

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA

FACULTE DES HYDROCARBURES, DES ENERGIES RENOUVELABLES ET DES
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Département d'Energies Renouvelables



Mémoire de Master Académique

Domaine : Sciences Techniques

Filière : Energies Renouvelables

Spécialité : Energies Renouvelables en Mécanique

Thème

***Amélioration de fonctionnement énergétique
des séchoirs solaires direct et indirect à
convection forcée***

Présenté par :

Zerrouki Mohamed Nadir

Azizi Malika

Soutenu publiquement le : 24 / 06 / 2018

Devant le jury :

<i>Président</i>	<i>Mr. BOUCHEKIMA Bachir</i>	Professeur	Univ. Ouargla
<i>Examineur</i>	<i>Mr. BERREBEUH Med.Hafed</i>	M. C. B	Univ. Ouargla
<i>Promoteur</i>	<i>Melle. CHOUICHA Samira</i>	M. A. A	Univ. Ouargla

Année Universitaire :2017/2018

REMERCIEMENTS

*En premier lieu, nous tenons à remercier ALLAH, notre créateur
pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.*

*Après, je tiens à remercier mes PARENTS et A nos FRÈRES et SOEURS qui
m'ont donné un grand support dans tous nos succès dans la vie.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous les professeurs
qui nous ont aidés tout au long de notre cursus universitaire
en particulier notre encadreur Melle: CHOUICHA SAMIRA pour ses conseils
précieux, pour sa disponibilité et la compétence de son
encadrement, qu'elle trouve ici notre reconnaissance et notre respect.*

*nos remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué, de près ou de
loin à l'accomplissement de ce travail, notamment les membres du jury*

M. Bachir Bouchejima et M. Berrebeuh Med.Hafed

, sans oublier nos professeurs M.dokkar Boubakeir et M. Cherrad ibrahim.

*Nos derniers remerciements, vont aussi à ceux qui nous ont assisté et conseillé
lors de la réalisation de ce mémoire*



DÉDICACE

A mes parents

A mes frères et sœurs

A tous mes amis

A ainsi qu'à tous mes proches

Je dédie ce mémoire

Med nadir

DÉDICACE

A mes parents

A ma grande mère et mon grand père

A mes frères et sœurs

A toutes mes amies (سلسلة تنوين-ورقة Club)

(Club SADA YOUTH)

(Club Petroleumclub)

Je dédie ce mémoire

malika

Liste des tableaux

Chapitre II

N°	Titre	Page
TableauII.1	Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement solaire dans la capture solaire (indirect)	24
TableauII.2	Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement solaire dans le capteur solaire par résistance électrique	27
TableauII.3	Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement	29
TableauII.4	Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement solaire dans le séchoir solaire direct	31
TableauII.5	Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement solaire dans le séchoir solaire direct	32

Chapitre III

TableauIII.1	Les conditions aux limites du Mai	47
TableauIII.2	modification du dimensionnement de la chambre de séchage	48
TableauIII.3	Les paramètres du premier cas de modification	48
TableauIII.4	Les paramètres de douzième cas de modification	51

Liste des figures

Chapitre I

<i>N°</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
FigureI.1	Périodes du séchage	06
FigureI.2	Les séchoirs solaires indirects	08
FigureI.3	Les séchoirs solaires directs	11
FigureI.	Les séchoirs solaires mixés	13
FigureI.2	Les séchoirs solaires hybrides	15

Chapitre II

FigureII.1	séchoir solaire direct	17
FigureII.2	séchoir solaire indirect	17
FigureII.3	Hygromètre (A) Testo 645 (B) Testo 608-H1	19
FigureII.4	Thermomètre	19
FigureII.5	Radiateur avec ventilateur	20
FigureII.6	systeme de chauffage électrique de l'eau (eau de refroidissement d'automobile)	20
FigureII.7	Le montage de système de l'échangeur de chaleur	21
FigureII.8	échangeur de chaleur intérieur de la chambre de séchage	21
FigureII.9	Photo régulateur résistance électrique avec régulateur de température	21
FigureII.10	L'installation de l'appoint énergétique	22
FigureII.11	Variation des températures dans la chambre de séchage (indirect)	23
FigureII.12	Variation des températures et rayonnement dans la capture solaire (indirect)	24
FigureII.13	Variation d'humidité intérieure et extérieure (indirect)	25
FigureII.14	Variations de profil de températures mesurées dans la chambre de séchage	26
FigureII.16	Relevé des températures de l'air dans la chambre de séchage avec et sans appoint lors du séchage à température variable	26
FigureII.17	Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du Temps(h)	26
FigureII.18	Variation des paramètres extérieurs de l'air en fonction du temps (h)	28

FigureII.19	Variation des températures dans le séchoir solaire (direct)	30
FigureII.20	Variation l'humidité intérieure et extérieure (direct)	31
FigureII.21	Variation des températures dans le séchoir solaire (direct) muni par appoint énergétique	32

Chapitre III

FigureIII.1	Importation de la géométrie	37
FigureIII.2	Vérification du maillage importé	37
FigureIII.3	Vérification de l'échelle	38
FigureIII.4	Choix du solveur	38
FigureIII.5	L'équation de l'énergie	39
FigureIII.6	Définition des caractéristiques du fluide	39
FigureIII.7	Choix de la pression de référence	40
FigureIII.8	conditions aux limites	40
FigureIII.9	Choix d'ordre des équations et l'algorithme	41
FigureIII.10	Initialisation	41
FigureIII.11	Choix des critères de convergence	42
FigureIII.12	Choix du nombre des itérations	42
FigureIII.13	Schéma de maillage	43
FigureIII.14	Convergence des résultats	44
FigureIII.15	Distribution de températures	45
FigureIII.16	Distribution de températures pour C1	46
FigureIII.17	le schéma de maillage pour C1	47
FigureIII.18	courbe d'évolution des températures pour C1	47
FigureIII.19	courbe d'évolution de vitesse pour C1	48
FigureIII.20	Distribution de température pour C2	48
FigureIII.21	le schéma de maillage pour C2	49
FigureIII.22	courbe d'évolution de température pour C2	49
FigureIII.23	courbe d'évolution de vitesse pour C2	50

Table des matières

Introduction générale	01
<i>Chapitre I : Généralités Sur Le Séchage</i>	
I.1. Généralités Sur Le Séchage	03
I.1.1. Définition	03
I.1.2. But de séchage	03
I.1.3. Domaines d'utilisations	03
I.1.4. Processus de séchage	04
I.1.5. Principe de séchage	04
I.1.6. Cinétique de séchage	05
I.1.7. Types de séchoirs solaires	06
I.1.8. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage	15
 <i>Chapitre II : Intégration des appoints énergétiques pour les séchoirs solaires direct et indirect</i>	
II.1. Description du système de séchage	17
II.1.1. Séchoir solaire indirect	17
II.1.2. Séchoir solaire direct	17
II.1.3. Appareillages de mesures	19
II.1.4. Protocole et méthodologie expérimentale	20
II.2. Amélioration de fonctionnement de séchoir solaire indirect par intégration des différents appoints énergétiques	21
II.2.1. Intégration d'un échangeur de chaleur air /eau	21
II.2.2. Intégration d'une résistance électrique à température constante	21
II.2.3. Amélioration de fonctionnement de séchoir solaire direct par intégration d'un appoint énergétique par échangeur air /eau	22
II.3. Etude de comportement thermique à vide de séchoir solaire indirect à convection forcée....	23
II.3.1. Distribution des températures dans de la chambre de séchoir solaire indirect....	23
II.3.2. Profil des températures et de rayonnement solaire dans le capteur Solaire	25
II.3.3 Variations des humidités intérieures et extérieures de l'air de Séchage	26
II.4. Proposition des solutions pratiques pour l'amélioration énergétique de séchoir solaire indirect	26
II.4.1. Amélioration par résistance électrique à une température de 55°C	27
II.4.1.1. Profil des températures et de rayonnement solaire dans le capteur solaire par résistance électrique	27

II.4.2. Amélioration par échangeur de chaleur	28
II.4.2.1. Variation de la température de l'air à l'intérieur de la chambre de séchage	28
II.4.2.2. Effet du rayonnement sur la température	29
II.4.2.3. Variation des paramètres extérieurs de l'air asséchant en fonction du Temps(h)	31
II.5. Etude de comportement thermique à vide du séchoir solaire direct à convection Forcée	32
II.5.1. Variation des humidités relatives de l'air à l'intérieur et l'extérieur du séchoir solaire direct	33
II.5.2. Amélioration de fonctionnement par échangeur thermique	34

Chapitre III : Partie simulation numérique de fonctionnement de séchoir solaire indirect à convection forcée

III.1. Le code FLUENT	36
III.2. Description du logiciel Fluent	36
III.2.1. Présentation de Gambit	39
III.2.1.1. Maillage	39
III.2.1.2. Présentation de Fluent	39
III.2.2. Simulation du séchoir à l'état original	46
III.2.2.1. Choix du maillage	46
III.2.2.2. La convergence	42
III.3. Simulation du cas des conditions de la journée typique de Mai	47
III.4. Simulation des modifications du dimensionnement de la chambre de séchage	48
III.4.1. Effet de la variation de la longueur (conception C1)	48
III.4.2. Effet de la variation de longueur et ventilateur (conception C2)	51
Conclusion générale	53
Références bibliographiques	55
Annexes	

Introduction Générale

Le séchage solaire présente un processus d'un grand intérêt pour préserver et stabiliser les produits agricoles tels que les fruits, les légumes et les plantes médicinales. Le séchage direct au soleil est la méthode la plus utilisée dans la plupart des pays en voie de développement. Pendant le séchage par cette méthode, des problèmes liés à la contamination et des pertes considérables se produisent en raison de diverses influences telles que les oiseaux, les insectes, les micro-organismes, les poussières, les pluies etc, en plus, la qualité des produits alimentaires peut être sérieusement dégradée. Afin de réduire les pertes et améliorer la qualité des produits séchés, le séchage direct au soleil devrait être remplacé par le séchage en utilisant des séchoirs solaires [1].

L'introduction des séchoirs solaires dans les pays en voie de développement peut réduire des pertes de récolte et améliorer sensiblement la qualité du produit sec. Comparées aux méthodes traditionnelles de séchage, de nombreuses tentatives ont été faites pour développer le séchage solaire principalement pour améliorer les performances thermiques des séchoirs solaires et préserver les produits agricoles [2].

L'optimisation de l'opération de séchage doit répondre à deux impératifs essentiels qui sont la consommation restreinte de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité biologique du produit sec, ces considérations ont conduit à de nombreux travaux correspondant à différents niveaux du processus : le séchoir solaire, le produit et le coût économique. Les modèles des simulations sont utiles pour la conception de nouveaux prototypes des séchoirs, l'amélioration des systèmes de séchage existant ou pour le contrôle de l'opération de séchage [3].

L'objectif du travail consiste d'une part à améliorer le fonctionnement énergétique des séchoirs solaires convectifs de type direct et indirect, afin de maintenir des conditions opératoires favorables pour sécher les produits alimentaires. L'amélioration est faite par l'intégration des appoints énergétiques par résistance électrique et échangeur de chaleur air/eau pour le séchoir indirect et par la mise en place d'un échangeur de chaleur couplé à un simulateur de l'eau géothermique pour le séchoir solaire direct, d'autre part, dans un objectif d'amélioration des performances du séchoir solaire indirect, notre travail met en application les équations d'écoulement et de transfert de thermique moyennant le logiciel CFD Fluent, les calculs de simulation concernant le séchoir indirect avec considération d'un nombre de modifications conceptuelles appropriées et qui feront objet de comparaison et de commentaires.

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire est rédigé dans un enchaînement logique composé d'une introduction générale, trois chapitres, et une conclusion.

Le premier chapitre présente l'état des connaissances concernant le séchage des produits agroalimentaires, et les différents types des séchoirs solaires. Le deuxième chapitre traite la description générale des dispositifs expérimentaux utilisés (séchoirs direct et indirect) et les améliorations énergétiques proposés (résistance électrique et échangeur de chaleur air / eau) ainsi que les appareils de mesure et la méthodologie de travail. Cette partie est suivie par la présentation des principaux résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude de comportement thermique des deux séchoirs solaires direct et indirect sans et avec appoints énergétiques

Le troisième chapitre est consacré à la simulation des profils des températures et des vitesses de l'air dans le séchoir solaire indirect convectif en terminant notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur le séchage

I.1. Généralités sur le séchage:

I.1.1. 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.

I.1.2. but de séchage :

Le but de 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.

I.1.3. Domaines d'utilisations :

❖ Industrie agroalimentaire :

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage. Le séchage peut être une étape nécessaire à la production du produit ou un rôle dans la conservation de l'aliment. Il existe moins de 200 types de séchoirs industriels dans le secteur alimentaire. Des produits agricoles peu hydratés, mais demandant parfois (selon la météorologie) un séchage complémentaire pour les stabiliser et/ou les standardiser avant traitement industriel : maïs, blé, autres céréales, graines oléagineuses, etc.

1. Des produits agricoles, très hydratés exigeant le séchage pour être stabilisé et allégés : le lait (surtout destiné à l'alimentation des veaux), la luzerne et le maïs plante entière (alimentation animale), des légumes et assimilés (pomme de terre, carottes, oignons).
2. Des produits de transformation industrielle, séchés pour raison de stabilité et de présentation : extraits de café et de thé, pâtes alimentaires, charcuterie (jambons et saucissons secs), fromages, produits pour animaux familiers, sucre, amidon ...etc. [5]
3. Des sous-produits industriels, généralement destinés à l'alimentation animale : pulpes de sucrerie, sérum de fromagerie.

❖ Industrie papetière :

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

❖ Industrie du bois :

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans les conditions correctes, sinon on s'expose à des changements de taille et de forme du bois. [5]

I.1.4. Processus de séchage :

Le séchage par convection à mettre en contact un gaz (généralement air chaud et de faible hygrométrie) en écoulement autour du corps à sécher. Ce courant gazeux assure à la fois l'apport de chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et l'enlèvement de la vapeur produite. Entre l'entrée et la sortie du séchoir, le gaz se refroidit en même temps qu'il se charge d'humidité. Dans le cas du solide, on observe une diminution progressive de sa teneur en eau et une augmentation de sa température au cours du séchage [6].

Pour favoriser le séchage, il est souvent amené à fournir l'énergie nécessaire pour vaporiser le liquide que l'on veut éliminer. Cette énergie peut être apportée :

I.1.4.1. Séchage par conduction [6] :

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.

I.1.4.2. Séchage par convection:

C'est le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie chimique, l'échange thermique est réalisé grâce à un contact direct entre le solide humide et le gaz caloporteur.

I.1.4.3. Séchage par rayonnement [6]:

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement. Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible.

I.1.5. Principe de séchage:

La première idée qui vient à l'esprit pour sécher un produit est de le porter à la température d'ébullition de l'eau, qui alors se vaporise. En réalité, ce principe n'est pas le plus

employé et l'on préfère souvent opérer à température moins élevée en utilisant l'air comme gaz d'entraînement.

Trois modes de séchage peuvent être distingués :

I.1.5.1.Séchage mécanique [6]:

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation, compression, décantation et filtration...).

1.5.2. Séchage chimique [6]:

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

I.1.5.3.Séchage thermique [6]:

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.

I.1.6. 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.1). Mais d'une manière générale, on remarque que l'allure de séchage,se décompose en trois périodes principales [7] :

- **phase 0** : Période transitoire.
- **phase I** : Période à vitesse de séchage constante.
- **Phase II**: Période à vitesse de séchage décroissante.

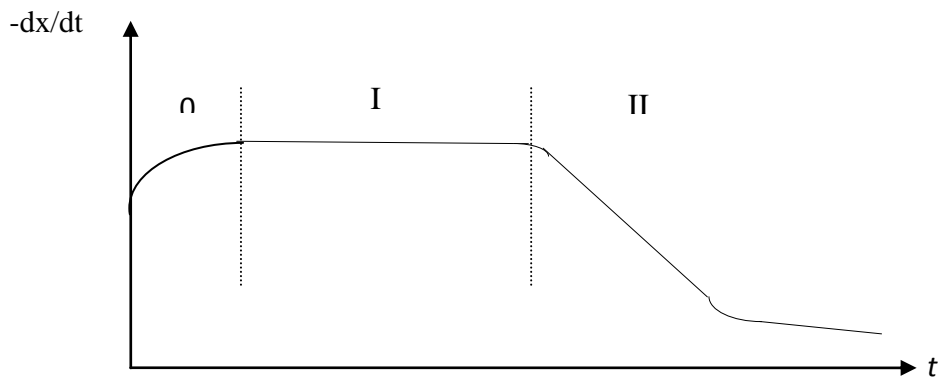


Figure I.1 : Périodes du séchage

Phase 0 : 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 [7].

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 est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique.

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.

I.1.7.Types de séchoirs solaires

Il y a plusieurs types des séchoirs solaires développés pour servir les divers buts de sécher des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité.

Généralement, on peut classer les séchoirs solaires selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement [8] :

- Les séchoirs solaires indirects ;
- Les séchoirs solaires directs ;

- Les séchoirs solaires mixtes ;
- Les séchoirs solaires hybrides.

I.1.7.1. Les séchoirs solaires indirects :

Ce type des séchoirs est souvent plus compliqué que le séchoir direct. Il se compose de deux parties: un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur et une chambre de séchage qui contient le produit. L'air pénètre dans le collecteur; il est chauffé et sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques [9].

Avantages :

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C) [10].

Inconvénients :

- Coût important.
- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- Conception et construction nécessitant une personne qualifiée.
- Formation nécessaire du personnel.

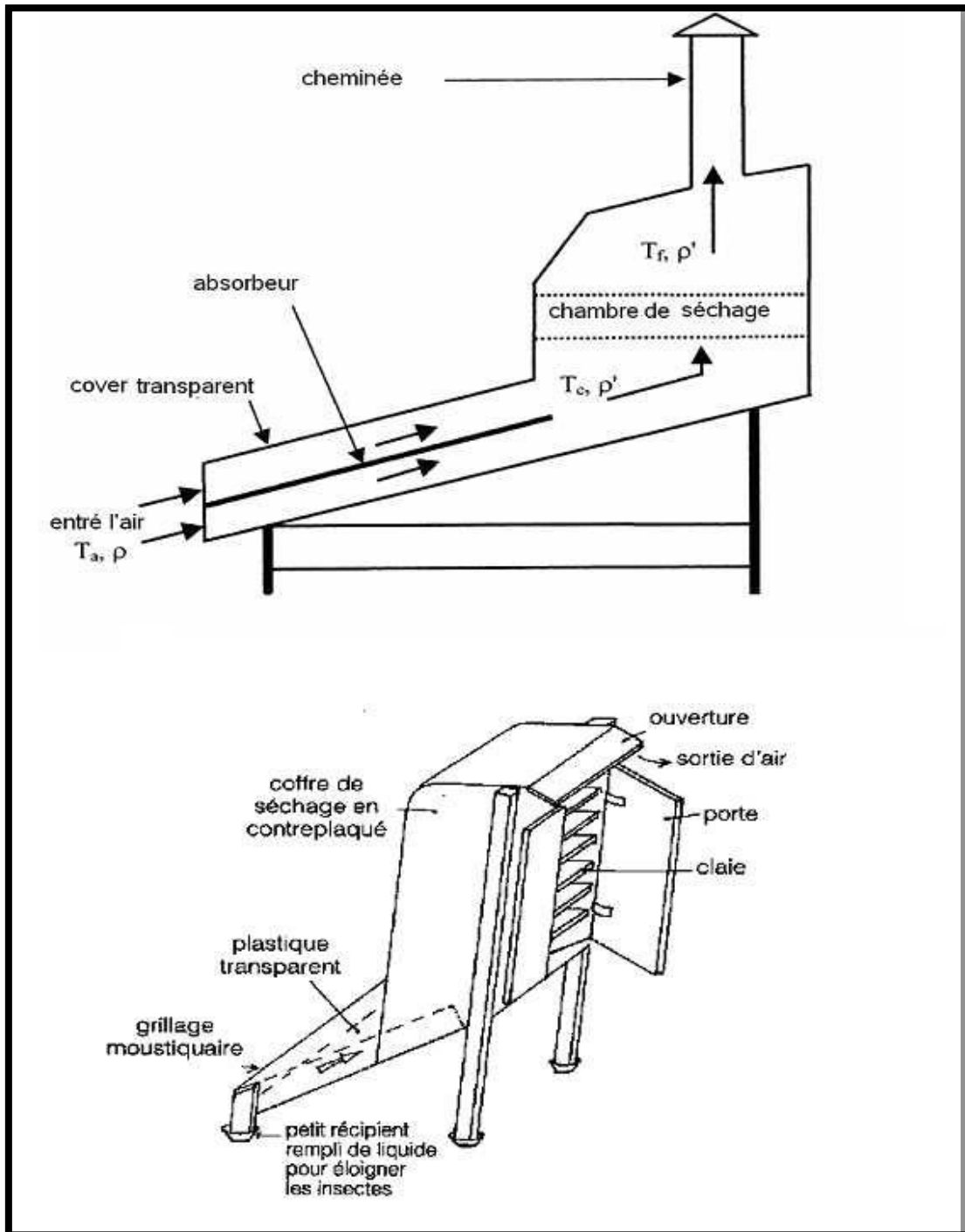


Figure I.2: Les séchoirs solaires indirects

I.1.7.2. Les séchoirs solaires directs :

Le séchage traditionnel des fruits et légumes se pratique à même le sol, le long des routes, sur des nattes, des rochers plats et sur les toits des habitations. Les aliments sont exposés aux intempéries, à la poussière et aux insectes. Ces systèmes s'améliorent par quelques astuces simples, faciles à mettre en œuvre et qui, dans de nombreux cas, suffisent à augmenter notablement la qualité des produits : figure (I.3A, B) [4].

