



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah d'Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique

Mémoire
Présenté pour l'obtention du Diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

Présenté et soutenu par :
Mecheri Ayoub et Kouici Abdessalam

Thème :

*Etude d'amélioration de l'homogénéité du champ thermique
dans un séchoir solaire en utilisant la méthode des plans
d'expériences*

Soutenu Publiquement Le : 25/06/2019

Devant Le Jury :

ACHOURI El-Hadj	M A.A	UKM Ouargla	Président
ZIANI Lotfi	M C.B	UKM Ouargla	Examineur
BOUBEKRI Abdelghani	Professeur	UKM Ouargla	Encadreur
BENHAMZA Abderrahmane	Doctorant	UKM Ouargla	Co-Encadreur

Année Universitaire : 2018/2019



Merci

Remerciements

Le présent travail a été effectué dans le cadre du mémoire de Master académique en énergétique au département de génie mécanique et a été gentiment accueilli dans le laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zones arides (LENREZA) à l'université de KASDI MERBAH Ouargla (Algérie).

*Nous tenons tout d'abord à remercier très vivement monsieur le professeur **BOUBEKRI Abdelghani** qui a eu l'aimable volonté de proposer et diriger ce travail.*

*Nous remercions également messieurs, **Dr. Achourí El-Hadj** et **Dr. Ziani Lotfi** pour avoir gentiment accepté de juger ce travail.*

*Nos remerciements sont aussi particulièrement adressés à messieurs **BENHAMZA Abderrahmane** et **SETTOU Belkhir** pour leur participation active au suivi de ce travail et leurs conseils constructifs durant tout le semestre.*

Nous remercions également l'ensemble du corps enseignant du département Génie mécanique pour la qualité de la formation dont on a bénéficié sur toutes nos années d'étude. En fin nos vifs remerciements sont adressés à toute personne ayant participé ou aidé, de loin ou de près, à l'achèvement de ce travail.



Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes parents

A mes grandes parents

*A mes frères et sœurs (khireddine, toufik,
hiba, wafa)*

A toute ma famille

*A Tous nos enseignants du département de
génie mécanique.*

*À tous mes amis et en particulier : HOCIN,
MOH, abdessalam, Ali,*

Mecheri Ayoub



Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes chers parents

A mes frères et mes sœurs

A toute ma famille

*A Tous nos enseignants du département de
génie mécanique.*

A tous mes amis chacun avec son nom

A chaque personne qui m'a aidé.

Kouici Abdessalam

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Chapitre 01 : Conception des séchoirs solaires et utilité de la simulation par CFD

I.1	Introduction	4
I.2	L'énergie solaire thermique :	4
I.3	Définition du séchage :	4
I.3.1	Classification des systèmes de séchage solaire :	4
I.4	Types des séchoirs solaires :	5
I.4.1	Les séchoirs solaires directs :	6
I.4.2	Les séchoirs solaires indirects :	7
I.4.3	Le séchoir solaire mixte :	8
I.4.4	Séchoir solaire hybride :	9
I.5	L'effet des paramètres géométriques sur le séchage uniforme :	10
I.6	Analyses bibliographiques sur l'uniformité et l'homogénéité de la température dans la chambre de séchage d'un séchoir solaire :	11
I.6.1	Intégration des matériaux à changement de phase au niveau du capteur ou la cheminée ou simultanément :	11
I.6.2	La simulation numérique à l'intérieur d'une chambre de séchage :	11
I.6.3	Séchoir à armoire :	11
I.6.4	Étuve de séchage :	12
I.6.5	Amélioration des champs thermiques dans la chambre de séchage par le changement géométrique :	12
I.7	Analyse bibliographique sur l'Utilisation de CFD aux simulations des séchoirs solaires :	13
I.7.1	Séchoir solaire direct :	13
I.7.2	Séchoir indirect :	14
I.8	Problématique de la présente étude :	15

Chapitre 02 : Exploration expérimentale du séchoir solaire à vide

II.1	Introduction :	17
II.2	Description du séchoir solaire :	17
II.2.1	Le capteur solaire :	18
II.2.2	La chambre de séchage :	18
II.3	Propriétés thermo-physiques :	19
II.4	Appareillage et mesure :	19
II.4.1	Rayonnement solaire :	19
II.4.2	Vitesse de l'air :	20
II.4.3	Mesure de la température :	20
II.5	Série d'expériences :	22
II.5.1	Emplacement des thermocouples :	22
II.5.2	Mesures expérimentales de la température :	23

Chapitre 03 : Simulation du séchoir indirect fonctionnant à vide

III.1	Introduction :	27
III.2	Géométrie du problème :	27
III.3	Hypothèses simplificatrices :	28
III.4	Equations dimensionnelles gouvernantes :	29
III.4.1	Equation de la continuité :	29

III.4.2	Equation de la quantité de mouvement :	29
III.4.3	Equation d'énergie :	29
III.5	Conditions aux limites :	29
III.6	Principales étapes de traitement du problème par CFD :	30
III.6.1	Schéma du maillage du modèle physique adopté :	31
III.6.2	Résolution du problème avec le code Fluent :	31
III.7	L'effet du maillage :	32
III.8	Validation :	33
III.9	Simulation numérique du comportement du séchoir :	34
III.9.1	Les conditions aux limites de la journée 21/04/2019.....	35
III.9.2	La distribution de température :	35
III.9.3	La Distribution de vitesse et de pression :	36
Chapitre 04 : Optimisation de la conception du séchoir solaire avec la MPE		
IV.1	Introduction :	39
IV.2	Etapes du traitement :	40
IV.3	La méthode des plans d'expériences	41
IV.4	Définition de la méthode de surface de réponse (MSR) :	41
IV.5	Réponses visées :	42
IV.5.1	La température moyenne de la chambre de séchage :	42
IV.5.2	Écart type de température	42
IV.5.3	Vitesse à la sortie (vitesse d'extraction) :	43
IV.6	Les facteurs et leurs niveaux :	43
IV.7	Les expériences données par la MPE :	44
IV.8	Discussion des résultats :	45
IV.8.1	Validation des modèles utilisés pour l'optimisation :	45
IV.8.2	Diagramme des effets :	46
IV.8.3	Diagramme de Pareto :	46
IV.8.4	Effet de la hauteur, la lame d'air et l'angle d'inclinaison cheminée sur l'écart type :...	49
IV.8.5	Effet de la hauteur, la lame d'air et l'angle d'inclinaison sur la température moyenne :	50
IV.8.6	Effet de la hauteur, la lame d'air et l'angle d'inclinaison sur la vitesse à la sortie :.....	51
IV.8.7	Effet de la position de la cheminée :	53
IV.9	La conception optimale du séchoir solaire indirect :	56
IV.9.1	Simulation des conceptions optimaux :	58
Conclusion générale :		62
Références		
Résumé		

Nomenclature

Lettres latines

Symbole	Désignation	Unité
H	Hauteur	[m]
L	Longueur du capteur	[m]
I	Rayonnement solaire	[W/m ²]
T	Température	[K]
T _a	Température ambiante	[K]
T ₀	Température de référence	[K]
P	Pression	[Pa]
P _{atm}	Pression atmosphérique	[Pa]
h _a	Coefficient de transfert thermique avec l'extérieur	[W/m ² -K]
g	La gravité	[m/s ²]
V _{vent}	Vitesse du vent	[m/s]
t	Temps	[s]
u	Vitesse axiale	[m/s]
V	Vitesse radiale	[m/s]
MCP	Matériaux à changement de phase	--

Lettres grecques

Symbole	Désignation	Unité
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
ρ_p	Masse volumique du polystyrène	[kg/m ³]
ρ_c	Masse volumique du cuivre	[kg/m ³]
ρ_A	Masse volumique de l'aluminium	[kg/m ³]
ρ_{Ai}	Masse volumique de l'acier inoxydable	[kg/m ³]
λ_v	Conductivité thermique de verre	[W/m-K]
λ_p	Conductivité thermique du polystyrène	[W/m-K]
λ_c	Conductivité thermique du cuivre	[W/m-K]
λ_A	Conductivité thermique de l'aluminium	[W/m-K]
λ_{Ai}	Conductivité thermique de l'acier inoxydable	[W/m-K]
c_v	Conductivité thermique de verre	[J/ kg-K]
c_p	Conductivité thermique de verre	[J/ kg-K]
c_c	Conductivité thermique du cuivre	[J/ kg-K]
c_A	Conductivité thermique de l'aluminium	[J/ kg-K]
c_{Ai}	Conductivité thermique de l'acier inoxydable	[J/ kg-K]

Liste des figures

Figure I.1: Classification des séchoirs solaire	5
Figure I.2: Différents types de séchoirs solaires.....	6
Figure I.3: Séchoir solaire direct.....	7
Figure I.4: séchoir solaire indirect	8
Figure I.5: Séchoir solaire mixte.....	9
Figure I.6 : Séchoir solaire hybride	10
Figure II.1: Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à doubles passes.....	17
Figure II.2: Séchoir solaire indirect réalisé par le laboratoire (LENREZA) univ. Kasdi Merbah Ouargla.....	18
Figure II.3: propriétés thermo-physiques des différentes composantes du séchoir solaire	19
Figure II.4: Solari-mètre de laboratoire (LENREZA).	20
Figure II.5 : Appareil de mesure du température C.A1051 a fil chaud	20
Figure II.6: Acquisition NI 9213 pour la mesure de la température.....	21
Figure II.7: Interface de logiciel d'acquisition (LabVIEW XNG)	22
Figure II.8: Positions des déférents thermocouples	22
Figure II.9: Mesure expérimentale de la température dans la chambre de séchage pour la journée (21.04.2019).....	23
Figure II.10: Figure Mesure expérimentale de la température dans le capteur pour la journée (21.04.2019).....	24
Figure II.11: Evolution horaire de la température et le rayonnement solaire de la journée 21/04/2019	24
Figure II.12: Mesures de la vitesse d'air pour la journée 21/04/2019.....	25
Figure III.1: Chambre et la cheminée à étudier	28
Figure III.2: Schéma du maillage du modèle physique adopté.....	31
Figure III.3: Température et Vitesse d'écoulement à la sortie de cheminée en fonction du nombre d'éléments	32
Figure III.4: Comparaison entre la température de sortie de capteur simulé et réel.....	33
Figure III.5: Comparaison entre la température au centre de la chambre simulé et réel.....	34
Figure III.6: Distribution de température du séchoir réel (21/04/2019)	35
Figure III.7: Distribution de la vitesse et la pression du séchoir réel (21/04/2019)	36
Figure III.8: Ecart de la température après la simulation dans la chambre du séchage.....	37
Figure IV.1: Diagramme des procédures d'optimisation.....	40
Figure IV.2: Comparaison des valeurs numériques prédits par le modèle MSR (a) écart type, (b) température moyenne et (c) vitesse de sortie	45
Figure IV.3: Diagramme illustré les facteurs les plus influences	46
Figure IV.4: Graphique de Pareto montre l'impact des facteurs sur écart type.....	47
Figure IV.5: Graphique de Pareto montre l'impact des facteurs sur la vitesse de sortie.....	48
Figure IV.6: Graphique de Pareto montre l'impact des facteurs sur la température moyenne.....	48
Figure IV.7: Effet de la hauteur et la lame d'air sur l'écart type	49
Figure IV.8: Effet de l'angle d'inclinaison sur l'écart type.....	49
Figure IV.9: Effet de la hauteur et la lame d'air sur la plage de la température	50
Figure IV.10: Effet de l'angle d'inclinaison sur la plage du température moyenne dans la chambre.....	51
Figure IV.11: Effet de la lame d'air et la hauteur de la cheminée su la vitesse à la sortie.....	52
Figure IV.12: Effet de l'angle d'inclinaison à la vitesse de sortie	52
Figure IV.13: Position de la cheminée au centre avec forme de la chambre coudé 45°.....	53
Figure IV.14: Position de la cheminée à droit avec une forme coudé 45°	53

Figure IV.15: Position de la cheminée à gauche avec la forme de la chambre coudé 45°	54
Figure IV.16: Chambre rectangulaire avec une cheminée au centre	55
Figure IV.17: Chambre rectangulaire avec une cheminée a droit	55
Figure IV.18: Chambre rectangulaire avec une cheminée à gauche.....	56
Figure IV.19: Contour de la température et du vitesse de la conception optimale N°1	58
Figure IV.20: Contour de la température et du vitesse de la conception optimale N°2	58
Figure IV.21: Contour de la température et du vitesse de la conception optimale N°3	59
Figure IV.22: Distribution de la température et des vitesses du séchoir a l'état réel	59

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Mesures obtenues expérimentalement de la journée 21/04/2019 à 12 :00 pm .	35
Tableau IV.1: : Sélection des facteurs étudiés et leurs niveaux de variation pour l'étude réalisée	43
Tableau IV.2: Points de conception générés à partir de la MPE.	44
Tableau IV.3: Facteurs optimaux par rapport aux facteurs de la conception réel	57
Tableau IV.4: Réponses optimaux par rapport aux réponses de la conception réel	57

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

L'énergie solaire est une sorte d'énergie propre et renouvelable. C'est une énergie peu coûteuse pour l'obtenir et elle est disponible au cours de l'année. L'énergie thermique solaire peut être convertie en énergie électrique, appelée énergie photovoltaïque, et en énergie thermique destinée à chauffer le fluide utilisé (eau ou air).

L'énergie thermique solaire est la transformation instantanée de l'énergie des rayons solaires en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée indirectement dans le cas de la production d'électricité dans une centrale thermodynamique solaire ou directement, par exemple pour le séchage solaire des produits agroalimentaires à l'aide des séchoirs solaires. Le séchage solaire des produits agroalimentaires est un procédé de conservation qui favorise le stockage des aliments et qui a un intérêt économique pour le pays [1].

Le processus de séchage solaire est effectué par plusieurs types de séchoirs direct, indirect, mixte et hybride. Le comportement de l'écoulement d'air au sein du séchoir solaire est un facteur principal qui affecte la performance thermique globale du système de séchage et la prévision de ce comportement permet d'optimiser l'ensemble du système de séchage.

L'écoulement d'air dans la plupart des séchoirs n'est pas si simple. En réalité, il peut y avoir des variations significatives dans la distribution de la température et la vitesse (grandeur et direction) à différentes positions dans le séchoir ce qui affecte négativement la qualité du produit séché et la durée du séchage[2]. Le taux de séchage, qui dépend essentiellement de ces variations, nécessite la parfaite connaissance du débit d'air et de la distribution de température à chaque point de la chambre de séchage. Cela permet de prévoir les zones d'air adéquates pour un séchage approprié. Par conséquent, l'utilisation des codes de calcul de la dynamique des fluides (CFD) devient le moyen le plus pratique pour évaluer le comportement thermique de l'écoulement d'air pour améliorer les performances du séchoir [3, 4].

Des études expérimentales, effectuées au laboratoire (LENREZA) de l'université Kasdi Merbah de Ouargla sur un séchoir solaire indirect, ont montré un manque en homogénéité de la distribution des températures dans la chambre de séchage. Il a été aussi observé dans ces expériences une température assez basse comparée à la température idéale requise pour un séchage optimal.

Il est évidemment difficile de se permettre des coûts exorbitants pour la fabrication de nombreux modèles de séchoirs solaires et de dépenser des temps allongés en recherchant les

meilleures conceptions pour un séchage optimal. C'est pourquoi nous avons choisi de passer à la simulation numérique, qui est peu coûteuse et à la méthode des plans d'expérience qui nous permet également de créer de nombreuses expériences dans des délais courts et rapides.

Notre étude vise à étudier par la simulation CFD les effets du changement géométrique de la conception du séchoir solaire indirect fabriqué au laboratoire de (LENREZA) sur les performances thermiques de ce séchoir, dans le but d'améliorer le champ thermique (la distribution et la plage de température de séchage) et le champ dynamique (la vitesse). Nous devons examiner les facteurs sur lesquels nous pouvons contrôler les améliorations requises. Pour ce faire, nous adopterons une méthodologie de résolution basée sur des calculs énergétiques couplée à une méthode de conception expérimentale. Cette approche nécessite l'utilisation d'outils numériques : logiciel ANSYS FLUENT 18.1, JMP14 et NI LABVIEW NXG.

La méthodologie de traitement de la présente étude nous a conduits à structurer ce mémoire dans une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré à présenter brièvement les séchoirs solaires et leur classification, présenter les grandes lignes de la méthode des plans d'expériences (MPE) et donner une courte analyse bibliographique sur les améliorations des séchoirs. En fin de ce chapitre nous avons présenté la problématique de notre étude. La présentation du prototype et ses composants et ses propriétés physiques ainsi que les différentes mesures expérimentales et les appareils des mesures sont présentées dans le second chapitre. Dans le troisième chapitre nous avons présenté le domaine d'étude ainsi que les différentes équations du modèle mathématique adopté. Dans le quatrième et dernier chapitre, en vue de ressortir une conception optimale du séchoir solaire indirect, nous avons présenté et discuté les résultats issus de la mise en œuvre de la méthode des plans d'expériences utilisant les données des essais numériques développés sur le code CFD. En fin la conclusion générale fait état des principaux résultats obtenus confrontés à la problématique définie au départ pour cette étude.

Chapitre I

**Conception des séchoirs solaires et
utilité de la simulation par CFD**

I. Chapitre 01 : Conception des séchoirs solaires et utilité de la simulation par CFD

I.1 Introduction

L'énergie solaire nous permet la construction de systèmes indépendants (autonomes). Néanmoins, nous pouvons dire que cette énergie possède un mode de conversion thermique sans concentration. La mise en œuvre pour la récupération de cette énergie nécessite une technologie simple et qui peut s'adapter simplement au site et à la région considérée et dans de très nombreuses utilisations[5].

I.2 L'énergie solaire thermique :

La thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser.

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire [6].

I.3 Définition du séchage :

Est une opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau. Le corps humide peut être solide ou liquide mais le produit final est un solide. Dans cette opération, interviennent deux phénomènes : un transfert de chaleur et un transfert de matière.

I.3.1 Classification des systèmes de séchage solaire :

Pour classer les différents types de séchoir solaire, il est nécessaire de simplifier la construction complexe et les divers modes de fonctionnement aux principes de base [7].

D'une manière générale les systèmes de séchage solaire sont classés en fonction de la méthode de circulation de l'air, du mode de transfert de la chaleur du soleil vers le produit et du type de chambre de séchage. **La figure I.1** illustre les différentes catégories de séchoirs solaires. D'une manière générale, ils peuvent être classés dans deux groupes majeurs, à savoir :

- Les systèmes de séchage d'énergie solaire actifs (souvent appelés les séchoirs solaires hybrides)

- Les systèmes de séchage d'énergie solaire passifs (conventionnellement appelés les séchoirs solaires à circulation naturelle de l'air de séchage).

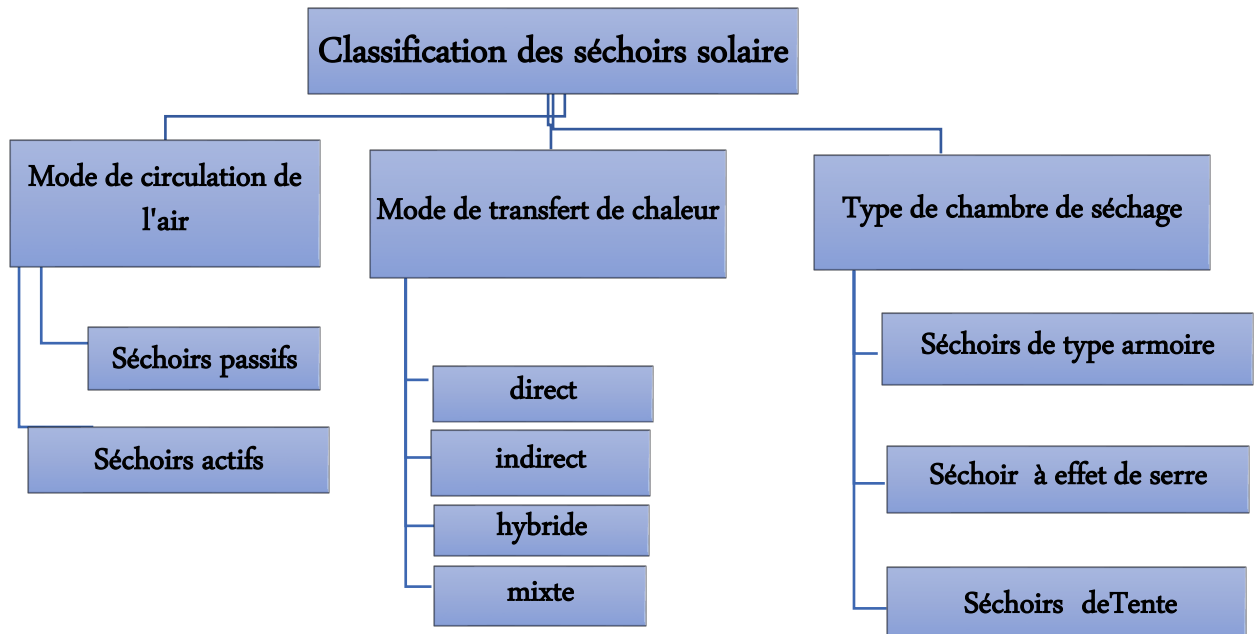


Figure I.1: Classification des séchoirs solaire

I.4 Types des séchoirs solaires :

Il existe une très grande diversité de type de séchoirs 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 en séchoirs directs, séchoirs indirects, séchoirs mixtes et séchoirs hybrides [8].

