



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA



Faculté Des : Sciences Appliqués  
Département : Génie Mécanique

**Mémoire**

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences Appliqués

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Énergique

Présenté par :

Mohammed ZELACI

Riad HERR

*Thème :*

Optimisation et simulation numérique d'un nouveau  
de refroidissement par un échangeur de chaleur air-  
sol couplée avec une tour du vent sous un climat aride

Soutenu Publiquement Le : 14/06/2022

Devant le jury :

M. Abdelghan BOUBEKRI	Professeur	Président	UKM Ouargla
M. Hocine BELAHYA	MC (B)	Examineur	UKM Ouargla
Mme Nadia. SAIFI	MC(A)	Promoteur	UKM Ouargla
M. Djamel BELLATRACH	MA(B)	Co-Promoteur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2021 /2022

## *Remerciements*

Dieu soit loué qui nous a guidés vers cela, merci à tous ceux qui nous ont donné l'opportunité de le faire un travail.

Je suis très reconnaissant à mon superviseur Mademoiselle. **Nadia SAIFI**, maître de conférences à l'université d'Ouargla, pour son soutien efficace et Un cadre utile pour mon étude de recherche.

Je tiens à remercier vivement le Monsieur **Djamel BELLATRACH** , maître assistant à l'université d'Ouargla, pour ses précieux conseils et continue de l'assister dans la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail, et en particulier :

Monsieur **Abdelghani BOUBEKRI**, professeur à l'université de Ouargla qui ma fait l'honneur de présider le jury.

Monsieur **Hocine BELAHYA**, maître de conférences à l'université d'Ouargla pour avoir accepté d'être examinateur de ce travail.

Je remercie également toutes nos familles qui nous ont aidés ou soutenus durant notre travail, Amis et collègues.

*Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chères parents << ma mère et mon père >> qui  
m'ont bien élevés, aidés Soutenus et encouragés durant toutes  
ces années d'étude.*

*A mes très chers frères pour Leurs précieuses aides et leurs  
merveilleux conseils.*

*A toute la famille <<**HORR**>> chacun par son nom.*

*A mes amis durant mes années d'étude qui m'ont beaucoup  
encouragé.*

*A tous mes professeurs que j'ai connus durant mes études.*

*A tous ceux que j'aime et que je leur souhaite la réussite pour  
toute la vie.*

**RIAD HORR**

*Dédicace*

*A l'âme de mon cher père (que Dieu lui fasse miséricorde).*

*Et aux personnes les plus chères et les plus proches de mon cœur, ma chère mère, qui m'a aidé et m'a aidé après Dieu*

*Tout-Puissant.*

*À tous mes chers frères qui m'ont soutenu dans mon parcours universitaire,*

*À mes professeurs et à tous ceux qui m'ont comblé d'amour, d'appréciation, de conseils et de direction.*

*Je dédie cet humble travail à tout le monde, demandant à Dieu Tout-Puissant de nous en faire profiter et de nous accorder le succès.*

**MOHAMMED ZELACI**

## *TABLE DES MATIERES*

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>I</b>
<b>DEDICACE</b> .....	<b>II</b>
<b>DEDICACE</b> .....	<b>III</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>IV</b>
<b>NOMENCLATURE</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>X</b>
Introduction generale .....	1
<b>Chapitre I : generalites sur l'energie geothermique et</b> .....	<b>3</b>
<b>Les systemes passif</b> .....	<b>3</b>
Introduction.....	4
1. Systeme de refroidissement passif .....	4
2. Énergie geothermique .....	6
2.1 classification des geothermiques :.....	7
2.1.1 geothermie a haute energie ( $T^{\circ}c >150^{\circ}c$ ).....	7
2.1.2 geothermie moyenne energie .....	8
2.1.3 geothermie basse energie ( $30^{\circ}C < T^{\circ}C < 90^{\circ}C$ ).....	9
2.1.4 geothermie tres basse energie .....	9
2.2 distribution de temperature a la zone geothermie tres basse .....	9
2.3 avantages et les inconvenients de la geothermie.....	10
2.3.1 avantages.. .....	10
2.3.2 inconvenients .....	10
2.4 procedes de la geothermie .....	11
2.4.1 pompe a chaleur geothermique .....	11
2.4.2 puits canadien (provençal).....	11
3. Échangeur air-sol .....	11
3.1. Modes de fonctionnement d'un echangeur air-sol.....	12
3.2. Differents types d'installation des echangeurs air/sol.....	13
3.2.1. Échangeur horizontal.....	13
3.2.2. Échangeurs air/sol verticaux.....	13
3.2.3. Échangeurs air/sol speciaux.....	14
3.3 caracteristiques techniques d'un echangeur air/ sol .....	15
3.4. Differents types de tuyaux .....	16

4. Tour à vent (wind catcher) .....	19
4.1 concept de tour a vent (tour a vent).....	19
4.2 principe de fonctionnement de la tour a vent.....	20
4.3. Types de tour a vent .....	21
4.3.1. Tour a vent traditionnel .....	21
4.3.2. Tour a vent modernes .....	23
4.3. Facteurs influençant les performances de ventilation de la tour a vent.....	24
4.4.1 section de tour a vent.....	24
4.4.2 hauteur de tour a vent .....	25
4.4.3 conception de toit de la tour a vent .....	26
4.4.4 cloisons et ouvertures interieures .....	27
4.5 avantages et les inconvenients d'un tour a vent .....	29
4.5.1 avantages.. .....	29
4.5.2 inconvenients .....	29
5 conclusion.....	30

## **Chapitre II : Modelisations et optimisation des systemes passifs**

Introduction.....	32
1. Methodologie .....	33
2. Simulation numerique de tour a vent .....	34
2.1 description du systeme .....	34
2.2 hypotheses considerees.....	35
2.3 les équations regissantes .....	36
2.3.1 équation de continuite .....	36
2.3.2 équation de conservation de quantite de mouvement .....	36
2.3.3 équation de l'energie cinetique turbulente .....	36
2.3.4 équation du taux de dissipation.....	37
2.4 les conditions aux limites .....	37
2.5 choix du maillage .....	38
3. Plan de taguchi (ou plan de taguchi orthogonal) .....	40
3.1 mise en application de la methode taguchi .....	40
3.1.1 facteurs.....	41
3.1.2 choix du plan d'experience .....	41
3.1.3 procedure de la methode taguchi dans mintab.....	41
3.2 organigramme de la methode de taguchi .....	44
4. Etude experimental .....	45

4.1 localisation géographique de la zone d'étude .....	45
4.1.1 la direction du vent.....	45
4.2 tour de vent .....	46
4.3 appareillages de mesures .....	47
4.3.1 mesure de la vitesse de l'air.....	47
5. Simulation CFD 3D d'un échangeur air-sol couplée avec tour du vent .....	48
5.1. Le modèle physique.....	48
5.2. Hypothèses considérées .....	49
5.3. Les équations régissantes.....	50
5.3.1 équation de conservation de l'énergie .....	50
5.3.2 l'approximation de boussinesq .....	50
5.4. Les conditions aux limites .....	51
5.5. Maillage de modèle physique .....	51
5.6. Organigramme de calcul.....	52
6. Conclusion... ..	53

### **Chapitre III : Résultats et discussions**

Introduction.....	55
1. Simulation numérique de la tour à vent .....	55
1.1. Convergence des solutions.....	55
1.2. Validation.....	56
2. Plan d'expérience – méthode de taguchi .....	59
2.1. Profil de vitesse pour les neuf essais .....	59
2.2. Les facteurs du modèle .....	60
3. Les résultats expérimentaux de la tour à vent.....	61
3.1. Variation des vitesses .....	61
4. Simulation numérique d'une tour à vent couplée avec un échangeur air-sol .....	62
4.1. Profils de vitesse dans différents endroits de la tour à vent.....	62
4.2. Profils de température de l'échangeur air/sol .....	63
4.3. Champ thermique .....	65
4.4. Champ dynamique.....	66
4.5. Efficacité de l'échangeur .....	68
5. Conclusion... ..	69
Conclusion générale.....	70

## ***NOMENCLATURE***

g	Accélération de la pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
C <sub>p</sub>	Chaleur massique	[J/kg. K]
β	Coefficient de dilatation	[1/K]
K	Conductivité thermique	[W/m. °C]
α	Diffusivité thermique	[m <sup>2</sup> /s]
K	Energie cinétique turbulente	[kg. m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
H	Hauteur	[m]
D	Largeur	[m]
A	Longueur	[m]
ρ	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
p <sub>r</sub>	Nombre de Prandtl	
P	Pression	[Pa]
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique	
T	Température	[K]
T	Temps	[s]
ν <sub>t</sub>	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> /s]
μ	Viscosité dynamique	[kg/m.s]
μ <sub>t</sub>	Viscosité dynamique turbulente du fluide	[kg/m.s]
V	Vitesse d'écoulement	[m/s]
V <sub>s</sub>	Vitesse à la sortie	[m/s]
V <sub>e</sub>	Vitesse à l'entrée	[m/s]

## ***LISTE DES ABREVIATIONS***

CFD	Dynamique des fluides computationnels
PVC	Polychlorure de vinyle
V.P.R.S	Valorisation et Promotion des Ressources Sahariennes



