de coupes de références.

TABLE 3.2 – Dimensions physiques utilisées

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
X1(m)	0	0	0	0,6	0,6	0,8	0,6
Y1(m)	0.1	0.1	0.05	0.1	0.3	0.5	0.5
X2(m)	0.6	0	1	0.6	1	0.8	1
Y2(m)	0.1	0	0.05	0	0.3	0.04	0.5

3.4 Présentation des différents profils de températures obtenues aux différentes heures :

Nous ferons une présentation pour chacune des parties de notre séchoir (c'est à dire l'entrée du capteur solaire, à l'entrée de la chambre de séchage, dans la chambre de séchage et à la sortie de la chambre de séchage.) ceci allant de 9h du matin à 16h de l'après midi

3.4.1 Graphes de la répartition de la température à l'entrée du capteur

Les figures (23) et (24) présentent l'évolution du profil de température en fonction de la longueur de l'arc ceci dans les plages horaires allant de 9h à 12h puis de 13h à 16h, ceci à l'entrée du capteur.

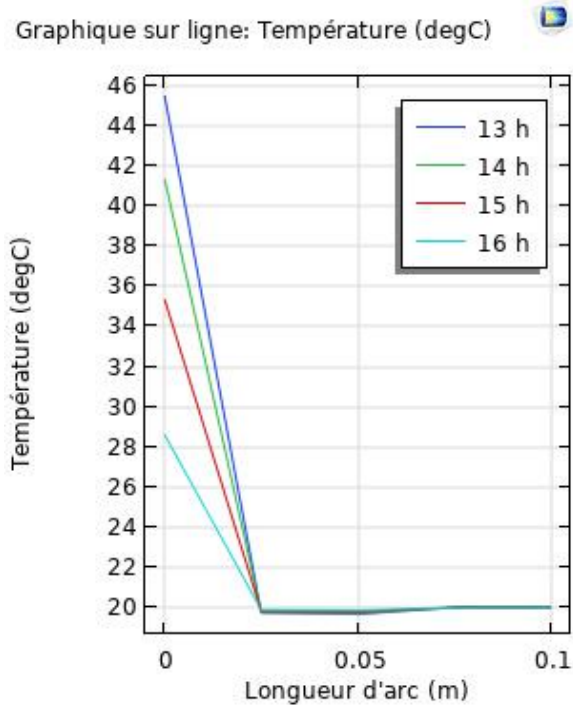


FIGURE 3.2 – profil de température de 9h à 12h

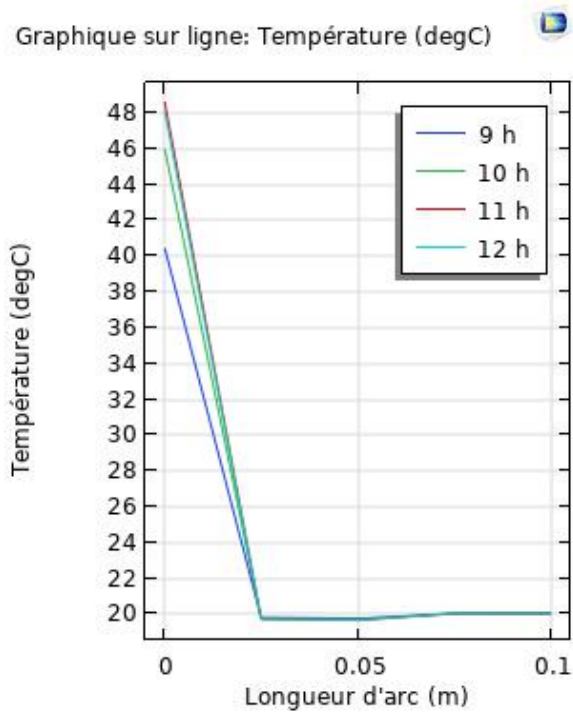


FIGURE 3.3 – profil de température de 13h à 16h.