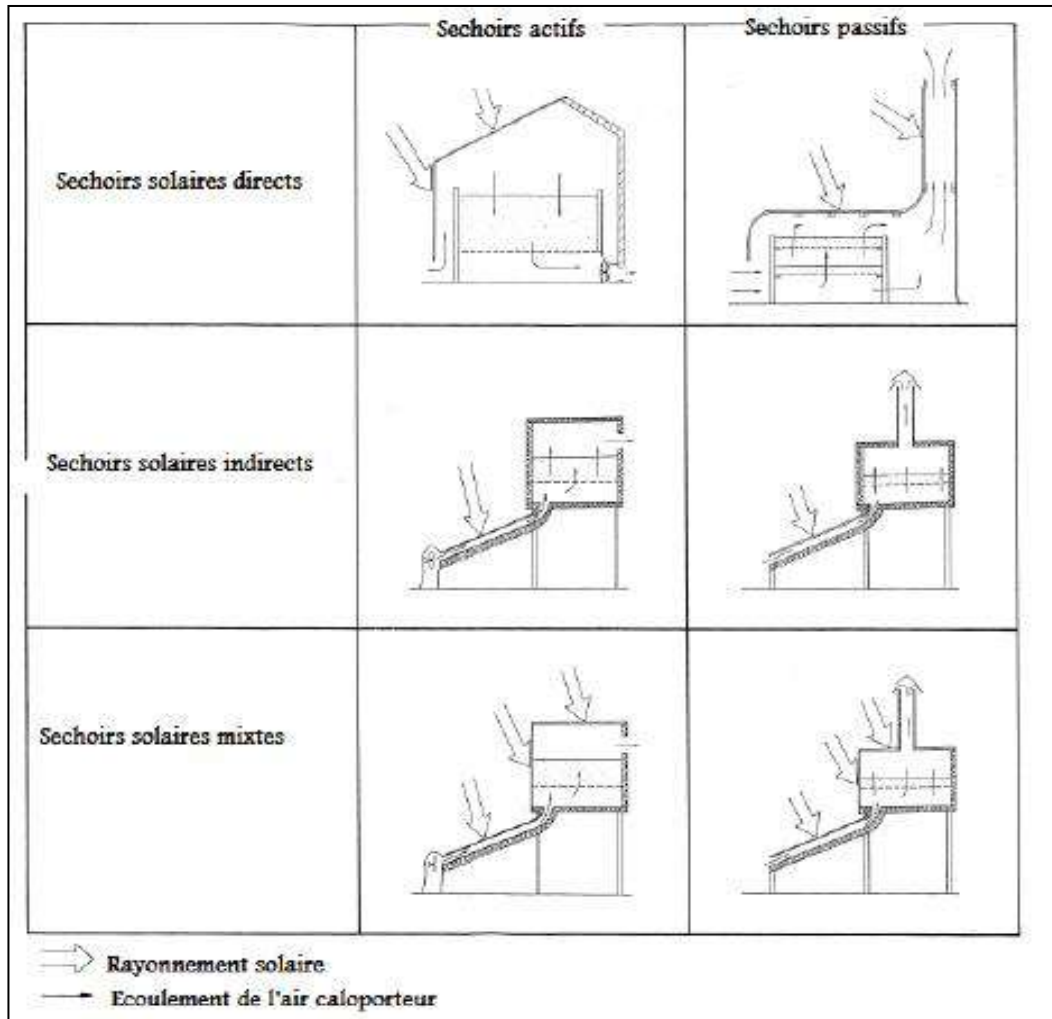


Figure I.2: Différents types de séchoirs solaires [9]

I.4.1 Les séchoirs solaires directs :

Le séchoir solaire direct comme illustré dans la figure I.3 est composé d'une chambre de séchage recouverte d'un vitrage transparent en plastique ou en verre [10]. Dans le séchoir solaire direct, le produit est placé dans une enceinte à couvercle transparent. Le rayonnement solaire est absorbé par le matériau, et les surfaces internes de la chambre de séchage générant de la chaleur. Ensuite, la chaleur évapore l'humidité du produit et le sèche[11].

Avantages :

- Les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes.
- ils sont soumis à un effet de serre au même titre qu'un absorbeur de capteur plan, d'où une amélioration du bilan radiatif et une élévation de la température du

produit à sécher, ce qui permet de diminuer notablement les temps de séchage par rapport aux systèmes traditionnels [12].

Inconvénients :

- Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration.
- 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.
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure.

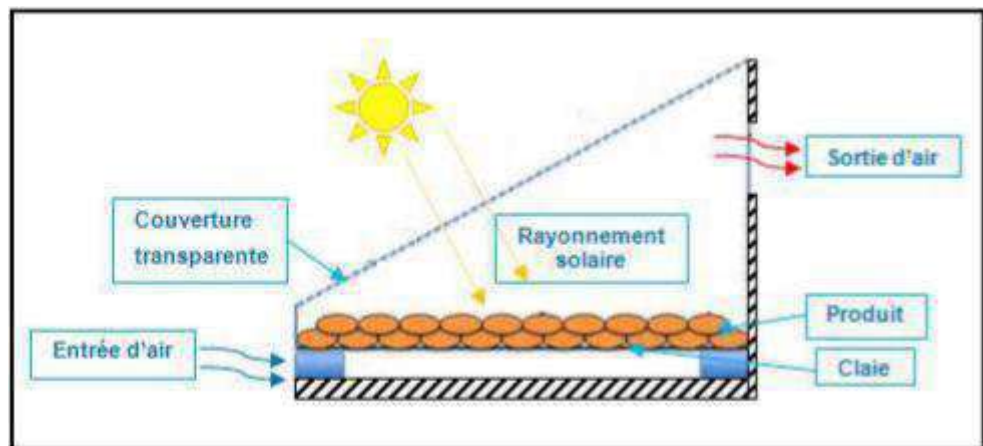


Figure I.3: Séchoir solaire direct.

I.4.2 Les séchoirs solaires indirects :

La figure I.4 explique ce type de séchoir qui se compose généralement de deux parties :

Un capteur solaire, qui peut être un capteur à plaque fixe ou un capteur de type concentré pour chauffer l'air atmosphérique, dans lequel le produit n'est pas exposé directement au rayonnement solaire. et une chambre de séchage qui contient le produit à sécher. L'air pénètre dans le collecteur qui s'échauffe (sa température augmente), et par l'effet de convection naturelle, l'air chauffé monte à la chambre de séchage pour sécher le produit. La durée du séchage reste très variable selon les conditions météorologiques et la ventilation du séchoir [13].

Ce type de séchoir est souvent plus compliqué et plus coûteux à construire que le séchoir direct. Il peut être réalisé à des échelles diverses, et il est surtout employé pour des produits très sensibles au rayonnement solaire ou dont le niveau de température doit être contrôlé [14].

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).
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

Inconvénients :

- Rapidité de séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

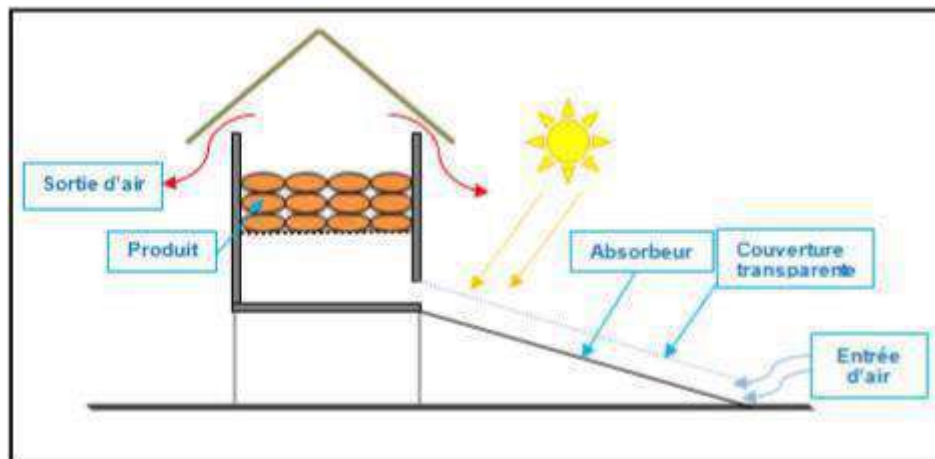


Figure I.4: séchoir solaire indirect

I.4.3 Le séchoir solaire mixte :

Le séchoir solaire mixte est une combinaison des types direct et indirect **figure I.5**. Le couvercle de la chambre de séchage dans le séchoir mixte est transparent. Dans un tel séchoir, un collecteur séparé préchauffe l'air avant d'entrer dans la chambre de séchage, puis la lumière du soleil ajoute de la chaleur aux produits à sécher [15].

Le séchoir solaire mixte a le taux de séchage le plus élevé par rapport aux séchoirs directs et indirects. En outre, il peut atteindre rapidement une température beaucoup plus élevée que la température ambiante, ce qui permet d'atteindre un niveau approprié d'humidité dans le produit. Mais c'est complexe et de coût initial élevé [16].

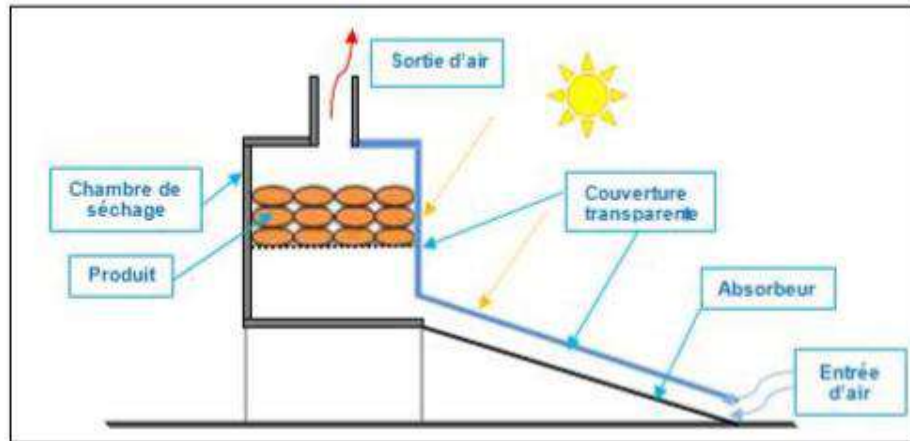


Figure I.5: Séchoir solaire mixte

I.4.4 Séchoir solaire hybride :

Les séchoirs solaires hybrides **figure I.6** sont des séchoirs qui dépendent de l'énergie solaire et d'une autre source, telle que la biomasse ou les combustibles fossiles. De tels séchoirs ont la capacité de fonctionner sans énergie solaire, ce qui réduit le risque de perte de nourriture. Ainsi, le séchoir solaire hybride réduit le temps de séchage par rapport à un autre séchoir solaire. D'autre part, les séchoirs solaires hybrides sont coûteux et peuvent conduire à une dépendance au combustible, l'objectif principal des séchoirs solaires étant de réduire la dépendance au combustible. La différence substantielle entre les séchoirs solaires mixtes et les séchoirs solaires hybrides réside dans le fait que, dans les séchoirs solaires mixtes, l'unique source d'énergie est l'énergie solaire ; toutefois, le mode de fonctionnement inclut une combinaison de sécheurs solaires directs et indirects. Cela dit, les séchoirs solaires hybrides ne dépendent pas uniquement de l'énergie solaire, ils couplent plusieurs sources d'énergie telles que l'énergie solaire et la biomasse.

Avantages :

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage.

- Forte augmentation de la productivité par rapport aux autres types des séchoirs solaires, car le matériel peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin

Inconvénients :

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

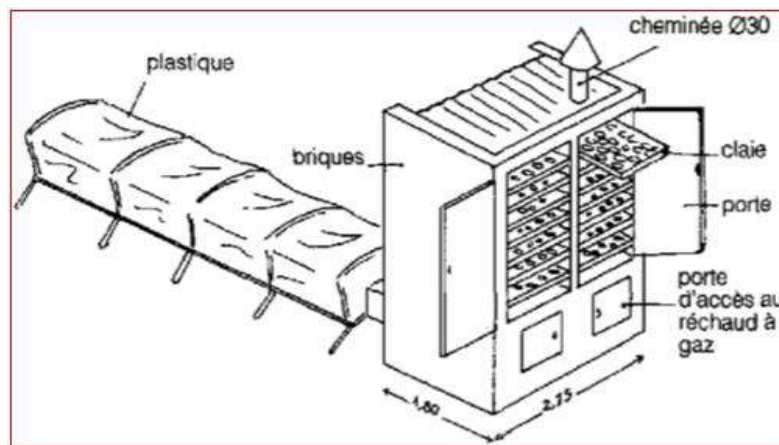


Figure I.6 : Séchoir solaire hybride

I.5 L'effet des paramètres géométriques sur le séchage uniforme :

L'un des problèmes liés à la conception des séchoirs solaires est l'uniformité du séchage qui indique l'efficacité du système et conduit à un produit de haute qualité. Les paramètres de conception du système de séchage solaire affectent de manière significative l'uniformité du séchage. Par exemple, la répartition de la vitesse de l'air doit être prise en compte dans la conception de la chambre de séchage afin de garantir une teneur en humidité finale uniforme des produits séchés sur les plateaux. Cependant, d'autres paramètres, tels que la disposition des composants du système de séchage, peuvent influencer sur les performances de séchage. Dans ce contexte, les lits de séchage multiples ou même les chambres de séchage multiples nécessitent une attention particulière afin de garantir un séchage uniforme [17].

I.6 Analyses bibliographiques sur l'uniformité et l'homogénéité de la température dans la chambre de séchage d'un séchoir solaire :

I.6.1 Intégration des matériaux à changement de phase au niveau du capteur ou la cheminée ou simultanément :

LOUAZENE Abderrahmane et BOUHNİK Abdallah [18] dans leur travail présentent une étude, par le moyen de simulation numérique, à l'amélioration des performances thermiques dans un séchoir solaire indirect, sans et avec intégration des matériaux à changement de phase au niveau du capteur ou la cheminée ou simultanément dans les deux. La conception étudiée est destinée à la ventilation naturelle d'un séchoir solaire ainsi que l'augmentation de la durée de fonctionnement journalière du séchoir. Plusieurs calculs ont été faits, moyennant la méthode des volumes finis par un modèle instationnaire bidimensionnel mis en application sur le logiciel CFD Fluent. A cet effet différents paramètres géométriques et conceptuels ont été étudiés et comparés pour le cas d'un séchoir avec ou sans MCP.

Les résultats obtenus, dans le cas d'absence de MCP, ont révélé des améliorations sensibles pour le cas d'une cheminée solaire par rapport à l'ordinaire avec un résultat meilleur pour la cheminée solaire d'épaisseur de lame de 3cm et décentrée au côté nord. Par ailleurs, les résultats issus du cas d'intégration d'une couche de MCP ont montré une nette amélioration du comportement thermique, notamment en période après coucher du soleil. En effet parmi les différents endroits d'emplacement de MCP envisagés, le cas d'intégration du MCP (paraffine wax) dans le capteur et la cheminée donnait un meilleur apport thermique pour deux heures de non ensoleillement et une ventilation naturelle convenable de l'ordre de 0,7 à 0,9 m/s.

I.6.2 La simulation numérique à l'intérieur d'une chambre de séchage :

Dionissios et Adrian-Gabriel Ghious [19] ont étudié la simulation numérique à l'intérieur d'une chambre de séchage. Un ensemble de mesures a été obtenu expérimentalement sur un seul plateau pour valider le modèle. La validation entre les données mesurées et les résultats de simulation par CFD montre que le modèle $k - \epsilon$ standard est le modèle de turbulence le plus adéquat.

I.6.3 Séchoir à armoire :

Amanlou et Zomorodian [20] ont étudié un nouveau séchoir à armoire avec un plénum monté latéralement pour le séchage des fruits. Des travaux expérimentaux et des simulations par CFD ont été réalisés pour obtenir un flux d'air de séchage et une répartition de la

température uniformes. Les résultats expérimentaux montrent que le sécheur développé produit un flux d'air uniforme et une répartition de la température dans la chambre de séchage. Les données expérimentales et de simulation montrent un très bon accord.

I.6.4 Étuve de séchage :

Jacek Smolka et al [21] ont étudié un modèle numérique d'étuve de séchage utilisant la simulation CFD. Plusieurs nouvelles configurations ont été simulées pour améliorer l'uniformité de la température dans la chambre de séchage. Une nouvelle forme et une nouvelle position du chauffage et un déflecteur supplémentaire dirigeant le flux d'air ont été jugés les plus efficaces. Les résultats de la simulation montrent un très bon accord avec les données expérimentales.

I.6.5 Amélioration des champs thermiques dans la chambre de séchage par le changement géométrique :

OUMAYA SAADIA [22] a présenté un travail qui consiste l'introduction des données dans le simulateur FLUENT, pour étudier l'écoulement de l'air dans la même géométrie de séchoir indirect (le cas réel) à convection naturelle, actuellement disponible dans le laboratoire (LENREZA).

- Les résultats obtenus de cette étude nous ont montré qu'il existe des zones où l'on ne trouve pas d'homogénéité de la température
- Pour les modifications de la forme géométrique de séchoir :
- ✓ Cas 1 : Amélioration de la section de la cheminée (120 mm), on remarque une homogénéité de la distribution de la température dans le séchoir ; il y a toujours une zone froide au bas de la chambre de séchage.
- ✓ Cas 2 : L'élimination de la zone latérale froide et l'amélioration de la section de la cheminée, une homogénéité pour la distribution de la température aux points de séchoir (chambre de séchage et la cheminée).

Babahani Amhamed [23] a présenté une étude dont le but est la recherche des moyens d'amélioration des conditions opératoires et des formes géométriques menant à une meilleure qualité du produit séché, par exploration expérimentale d'une part et par voie de simulation numérique d'autre part. L'exploitation des résultats attendus de cette étude se

permettent de proposer certaines modifications de conception du séchoir, notamment sur la géométrie de la chambre de séchage et les dimensions de la cheminée d'évacuation de l'air.

Les résultats obtenus numériquement pour les distributions des températures sont satisfaisants et comparés aux valeurs mesurées ce qui offre une forte raison pour des conceptions à base de cette simulation. D'après les modifications conceptuelles simulées numériquement, les meilleurs résultats en matière d'homogénéité des températures ont été constatés en cas d'utilisation d'un convergent au niveau d'échappement de l'air et aussi en cas d'agrandissement de la section de la cheminée.

I.7 Analyse bibliographique sur l'Utilisation de CFD aux simulations des séchoirs solaires :

I.7.1 Séchoir solaire direct :

Le séchoir solaire direct utilise le rayonnement solaire visible direct pour le séchage. La conception et le fonctionnement de ce séchoir sont simples et faciles à entretenir. Il peut être utilisé pour le séchage en bloc et OPEM n'est pas fastidieux. Le séchoir à armoire, le séchoir à effet de serre et les séchoirs à plateaux et à tentes sont les exemples. Il peut être utilisé en mode de convection forcée ou en mode de convection naturelle. Le séchoir solaire de l'armoire en mode de convection naturelle est illustré. Diverses techniques de calcul non contraignantes appliquées au séchage solaire direct des aliments.

❖ Simulation Computational Fluid Dynamic (CFD):

Mathioulakis et al [3] ont conçu un séchoir solaire industriel à plateaux pour le séchage des fruits. Le logiciel CFD Fluent est utilisé pour comprendre le mouvement de l'air dans la chambre de séchage. Dans le fonctionnement de ce système, trois conditions aux limites ont été supposées par la technique de modélisation CFD (Mathioulakis et al. 1998). Selon la première condition, l'entrée de la chambre de séchage sert de condition limite d'admission comprenant une masse fixe. Le second n'a aucune condition limite de résistance, alors que la masse d'air était autorisée à sortir du domaine par la fenêtre de sortie. La troisième condition implique la présomption d'une condition de contrainte de cisaillement dans le mur qui a été faite dans le domaine limité des surfaces. La variation de l'état de sécheresse de différents plateaux a été enregistrée. Le perfectionnement du processus de séchage qui accompagne la mesure de la vitesse de l'air dans la section de séchage du séchoir est effectué par CFD Fluent. Les résultats de la simulation permettent de conclure qu'il existe une relation fine entre la vitesse de séchage

et la vitesse interne de l'air. CFD Fluent a servi d'outil d'amélioration du processus d'optimisation du séchage solaire. Bartzanas et al. (2004) ont utilisé le logiciel CFD Fluent v5.3 pour analyser les performances du séchoir à serre solaire. Le logiciel Fluent a été utilisé pour localiser avec précision les événements permettant la circulation de l'air à l'intérieur du séchoir. Le taux de circulation de l'air et la configuration du flux d'air ont été déterminés par la technique du traçage du verre et de l'anémomètre sonique tridimensionnel, respectivement.

I.7.2 Séchoir indirect :

Le système de séchage solaire indirect consiste en une surface peinte en noir capable d'absorber la chaleur, qui transfère la chaleur sous forme d'air circulé. Cet air en circulation est ensuite chauffé et passé à travers un échantillon de culture, absorbant l'humidité présente, et évacué par la cheminée. [24]

❖ Dynamique des fluides numérique (Simulation CFD) :

Romero et al [25] a conçu et fabriqué un séchoir solaire indirect d'une capacité de séchage de 50 kg pour le séchage de la vanille à l'Université del Caribe de Cancun, au Mexique. Ils ont utilisé le logiciel ANSYS FLUENT pour la simulation et la validation. L'analyse de la répartition de la température du séchoir solaire a été réalisée par CFD, l'entrée étant la température d'entrée et de sortie de l'armoire et la température d'entrée du capteur solaire. Un écoulement tridimensionnel, transitoire et laminaire a été pris en compte pour la simulation CFD. La température, la pression et la vitesse du fluide de travail sont des paramètres nécessaires pour résoudre les différentes équations de conservation. Les étapes suivantes ont été appliquées pour résoudre les phénomènes physiques à l'aide du code ANSYS-FLUENT.

Un degré d'harmonie supérieur a été trouvé entre la simulation CFD et les paramètres mesurés pour le capteur solaire, alors que dans le cas d'une armoire, une faible variation a été constatée entre les températures mesurées et estimées. Cette variation a été trouvée en raison de la prise en compte du coefficient de transfert de chaleur par convection constant dans l'ambiance.

Vintila et al [26] Ont appliqué le logiciel CFD Comsol Multiphysics pour la simulation numérique dans un séchoir solaire indirect. Dans cette expérience, la simulation numérique a été réalisée avec le code commercial CFD de Comsol Multiphysics selon un modèle de domaine 2D réduit en négligeant les effets extrêmes des parois latérales. Les paramètres physiques de COMSOL se composent de deux éléments, à savoir les paramètres de sous-domaine et les

conditions aux limites. Dans les paramètres de sous-domaine, les types de matériaux, les modes de transfert de chaleur (conduction et / ou convection) et les conditions initiales peuvent être pris en compte, tandis que dans les paramètres de conditions aux limites, la géométrie des limites peut être prise en compte. La simulation a été réalisée à midi par temps clair et ensoleillé et l'irradiation solaire a été supposée être de 300 W / m^2 . Les parois de l'armoire de séchage et de l'arrière du collecteur étaient considérées comme adiabatiques (isolées thermiquement). Après l'analyse du modèle thermo-fluide couplé, différents résultats ont été obtenus, tels que le champ de vitesse, la température.

I.8 Problématique de la présente étude :

Des études expérimentales antérieures ont montré que le champ thermique n'est pas homogénéisé dans la chambre de séchage d'un séchoir solaire indirect (SSI), ce qui affecte à la qualité du produit.

Dans ce travail nous allons étudier et suivre l'évolution des champs thermiques et dynamiques dans la chambre de séchage par la simulation numérique (CFD), et en montrant l'effet de la modification géométrique sur ces deux champs et sur la performance thermique utilisant la méthode des plans d'expériences (MPE) dont l'objectif de trouver une conception du SSI qui améliore leur performance thermique et réalise l'homogénéité de la température.

Le couplage entre la MPE et l'outil CFD permet d'examiner les différentes conceptions avec ses changements géométrique, en vue d'optimiser le champ thermique et le champ dynamique du séchoir.

Les meilleurs cas des figures permettant d'obtenir des températures de travail suffisantes pour assurer et achever des opérations de séchage des produits agroalimentaires, avec bonne qualité finale, dans les conditions climatiques de la région de Ouargla.

Chapitre II

**Exploration expérimentale du séchoir
solaire à vide**

II. Chapitre 02 : Exploration expérimentale du séchoir solaire à vide

II.1 Introduction :

Cette partie est consacrée principalement à prendre des mesures expérimentales de la vitesse d'écoulement de la température dans la réalité et dans laquelle nous mentionnons et expliquons les moyens utilisés, ainsi que les équations les plus importantes liées aux valeurs de la température ambiante et les valeurs du rayonnement solaire.