Les séchoirs solaires directs sont conçus de façon à laisser pénétrer le rayonnement solaire directement dans l'armoire de séchage où il est converti en chaleur par le produit à sécher lui-même et les diverses parois qu'il rencontre. [7]

Les séchoirs solaires directs sont constitués d'un caisson de forme variable offrant au rayonnement solaire une couverture transparente (verre ou film plastique). Des claies sont disposées à l'intérieur du caisson entre lesquelles l'air circule le plus souvent par convection naturelle. Ces séchoirs, dont la figure (I.3C, D,) montrent que quelques modèles sont faciles à construire et de faible coût, car on peut utiliser des matériaux locaux. Mais ils présentent, par suite de leur simplicité même, des inconvénients : faible capacité, rendement médiocre, séchage irrégulier et non uniforme à cause d'une convection naturelle non contrôlée, détérioration éventuelle du produit par le rayonnement solaire en raison de réactions photochimiques ou de surchauffes superficielles... etc. On trouve seulement quelques séchoirs en convection forcée qui concernent le séchage de fruits disposés en couche unique sur des étagères horizontales situées à l'intérieur d'un séchoir-captateur assimilé à une boîte parallélépipédique figure (I.3E) dont la face supérieure est une vitre laissant passer le rayonnement solaire et la face inférieure est un plan noir isolé à l'arrière pour éviter les pertes thermiques. [5]

Il y a un autre type de séchoir solaire qui est le séchoir coquillage, il est composé de deux cônes métalliques reliés par une charnière, la tôle peinte en noir assure une bonne captation du rayonnement solaire, des trous perforés dans la tôle inférieure et supérieure permettent la circulation de l'air.

L'efficacité du séchoir dépend des conditions climatiques: figure (I.3F). [11]

Avantages :

- Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de manœuvre qualifiée.
- Grandes possibilités de conception.

Inconvénients :

- Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration. [12]
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

- Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments. [13]
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risque de moisissure.

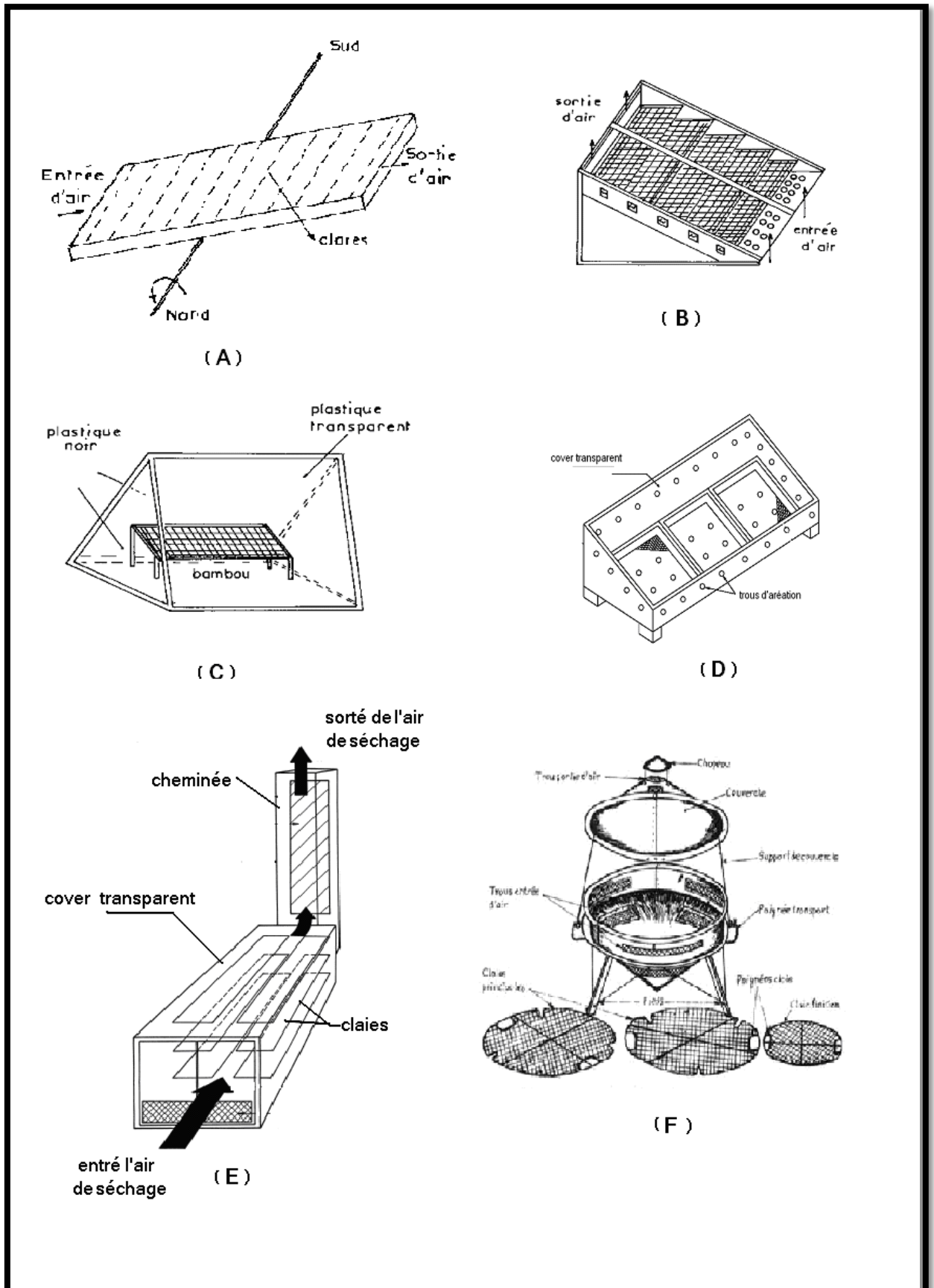


Figure I.3: Les séchoirs solaires directs

I.1.7.3. Les séchoirs solaires mixtes :

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage.

Un séchoir mixte à circulation naturelle (figure I.4A) aurait les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage et cheminée) mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empète directement sur le produit comme le séchoir intégral [5].

Une autre conception (figure I.4B) se compose d'un capteur à air recouvert d'une plaque de verre. La chambre de séchage contenant des claies superposées, les parois sont des contreplaqués, la surface supérieure recouverte de verre. La cheminée solaire prend une forme cylindrique, fabriquée avec des feuilles galvanisées équipées d'un chapeau en métal pour conserver hors de la pluie [14].

Avantages :

- Forte augmentation de la production par rapport à l'autre type des séchoirs solaires. [15]

Inconvénients :

- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir. [15]

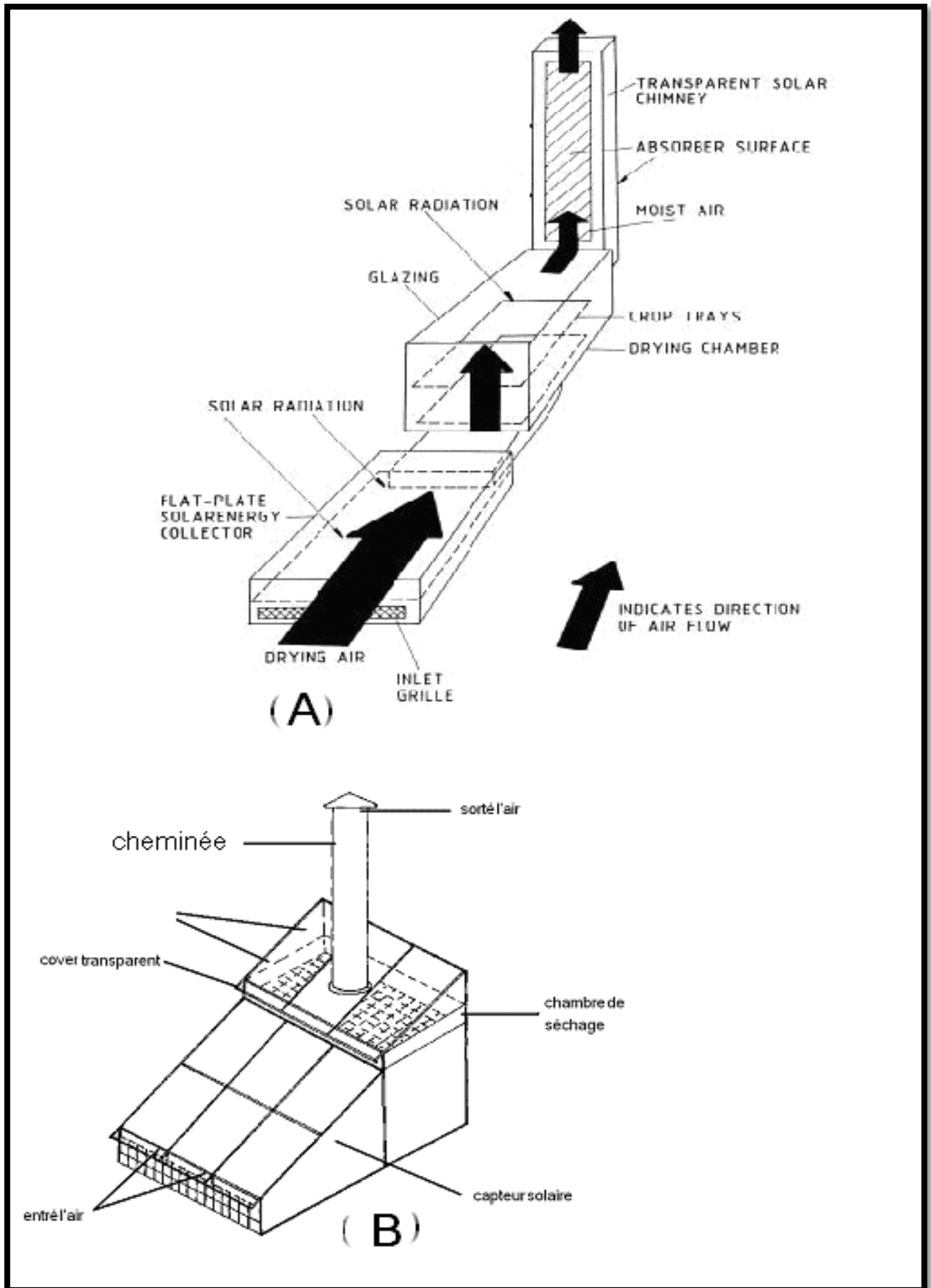


Figure I.4: Les séchoirs solaires mixtes

I.1.7.4. Les séchoirs hybrides :

Malgré les améliorations techniques apportées, le processus de séchage n'est pas réellement contrôlable. Le producteur reste tributaire des conditions météorologiques. Les performances des séchoirs diminuent fortement en cas de pluie ou de temps nuageux.

Le temps de séchage dépasse fréquemment une journée. Comme le matériel ne fonctionne pas la nuit, les produits encore humides s'exposent aux attaques microbiennes.

Pour pallier ces inconvénients, les recherches se sont orientées vers des séchoirs hybrides utilisant une énergie d'appoint : fuel, électricité, bois, gaz, sous-produit végétaux... L'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir: [11]

- Maintien d'une température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu de bois. Dans ce cas, l'énergie solaire devient secondaire. Elle permet simplement de préchauffer l'air : figure (I.5A).
- Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques. Ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation : figure(I.5B).

Avantages

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage.
- Forte augmentation de la productivité par rapport au séchoir solaire car le matériel peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

Inconvénients

- Coûts de production et d'investissement élevés.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz, pièces de rechange.
- Personnel qualifié pour la maintenance.

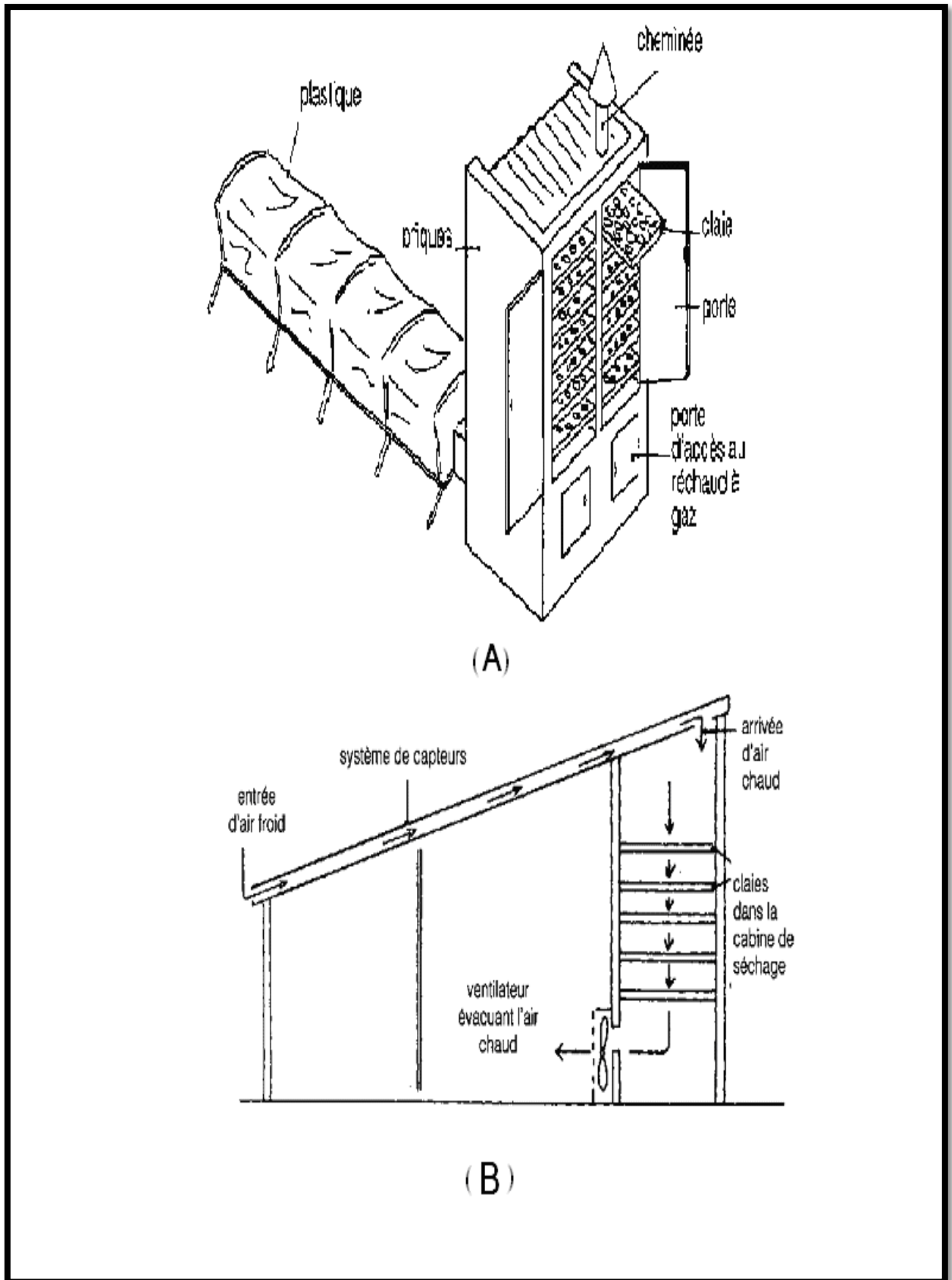


Figure I.5 : Les séchoirs solaires hybrides

I.1.8. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage :

On distingue plusieurs d'influence des paramètres de l'air :

I.1.8.1. Influence de la température de l'air :

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croit avec la température de l'air, elle est aussi à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air est élevée. Par conséquent, les conductivités de l'eau dans le produit deviennent importantes [4].

I.1.8.2. Influence de la vitesse de l'air :

La vitesse de l'air influe effectivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par le transport interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible [4].

I.1.8.3. Influence de l'humidité de l'air:

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits, il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente [4].

Chapitre II

*Intégration des appoints énergétiques
pour les séchoirs solaires direct et
indirect*

Cette partie présente les résultats expérimentaux de l'évaluation de comportement thermique à vide des séchoirs solaires direct et indirect à convection forcée, les deux séchoirs solaires direct et indirect étudiés sont conçus et réalisés par l'équipe de conversion d'énergie du laboratoire LENREZA.

Pour améliorer le fonctionnement énergétique des deux prototypes en proposant l'intégration des différents appoints énergétiques (régulateur de température, et un échangeur de chaleur air / eau) pour le séchoir indirect et un échangeur air / eau pour le séchoir direct.

II.1. Description du systèmes de séchage :

Dans cette étude nous avons utilisé deux systèmes de séchage solaire fonctionne en convection forcée ; séchoir solaire direct(A), et le séchoir indirect (B) figure (II.1)

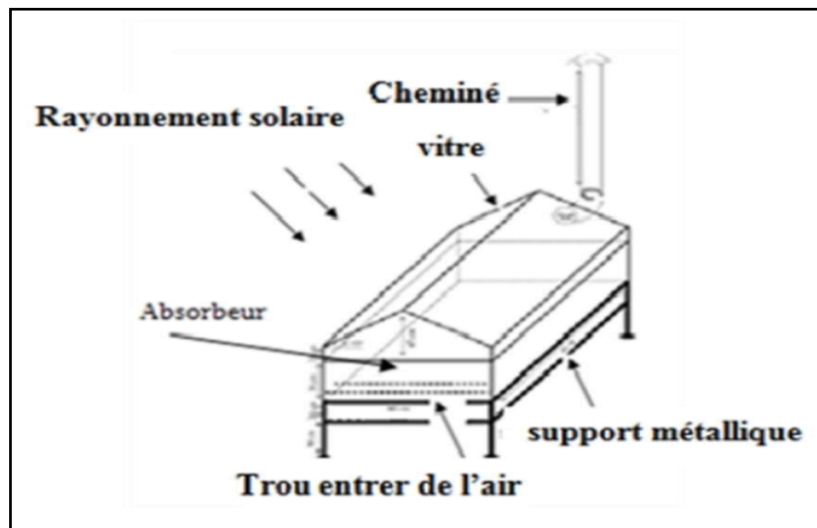


Figure (II.1): séchoir solaire direct

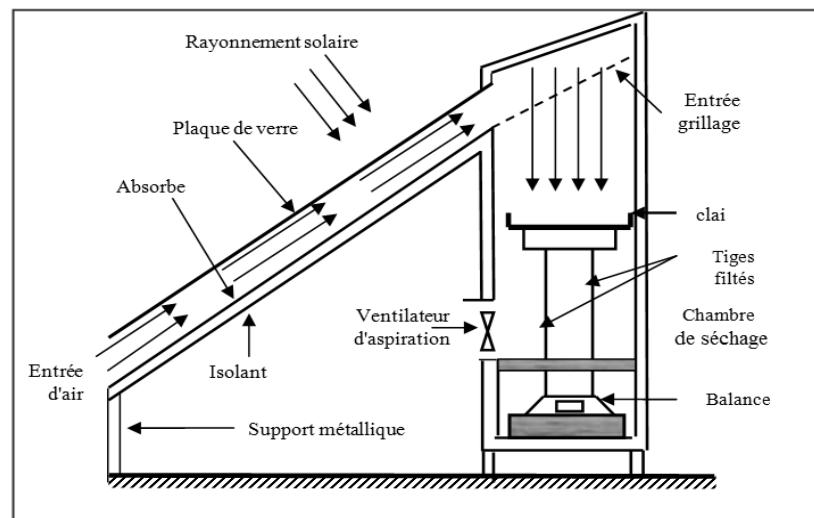


Figure (II.2): séchoir solaire indirect

II.1.1. Séchoir solaire indirect :

➤ Chambre de séchage

La chambre de séchage est de forme parallélépipédique de hauteur 1.60m, de longueur 0.7m et de largeur 0,6 m. Les parois extérieures sont en tôle galvanisée avec une isolation interne en polystyrène. A l'entrée de la chambre de séchage, on place une autre tôle galvanisée pour éviter les écarts de température entre la sortie de capteur et un ventilateur d'aspiration de marque (FA-30) (vitesse $V_{vtl}=1400$ tours/min, débit Volumique= $25m^3/min$) permet la circulation forcée de l'air avec un débit réglable. Une claie de forme rectangulaire en grillage galvanisé sert de support pour le produit à sécher.