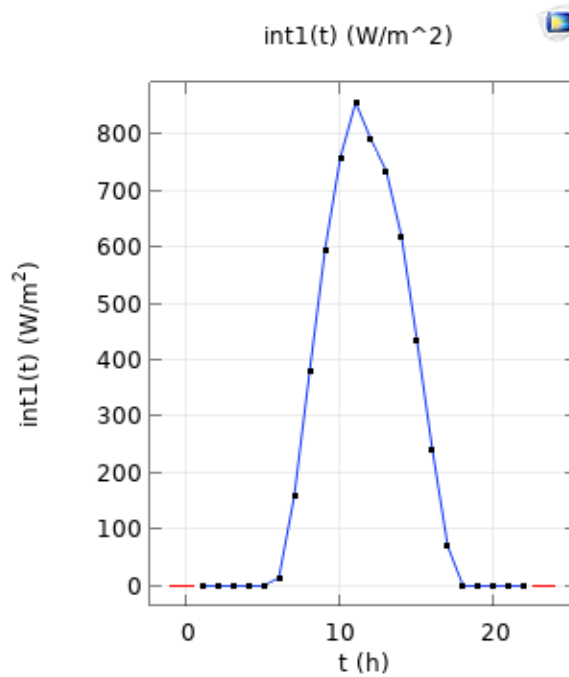


FIGURE 3.4 – profil du rayonnement solaire sur 24h

Les courbes correspondantes aux heures de 9h à 12h (a) de la (figure) convergent vers un point de rencontre de 0.04m et ont le même comportement après ce point, les valeurs maximales des températures avant le point de rencontre correspondent à 40,5°C;45,9°C;49,5°C et 49°C respectivement pour 9h,10h,11h et 12h l'on remarque que les courbes correspondants aux heures de 11h à 12h ont le même comportement mais ne diffèrent pas d'une grande valeur de manière quantitative cela est dû au fait que le rayonnement solaire de 11h qui est de 857,38W/m² n'est pas loin de celle de 12h qui est 800W/m² (figure) d'où la similitude observé. Nous observons que 11h et 12h sont les heures optimales du séchage. Les courbes caractérisant le comportement du gradient de température à l'entrée du capteur entre 13h et 16h (b) de la (figure) nous montrent que les courbes ont la même allure jusqu'au point de rencontre où la longueur d'arc vaut 0.04m et ont le même comportement après ce point, les valeurs maximales des températures valent 28°C; 35,7°C; 41,8°C et 45,8°C respectivement pour 16h;15h;14h et 13h. l'on remarque que la courbe correspondant à 13h est celle ayant la valeur maximale de la température la plus élevée ceci s'explique par la valeur importante du rayonnement solaire qui est de 735,8W/m² comme nous présente la(figure) cette heure est donc optimale pour le séchage dans cette seconde tranche horaire.

3.4.2 Graphes de la répartition de la température à l'entrée de la chambre de séchage

Les figures (...) et (...) présentent l'évolution du profil de température en fonction de la longueur de l'arc ceci dans les plages horaires allant de 9h à 12h puis de 13h à 16h, ceci à