## ***LISTE DES FIGURES***

FIGURE I.1 : differentes techniques de refroidissement passif dans les batiments.....	5
FIGURE .I.2 : vue schematique du trajet de l'air a travers une tour a vent et un echangeur de chaleur air/sol .....	6
FIGURE .I.3 : geothermie a haute energie.....	8
FIGURE .I.4 : geothermie moyenne energie.....	8
FIGURE I.5 : geothermie tres basse energie. ....	9
FIGURE. I.6 : variation de la temperature en fonction de profondeur et les saisons. ....	10
FIGURE. I.7 : geometrie de l'echangeur air-sol modelise.....	12
FIGURE .I.8 : échangeur air -sol horizontal. ....	13
FIGURE. I.9 : échangeur air /sol verticaux.....	14
FIGURE I.10 : conceptions d'echangeurs de chaleur au sol. ....	14
FIGURE I.11 : temperature theorique de l'air suivant le materiau de tube. ....	18
FIGURE I.12 : differents tours a vent traditionnels au moyen-orient .....	20
FIGURE I.13 : principe de fonctionnement de la tour a vent pendant la journee et la nuit. ....	21
FIGURE I.14 : differents composants de tour a vent traditionnel. ....	22
FIGURE I.15 : differents types de tours a vent traditionnels .....	23
FIGURE I.16 : tour a vent dans les batiments contemporains .....	24
FIGURE I.17 : schema d'un tour a vent avec des configurations de toit plat, incline et incurve. ....	27
FIGURE I.18 : differentes sections transversales et pales internes (cloisons) dans les tours a vent traditionnels.....	28
FIGURE I.19 : vue de dessus des modeles d'ecoulement autour et a l'interieur de tour a vent a deux cotes a differents angles du vent (a) .....	29
FIGURE II.1 : methodologie de travail.....	34
FIGURE II.2 : tour a vent.....	35
FIGURE II.3 : frontiere de la tour du vent.....	37
FIGURE II.4 : la geometrie du systeme et le maillage choisir dans cette etude. ....	39
FIGURE II.5 : test de maillage.....	39
FIGURE II.6 : les 9 formes geometriques de tour a vent.....	43
FIGURE II.7 : organigramme de la methode de taguchi. ....	44
FIGURE II.8 : la direction de la vitesse du vent a ouargla. ....	46
FIGURE II.9 : tour a vent.....	47
FIGURE II.10 : chauvin arnoux c.a 1051. ....	48
FIGURE II.11: Le modele physique de l'echangeur air-sol couplee avec tour du vent.....	49

FIGURE II.12 : maillage de modele physique. ....	52
FIGURE II.13 : organigramme de calcul. ....	52
FIGURE III.1 : évolution de residu. ....	55
FIGURE III.2 : dimensions geometriques d'un la chambre avec tour a vent. ....	56
FIGURE III.3: comparaison de la variation de vitesse en fonction de largeur dans differents endroits. ....	57
FIGURE III.4 : la variation de la vitesse en fonction de la position a la sortie de la tour a vent. ....	59
FIGURE III.5 : effets de facteurs pour rapport signal / bruit. ....	60
FIGURE III.6 : variation de la vitesse de l'air a l'entree et a la sortie de la tour en fonction du temps (de 15 a 17 /05/2022). ....	61
FIGURE III.7 : les differents endroits dans le systeme. ....	62
FIGURE III.8: profils de vitesse dans la tour du vent. ....	63
FIGURE III.9 : variation de la temperature de l'air a l'interieur du tube en periode estivale. .	64
FIGURE III.10 : variation de la temperature de l'air a l'interieur du tube en periode hivernale. ....	64
FIGURE III.11 : champ thermique au mois de juin.....	65
FIGURE III.12: champ thermique au mois d'octobre. ....	66
FIGURE III.13 : champ dynamique au mois de juin. ....	67
FIGURE III.14 : champ dynamique au mois d'octobre. ....	67

## ***LISTE DES TABLEAUX***

TABLEAU I.1 : utilisations de la geothermie.....	7
TABLEAU I.2 : caracteristiques techniques d'un echangeur air- sol. ....	15
TABLEAU I.3 : types de tuyaux. ....	17
TABLEAU II.1 : les conditions aux limites de tour a vent.....	38
TABLEAU II.2 : test d'independance du maillage. ....	38
TABLEAU II.3 : niveaux des facteurs.....	41
TABLEAU II.4 : dimensions geometriques de 9 essai. ....	42
TABLEAU II.5 : les dimensions optimales de tour a vent. ....	43
TABLEAU II.6 : les caracteristiques climatiques a ouargla 2019. ....	45
TABLEAU II.7 : proprietes thermo physiques du sol du site. ....	45
TABLEAU II.8 : les proprietes thermo-physiques de l'air. ....	50
TABLEAU II.9 : les conditions aux limites. ....	51
TABLEAU III.1 : parametres thermo physiques de l'air. ....	56
TABLEAU III.2 : ecart entre les resultats d'etude presente et les resultats numeriques experimentaux par f.z. sierra-espinosa. ....	58
TABLEAU III.3 : les facteurs optimaux de tour a vent.....	61
TABLEAU III.4 : efficacite du systeme en periode estivale. ....	68
TABLEAU III.5 : efficacite du systeme en periode hivernale. ....	68

## ***Introduction générale***

Le sud de l'Algérie est classé comme une zone hyper aride et désertique qui se caractérise par une longue période d'inconfort. Pour pallier cet inconfort thermique pendant la saison estivale, les systèmes de ventilation et de climatisation sont largement utilisés, ce qui entraîne une consommation d'énergie électrique de 40% dans le secteur du bâtiment [1]. Ce pourcentage augmente aussi en raison de l'urbanisation et de la croissance démographique. L'utilisation de l'énergie de cette manière contribue à augmenter les émissions de gaz à effet de serre et la consommation énergétique. Les émissions de CO<sub>2</sub> proviennent principalement de la combustion des combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon).

Le recours à des ressources locales, naturelles et renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie géothermique et la ventilation naturelle semblent être indispensables. Il existe plusieurs techniques et systèmes de rafraîchissement comme l'échangeur de chaleur air sol, la cheminée solaire, la tour à vent, les toitures et les façades végétalisées...etc.

La ventilation naturelle permet de réduire la consommation d'énergie et les polluants environnementaux indésirables et crée un confort thermique acceptable. La tour à vent ou le capteur du vent est une conception traditionnelle qui est utilisée depuis des siècles pour fournir aux bâtiments une ventilation naturelle sous le climat chaud et sec.

Le système d'échangeur de chaleur air-sol, l'une des techniques géothermiques les plus prometteuses, il est principalement utilisé pour préchauffer ou pré refroidir l'air frais ambiant. L'air est introduit dans les bâtiments pour réduire les charges de chauffage et de climatisation.

L'objectif du présent travail est d'évaluer un système d'un échangeur de chaleur air-sol couplé avec une tour à vent, une analyse d'influence des différents paramètres sur la performance de ce système a été réalisé, cela permet de dimensionner un modèle physique propre aux conditions climatiques de la ville d'Ouargla.

Cette mémoire est divisée en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre présente un aperçu de l'énergie géothermique, qui comprend ses types et son utilisation, ainsi que ses avantages et ses inconvénients. Nous avons également présenté le système passif hybride qui se compose des deux systèmes. Le premier système est

l'échangeur de chaleur air-sol, qu'il est considéré comme l'un des systèmes de refroidissement des bâtiments. Le deuxième système est la tour à vent, un élément traditionnel assure une ventilation naturelle et un refroidissement passif dans les régions chaudes et arides.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la méthodologie utilisée dans notre travail. Il traite les équations régissant, afin de les simuler par le code de calcul Fluent. Ce chapitre présente aussi les différentes configurations des modèles étudiés. La méthode Taguchi a été utilisée comme l'une des méthodes de plan d'expérience pour déterminer les dimensions optimales du modèle physique propre aux conditions climatiques de la ville d'Ouargla. Puis une étude expérimentale a été présentée pour tester la variation de la vitesse de l'air à l'entrée et à la sortie de la tour à vent. En donnant une description du modèle physique de l'échangeur de chaleur air-sol couplé avec une tour à vent.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats numériques obtenus à partir de la simulation numérique tridimensionnelle. D'abord, une validation du modèle de la tour à vent est réalisée à partir de la confrontation de nos résultats de simulation avec les essais expérimentaux de la littérature. Ensuite, une analyse d'influence des différents paramètres (longueur, largeur et la hauteur et la vitesse du vent) sur la performance de tour à vent. On a utilisé la méthode Taguchi pour déterminer les valeurs optimales de ces paramètres.

. En outre, on a analysé les résultats expérimentaux de la vitesse de l'air à la sortie de la tour à vent. On a exposé les résultats obtenus après avoir réalisé une simulation numérique de l'échangeur air-sol couplé à la tour éolienne pendant une année.

On achève ce manuscrit par une conclusion générale.

**Chapitre I : Généralités sur  
l'énergie géothermique et  
les systèmes passifs**

### Introduction

Les bâtiments dans les régions arides et semi-arides connaissent un accroissement exponentiel de la consommation d'énergie, surtout pendant la période estivale [1], Par conséquent, le recours aux énergies renouvelables est devenu très important, celles-ci sont respectueuses de l'environnement et inépuisables. Ce chapitre traite les généralités sur le refroidissement passif, nous avons abordé le système de tour à vent qui permet de maintenir le refroidissement et la ventilation naturels dans les bâtiments grâce au flux d'air entraîné par le vent ainsi qu'à la différence de température. Nous avons rappelé quelques notions sur l'énergie géothermie et leurs domaines d'utilisation. Parmi les systèmes qui utilisent l'énergie géothermique, nous avons défini et décrit un système d'échangeur de chaleur air-sol.

### 1. Système de Refroidissement passif

Le refroidissement passif peut être considéré comme une stratégie viable et appropriée pour le concept du bâtiment durable. Il contribue à réduire la consommation d'énergie et les gaz à effet de serre [2].