➤ Unité de production d'air chaud

Constituée d'un capteur solaire plan à air à simple vitrage avec des chicane, de surface de $2m^2$ incliné de 31° (latitude de la ville d'Ouargla) par rapport au plan horizontal et orienté Vers le sud. L'absorbeur, en tôle galvanisée, est peint en noir. L'isolation thermique, d'épaisseur 50 mm, est faite en polystyrène et le vitrage est en verre ordinaire.

➤ Fonctionnement du séchoir solaire indirect

L'air frais provenant de l'extérieur est préalablement chauffé dans le capteur solaire, le contact air absorbeur, le transfert convectif ainsi que les chicane permet d'élever la température de l'air. Ce dernier arrive à l'entrée de la chambre de séchage et avant de traverser la claie, l'air est chauffé par une source d'appoint thermique qui fournit, en cas de besoin, de l'énergie supplémentaire permettant d'assurer une température de séchage élevée. L'aspirateur aspire l'air de séchage qui traverse la claie, et l'évacue vers l'extérieur.

II.1.2. Séchoir solaire direct :

□ Chambre du séchage

Elle est constituée de six plaques de verre d'épaisseur égale à 4 mm, deux plaques sont inclinées d'un angle $31,57$ deux sont positionnées dans l'avant et arrière du séchoir et deux dans les parties latérales du séchoir les quatre dernières plaques de verre sont reposées sur des plaques en tôle galvanisée (épaisseur= $0,5$) et qui sont isolées thermiquement avec le polystyrène la plaque située dans l'avant du séchoir représente la porte de la chambre elle est perforée par des rangées de trous dont le diamètre est de 1cm et la distance inter axiale égale ($d=5cm$). La base de la chambre est composée de deux plaques en tôle galvanisée séparées avec le polystyrène l'une des plaques est peinte en noire est considérée comme absorbeur la chambre

de séchage est pose sur un support métallique, la fève est disposé a l'intérieure de cette chambre sur une claie, ce dernier est déposé sure une balance de type d'Enver (situer au-dessous de la chambre) de précision 0.1.

□ **Cheminé**

La cheminé du séchoir présente un cylindre en tôle galvanisé de hauteur de 1m et de diamètre de 10cm, elle joue le rôle d'un aspirateur de l'air humide vers l'extérieure.

➤ **Fonctionnement du séchoir solaire direct**

Le rayonnement solaire traverse la couverture transparente et frappe directement le produit l'air frais arrive de l'extérieure et pénètre les trous, le contact air absorbeur (noire) ainsi que le transfert convectifs augment la température de l'aire par l'effet de serre qui sert a séché le produit, le ventilateur placé aspire l'air de séchage et sert à son évacuation à travers la cheminée

II.1.3. Appareillages de mesures :

➤ **Mesure de l'humidité de l'air asséchant**

La mesure des humidités s'effectue à l'aide d'un hygromètre dans plusieurs endroits :

- L'humidité relative de l'air asséchant à l'entrée de la claie est mesurée à laide d'un hygromètre à affichage numérique connecté à un appareil de marque Testo 645.
- La mesure de l'humidité relative de l'air exterieur est effectuée par un hygromètre type Testo 608-H1.



(B)



(A)

Figure (II.3) : Hygromètre (A) Testo 645 (B) Testo 608-H1

➤ **Mesure des températures**

La mesure des températures s'effectue à l'aide des thermocouples figure (II.2) dans plusieurs endroits du capteur solaire :

- Entrée et sortie du capteur solaire.
- Avant la claie portant le produit à sécher.
- Au niveau de l'absorbeur et la vitre du capteur solaire.

Les résultats de mesure sont affichés sur une température mètre figure (II.3) :



Figure (II.4) : Température mètre

II.1.4. Protocole et méthodologie expérimental :

La méthodologie d'expérience se compose de :

- Une préparation de séchoir solaire
- Une installation des appareils de mesures
- Une expérimentation

➤ **Préparation des séchoirs solaires**

La préparation des séchoirs solaires concerne l'assurance du bon fonctionnement des séchoirs par :

- Le nettoyage de la couverture transparente et de la plaque noire du capteur solaire. et de l'absorbeur

- Fonctionnement des séchoirs à vide pendant 30min.

II.2. Amélioration du fonctionnement des séchoirs solaires indirects par intégration des différents appoints énergétiques :

II.2.1 Intégration d'un échangeur de chaleur air /eau :

La connexion du système avec un échangeur de chaleur sous forme d'un radiateur d'automobile (Marque DFM) connecté avec un système de chauffage d'eau qui simule l'apport en eau de source géothermique.

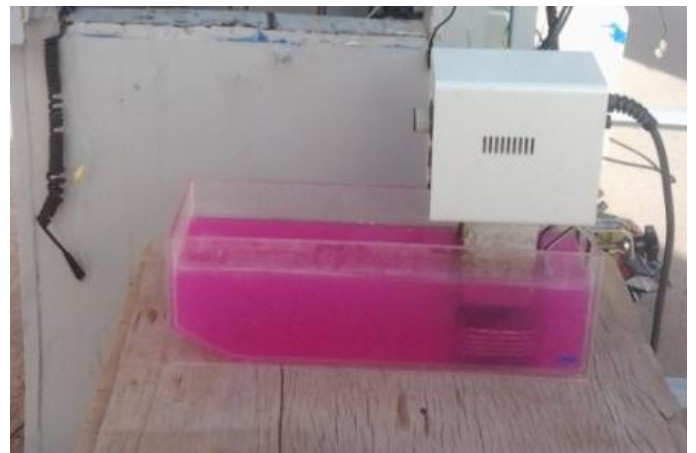


Figure (II.5) : Radiateur avec ventilateur

Figure (II.6): Système de chauffage électrique de l'eau (eau de refroidissement d'automobile)



Figure (II.7) : Le montage du système de l'échangeur de chaleur



Figure (II.8) : Échangeur de chaleur intérieur de la chambre de séchage

II.2.2 Intégration d'une résistance électrique à température constante :



Figure (II.9) : Régulateur résistance électrique avec régulateur de température

II.2.3 Amélioration du fonctionnement du séchoir solaire direct par intégration d'un appoint énergétique par échangeur air /eau :

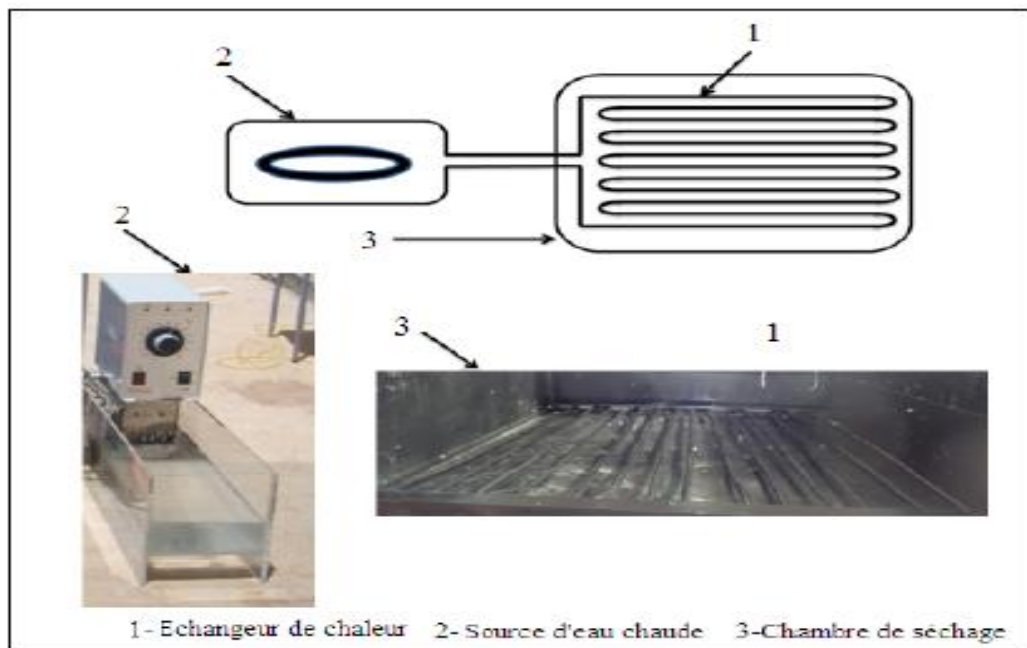


Figure (II.10) : L'installation de l'appoint énergétique.

➤ **Fonctionnement du système de séchage direct**

Le fonctionnement de système de séchage est effectué lorsque le rayonnement solaire devient faible (vers 18 h). La circulation d'eau chaude dans ce système de séchage (Bac - échangeur) présente une boucle fermée, dont la température du fluide est d'environ 60°C. Au cours de l'écoulement de l'eau chaude dans l'échangeur, un transfert de chaleur se produit à travers les parois de ce dernier, on distingue deux types de transfert thermique :

a- Transfert par conduction : entre l'échangeur et la claie de séchage.

b-Transfert par convection : entre les tubes de l'échangeur et l'air frais.

➤ **Série d'expérience :**

- La 1^{ier} partie est consacrée à l'étude du comportement thermique des deux séchoirs solaires convectifs direct et indirect sans produits en régime variable.
- La 2^{ieme} partie de l'étude est basée sur l'amélioration de processus de séchage solaire en mode de fonctionnement alimentée via le réseau électrique pour le séchoir solaire indirect, nous proposant d'améliorer le fonctionnement du système d'autre l'amélioration de fonctionnement des deux systèmes de séchage a été faite par l'intégration d'un échangeur de chaleur air /eau fonctionnant en régime continue période du travail du 01/05/2018 au 10/05/2018.

II.3 Etude de comportement thermique à vide de séchoir solaire indirect à convection forcée :

Nous avons effectué une série des mesures de température dans plusieurs positions dans la chambre de séchage.

II.3.1 Distribution des températures dans la chambre de séchoir solaire indirect :

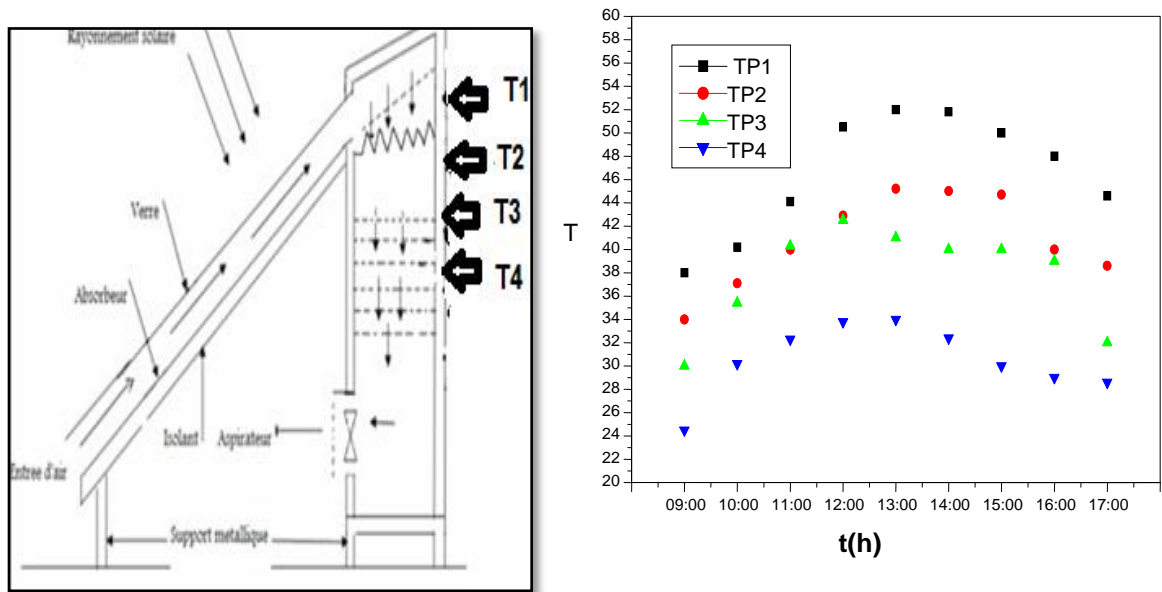


Figure (II.11) : Variation des températures dans la chambre de séchage (indirect)

La figure(II.11) présente la distribution de température en fonction du temps pour un essai de séchage à vide où la température de l'air asséchant est mesurée dans quatre positions de la chambre (P₁, P₂, P₃, P₄) correspondant aux températures (T_{P1}, T_{P2}, T_{P3}, T_{P4}). La courbe de distribution de la température dans la chambre présente une similitude dans l'allure, L'expérimentation s'est déroulée durant un jour ensoleillé, on constate qu'il existe un gradient de température entre les températures (T_{P1} et T_{P2}), (T_{P2} et T_{P3}) (T_{P3} et T_{P4}) où T_{P1} varie de T_{min}= 38.3°C à T_{max}= 52 °C T_{P2} varie de T_{min} = 34°C à T_{max} = 45.1°C T_{P3}, varie de T_{min} = 30.5°C à T_{max} = 41°C T_{P4} varie de T_{min}= 24.2°C à T_{max}=35°C. Ces valeurs présentent une dégradation significative dans la chambre, par suite de fonctionnement de séchoir en régime variable où la source d'énergie provient du capteur solaire ,cette dégradation (chute de température) entraine des conditions défavorables dans la chambre de séchage , donc le séchoir solaire nécessite des améliorations énergétiques pour assurer des conditions opératoires favorable , on propose d'intégrer des résistances électriques pour maintenir des températures stables et un échangeur de chaleur pour augmenter la température en régime de fonctionnement en continu.

II.3.2 Profil des températures et de rayonnement solaire dans le capteur solaire :

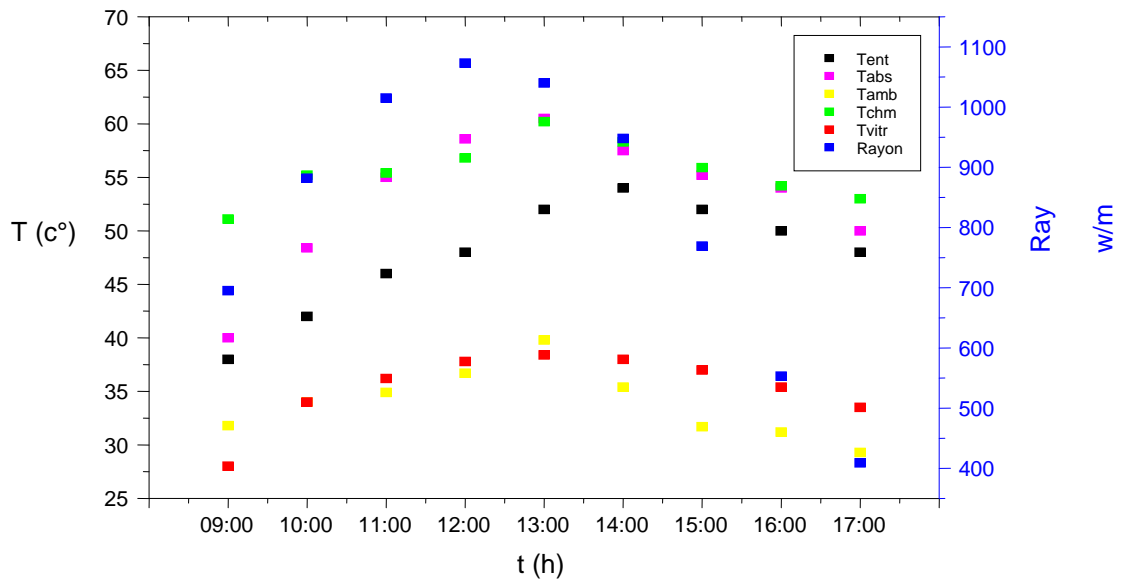


Figure (II.12) : Variation des températures et rayonnement dans la capture solaire (indirect)

La figure (II.12) présente la variation du rayonnement solaire (Rayon) et la distribution de la température en fonction du temps pour un essai de séchage où la température de l'air asséchant est mesurée dans cinq positions, entrée de séchoir (Tent), sortie de séchoir (Tsort), au niveau de vitre (Tvit_r), au niveau de capteur solaire et la température de l'air ambiant (Tamb). La courbe de distribution de la température dans le séchoir indirect présente une similitude dans l'allure avec la courbe de l'éclairement global avec un léger décalage dans le temps L'expérimentation s'est déroulée durant un jour ensoleillé, les valeurs max/min quotidiennes, des températures de produit et de l'air asséchant et le rayonnement solaire varient selon le tableau (II.2).

Tableau (II.1) : Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement solaire dans la capture solaire (indirect)

02/05/2018	Te	Te min	Ts max	Ts	Tamb	Tamb	Tab _s	Tab _s	Tv	Tv	R max	R min
	max			min	max	min	max	min	max	min		
	35,1°C	26,4°C	52,2°C	37°C	32,8°C	25°C	46°C	32°C	27°C	35°C		

II.3.3 Variations des humidités intérieures et extérieures de l'air de séchage :

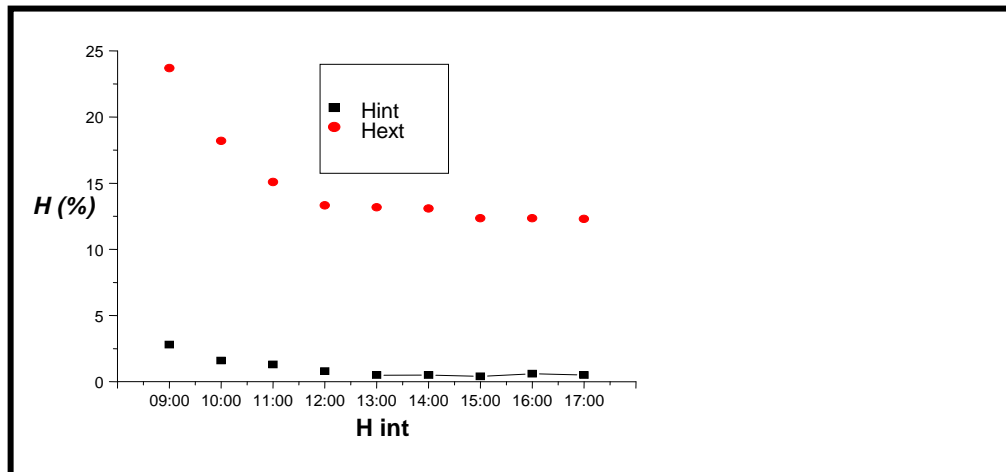


Figure (II.13) : Variation del'humidité intérieure et extérieure (indirect)

La figure (II.13) présente la variation des humidités relatives de l'air asséchant à l'intérieure d'un séchoir indirect et du milieu extérieure l'augmentation de température à l'extérieur à l'intérieur du séchoir engendre une diminution des humidités relative de l'air (Hext=13.09%, Hint=0.7%) pour les jours ensoleillée à température élevée.