II.2 Description du séchoir solaire :

Dans cette étude, nous avons utilisé un séchoir solaire indirect à convection naturelle **figure II.2** conçu et réalisé par l'équipe de laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables zones arides et sahariennes (LENREZA) dans l'université Kasdi Merbah de Ouargla. Les principaux éléments constitutifs sont :

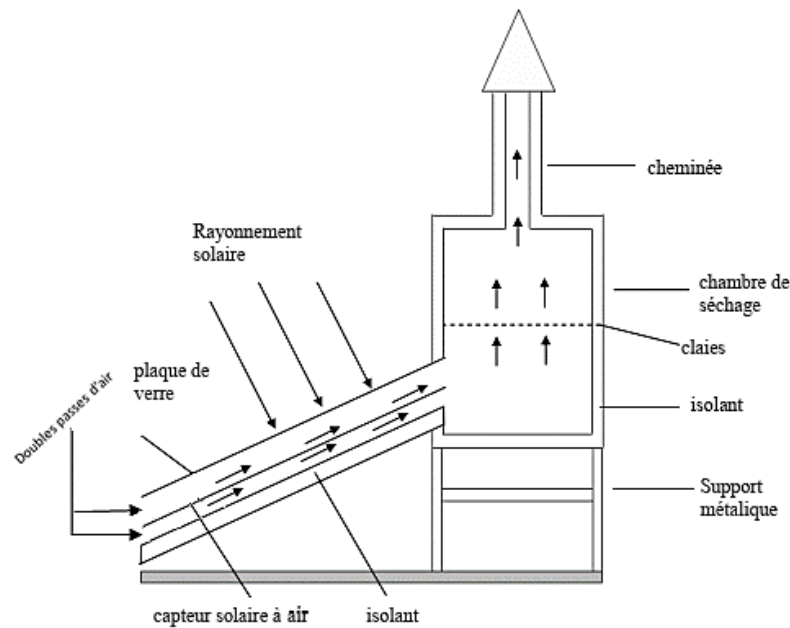


Figure II.1: Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à doubles passes



Figure II.2: Séchoir solaire indirect réalisé par le laboratoire (LENREZA) univ. Kasdi Merbah Ouargla

II.2.1 Le capteur solaire :

Le capteur solaire est un capteur à air plan, de longueur de 2m. de largeur 1m et une hauteur de 0.13m. Le capteur est recouvert d'une plaque de verre, et deux lames d'air 0.06m est déposée une plaque d'acier inoxydable peinte en noire mate qui sert d'absorbeur. Les côtés latéraux et la partie inférieure sont isolés thermiquement avec le polystyrène, le capteur est incliné d'un angle de 31° (l'altitude de la ville de Ouargla) par rapport au plan horizontal et orienté vers le plan sud.

II.2.2 La chambre de séchage :

La chambre de séchage est une boîte galvanisée de forme cubique, de hauteur 0.8 m, de profondeur de 0,8 m, les parois latérales et les parties inférieures et supérieures sont isolées thermiquement par le polystyrène. La chambre de séchage est munie d'une cheminée cubique fabriquée avec des feuilles galvanisées de hauteur 1 m, les côtés de 0.020 m, les parties latérales sont isolées thermiquement par du polystyrène. La chambre de séchage est posée sur un support métallique, les produits sont déposés à l'intérieur de la boîte sur une claie de forme rectangulaire composée d'un cadre en métal sur lequel est fixé un grillage pour permettre le passage de l'air.

A cause de l'absence d'homogénéité de la distribution de la température dans le séchoir naturelle, nous voulons introduire dans notre expérience la simulation numérique pour étudier l'écoulement de l'air dans la même géométrie de notre séchoir vide et nous interprétons les résultats pour améliorer le séchoir.

II.3 Propriétés thermo-physiques :

Les propriétés thermo-physique des éléments constituant le séchoir solaire à envisager dans cette étude sont exposée, dans le tableau ci-dessous.

Figure II.3: propriétés thermo-physiques des différentes composantes du séchoir solaire

Matériaux	Propriétés physiques					
	Masse volumique [Kg/m ³]		Conductivité thermique [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]		Chaleur spécifique [J/kgK]	
	Symbole	Valeurs	Symbole	Valeurs	Symbole	Valeurs
Verre	ρ_v	2500	λ_v	0.81	C_v	840
Polystyrène	ρ_p	700	λ_p	0.320	C_p	2310
Aluminium	ρ_A	2719	λ_A	202.4	C_A	871
Acier inoxydable	ρ_{Ai}	7850	λ_{Ai}	15	C_{Ai}	460

II.4 Appareillage et mesure :

II.4.1 Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire globale reçue sur le plan du capteur et mesuré en W/m² a l'aide d'un solari-mètre (type Mod.DS 120) et ceci durant la journée de l'expérience. Les résultats obtenus sont affichés sur un appareil à affichage numérique :



Figure II.4: Solari-mètre de laboratoire (LENREZA).

II.4.2 Vitesse de l'air :

On a utilisé une Appareil multifonction Mesure Physique C.A 1051 avec une anémométrie à fil chaud **figure II.5** pour le calcul de la vitesse de l'air ambiante et la vitesse d'écoulement à l'entrée du capteur et aussi à l'entré et la sortie de la cheminée du séchoir solaire.



Figure II.5 : Appareil de mesure du température C.A1051 a fil chaud

II.4.3 Mesure de la température :

Pour les mesures de la température ambiante et dans plusieurs endroits du séchoir solaire (le capteur, la chambre de séchage, et la cheminée) on a utilisé des thermocouples de type k contacté avec un système d'acquisition comprenant un micro PC **figure II.6**, cette acquisition affiche les résultats de la mesure par un logiciel « labview NXG » **figure II.7**, ce qui permet d'analyser et présenter rapidement et sans programmation les données de centaines périphériques. Selon les sources de constructeur « National Instruments » les spécifications du système utilisé sont les suivantes :

Le NI cDAQ -9174 est un châssis NI compact DAQ 4 emplacements destiné aux systèmes de test de mesures de signaux mixtes compacts et portables. Le châssis cDAQ-9174 se compose des éléments suivants :

- Un convertisseur CA/CC qui se branche directement dans le châssis
- Un câble USB doté de vis moleté pour le maintien des câbles

Les Modules NI a des différents types. Chaque type mesure de différentes Energies. Il y a 3 types de module NI.:

- ✓ NI 9213 : mesure de température. (Connecté avec des thermocouples).
- ✓ NI 9203 : mesure de la vitesse de vent (connecté avec un Anémomètre).
- ✓ NI 9215 : mesure de rayonnement solaire (ce composant n'a pas été utilisé dans notre cas d'application).

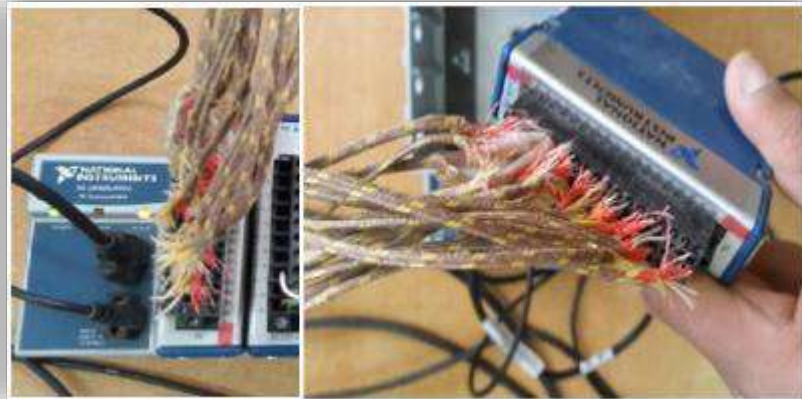


Figure II.6: Acquisition NI 9213 pour la mesure de la température

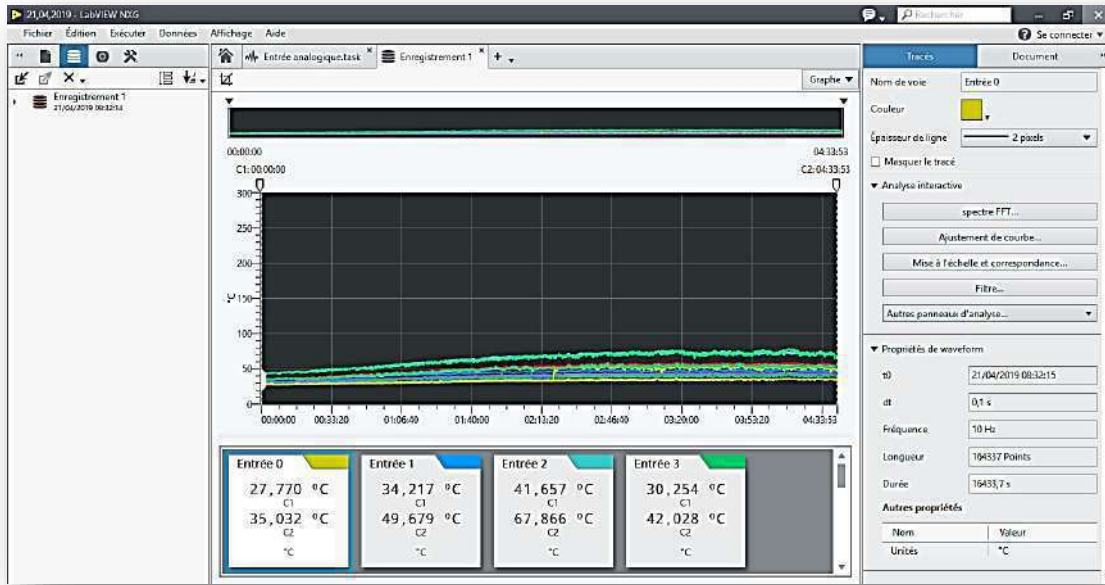


Figure II.7: Interface de logiciel d'acquisition (LabVIEW XNG)

II.5 Série d'expériences :

Nous avons effectué une série d'expériences pour étudier le comportement physique du séchoir solaire à convection naturelle. Le travail expérimental est consacré pour l'étude du séchoir solaire à vide, période de travail expérimental : 28/02/2019, 05/03/2019, 21/04/2019

II.5.1 Emplacement des thermocouples :

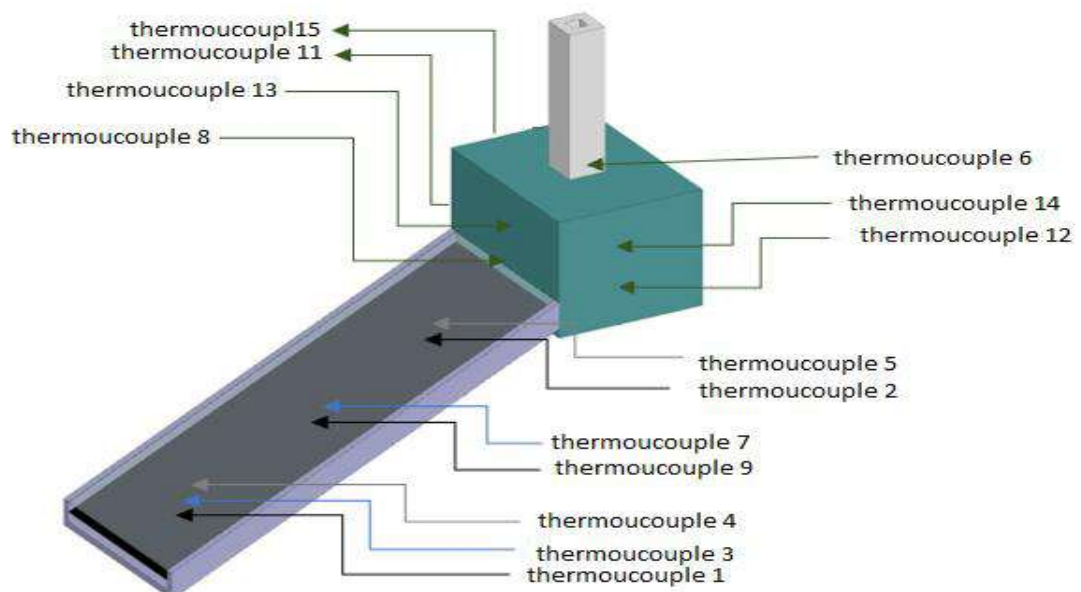


Figure II.8: Positions des différents thermocouples

II.5.2 Mesures expérimentales de la température :

Dans ces courbes (les figures II9, II10, II11), nous montrons les mesures du rayonnement solaire et aussi de la température ambiante horaire de la journée du validation 21/04/2019.

Le choix de cette journée était principalement dû à : une journée chaude avec une bonne température pour le séchage, la difficulté de choisir une journée de bonnes conditions climatiques en cette saison difficile.

a. Les mesures de la température obtenues dans la chambre et au niveau du capteur concernant la journée 21/04/2019 (résultat de validation) :

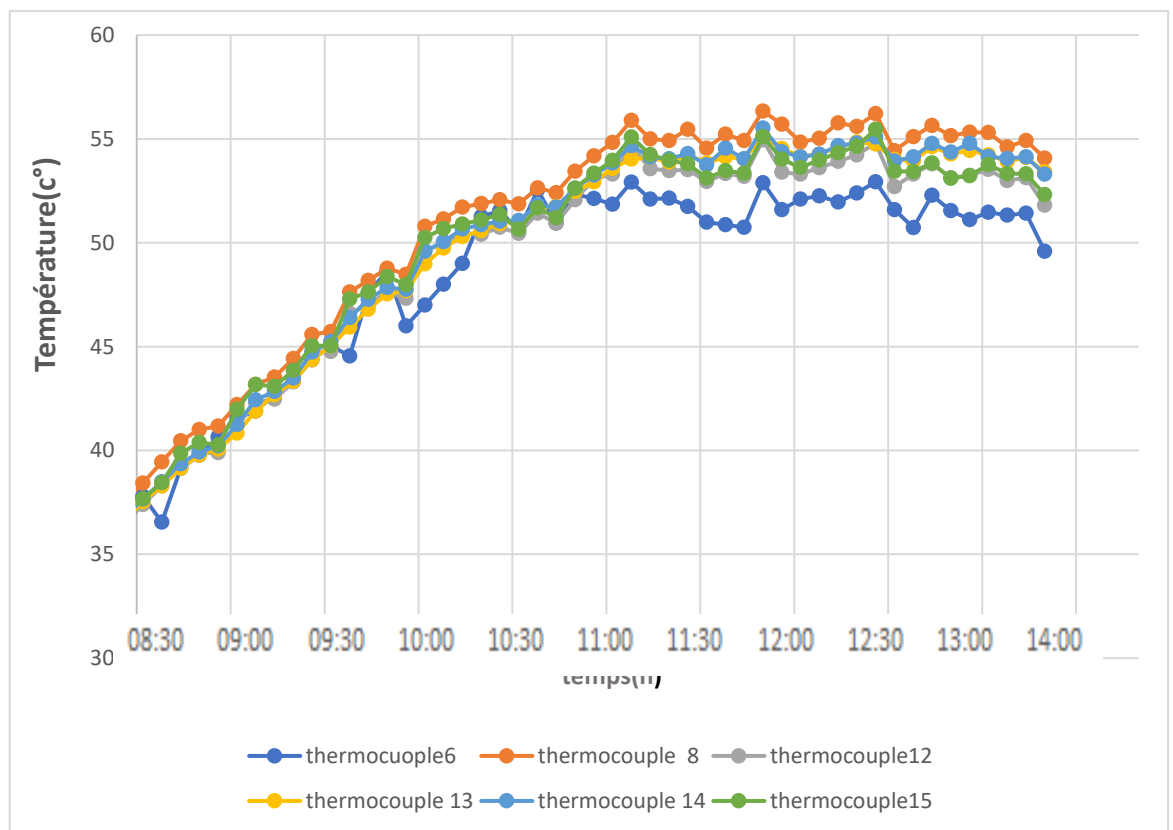


Figure II.9: Mesure expérimentale de la température dans la chambre de séchage pour la journée (21.04.2019)

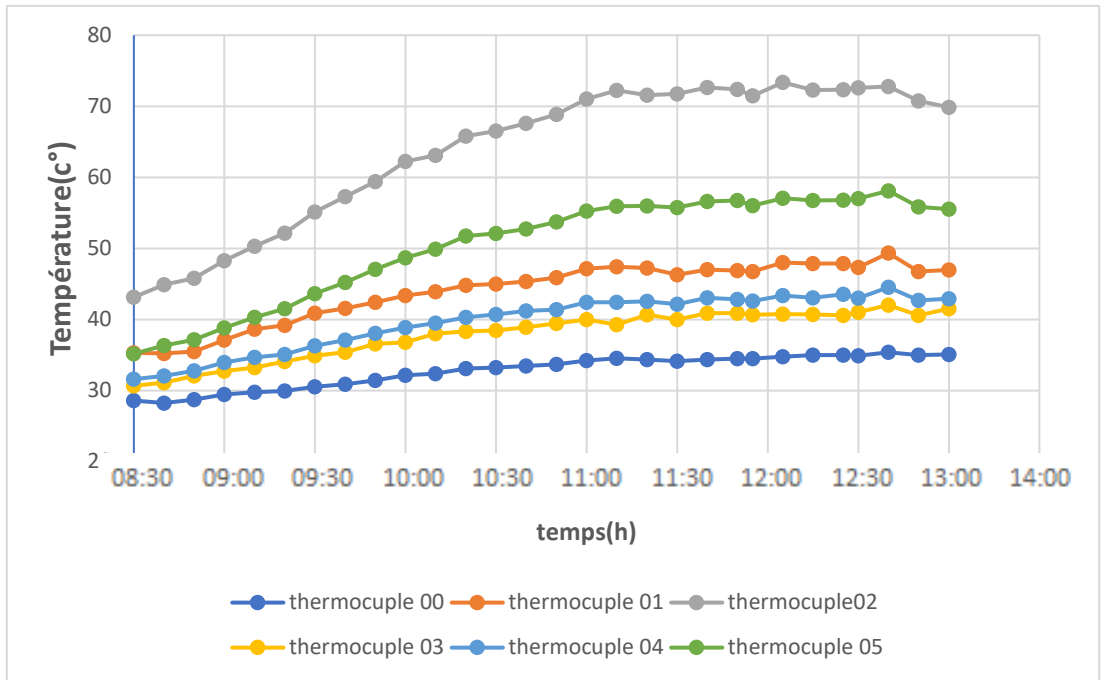


Figure II.10: Figure Mesure expérimentale de la température dans le capteur pour la journée (21.04.2019)

b. La température ambiante et le rayonnement solaire mesurés de la journée 21/04/2019 :

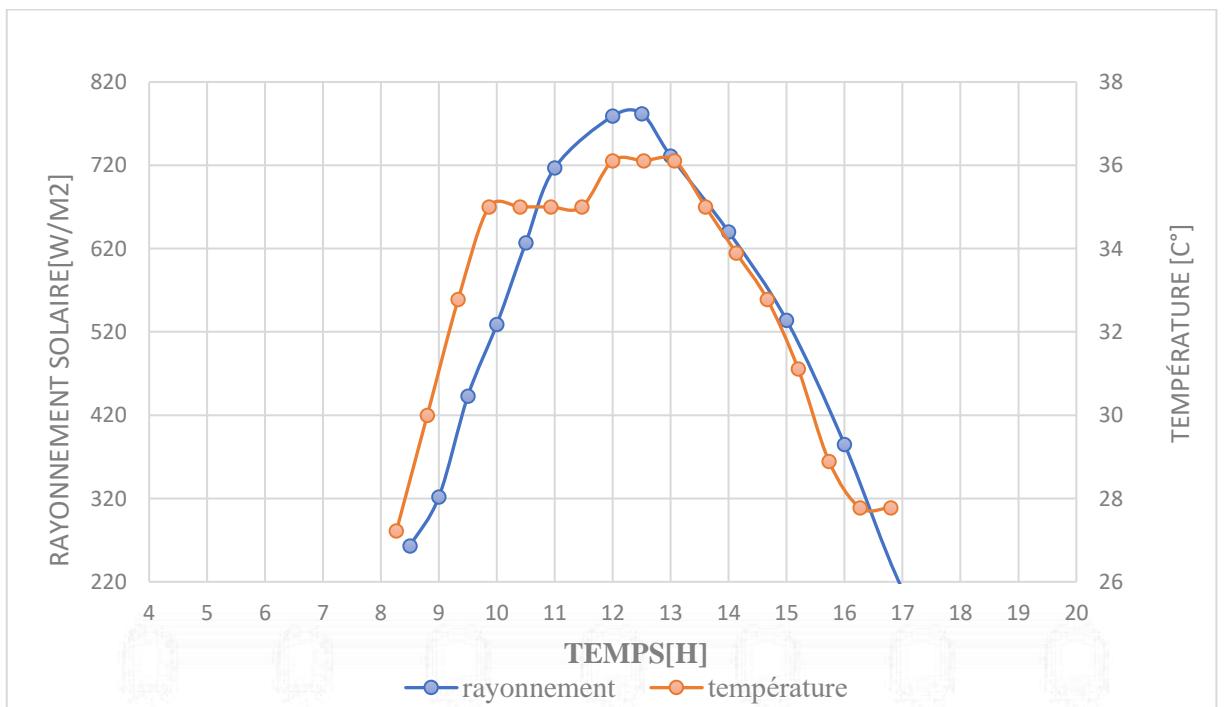


Figure II.11: Evolution horaire de la température et le rayonnement solaire de la journée 21/04/2019

c. Mesures de la vitesse d'écoulement (l'air) concernant la journée 21/04/2019 :

La figure II.12 montre les mesures expérimentales de la vitesse ambiante et la vitesse au niveau du capteur et du cheminée dans différents emplacements.

