



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Kasdi Merbah – Ouargla  
Faculté des Hydrocarbures, des Energies Renouvelables, des Sciences de la  
Terre et de l'Univers  
Département des énergies renouvelables



**Mémoire**  
Présenté pour l'obtention du diplôme de  
**MASTER ACADEMIQUE**  
Spécialité : Energies renouvelables

Présenté par :  
Bouguetit Mohammed  
Bougoffa Sassi  
Thème

*Etude expérimentale et théorique d'un  
séchoir solaire convectif direct*

Soutenu publiquement le : 27/06/2019 à 18:00h

Devant le jury :

Dr. <i>Djamel BEN MENINE</i>	UKM Ouargla	Président
Dr. <i>Samira Chouicha</i>	UKM Ouargla	Rapporteur
Pr. <i>Bachir BOUCHEKIMA</i>	UKM Ouargla	Examineur

Année universitaire 2018 / 2019

## ***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 mes FRÈRES et SŒURS qui nous donne un*

*grand support dans tous les succès dans ma 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 Mme: CHOUICHA SAMIRA pour ses conseils précieux,*

*pour sa disponibilité et la compétence de son*

*encadrement, qu'elle trouve ici notre reconnaissance et notre respect.*

*Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à*

*l'accomplissement de ce travail,*

*,sans oublier nos professeurs M. Djamel Ben Menine et M. Bachir BouchEkjima .*

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

*réalisation de ce mémoire*

## *Dédicaces*

*A ma mère qui m'a soutenu et encourager durant ces  
années d'étude Qu'elle trouve ici le témoignage de ma  
profonde reconnaissance*

*A mes frères et ceux qui on partagé avec moi tout les  
moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail, ils  
m'ont chaleureusement supporté et en couragé tout au long  
de mon parcours*

*A ma famille, mes proches et a ceux qui me donnent de  
l'amour et de la vivacité*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encourage et à qui je  
souhaite plus de succès*

*A tous ceux que j'aime*

*Merci*

# Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralités Sur Le Séchage</b>	
I.1. Généralité sur le séchage .....	3
I.1.1. Définition .....	3
I.1.2. but de séchage .....	3
I.1.3. Domaines d'utilisations .....	3
I.1.4. Processus de séchage.....	4
I.1.4.1. Séchage par conduction.....	4
I.1.4.2. Séchage par convection.....	4
I.1.4.3. Séchage par rayonnement.....	4
I.1.5. Principe de séchage .....	4
I.1.5.1.Séchage mécanique .....	5
I.1.5.2. Séchage chimique.....	5
I.1.5.3.Séchage thermique .....	5
I.1.6. Cinétique de séchage .....	5
I.1.7.Types de séchoirs solaires .....	6
I.1.7.1. Les séchoirs solaires indirects .....	6
I.1.7.2.Les séchoirs solaires directs .....	8
I.1.7.3.Les séchoirs solaires mixtes .....	11
I.1.7.4.Les séchoirs hybrides .....	13
I.1.8.Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage.....	15
I.1.8.1.Influence de la température de l'air.....	15
I.1.8.2.Influence de la vitesse de l'air .....	15
I.1.8.3. Influence de l'humidité de l'air .....	15
<b>Chapitre II : Matériels et méthodes</b>	
II.1. Description du système de séchage .....	16
II.1.1.Séchoirsolairedirect .....	16
II.1.2 Amélioration de fonctionnement de séchoir solaire direct par intégration d'un appoint énergétique par échangeur air /eau.....	17
II.2. Produit d'étude.....	17
II.3 Appareillagesdemesures.....	18
II.4. Protocole et méthodologie expérimental .....	21
II .4 .1 Préparation des séchoirs solaires.....	21
II.5. Description du logiciel Fluent .....	22

II.5.1. Présentation de Gambit .....	24
II.5.1.1 Maillage .....	24
II.5.1.2. Présentation de Fluent.....	24
II .5 .2 Série d'expériences .....	31

***Chapitre III : Résultat et discussion***

III.1. Etude de comportement thermique à vide de séchoir solaire direct sans appoint énergétique à convection forcée.....	33
III.1.1 Variation des humidités relative de l'air à l'intérieure et l'extérieur du séchoir solaire direct.....	34
III.2.Amélioration de fonctionnement par échangeur thermique.....	34
III.2.1 Variation des humidités relative de l'air à l'intérieure et l'extérieur du séchoir solaire direct.....	36
III.3. Simulation du séchoir solaire à l'état original.....	37
III.3.1 Choix du maillage.....	37
III.3.1.1 La convergence.....	37
III.3.2.Simulation numérique du fonctionnement du séchoir solaire direct pour une journée ensoleillée .....	38
III. 3.2.1.Contours de la température du séchoir direct sans échangeur .....	38
III. 3.2.2Variation des températures dans le séchoir solaire sans échangeur.....	39
III.3.3.Contur de la température du séchoir avec échangeur .....	40
III.3.3.1.Variation des températures du séchoir solaire avec échangeur .....	41
III.3.3.2.Variation des températures de l'air asséchant.....	42
III.3.3.3.Variation des températures de l'air à l'entrée du séchoir solaire.....	43
III.4 Essais du séchage solaire avec produit (rondelles des oranges).....	43
III.4.1. Mesure de la teneur en eau .....	43
III.4.2.Variation de la teneur en eau dans le séchoir solaire direct sans et avec échangeur .....	44
Conclusion .....	47
REFERENCES .....	49
Annexes .....	52

## Liste des figures

Figure I.1 : Périodes du séchage.....	5
Figure I.2: Les séchoirs solaires indirects .....	7
Figure I.3: Les séchoirs solaires directs.....	10
Figure I.4: Les séchoirs solaires mixtes.....	12
Figure I.5 : Les séchoirs solaires hybrides .....	14
Figure II.1 :séchoirsolairedirect .....	16
Figure II.2 : L'installation de l'appoint énergétique.....	17
Figure II.3 : Hygromètre (A) Testo 645 (B) Testo 608-H1 .....	19
Figure II.4 : Température mètre .....	19
Figure II.5 : Solari mètre à affichage numérique.....	20
Figure II.6 : Balance électronique (Marque Denver).....	20
Figure II.7 : Hygromètre Testo 645.....	21
Figure II.8: Appareil physique multi fonctionne .....	21
Figure II.9 : Importation de la géométrie .....	25
Figure II.10 : Vérification du maillage importé.....	25
Figure II.11 : Vérification de l'échelle .....	26
Figure II.12 : Choix du solveur .....	26
Figure II.13 : L'équation de l'énergie .....	27
Figure II.14 : Définition des caractéristiques du fluide .....	27
Figure II.15 : Choix de la pression de référence.....	28
Figure II.16 : Conditions aux limites.....	28
Figure II.17 : Choix d'ordre des équations et l'algorithme .....	29
Figure II.18 : Initialisation.....	29
Figure II.19 : Choix des critères de convergence .....	30
Figure II. 20 : Choix du nombre des itérations.....	30
Figure III.1 : Variation des températures dans le séchoir solaire (direct).....	33
Figure III.2 : Variation l'humidité intérieure et extérieure (direct) .....	34
Figure III.3 : Variation des températures dans le séchoir solaire (direct) muni par appoint énergétique .....	35
Figure III.4 : Variation l'humidité intérieure et extérieure (direct) .....	36
Figure III.5 : Schéma de maillage .....	37
Figure III.6 : Convergence des résultats.....	38
Figure III.7 : conteurs de la température. ....	38
Figure III.8 : Variation de la température en fonction du temps .....	39
Figure III.9 : Conteurs de la température .....	40

Figure III.10 : Variation de la température en fonction du temps .....	41
Figure III.11: Variation de la température en fonction du temps .....	42
Figure III.12: Variation de la température en fonction du temps .....	43
FigureIII.13: Analyseurde lateneur en eau.....	44
Figure III.14 : Evaluation de la teneur en eau en fonction du temps .....	44
Figure III.15 : Evaluation de la teneur en eau en fonction du temps .....	44

## Liste des tableaux

Tableau III.2 : Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement solaire dans le séchoir solaire direct.....34

Tableau III.1 : Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement solaire dans le séchoir solaire direct.....36



## Nomenclature

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
R	Rayonnement solaire	$W.m^{-2}$
T	Température	K
T <sub>a</sub>	Température ambiante	K
T <sub>s.ch</sub>	Température sortie cheminée	K
T <sub>ent</sub>	Température entrée	K
V vent	Vitesse du vent	$m.s^{-1}$
T	Temps	s

# *Introduction Générale*

## **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 comparé 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 et ce aux différents niveaux du processus ; le séchoir solaire, le produit et le coût économique. Les modèles des simulations sont utiles pour la conception de nouveau prototype de séchoir, l'amélioration des systèmes de séchage existants ou pour le contrôle de l'opération de séchage [3].

L'objectif du travail consiste d'une part à améliorer le fonctionnement énergétique du séchoir solaire convectif de type direct, afin de maintenir des conditions opératoires favorables pour sécher les produits alimentaires. L'amélioration est faite par la mise en place d'un échangeur de chaleur air-eau couplé avec un simulateur de l'eau géothermique. D'autre part dans un objectif d'étudier l'influence de l'appoint énergétique par échangeur de chaleur sur les performances thermiques du séchoir solaire direct. Notre travail met en application les équations d'écoulement et de transfert thermique moyennant le logiciel CFD Fluent, en comparant les résultats obtenus expérimentalement et celles calculés par simulation. 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 sans et avec appoint énergétique), les appareils de mesure et la méthodologie de travail ainsi que une présentation du logiciel fluent. Cette partie est suivie par la présentation des principaux résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude de comportement thermique des deux séchoirs solaires direct sans et avec appoints énergétiques, ensuite nous présentons les résultats de calculs de simulation du séchoirs sans et avec appoint énergétique en comparant les deux résultats théoriques et expérimentaux pour la validation du travail, Finalement nous avons procédé au séchage direct des rondelles des oranges par le séchoir solaire direct sans et avec appoint énergétique.

Nous terminons 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 par séchage de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés.

**❖ Industrie du bois :**

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans les conditions correctes, sinon on s'expose à des changements de taille et de forme du bois. [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 [7].

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

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

### 1.5.2. Séchage chimique

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

### I.1.5.3. Séchage thermique

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une activation de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur.

## 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 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.

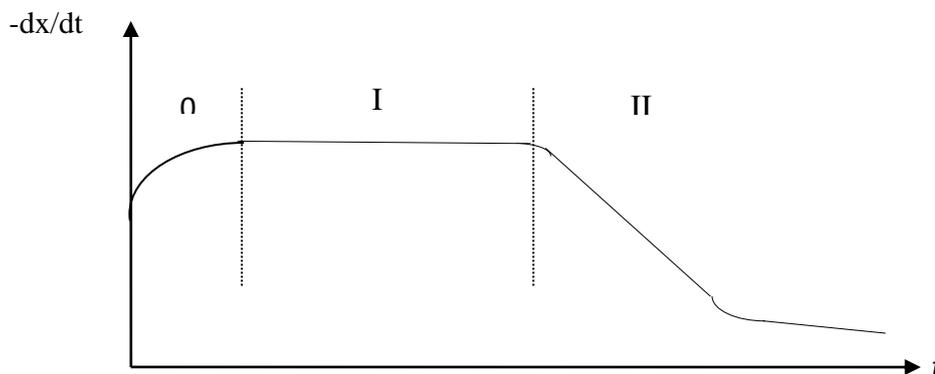


Figure I.1 : Périodes du séchage

**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 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 :

- 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 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 [8].