II.4. Proposition des solutions pratique pour l'amélioration énergétique de séchoir solaire indirect :

II.4.1 Amélioration par résistance électrique à une température de 55°C:

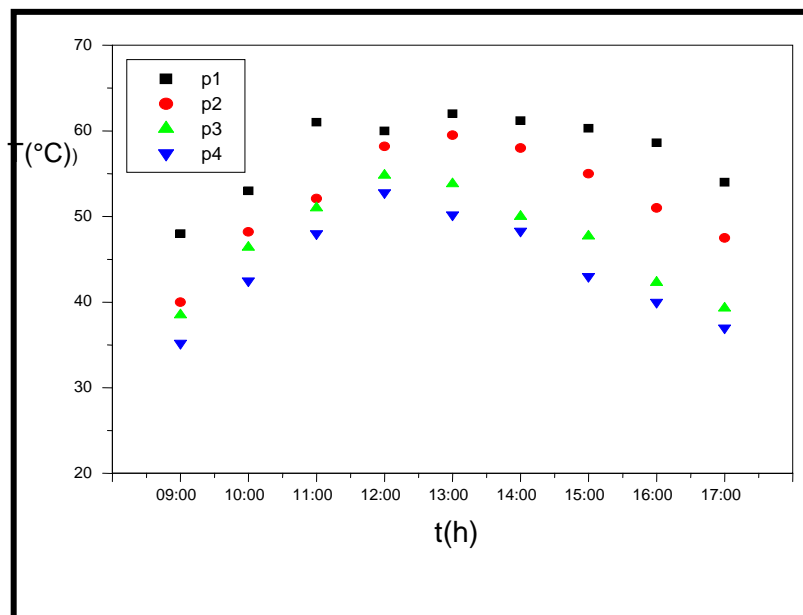


Figure (II.14) : Variations du profil de températures mesurées dans la chambre de séchage

La figure (II.14) montre l'importance du séchage solaire utilisant l'appoint de chauffage par résistance par rapport au séchage sans appoint, dans un séchoir solaire de type indirect fonctionnant en convection forcée. Ces résultats ont montré que la température de l'air de séchage sans utilisation d'appoint de chauffage n'a pu atteindre des valeurs élevées (séchoir à vide) pour différents positions du mesure température, par contre la température de l'air asséchant est augmentée considérablement dans la chambre avec utilisation de l'appoint, l'effet de joule par résistance électrique sert à augmenter les températures dans toutes les positions et surtout près de la position de la claie de séchage, le gain en de température est de 10°C.

II.4.1.1. Profil des températures et de rayonnement solaire dans le capteur solaire par résistance électrique :

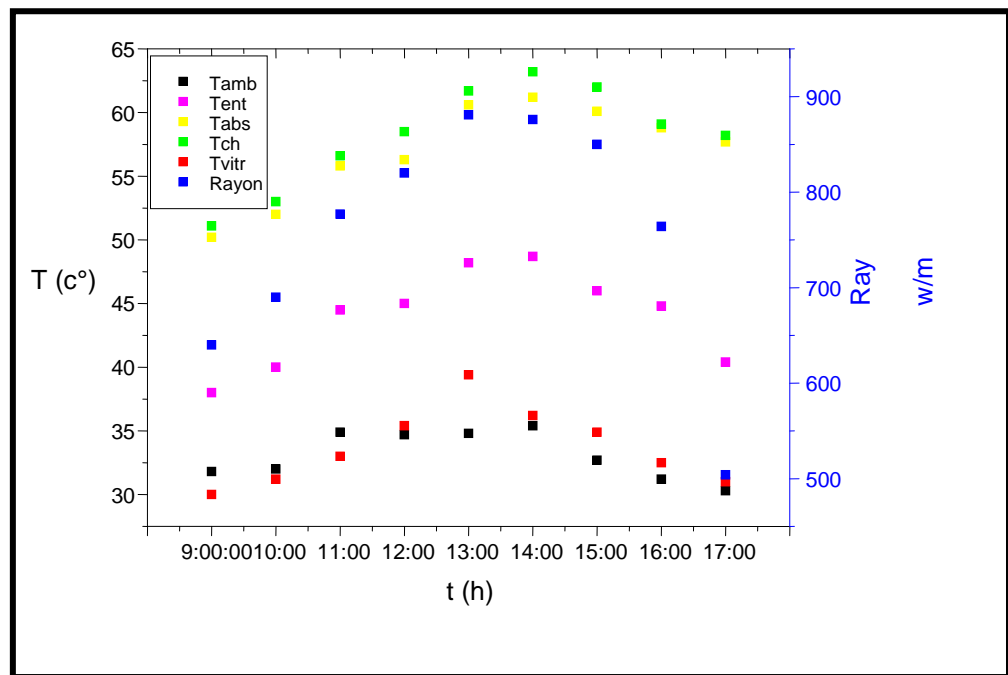


Figure II.15 : Variation des températures et rayonnement dans la capture solaire (indirect) par résistance électrique

La figure (II.15) présente la variation du rayonnement solaire (Rayon) et la distribution de la température en fonction du temps pour un essai de séchage où la température de l'air asséchant est mesurée dans cinq positions par résistance électrique, entrée de séchoir (Tent), sortie de séchoir (Tsort), au niveau de la vitre (Tvit), au niveau du capteur solaire et la température de l'air ambiant (Tamb). La courbe de distribution de la température dans le

séchoir indirect présente une similitude dans l'allure avec la courbe de l'éclairement global avec un léger décalage dans le temps. L'expérimentation s'est déroulée durant un jour ensoleillé, les valeurs max/min quotidiennes, des températures du produit et de l'air asséchant et le rayonnement solaire varient selon le tableau (II.2).

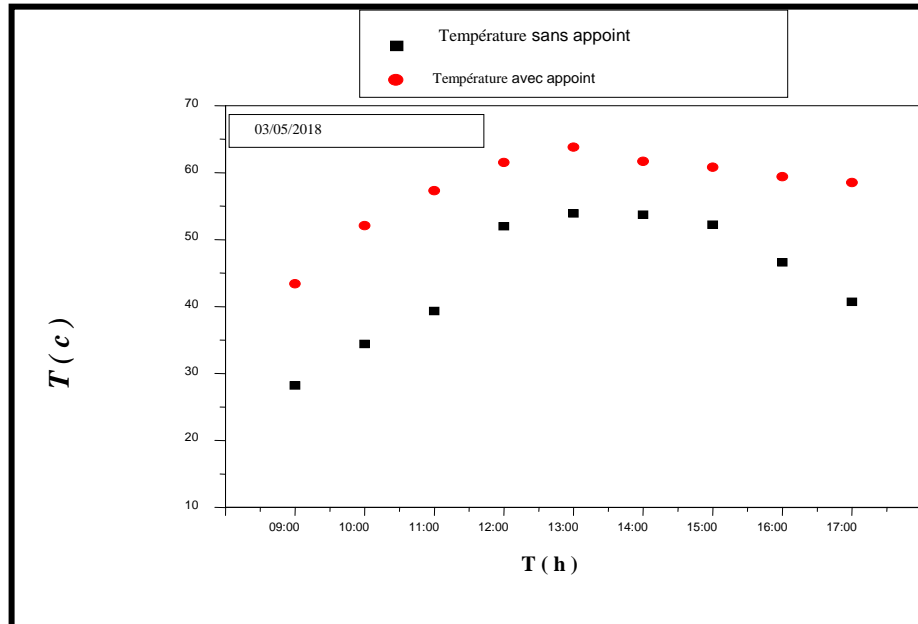
03/05/2018	T_{ent}	T_{ent}	T_{abs}	T_{abs}	T_v	T_v	T_{srt}	T_{srt}	T_{amb}	T_{amb}	Ray	Ray
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
	26	35	37	58	32	43	43	61.4	32	40	409	1173
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	w/m2	w/m2

Tableau (II.2) : Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement solaire dans le capteur solaire par résistance électrique

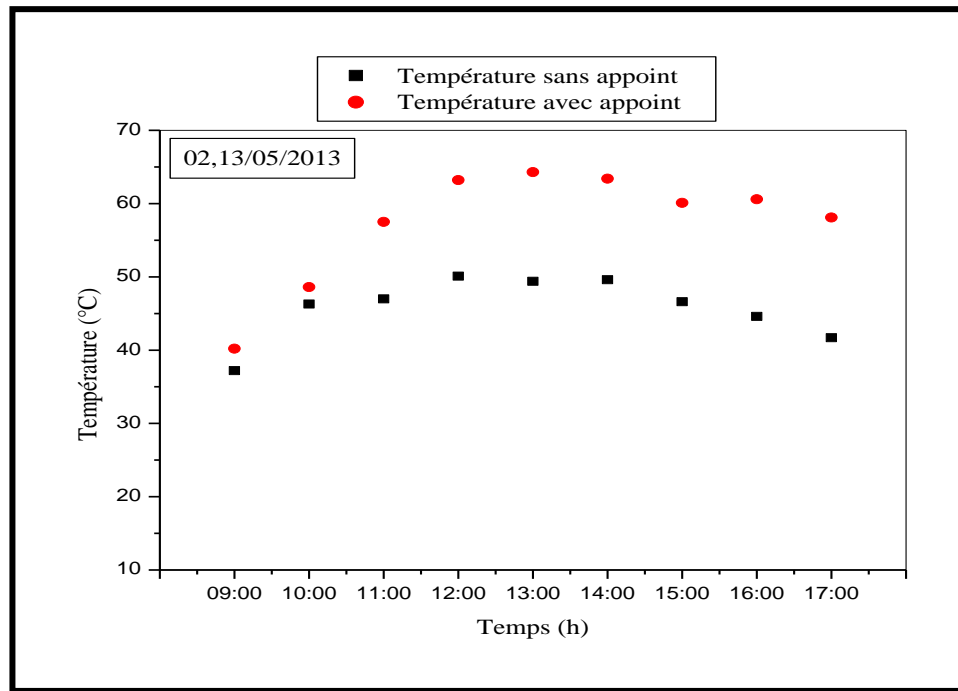
II.4.2 Amélioration par échangeur de chaleur :

II.4.2.1 Variation de la température de l'air à l'intérieur de la chambre de séchage :

Les relevés des températures de l'air dans la chambre de séchage avec et sans appoint pour différentes journées sont présentés sur les figures (II.13) (A, B).



(A)



(B)

Figure (II.16) (A, B) : Relevé des températures de l'air dans la chambre de séchage avec et sans appoint lors du séchage à température variable

D'après les résultats obtenus, on peut remarquer l'augmentation de la température de l'air asséchant avec utilisation de l'appoint par échangeur de chaleur fonctionnant par eau géothermique. Pour le fonctionnement du séchoir solaire sans appoint la température maximale de l'air est de 53,9°C avec une valeur moyenne de 45,3°C. L'élévation de la température est due à l'apport de chaleur dû au capteur solaire, notamment au milieu des journées où le rayonnement solaire atteint son maximum. Pour le fonctionnement du séchoir solaire avec utilisation d'un appoint par échangeur de chaleur fonctionnant par eau géothermique, la température de l'air dans la chambre atteint 64,3°C avec une valeur moyenne est de 57,4°C ce qui écourte la durée de séchage des produits séchés.

II.4.2.2 Effet du rayonnement sur la température :

La figure (II.16) présente la variation du rayonnement solaire et la distribution de la température en fonction du temps où la température de l'air asséchant est mesurée dans trois positions, l'entrée, la sortie du capteur solaire, et le milieu extérieur.

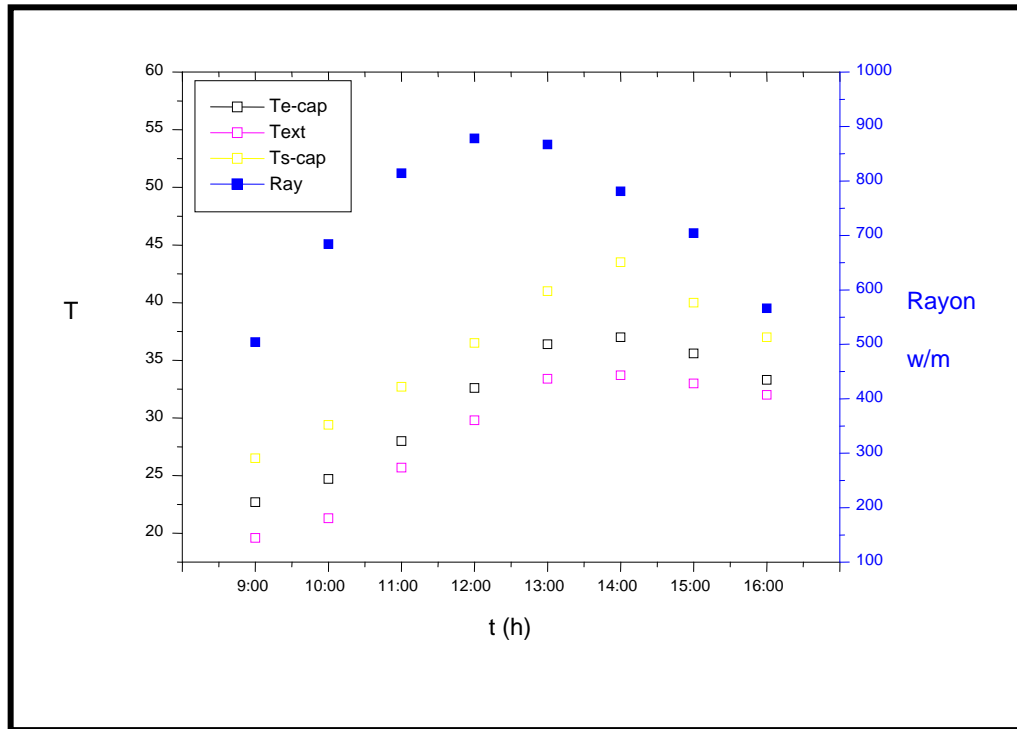


Figure (II.17): Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du Temps(h)

La figure (II.17) montre la variation de la température de l'air ambiant, la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur solaire, et les rayonnements solaires en fonction du temps. On remarque que l'allure des températures est identique à celle du rayonnement solaire. Pendant le jour de séchage solaire, les valeurs moyennes quotidiennes d'air ambiant, la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur et le rayonnement solaire varient selon le tableau suivant. Elles ont atteint leurs valeurs maximales entre 12 h et 14 h.

On peut aussi observer une élévation de température significative entre l'entrée et la sortie du capteur solaire ($T_{e \text{ max}}=37^{\circ}\text{C}$, $T_{s \text{ max}}=43,5^{\circ}\text{C}$). Cette différence atteint un maximum de $6,5^{\circ}\text{C}$, pendant la durée de l'expérience. L'écart est dû à l'influence du rayonnement solaire sur l'absorbeur et à l'effet de serre qui en résulte entre l'absorbeur et la vitre qui joue un rôle important dans l'échauffement de l'air circulant à l'intérieur du capteur solaire.

Tableau (II.3) : Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement

03/05/2018	Te-cap max	Te-cap min	Tex max	Tex Min	Ts-cap max	Ts-cap Min
	37°C	22,7°C	33 °C	19,6°C	43,5°C	26 °C

II.4.2.3 Variation des paramètres extérieurs de l'air asséchant en fonction du Temps(h) :

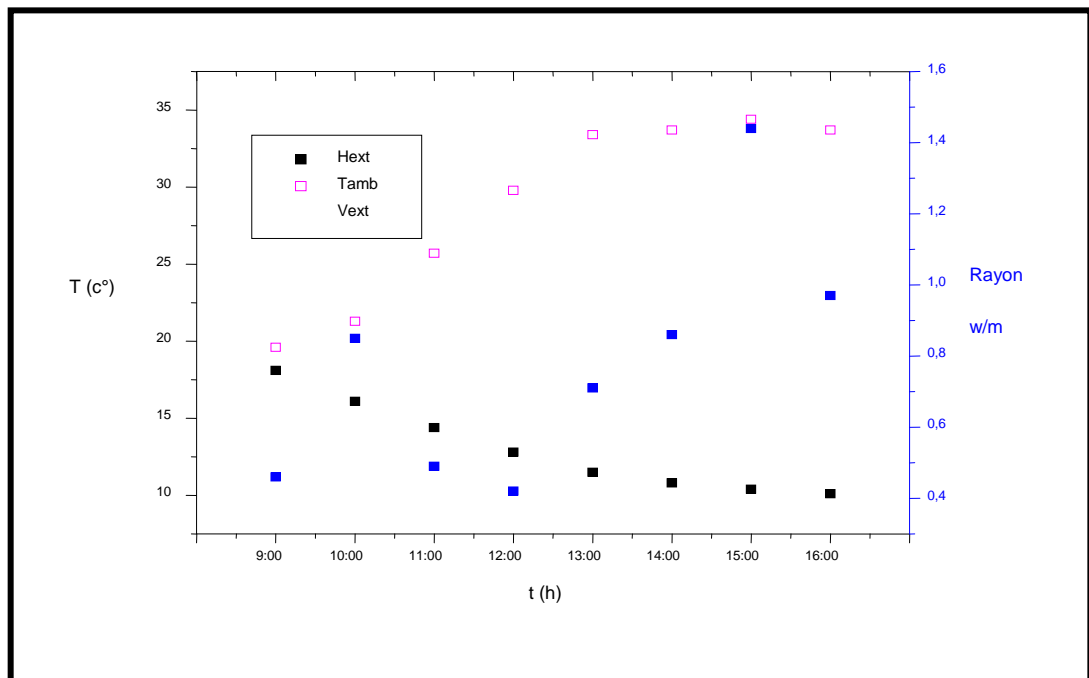


Figure (II.18) : Variation des paramètres extérieurs de l'air asséchant en fonction du Temps(h)

La figure (II.18) présente la variation des paramètres extérieurs (Vext, Hext, Text) de l'air asséchant la chambre de séchage. Les valeurs minimales et maximales de l'humidité relative et de vitesse de l'air sont respectivement (t Hext max = 27,3 % et Hext min = 13,4 % et Vent max=1,4 m/s et Vent min = 0,08 m/s).

II.5 Etude de comportement thermique à vide de séchoir solaire direct à convection forcée :

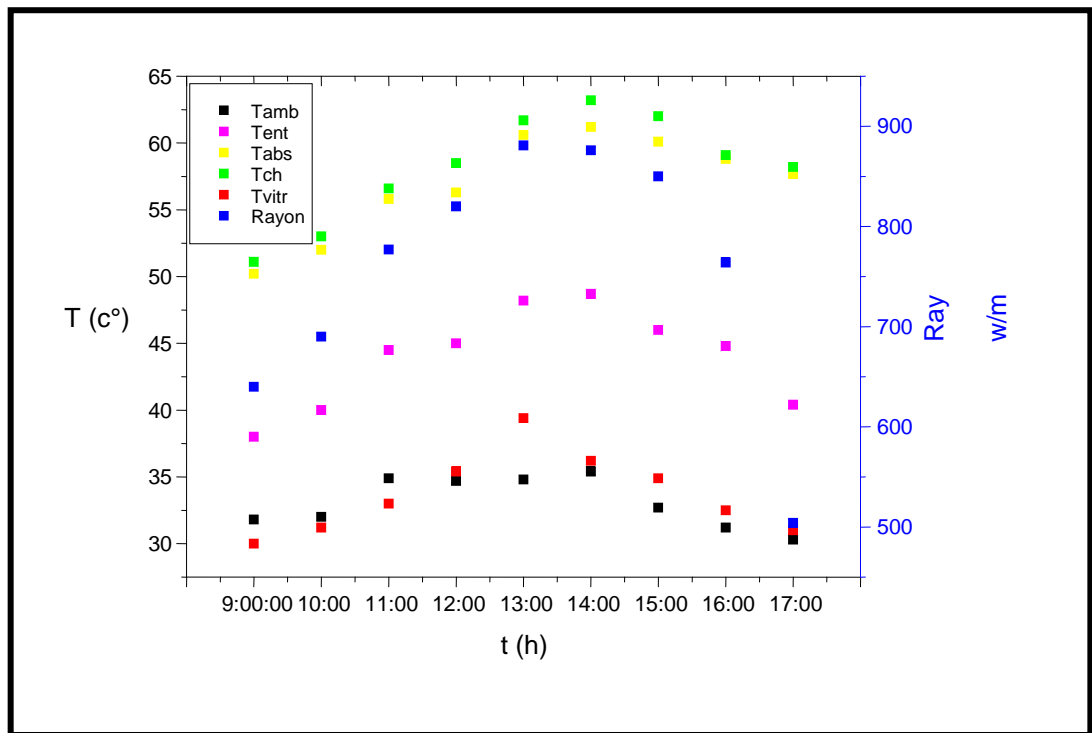


Figure (II.19) : Variation des températures dans le séchoir solaire (direct)

La figure (II.19) présente la variation du rayonnement solaire (Rayon) et la distribution de la température en fonction du temps pour un essai de séchage où la température de l'air asséchant est mesurée dans cinq positions, entrée de séchoir (Tent), sortie de cheminée (Tchm), au niveau de l'absorbeur (Tabs), au niveau de la vitre (Tvittr), la température ambiante (Tamb) et . La courbe de distribution de la température dans le séchoir direct présente une similitude dans l'allure avec la courbe de l'éclairement global avec un léger décalage dans le temps L'expérimentation s'est déroulée durant un jour ensoleillé, les valeurs min/max quotidiennes, des températures de l'air asséchant et le rayonnement solaire varient selon le tableau (II.4). Elles ont atteint les valeurs maximales entre (12h et 14h30). Pour cette expérience de séchage, les valeurs de l'éclairement global varient entre 1047 et 409 W/m² avec un pic vers 12 :00: .On remarque sur la figure (II.16) un l'écart important entre la température de l'air ambiant. Et la température à l'intérieur du séchoir direct, il est dû à l'influence du rayonnement solaire sur l'absorbeur qui joue un rôle important pour l'échauffement de l'air sous l'effet de serre à l'intérieur du séchoir direct .On constate que les températures à l'intérieur du séchoir direct sont élevée Tchm varie entre T min= 52 °C et T max=57.1°C Tabs varie entre Tmin=44°C et T max=56.5°C donc le séchoir direct nous

assure des conditions opératoires favorables pour assurer en régime variable.