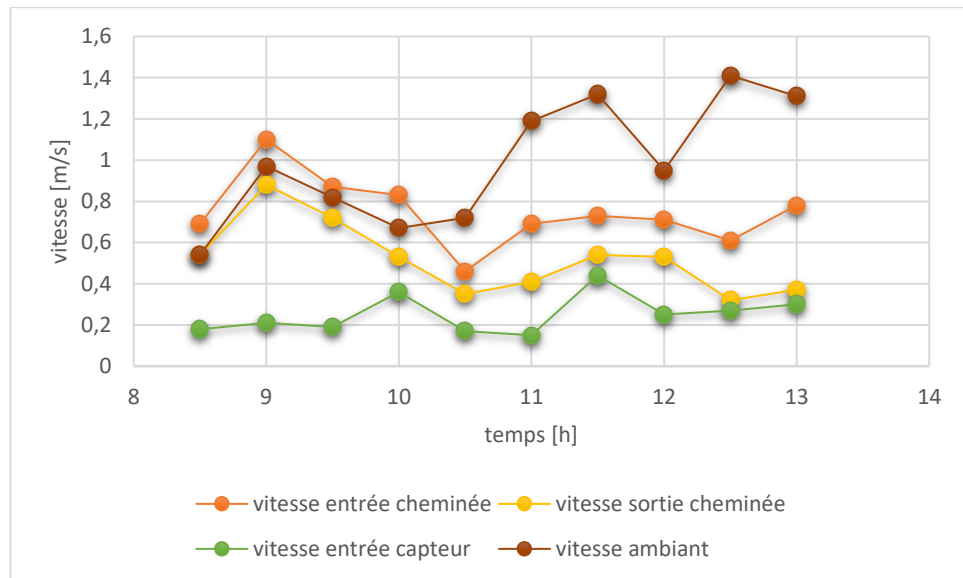


Figure II.12: Mesures de la vitesse d'air pour la journée 21/04/2019

Chapitre III

**Simulation du séchoir indirect
fonctionnant à vide**

III. Chapitre 03 : Simulation du séchoir indirect fonctionnant à vide

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter le modèle physique adopté pour les différentes simulations. Il s'agit d'un séchoir solaire indirect dont nous étudierons l'homogénéité et l'uniformité de son champs thermique et la variation de son champs dynamique. La configuration géométrique du séchoir ainsi que les conditions aux limites adoptées seront exposées dans cette partie. Ce chapitre sera achevé par une courte présentation des différentes étapes relatives à la mise en œuvre du problème sur le logiciel CFD ANSYS Fluent utilisé pour la résolution numérique des équations gouvernantes.

La procédure de résolution et la présentation des résultats sont basées sur les deux volets suivants :

- a. Essais de validation du modèle numérique adopté, faisant recours à des résultats expérimentaux relevés sur un séchoir solaire indirect conçu et réalisé au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zones aride (LENREZA, Univ. Ouargla, Algérie).
- b. Simulation du séchoir solaire dans le sens de montrer les effets des différents paramètres de conception (L'épaisseur de la lame d'aire, l'angle d'inclinaison et la position et la hauteur de la cheminée, la forme de la chambre de séchage) sur le champ thermique et dynamique.

III.2 Géométrie du problème :

Dans ce travail, on s'intéresse à la partie après le capteur plan (la chambre de séchage et la cheminée) donc la géométrie étudiée est une combinaison de cavité rectangulaire (cheminée) et une cavité carrée (la chambre). Ces derniers sont constitués par les composants montrés ci-dessous **Figure III.1**

Dans cette géométrie, on va analyser les phénomènes convectifs et conductifs qui se déroulent dans la chambre du séchage et la cheminée.

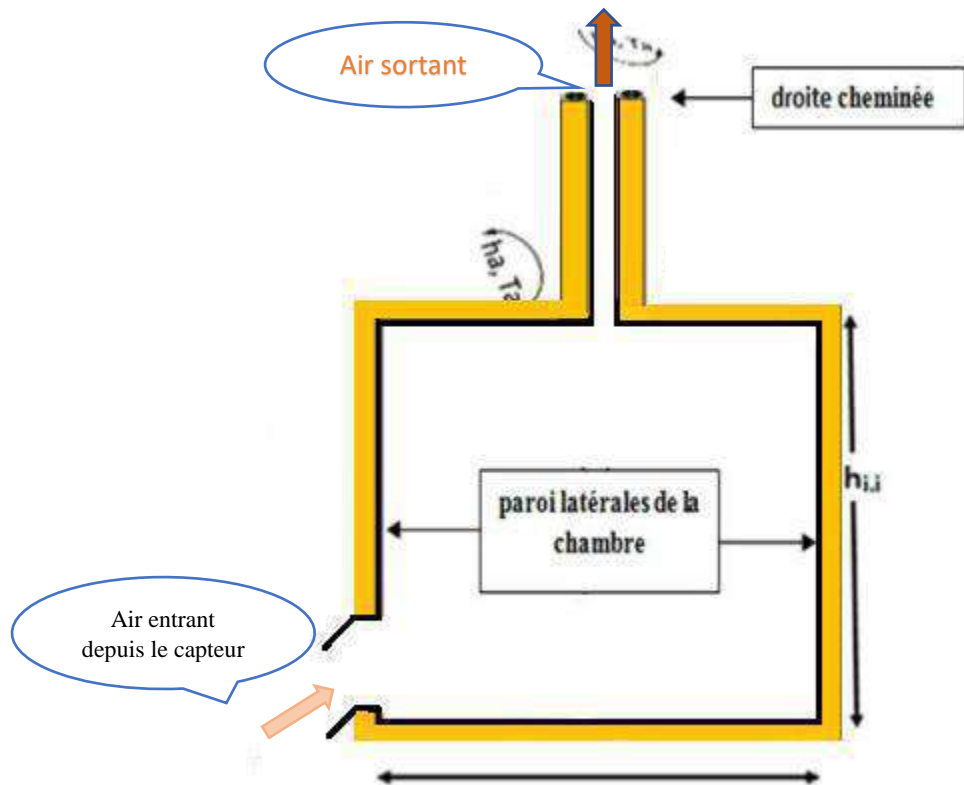


Figure III.1: Chambre et la cheminée à étudier

III.3 Hypothèses simplificatrices :

Les hypothèses simplificatrices suivantes ont été adoptées :

- L'écoulement est supposé bidimensionnel, stationnaire et en régime turbulent.
- Le fluide est supposé incompressible, monophasique, visqueux et newtonien.
- Les propriétés thermo-physiques de l'air et des composants du séchoir sont considérées constantes.
- Le rayonnement entre les parois internes du séchoir est négligeable
- L'effet de l'humidité du produit sur la température de l'air de séchage est négligeable.
- L'écoulement d'air obéit à l'approximation de Boussinesq $\rho = \rho_0$ partout sauf dans le terme de gravité où elle varie selon la relation :

$$\rho \vec{g} = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \vec{g} \dots\dots\dots (1)$$

ρ_0 : Masse volumique à la température de référence T_0 et β est le coefficient d'expansion thermique, évalué à T_0 .

III.4 Equations dimensionnelles gouvernantes :

III.4.1 Equation de la continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

Ou u et v représente les composantes de la vitesse du fluide dans les directions x et y, respectivement.

III.4.2 Equation de la quantité de mouvement :

Suivant l'axe **ox** :

$$\rho \left(\frac{\partial(u)}{\partial \tau} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{\tau} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 u}{\partial^2 y} \right) \dots\dots\dots (3)$$

Suivant l'axe **oy** :

$$\rho \left(\frac{\partial(v)}{\partial \tau} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{\tau} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 v}{\partial^2 y} \right) + \rho g \beta (T - T_0) \dots\dots\dots (4)$$

III.4.3 Equation d'énergie :

$$\rho \left(\frac{\partial(T)}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} \right) = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_{\tau}}{\sigma_t} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} \right) \dots\dots\dots (5)$$

Pr est le nombre de Prandtl turbulent.

III.5 Conditions aux limites :

- **Aux frontières des parois :**

Convection avec l'air ambiant : l'instruction (Wall) était choisie dans Fluent, puis le coefficient de transfert de chaleur de la paroi de la (chambre, capteur), et les conditions climatiques ont été définies et introduits.

- **A L'entrée du capteur :**

La condition est la vitesse de l'air à et la température à l'entrée du capteur obtenus expérimentalement.

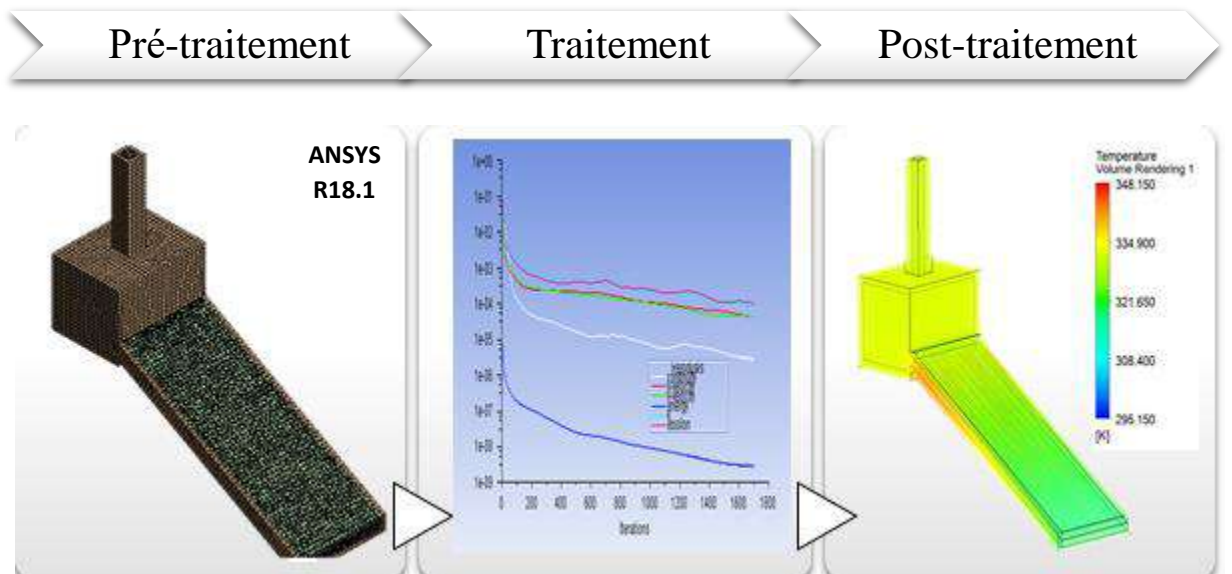
A la sortie de la cheminée :

La pression à la sortie : $P_s = P_{atm}$

- **Cellules des zones internes :** les propriétés thermo-physiques des différents matériaux du séchoir, et ont été introduites fluide ou solide (de différent type).

III.6 Principales étapes de traitement du problème par CFD :

La résolution d'un problème physique par les outils CFD passe généralement par des étapes communes dans la majorité des logiciel (Fluent, CFX ...). Le diagramme suivant résume les principales étapes de modélisation et simulation CFD groupé en trois grandes parties (pré-traitement, traitement et Post-traitement)



<ul style="list-style-type: none"> • problème étudié • génération de maillage • Choix du model computationnel 	<ul style="list-style-type: none"> • Discrétisation des équations mathématiques • Introduire les conditions aux limites • continuer le calcul jusqu'à la convergence. 	<ul style="list-style-type: none"> •Analyse numérique des résultats •Visualisation des résultats
--	--	--

III.6.1 Schéma du maillage du modèle physique adopté :

Pour une meilleure précision et une meilleure stabilité, nous avons adopté un maillage quadrilatéral structuré à multi blocs comme le montre **la figure III.2** ci-dessous.

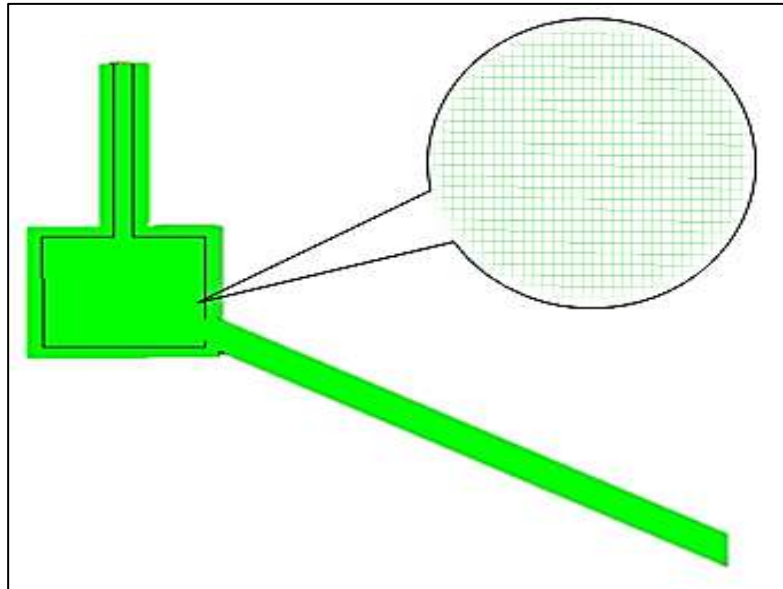


Figure III.2: Schéma du maillage du modèle physique adopté

III.6.2 Résolution du problème avec le code Fluent :

Pour effectuer la simulation par ce logiciel, il faut décrire les paramètres de solution comme suit :

a. Choix du type des résolutions :

- | | |
|---------------------|--------------------------|
| ✓ Space | 2D |
| ✓ Viscous turbulent | |
| ✓ Heat Transfer | Enabled |
| ✓ Radiation | surface to surface (S2S) |

b. Choix de matériau :

Le choix des matériaux utilisés dans notre modèle à partir des listes existantes, sinon il faut les introduire selon nos besoins.

Les propriétés thermo-physiques des différents matériaux simulés sont introduits. À partir des données réelles.

c. Contrôle de la Solution :

Equations	Facteurs de sous-relaxation	Couplage pression-vitesse	Schéma de discrétisation
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mouvement ▪ Energie 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pression 0.3 ▪ Densité 1 ▪ Forces 1 ▪ Moment 0.7 ▪ Energie 1 ▪ Energie cinétique du turbulence 0.8 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ SIMPLE 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pression PRESTO! ▪ Mouvement Second Order Upwind ▪ Energie cinétique turbulente second order upwind ▪ Taux de dissipation turbulent second order upwind ▪ Energie Second Order Up

III.7 L'effet du maillage :

Nous démontrons dans cette courbe **figure III.3** l'effet du maillage sur les résultats de la simulation où le pourcentage d'erreur entre les raffinements de la grille a été minimisé (≈ 1.23). Nous avons choisi le minimum nombre des nœuds qui n'affecte pas aux résultats.

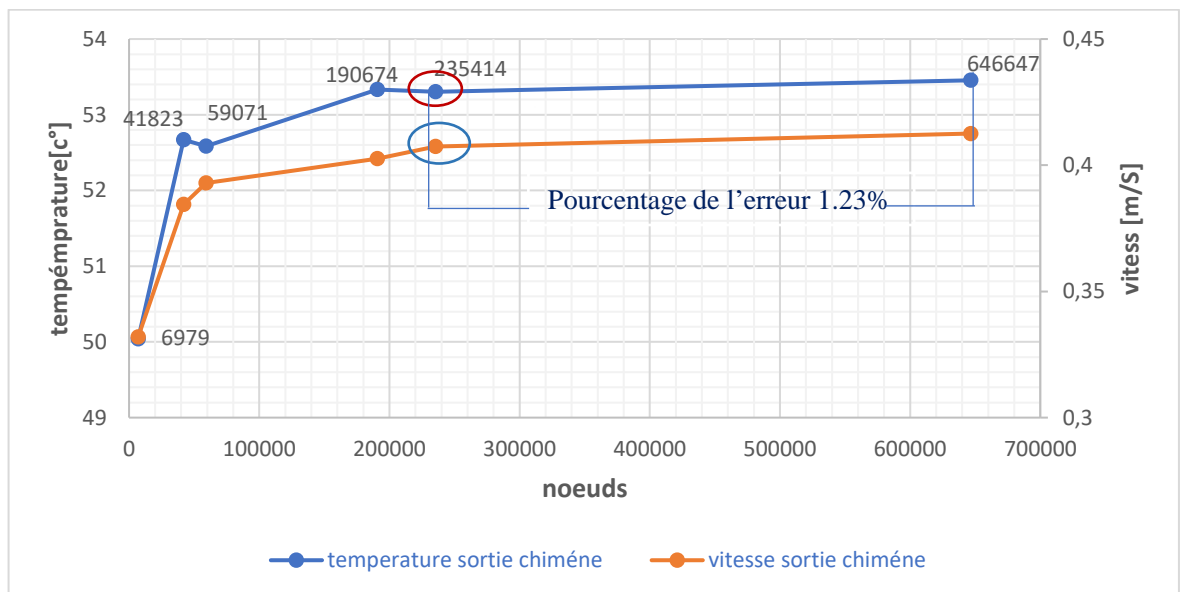


Figure III.3: Température et Vitesse d'écoulement à la sortie de cheminée en fonction du nombre d'éléments

III.8 Validation :

Nous avons procédé à un essai de simulation permettant de relever à chaque fois la valeur ponctuelle de la température au centre de la lame d'air sortant du capteur (thermocouple 8) et aussi au centre de la chambre de séchage (thermocouple 13). Ces valeurs pour des intervalles de temps réguliers ont été comparées aux valeurs mesurées expérimentalement pour les mêmes intervalles de temps. L'ensemble de ces valeurs simulées et calculées sont présentées sur les **figures III.4 et III.5**. On peut remarquer, tenant compte du phénomène étudié, que les valeurs calculées et mesurées sont en bonne cohérence avec un écart maximal de presque 4°C. Cet écart observé peut être expliqué par la différence entre les conditions climatiques réelles (fluctuations du rayonnement solaire et de la vitesse du vent dans la journée) et celles utilisées par le logiciel de calcul, basées sur une évolution typique régulière.

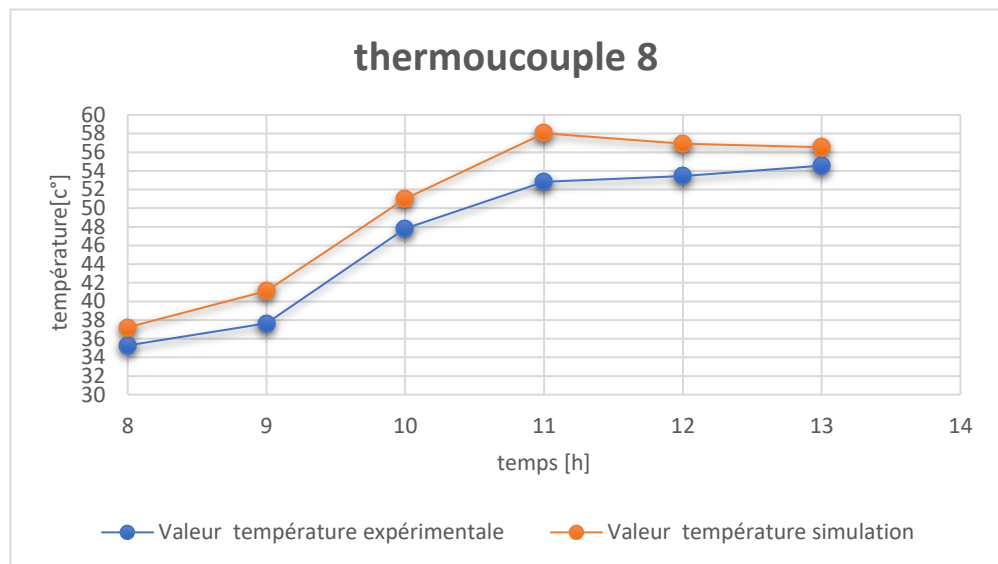


Figure III.4: Comparaison entre la température de sortie de capteur simulé et réel

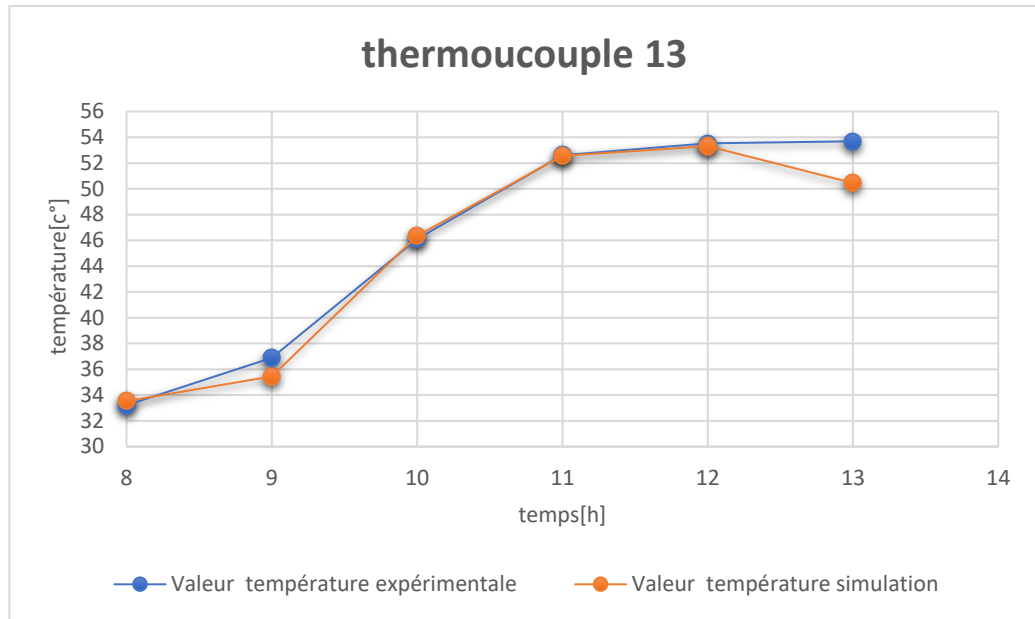


Figure III.5: Comparaison entre la température au centre de la chambre simulé et réel

III.9 Simulation numérique du comportement du séchoir :

C'est le séchoir solaire indirect à l'état réel avec les propriétés suivants :

a. Caractéristique du capteur :

La longueur du capteur $L = 2.5\text{m}$, la largeur $H = 1\text{m}$ la hauteur de capteur égale à $0,013\text{m}$ et la lame d'air à égale $0,006\text{m}$.

b. Caractéristique de la chambre de séchage :

Une forme cubique $0.8\text{m} \times 08\text{m} \times 1\text{m}$ avec une isolation $e = 0.06\text{m}$.

c. Caractéristique de la cheminée :

Une cheminée rectangulaire au centre de la chambre de séchage avec une longueur de $\ell = 1\text{m}$ et largeur $h = 0.2\text{m}$ avec une isolation $e = 0.06\text{m}$.

III.9.1 Les conditions aux limites de la journée 21/04/2019

Tableau III.1 : Mesures obtenues expérimentalement de la journée 21/04/2019 à 12 :00 pm

Temps	v_e [m/s]	T_e [c°]	T_{abs} [c°]	T_{vitre} [c°]	H [w/m²k]	$T_{ambiant}$ [c°]	$V_{sortie\ cheminée}$ [m/s]
12:00pm	0,25	45.58	69.51	45.15	18,64	34.43	0.38

III.9.2 La distribution de température :

La **figure III.6** montre la distribution de température dans le séchoir à l'état réel pour les conditions aux limites de la journée 21/04/2019.