**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) [9].

**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.

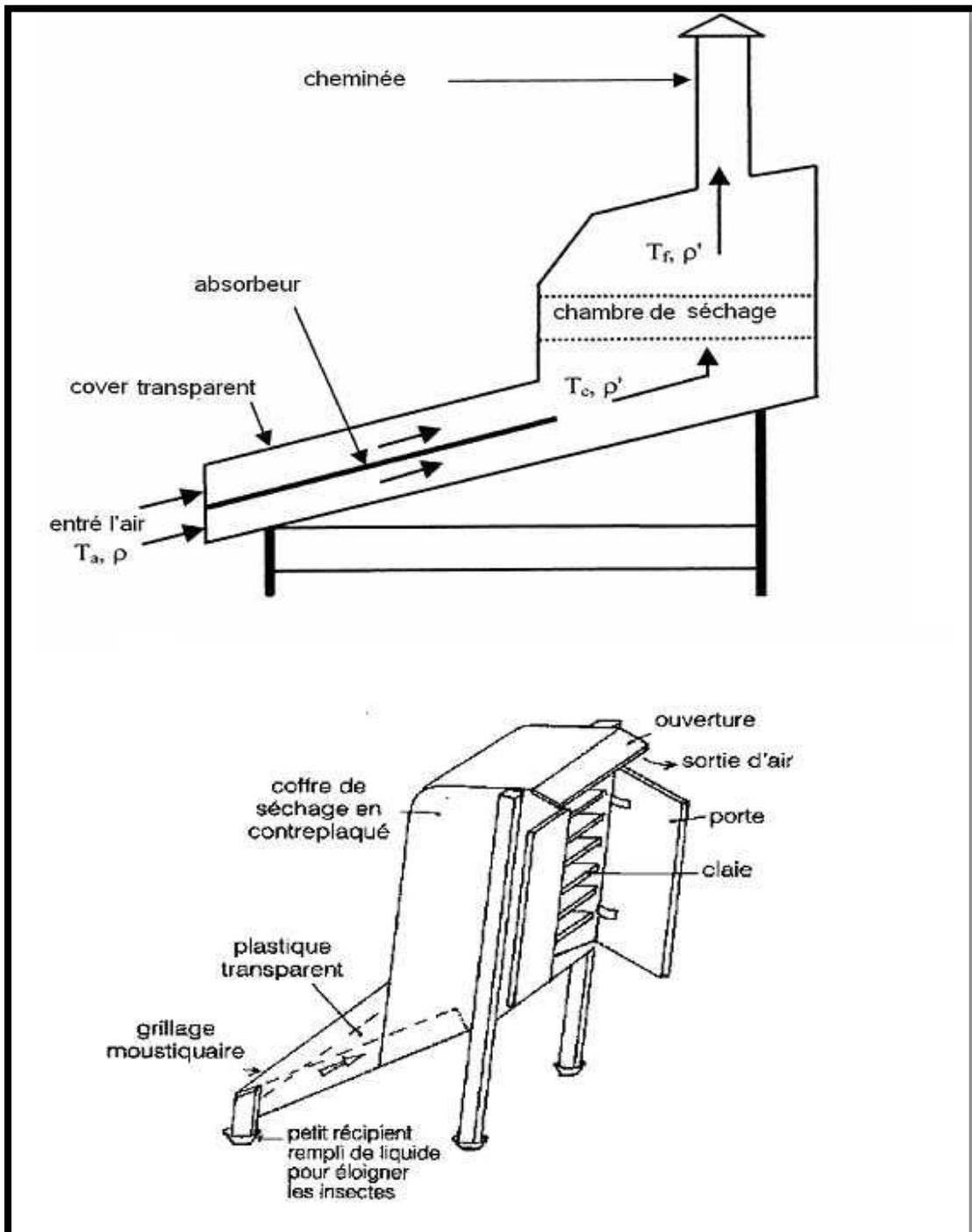


Figure I.2: Les séchoirs solaires indirects

### 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). [10]

#### Avantages :

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

**Inconvénients :**

- Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration. [11]
- 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. [12]
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risque de moisissure.

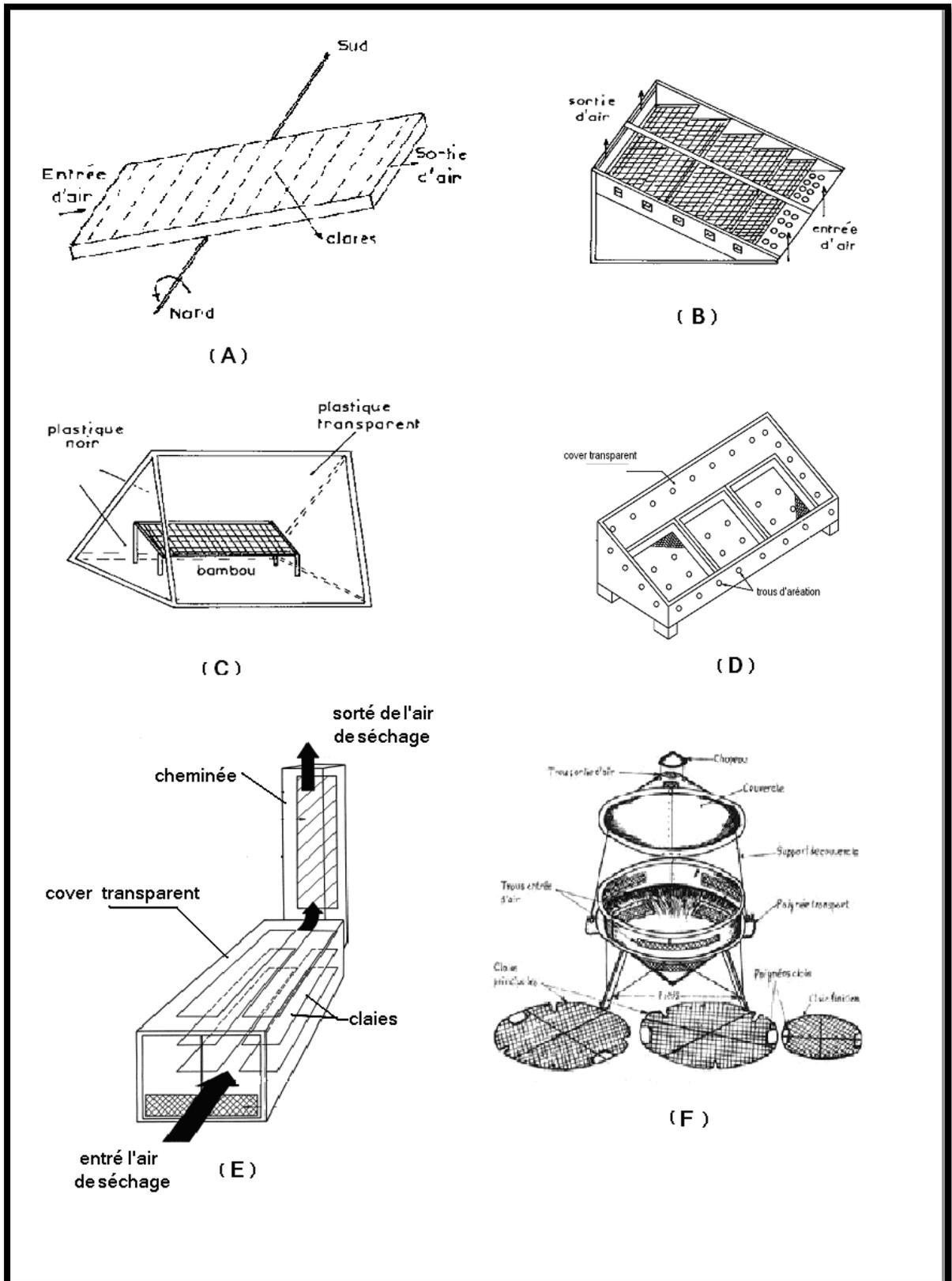


Figure I.3: Les séchoirs solaires directs

### **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 [13].

#### **Avantages :**

- Forte augmentation de la production par rapport à l'autre type des séchoirs solaires. [14]

#### **Inconvénients :**

- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir. [14]

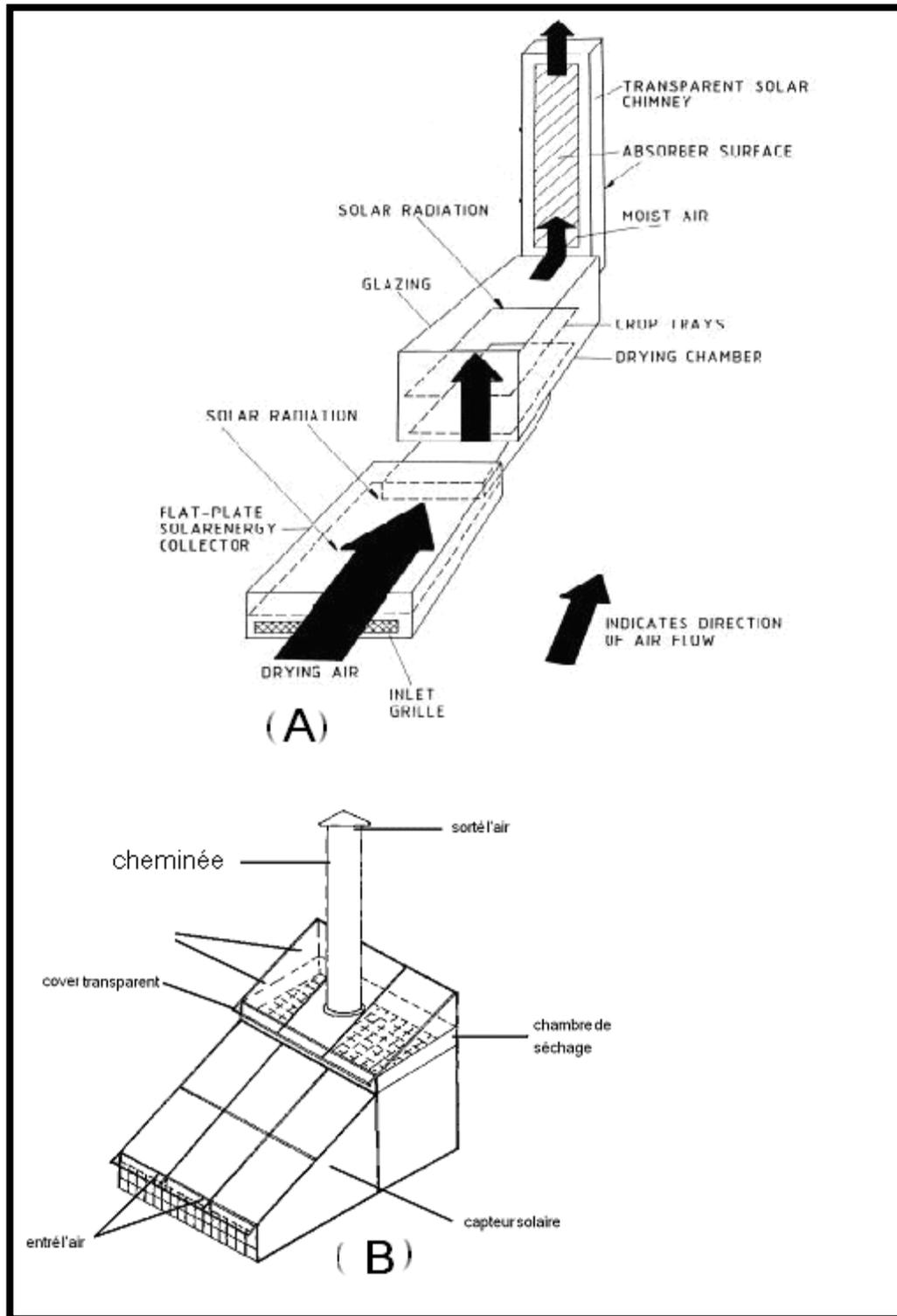


Figure I.4: Les séchoirs solaires mixtes

#### **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: [10]

- 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.