Les expériences précédentes (maisons traditionnelles) ont montré que le refroidissement passif offre un excellent confort thermique et une excellente qualité de l'air intérieur, ainsi qu'une très faible consommation d'énergie [3]. La figure (I.1) montre les différentes techniques de refroidissement passif dans les bâtiments. Cette classification est déterminée par les éléments suivants :

- Les techniques de modulation thermique concernent la capacité de stockage thermique de la structure du bâtiment.
- Les techniques de contrôle solaire et thermique traitent de la réduction des gains de chaleur du bâtiment de plusieurs manières telles que la végétation, l'isolation.
- Les puits à plus basse température telle que le sol, l'air ambiant et l'eau sont utilisés dans les techniques de dissipation thermique afin d'évacuer la chaleur excédentaire des bâtiments.

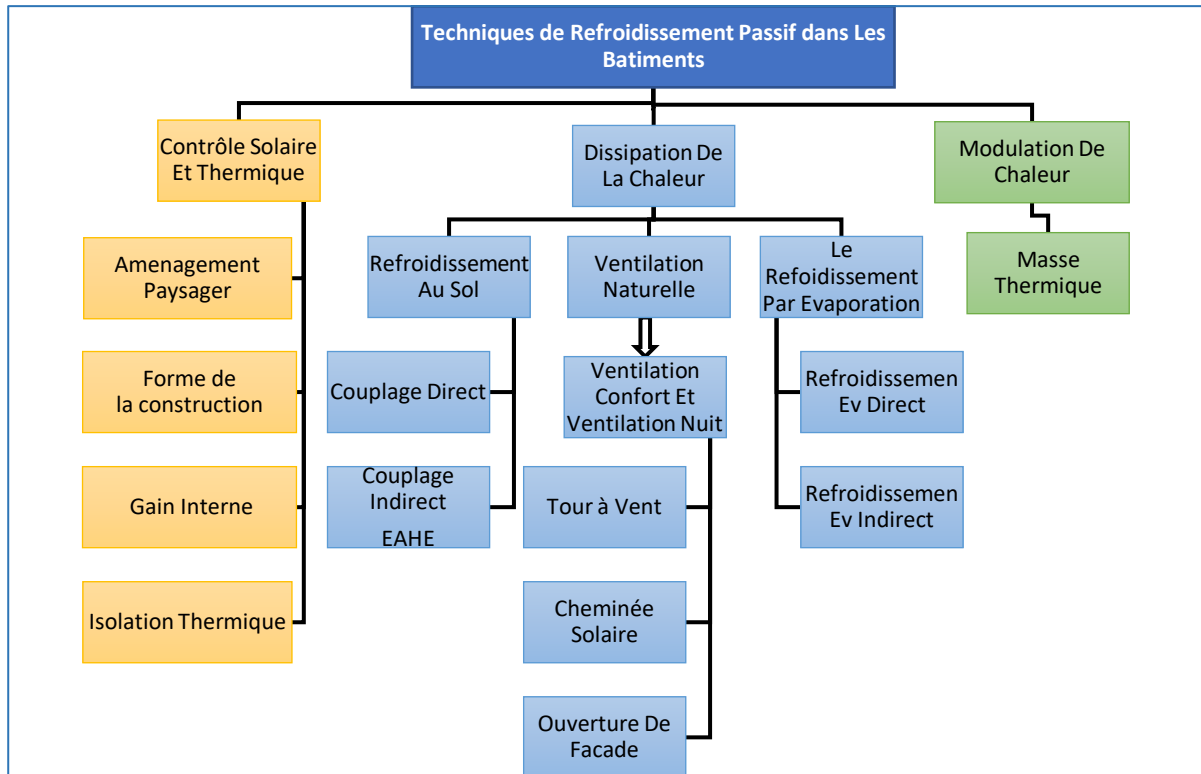


Figure I.1 : Différentes techniques de refroidissement passif dans les bâtiments.[2],[3],[4],[5]

Pour configurer le système hybride de refroidissement du bâtiment, nous utilisons :

- Énergie géothermique (Géothermie très basse énergie)
- Système d'échangeur de chaleur air-sol
- Système de tour à vent.

Comme illustré sur la figure (I.2.), l'air ambiant chaud se déplace dans la tour à vent, puis l'air passe à travers les tubes, qui ils sont placés à une certaine profondeur où la température du sol reste presque constante tout au long de l'année. La chaleur est libérée ou absorbée par les flux d'air qui traversent les parois des tubes par convection et des parois des tubes vers le sol environnant par conduction. En conséquence, l'humidité relative de l'air augmente tandis que sa température diminue du point A au point B [6].



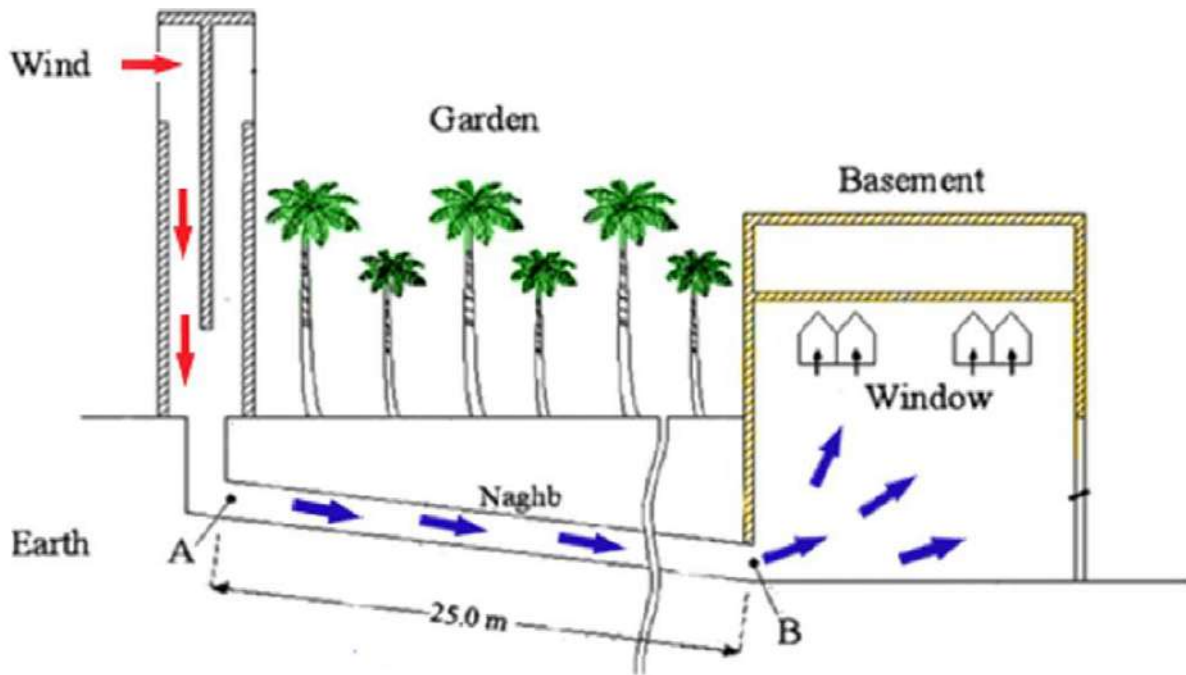


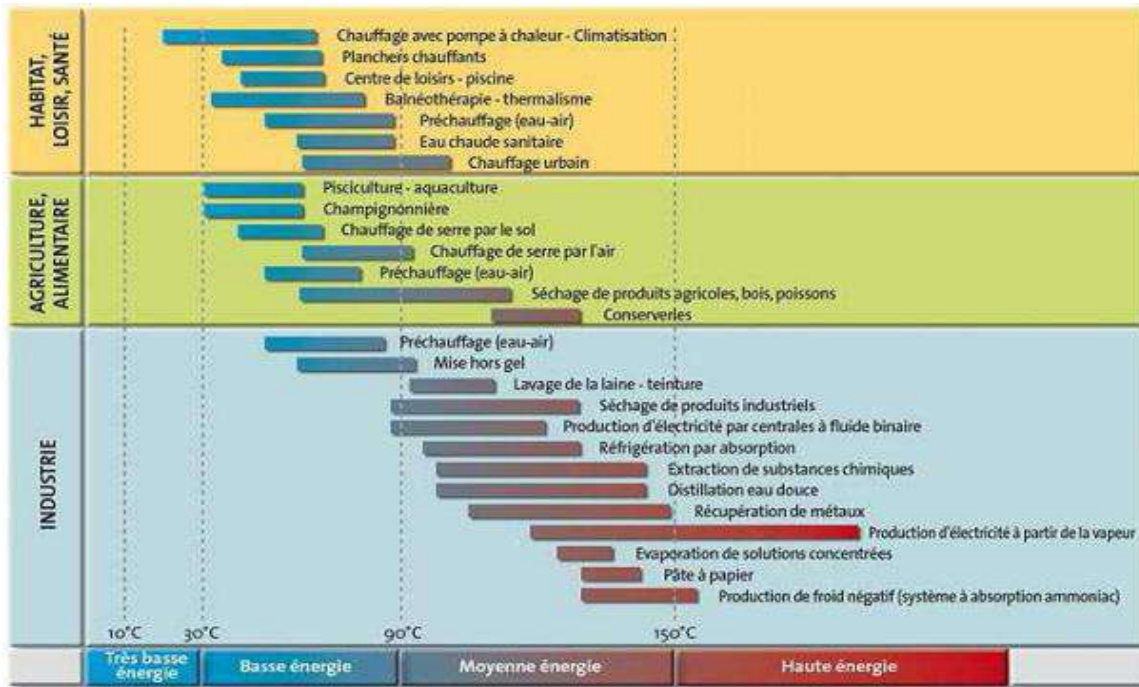
Figure .I.2 : Vue schématique du trajet de l'air à travers une tour à vent et un échangeur de chaleur air/soil. [6]