l'entrée de la chambre de séchage

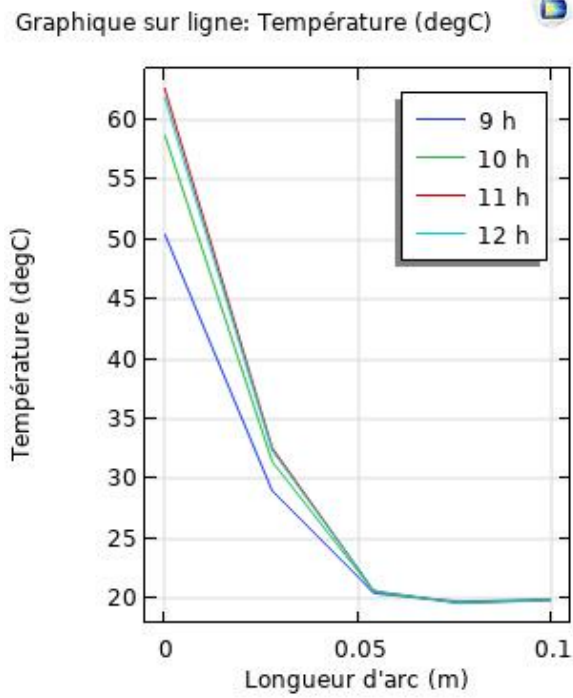


FIGURE 3.5 – Profil de température de 9h à 12h

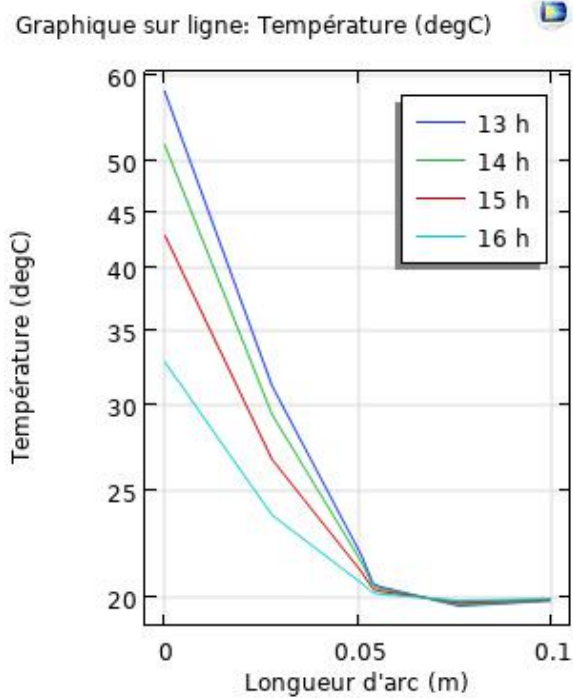


FIGURE 3.6 – profil de température de 13h à 16h.

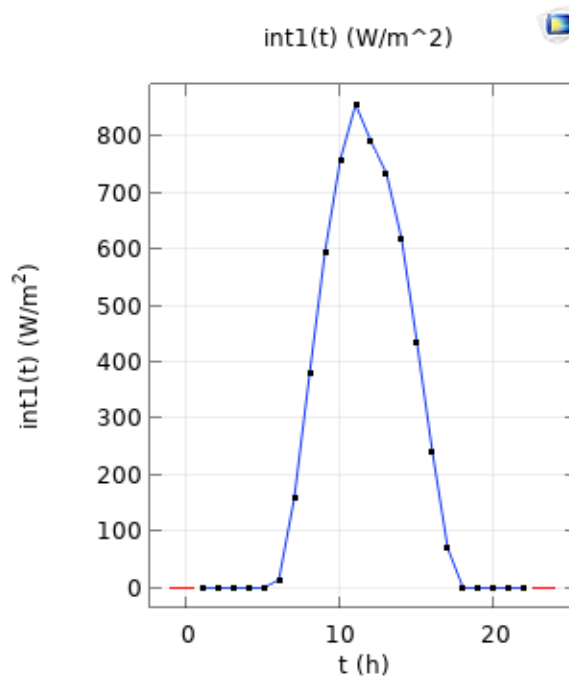


FIGURE 3.7 – profil du rayonnement solaire 24h.

Les courbes correspondants aux heures allant de 9h à 12h ont la même allure elles subissent des inflexions à 0,04m; elles se rencontrent à 0.055m et a le même comportement après ce point. Les valeurs maximales de la température sont 50°C;58°C; 64°C;63°C respectivement pour 9h;10h;11h et 12h. l'on remarque une augmentation de la température au niveau de l'entrée du séchoir ceci s'explique par la condition du flux solaire imposé sur la paroi du capteur ou à ce niveau le rayonnement solaire est plus concentré, nous remarquons également que les courbes correspondants aux heures de 11h à 12h se superposent mais ne diffère pas d'une grande valeur de manière quantitative cela est dû au fait que le rayonnement solaire de 11h qui est de 857,38W/m² est proche de celle de 12h qui est 800W/m² (figure) d'où la similitude observé. Nous observons qu'entre 11h et 12h sont les heures optimales du séchage.

La figure (b) représente la variation de la température de 13h à 16h à l'entrée de la chambre de séchage en fonction de la longueur de l'arc. Les courbes présentent la même allure elles se rencontrent à 0.05m et ont le même comportement après ce point, les températures varient de 59,6°C; 52,3°C;44,7°C et 34,6°C respectivement pour 13h;14h;15h et 16h. nous remarquons l'écart de température entre ces heures à cause des valeurs du rayonnement solaire qui varie ici de 735,8W/m² à 618,4W/m² entre 13h et 14h et de 434,5W/m² à 341,67W/m² entre 15h et 16h (voir figure rayonnement solaire). Nous observons que 13h et 14h sont les heures optimales du séchage.

3.4.3 Graphes de la répartition de la température à la sortie de la chambre de séchage

Les figures (...) et (...) présentent l'évolution du profil de température en fonction de la longueur de l'arc ceci dans les plages horaires allant de 9h à 12h puis de 13h à 16h, ceci à la sortie de la chambre de séchage.