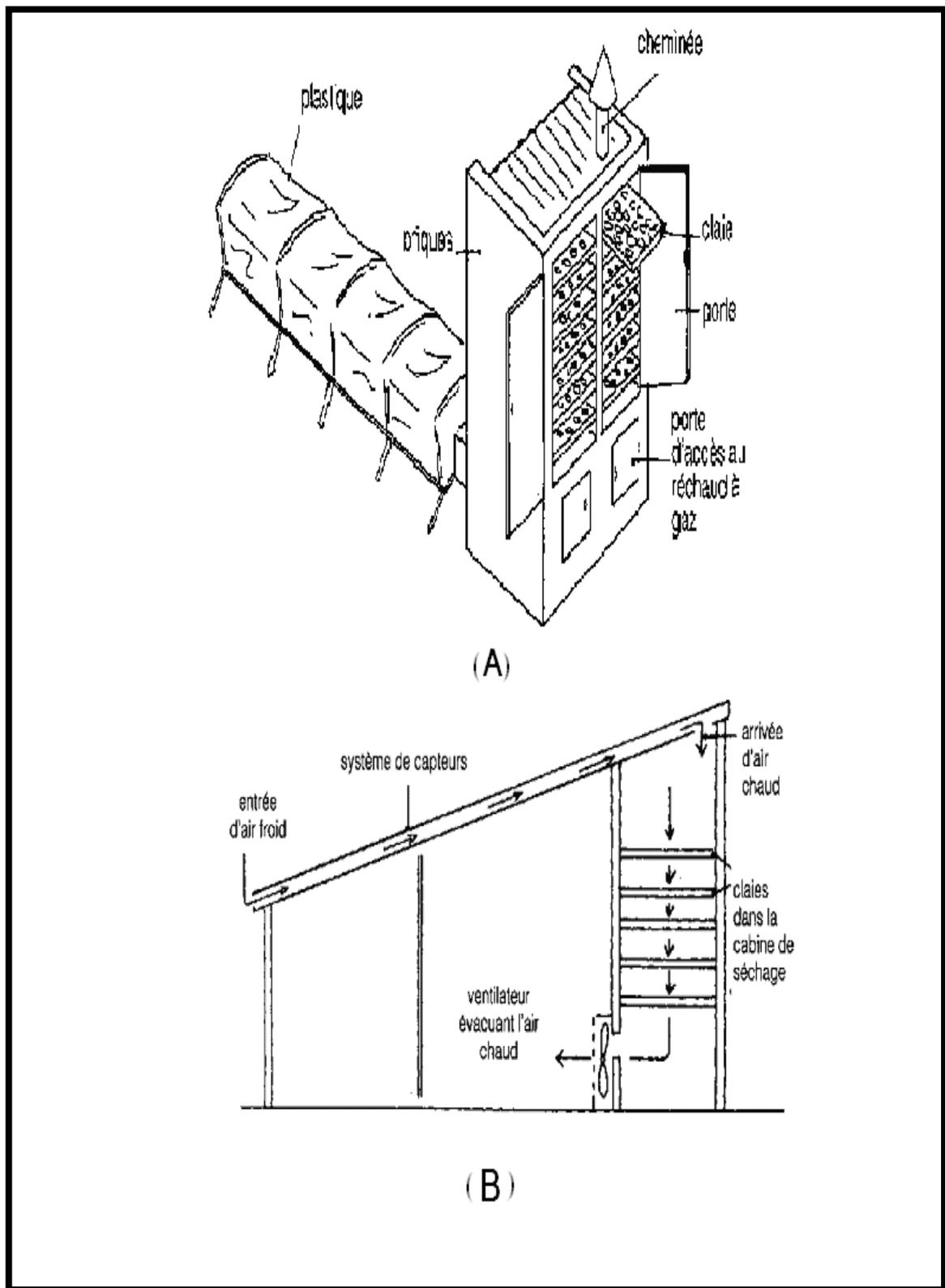


Figure I.5 : Les séchoirs solaires hybrides

### **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 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, 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*

---

## *Matériels et méthodes*

## II.1. Description du système de séchage

Dans cette étude nous avons utilisé deux systèmes de séchage solaire direct fonctionnant en convection forcée le premier système est un séchoir solaire direct sans appoint énergétique, le deuxième séchoir direct est fonctionné avec un appoint énergétique par échangeur de chaleur air-eau couplé avec un simulateur de l'eau géothermique ; Les deux séchoirs solaires étudiées sont conçus et réalisés par l'équipe de conversion d'énergie du laboratoire LENREZA. figure (II.1) Pour améliorer le fonctionnement énergétique du séchoir solaire direct en proposant d'intégrer un appoint énergétique par échangeur de chaleur air-eau

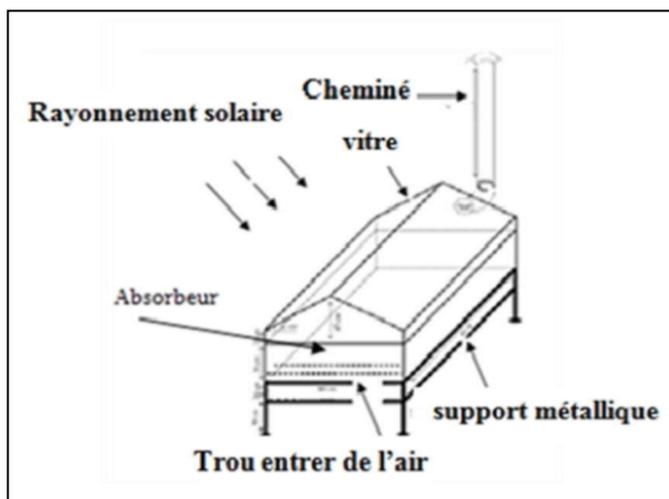


Figure (II.1): séchoir solaire direct

### II.1.1.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  $31,57^\circ$  deux sont positionnés 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 à ( $d=5\text{cm}$ ). La base de la chambre est composée de deux plaques en tôle galvanisée séparées avec le polystyrène l'une des plaques est peinte en noir est considérée comme absorbeur la chambre de séchage est posée sur un support métallique, la fève est disposée à l'intérieur de cette chambre sur une claie, ce dernier est déposé sur une balance de type d'Enver (située au-dessous de la chambre) de précision 0.1.

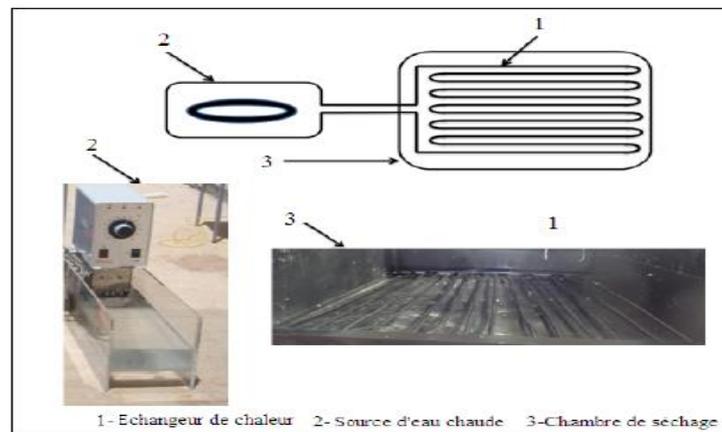
➤ **Cheminée**

La cheminée du séchoir présente un cylindre en tôle galvanisée 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.1.2 Amélioration de fonctionnement de séchoir solaire direct par intégration d'un appoint énergétique par échangeur air /eau :**



**Figure (II.2) : 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.

**II.2. Produit d'étude**

L'orange ou orange douce est le fruit de l'oranger de la famille des Rutacées. Comme pour tous les agrumes, il s'agit d'une forme particulière de baie appelée Hespéride. Il existe plusieurs variétés d'oranges classées en quatre groupes variétaux.

Comestible, elle est réputée pour sa grande teneur en vitamine C, bien que cette dernière ne soit pas particulièrement haute comparée à d'autres fruits et légumes. C'est le quatrième fruit le plus cultivé au monde. L'orange a donné son nom à la couleur secondaire qui, sur le cercle chromatique, prend place entre le rouge et le jaune. La teneur en eau de l'orange est très élevée (environ 90%), favorise sa dégradation à l'état frais et sa détérioration physico-chimique et microbiologique. Le séchage présente un procédé approprié pour minimiser la perte et l'amortissement du caractère saisonnier de l'orange. Plusieurs auteurs ont étudié le séchage des oranges en utilisant des séchoirs solaires[19]. [20]

### II.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 l'aide d'un hygromètre à affichage numérique connecté à un appareil de marque Testo 645.
- La mesure de l'humidité relative de l'air extérieur est effectuée par un hygromètre type Testo 608-H1.



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 du l'absorbeur et la vitre du capteur solaire.

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



Figure (II.4) : Température mètre

### ➤ Mesure du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire reçu sur le plan du capteur est mesuré en  $W/m^2$  à l'aide d'un Solari mètre et ceci durant la journée de l'expérience. Les résultats obtenus sont affichés sur un appareil à affichage numérique.



Figure (II.5) : Solari mètre à affichage numérique

### ➤ Mesure de la perte de masse

La mesure de la perte de masse du produit en fonction du temps est effectué sur l'ensemble produit – claie support à laide d'une balance de précision 0.1g pour la pesée systématique des produits séché, (poids max : 12kg).



**Figure (II.6) : Balance électronique (Marque Denver)**

➤ **Mesure de la vitesse de l'air asséchant**

La vitesse de l'air à l'entrée de la chambre de séchage est mesurée à l'aide d'un Anémomètre à fil chaud connecté à un appareil d'acquisition de marque testo 425.



**Figure (II.7) : Hygromètre Testo 645**

➤ **Mesures externes**

Les mesures de la vitesse et de la température de l'air ambiant sont effectuées à l'aide d'un anémomètre à affichage numérique (type CA 1051).



**Figure (II.8): Appareil physique multi fonctionne**

## II.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

### II .4 .1 Préparation des séchoirs solaires

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

- Le nettoyage de la couverture transparente et de la plaque noir du capteur solaire. et de l'absorbeur
- Fonctionnement des séchoirs à vide pendant 30min.

## II.5.Description du logiciel 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.

### ➤ **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 adaptative 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 parallélisée et vectorisés.

### ➤ **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 de 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 ( annexe 2 ) :

- 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.

### **II.5.1. Présentation de Gambit [18]**

Le logiciel Gambit est un meilleur 2D/3D ; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computation Fluide 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. [16]

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.

### II.5.1.1 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 nouds 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).

### II.5.1.2. Présentation de Fluent

#### 1. Importation de la géométrie

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

File → Read → Case...