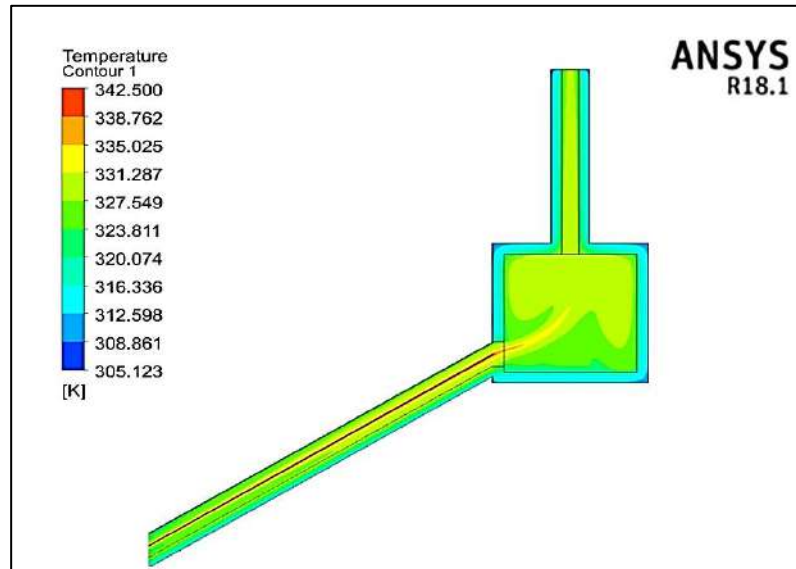


Figure III.6: Distribution de température du séchoir réel (21/04/2019)

III.9.3 La Distribution de vitesse et de pression :

La figure III.7 montre la distribution de vitesse et la pression dans le séchoir à l'état réel pour les conditions aux limites pour la journée 21/04/2019.

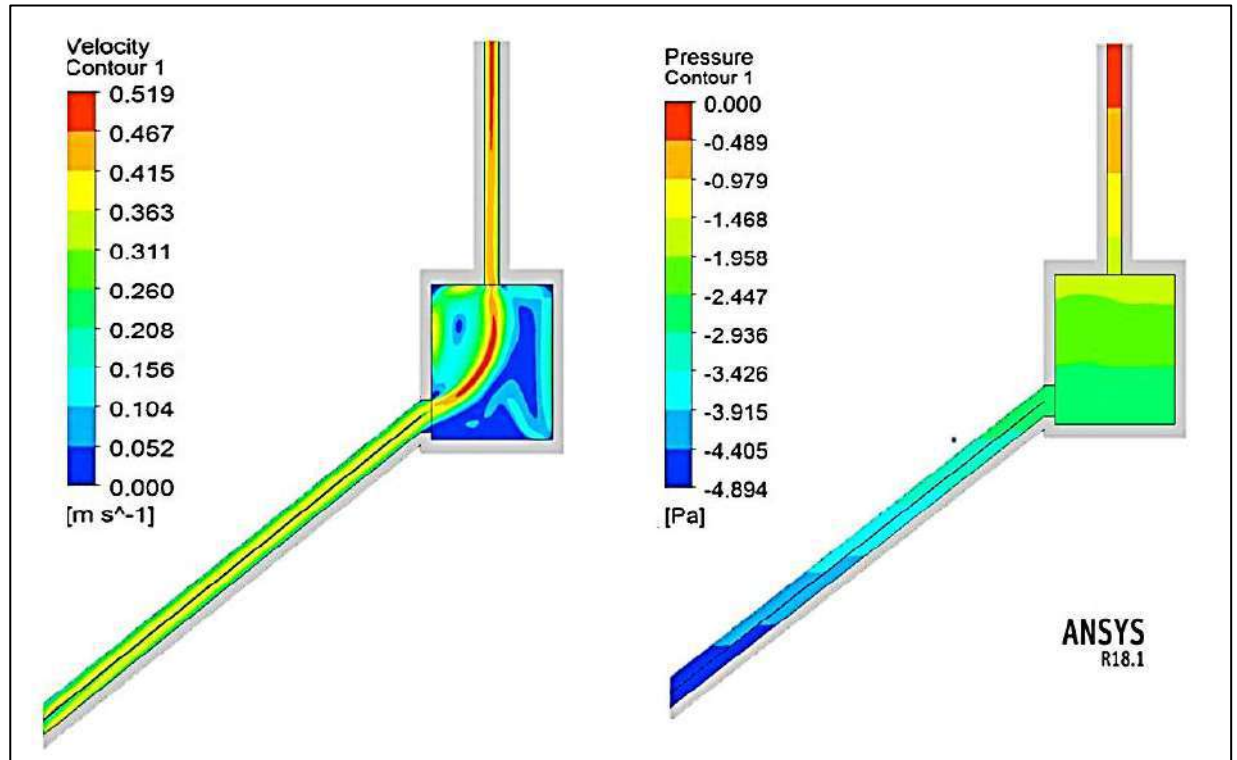


Figure III.7: Distribution de la vitesse et la pression du séchoir réel (21/04/2019)

Dans l'objectif de vérifier et trouver une solution de l'homogénéité de la distribution de la température à l'intérieur de la chambre de séchage, nous avons présenté dans la figure III.6 le résultat de simulation des distributions des températures au sein de séchoir solaire indirect, ces résultats indiquent une faible homogénéité de distribution des températures, et la vitesse d'extraction de l'air à la sortie de la cheminée elle est au voisinage de 0,4 m/s restant un peu faible pour répondre au besoin d'évacuer la totalité d'air humide en cas de traitement de produits agro-alimentaires. Les courbes ci-dessous de la figure III.8 représentent la variation de la température dans la chambre de séchage au niveau des étages en fonction de temps et à la sortie du capteur et l'entrée de cheminée (emplacement des thermocouples), ces courbes à partir des valeurs de températures calculées confirment le résultat de la non-homogénéité de la température avec un écart $\Delta T = 7\text{C}^\circ$ dans la chambre, ce qui prouve la présence de la stratification thermique.

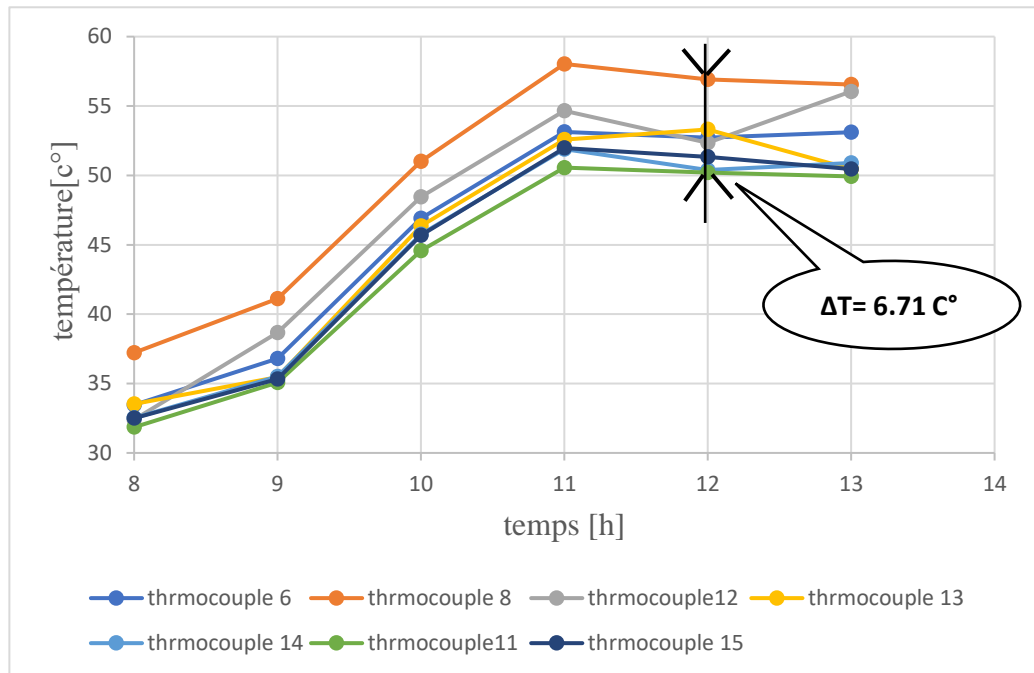


Figure III.8: Ecart de la température après la simulation dans la chambre du séchage

Chapitre IV

**Optimisation de la conception du
séchoir solaire avec la MPE**

IV. Chapitre 04 : Optimisation de la conception du séchoir solaire avec la MPE

IV.1 Introduction :

L'amélioration de performance thermique et de l'homogénéité thermique du séchoir solaire indirect (SSI) dépend de manière significative sur les paramètres de conception. Les variables de conception pertinentes incluent les paramètres géométriques qui contrôlent l'opération de séchage, tels que la hauteur, la largeur, l'angle d'inclinaison, la position de la cheminée et la forme de la chambre de séchage. Pour optimiser et fournir des résultats détaillés et précis, la quasi-totalité des probabilités des paramètres doit être examinée, ce qui nécessite un nombre considérable de simulations CFD. Dans cette étude nous utilisons le couplage entre la méthode des plans d'expériences et la simulation CFD afin d'optimiser la conception du SSI répondant aux exigences prédéfinies. Pour la mise en application de cette technique, nous utiliserons le logiciel CFD ANSYS®18.1 FLUENT couplé avec le logiciel JMP 14. Le programme JMP 14 est un module d'optimisation qui dérive les variables de conception optimales en fonction des contraintes de conception et de la fonction objectif. Dans cette méthode, plusieurs critères (tels que « maximiser », « minimiser » ou « déterminer la valeur cible ») sont utilisés pour trouver une conception géométrique qui réalise des champs thermique et dynamique optimaux à travers plusieurs paramètres de sortie.

Initialement, le choix de ces variables (longueur, largeur, position et angle d'inclinaison de la cheminée et la forme de la chambre) est dû à leur effet direct sur l'homogénéité des champs thermique et dynamique. L'écart type de température, la vitesse à la sortie et la température moyenne dans la chambre de séchage ont été introduits en tant que des paramètres de sortie (Réponses) sur le JMP 14.

Le processus d'optimisation global englobe l'échantillonnage initial à passer au stade de la méthode des plans d'expériences (MPE), suivi de la technique d'interpolation appropriée à l'aide d'une méthode de surface de réponse (MSR).

Enfin, les données des deux étapes précédentes sont analysées pour atteindre la conception du SSI optimal. Les procédures d'optimisation détaillées sont décrites sous forme d'organigramme sur la **figure IV.1**.

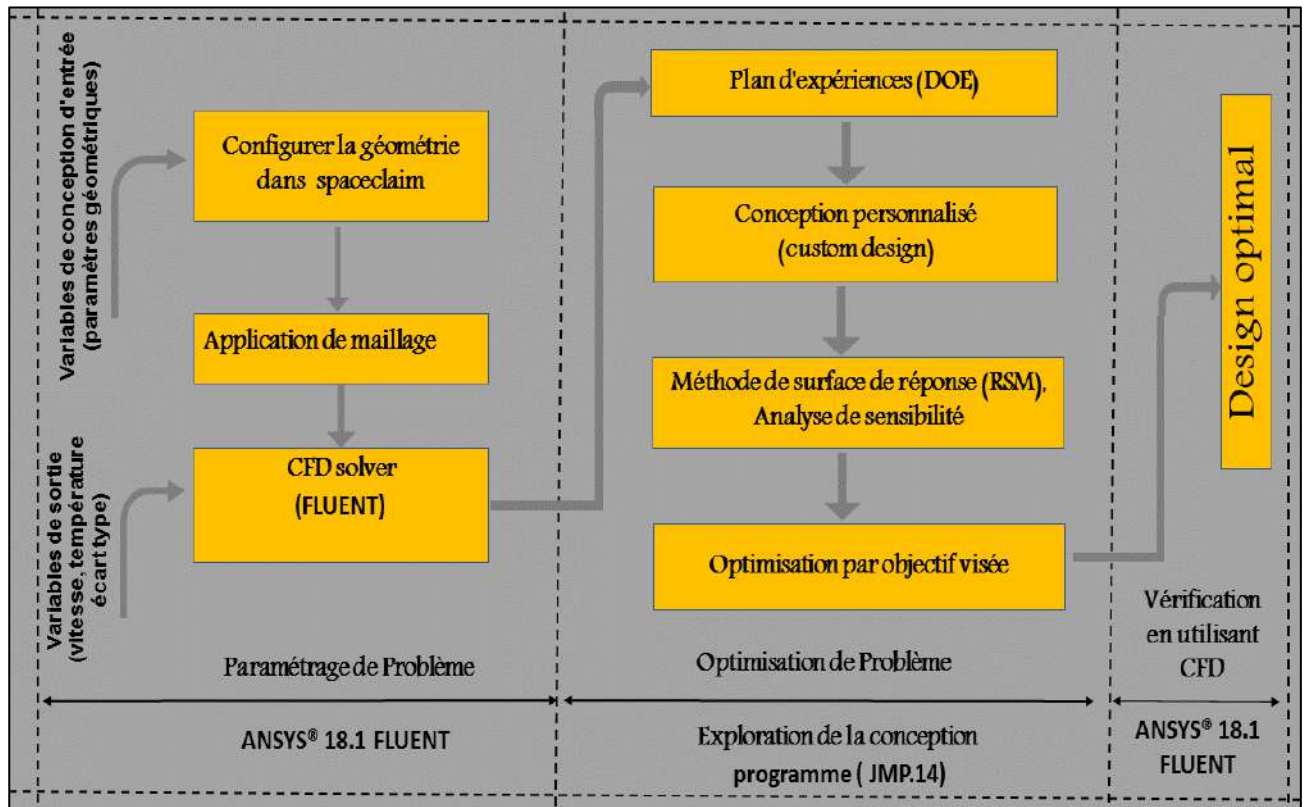


Figure IV.1: Diagramme des procédures d'optimisation

IV.2 Etapes du traitement :

- Choix des réponses (**écart type**, température moyenne dans la chambre, la vitesse à la sortie de cheminée).
- L'entrée des facteurs influents (l'épaisseur de la lame d'air, hauteur et angle d'inclinaison et position de la cheminée, et la forme de la chambre de séchage).
- L'entrée des niveaux des facteurs.
- Choix du plan d'expérience.
- Optimisation par MSR
- Simulation et convergence des expériences virtuelles par FLUENT.
- Analyse des résultats par des courbes de surface de réponse et obtenir la conception optimale qui réalise l'objectif.

IV.3 La méthode des plans d'expériences

L'avantage de cette méthode réside dans le fait que le nombre d'expériences à réaliser est limité et doit être le plus faible possible, toutefois ces expériences doivent être structurées et organisées. Au modèle expérimental qui est exprimé peut correspondre une modélisation mathématique. Celle-ci permet de relier la variation des facteurs étudiés à la variation de la réponse mesurée $Y = f(X_1; X_2; \dots X_k)$. Ainsi ce modèle mathématique permet une interprétation plus profonde des phénomènes. Il possède des qualités prédictives et rend les orientations de recherche plus sûres.

La théorie de cette méthode et des différents plans d'expériences est traitée en détail dans plusieurs livres en français et en Anglais ; le livre de Jacques Goupy intitulé « Introduction aux plans d'expériences » est un livre très recommandé qui explique la méthode avec plusieurs exemples d'application. Les logiciels d'aujourd'hui permettent de construire facilement tous les plans et qui réalisent les calculs les plus complexes rapidement et sans aucune difficulté. Les logiciels très reconnus qui traitent la méthode sont : JMP, STATGRAPHICS, DESIGN EXPERT et MINITAB.

IV.4 Définition de la méthode de surface de réponse (MSR) :

La méthode de surface de réponse (MSR), largement utilisée pour optimiser les applications industrielles, est une fonction d'approximation explicite qui produit des corrélations entre les paramètres d'entrée et de sortie utilisés par l'algorithme d'ajustement indiqué dans la méthodologie de la MPE. Le MSR est obtenu en utilisant l'ensemble de modèles de régression polynomiale du second ordre et les résultats générés à partir des MPEs, qui peuvent être écrits comme suit :

$$f = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n \beta_{ij} x_i x_j \dots\dots\dots (6)$$

Ces corrélations reflètent les relations entre les paramètres de conception et la surface de réponse, où f est la réponse, x est la variable de conception, n est le nombre de variables de conception et β_0, β_1, \dots sont des coefficients de régression [27].

IV.5 Réponses visées :

Dans cette étude, l'algorithme MSR a été appliqué pour dériver la conception optimale en fonction des ensembles de cibles que sont représentées dans la température moyenne de la chambre de séchage, l'écart type de température et la vitesse de sortie.

IV.5.1 La température moyenne de la chambre de séchage :

Pour un séchage convenable des produits agroalimentaires nous cherchons une température de séchage dans la marge de 50 à 75 [28].

IV.5.2 Écart type de température

IV.5.2.1 Définition statistique :

L'écart type (aussi orthographié écart-type) est une mesure de la dispersion des valeurs d'un échantillon statistique ou d'une distribution de probabilité. Il est défini comme la racine carrée de la variance ou, de manière équivalente, comme la moyenne quadratique des écarts par rapport à la moyenne. Il se note en général avec la lettre grecque σ (« sigma ») :

$$\sigma = \sqrt{V} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2} \dots\dots\dots (7)$$

Les écarts types permettent en général de synthétiser les résultats numériques d'une expérience répétée. Tant en probabilités qu'en statistique, il sert à l'expression d'autres notions importantes comme le coefficient de corrélation, le coefficient de variation ou la répartition optimale de Neyman.

IV.5.2.2 Écart type de température dans la chambre de séchage :

Dans cette partie d'étude ce paramètre statistique est utilisé comme réponse pour enquêter l'homogénéité de température dans la chambre de séchage.

Après la simulation numérique CFD de chaque conception des conceptions virtuelles obtenues à partir de la MPE. Utilisant le logiciel de post-CFD nous exportons tous les températures des nœuds existants à la chambre de séchage, puis avec l'écart type de température est calculé avec EXCEL. L'écart type de température dans ce cas représente la moyenne des sommes des distances entre les températures des nœuds et la température moyenne. Après cette définition il est clair que pour une température homogène nous visons un écart type minimale.

IV.5.3 Vitesse à la sortie (vitesse d'extraction) :

L'amélioration des champs dynamique à une grande influence sur l'opération de séchage c'est pour cela nous avons choisi la vitesse de sortie comme une réponse à optimiser dans cette étude.

IV.6 Les facteurs et leurs niveaux :

L'étude consistait à élaborer un plan d'expériences visant à optimiser les réponses présentées précédemment. Plusieurs paramètres ont été étudiés pour déterminer leur influence sur les réponses. Ces paramètres sont la hauteur, la lame d'air, l'angle d'inclinaison de la cheminée, ainsi que la forme de la chambre de séchage et la position de la cheminée. Pour chacun des facteurs continus et des facteurs catégoriels, les niveaux de variation (faible et élevé) -1 et +1 ont été définis et sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.1: : Sélection des facteurs étudiés et leurs niveaux de variation pour l'étude réalisée

Facteurs	Variables	Niveau -1		Niveau +1	
Continues					
01	Hauteur de la cheminée [cm]	30		120	
02	Largeur de la lame d'air [cm]	5		15	
03	Angle d'inclinaison [°]	30		90	
Discrets					
04	La forme de la chambre de séchage	Rectangle		Coudé 45°	
05	La position de la cheminée	Gauche	Centre	Droite	

IV.7 Les expériences données par la MPE :

Tableau IV.2: Points de conception générés à partir de la MPE.

Essais	Hauteur de la Cheminée (Cm)	Lame d'air (Cm)	Angle d'inclinaison (°)	Position de la cheminée	Forme de la chambre
01	75	15	90	Droit	Coudé avec 45°
02	30	15	60	Gauche	Coudé avec 45°
03	30	10	30	Gauche	Rectangulaire
04	30	15	30	Centre	Coudé avec 45°
05	30	5	90	Centre	Coudé avec 45°
06	120	15	90	Droit	Rectangulaire
07	75	15	60	Gauche	Rectangulaire
08	120	5	60	Gauche	Rectangulaire
09	120	5	30	Centre	Coudé avec 45°
10	75	10	60	Centre	Coudé avec 45°
11	30	5	60	Centre	Rectangulaire
12	75	5	30	Droit	Rectangulaire
13	120	15	90	Centre	Coudé avec 45°
14	120	10	90	Gauche	Coudé avec 45°
15	120	5	90	Droit	Coudé avec 45°
16	30	10	60	Droit	Rectangulaire
17	120	15	30	Gauche	Coudé avec 45°
18	30	15	90	Centre	Rectangulaire
19	30	15	30	Droit	Rectangulaire
20	75	10	90	Centre	Rectangulaire
21	30	5	90	Gauche	Rectangulaire
22	30	5	30	Droit	Coudé avec 45°
23	75	5	60	Gauche	Coudé avec 45°
24	120	15	30	Centre	Rectangulaire
25	120	10	30	Droit	Coudé avec 45°
26	75	10	60	Gauche	Rectangulaire
27	75	10	60	Droit	Rectangulaire
28	75	10	60	Centre	Rectangulaire
29	75	10	60	Droit	Coudé avec 45°
30	75	10	60	Gauche	Coudé avec 45°

IV.8 Discussion des résultats :

IV.8.1 Validation des modèles utilisés pour l'optimisation :

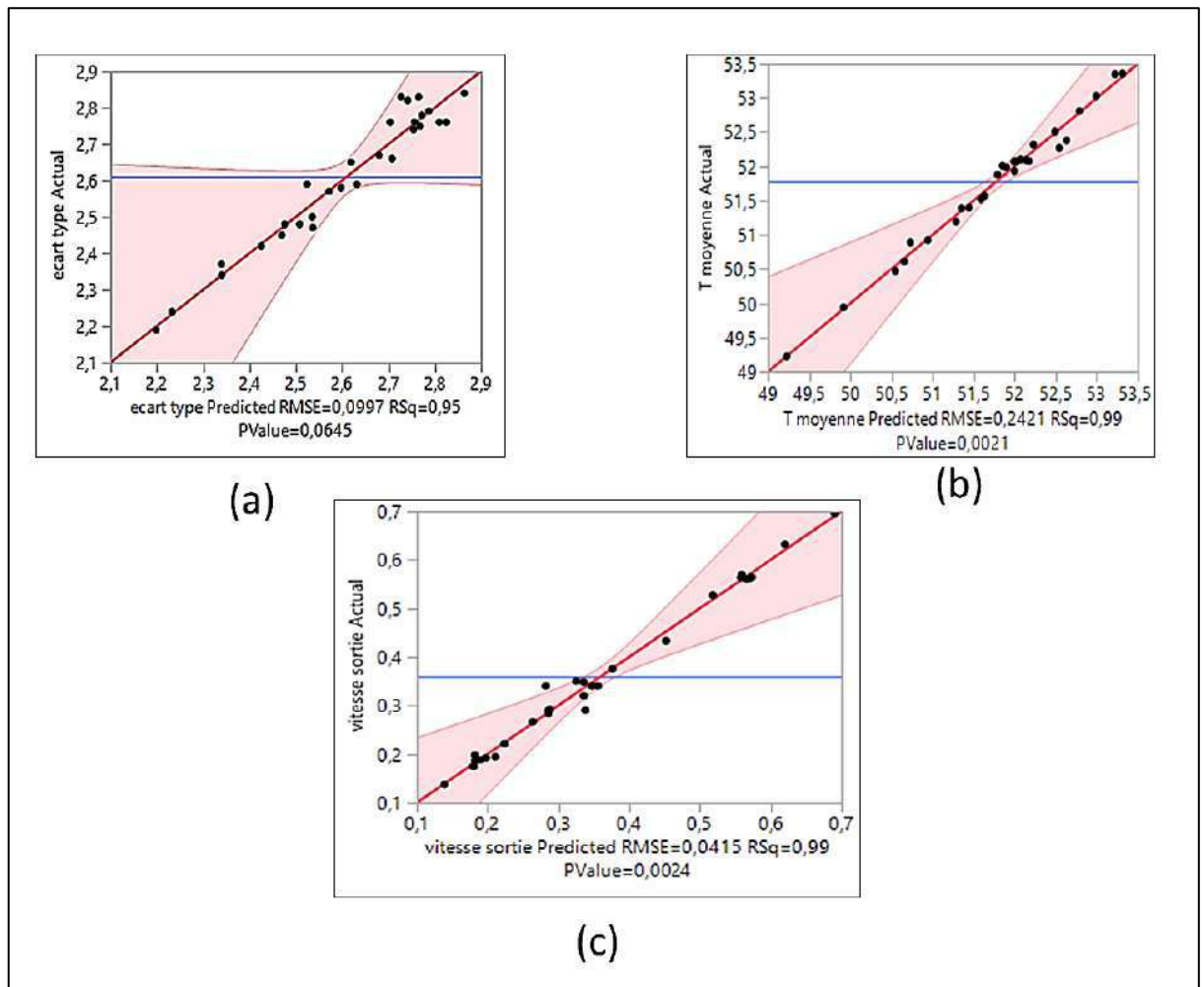


Figure IV.2: Comparaison des valeurs numériques prédits par le modèle MSR (a) écart type, (b) température moyenne et (c) vitesse de sortie

La **figure IV.2** montre bien une relation linéaire entre ces valeurs qui témoigne de la bonne adéquation entre les réponses pouvant être obtenues par le modèle expérimental et celles qui pourraient être prédites par la relation mathématique proposé à partir de la MPE. Par ailleurs on peut obtenir les surfaces de réponses pour chacune des réponses et qui seront présentées plus tard.