Tableau II.4 : Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement solaire dans le séchoir solaire direct

02/05/2018	T_{ent}	T _{ent}	T _{abs}	T _{abs}	T_v	T_v	T _{chm}	T _{chm}	T _{amb}	T _{amb}	Ray	Ray
	Min	max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
	38	55	44	56,5	27	37	52	57,1	28	39	409	1073
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	w/m ²	w/m ²

II.5.1 Variation des humidités relative de l'air à l'intérieure et l'extérieur du séchoir solaire direct :

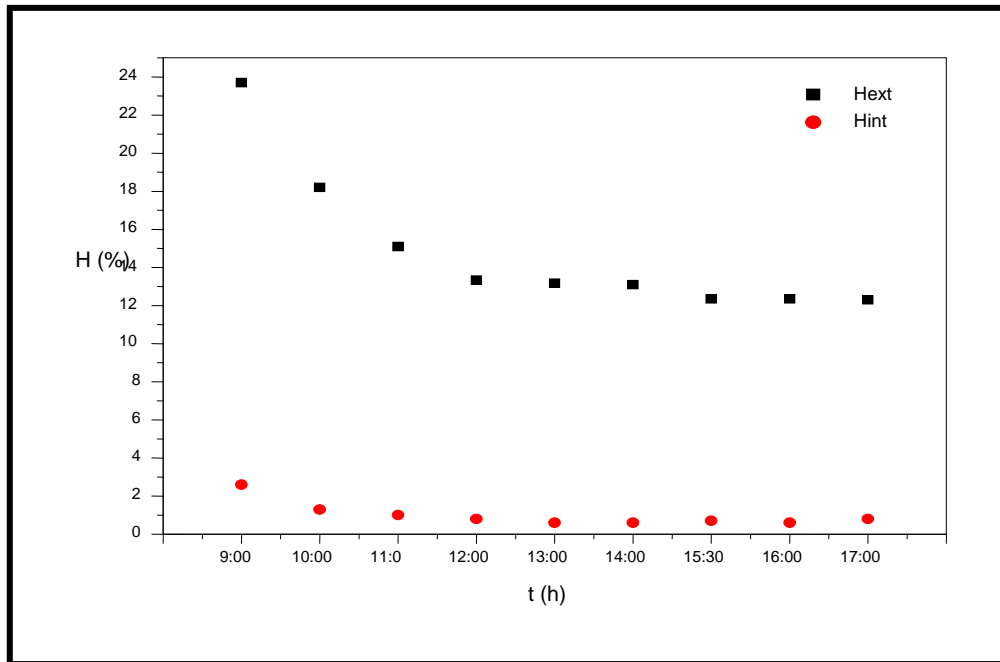


Figure (II.20) : Variation l'humidité intérieure et extérieure (direct)

La figure (II.20) présente la variation des humidités de l'air à l'extérieur et à l'intérieur de la chambre de séchage. L'évolution de l'humidité de l'air varie d'une façon opposée à l'évolution de la température de l'air à l'intérieur du séchoir. En effet, l'augmentation brusque de la température de l'air asséchant par le contact air absorbeur ainsi que le transfert convectif, diminue considérablement l'humidité. Pour le jour de séchage, les valeurs minimales de l'humidité de l'air à l'intérieur du séchoir direct sont respectivement 0,6; 0,7; 0,8 % dans

l'intervalle de temps compris entre 13h00 et 16h00 où la température de l'air asséchant atteint sa plus grande valeur qui correspond à un flux solaire maximum.

II.5.2. Amélioration de fonctionnement par échangeur thermique :

Pour assurer une opération de séchage solaire direct en continue (pendant la nuit ou dans le cas des journées nuageux), nous proposons de tester le fonctionnement de séchoir par la mesure des températures et de rayonnement dans le cas de l'augmentation de fraction d'énergie provenant de l'échangeur air/eau couplé à un simulateur d'eau chaude et fonctionnant à une température de 60°C [1].

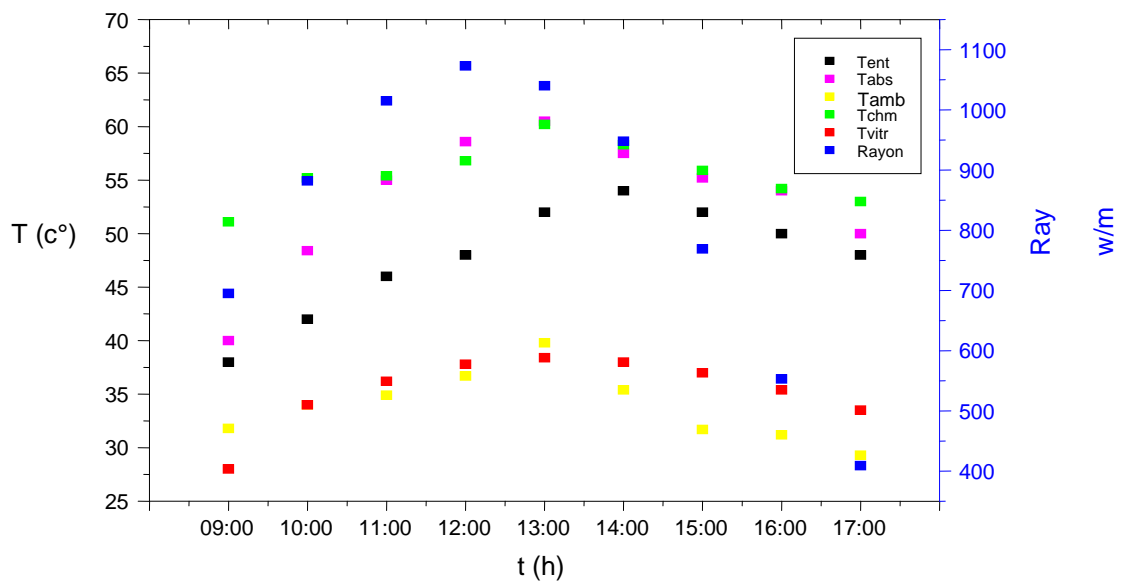


Figure (II.21) : Variation des températures dans le séchoir solaire (direct) muni par appoint énergétique

TableauII.5 : Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement solaire dans le séchoir solaire direct

03/05/2018	T_{ent}	T_{ent}	T_{abs}	T_{abs}	T_v	T_v	T_{chm}	T_{chm}	T_{amb}	T_{amb}	Ray	Ray
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
	338°C	48,7	50,2	61,2	30	39,1	52	63,2	51,1	35,5	504	881
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W/m2	W/m2

Il est à noter que l'évolution horaire de la température des composants du séchoir serre (couverture, absorbeur, ambiant et intérieur) est similaire à celle de l'éclairement solaire quelque soit les conditions extérieures rencontrés dans l'expérience. La température de la chambre et la température de l'absorbeur au cours de la journée sont supérieures à celle des autres composants. Cela est due à l'effet multiple de l'échangeur thermique air/eau et de flux solaire absorbé par l'absorbeur dont une partie contribue à l'accroissement de sa température. Il est à noter que les températures les plus élevées sont obtenues comme pour celle de l'air asséchant. L'intérêt de l'échangeur est apparu qu'à partir de (coucher du soleil), les températures de l'air asséchant et des composants du séchoir, reste élevées à l'exception de la face supérieure de couverture diminuent jusqu'à atteindre les températures de l'air ambiant.

L'apport de l'énergie par échangeur à l'intérieur de séchoir direct compense les déperditions thermiques entre la couverture et son environnement. Il en résulte une élévation des températures de la chambre même après accroissement du flux net radiatif entre l'absorbeur et l'intérieur du séchoir direct.

Pour cette expérience de séchage, les valeurs de l'éclairement global varient entre 1047 et 409 W/m^2 avec un pic vers 12 :00: .On remarque sur la au figure (II.18) que la température à l'intérieur du séchoir direct sont élevée T_{chm} varie entre $T_{min}= 52\text{ }^{\circ}C$ et $T_{max}=57,1^{\circ}C$ T_{abs} varie entre $T_{min}=44^{\circ}C$ et $T_{max}=56,5^{\circ}C$ donc le séchoir direct nous assure des conditions opératoires favorables donc le procédé de séchage continu (avec appoint), dans les zones arides, où les sources en eau albienne est en abondance, présente un grand intérêt économique et industriel.

Chapitre III

*Simulation numérique de
fonctionnement du séchoir solaire
indirect à convection forcée*

A cause de l'absence d'homogénéité de distribution de température dans le séchoir indirect nous voulons introduire dans notre expérience le simulateur FLUENT pour étudier l'écoulement de l'air dans la géométrie de notre séchoir vide et nous interprétons les résultats pour améliorer les performances du séchoir solaire indirect à convection forcée.

III.1. Le code FLUENT : [16]

Le logiciel FLUENT est un code industriel qui comprend trois entités complémentaires utilisées dans le but de simuler, à l'aide de modèles mathématiques, des phénomènes physiques qui font intervenir du transfert de masse, de quantité de mouvement ou d'énergie.

III.2. Description du logiciel Fluent : [18]

➤ Domaine d'application :

FLUENT est un logiciel largement utilisé dans le domaine de la mécanique des fluides, il permet de modéliser tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques et ce, sur les géométries complexes industrielles. La solution Fluent inclut également un environnement CAO et un mailleur paramétrique, permettant de mettre en place les modèles numériques ou de s'intégrer aux outils de conception déjà existants.

Les domaines d'application sont nombreux et variés tels que :

- Air conditionné, chauffage.
- Production d'énergie.
- Electronique, informatique.
- Turbomachines.
- Chimie de procédés.
- Automobiles
- Biotechnologie.
- Fabrication de matériaux.
- Aéronautique.
- Environnement.

➤ **Caractéristique :**

Le logiciel FLUENT possède les caractéristiques suivantes :

- La résolution des équations de Navier-Stokes dans des repères fixes ou tournants
- Technique de volumes finis précise au second ordre.
- Maillages structurés ou non, déformables, du triangle en 2D à l'hexaèdre en 3D permettant une construction simple, rapide et automatisée.
- Maillage dynamique, glissant et déformable.
- Maillage auto adaptatif à la solution améliorant la précision des zones à forts gradients.
- Interpolation automatique de la solution sur le maillage affiné.
- Convergence accélérée par schéma de multi grille.
- Nombreuses conditions limites pour écoulements externes et internes.
- Programme parallélisé et vectorisé.

➤ **Types d'écoulements :**

- Stationnaires ou transitoires, en 2D, 2D axisymétriques ou 3D dans des géométries complexes.
- Laminaires ou turbulents (modèles K-eps, RNG ou RSM).
- Transferts de chaleur couplés par conduction, convection et rayonnement avec ou sans source de chaleur internes.
- Incompressibles ou compressibles (subsonique, transsonique et supersonique).
- Mélanges d'espèces avec ou sans réactions chimiques.
- Ecoulements diphasiques dispersés (particules, gouttelettes, bulle).
- Ecoulements diphasiques non dispersés (gaz, liquides, lits fluidisés).
- Ecoulements en repères tournants.
- Ecoulements laminaires non Newtoniens.

➤ **Utilisation de FLUENT :**

Les étapes à suivre pour l'utilisation du logiciel FLUENT se résument en :

1. Lancement de FLUENT.
2. Chargement du fichier de maillage.
3. Vérification du maillage.
4. Définition du modèle: cette étape permet de définir le modèle physique utilisé, les caractéristiques du fluide et les conditions aux limites.
5. Contrôle de la convergence : un tracé des résidus permet d'observer la convergence de la résolution.
6. Résolution du problème après l'initialisation des calculs.
7. Affichage des résultats.

➤ **Les conditions aux limites :**

Les conditions aux limites définissent les variables physiques et thermiques qui dépendent de l'écoulement dans les frontières du domaine physique à étudier, se sont des composantes très importantes, et critiques pour la simulation par Fluent. Leur choix est un facteur très important pour avoir des résultats avec plus de précision.

La définition des conditions limites comprend :

- L'identification de la position des limites (entrée, sortie, parois ...etc.).
- Les propriétés physiques dans les limites du domaine (Vitesse, température,...etc.).

Les conditions aux limites sont classées dans FLUENT comme suit :

1. Les limites d'entrée et de sortie : pression d'entrée, pression de sortie, vitesse d'entrée, masse volumique d'entrée, pression d'environnement, écoulement de sortie.
2. Les limites des parois, répétitions et poteaux : paroi, symétrie, périodique et axe les zones internes : fluide et solide (milieu poreux est considéré comme un type de fluide).
3. Les limites des faces internes : ventilateur, radiateur, paroi, milieu poreux.

III.2.1. Présentation de Gambit : [19]

Le logiciel Gambit est un meilleur 2D/3D ; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computayion Fluid Dynamics). Il génère des fichiers*.msh pour FLUENT. FLUENT est un logiciel qui permet de résoudre et simuler des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques par la méthode des volumes finis. [17]

Gambit regroupe trois fonctions :

- Définition de la géométrie du problème.
- Le maillage et sa vérification.
- La définition des frontières (Types de condition aux limites) et définitions des domaines de calculs.

III.2.1.1. Maillage :

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Ces menu permet se mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les noeds avec des conditions formes différentes de maillage. Il y'a plusieurs types da maillage

- Maillage hybride
- Maillage non structuré (tri /tétra)
- Maillage structuré (quad/submap).

III.2.1.2. Présentation de Fluent :

1. Importation de la géométrie :

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit.

File → **Read** → **Case...**

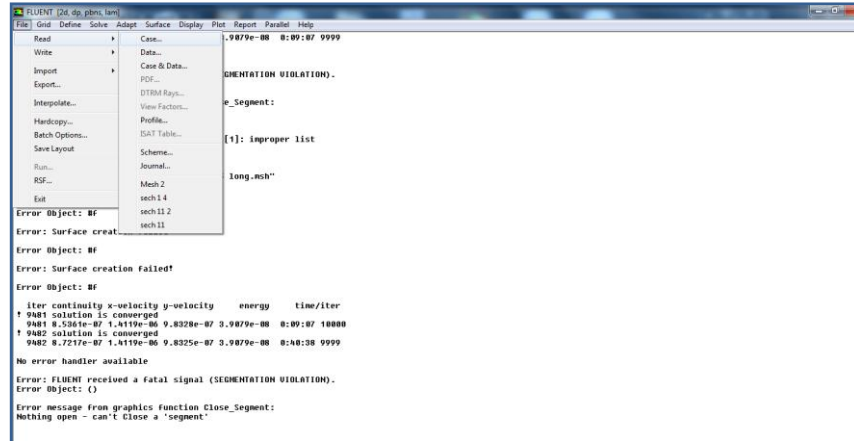


Figure III.1 : Importation de la géométrie

2. Vérification du maillage importé :

Grid → Check

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs.

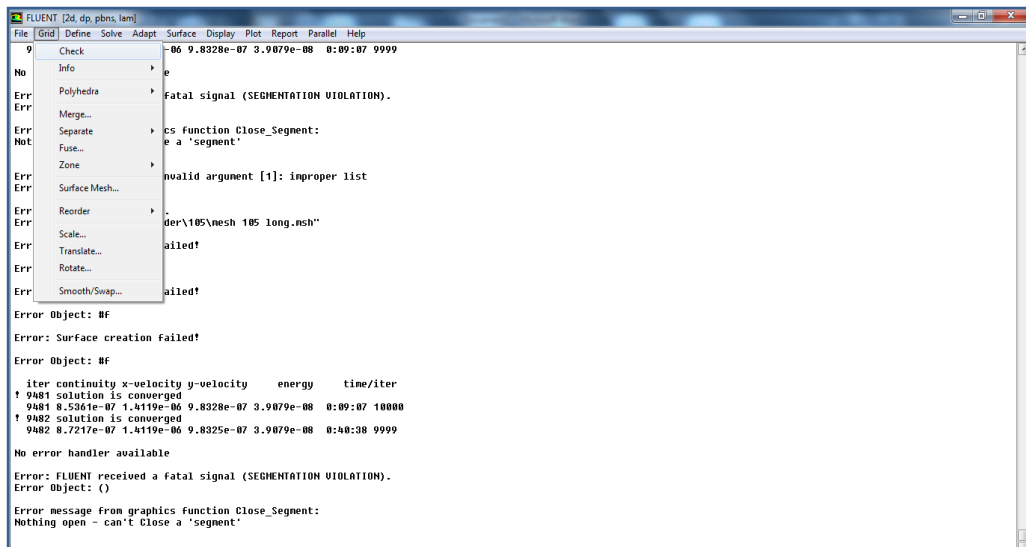


Figure III.2 : Vérification du maillage importé

3. Vérification de l'échelle :

Grid → Scale

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème.

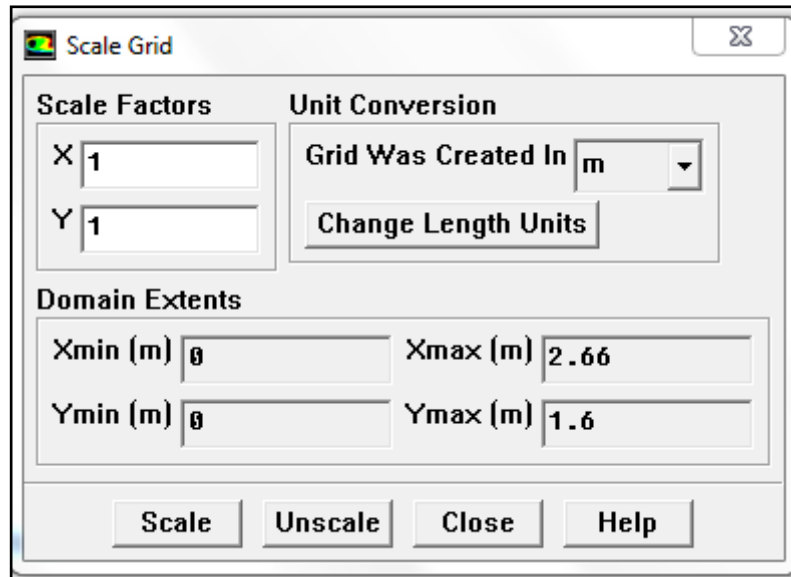


Figure III.3 : Vérification de l'échelle

4. Choix du solveur :

Define → Models → Solver

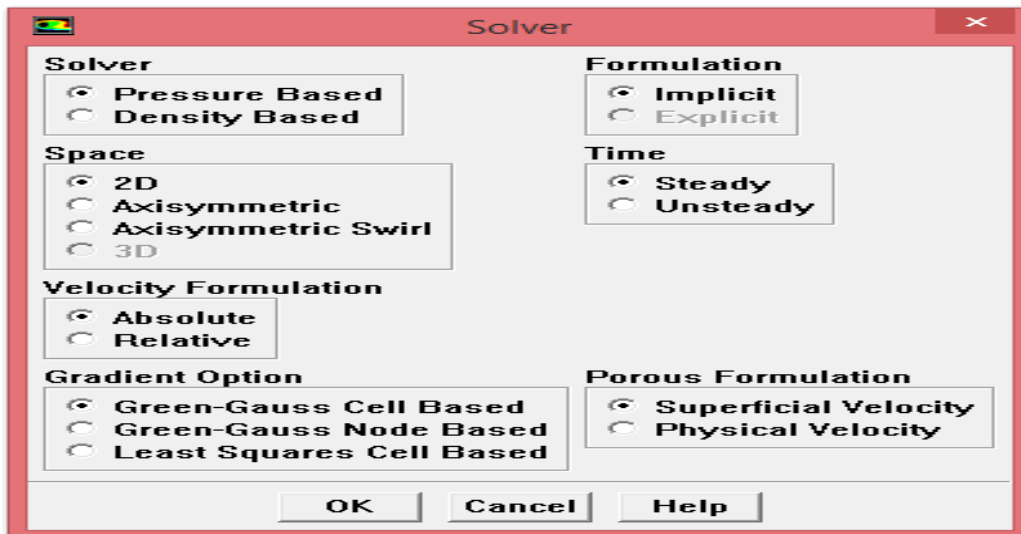


Figure III.4 : Choix du solveur

- **Segregated Solver** : est le plus approprié pour les écoulements incompressibles (ventilateur, pompes...)
- **Coupled Solver** : les solveurs « coupled implicit » et « coupled explicit », sont plutôt réservés aux écoulements compressibles à grande vitesse.