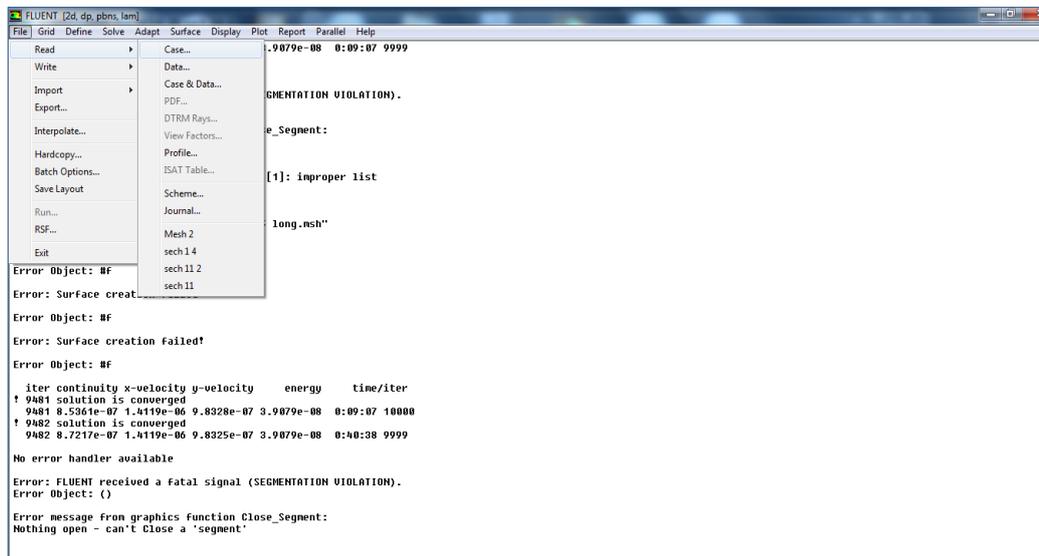


Figure II.9 : Importation de la géométrie

## 2. Vérification du maillage importé

Grid → Check

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

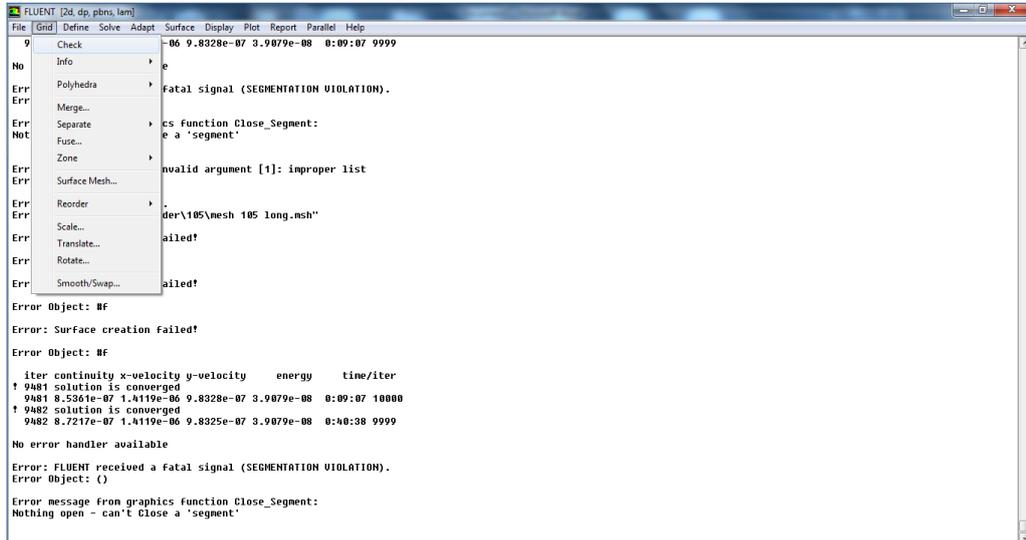


Figure II.10 : Vérification du maillage importé

## 3 Vérification de l'échelle

Grid → Scale

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

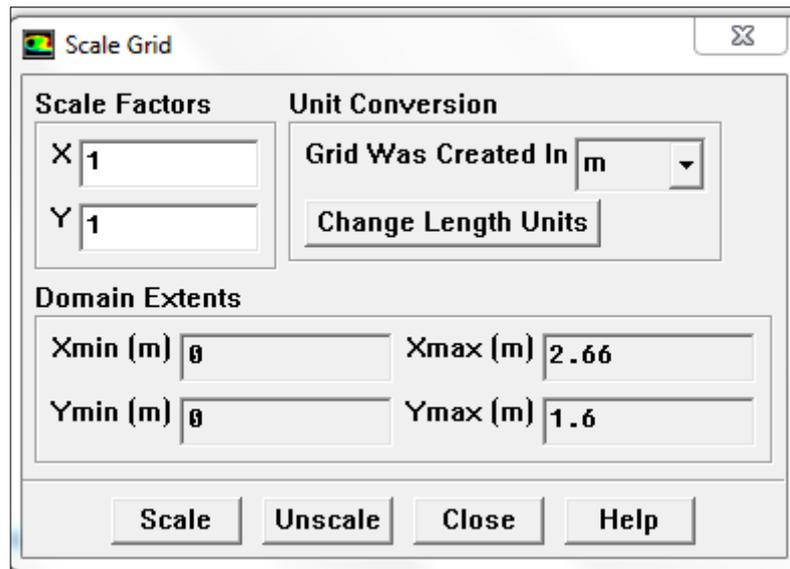


Figure II.11 : Vérification de l'échelle

#### 4 Choix du solveur

Define → Models → Solver

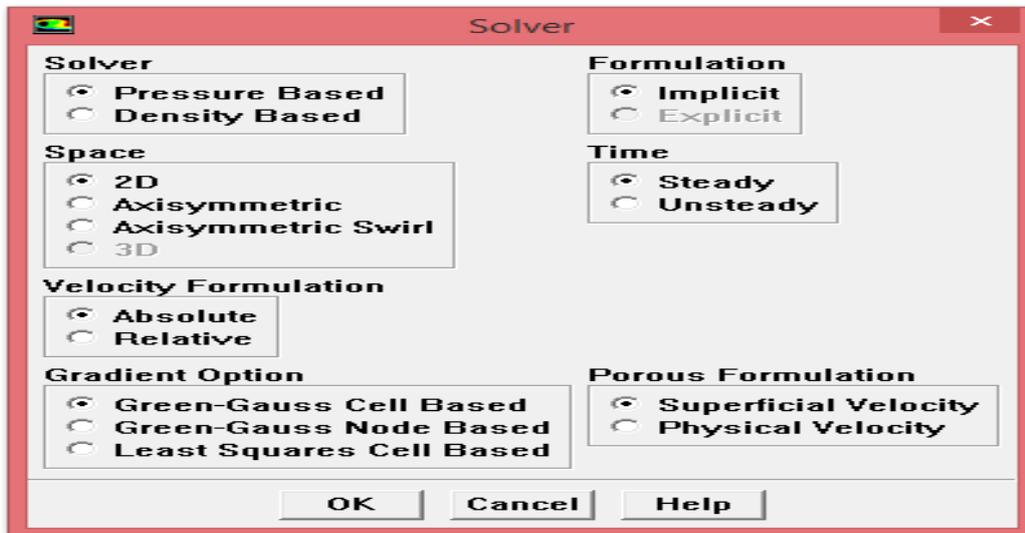


Figure II.12 : Choix du solveur

- **Segregated Solver** : est le plus approprié pour les écoulements incompressibles (ventilateur, pompes...)
- **Coupled Solver** : les solveurs « couplé implicite » et « couplé explicite », sont plutôt réservés aux écoulements compressibles à grande vitesse. C'est là aussi qu'on choisit le régime d'écoulement ; permanent ou instationnaire.

#### 4. L'équation de l'énergie

Define → Models → Energie...

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

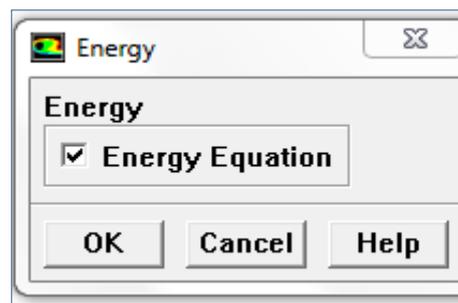


Figure II.13 : L'équation de l'énergie

## 5. Définition des caractéristiques du fluide

Define  $\longrightarrow$  Materials

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

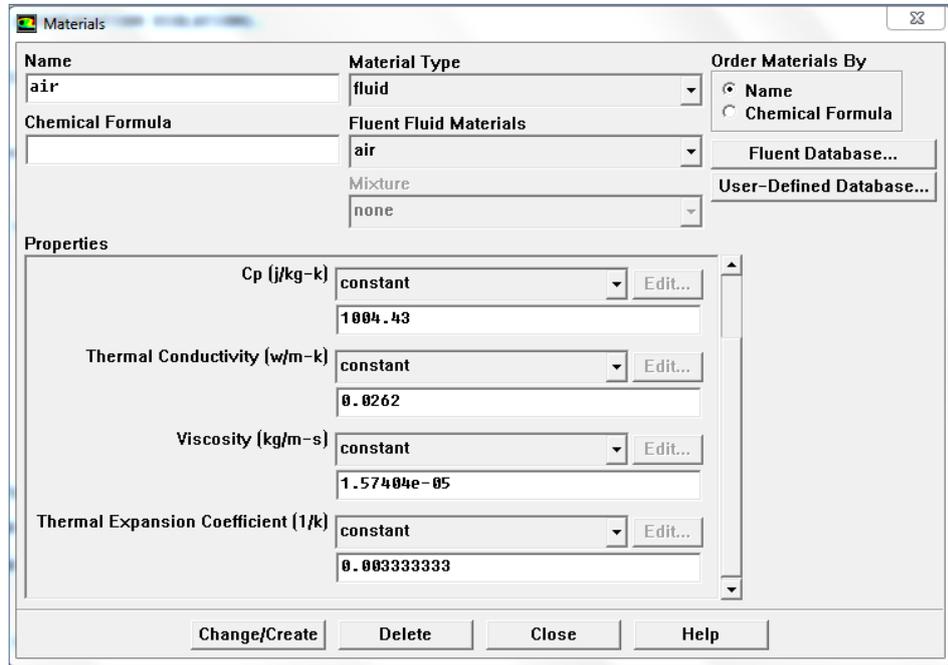


Figure II.14 : Définition des caractéristiques du fluide

## 6. Operating condition

Define → Operating condition

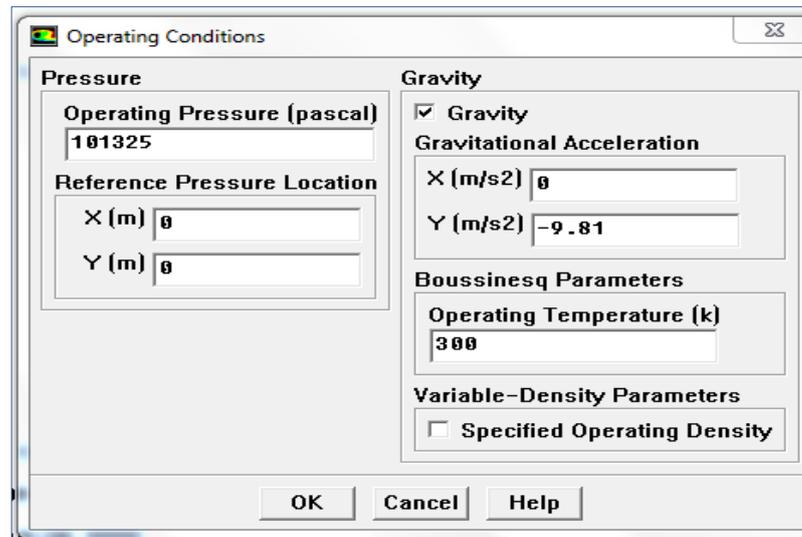


Figure II.15 : Choix de la pression de référence

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

## 7. conditions aux limites :

Define → Boundary conditions

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

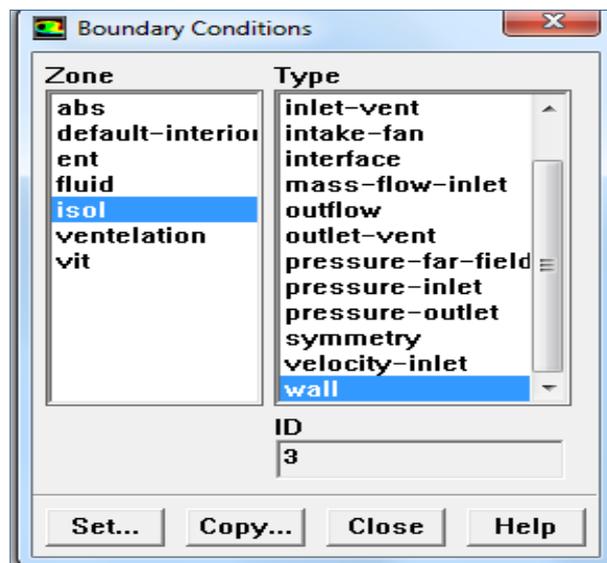


Figure II.16 : conditions aux limites

## 8.Choix d'ordre des équations et l'algorithme

Solve → Controls → Solution...

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

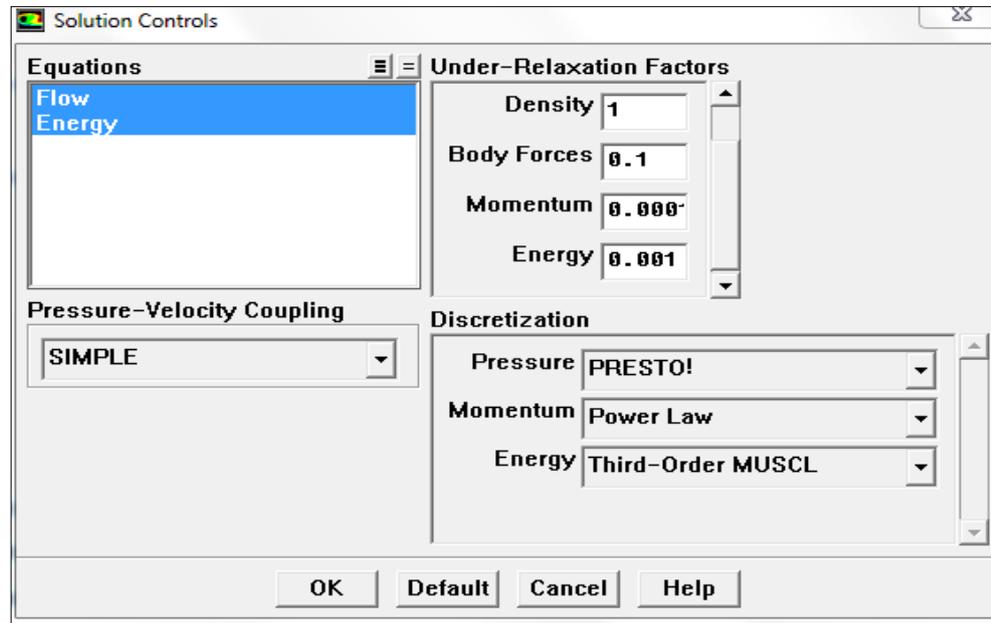


Figure II.17 : Choix d'ordre des équations et l'algorithme

## 9.Initialisation

Solve → Initialize → Initialize...

Cette fonction permet d'initialisé le calcul.