## 2. Énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (terre) et thermie (chaleur) est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes de la terre, et la technologie qui vise à exploiter. Par extension, la géothermie désigne également l'énergie géothermique résultant de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. Pour capter l'énergie géothermique, un fluide circule au plus profond de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe phréatique captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche imperméable. Dans les deux cas le fluide s'échauffe et monte pour se charger de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou partiellement converties en électricité. [7]

Les différents types et l'usage des énergies géothermiques sont présentés sur le tableau (I.1.) suivant :

Tableau I.1 : Utilisations de la géothermie. [8]



## 2.1 Classification des géothermiques :

L'exploitation de la géothermie dépend du type de gisement et du fluide géothermique existant, ainsi, il se distingue quatre classifications de la géothermie :

### 2.1.1 Géothermie à haute énergie ( $T^{\circ}\text{C} > 150^{\circ}\text{C}$ ) :

La géothermie haute énergie, exploite les gisements de vapeur sèche ou humide (mélange eau et vapeur). Ces gisements se caractérisent par des températures supérieures à  $150^{\circ}\text{C}$ . Les réservoirs généralement localisés au-delà de 1500 mètres de profondeur, On rencontre cette géothermie haute énergie dans les régions volcaniques (volcans) et Sismiques (frontières de plaques) ou le gradient géothermique est particulièrement élevé. La géothermie haute énergie est destinée principalement à la production d'électricité. La vapeur, qui est puisée dans le réservoir géothermique, est déchargée dans une turbine, reliée à un alternateur pour la production d'électricité. La vapeur sèche est directement utilisée alors que la vapeur humide qui est plus fréquente nécessite l'utilisation d'un séparateur. [9]

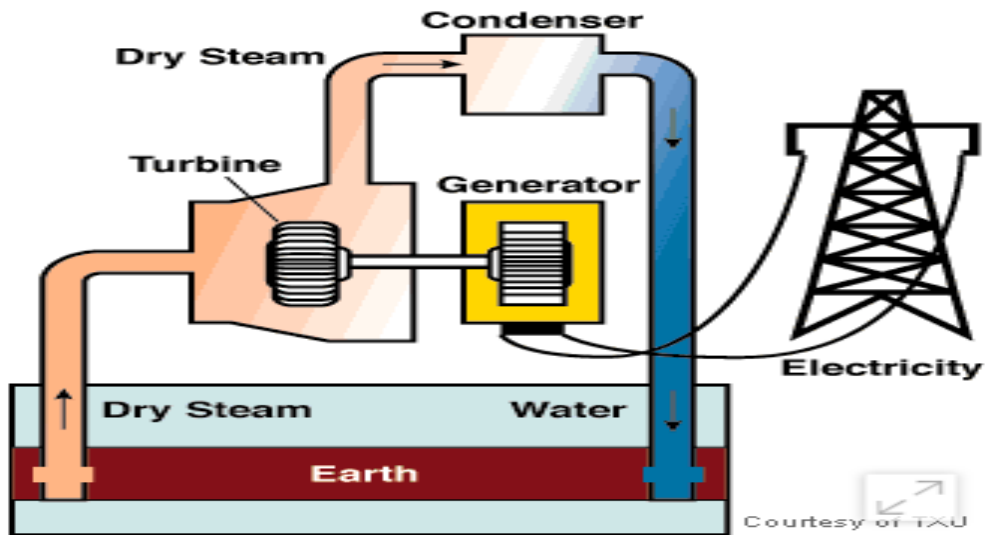


Figure .I.3 : Géothermie à haute énergie. [10]

### 2.1.2 Géothermie moyenne énergie :

La géothermie de moyenne énergie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 90 et 150 °C. Elle se retrouve dans les zones propices à la géothermie haute énergie, mais à une profondeur inférieure à 1000 mètres. Elle se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs s'allant de 2000 à 4000 mètres. Pour produire de l'électricité nécessite une technologie qui nécessite l'utilisation d'un fluide intermédiaire [11].

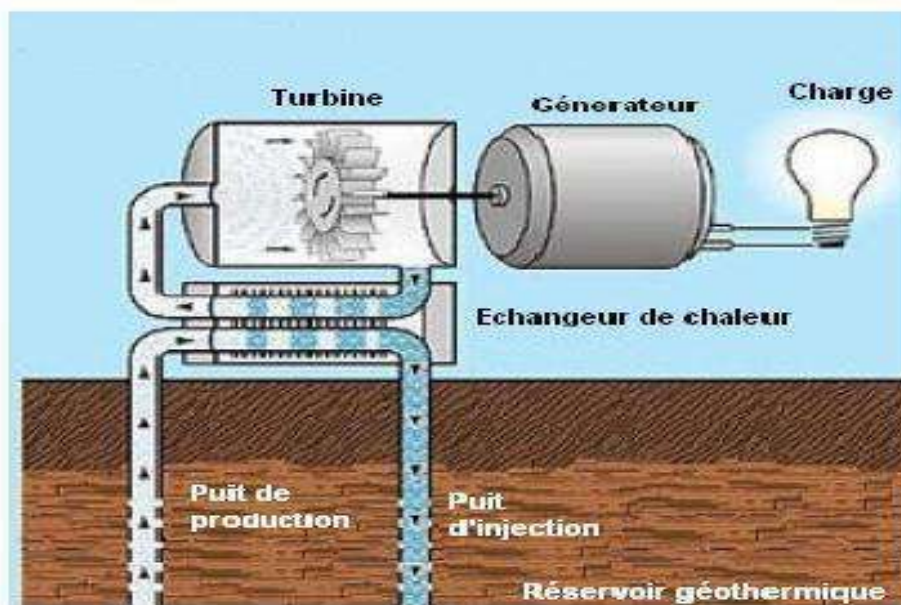


Figure .I.4 : Géothermie moyenne énergie. [12]

### 2.1.3 Géothermie basse énergie ( $30^{\circ}\text{C} < T^{\circ}\text{C} < 90^{\circ}\text{C}$ ) :

Elle consiste en l'utilisation de la chaleur, par extraction d'eau chaude contenue dans les aquifères profonds (1500-2000 m) bassinsse diamantaires et d'utiliser cette eau directement (via un échangeur de chaleur) pour le chauffage [11].

### 2.1.4 Géothermie très basse énergie :

La géothermie très basse énergie est une géothermie de surface dont la température est comprise entre 10 et 30 °C. Dans ce cas, la chaleur ne provient pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain joint un rôle d'inertie thermique. Cette technologie est appliquée à [9] :

- La climatisation.
- Le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique.

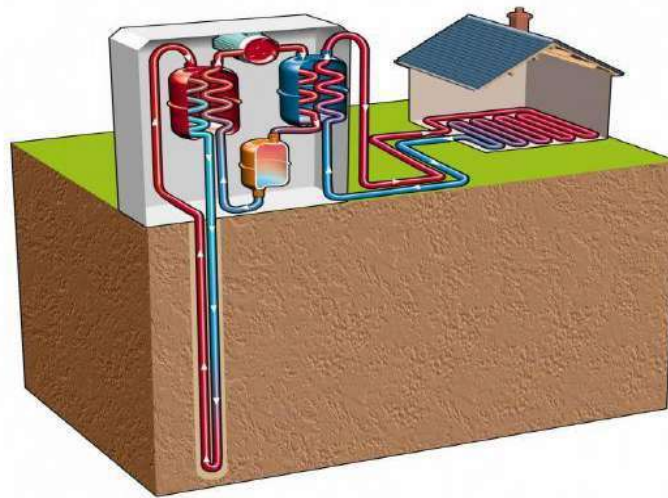


Figure I.5 : Géothermie très basse énergie. [13]

### 2.2 Distribution de température a la zone géothermie très basse :

La température de l'air extérieur dans la plupart des pays européens peut varier de -20°C à +40°C tout au long de l'année, tandis que la température du sol à quelques mètres de profondeur reste plus stable, en moyenne entre 5 et 15°C. [14]

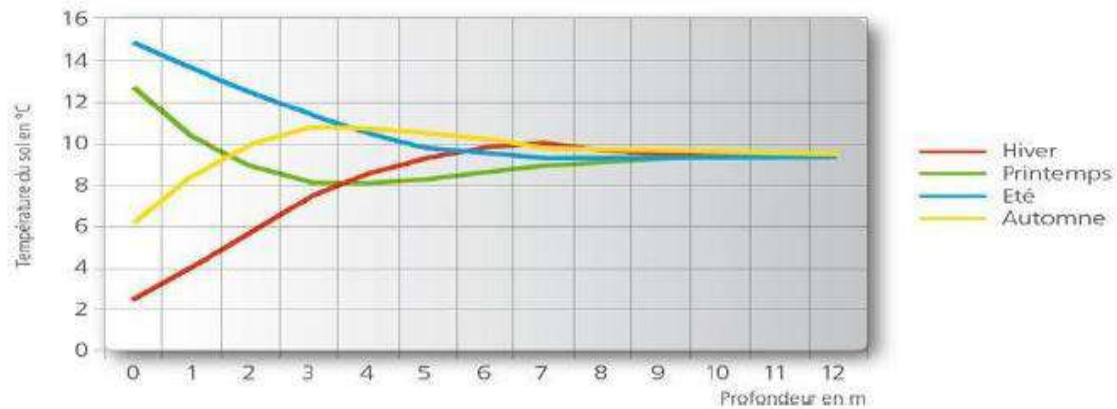


Figure. I.6 : Variation de la température en fonction de profondeur et les saisons. [14]

### 2.3 Avantages et les inconvénients de la géothermie :

Les avantages et les inconvénients sont les suivants :

#### 2.3.1 Avantages :

- La géothermie de profondeur ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).
- C'est une source d'énergie quasi-continue.
- Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne) et disponible dans tous les sous-sols de la planète.
- La géothermie est une énergie renouvelable et propre (pas de déchets à stocker, très peu d'émissions de CO<sub>2</sub>).
- Ressource énergétique locales qui ne nécessite pas de transport ; Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement.
- Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelables.
- Énergie de base, généralement, indépendant des conditions climatiques [15].