C'est là aussi qu'on choisit le régime d'écoulement ; permanent ou instationnaire.

5. L'équation de l'énergie :

Define → Models → Energie...

L'instruction énergie doit être activée pour l'étude du champ thermique.

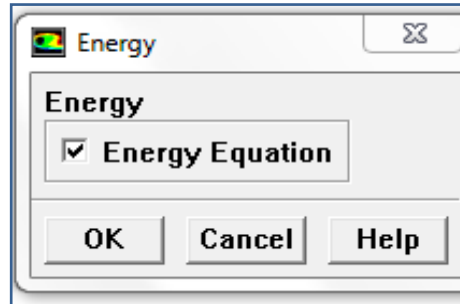


Figure III.5 : L'équation de l'énergie

6. Définition des caractéristiques du fluide :

Define → Materials

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent.

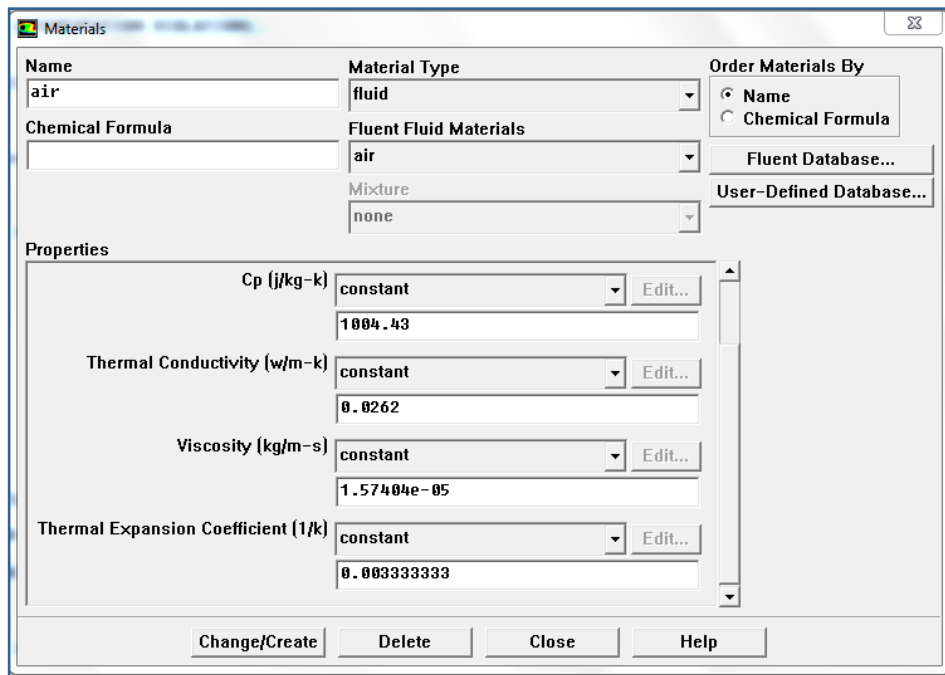


Figure III.6 : Définition des caractéristiques du fluide

7. Operating conditions

Define → Operating condition

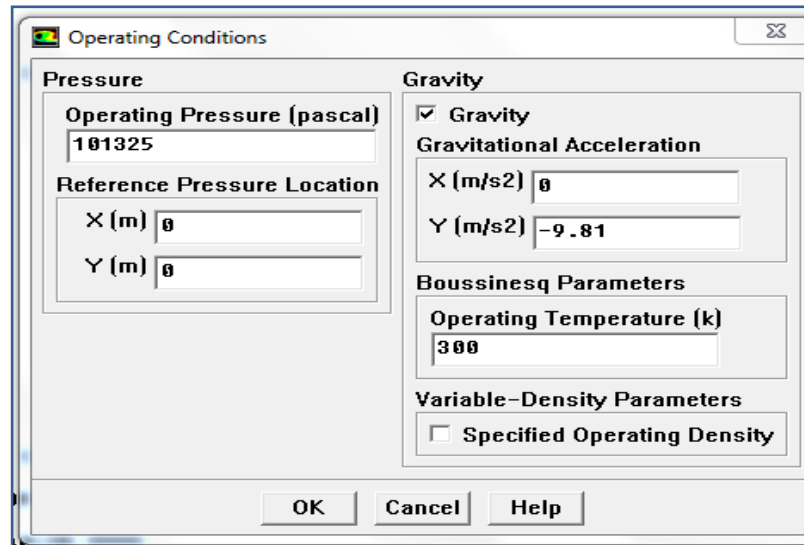


Figure III.7 : Choix de la pression de référence

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence « Operating conditions ».

8. conditions aux limites :

Define \longrightarrow Boundary conditions

En suite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites.

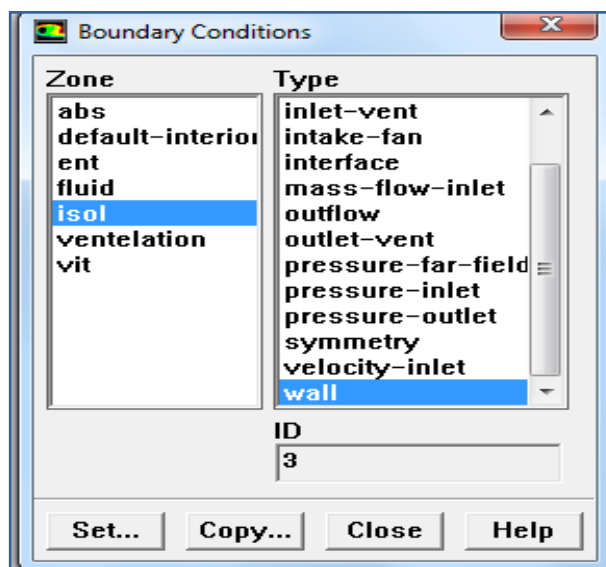


Figure III.8 : conditions aux limites

9. Choix d'ordre des équations et l'algorithme :

Solve \longrightarrow Controls \longrightarrow Solution...

Ceci permet de spécifier le degré d'ordre des équations à résoudre, ainsi l'algorithme.

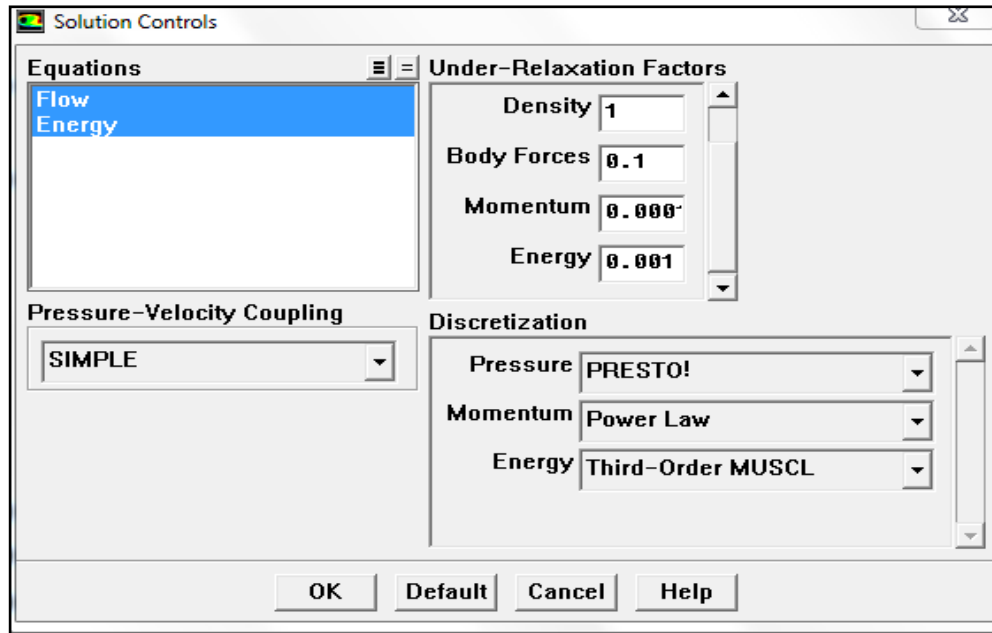


Figure III.9 : Choix d'ordre des équations et l'algorithme

10. Initialisation :

Solve → Initialize → Initialize...

Cette fonction permet d'initialisé le calcul.

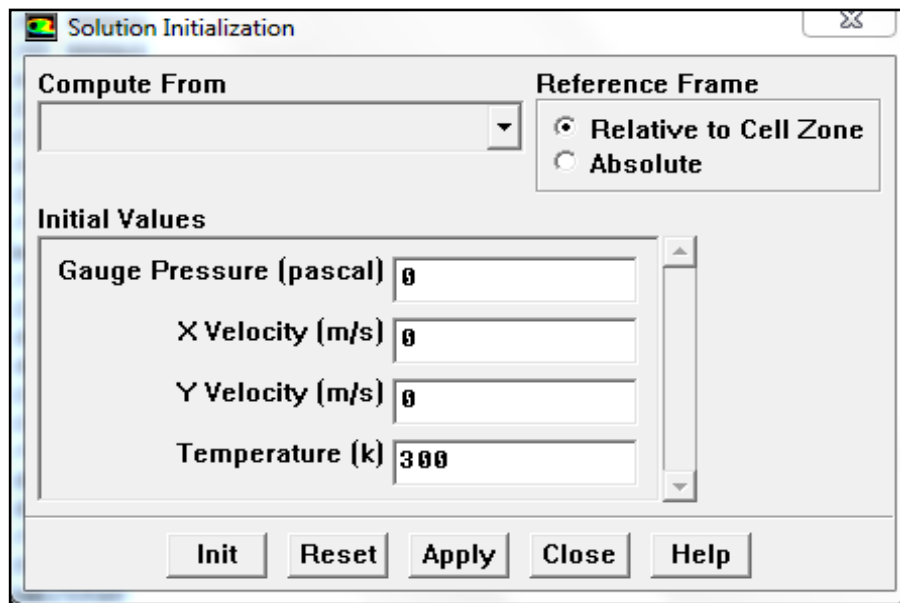


Figure III.10 : Initialisation

11. Choix des critères de convergence :

Solve → Monitors → Residual...

Il s'agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent.

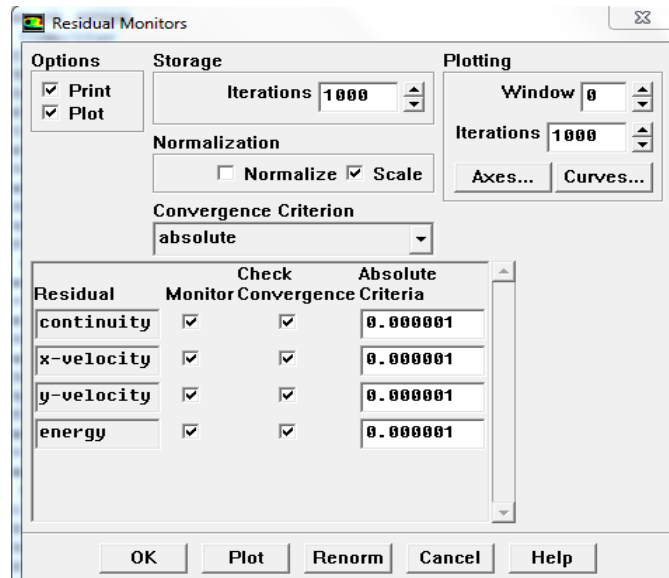


Figure III.11 : Choix des critères de convergence

Pour afficher la convergence à l'écran pendant les calculs sous forme d'un graphe, il faut activer l'option Plot. Il est possible de désactiver certains critères d'arrêt de la simulation en décochant la case de convergence.

12. Lancement du calcul :

Solve \longrightarrow Iterate ...

Pour commencer les calculs il faut d'abord choisir le nombre des itérations.

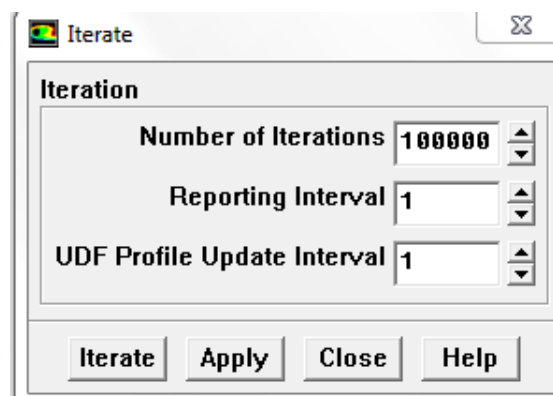


Figure III. 12 : Choix du nombre des itérations

III.2.2 Simulation du séchoir à l'état original :

L'objectif de cette partie de travail de simulation est la validation du modèle mathématique, adapté et mis en application sur logiciel, et ce par la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux.

III.2.2.1 Choix du maillage :

Pour un maillage précision et une meilleure stabilité, nous avons adopté un maillage quadrilatéral structuré à multi bloc formé de lignes continues à travers le domaine, qui suivent au mieux le contour des surfaces définissant la géométrie. Après des tests de précision, un maillage de 300 cellules a été adopté.

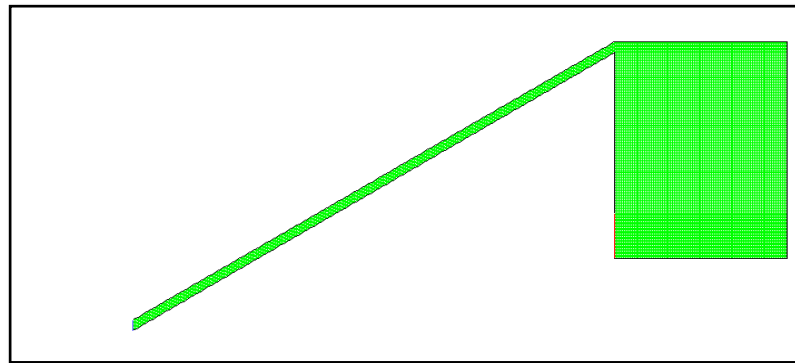


Figure III.13 : Schéma de maillage

III.2.2.2 La convergence :

L'algorithme simple est utilisé pour résoudre le couplage entre la pression et la vitesse dans les équations de continuité et de quantité de mouvement l'équation d'énergie et résolue numérique en utilisant le modèle de radiation. Une solution numérique est prise convergée lorsque les résidus pour les différentes grandeurs physique deviennent inférieure à 10^{-5}

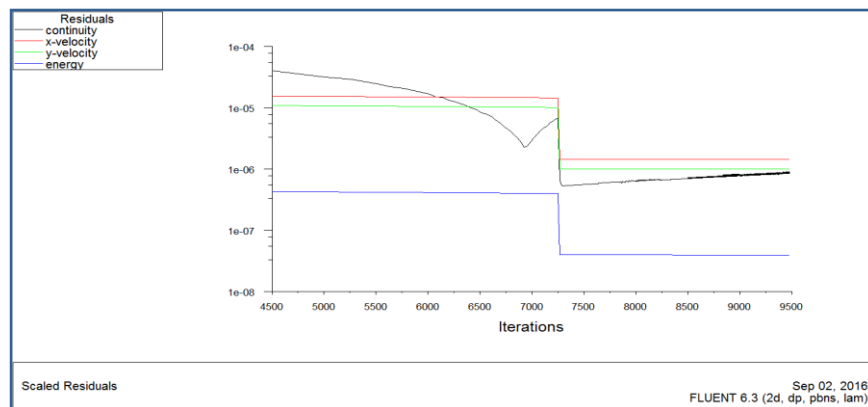


Figure III.14 : Convergence des résultats

III.3. Simulation du cas des conditions de la journée typique de Mai :

A fin de validation du phénomène étudié dans autres conditions climatiques nous avons refait les mêmes calculs de simulation mais en considérant les données (entrées) correspondantes à celles mesurées pour une journée typique du débit de Mai. Elles sont données par le tableau (III.1) ci-dessous.

Tableau III.1 : Les conditions aux limites du Mai

Journée	Ve (m/s)	Te (K)	Tabs (K)	Tv (K)
Mai	2	305	330	319

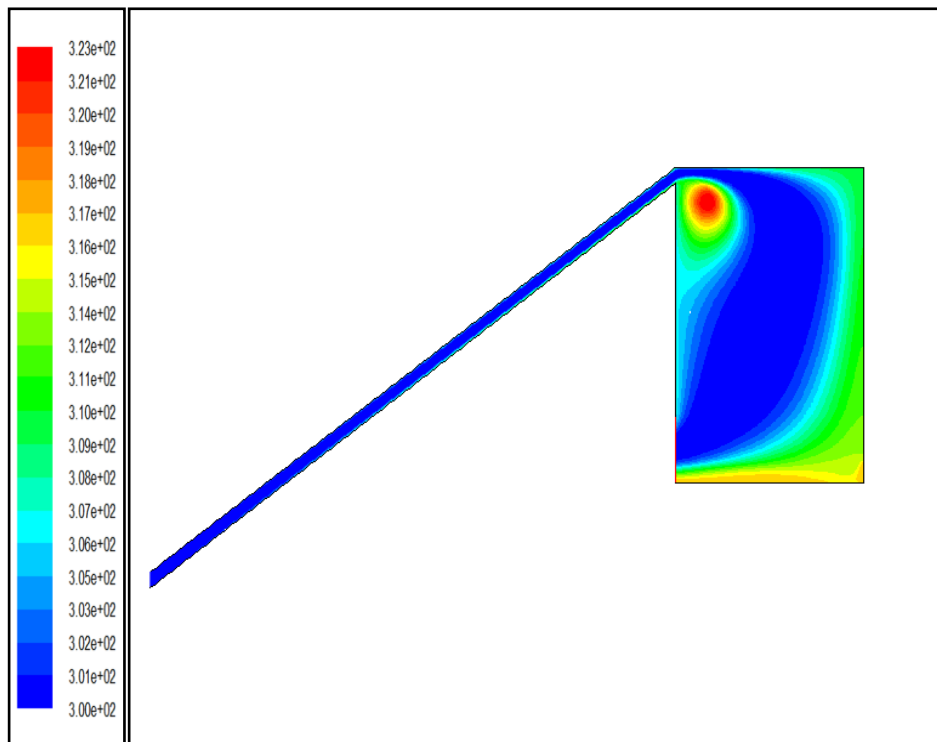


Figure III.15 : Distribution de température

La figure (III-15) montre la variation des températures pour le séchoir solaire indirect sans intégration des appoints énergétiques, on constate que distribution de température est instable et variable avec présence des hétérogénéités dans la chambre où la grande partie centrale est froide, les zones de la partie droite et près de la sortie capteur et entrée de la chambre sont assez chaudes.

III.4. Simulation des modifications du dimensionnement de la chambre de séchage:

Dans ce qui suit on va modifier la forme du séchoir en modifiant la longueur, la largeur L'ensemble des modifications est résumé comme sur le (Tableau III.2) ci-dessous.

Tableau III.2 : modification du dimensionnement de la chambre de séchage

Paramètres	Symboles et valeurs	conception
Largeur de chambre de séchage	$l = 2,3\text{m}$	C1
Longueur et ventilation	$L = 1,20$	C2

On note ici que dans la suite de présentation et discussion des résultats on se restreint à exposer les résultats correspondants.

III.4.1.Effet de la variation de la longueur (conception C1) :

Dans ce premier cas nous allons modifier la largeur de la chambre, les autres paramètres étant maintenus aux valeurs initiales.