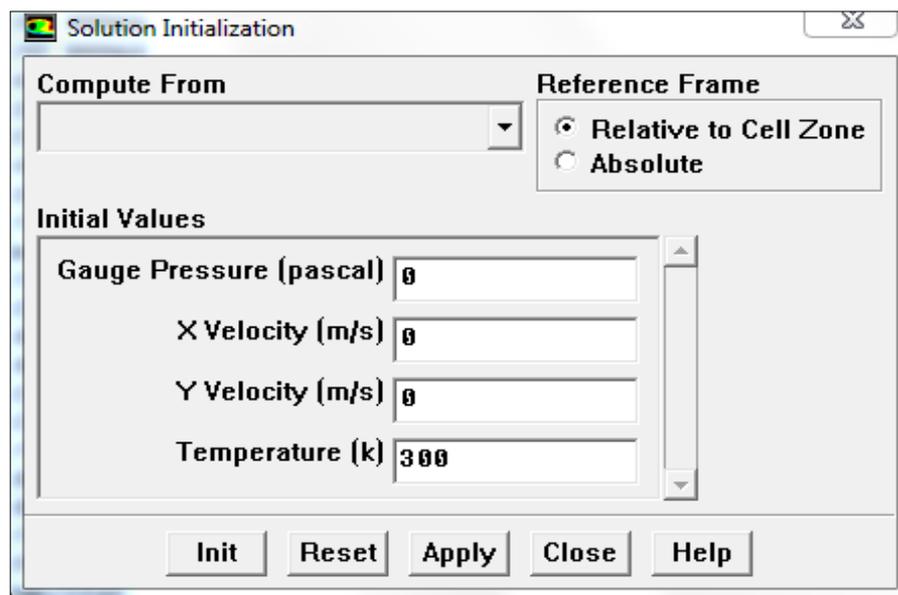


Figure II.18 : Initialisation

## 10.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.

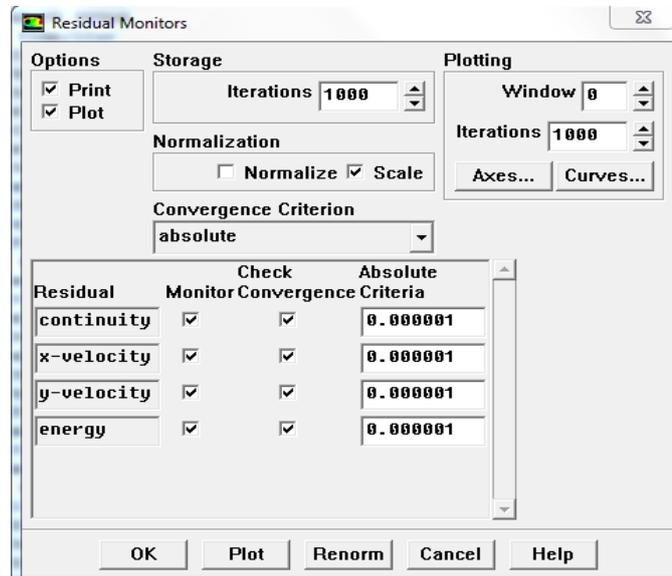


Figure II.19 : Choix des critères de convergence

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.

## 11 .Lancement du calcul

Solve → Iterate

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

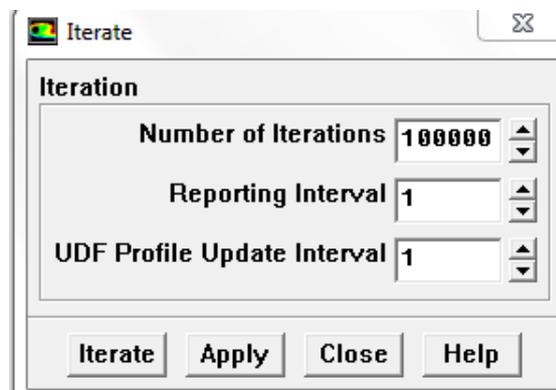


Figure II.20 : Choix du nombre des itérations

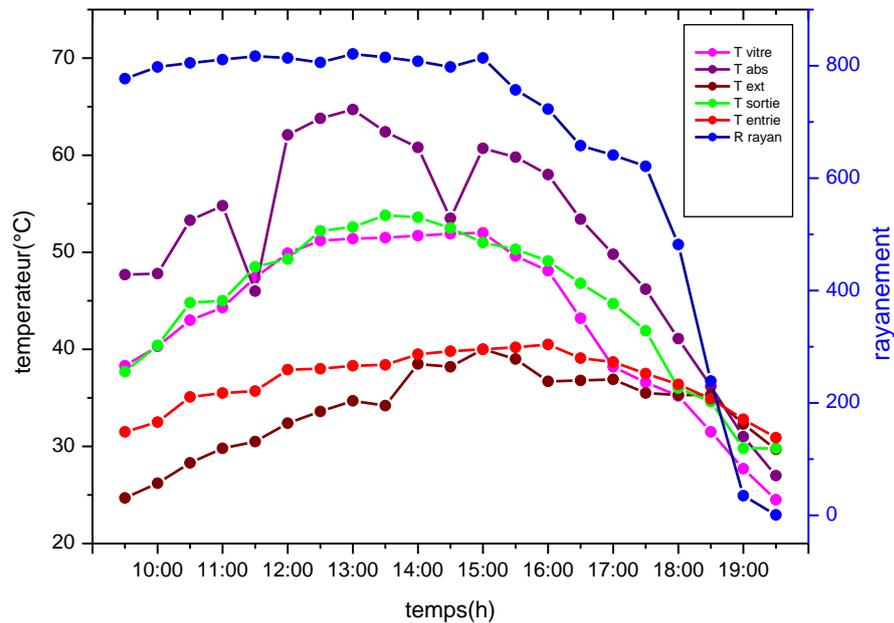
## **II .5 .2 Série d'expérience**

- La première partie est consacré pour l'étude de comportement thermique à vide des deux séchoirs solaires convectifs directs sans et avec appoints énergétique en régime variable.
- La deuxième partie de l'étude est basée sur l'évaluation des températures de l'air asséchant à l'intérieur du séchoir direct par simulation numérique en utilisant le logiciel fluent en comparant les résultats expérimentaux avec les résultats obtenus par simulation numérique
- La troisième partie de l'étude est basé sur la réalisation des essais de séchage des rondelles des oranges fraîches sous conditions variables sans et avec appoint énergétique .

# *Chapitre III*

## *Résultats et discussion*

### III.1. Etude de comportement thermique à vide de séchoir solaire direct sans appoint énergétique à convection forcée



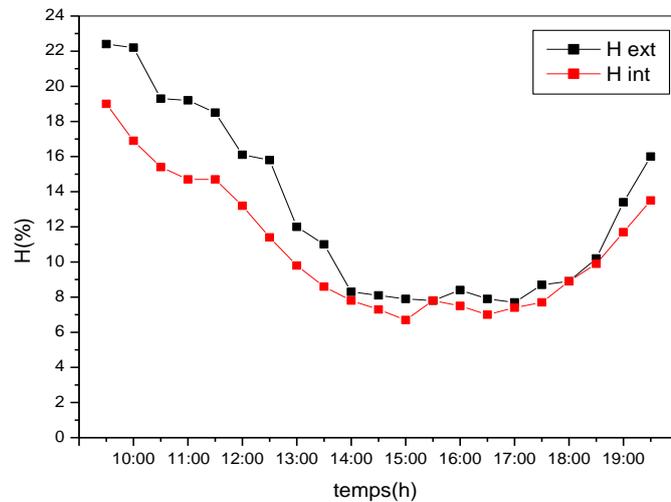
**Figure (III.1) : Variation des températures dans le séchoir solaire (direct)**

La figure (III.1) 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 (Tvit), 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 (III.1). Elles ont atteint les valeurs maximales entre (11h30 et 18h). Pour cette expérience de séchage les valeurs de l'éclairement global varient entre 821 et 10 W/m<sup>2</sup> avec un pic vers 11:00: .On remarque sur la figure (III.1) un l'écart important entre la température de l'air ambiant. Et le 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'intérieure du séchoir direct .on constate que la température à l'intérieur du séchoir direct sont élevée Tentre varie entre T min= 30.9 °C et Tmax=40.5°C Tabs varie entre Tmin=27°C et T max=64.7°C donc le séchoir direct nous assure des conditions opératoires favorables pour assurer en régime variable.

**Tableau III.1 : Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement solaire dans le séchoir solaire direct**

25/04/2019	T <sub>ent</sub>	T <sub>ent</sub>	T <sub>abs</sub>	T <sub>abs</sub>	T <sub>v</sub>	T <sub>v</sub>	T <sub>chm</sub>	T <sub>chm</sub>	T <sub>amb</sub>	T <sub>amb</sub>	Ray	Ray
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
	30.9	40.5	27	64.7	24.5	52	29.8	53.8	24.7	40	01	821
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	w/m2	w/m2

**III.1.1 Variation des humidités relative de l’air à l’intérieure et l’extérieur du séchoir solaire direct :**



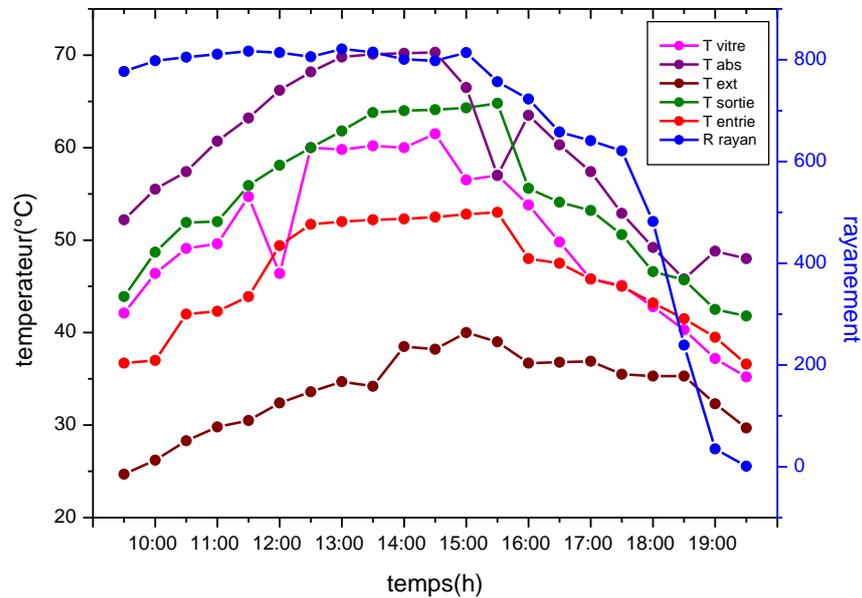
**Figure (III.2) : Variation l’humidité intérieure et extérieure du séchoir solaire direct**

La figure (III.2) 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 et maximales de l’humidité de l’air à l’intérieur du séchoir direct sont respectivement Hmin=6.7% et Hmax=19% dans l’intervalle de temps compris entre 15h00 et 16h30 où la température de l’air asséchant atteint sa plus grande valeur qui correspond à un flux solaire maximum

**III.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 le mesure des températures et de rayonnement dans le cas de l’augmentation de fraction

d'énergie provient de l'échangeur air /eau couplé à un simulateur d'eau chaude et fonctionne à une température de 60°C [1].