L'analyse des résultats de ces expériences sur les trois réponses écart type (Y1) et température moyenne (Y2) et vitesse de sortie (Y3) a pu être réalisée à partir du logiciel JMP.

On peut constater à partir du coefficient de régression linéaire (R^2) calculé sur les réponses Y1 et Y2 et Y3 représenté sur la figure IV.2 que le modèle étudié est satisfaisant. En

effet ce coefficient étant supérieur ou égal à 0.9 ceci indique que plus de 90% des variables sont expliquées par le modèle.

IV.8.2 Diagramme des effets :

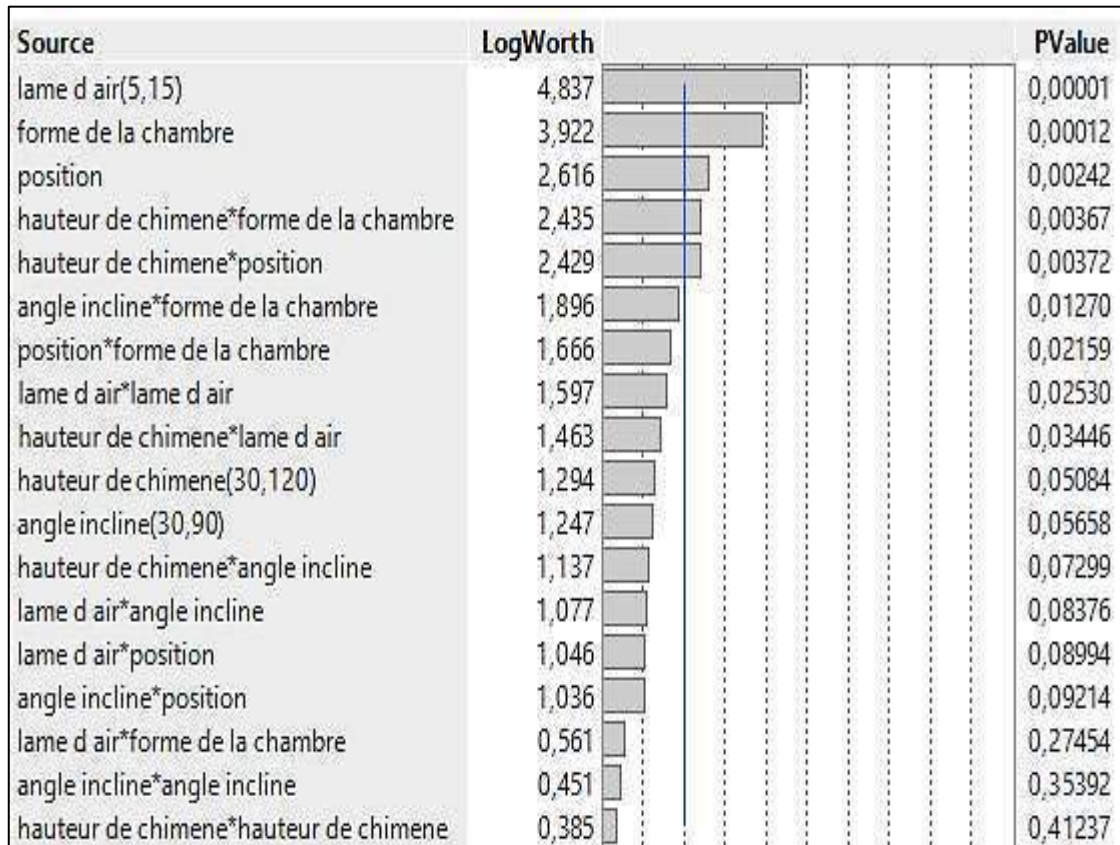


Figure IV.3: Diagramme illustré les facteurs les plus influences

Le diagramme **figure IV.3** représente un résumé des effets sur les réponses à optimiser. Statistiquement on peut dire que tout paramètre à un P-value inférieur à 0.01 donc a un effet significatif.

Nous pouvons aussi ordonner les paramètres par leurs influences. Nous remarquons alors que la lame d'air est la plus influente puis la forme de la chambre ensuite la position de la cheminée et en fin la hauteur et l'angle d'inclinaison de la cheminée.

IV.8.3 Diagramme de Pareto :

Le graphique de Pareto dans **les figures IV.4, IV.5 et IV.6** montre tous les effets des paramètres et leurs interactions par ordre décroissant d'importance. Le signe (+) indique une contribution positive de l'effet, tandis que le signe (-) indique une contribution négative [29].

Dans le cas de l'écart type, nous n'avons que deux effets principaux (forme de la chambre rectangulaire, la position de la cheminée au centre) et trois interactions (position centrale avec la forme rectangulaire, l'angle d'inclinaison avec la forme rectangulaire et la hauteur de la cheminée avec la lame d'air).

Et dans le cas de la température moyenne, il existe trois effets principaux (la forme de la chambre rectangulaire et la position de la cheminée à gauche et la lame d'air) et quatre interactions significatives (hauteur de la cheminée avec la position au centre, hauteur avec la forme rectangulaire, lame d'air avec la position de la cheminée au centre, l'angle d'inclinaison avec la position centrale).

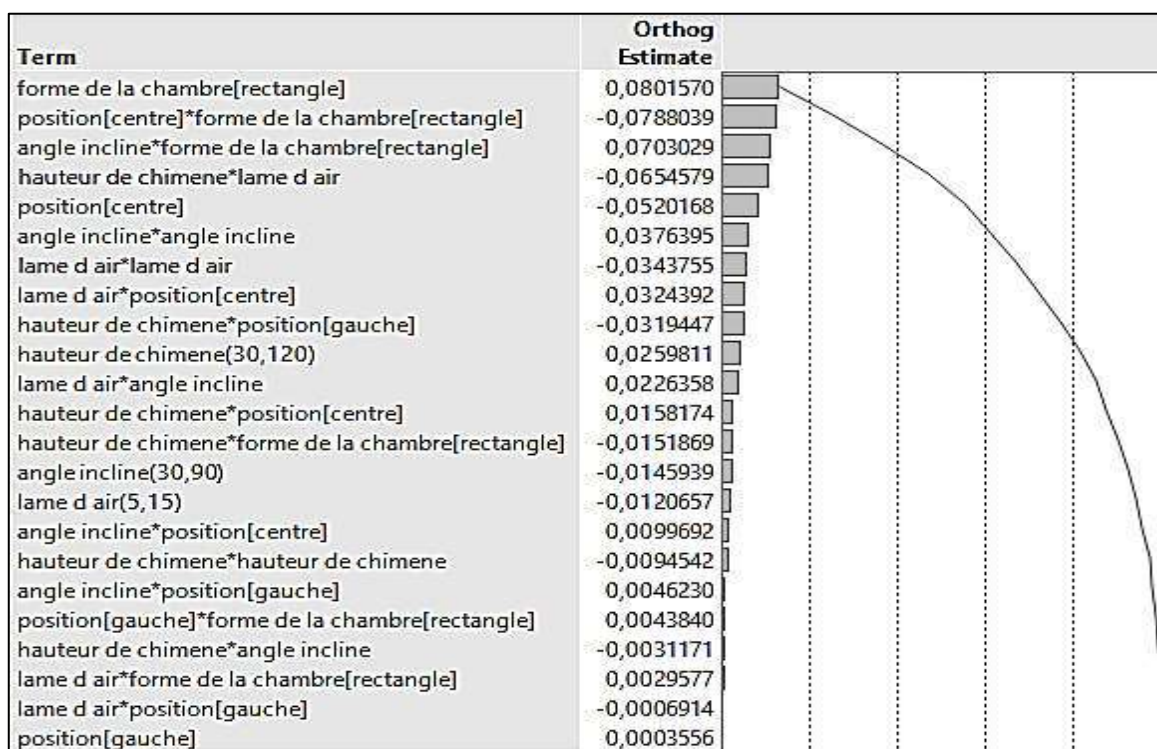


Figure IV.4: Graphique de Pareto montre l'impact des facteurs sur écart type

Et concernant le cas de la vitesse à la sortie de la cheminée on remarque deux effets nécessaires (la lame d'air qui affecte clairement et la hauteur de la cheminée et la forme rectangle avec moins d'effet) et trois interactions significatives (l'angle d'inclinaison avec la forme de la chambre rectangulaire, la hauteur de la cheminée avec l'angle d'inclinaison, et la position de la cheminée à gauche avec l'angle d'inclinaison).

Remarque : toutes les interactions qui ont un effet très faible peuvent être éliminées

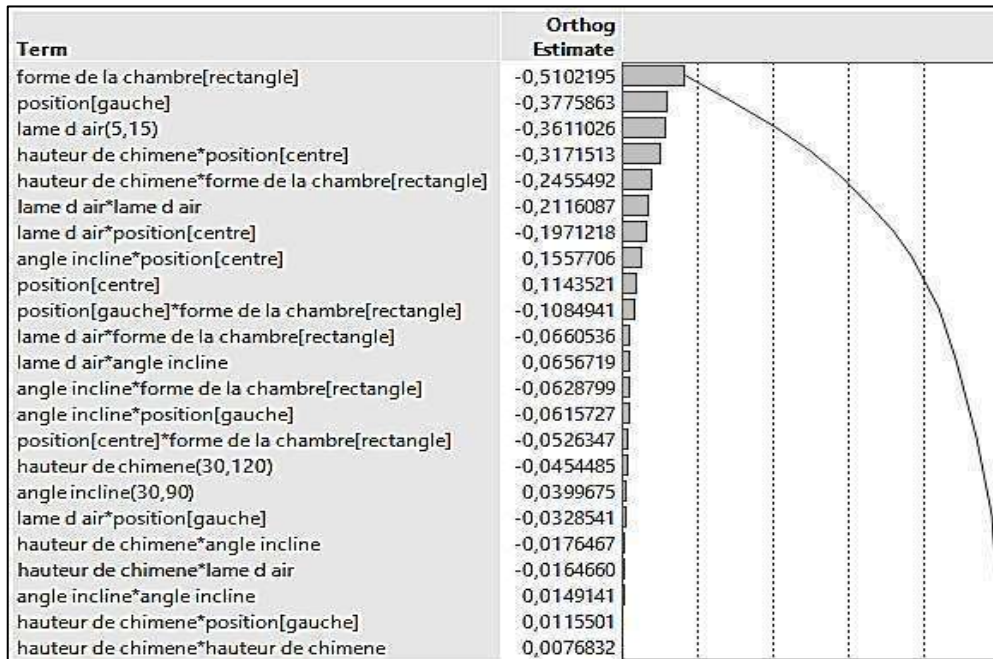


Figure IV.6: Graphique de Pareto montre l'impact des facteurs sur la température moyenne

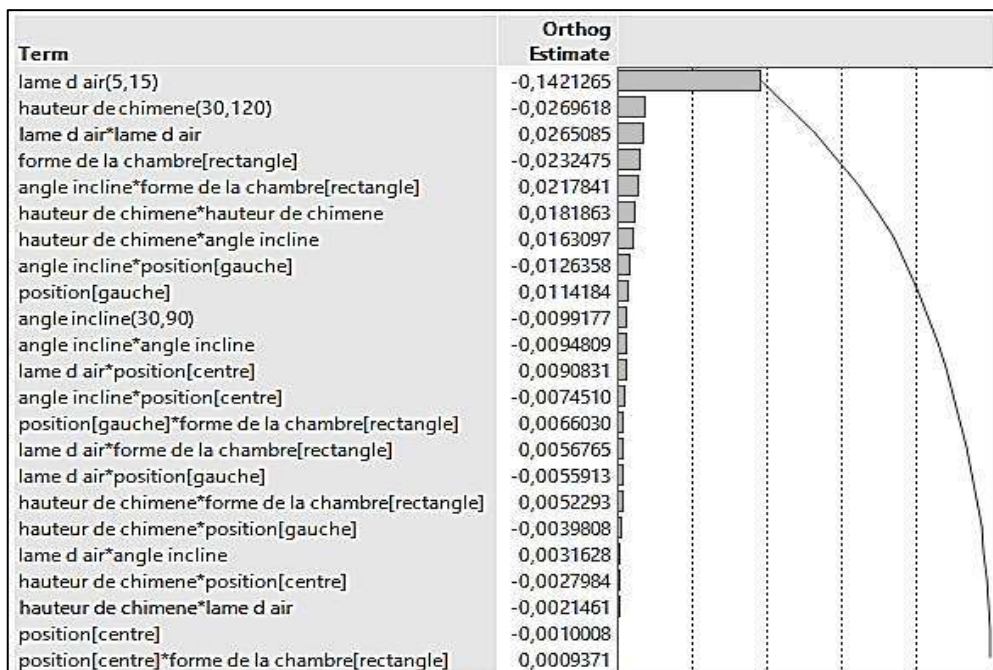


Figure IV.5: Graphique de Pareto montre l'impact des facteurs sur la vitesse de sortie

IV.8.4 Effet de la hauteur, la lame d'air et l'angle d'inclinaison cheminée sur l'écart type :

Les modèles prédits par le logiciel JMP permettent de tracer les surfaces de réponse ; la figure **la figure IV.7 et la figure IV.8** à titre d'exemple. La surface de réponse représente la variation d'une réponse en fonction de deux facteurs d'influences. Nous rappelons que nous chercherons à minimiser la valeur de l'écart type dans toutes les simulations réalisées.

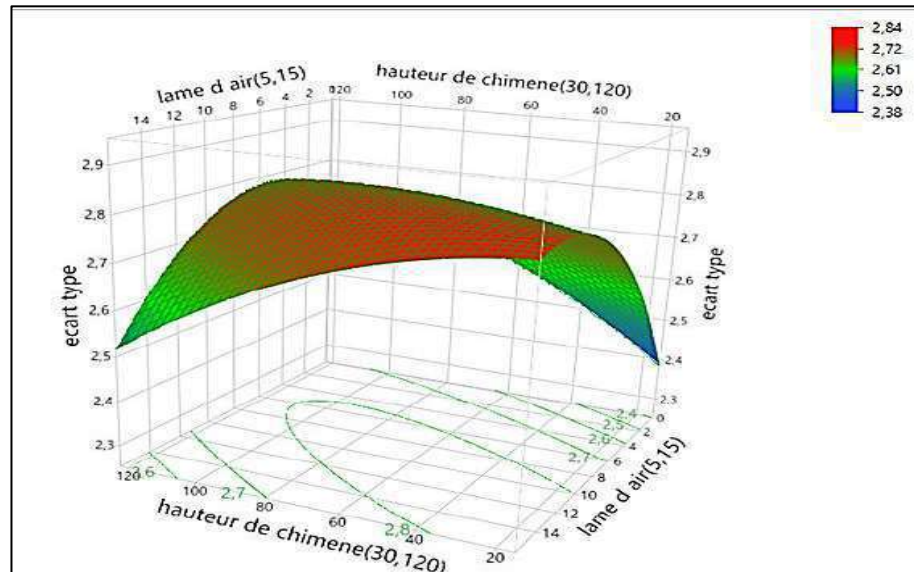


Figure IV.7: Effet de la hauteur et la lame d'air sur l'écart type

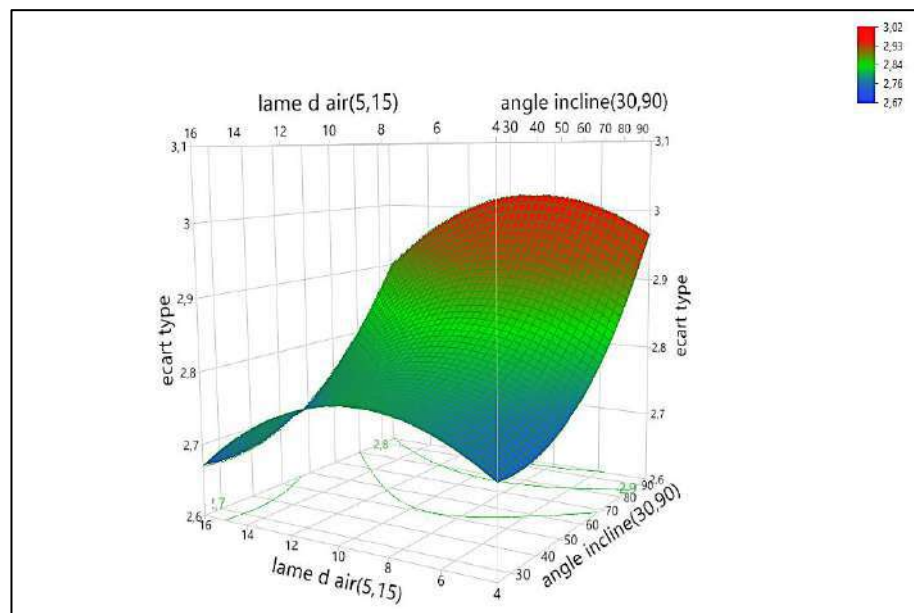


Figure IV.8: Effet de l'angle d'inclinaison sur l'écart type

L'écart type de température a une valeur minimale entre 2.4 et 2.5 quand la hauteur et lame d'air de cheminée sont simultanément soit au niveau +1 ou bien au niveau -1. Par contre il prend sa valeur maximale 2.84 pour le niveau +1 de lame d'air avec la hauteur minimale.

La zone en bleu représente les meilleures valeurs de l'angle d'inclinaison pour une distribution homogène de température dans la chambre de séchage, ainsi nous concluons de la courbe précédente que l'angle d'inclinaison optimal est de 30° .

IV.8.5 Effet de la hauteur, la lame d'air et l'angle d'inclinaison sur la température moyenne :

On en déduit à travers la courbe illustrée dans la **Figure IIV.9** que les valeurs minimales de la lame d'air et la longueur de la cheminée donnent la meilleure valeur de la température moyenne à la chambre de séchage. Ce qui est représenté par a zone rouge de la surface de réponse.

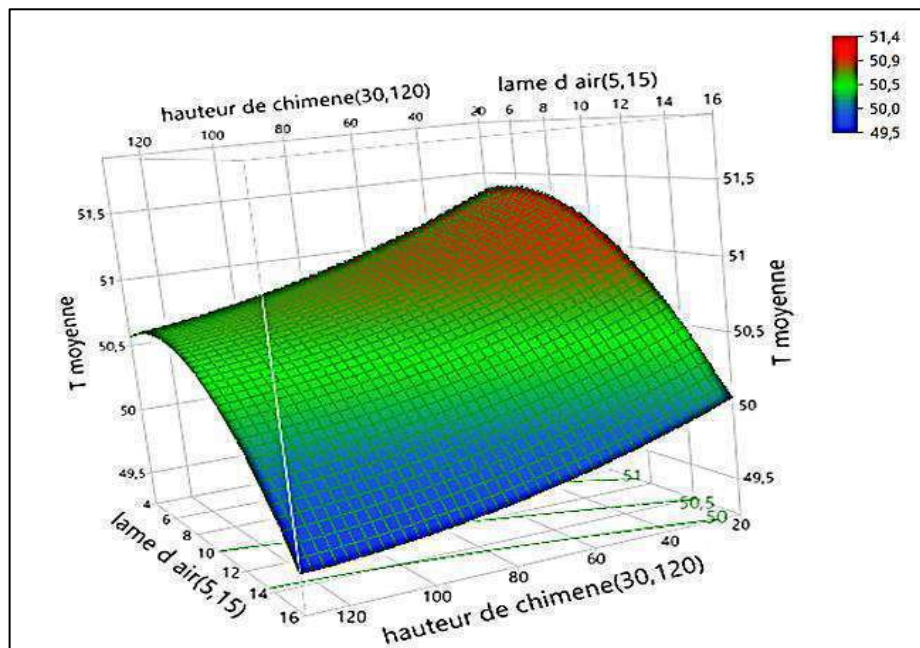


Figure IV.9: Effet de la hauteur et la lame d'air sur la plage de la température

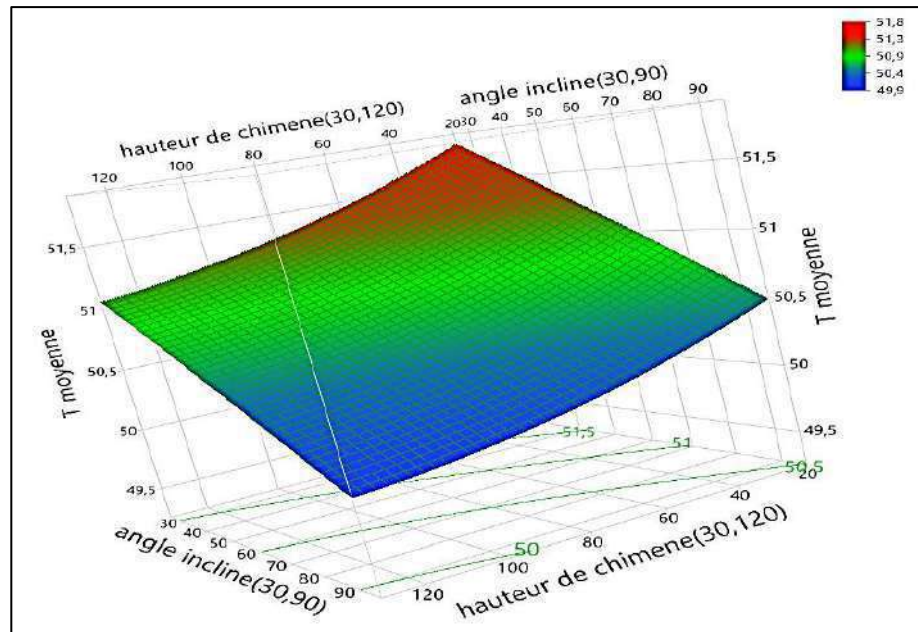


Figure IV.10: Effet de l'angle d'inclinaison sur la plage du température moyenne dans la chambre

La courbe illustrée à la **Figure IIV.10** montre que l'angle d'inclinaison de la cheminée n'a pas un effet significatif sur la température moyenne dans la chambre de séchage car la minimisation de l'angle peut augmenter la température avec une valeur environ de 0,75 °C pour le niveau +1 de la hauteur de cheminée, alors que pour le niveau -1 de ce dernier la température peut être augmentée avec 1,5 °C.