#### 2.3.2 Inconvénients :

- Coûts d'investissement et de maintenance très élevés.
- L'utilisation de la géothermie reste particulière, proche notamment des zones volcaniques.
- Risque de glissement de terrain.
- Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques [15].

## **2.4 Procédés de la géothermie :**

### **2.4.1 Pompe à chaleur géothermique :**

La pompe à chaleur (parfois appelée PAC) est un appareil qui utilise un dispositif thermodynamique, qui permet de transférer de la chaleur provenant d'un milieu froid vers un lieu à chauffer. Autrement dit, c'est le contraire d'un réfrigérateur. Il s'agit d'un système de chauffage écologique permettant de réchauffer un habitat et dans certaines situations de chauffer l'eau sanitaire ou une piscine. Le principe de la pompe à chaleur est d'extraire de l'énergie à l'extérieur d'un logement pour le diriger vers l'intérieur en utilisant un radiateur ou tous autres dispositifs chauffants. [16]

### **2.4.2 Puits canadien (provençal) :**

Le puits provençal, ou échangeur air-sol, est un échangeur géothermique à très basse énergie utilisée pour rafraîchir l'air ventilé dans un bâtiment en été. Il est appelé puits canadien lorsqu'il vise au préchauffage hivernal de l'air ventilé.

Il est un mode de rafraîchissement estival et de préchauffage hivernal notamment utilisé dans l'habitat passif [17].

## **3. Échangeur Air-Sol :**

L'échangeur air-sol est un système de refroidissement du bâtiment économe en énergie qui exploite l'inertie thermique du sol. Un modèle a été développé qui prend en compte les principaux phénomènes qui se produisent lors de l'échange air/sol de deux éléments : un modèle thermique de sol et un modèle d'échangeur.

Le premier calcule la température du sol « non perturbé » à partir du bilan énergétique à la surface du sol, de l'influence d'un bâtiment proche et de la puissance géothermique.

La seconde utilise la température du sol calculée pour déterminer la température de l'air sortant de l'échangeur. Ce modèle a été intégré dans un outil de simulation thermique du bâtiment [18].

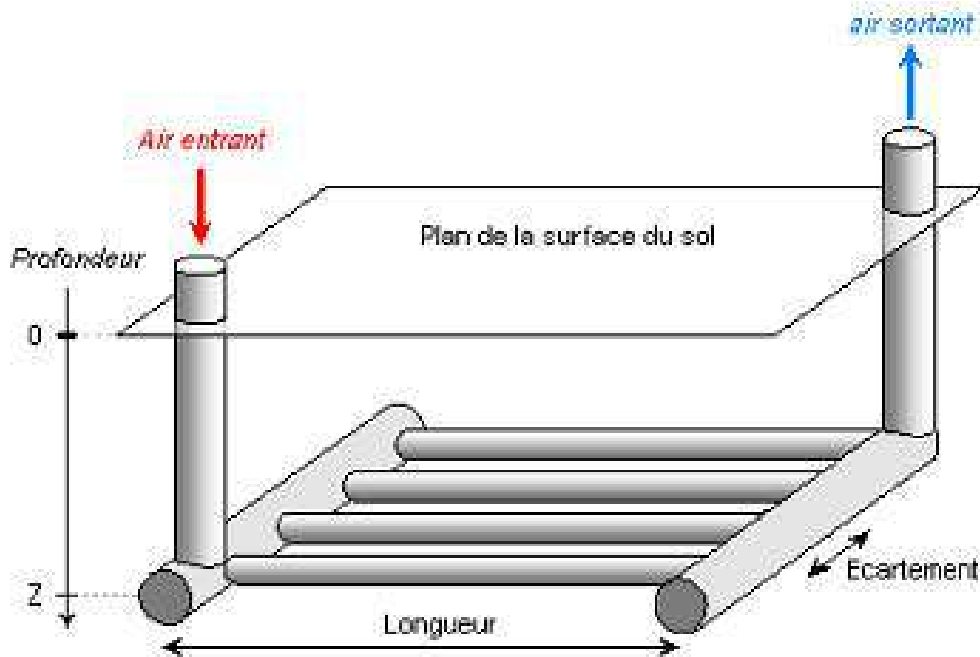


Figure. I.7 : Géométrie de l'échangeur air-sol modélisé [18].

### 3.1 Modes de fonctionnement d'un échangeur air-sol :

Trois modes de fonctionnement de l'échangeur air-sol, qui sont appropriés à chaque saison :

- Fonctionnement en été :

En été, la température du sous-sol est basse, l'air extérieur est refroidi en passant par l'échangeur géothermique puis diffusé dans la maison, avec une diminution conséquente de la température ambiante pour un meilleur confort. [15]

- Fonctionnement en hiver :

En hiver, la température extérieure est inférieure à celle du sol, l'air est réchauffé en passant par l'échangeur géothermique et, grâce à la chaleur du sous-sol, cet air chaud permet des économies d'énergie. [15]

- Fonctionnement au printemps/automne :

Pendant les intersaisons, la température extérieure subit des variations importantes (journées ensoleillées – nuits froides), mais la température du sous-sol reste stable (fraîche au printemps – encore chaude en automne). Par une chaude journée de printemps, il n'est pas souhaitable d'amener de l'air neuf par l'intermédiaire de l'échangeur géothermique, cet air serait plus frais que l'air extérieur. Par contre, le préchauffage de l'air par l'échangeur

géothermique pendant les nuits fraîches du printemps est souhaitable. L'exemple inverse (journées fraîches, nuits chaudes) est valable pour les journées d'automne [19].

### 3.2 Différents types d'installation des échangeurs air/sol :

#### 3.2.1. Échangeur horizontal :

Un échangeur air - sol implique plusieurs tuyaux/tubes de raccordement aligné droit et horizontalement sous le sol, soit en parallèle Figure (I.8) soit en série [20].

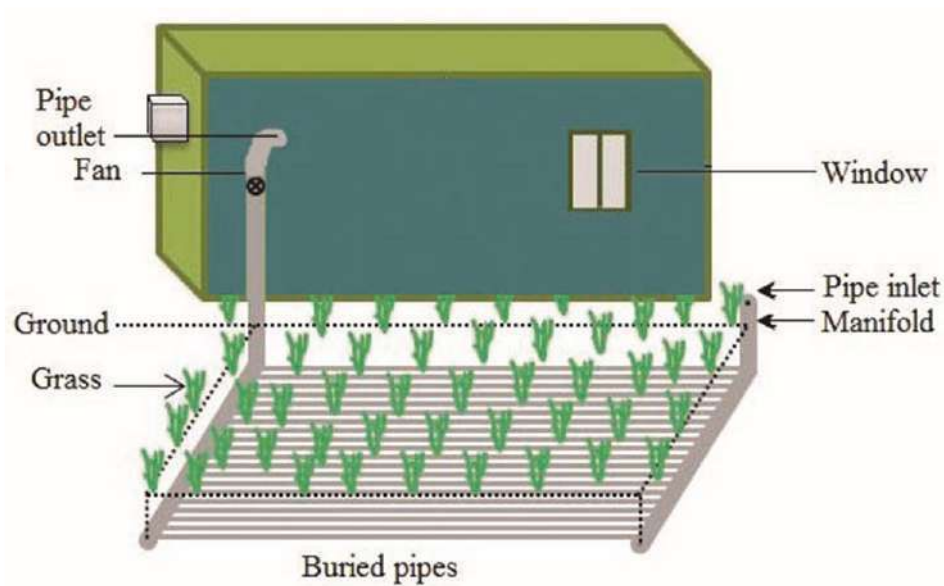


Figure .I.8 : Échangeur air -sol horizontal. [20]

#### 3.2.2. Échangeurs air/sol verticaux :

Échangeurs air- sol verticaux se composent d'un seul tube/tuyau ou de plusieurs tuyaux de raccordement alignés directement et enterrés verticalement. Comme le montre la figure (I.9), peut être installée dans un espace terrestre limité [20].



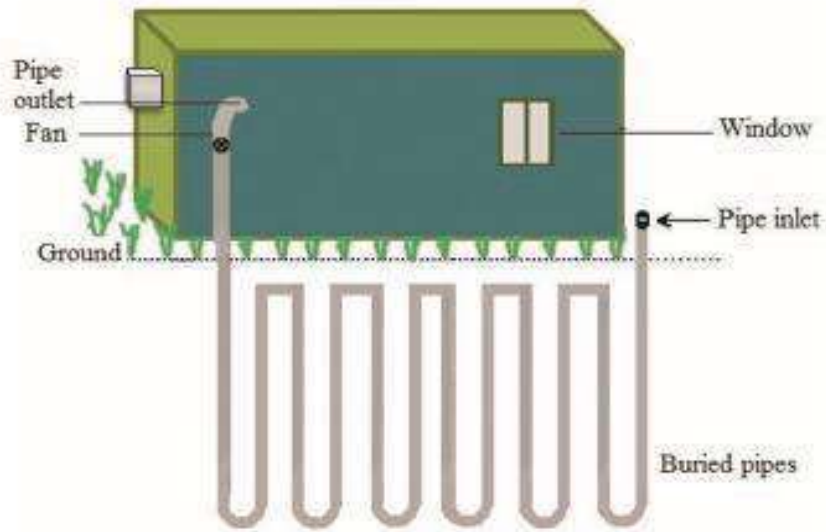


Figure. I.9 : Échangeur air /sol verticaux. [20]

### 3.2.3. Échangeurs air/sol spéciaux :

Ce type d'échangeur air-sol comprend plusieurs tubes/tuyaux circulaires conçus comme spirale qui est installée horizontalement ou verticalement sous terre. L'échangeur air sol spécial fonctionne bien si les conduites souterraines sont orientées verticalement. Les tuyaux enterrés peuvent se chevaucher ou être séparés les uns des autres, comme illustré à la figure (I.10) [20].