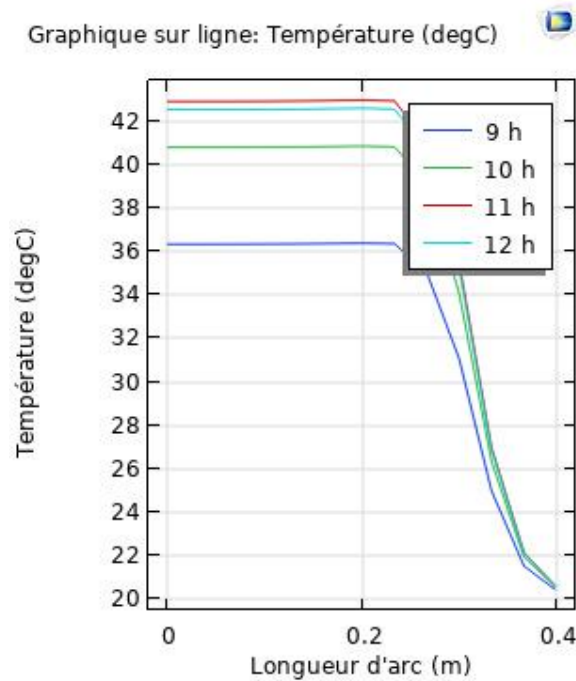


FIGURE 3.8 – profil de température de 9h à 12h

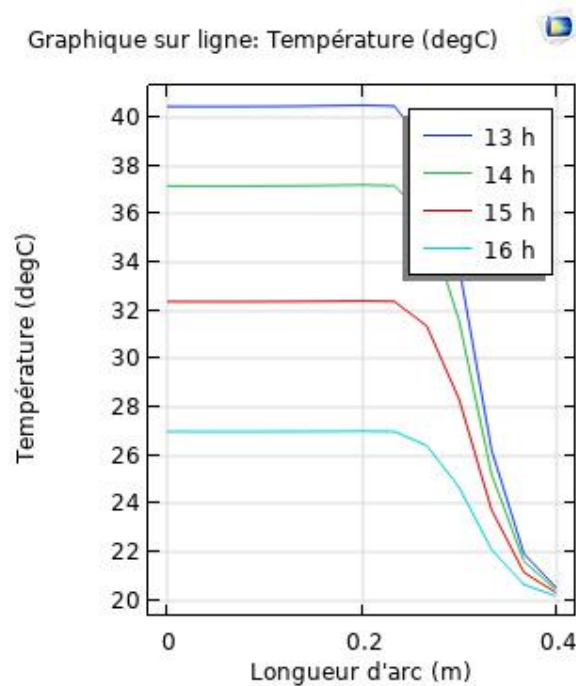


FIGURE 3.9 – profil de température de 13h à 16h.

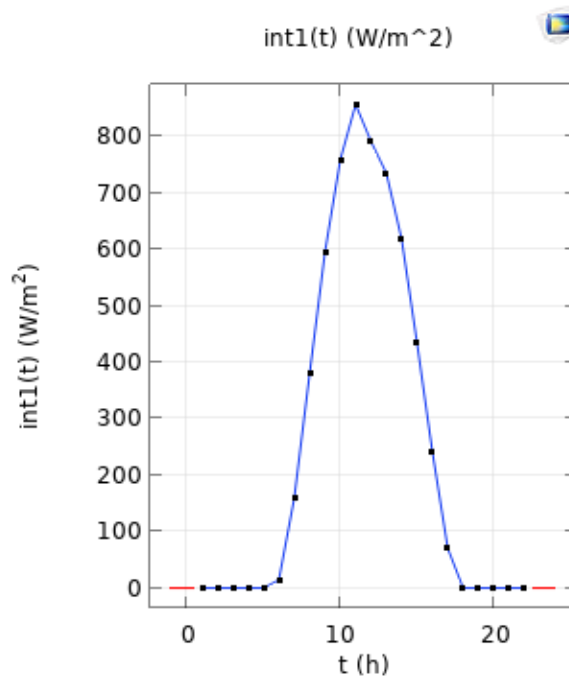


FIGURE 3.10 – profil rayonnement solaire sur 24h.

D’après la figure(a) les courbes correspondantes aux heures de 9h à 12h convergent vers un point de rencontre de 0.4m et ont le même comportement après ce point, les valeurs maximales des températures avant le point de rencontre correspondent à 36,7°C;40,5°C;42,5°C et 43°C respectivement pour 9h,10h,11h et 12h l’on remarque que les courbes correspondants aux heures de 11h à 12h ont le même comportement mais ne diffèrent pas d’une grande valeur de manière quantitative cela est dû au fait que le rayonnement solaire de 11h qui est de 857,38W/m² n’est pas loin de celle de 12h qui est 800W/m² (figure) d’où la similitude observé. Nous observons qu’entre 11h et 12h sont les heures optimales du séchage.