**Figure III.3 : Variation des températures dans le séchoir solaire (direct) muni par appoint énergétique**

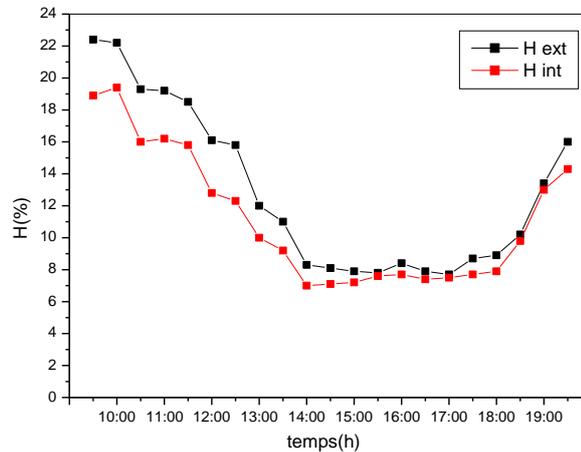
Il est à noter que l'évolution horaire de la température des composants du séchoir serre (couverture, absorbeur, ambiant et intérieur) est similaire à celle de l'éclairement solaire quelque soit les conditions extérieurs rencontrés dans l'expérience vs. La température de la chambre et la température 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 et 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 apparait 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 821 et 01 W/m<sup>2</sup> avec un pic vers 13:00: .On remarque sur la figure (II.18) que la température à l'intérieur du séchoir direct sont élevée Tent varie entre Tmin= 36.6 °C

et  $T_{max}=53^{\circ}\text{C}$   $T_{abs}$  varie entre  $T_{min}=48^{\circ}\text{C}$  et  $T_{max}=70.3^{\circ}\text{C}$  donc le séchoir direct nous assure des conditions opératoires favorables donc Le procédé de séchage continue (avec appoint),

**Tableau III.2 : Valeurs minimales, maximales des températures et rayonnement solaire dans le séchoir solaire direct**

25/04/2019	$T_{ent}$	$T_{ent}$	$T_{abs}$	$T_{abs}$	$T_v$	$T_v$	$T_{chm}$	$T_{chm}$	$T_{amb}$	$T_{amb}$	Ray	Ray
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
	36.7 °C	53 °C	48 °C	70.3 °C	35.2 °C	61.5 °C	41.8 °C	64.8 °C	24.7 °C	40 °C	1 w/m2	821 w/m2

**III.2.1 Variation des humidités relative de l’air à l’intérieure et l’extérieur du séchoir solaire direct :**



**Figure (III.4) : Variation l’humidité intérieure et extérieure du séchoir solaire direct**

La figure (III.4) 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 et maximales de l'humidité de l'air à l'intérieur du séchoir direct sont respectivement  $H_{min}=7\%$  et  $H_{max}=19.5\%$  dans l'intervalle de temps compris entre 14h00 et 15h00 où la température de l'air asséchant atteint sa plus grande valeur qui correspond à un flux solaire maximum.

### III.3. Simulation du séchoir solaire 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.3.1 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.

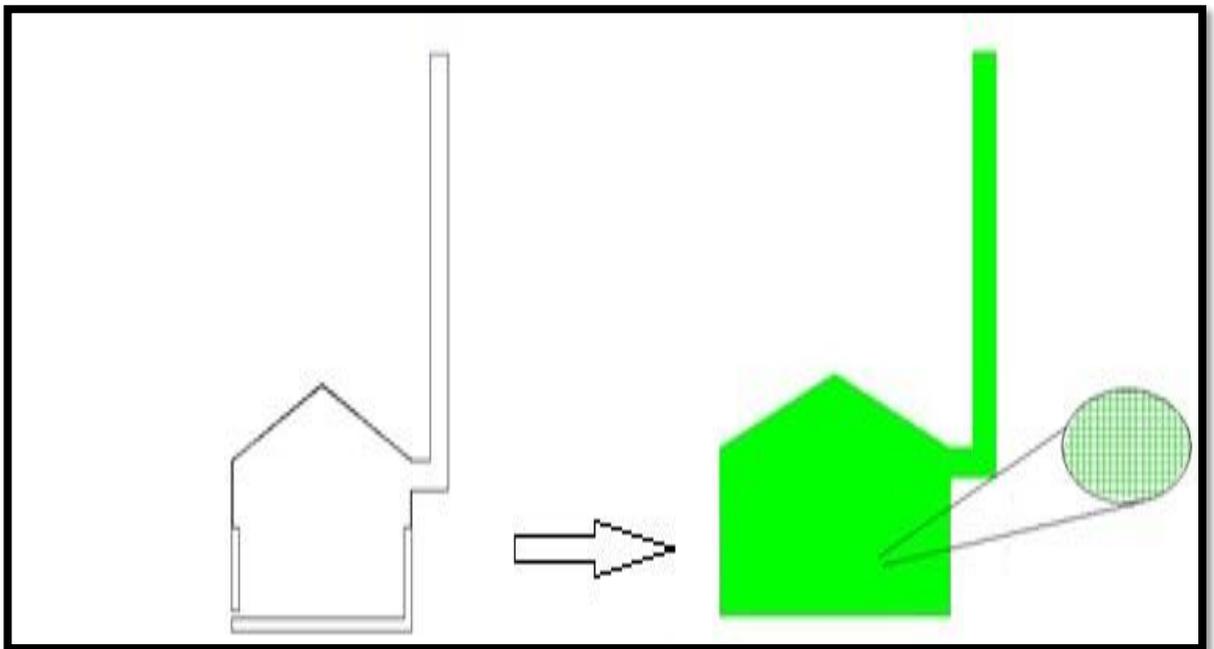


Figure III.5 : Schéma de maillage

##### III.3.1.1 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  $10^{-5}$ .

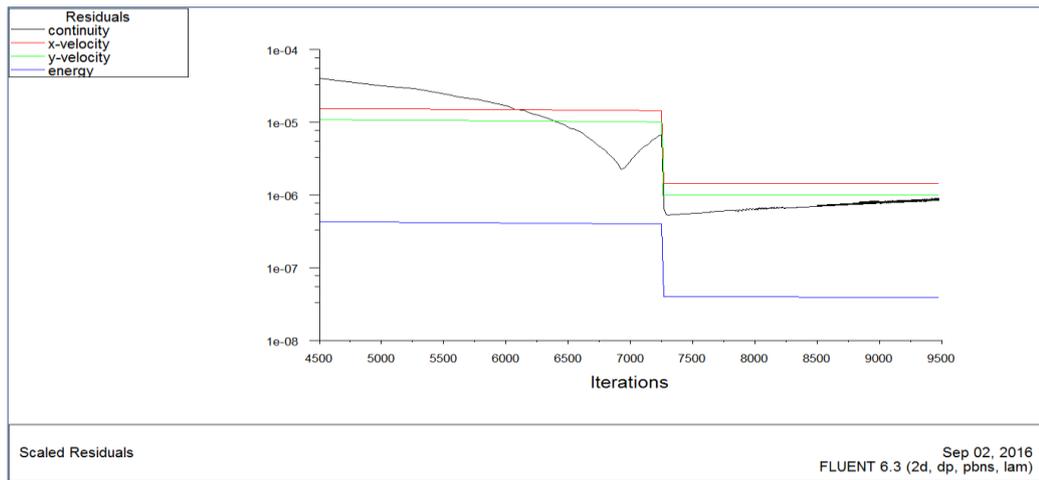


Figure III.6 : Convergence des résultats

### III.3.2 Simulation numérique du fonctionnement du séchoir solaire direct pour une journée ensoleillée

Pour confirmer l'exactitude de notre travail expérimentale, on a utilisé la simulation par le logiciel fluent, les résultats donnés par ce programme ont été présentée par les figures ci-dessous.

#### III. 3.2.1. Contours de la température du séchoir direct sans échangeur

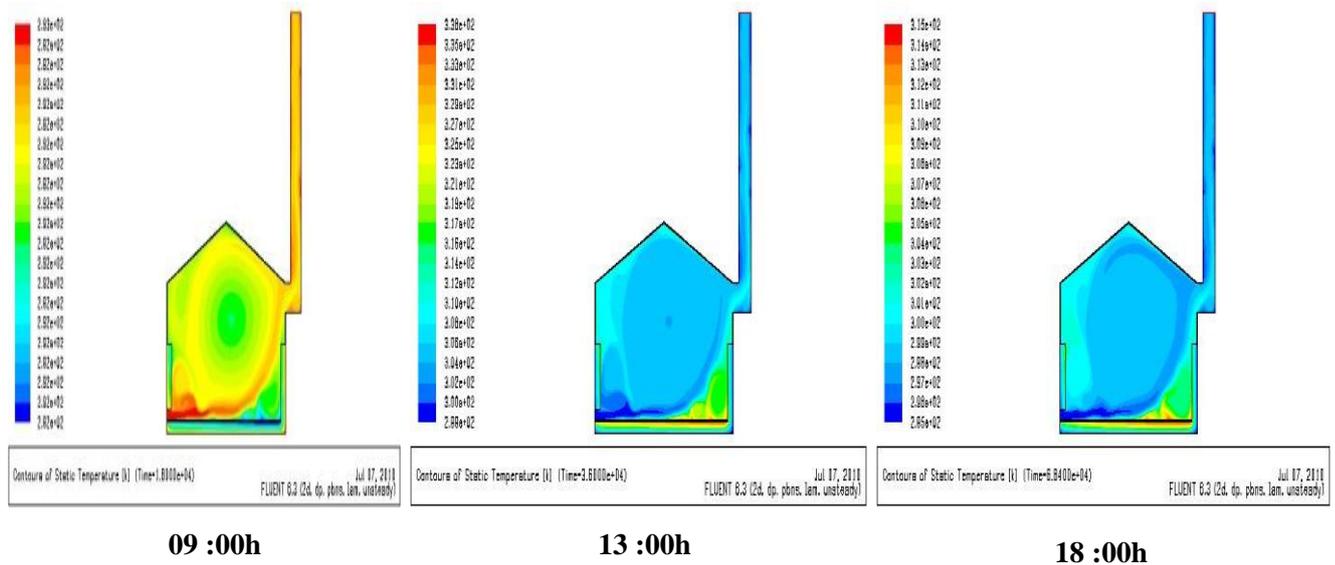
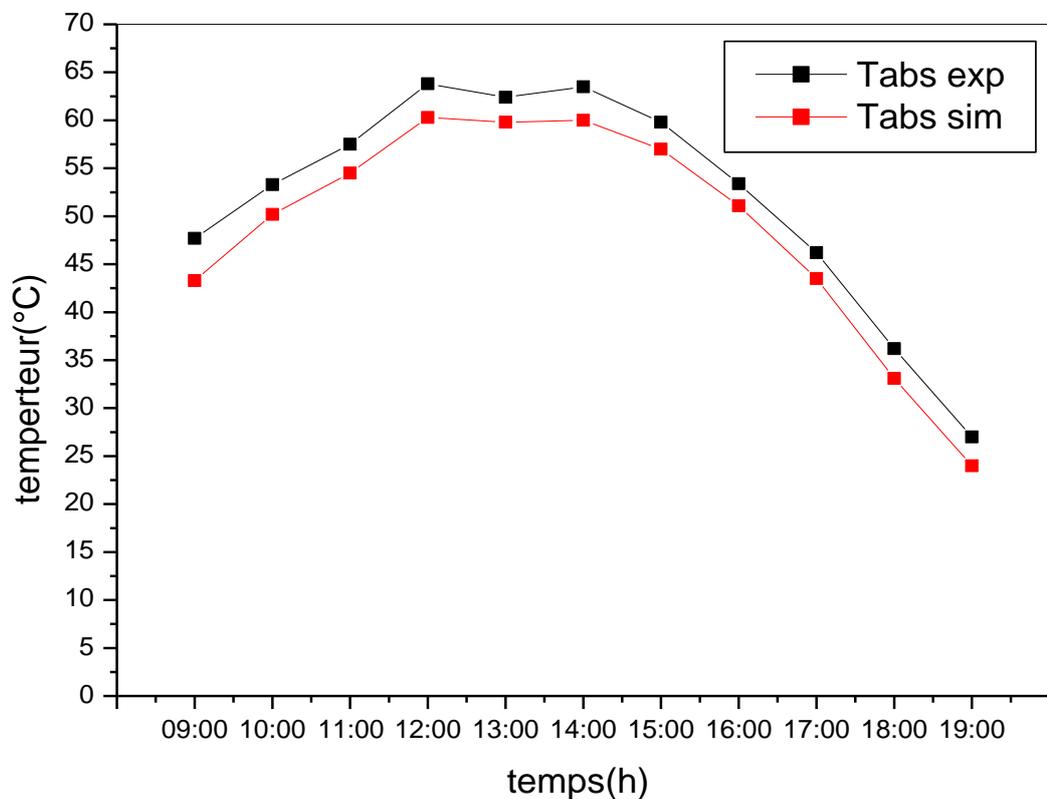


Figure III.7 : contours de la température.