IV.8.6 Effet de la hauteur, la lame d'air et l'angle d'inclinaison sur la vitesse à la sortie :

La **Figure IV.11** montre que valeur maximale de la vitesse à la sortie est obtenue quand les valeurs de la hauteur et de la lame d'air et de la lame cheminée sont minimales.

Nous rappelons que la vitesse d'extraction affecte directement la durée du séchage, donc l'augmentation de la vitesse à la sortie accélère le processus de séchage.

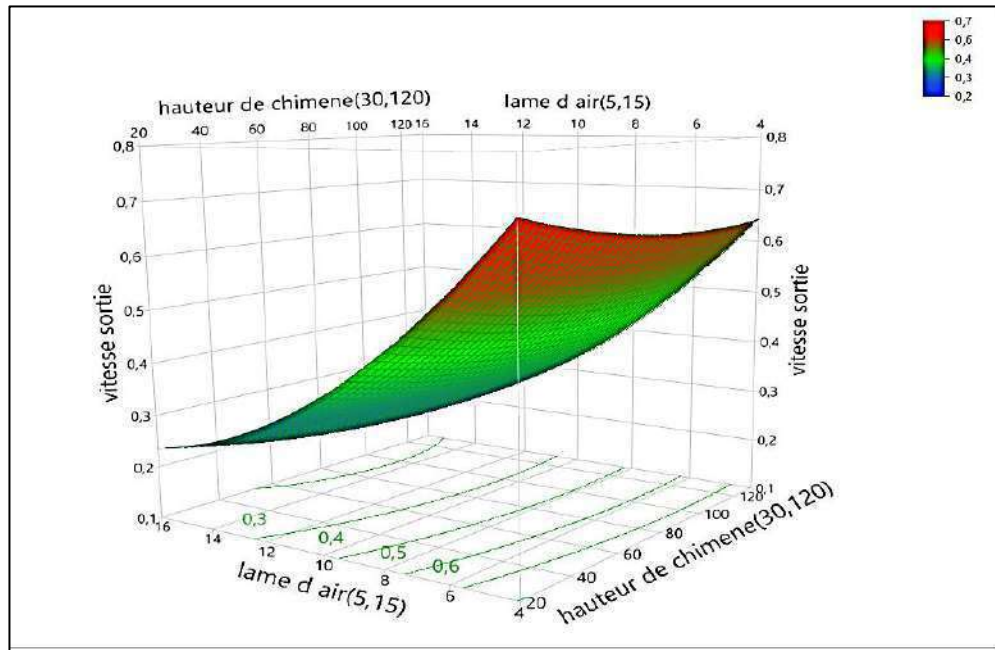


Figure IV.11: Effet de la lame d'air et la hauteur de la cheminée su la vitesse à la sortie

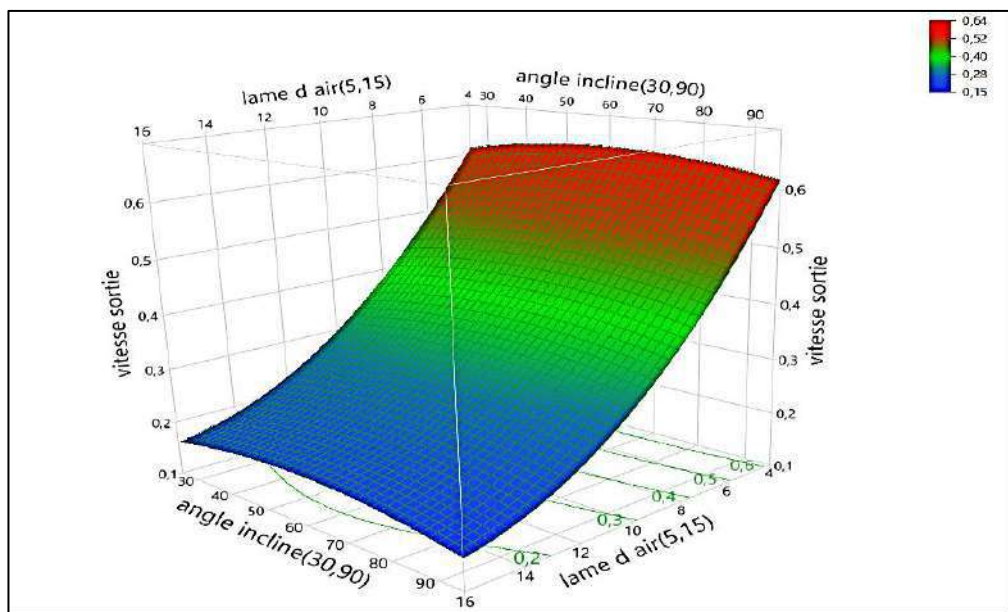


Figure IV.12: Effet de l'angle d'inclinaison à la vitesse de sortie

Nous remarquons à travers la courbe de la Figure IV.12 que l'angle d'inclinaison n'affecte pas significativement à la vitesse de sortie.

IV.8.7 Effet de la position de la cheminée :

IV.8.7.1 Chambre de séchage sous forme coudée 45° :

Ces interfaces **figure IV.13, IV14, IV15** illustrent l'effet de la forme de la chambre de séchage (coudé 45°) avec la position variable de la cheminée à chaque fois (au centre, à droite, à gauche) aux réponses (écart type, température moyenne et la vitesse à la sortie).

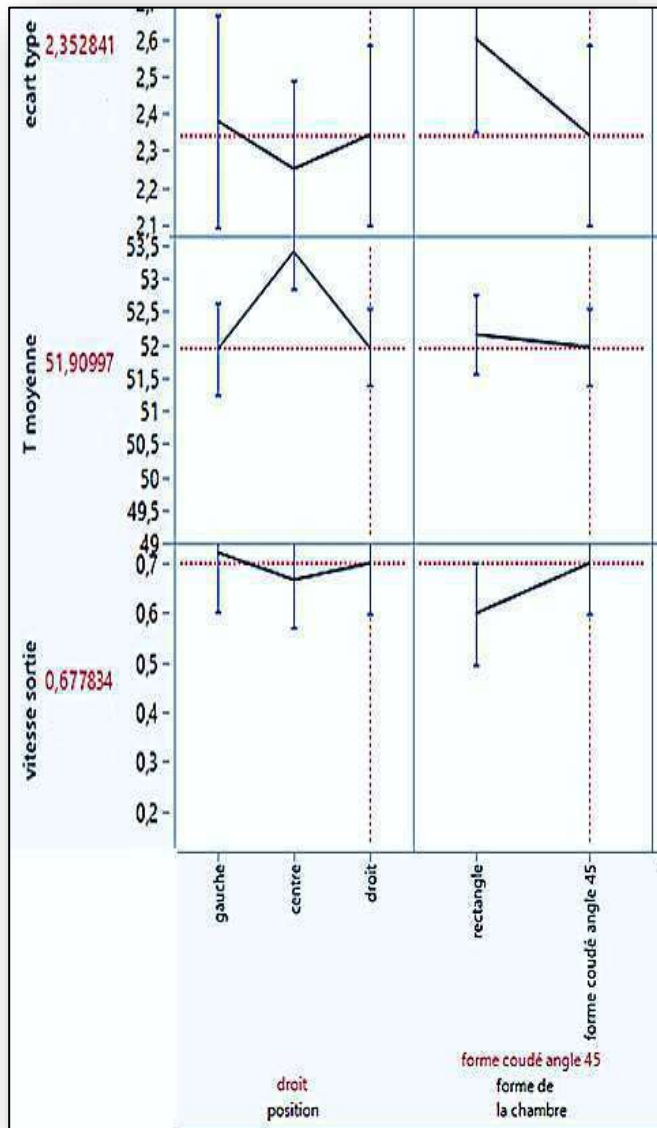


Figure IV.14: Position de la cheminée à droit avec une forme coudée 45°

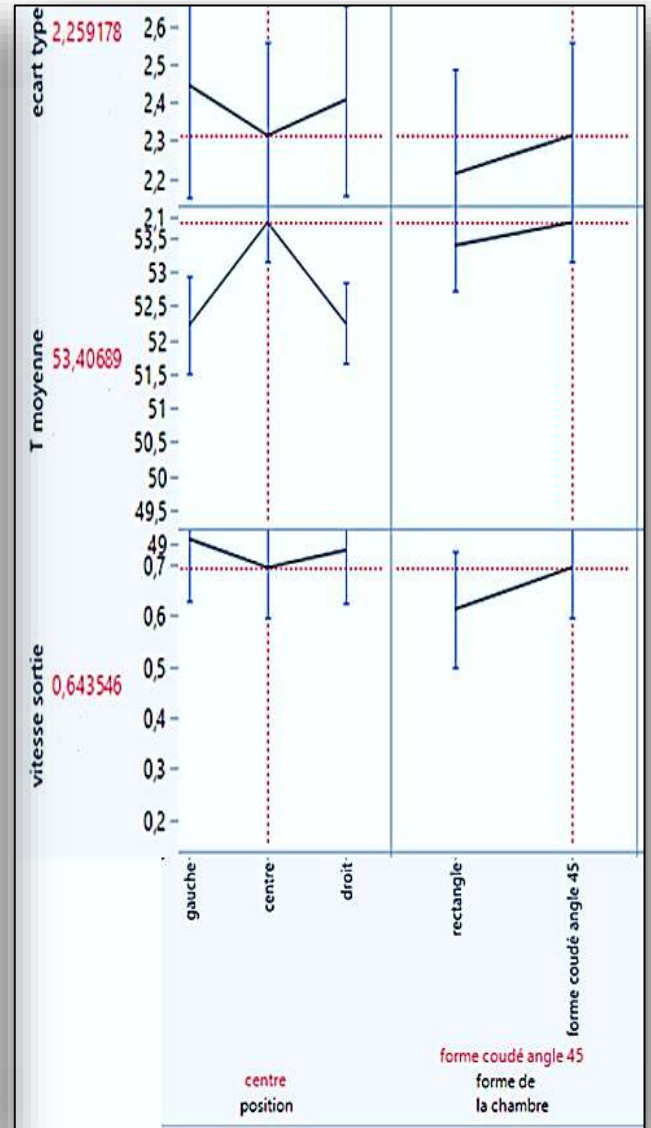


Figure IV.13: Position de la cheminée au centre avec forme de la chambre coudée 45°

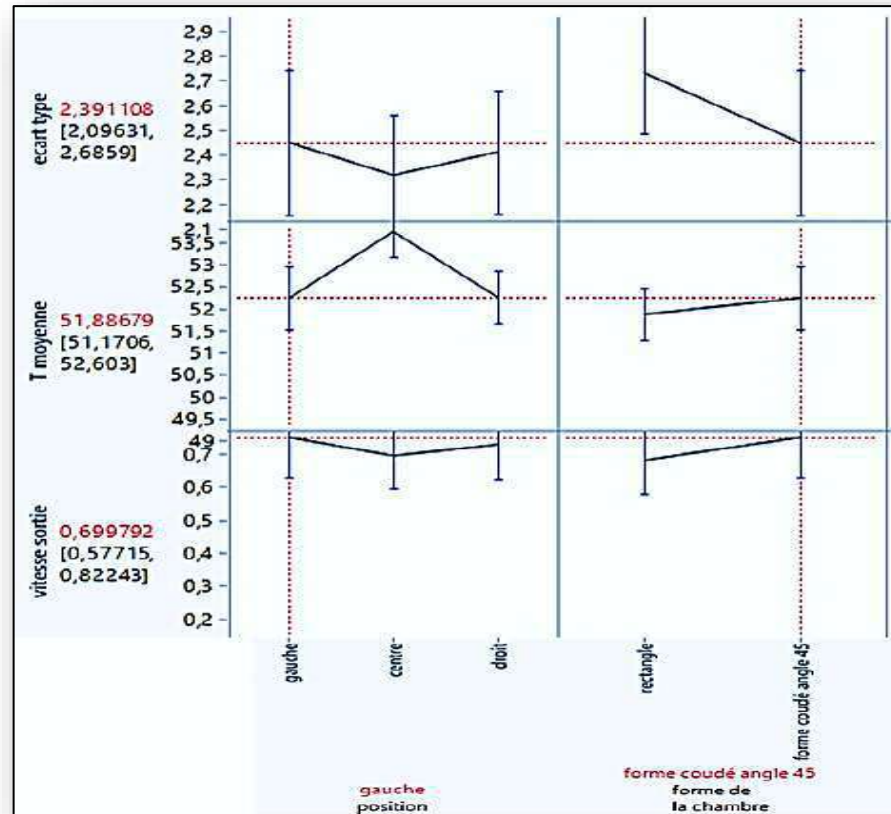


Figure IV.15: Position de la cheminée à gauche avec la forme de la chambre coudé 45°

Nous voyons que la position centrale de la cheminée donne une valeur de l'écart type plus basse 2.25 avec une valeur maximale de la température moyenne égale à 53.40 °C par rapport à les positions gauche et droite où la valeur de l'écart augmente à 2.39 et 2.35 respectivement et la moyenne de la température diminue à 51.88 °C.

Et pour la vitesse à la sortie de la cheminée, elle atteint sa valeur la plus basse 0.64m/s dans le cas de la position centrale de la cheminée. Et la valeur de la vitesse est relativement élevée dans les deux autres cas gauche et droite 0.70m/s et 0.68m/s avec un faible écart qui peut être négligé, alors nous concluons que la position de la cheminée n'affecte pas significativement à la vitesse de la sortie.

Enfin, on peut dire que la position centrale dans le cas d'une chambre coudée 45° est la situation la plus appropriée.

IV.8.7.2 Chambre de séchage rectangulaire :

Ces interfaces **figure IV.16, IV17, IV18** illustrent l'effet de la forme de la chambre de séchage (rectangulaire) avec la position variable de la cheminée à chaque fois (au centre, à droit, à gauche) aux réponses (écart type, température moyenne et la vitesse à la sortie).

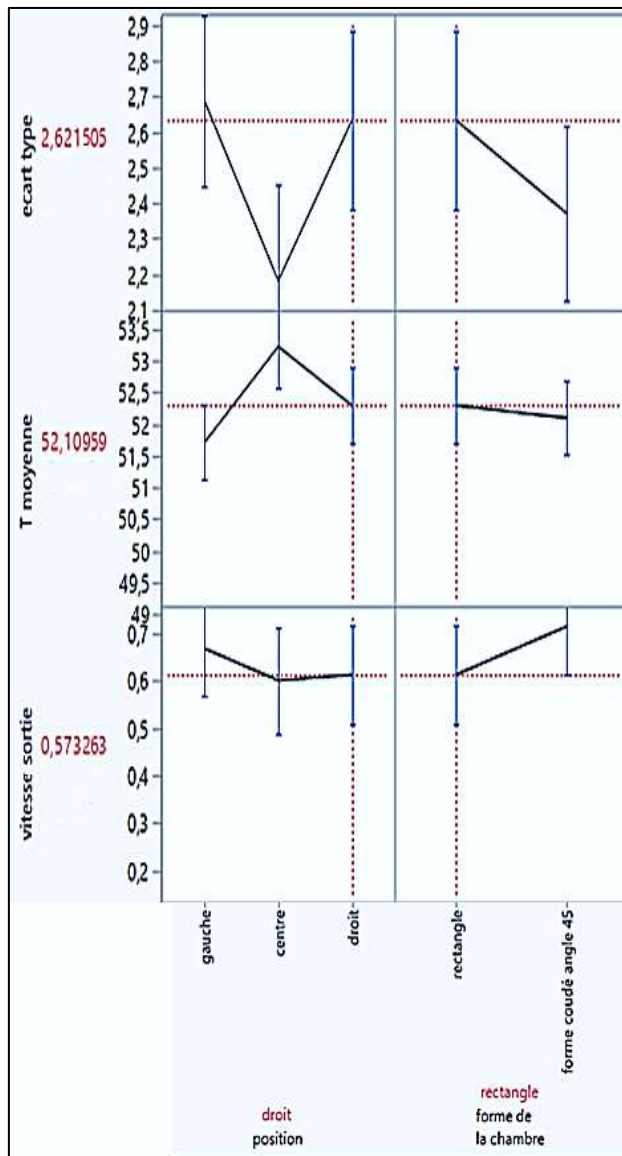


Figure IV.17: Chambre rectangulaire avec une cheminée a droit

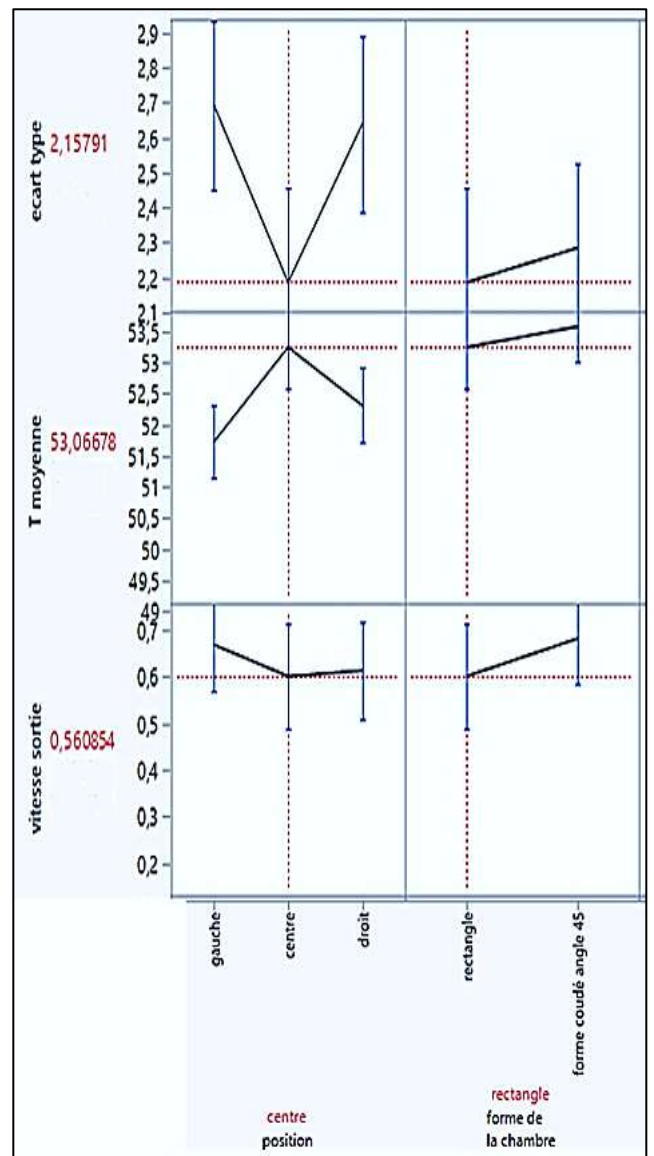


Figure IV.16: Chambre rectangulaire avec une cheminée au centre

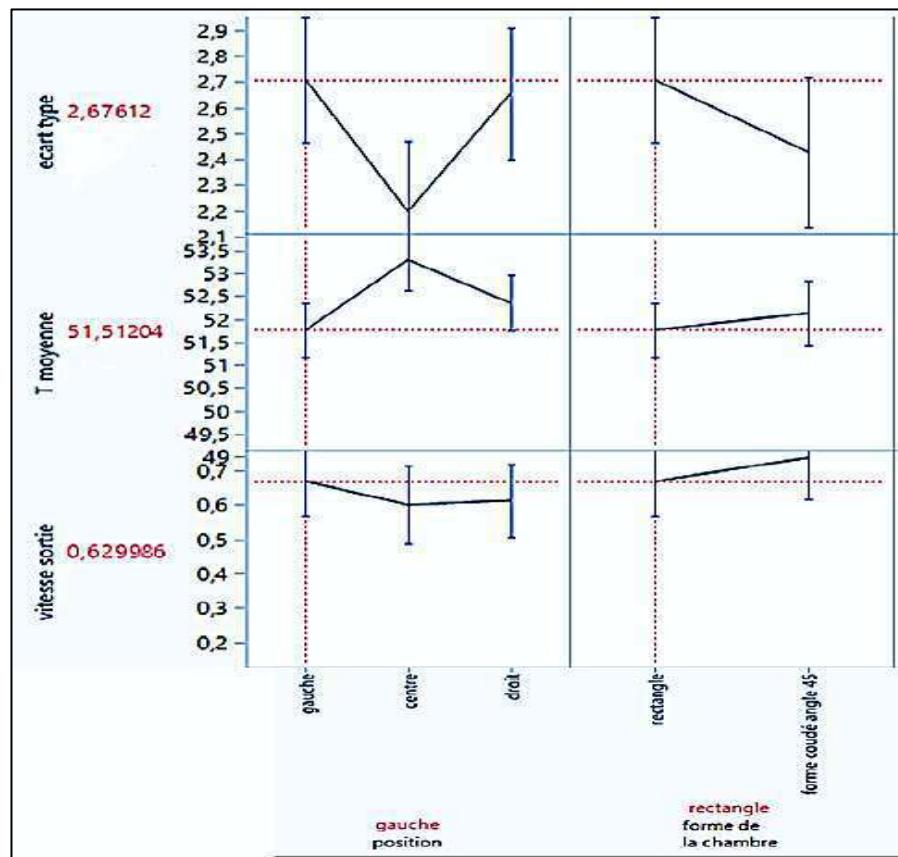


Figure IV.18: Chambre rectangulaire avec une cheminée à gauche

Dans ce cas d'une chambre rectangulaire avec une cheminée au centre **figure IV.17** nous avons constaté que l'écart type diminuait à 2,15 par rapport au cas précédent (chambre coudée), Et lorsque nous comparons cette valeur avec les deux autres (d'une position de la cheminée à droite et à gauche), nous trouvons que c'est dans ce cas qu'on a la plus basse valeur de l'écart type avec une différence de 0.52.

En ce qui concerne la température moyenne dans la chambre, nous trouvons la valeur la plus élevée dans la position de la cheminée au milieu avec une valeur de 53.06C° et 52.10C°, 51.51C° à droite et à gauche respectivement.

Et **la figures IV.18** montre que la valeur optimale de la vitesse à la sortie dans le cas d'une cheminée positionnée à gauche de la chambre avec une valeur de 0.62 m/s.