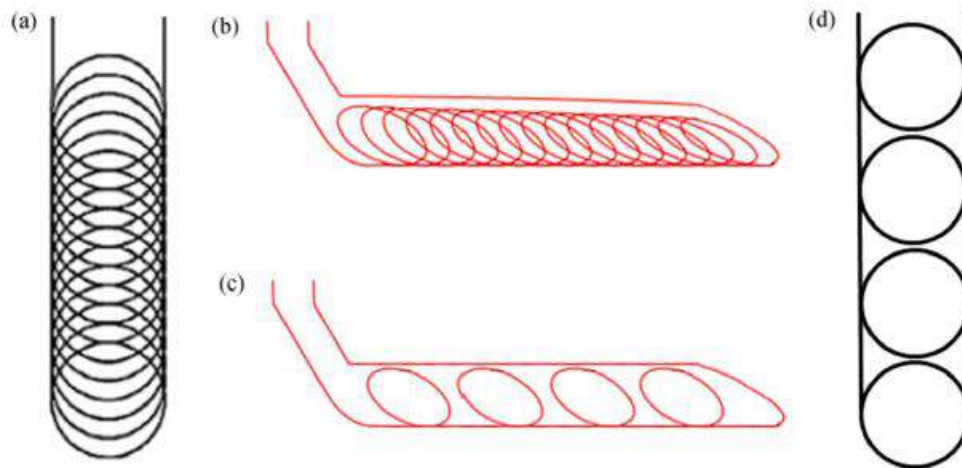


Figure I.10 : Conceptions d'échangeurs de chaleur au sol. (a) superposés verticalement, (b) superposés horizontalement, (c) non superposés (séparés) horizontalement, (d) non superposés (séparés) verticalement. [20]

### 3.3 Caractéristiques techniques d'un échangeur air/ sol :

L'échangeur air-sol est une idée attrayante pour beaucoup de chercheurs dans différents champs. En vue d'améliorer la ventilation naturelle, différentes configurations l'échangeur air-sol ont été étudiées et expérimentés. Dans le tableau (I.2), diverses études sont présentées. Ces données et résultats ont été proposés par plusieurs chercheurs.

Tableau I.2 : Caractéristiques techniques d'un échangeur air- sol.

Auteur et Ref	Base	Lieu	But	Matériau de la pipe	Longueur de pipe (m)	Diamètre de pipe (m)	Profondeur (m)	Vitesse moyenne (m/s)	Sol Tempe (°C)	Chambre Tempe (°C)
Jakhar et al. 2015[21]	Expérimental	Inde	refroidissement	PVC	60	0.1	3.7	5	27.4	17.5-22.3
Agrawal et al. 2018[22]	Expérimental	Inde	refroidissement	PVC	60	0.1	3.7	5	27.4	17.5-22.3
Serageldin et al. 2016[23]	Expérimental	Egypte	chauffage	PVC	5.5	0.0508	2	1- 3.9	-	19.7
Misra et al. 2015 [24]	Analytique	Inde	refroidissement	PVC	25	0.025	3	-	-	20-22
Gan 2014 [25]	Analytique	Angleterr	chauffage	PVC	40	0.1923	1.5	2	14.1	12.7
Barakat et al. 2016 [26]	Analytique	Egypte	refroidissement	PVC	85	0.35	5	4.5	26.7	29.14
Al-Ajmi et al. 2006 [27]	Analytique	Kuwait	refroidissement	-	60	0.25	4	-	-	28
Ahmed et al. 2015 [28]	Analytique	Australi a	refroidissement	PVC	8	0.02	-	1.1	-	24.9

### 3.4 Différents types de tuyaux :

Les matériaux utilisés pour les tuyaux sont nombreux. Ils doivent répondre aux caractéristiques suivantes :

1. Une stabilité suffisante pour supporter l'enfouissement dans la terre.
2. Une étanchéité importante (à la fois du tuyau et des raccords) afin d'éviter l'infiltration des eaux souterraines et la propagation de bactéries.
3. Une bonne conductivité thermique.
4. Une surface lisse à l'intérieur pour favoriser l'écoulement des condensats et diminuer les pertes de charges.
5. Une qualité sanitaire irréprochable afin de ne pas polluer l'air du bâtiment [29].

Trois catégories de tubes permettent de réaliser l'échangeur air-sol :

- Les minéraux (béton et grès);
- Les métalliques (fonte ou aluminium);
- Les synthétiques (PVC, PE, PP).

Il existe plusieurs matériaux de tuyaux avec différentes conductivités thermiques, les types les plus importants sont indiqués dans le tableau (I.3). Ces différents types de tuyaux sont les plus utilisées en raison de son prix et de sa facilité de mise en œuvre. Les matériaux synthétiques les plus courantes sont le PE (Polyéthylène) et le PP (Polypropylène). Le tube doit être lisse à l'intérieur, de qualité alimentaire, fabriqué avec des produits non recyclés, étanche et résister à l'écrasement.

Tableau I.3 : Types de tuyaux. [30]

Matériau	Remarque	Conductivité thermique k (W/m K)	Utilisation
PVC	-le matériau le moins cher -Il contient du chlore qui cause des problèmes de santé et n'est pas adapté à ce type d'application longue durée.	0.12-0.25	Non D'application longue durée  Oui D'application court instant
PP	Ce matériau est écologique, car il est recyclable à l'infini et il ne dégage pas de vapeur nocive.	0.4	Oui
Gaine annelée en PE	Une gaine spécialement étudiée, pour puits canadien, Caractérisé par la structure intérieure lisse est fabriquée avec du PE non recyclé et sans dégagement de solvants et d'odeurs.	0.35	Oui
Le béton	Ce matériau est un matériau poreux et de ce fait il n'est pas assez étanche pour éviter des infiltrations d'eau et sa structure non lisse	1.5	Non
Le grès	Le problème réside dans la qualité de l'étanchéité des raccords. Ils ne permettent pas de garantir une étanchéité suffisant pour la mise en œuvre d'un puits canadien.	1.1	Non
La fonte	Le poids est lourd pour la fonte et la corrosion avec le temps	55	Non

L'utilisation de tubes en PVC et de gaines est déconseillée, car ces produits ne respectent pas les critères sanitaires et d'étanchéités indispensables pour une installation pérenne.

Le matériau du tube a peu d'influence sur le rendement d'un échangeur d'air géothermique Figure (II.8) [31].

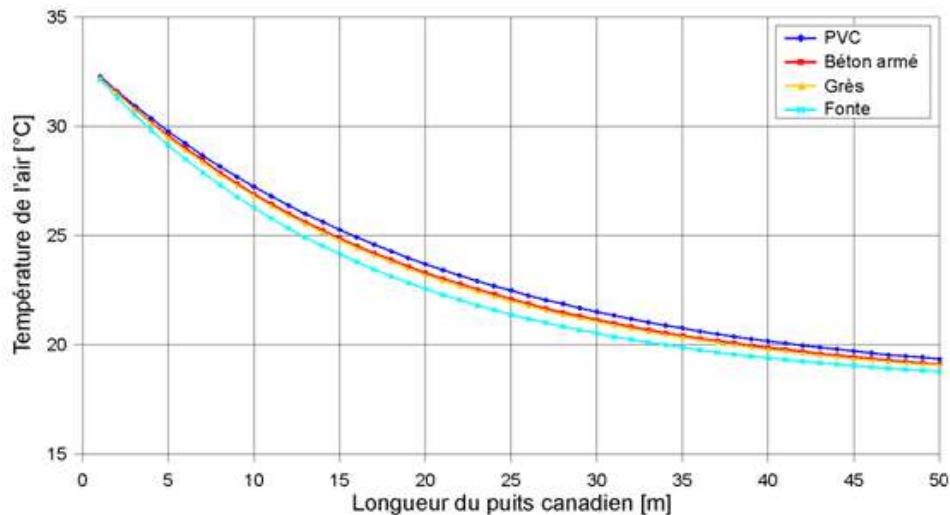


Figure I.11 : Température théorique de l'air suivant le matériau de tube. [31]

### 3.5 Avantages et les inconvénients d'un échangeur air/sol :

Les avantages et les inconvénients sont les suivants :

#### A. Avantages :

- Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport.
- Énergie de base, généralement, indépendant des conditions climatiques.
- Le coût de la consommation d'énergie est fortement réduit.
- Facile d'utilisation- L'énergie géothermique n'est pas liée à la politique pétrolière.
- Durabilité : inépuisable à l'échelle humaine, sa gestion est du type renouvelable.
- C'est un système confortable et écologique -Pas de combustion.
- Elles n'utilisent pas de combustion pour chauffer, -Pas de fumée.
- Utiliser de l'énergie 100% naturelle.
- Le fait qu'elle ne dépend pas des conditions atmosphériques (froid, vent, pluie et soleil) [32]

#### B. Inconvénients :

Malgré ses multiples avantages, l'échangeur air/sol peut présenter certains inconvénients :

- Coûts d'investissement et de maintenance très élevés.
- Un dispositif qui nécessite une grande compétence Il est essentiel que son montage soit effectué par un professionnel qualifié, compétent, expérimenté et bien équipé, car ce système nécessite une pente douce, mais réelle.

- C'est une énergie qui se transporte difficilement, elle doit donc être utilisée sur place [15].