D’après la figure (b) on remarque aussi que les courbes ont la même allure elles se rencontrent à 0,4m et a le même comportement après ce point, les valeurs maximales des températures sont : de 41°C à 37°C de 13h à 14h et de 32,5°C à 27°C de 15hà 16h, on peut expliquer l’écart entre les températures par la variation du rayonnement solaire comme illustre la figure (rayonnement solaire) qui varie de 735,8W/m² à 618,4W/m² de 13h à 14h respectivement et de 434,5W/m² à 241,67W/m² entre 15h et 16h respectivement. Ces plages de températures sont propices pour le séchage des produits agroalimentaires selon la littérature. Ici, l’heure optimale pour le séchage se situe entre 13h et 14h.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation du modèle 2-D du séchoir solaire indirect utilisé. Il est nécessaire d'indiquer que les résultats obtenus représentés par les différents profils de température sont en parfait accord avec celui de la littérature.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le problème de conservation des produits agroalimentaires reste capital à cause du manque d'équipement adéquat de séchage. L'objectif principal de ce travail était de modéliser et de simuler le fonctionnement d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle destiné au séchage des produits agroalimentaires. Pour atteindre cet objectif, nous avons dans un premier temps effectué une revue de littérature sur le phénomène de séchage ainsi que les différentes technologies de séchoirs solaires. Cette revue nous a permis de constater que la technique de conservation par séchage semble être maîtrisée mais au Cameroun principalement le séchage des produits agroalimentaires restent toujours artisanal, ce qui ne garantit pas une bonne qualité des produits issus de ce genre de séchage. Nous avons ensuite procédé au choix des éléments constitutifs du prototype de séchoir solaire indirect utilisé. Par suite, nous avons présenté un modèle simulant le fonctionnement de ce séchoir. Ce modèle intègre la modélisation du capteur solaire thermique ainsi que la modélisation de la chambre de séchage. Un programme de calcul a été développé dans l'environnement Comsol Multiphysics en 2-D pour simuler globalement le fonctionnement du prototype de séchoir solaire indirect utilisé. D'après les résultats obtenus nous pouvons conclure que la température de l'air asséchant dépend fortement du rayonnement solaire reçu au niveau du capteur. Plus le rayonnement reçu est important plus la valeur de la température est élevée. Nous recommandons donc en complément à ce travail, les perspectives suivantes :

*** Tester avec le modèle proposé, le séchage des produits agroalimentaires afin d'établir un répertoire des produits de grande consommation pouvant être séchés par ce séchoir,**

*** Simuler le fonctionnement de ce prototype en tenant compte des données météorologiques ;**

*** Valider expérimentalement le prototype de séchoir solaire indirect ;**

*** Faire la simulation numérique incluant la colonne, où seront placés les plateaux contenant les aliments à sécher.**

Bibliographie

- [4] B. Touati, Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe, Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, Algérie (2001).
- [14] A.BENSEDIK, « Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée », Mémoire de magister, Université ABOU-BEKR BELKAID, Tlemcen, 2011.
- [15] M. MOGHARBI et D. HALASSA, « Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air », Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2006.
- [5] André LEMAITRE, procédés papetiers-préparation des pâtes, l'école Française de papeterie de Grenoble(EFPG), France 10 déc.2003.
- [6] Kane Abdoul Youssouf, « Etude d'un séchoir hybride, solaire-gaz », Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural, Burkina Faso, Mémoire de fin d'études 289/96, 1996.
- [3] Techniques de l'ingénieur – génie des procédés Séchage, Théorie et calculs. Par André charreau et Roland cavaillé, j 2480-2 ; 2480-22.
- [01] S. ZEKAI, « Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques », Springer 2008.
- [12] S. BOUGHALI, « Etude et optimisation du séchage solaire des Produits agroalimentaires dans les zones arides et désertiques », Phd-Thesis Université de Batna 2, 2010.
- [29] H. COMMUNAY, « Héliothermique, le gisement solaire, méthode et calculs », France 2002.
- [7] O.V. Ekechukwu et B. Norton, « Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology », Process Safety and Environment Protection, p. 620, 1997.
- [30] M. KOUHILA, M. MAHROUZ, A. IDLIMAM et A. JAMALI, « Thin layer convective solar drying an mathematical modeling of prickly pear peel », Energy, (211 - 244) - 2004.