Tableau III.3 : Les paramètres du premier cas de modification

Paramètres	Valeurs initiale	Valeur modifié
Longueur : L (m)	1,6	1,6
Largeur : l (m)	2,66	2,3

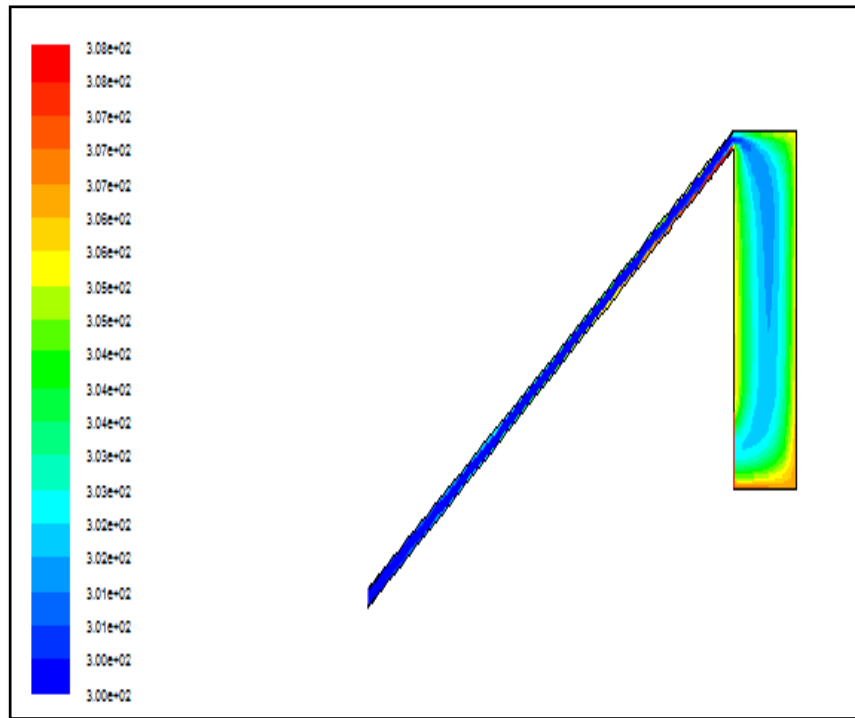


Figure III.16 : Distribution des températures pour C1

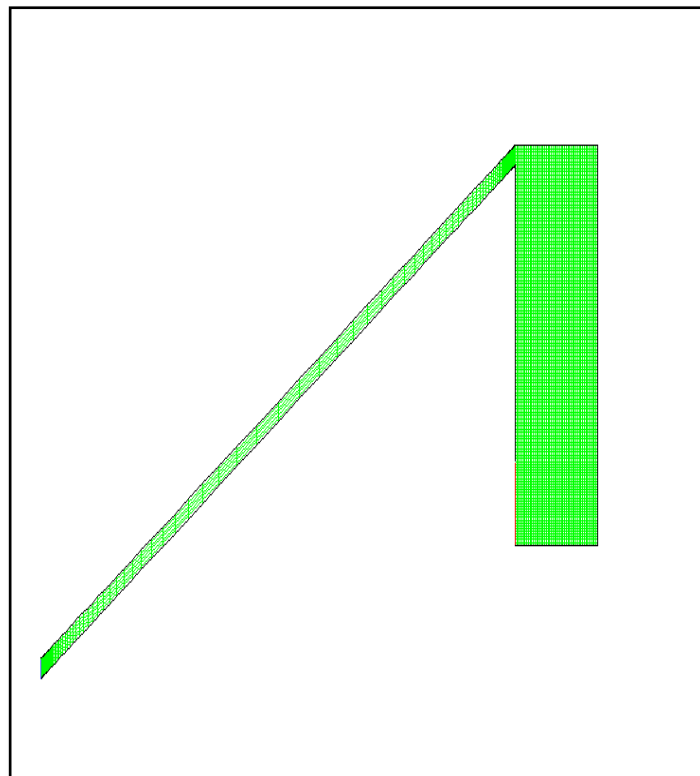


Figure III.17 : le schéma de maillage pour C1

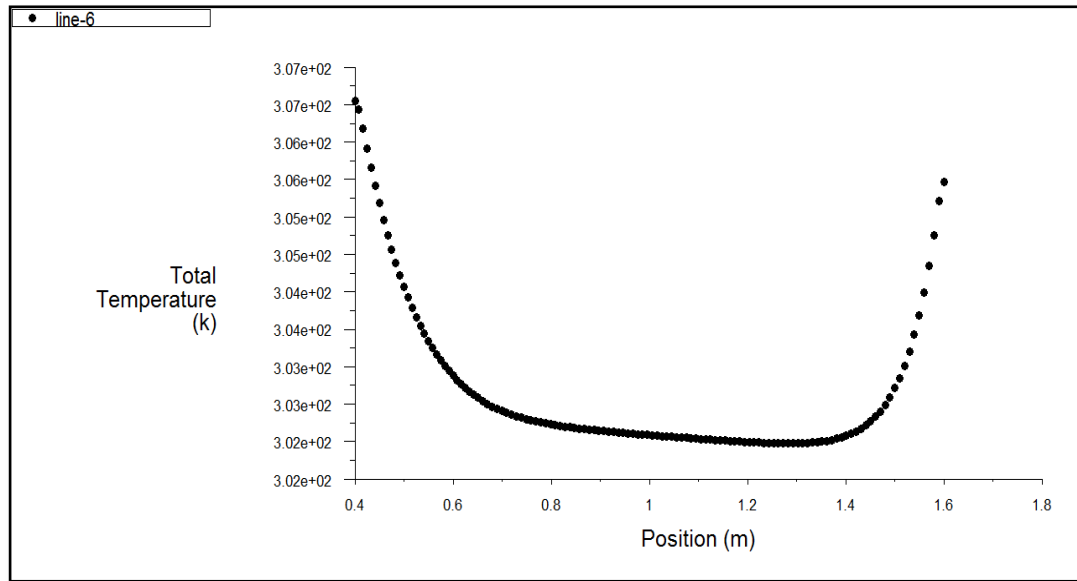


Figure III.18 : courbe d'évolution de température pour C1

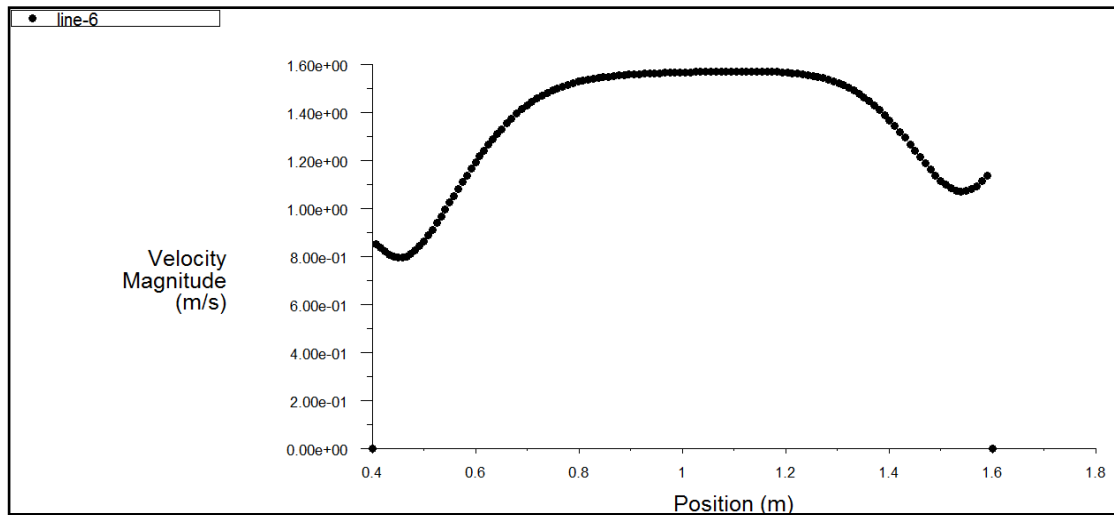


Figure III.19: courbe d'évolution de vitesse pour C1

La figure (III-17) présente la distribution de température de l'air à l'intérieur de la chambre de séchage dans le cas des modifications des dimensions de la chambre (largeur=2.3m et longueur= 1.6m) après simulation des plusieurs modifications des dimensions , on constate des zones chaudes à température élevée sur toutes les partie droite et gauche , la distribution des températures dans la zone centrale de la chambre est assez élevée par apport aux les lignes droites et gauches.

III.4.2.Effet de la variation de longueur et ventilateur (conception C2) :

Tableau III.4 : Les paramètres de douzième cas de modification

Paramètre	Valeurs initiale	Valeur modifié
Longueur : L (m)	1,6	1,2
Largeur : l (m)	2,66	2,66

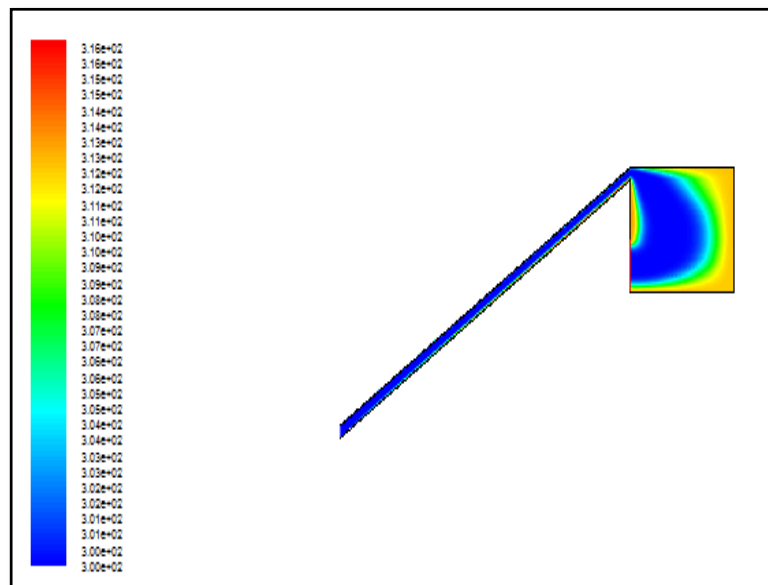


Figure III.20: Distribution des températures pour C2

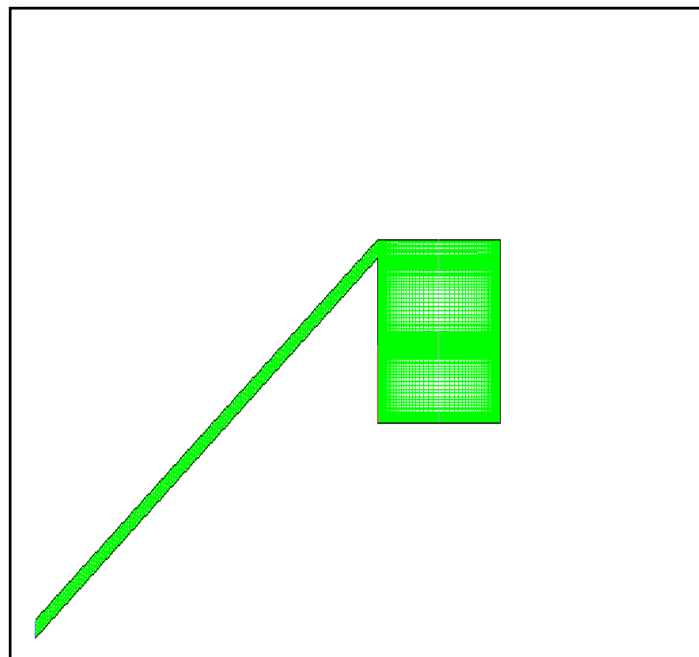


Figure III.21 : le schéma de maillage pour C2

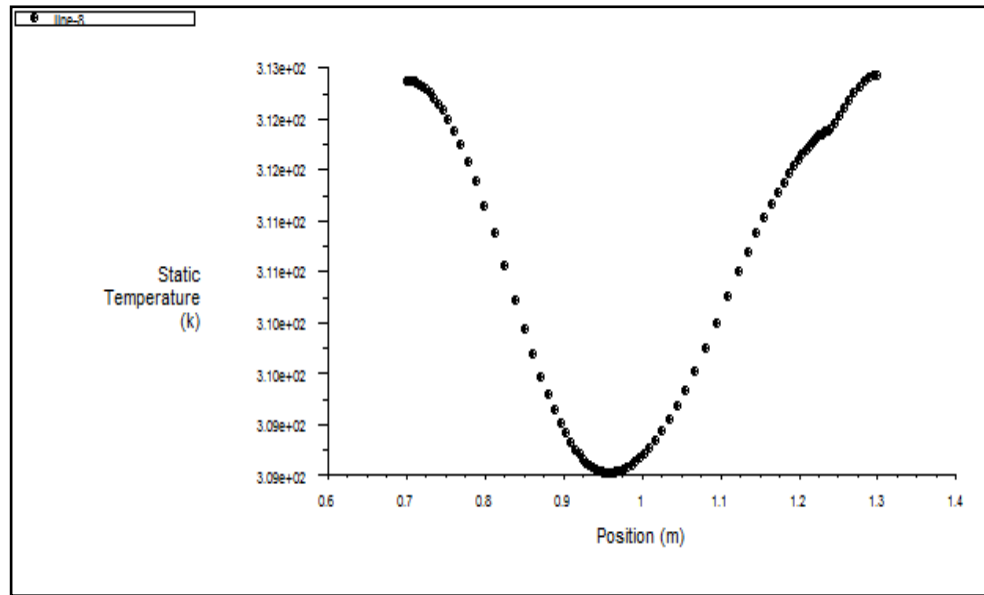


Figure III.22: courbe d'évolution de température pour C2

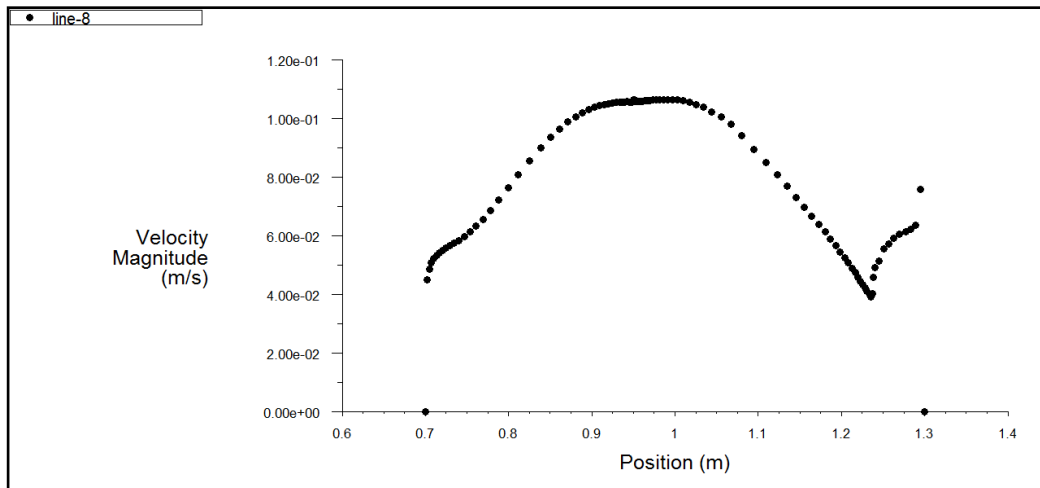


Figure III.23: courbe d'évolution de vitesse pour C2

Les résultats de simulation numérique de la modification de la largeur et de position de ventilateur nous donne plus d'homogénéité de distribution de température par comparaison avec les résultats de l'état réels, nous remarquons une diminution de l'effet de vitesse sur la température avec le changement de position de ventilateur, nous expliquons l'importance des modifications des dimensions et de position sur la distribution des températures.

Conclusion Générale

CONCLUSION

Notre travail a consisté en l'étude expérimentale et théorique du comportement thermique des séchoirs solaires direct et indirect à convection forcée. Cette étude a été menée dans un objectif principal d'amélioration des performances thermiques des deux séchoirs solaires par voie de l'expérience et de la simulation.

L'amélioration est faite par l'intégration des appoints énergétiques (régulateur de température et échangeur air /eau couplé à une source d'eau chaude) afin de maintenir des conditions favorables dans la chambre de séchage

La simulation numérique de fonctionnement du séchoir indirect sans intégration des appoints énergétiques a été faite par le logiciel CFD FLUENT en proposant des modifications des dimensions de longueur de la chambre de séchage et de position de ventilateur d'évacuation de l'air. Nous étudions par la suite l'influence de ces modifications sur l'écoulement de l'air et la stabilité des températures dans le séchoir solaire indirect.

Sur le plan expérimentale, nous avons réalisé des essais de mesure à vide des températures de l'air asséchant de séchoir indirect que sont variables et instables dans plusieurs positions de la chambre ($T_1=42,5^\circ\text{C}$, $T_2=39,5^\circ\text{C}$, $T_3=35,75^\circ\text{C}$, $T_4=29,6^\circ\text{C}$) avec l'utilisation de régulateur ou échangeur de chaleur les températures sont autant plus élevées.

L'utilisation de l'échangeur comme une source supplémentaire d'énergie présente une meilleure solution pour maintenir des conditions favorables avec l'élévation considérable de température ($T_1=52^\circ\text{C}$, $T_2=45,1^\circ\text{C}$, $T_3=41^\circ\text{C}$, $T_4=35^\circ\text{C}$).

Le séchoir solaire direct sans appoint énergétique nous offre des températures élevées ($T_{\min}=52^\circ\text{C}$ et $T_{\max}=57,1^\circ\text{C}$), avec l'intégration de l'appoint énergétique par échangeur de chaleur l'efficacité énergétique est améliorée.

L'intégration des appoints énergétiques nous assure le séchage direct ou indirect des produits alimentaires avec un coût énergétique très faible en évitant le stockage de produit pendant la nuit, et donc en éliminant les coûts des charges de manœuvre et des équipements de stockage.

L'augmentation de l'efficacité énergétique par l'intégration d'un système d'appoint, qui présente une combinaison d'un échangeur de chaleur Eau/Air et d'une source d'eau chaude, dans le séchoir solaire direct ou indirect à convection forcée présente un grand intérêt

économique et industriel, il permet de préserver le produit d'éviter le stockage pendant la nuit.

Le modèle numérique de l'écoulement convectif mis en application sur le logiciel CFD fluent a été convenablement validé par comparaison aux résultats expérimentaux obtenus sur le séchoir prototype de laboratoire. La simulation numérique par FLUENT, nous a montré qu'il est préférable d'avoir un séchoir solaire indirect de géométrie modifiée par diminution de largeur et modification de position de ventilateur (longueur = 1.2m ; position de ventilateur = 0.8m) pour une distribution homogène de température de l'air et pour une meilleure circulation de l'air de séchage.

Références Bibliographiques

REFERENCE

- [1]. Djamel Menouche , Etude et amélioration de l'efficacité énergétique des séchoirs solaires dans les zones arides désertiques, Thèse de doctorat , Université Bejaia, 2016
- [2] Louazene Ahmed , étude technico-économique de séchage solaire des produits alimentaires , Master énergies renouvelables, université d'ouargla 2017
- [3] Frihi ilyes Etude expérimentale et théorique du séchage solaire des grains de fève, Master en énergies renouvelables, Université d'ouargla2015
- [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).
- [5] . O. V. Ekechukwu, B. Norton, "Review of solar energy systems II : an overview of solar drying technology", Energy Conversion and Management, 40, 1999, 615 –655.
- [6] Techniques de l'ingénieur – génie des procédés Séchage, Théorie et calculs.Par André charreau et Roland cavailié, j 2480-2 ; 2480-22.
- [7]. Daguénet. M., "Les séchoirs solaires : théorie et pratique ", Publication de l'UNESCO, Paris, France, 1985.
- [8] M. Sodani, étude théorique d'un capteur cylindro-parabolique, mémoire d'ingénieur d'état Université de Ouargla, juin 2008.
- [9] P. Duzé, Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes: expériences et procédés, Edition du Greth, France (1999).
- [10] D. R. Pangavhanc, R. L. Sawhcy and P. N. Sarsavadia, "Design, development and performance testing of new natural convection", Energy 27(579-590) (2002).
- [11] D. Mennouche, Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, (2006).

[12] A. Madhlope, S. A. Jones, and J. D. KalengaSaka "A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration ", *Renewable Energy*, 27 (27 - 37) - (2001).

[13] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam and A. Jamali, "Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel ", *Energy* 29 (211-244) - (2004).

[14]. A. Ayensu, "Dehydration of food crops using a solar drying with convective heat flow" *Solar Energy* Vol. 59, Nos. 4-6, pp. 121-126, Ghana, 1997.

[15]. A. Ouaouich, A. Osakwe, H. Chimi. Guide du constructeur du séchoir hybride. Organisation des Nations Unies pour le développement industriel, Cas de Bouadel-Taounate-Maroc ,US/MOR/04/A48 .2005

[16] Documentation FLUENT" User's Guide" Fluent Inc All Rights Reserved. No part of this document may be reproduced or otherwise used in any form without express written permission from ANSYS, Inc. ANSYS, Inc. is certified to ISO 9001:2008 . . July 26,1998 .

[17] D.Fedala, « Initiation à la CFD » ISBN: 978-0-13-127498-3, October 2007.

Webographiques :

[18] FLUENT Tutorial Guide PDF [ftp.energia.bme.hu> pub >MSc >flu_tg](http://ftp.energia.bme.hu/pub/MSc/flu_tg).

[19]GAMBIT TUTORIAL GUIDE: 1.CREATING AND MESHING .