### 4. Tour à vent (Wind Catcher) :

#### 4.1 Concept de tour à vent :

Avant l'invention des systèmes de refroidissement mécanique, l'homme utilisait les ressources naturelles de manière innovante pour assurer la ventilation et le confort thermique dans les climats chauds, un exemple d'une telle technique est la tour à vent [6]. La tour à vent est définie comme une tour conçue et installée sur le toit d'un bâtiment pour «capter» le vent. Ils sont également placés à des altitudes plus élevées et ils dirigent l'air vers l'environnement interne du bâtiment. Il est connu sous le nom "Tour à vent".

Les tours à vent en tant que caractéristiques architecturales spectaculaires démontrent l'harmonie de l'environnement créé par l'homme avec la nature [35,36] ; en d'autres termes, ils sont ingénieusement adaptés aux conditions climatiques locales [37].

Les tours à vent étaient non seulement d'une décoration saisissante, mais également très fonctionnels. Ils ont joué un rôle important sur l'efficacité de la ventilation et du refroidissement des espaces de vie, du sous-sol des bâtiments résidentiels, des citernes d'eau, des salles de prières des mosquées et des pavillons des jardins. Ils sont ventilés de façon naturelle, sans utiliser d'énergie [35,38].

Dans les pays du Moyen-Orient, la tour à vent est appelée avec différents noms tels que "Badgir" en Iran, "Malqaf" en Egypte [44,45], "Barjeel" (provenant du mot persan Badgir) en Irak et dans le Golfe [33,44] « Bating » en Syrie, et « Mungh » ou « Hawadani » en langue locale de la province du Sindh au Pakistan [46] Figure (I.12).



Figure I.12 : Différents tours à vent traditionnels au Moyen-Orient : (A) Badgir dans le climat chaud et humide de l'Iran ; (B) Barjeel décoratif au Qatar ; (C) Barjeel dans le quartier Bastakiya de Dubaï ; (D) Badgir dans le climat chaud et sec de l'Iran ; (E) Malqaf en Egypte ; (F) Barjeel à Bahreïn ; (G) Mungh au Pakistan [38,47].

#### **4.2 Principe de fonctionnement de la tour à vent :**

Le principe de fonctionnement du système de ventilation naturelle de tour à vent est basé sur la ventilation entraînée par le vent et l'effet de cheminée (flottabilité) [36,48].

Pendant la journée, par le mouvement du vent extérieur au niveau du toit, une pression positive sur le côté au vent de la structure et en même temps, une pression négative sur le côté sous le vent est produite.

Cette différence de pression est largement suffisante pour fournir de l'air frais à l'espace intérieur et extraire l'air chaud [40, 49].

Pendant la nuit, en l'absence de mouvement d'air ou dans des conditions du vent faible, le dispositif de tour à vent fonctionne avec l'utilisation de la flottabilité naturelle des forces thermiques [39,43,50], il est créé par le gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment (Figure I.13).

Lorsque la température de l'air ambiant est considérablement inférieure à la température intérieure, la différence de pression et de gradient de densité de l'air interne et externe conduit une augmentation de densité d'air, cela provoque son expulsion du côté sous le vent de la tour à vent et en même temps l'air frais descendant à travers le côté du vent du système [51].

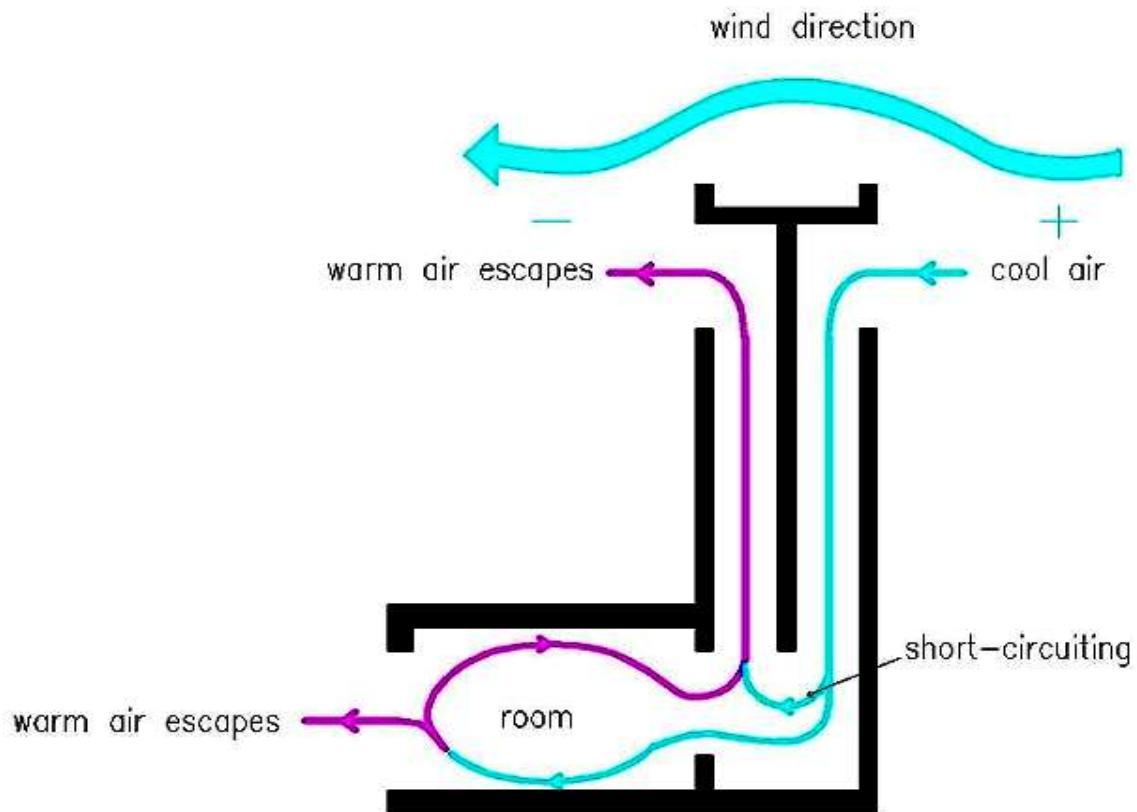


Figure I.13 : Principe de fonctionnement de la tour à vent pendant la journée et la nuit. [51]

### 4.3 Types de tour à vent :

Les tours à vent sont classés en deux groupes principaux : les tours à vent traditionnels et les tours à vent modernes.

#### 4.3.1. Tour à vent traditionnel :

Les tours à vents conventionnels se composent de différentes parties, y compris les ouvertures, le toit, la tête, le canal et les cloisons internes Figure (I.14). Généralement, le premier type est classé en cinq groupes comprenant un, deux, quatre, six et huit côtés comme ainsi que des tours à vent cylindriques en fonction du nombre de leurs côtés (faces) qui contiennent des ouvertures. [38, 41, 52]



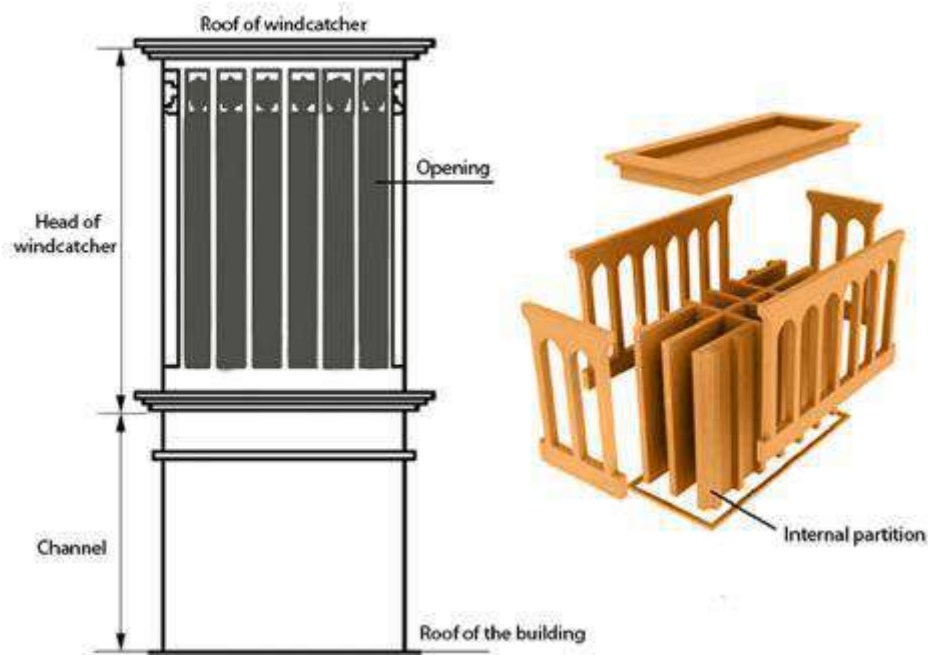


Figure I.14 : Différents composants de tour à vent traditionnel. [53,54]

Les tours à vent unilatérales captent le vent de l'ouverture supérieure et le canalisent à l'intérieur, puis l'air sort d'une autre ouverture d'un bâtiment.

Ils étaient généralement utilisés dans les zones où l'air souffle dans une direction spécifique. La tour à vent à deux côtés a deux ouvertures sur deux côtés opposés de sorte qu'une ouverture est utilisée comme entrée pour l'air frais et un autre extrait l'air chaud [34,51].

De plus, dans les zones où il n'y a pas de direction spécifique pour le vent, des tours à vent à quatre côtés peuvent être fréquemment vus car leur conception dépend principalement de la capture du vent dominant dans toutes les directions [51].

Les tours à vent à six et huit côtés (avec des sections transversales hexagonales et octogonales) ont été rarement vus dans les bâtiments résidentiels alors qu'ils sont fréquemment construits au-dessus des citernes d'eau, en particulier dans les régions chaudes et arides de l'Iran [52].

Une tour à vent cylindrique peut être considérée comme la dernière génération de tours à vent traditionnels [38].