IV.9 La conception optimale du séchoir solaire indirect :

Après les résultats extraits par la MPE et après avoir lié les probabilités des facteurs pour la meilleure valeur des **réponses** souhaitées, nous avons trouvé trois formes qui apportaient une amélioration par rapport à la forme réelle du séchoir solaire indirect fabriqué par le laboratoire de (L.E.N.R.E.Z.A). Afin de vérifier l'étendue d'amélioration ; trois réponses

ont été choisies. La première est la vitesse à la sortie puisqu'elle affecte directement la durée du séchage où le deuxième paramètre est l'écart type de température à la chambre de séchage, ce qui conduit à une plus grande homogénéité de la répartition de la température de séchage pour sa valeur minimale. Ainsi que l'augmentation relative de la température moyenne (troisième réponse) dans la chambre de séchage qui affecte positivement l'opération de séchage. Ceci est expliqué par (les tableaux IV.3 et IV.4) suivants :

Tableau IV.3: Facteurs optimaux par rapport aux facteurs de la conception réel

Paramètre de géométrie	Conception réel de laboratoire	Candidate N° 1	Candidate N° 2	Candidate N° 3
La lame d'air (m)	0,085	0.05	0.05	0.05
Hauteur de la cheminée (m)	1.00	0.2	0.3	0.4
Angle d'inclinaison (°)	90	52	52	45
Position de la cheminée	Centre	Centre	Centre	Centre
Forme de la chambre de séchage	Rectangle	Forme coudé 45°	Forme coudé 45	Forme coudé 45°

Tableau IV.4: Réponses optimaux par rapport aux réponses de la conception réel

Réponses / Conceptions	Candidate réel de laboratoire	Candidate N°1	Candidate N°2	Candidate N° 3
Ecart type (facteur d'homogénéité)	2.74	2.37	2.51	2.48
Température moyenne (c°)	51.37	51.81	51.73	52.39
Vitesse sortie (m/s)	0.38	0.660	0.661	0.66

IV.9.1 Simulation des conceptions optimales :

Candidate N°1 :

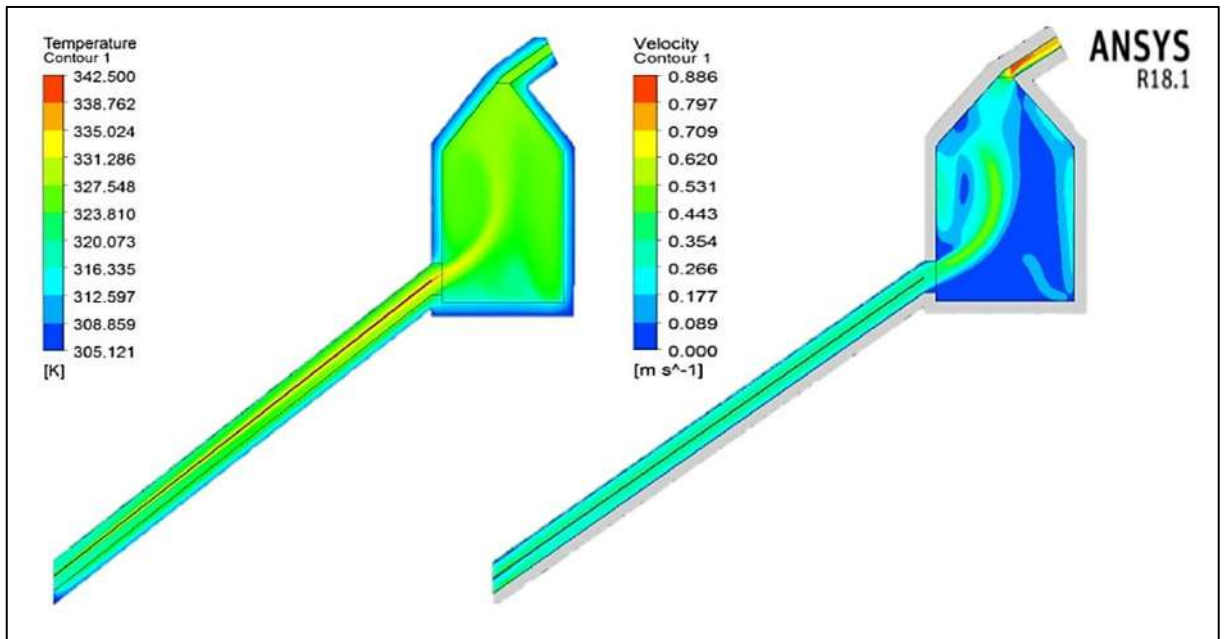


Figure IV.19: Contour de la température et du vitesse de la conception optimale N°1

Candidat N°2 :

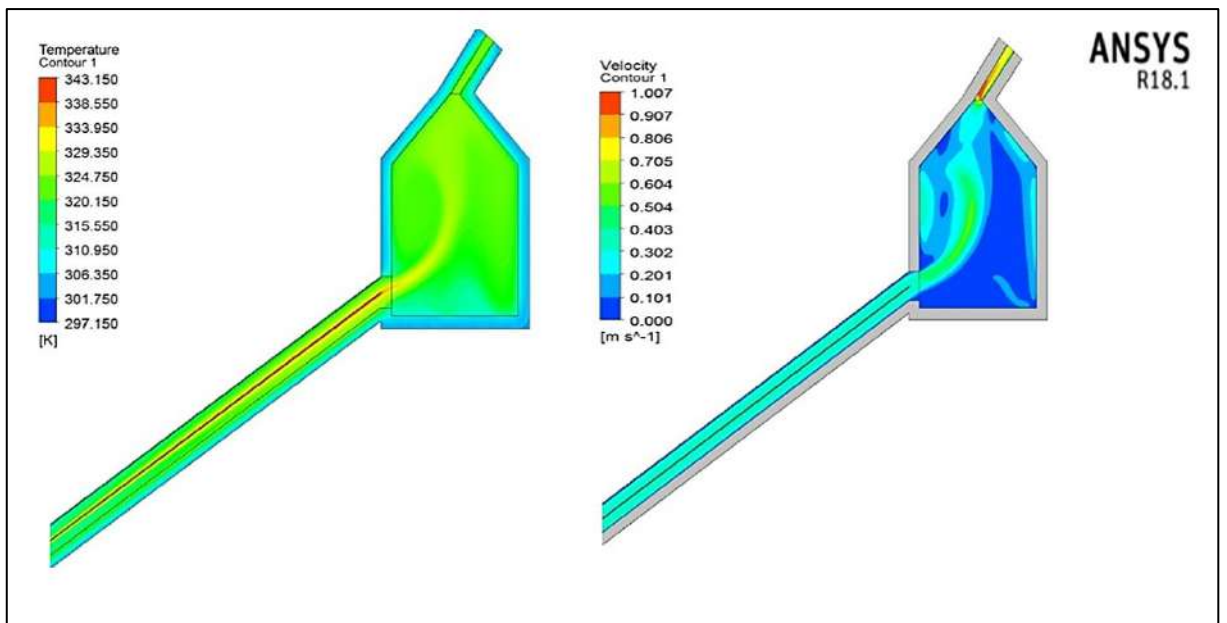


Figure IV.20: Contour de la température et du vitesse de la conception optimale N°2

Candidat N°3 :

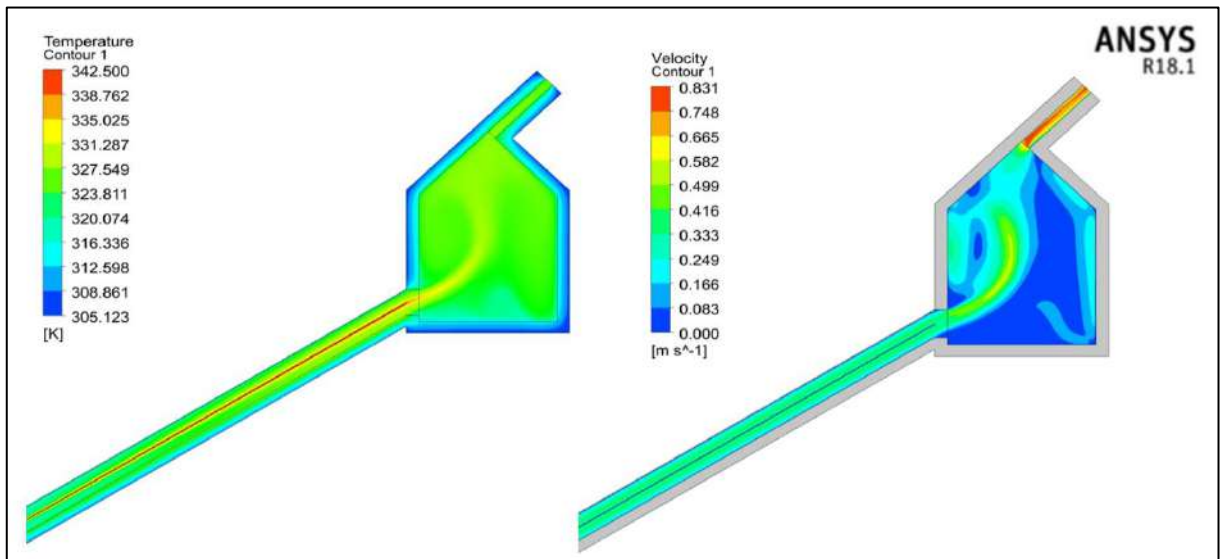


Figure IV.21: contour de la température et du vitesse de la conception optimale N°3

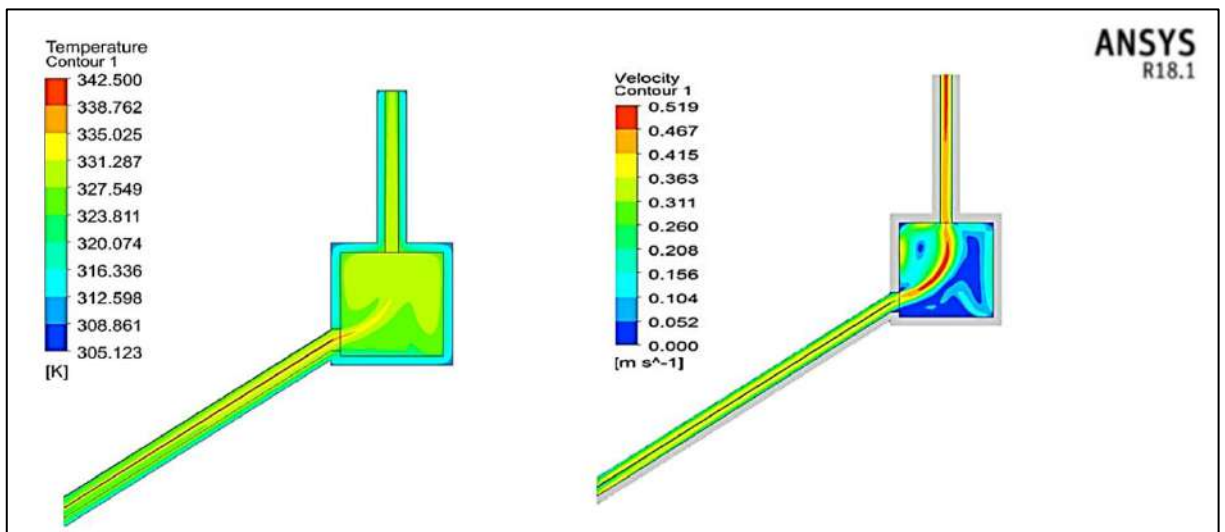


Figure IV.22: Distribution de la température et des vitesses du séchoir a l'état réel

Les (figures IIV.19, IIV.20, IIV.21) représentent les contours de la distribution de la température et la vitesse des conceptions optimales. Dans ces figures il est clairement illustré la différence de distribution et la valeur de la vitesse comparativement avec l'état réel (figure IIV.22) et on remarque que les courbes ont des valeurs proches. Nous notons également que la conception N°3 a une température plus élevée par rapport aux autres conceptions N°1, N°2.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail de ce mémoire vise à améliorer les champs thermiques et dynamiques d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle, notamment l'homogénéité de la distribution de température dans la chambre de séchage, où le produit alimentaire en cours de séchage peut être exposé à de nombreux effets négatifs dus à la distribution non uniforme de la chaleur, ce qui peut aussi affecter négativement la performance thermique du séchoir.

Afin de résoudre cette problématique, nous avons réalisé un processus de couplage entre la méthode des plans d'expérience à l'aide du logiciel **JMP14**, et un modèle numérique bidimensionnel utilisant la méthode des volumes finies à l'aide du logiciel commercial **ANSYS Fluent 18.1**.

Dans l'objectif de valider la simulation CFD nous avons d'abord commencé par des mesures expérimentales sur un séchoir solaire indirect, exploré à vide, réalisé au laboratoire LENREZA à l'université de Ouargla dans le cadre de travaux antérieurs.

Nous avons ensuite abordé l'essentiel de notre travail, qui consiste à étudier les facteurs d'influence sur la distribution des températures dans la chambre de séchage, la vitesse d'air et la plage de température de séchage en utilisant la méthode des plans d'expériences à l'aide du logiciel JMP14. Le plan de surface de réponse a été choisi afin d'étudier les effets des différents facteurs (la hauteur de la cheminée, la lame d'air ou section de passage, l'angle d'inclinaison, la position de la cheminée, et la forme de la chambre de séchage).

La méthode des plans nous a aidé à trouver les paramètres les plus influents sur les réponses. Nous avons conclu après l'analyse que l'influence majeure était trouvée pour la lame d'air de la cheminée, la forme de la chambre et la position de la cheminée. Tandis que la hauteur et l'angle d'inclinaison de la cheminée étaient d'une influence secondaire.

Suite au processus d'optimisation développé sur le code JMP, le résultat final obtenu pour les conditions optimales permettant de maximiser la température moyenne et la vitesse à la sortie de la cheminée est tel que : la lame d'air 0,05m ; la hauteur de la cheminée 0,2 m ; l'angle d'inclinaison de la cheminée 52° avec une cheminée positionnée au centre et une chambre de séchage coudée 45°.

Enfin, lors de la dernière étape de l'étude, nous avons procédé à une simulation numérique du séchoir solaire à l'aide du logiciel ANSYS FLUENT sur la base des conditions

Conclusion générale

optimales, en suite, la conception optimale a été comparée avec la conception originale. Les résultats de simulation du séchoir optimal ont montré une amélioration relative de la vitesse à la sortie qui a atteint 0,66 m/s avec écart type de température de 2.37 et une élévation relative de la température moyenne de séchage de 52.39 °C. Notons ici que les résultats des tests précédemment effectués dans le laboratoire LENREZA pour l'état réel du séchoir, donnaient une vitesse de sortie de 0.38m/s, un écart type de 2,74 et une température moyenne de 51.37°C.

Références :

1. Achoura, M., Modélisation-Simulation du procédé de séchage solaire des feuilles de menthe. 2004, kasdi merbah-ouargla.
2. Norton, T. And D.-W. Sun, Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 2006. **17**(11): p. 600-620.
3. E. Mathioulakis, V.T.K.e.V.G.B., Simulation of Air Movement in a Dryer by Computational Fluid Dynamics: Application for the Drying of Fruits. *Journal of Food engineering*, 1998. **36**: p. 183-200.
4. Mirade, P.S., Prediction of the air velocity field in modern meat dryers using unsteady computational fluid dynamics (CFD) models. *Journal of Food Engineering*, 2003. **60**(1): p. 41-48.
5. A. Labed, N.M., K. Aouès, M. Zellouf et A. Moummi, Etude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle. *Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 (2009) 237 – 248*, 2009. **12**(4): p. 551 – 561.
6. SOUAD, S, effet des parametres operationnels sur les performances d'un capteur solaire plan. 2010, mentouri de constantine.
7. Jayesh.r.lakhani, V.T.P., Tushar.G.Tadha , Mayabhai.B.Kamaliya design and development of solar dryer for fruit chips. May 2013, Gujarat Technological University, Ahmedabad.
8. Benammar Roumaïssa , G.K., Séchage Solaire des Produits Agricoles. 2018, universite kasdi merbah ouargla.
9. Bennamoun, L., Reviewing the experience of solar drying in Algeria with presentation of the different design aspects of solar dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011. **15**(7): p. 3371-3379.
10. Rahman, M., Prospect & future of solar dryer in bangladesh. *International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy 2013*, December 2013.
11. Megha S. Sontakke, P.S.P.S., Solar Drying Technologies. *Journal of Engineering and Science (IRJES)*, April 2015. **4**(4): p. 29-35.
12. Yuan, G., et al., Experimental Investigation of a Solar Dryer System for Drying Carpet. *Energy Procedia*, 2015. **70**: p. 626-633.
13. Fulle, r.j., solar drying - a technology for sustainable agriculture and food production. University of Melbourne, Australia.
14. Pranav C. Phadke, P.V.W., and Vilayatrai M. Kriplani, INDIRECT SOLAR DRYERS. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, MAY 2015. **10**.

15. Ammar, B., Etude expérimentale du séchage des produits agroalimentaires ; comparaison entre deux modes de séchage. 2016 / 2017, Université de Biskra.
16. Mustayen, A.G.M.B., S. Mekhilef, and R. Saidur, Performance study of different solar dryers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. **34**: p. 463-470.
17. Shaymaa Husham Abdulmalek , M.K.A., Hussain H. Al-Kayiem , Ali Ahmed Gitan A comparative analysis on the uniformity enhancement methods of solar thermal drying. *Energy*, 2018. **148**: p. 1103-1115.
18. Abdallah, L.A.-B., Etude Numérique d'une Cheminée Solaire à MCP Intégré Destinée à la Ventilation d'un Séchoir Solaire 2016 /2017, kasdi merbah -ouargla.
19. Misha, S., et al., The CFD Simulation of Tray Dryer Design for Kenaf Core Drying. *Applied Mechanics and Materials*, 2013. **393**: p. 717-722.
20. Amanlou, Y. And A. Zomorodian, Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer. *Journal of Food Engineering*, 2010. **101**(1): p. 8-15.
21. Smolka, J., A.J. Nowak, and D. Rybarz, Improved 3-D temperature uniformity in a laboratory drying oven based on experimentally validated CFD computations. *Journal of Food Engineering*, 2010. **97**(3): p. 373-383.
22. Saadia, O., correction d'une géométrie d'un séchoir solair par le cod fluent. 2009/2010, université de kasdi merbah-ouargla.
23. Amhamed, B., Investigation expérimentale d'un séchoir Solaire indirect en vue d'amélioration de la qualité du produit fini. 2013.
24. Singh Chauhan, P., A. Kumar, and P. Tekasakul, Applications of software in solar drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. **51**: p. 1326-1337.
25. Romero, V.M., et al., Simulation and Validation of Vanilla Drying Process in an Indirect Solar Dryer Prototype Using CFD Fluent Program. *Energy Procedia*, 2014. **57**: p. 1651-1658.
26. Vintilă, M., A.G. Ghiaus, and V. Fătu, Prediction of Air Flow and Temperature Profiles Inside Convective Solar Dryer. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Food Science and Technology*, 2014. **71**(2).
27. Abdeen, A., et al., Solar chimney optimization for enhancing thermal comfort in Egypt: An experimental and numerical study. *Solar Energy*, 2019. **180**: p. 524-536.
28. Sumit Tiwaria, S.A., G.N. Tiwaric, PVT air collector integrated greenhouse dryers. *Renewable and Sustainable Energy*, (2018) **90**: p. 142–159.
29. BADACHE, M., Étude numérique et expérimentale du transfert de chaleur dans un capteur solaire à perforations doté d'un collecteur transparent et opaque. 2013, École de technologie supérieure université du québec.

Résumé :

Dans la présente étude, des mesures expérimentales et une approche combinée entre la simulation numérique (CFD) en 2D et la méthode des plans d'expériences (MPE) a été appliquée dans le but d'optimiser la conception d'un séchoir solaire indirect non ventilé réalisé antérieurement au laboratoire (L.E.N.R.E.Z.A) de l'université de Ouargla. Ces travaux visaient à optimiser la conception de séchoir solaire afin de maximiser la vitesse de l'air à la sortie tout en améliorant la plage de température convenable pour le séchage, ainsi l'homogénéité de distribution du champ thermique dans la chambre de séchage. La méthode des surfaces de réponse (MSR) a été utilisée pour analyser les résultats et optimiser les paramètres suivants : (a) longueur de cheminée avec la plage entre 30 à 120 cm, (b) angle d'inclinaison entre 30° à 90°, (c) largeur de la lame d'air entre 5 à 15 cm, (d) formes de la chambre (rectangulaire ou coudée avec 45°) et (e) positions de la cheminée (centré, gauche et droite).

Les résultats de l'optimisation révèlent que la vitesse maximale de l'air à la sortie et la température de séchage optimale et l'homogénéité acceptable dans la chambre sont obtenues avec une cheminée ordinaire de 30 cm de hauteur, 5 cm de lame d'air, un angle d'inclinaison de 52° et une forme de chambre coudée à 45° avec une cheminée positionnée au centre.

Mots Clés : séchoir solaire, plans d'expérience, surface de réponse, uniformité thermique, simulation CFD.

المخلص:

يعتبر هذا العمل امتدادا لدراسات سابقة؛ اعتمدت الدراسة فيه على المحاكاة العددية CFD بواسطة برنامج ANSYS fluent 18.1 مقرونة بطريقة المخططات التجريبية MPE المحققة بواسطة برنامج JMP14 .

وقد عُني هذا البحث بدراسة الحقل الحراري والديناميكي لمجفف شمسي غير مباشر على مستوى مخبر (LENREZA) بجامعة ورقلة ، بهدف تحسين توزيع الحرارة داخل غرفة التجفيف وكذا تحسين كفاءته من خلال التحسين في سرعة استخراج الهواء ودرجة الحرارة المثلى للتجفيف.

اخترنا طريقة المخططات التجريبية MPE ومنهجية سطح الاستجابة MSR لدراسة العوامل المؤثرة التالية:

(أ): طول المدخنة في المجال (30سم-120سم) ، (ب): زاوية انحناء المدخنة في المجال (30° - 90°) ، (ج): فتحة الهواء على مستوى المدخنة في المجال (5سم – 15سم) ، (د): شكل غرفة التجفيف (مكعب أو مضيق بـ 45°) ، (هـ): موقع المدخنة (في الوسط، على اليمين، على اليسار).

بعد اجراء المحاكاة العددية للتجارب التي أسفرت عنها المخططات التجريبية وجدنا تحسنا ملحوظا للاستجابات (réponses) المدروسة مقارنة مع المجفف قبل التحسين. حيث كانت أبعاد المجفف بعد التحسين كالآتي:

ارتفاع المدخنة 30 cm بفتحة هواء عرضها 05 cm وبزاوية ميلان 52 cm مما أثر إيجابا على سرعة الإستخراج وزيادة قيمتها الى 0.66 m/s وبشكل غرفة تجفيف مُضَيِّقَة في الأعلى وموقع المدخنة في الوسط مما حسّن من تجانس توزيع الحرارة.

الكلمات المفتاحية: المجفف الشمسي، مخططات التجارب، سطح الاستجابة، التجانس الحراري، المحاكاة CFD