La figure (III.7) présente la distribution de la température de l'air dans le séchoir dans trois période de fonctionnement 9 :00H, 12:00H et 18 :00H durant les essais à vide . à 9 :00H on constate que le contour de la température est variable avec une distribution homogène au centre du séchoir solaire, les températures au voisinage du vitrage et de la cheminé sont faible .A 13 :00H on constate que la température de la zone centrale du séchoir solaire augmente considérablement d'où le rayonnement solaire atteint sa valeur maximale, ce qui permet d'augmenter la température de la plaque absorbeur, et la température de l'air de séchage dans le séchoir solaire, à 18 :00H les températures diminuent dans la partie supérieure du séchoir et le long de la cheminée

### III. 3.2.2 Variation des températures dans le séchoir solaire sans échangeur



**Figure III.8 : Variation de la température en fonction du temps**

D'après la figure (III.8) on remarque que Tabs.sim et Tabs.exp varient de 24 à 60.3°C et de 27 à 63.8°C respectivement. La figure montre aussi qu'il existe une différence de température d'environ 3-4°C entre Tabs.exp et Tabs.sim,

III.3.3. Contour de la température du séchoir avec échangeur

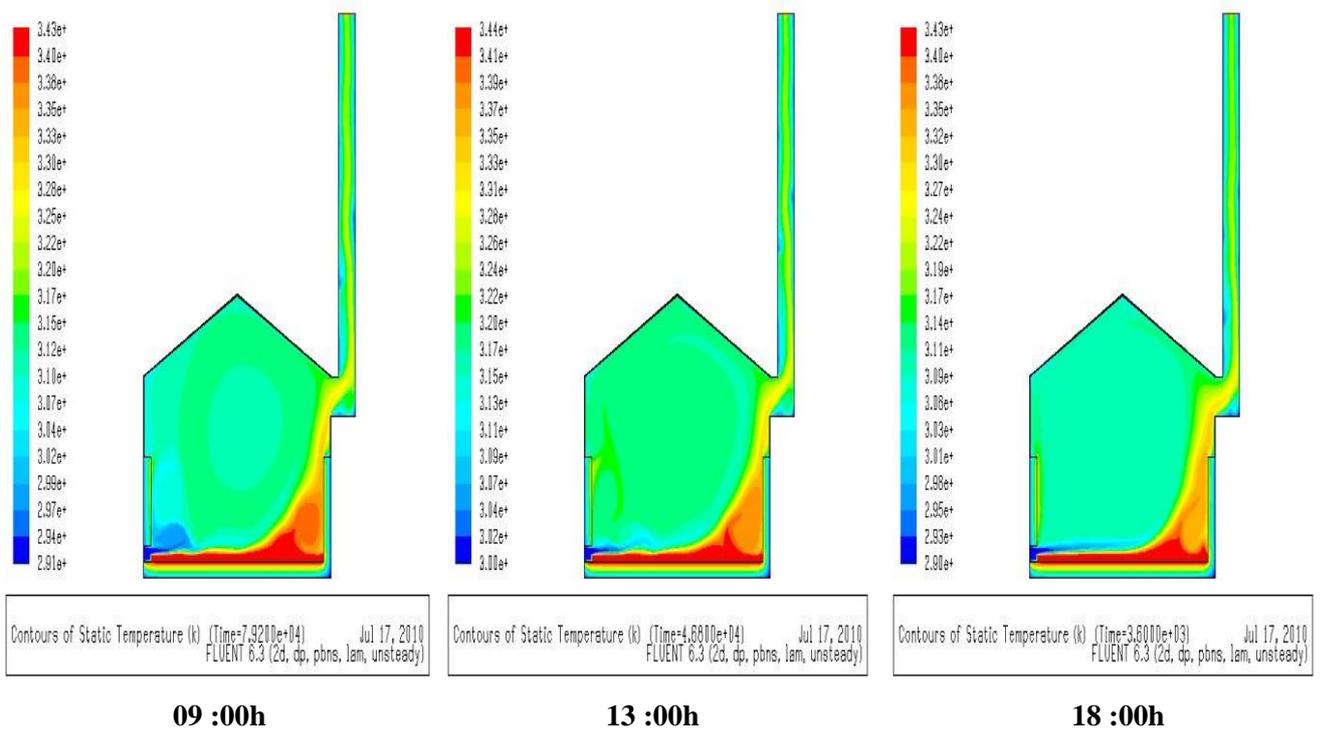
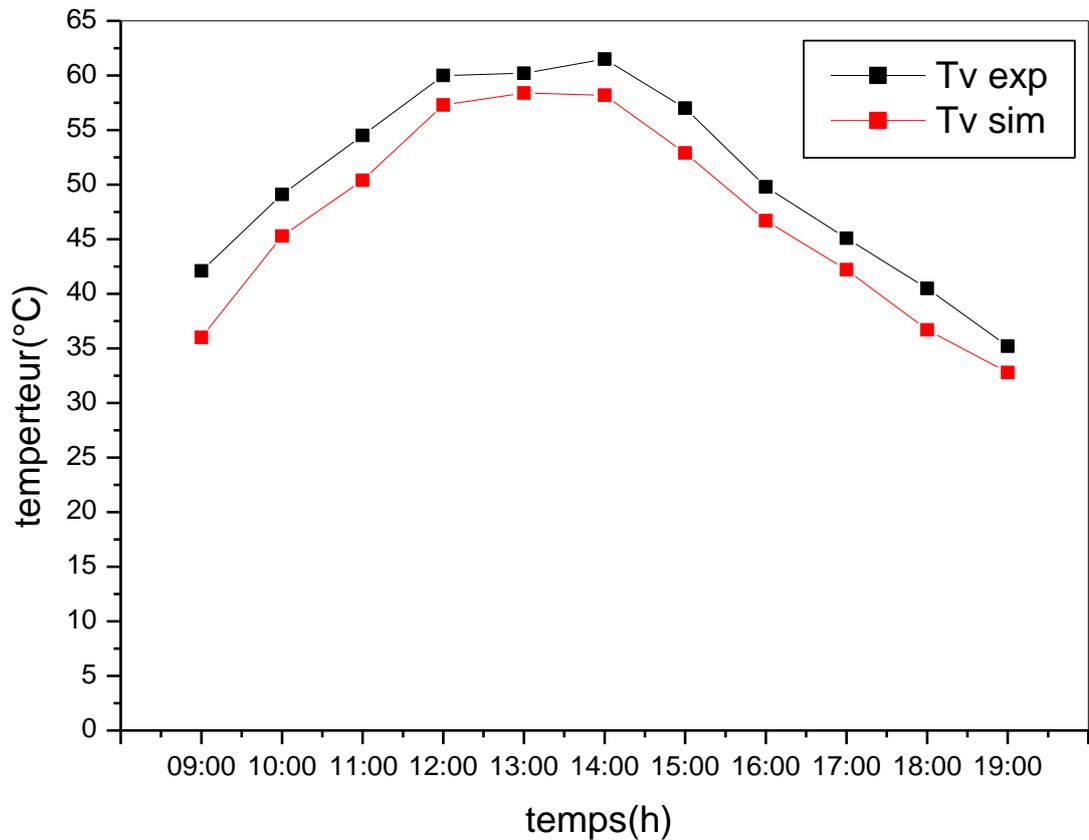


Figure III.9 : Contours de la température

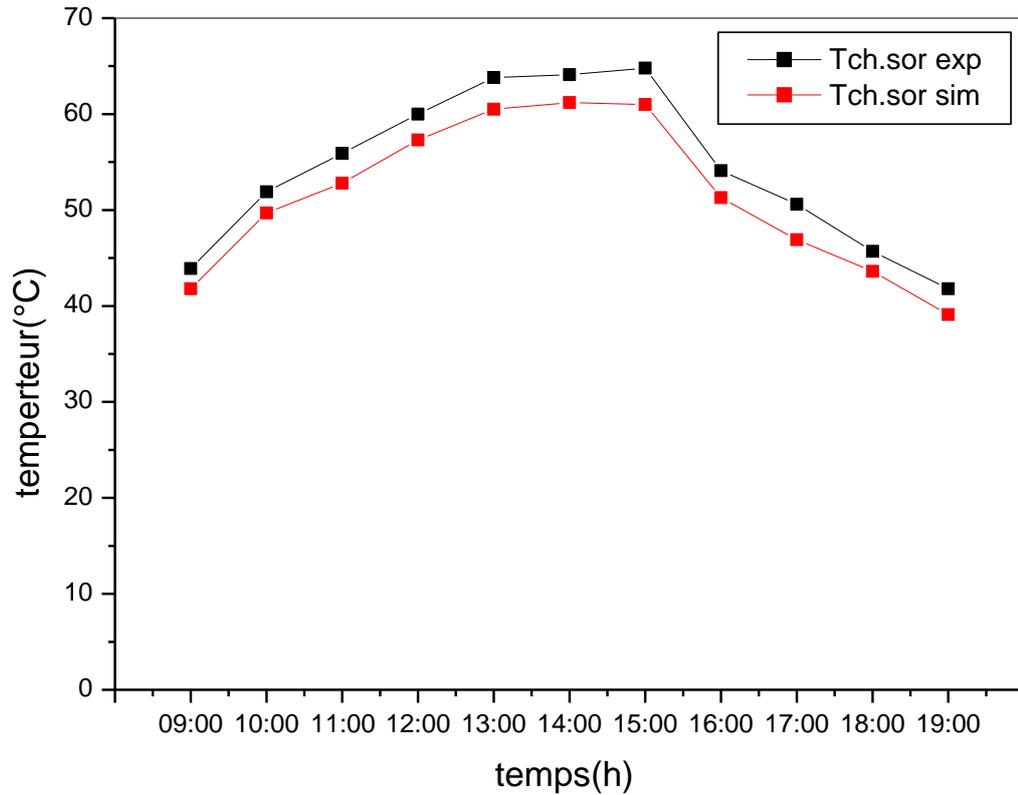
La figure (III.9) présente le contour de température du séchoir avec appoint entre 13h00H à 16 :00H ,le calcul de simulation nous montre le profil des variations des températures des composants du séchoir solaire direct avec échangeur . On constate que la température de l’air asséchant augmente dans la zone centrale et près du l’échangeur au début de l’expérience, au cours du temps l’augmentation de la température est due à l’élévation des températures dans tous les composants du séchoir solaire cela est expliqué par l’augmentation du flux radiatif et convectif (contact air – échangeur) dans ce cas la plaque absorbante prennent des valeurs maximales. La présence des deux sources de chaleur dans le séchoir solaire; échangeur de chaleur et plaque d’absorption permettent d’obtenir des températures de l’air plus élevées jusque la fin de l’expérience à 18 :00H

**III.3.3.1 Variation des températures du séchoir solaire avec échangeur:**

**Figure III.10 : Variation de la température dans le séchoir solaire direct en fonction du temps**

La figure (III.10) montre la variation de Tv.exp et Tv.sim en fonction du temps pour un fonctionnement de séchoir. On remarque que Tv.exp et Tv.sim variant de 35.2 à 61.5°C et de 32.8 à 58.4°C respectivement. La figure montre aussi l'existence d'une différence de température d'environ 3-4 °C entre Tv.exp et Tv.sim,

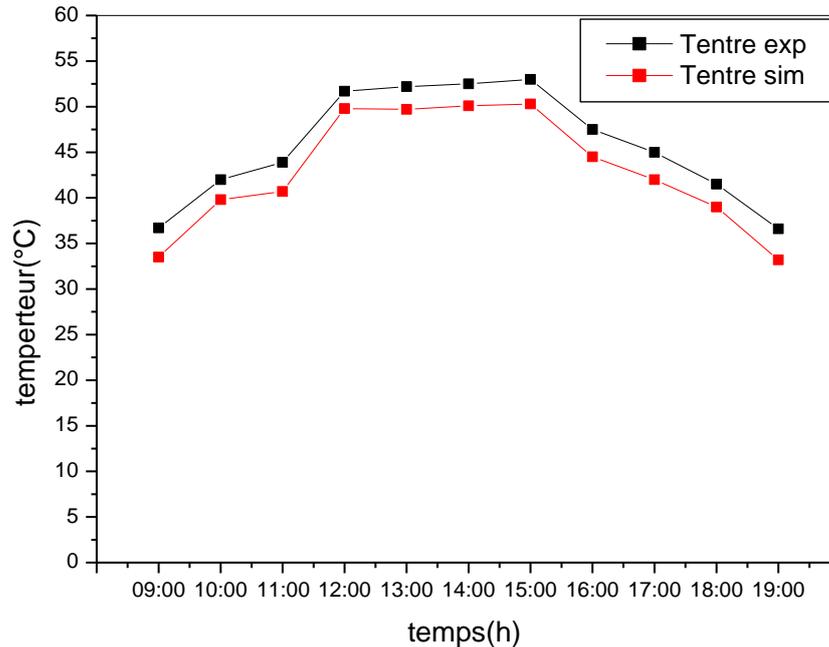
### III.3.3.2. Variation des températures de l'air asséchant



**Figure III.11: Variation de la température dans le séchoir solaire en fonction du temps**

La figure (III.11) montre la variation de Tch.sort.sim et Tch.sort.exp en fonction du temps pour un fonctionnement de séchoir . On remarque que Tch.sort.sim et Tch.sort.exp varient de 39.1 à 61.2°C et de 41.8 à 64.8°C respectivement. La figure montre aussi l'existence d'une différence de température d'environ 2-3°C entre Tch.sort.exp et Tch.sort.sim,

### III.3.3.3. Variation des températures de l'air à l'entrée du séchoir solaire



**Figure III.12: Variation de la température dans le séchoir solaire direct en fonction du temps**

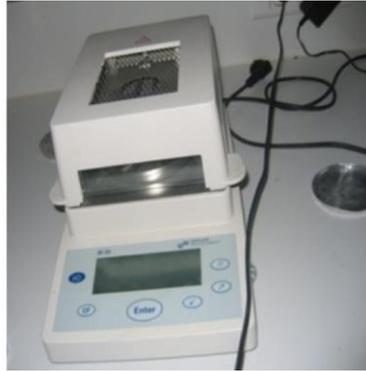
La figure (III.12) montre la variation de Tentre.sim et Tentre.exp en fonction du temps pour un fonctionnement de séchoir. On remarque que Tentre.sim et Tentre.exp varient de 33.2 à 50.3°C et de 36.6 à 53°C respectivement. La figure montre aussi l'existence d'une différence de température d'environ 2-3°C entre Tentre.exp et Tentre.sim,

## III.4 Essais du séchage solaire avec produit (rondelles des oranges)

### III.4.1. Mesure de la teneur en eau

Dans notre cas, la détermination de la teneur en eau, des échantillons des rondelles des oranges de 0.5 cm s'effectue à l'aide d'un analyseur d'humidité : Sartorius MA selon les étapes suivantes :

- Réglage de la température de l'analyseur d'humidité à 105° [22].
- Introduction d'une masse initiale (Environ 3.995g) de produit dans la chambre de l'analyseur.
  - Démarrage de l'analyseur d'humidité en choisissant le programme convenable de chauffage.
  - Arrêt automatique de l'appareil après que la masse de l'échantillon devient constante.