Annexes

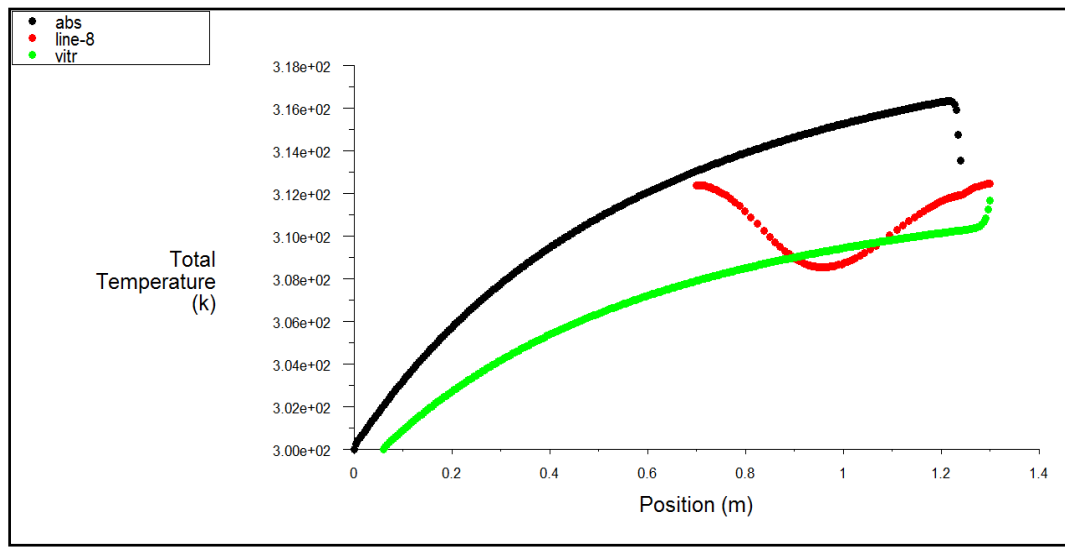
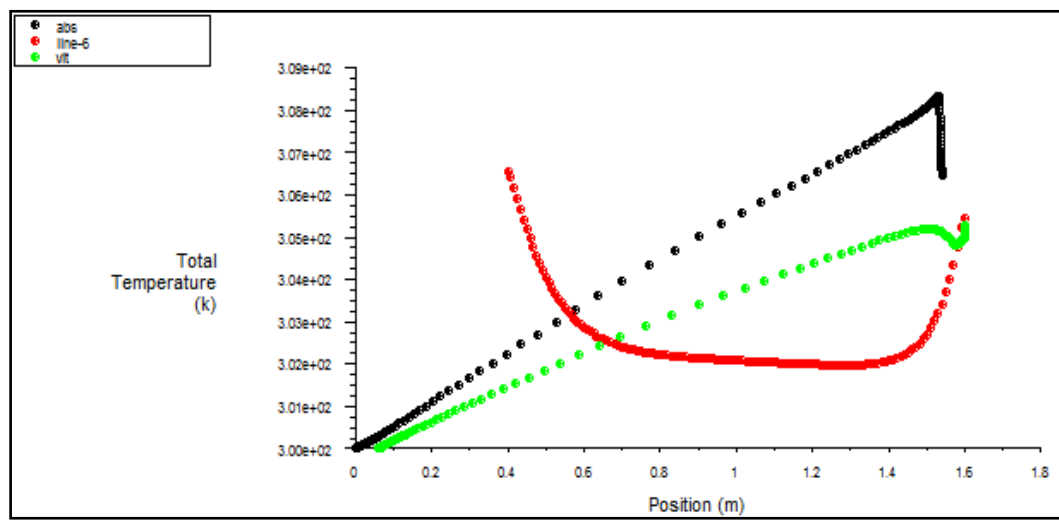
Annexe A :

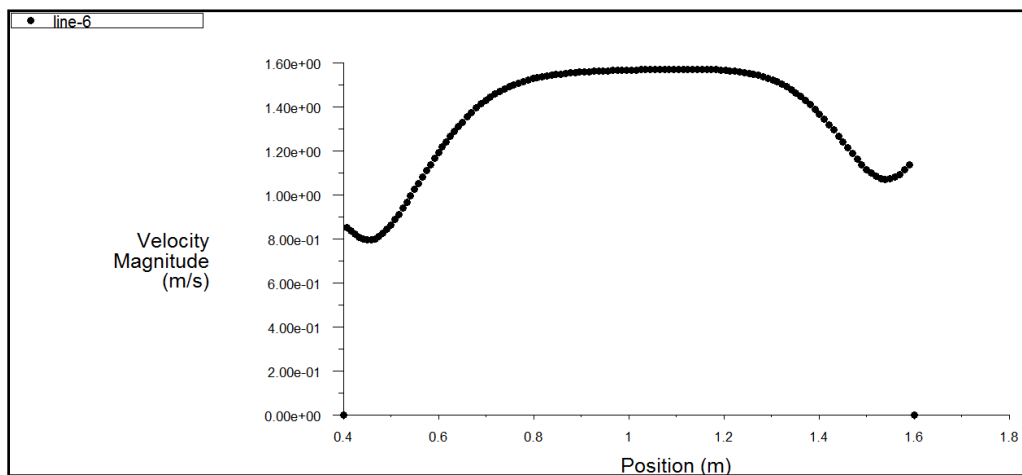


Séchoir solaire indirect actif ou forcé

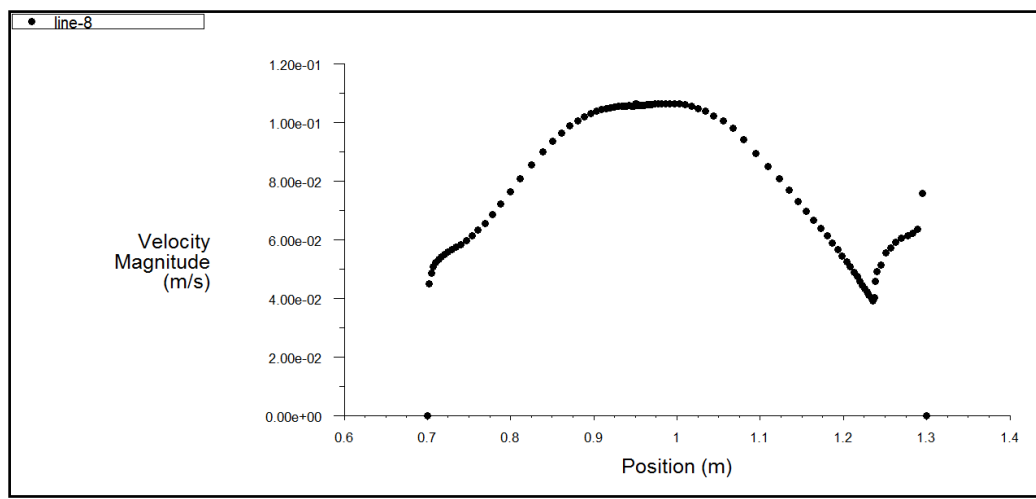


Séchoir solaire direct avec l'appoint énergétique (échangeur)

Annexe B :**Variation de température dans le cas du modification de largeur****Variation de température dans le cas de la modification de longueur et ventilation**



Variation de vitesse dans le cas de la modification de largeur



Variation de vitesse dans le cas de la modification de longueur et ventilation

Résumé

Ce travail présente une contribution expérimentale et théorique pour l'amélioration de fonctionnement énergétique de séchoir solaire indirect et direct à convection forcée. L'amélioration est faite par l'intégration des appoints énergétique (régulateur de température et échangeur air /eau couplé à une source d'eau chaude) afin de maintenir des conditions favorables dans la chambre de séchage. L'objectif de notre travail étant d'une part l'étude des effets des sources supplémentaires d'énergie (régulation de température et échangeur air /eau) sur la variation des températures de l'air en comparant les résultats obtenus lors de l'améliorations des deux séchoirs solaires avec les résultats de comportement des séchoirs solaires direct et indirect à vide (essais sans appoint énergétique), d'autre part les températures de l'air asséchant dans le séchoirs indirect sans appoint sont instables et assez faibles, avec l'utilisation de régulateur ou échangeur de chaleur les températures augmentent, le séchoir solaire direct sans appoint énergétique nous offre des température élevée ($T_{\min}= 52^{\circ}\text{C}$ et $T_{\max}=57,1^{\circ}\text{C}$), avec l'intégration de l'appoint énergétique par échangeur de chaleur l'efficacité énergétique est améliorée, la simulation numérique de fonctionnement de séchoir indirect sans intégration des appoints énergétiques à été faite par le logiciel CFD FLUENT en proposant des modifications des dimensions de longueur de la chambre de séchage et de position de ventilateur d'évacuation de l'air, Nous étudions par la suite l'influence de ces modifications sur l'écoulement de l'air et la stabilité des températures dans le séchoir solaire indirect. Les résultats de l'étude expérimentale montre que le séchoir solaire direct offre des températures de séchage élevée, l'appoint énergétique par échangeur dans le cas de séchoir indirect sert à l'augmentation des températures à une température moyenne de 55°C , le régulateur de température sert à maintenir des conditions stables dans le séchoir solaire indirect. La simulation numérique par FLUENT nous a montré qu'il est préférable d'avoir un séchoir solaire indirect de géométrie modifiée par diminution de largeur et modification de position de ventilateur (longueur =2,30m position de ventilateur = 1,2m) pour une distribution homogène de température de l'air et pour une meilleure circulation de l'air de séchage.

Mots Clés : amélioration énergétique, séchoir direct et indirect, échangeur de chaleur, simulation.

الملخص

يقدم هذا العمل مساهمة تجريبية ونظرية لتحسين كفاءة استخدام الطاقة للمجفف الحراري الشمسي المباشر وغير المباشر. يتم إجراء التحسين من خلال دمج إضافات طاوقية (جهاز التحكم في درجة الحرارة والمبادل الحراري للهواء / الماء إلى جانب مصدر الماء الساخن) من أجل الحفاظ على الظروف الملائمة في غرفة التجفيف. الهدف من عملنا هو من ناحية دراسة آثار مصادر الطاقة الإضافية (تنظيم درجة الحرارة ومبادل الهواء / الماء) على تغير درجات حرارة الهواء من خلال مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها خلال تحسينات في المجففين الشمسيين مع نتائج مجففات الطاقة الشمسية المباشرة وغير المباشرة فارغة بدون إضافات طاوقية (الاختبارات بدون ملحق الطاقة) ، من ناحية أخرى ، فإن درجات حرارة هواء التجفيف في المجففات غير المباشرة بدون الداعم غير مستقرة ومنخفضة جداً ، ومع استخدام منظم أو مبادل حراري نحصل على درجات الحرارة أعلى ، وفي المجفف الشمسي عالية (Tmin = 52) درجة مئوية و Tmax = 57,1 درجة مئوية (المباشر دون ملحق الطاقة يوفر لنا درجة حرارة.

مع تحسين تكامل الطاقة من خلال تحسين كفاءة الطاقة المبادل الحراري تم إجراء محاكاة عددية لعملية جفاف غير مباشرة دون دمج إضافات الطاقة بواسطة برنامج

CFD FLUENT

من خلال اقتراح تغييرات على أبعاد الطول لـ حجرة التجفيف وموقف مروحة العادمة تمت دراسة تأثير هذه التعديلات على تدفق الهواء واستقرار درجة الحرارة في المجفف الشمسي غير المباشر في وقت لاحق .. نتائج دراسة تجريبية تعرض المجفف شمسي المباشر يوفر درجات حرارة عالية للتجفيف . ملحق الطاقة من خلال المبادلة الحرارية في حالة التجفيف غير المباشر يعمل على زيادة درجات الحرارة بمتوسط درجة حرارة 55 درجة مئوية. يعمل جهاز التحكم بدرجة الحرارة على الحفاظ في ظروف مستقرة في المجفف الشمسي غير المباشر

(لتوزيع متجانس لدرجة حرارة أظهرت لنا المحاكاة العددية أنه من الأفضل وجود مجفف شمسي غير مباشر بشكل معدل في تصغير الطول وتعديل وضعية المروحة العواء لتحسين دوران الهواء الجاف الطول = 2.30م و وضعية المروحة = 1.2م .

الكلمات المفتاحية: تحسين الطاقة ، المجفف المباشر وغير المباشر ، المبادل الحراري ، المحاكاة.

Abstract

This work presents an experimental and theoretical contribution for the energy efficiency improvement of indirect and direct forced convection solar drier. The improvement is made by the integration of energy supplements (temperature controller and air / water heat exchanger coupled to a hot water source) in order to maintain favorable conditions in the drying chamber. The objective of our work is on the one hand the study of the effects of the additional sources of energy (temperature regulation and air / water exchanger) on the variation of the temperatures of the air by comparing the results obtained during the improvements of the two solar dryers with the results of behavior of the direct and indirect solar dryers vacuum (tests without energy supplement), on the other hand the temperatures of the drying air in the indirect dryers without booster are unstable and quite low, with the use of regulator or heat exchanger the temperatures are higher, the direct solar dryer without energy supplement offers us high temperature ($T_{min} = 52 \text{ }^{\circ} \text{C}$ and $T_{max} = 57,1 \text{ }^{\circ} \text{C}$), with the integration of the energy supplement by heat exchanger energy efficiency is improved, numerical simulation of indirect dryer operation without integration of s energy additions has been made by CFD FLUENT software by proposing changes in the length dimensions of the drying chamber and the position of the exhaust fan, we study later the influence of these modifications on the airflow and temperature stability in the indirect solar dryer. The results of the experimental study show that the direct solar dryer offers high drying temperatures, the energy supplement by exchanger in the case of indirect dryer is used to increase temperatures at an average temperature of $55 \text{ }^{\circ} \text{C}$, the regulator of temperature is used to maintain stable conditions in the indirect solar dryer. The numerical simulation by FLUENT has shown us that it is better to have an indirect solar dryer of modified geometry by decreasing width and changing fan position (length = 2,30m fan position = 1,2m) for homogeneous distribution of air temperature and for better circulation of drying air.

Key words: energy improvement, direct and indirect dryer, heat exchanger, simulation.

Résumé

Ce travail présente une contribution expérimentale et théorique pour l'amélioration de fonctionnement énergétique de séchoir solaire indirect et direct à convection forcée. L'amélioration est faite par l'intégration des appoints énergétique (régulateur de température et échangeur air /eau couplé à une source d'eau chaude) afin de maintenir des conditions favorables dans la chambre de séchage. L'objectif de notre travail étant d'une part l'étude des effets des sources supplémentaires d'énergie (régulation de température et échangeur air /eau) sur la variation des températures de l'air en comparant les résultats obtenus lors de l'améliorations des deux séchoirs solaires avec les résultats de comportement des séchoirs solaires direct et indirect à vide (essais sans appoint énergétique), d'autre part les températures de l'air asséchant dans le séchoir indirect sans appoint sont instables et assez faibles, avec l'utilisation de régulateur ou échangeur de chaleur les températures augmentent, le séchoir solaire direct sans appoint énergétique nous offre des températures élevées ($T_{min}= 52^{\circ}C$ et $T_{max}=57,1^{\circ}C$), avec l'intégration de l'appoint énergétique par échangeur de chaleur l'efficacité énergétique est améliorée, la simulation numérique de fonctionnement de séchoir indirect sans intégration des appoints énergétiques a été faite par le logiciel CFD FLUENT en proposant des modifications des dimensions de longueur de la chambre de séchage et de position de ventilateur d'évacuation de l'air, Nous étudions par la suite l'influence de ces modifications sur l'écoulement de l'air et la stabilité des températures dans le séchoir solaire indirect. Les résultats de l'étude expérimentale montre que le séchoir solaire direct offre des températures de séchage élevée, l'appoint énergétique par échangeur dans le cas de séchoir indirect sert à l'augmentation des températures à une température moyenne de $55^{\circ}C$, le régulateur de température sert à maintenir des conditions stables dans le séchoir solaire indirect. La simulation numérique par FLUENT nous a montré qu'il est préférable d'avoir un séchoir solaire indirect de géométrie modifiée par diminution de largeur et modification de position de ventilateur (longueur = 2,30m position de ventilateur = 1,2m) pour une distribution homogène de température de l'air et pour une meilleure circulation de l'air de séchage.

Mots Clés : amélioration énergétique, séchoir direct et indirect, échangeur de chaleur, simulation.

المخلص

يقدم هذا العمل مساهمة تجريبية ونظرية لتحسين كفاءة استخدام الطاقة للمجفف الحراري الشمسي المباشر وغير المباشر. يتم إجراء التحسين من خلال دمج إضافات طاقة (جهاز التحكم في درجة الحرارة والمبادل الحراري للهواء / الماء إلى جانب مصدر الماء الساخن) من أجل الحفاظ على الظروف الملائمة في غرفة التجفيف. الهدف من عملنا هو من ناحية دراسة آثار مصادر الطاقة الإضافية (تنظيم درجة الحرارة ومبادل الهواء / الماء) على تغير درجات حرارة الهواء من خلال مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها خلال تحسينات في المجففين الشمسيين مع نتائج مجففات الطاقة الشمسية المباشرة وغير المباشرة فارغة بدون إضافات طاقة (الاختبارات بدون ملحق الطاقة)، من ناحية أخرى، فإن درجات حرارة هواء التجفيف في المجففات غير المباشرة بدون الداعم غير مستقرة ومنخفضة جداً، ومع استخدام منظم أو مبادل حراري نحصل على درجات الحرارة أعلى، وفي المجفف الشمسي عالية (57,1 درجة مئوية = T_{max} و $T_{min} = 52$) المباشر دون ملحق الطاقة يوفر لنا درجة حرارة .

مع تحسين تكامل الطاقة من خلال تحسين كفاءة الطاقة المبادل الحراري تم إجراء محاكاة عددية لعملية جفاف غير مباشرة دون دمج إضافات الطاقة بواسطة برنامج CFD FLUENT

من خلال اقتراح تغييرات على أبعاد الطول الحجرية التجفيف وموقف مروحة العادمة تمت دراسة تأثير هذه التعديلات على تدفق الهواء واستقرار درجة الحرارة في المجفف الشمسي غير المباشر في وقت لاحق.. نتائج دراسة تجريبية تعرض المجفف شمسي المباشر يوفر درجات حرارة عالية للتجفيف. ملحق الطاقة من خلال المبادلة الحرارية في حالة التجفيف غير المباشر يعمل على زيادة درجات الحرارة بمتوسط درجة حرارة $55^{\circ}C$ درجة مئوية. يعمل جهاز التحكم بدرجات الحرارة على الحفاظ في ظروف مستقرة في المجفف الشمسي غير المباشر (لتوزيع متجانس لدرجة حرارة الهواء أظهرت لنا المحاكاة العددية أنه من الأفضل وجود مجفف شمسي غير مباشر بشكل معدل في تصغير الطول وتعديل وضعية المروحة لتحسين دوران الهواء الجاف.

الطول = 2.30م و وضعية المروحة = 1.2م .

الكلمات المفتاحية: تحسين الطاقة، المجفف المباشر وغير المباشر، المبادل الحراري، المحاكاة.

Abstract

This work presents an experimental and theoretical contribution for the energy efficiency improvement of indirect and direct forced convection solar drier. The improvement is made by the integration of energy supplements (temperature controller and air / water heat exchanger coupled to a hot water source) in order to maintain favorable conditions in the drying chamber. The objective of our work is on the one hand the study of the effects of the additional sources of energy (temperature regulation and air / water exchanger) on the variation of the temperatures of the air by comparing the results obtained during the improvements of the two solar dryers with the results of behavior of the direct and indirect solar dryers vacuum (tests without energy supplement), on the other hand the temperatures of the drying air in the indirect dryers without booster are unstable and quite low, with the use of regulator or heat exchanger the temperatures are higher, the direct solar dryer without energy supplement offers us high temperature ($T_{min} = 52^{\circ}C$ and $T_{max} = 57,1^{\circ}C$), with the integration of the energy supplement by heat exchanger energy efficiency is improved, numerical simulation of indirect dryer operation without integration of s energy additions has been made by CFD FLUENT software by proposing changes in the length dimensions of the drying chamber and the position of the exhaust fan, we study later the influence of these modifications on the airflow and temperature stability in the indirect solar dryer. The results of the experimental study show that the direct solar dryer offers high drying temperatures, the energy supplement by exchanger in the case of indirect dryer is used to increase temperatures at an average temperature of $55^{\circ}C$, the regulator of temperature is used to maintain stable conditions in the indirect solar dryer. The numerical simulation by FLUENT has shown us that it is better to have an indirect solar dryer of modified geometry by decreasing width and changing fan position (length = 2,30m fan position = 1,2m) for homogeneous distribution of air temperature and for better circulation of drying air.

Key words: energy improvement, direct and indirect dryer, heat exchanger, simulation.