Figure(III.13): Analyseur de la teneur en eau

### III.4.2 Variation de la teneur en eau dans le séchoir solaire direct sans et avec échangeur

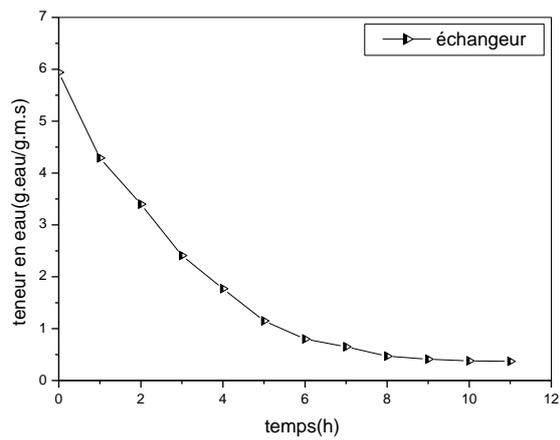


Figure (III.14) : évaluation de la teneur en eau en fonction du temps

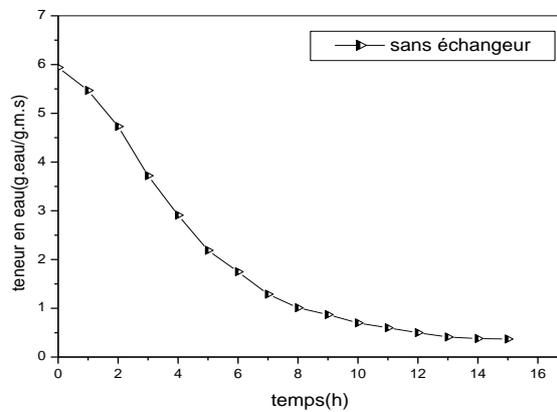


Figure (III.15) : évaluation de la teneur en eau en fonction du temps

Nous pouvons voir sur la figure (III .14) que la durée e séchage est 10H en continue ,à partir de 9 h jusqu'à 19 h la teneur en eau présente une diminution importante , ceci est expliqué par la diffusion d'une grande quantité de vapeur d'eau dans l'air asséchant. Pour le reste du temps de séchage, la diminution de la teneur en eau est moins importante et tend vers une valeur finale de 0.13 kg eau/g de m.s.

Sur la Figure III.15 nous avons montré la variation de la teneur en eau (X) en fonction du temps pendant la période de séchage direct sans appoint énergétique . La durée de séchage nécessaire pour atteindre la teneur en eau finale (0.13kg d'eau par kg de matière sèche) est d'environ 15 heures. Le taux élevé de perte en eau a été observé au cours des six premières heures de séchage 9h00-15h00 correspondant à une teneur en eau allant de 5.94 kg d'eau / kg m.s à 0.18 kg d'eau / kg de m.s. C'est à partir de 15h00 que la teneur en eau devient moins importante et la valeur finale de la teneur en eau a été constatée à la fin du processus de séchage

# *Conclusion Générale*

## **CONCLUSION**

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

L'amélioration est faite par l'intégration d'un appoint énergétique par un échangeur air /eau couplé à un simulateur de l'eau géothermique afin de maintenir des conditions favorables dans la chambre de séchage ,L'échangeur génère de la chaleur à partir de l'eau chaude distribuée et réagit en tant que source de chaleur permanente.

Les résultats obtenus ont montré une amélioration significative du comportement thermique du séchoir solaire, surtout après le coucher du soleil .Avec intégration de l'échangeur de chaleur à l'intérieur du séchoir solaire, la plus petite valeur obtenue de la température de l'air de séchage était de 36.6°C, tandis que la plus haute valeur obtenue était de 53°C, ce qui permet de diminuer le temps de séchage dans le cas du séchage des rondelles des oranges. La durée est  $t= 15h$  pour le séchoir sans appoint et  $t= 10h$  pour le séchoir avec appoint énergétique

La simulation numérique par FLUENT a été réalisée pour montrer l'influence de l'intégration de l'échangeur de chaleur sur la performance thermique du séchoir solaire. Il a été constaté que l'échange de chaleur entre l'eau chaude et l'air asséchant augmente l'homogénéité des températures du séchoir solaire direct

L'intégration de l'appoint énergétique nous assurer le séchage direct 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 mains d'ouvre 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 à convection forcée présente un grand intérêt économique et industriel, il permet de préserver d'éviter le stockage du produit pendant la nuit.

# *Références Bibliographiques*

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1]. Djamel Menouche ,Etude et amélioration de l'efficacité énergétique des séchoirs solaires dans les zones arides désertiques, Thèse de doctorat , université Bejaya, 2016
- [2]LOUAZENE AHMED , étude technico-économique de séchage solaire des produits alimentaires , master energie renouvelable, université ouargla2017
- [3]Frihiilyes Etude expérimentale et théorique du séchage solaire des grains de fève master energie renouvelable, université ouargla2017
- [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 cavaillé, j 2480-2 ; 2480-22.
- [7]. Daguinet. M., "Les séchoirs solaires : théorie et pratique ", Publication de l'UNESCO, Paris, France, 1985.
- [8] P. Dudez, Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes: expériences et procédés, Edition du Greth, France (1999).
- [9] D. R. Pangavhanc, R. L. Sawhcy and P. N. Sarsavadia, "Design, development and performance testing of new natural convection", Energy 27(579-590) (2002).
- [10] D. Mennouche, Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, (2006).

- [11] 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).
- [12] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Iddimamand A. Jamali, "Thin la1'er convectivesolar drying an mathematical modeling of prickly pear peel ", *Energy* 29 (211-244) - (2004).
- [13]. 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.
- [14]. A. Ouaouich, A. Osakwe, H. chimi. Guide du constructeur du séchoir hybride. L'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel .2005
- [15] Documentation FLUENT" User's Guide" Fluent Inc. July 26,1998.
- [16] **D.Fedala**, « Initiation à la CFD », October 2007.

**Web bibliographiques :**

- [17] FLUENT Tutorial Guide PDFftp.energia.bme.hu> pub >MSc >flu\_tg
- [18]GAMBIT TUTORIAL GUIDE: 1.CREATING AND MESHING THE  
...<https://www.shrcnet.ca>>Gambit>html
- [19] K. Manjarres- Pinzon<sup>1</sup>; M. Cortes-Rodriguez; E. Rodríguez-Sandoval Effect of drying conditions on the physical properties of impregnated orange peel, *Braz. J. Chem. Eng.* vol.30 no.3 São Paulo July/Sept. 2013
- [20]Chafer, M., Gonzalez-Martinez, C., Ortola, M. D., Chiralt, A., Fito, P., Kinetics of osmotic dehydration in orange and mandarin peels. *Journal of Food Process Engineering*, 24, (4), 273-289 (2001).
- [21] Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., Bechki, D. Crop drying by indirect active hybrid solar - Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar Energy* 83(12), 2223-2232(2009)

# *Annexes*

**Annexe A :**



**Séchoir solaire direct actif ou forcé**



**Séchoir solaire direct avec l'appoint énergétique (échangeur)**

**Annexe B :**



**Séchage solaire direct des rondelles des oranges**



**Séchage solaire direct des rondelles des oranges**



**Détermination de la teneur en eau initiale des rondelles des oranges**

## Résumé

Ce travail présente les résultats de l'étude expérimentale et théorique du séchoir solaire direct sans et avec intégration d'échangeur de chaleur couplé avec un simulateur de l'eau géothermique à haute température qui peut être utilisé comme source de chaleur pour alimenter le séchoir solaire après le coucher du soleil et en dehors des heures ensoleillées, l'échangeur de chaleur fournira la chaleur de l'eau chaude, il sert à l'augmentation des températures des composants du séchoir direct, il nous assure la continuité du séchage dans la nuit et même par temps nuageux.

les simulations numériques par FLUENT ont été réalisées pour montrer l'influence de l'intégration de l'échangeur de chaleur sur la performance thermique du séchoir solaire direct. Il a été constaté que l'échange de chaleur entre l'eau chaude et l'air asséchant augmente l'homogénéité des températures du séchoir solaire direct

les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les points mesurés expérimentalement et ceux calculés par simulation, en plus le séchoir solaire direct avec appoint énergétique est retrouvé plus rapide pour le séchage des rondelles des oranges avec une durée égale à 4 h

**mots clés :** Séchoir solaire direct, échangeur air-eau, température de l'air, simulation numérique

## ملخص

يقدم هذا العمل نتائج الدراسة التجريبية والنظرية للمجفف الشمسي المباشر مع وبدون تكامل مبادل حراري مقترن بجهاز محاكاة للمياه الحرارية الأرضية بدرجات حرارة عالية والذي يمكن استخدامه كمصدر للحرارة لتشغيل المجفف الشمسي بعد غروب الشمس، كما يعمل على زيادة درجة حرارة مكونات المجفف المباشر، ويضمن استمرارية التجفيف في الليل وحتى أثناء الطقس الغائم

تم إجراء عمليات محاكاة رقمية بواسطة برنامج فلونت لإظهار تأثير تكامل المبادل الحراري على الأداء الحراري للمجفف الشمسي المباشر. لقد وجدنا أن التبادل الحراري بين الهواء الساخن وهواء المجفف الشمسي يزيد من تجانس درجات حرارة مجفف الطاقة الشمسية المباشر.

كما أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تجانساً بين النقاط التي تم قياسها تجريبياً والنقاط المحسوبة عن طريق المحاكاة، بالإضافة إلى أن المجفف الشمسي المباشر يؤدي ذلك بشكل أسرع في ظرف مدة لا تتجاوز 4 ساعات

الكلمات المفتاحية: مجفف شمسي مباشر، مبادل هواء - ماء، درجة حرارة هواء، محاكاة رقمية

## Summary

This work presents the results of the experimental and theoretical study of the direct solar dryer with and without heat exchanger integration coupled with a high temperature geothermal water simulator that can be used as a heat source to power the solar dryer. after sunset and outside sunny hours, the heat exchanger will provide the heat of the hot water, it serves to increase the temperatures of the components of the direct dryer, it ensures the continuity of the drying in the night and even in cloudy weather.

the numerical simulations by FLUENT were carried out to show the influence of the integration of the heat exchanger on the thermal performance of the solar dryer. It has been found that heat exchange between hot and drying air increases the homogeneity of direct solar dryer temperatures.

the exchanger improves the thermal performance of the dryer during operation, the results obtained show a good agreement between the points measured experimentally and that calculated by simulation, in addition the direct solar dryer with energy supplement is found faster for drying the washers oranges with a duration equal to 4h.

**Key words:** Direct solar dryer, air-water exchanger, air temperature, numerical simulation.