L'application des tours à vent cylindriques est limitée et quelques exemples de ce type peuvent être trouvés en Iran et à Dubaï [38, 52]. La Figure (I.15) montre tous les types de tours à vent traditionnels.

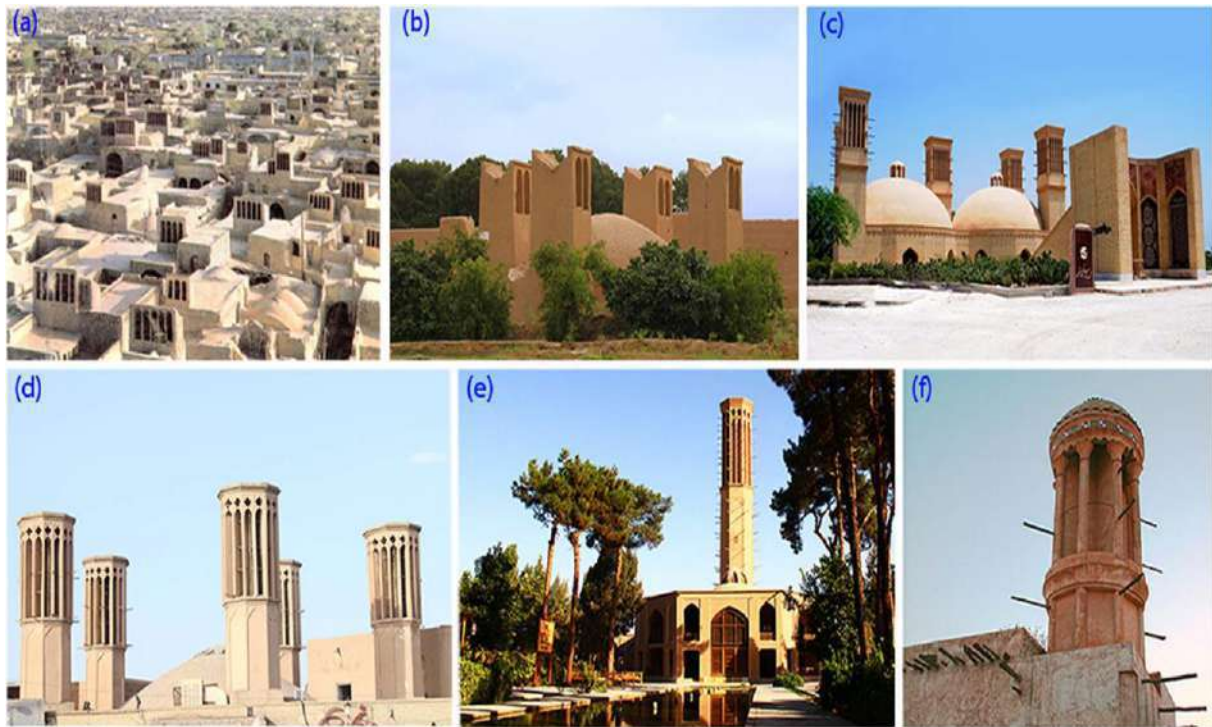


Figure I.15 : Différents types de tours à vent traditionnels : (a) tours à vent unilatéraux à Meybod, Iran [55] ; (b) tours à vent à deux côtés de la citerne d'eau du jardin de Dowlat-Abad, Yazd, Iran [56] ; (c) des tours à vent à quatre côtés de la citerne d'eau de l'île de Kish, en Iran [57] ; (d) tours à vent à six côtés à Yazd, Iran [38]; (e) tour à vent à huit côtés dans le jardin de Dowlat-Abad, Yazd, Iran [58] ; (f) tour à vent cylindrique à Dubaï [38].

#### 4.3.2. Tour à vent Modernes :

Les architectes et ingénieurs contemporains ont adapté les tours à vent de l'architecture vernaculaire du Moyen-Orient [59]. Les tours à vent modernes ont été développés pour tirer parti des avantages des tours à vent traditionnels et éliminer leurs limites pour les adopter avec des principes et des technologies de construction avancés [60]. L'utilisation des tours à vent est maintenant répandue, en particulier pour les espaces intérieurs à fort nombre d'occupants tels que les écoles et les immeubles de bureaux [61]. Par exemple, plus de 7000 tours à vent ont été installés dans les bâtiments publics britanniques au cours des 15 dernières années [63]. En outre, d'autres exemples de tours à vent modernes dans différentes parties du monde sont illustrés à la figure (I.16).

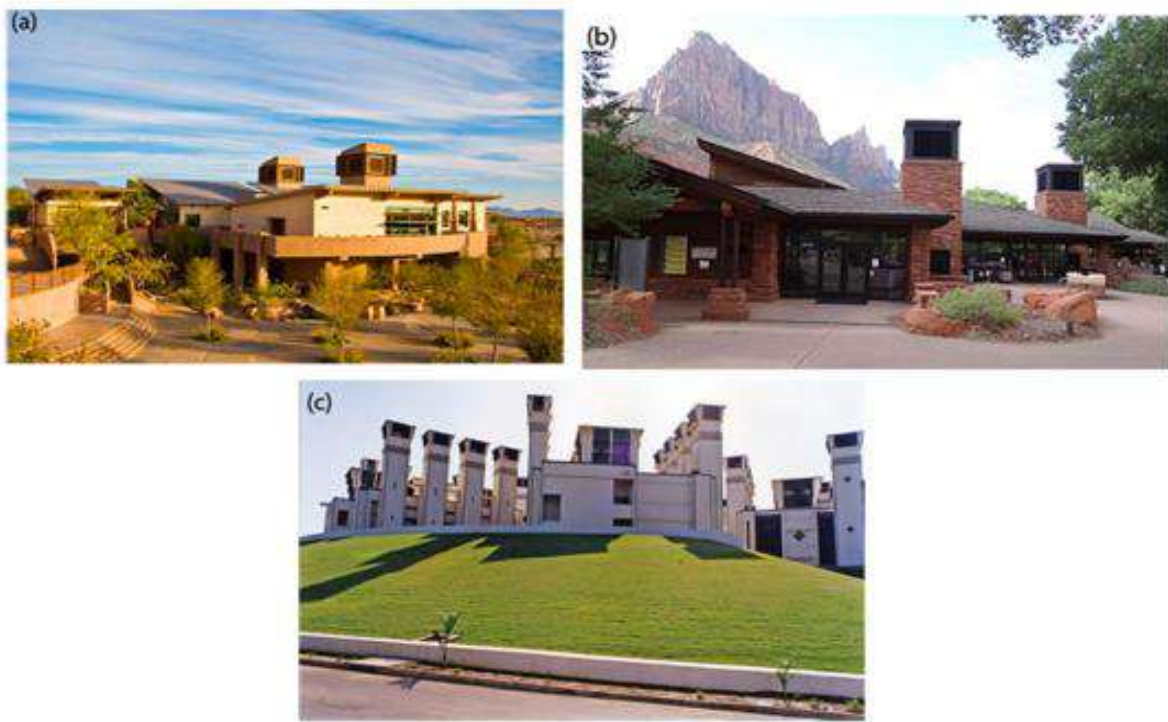


Figure I.16 : Tour à vent dans les bâtiments contemporains : (a) bâtiment Springs Preserve à Las Vegas, États-Unis ; (b) le centre des visiteurs du parc national l'Utah, aux États-Unis ; (c) Bâtiment du centre de recherche Torrent à Ahmedabad, Inde [42, 47,62].

### **4.3 Facteurs influençant les performances de ventilation de la tour à vent :**

Cette section examinera les études récentes portant sur divers facteurs liés à la géométrie et aux paramètres de conception de tour à vent, qui affectent les performances de ventilation. La hauteur et la section du canal d'air, l'orientation des ouvertures de tour à vent concernant les vents dominants et leur nombre, la forme du toit de tour à vent et son orientation, le placement de la tour par rapport au bâtiment ainsi que l'épaisseur et la disposition des murs sont des paramètres de conception géométriques déterminants [66,67].

Ces facteurs seront passés en revue dans les sections suivantes :

#### **4.4.1 Section de tour à vent :**

Les quadrilatères et les polygones réguliers sont les formes les plus courantes de tours à vent traditionnels que l'on peut voir dans les différentes parties du Moyen-Orient. La section transversale de tour à vent est généralement rectangulaire, cependant, certains sont circulaires,

hexagonaux et octogonaux [64,68]. De plus, le carré et la circulaire sont des sections transversales typiques parmi les tours à vent commerciaux [65].

Gage et Graham [69] ont comparé, expérimentalement, les performances de ventilation de deux conceptions contemporaines de tours à vent avec des sections transversales carrées (à quatre côtés) et hexagonales à différentes vitesses et directions du vent. Un modèle à l'échelle 1:10 des deux configurations de tours à vent a été connecté à une salle d'essai située sous la soufflerie. Les résultats obtenus ont montré qu'une performance de ventilation plus fiable et cohérente a été observée pour la tour à vent à section hexagonale dans les zones à angle du vent variable. Cependant, la tour à vent à quatre côtés est bien fonctionnée à l'angle d'incidence de l'air de  $45^\circ$  dans les conditions du vent dominantes.

Elmualim et Awbi [70] ont étudié l'effet de deux sections transversales (carrée et circulaire) sur les performances de tour à vent à différentes vitesses et directions du vent. L'étude menée à bien mesures à l'échelle du débit d'air volumétrique, de la distribution des coefficients de pression et de la vitesse du vent interne obtenu par les systèmes de tours à vent contemporains. Les résultats obtenus ont montré que la vitesse et la direction du vent dominant étaient les principaux facteurs affectant le fonctionnement de la ventilation des deux types de tours à vent. Il a également été constaté qu'à la même vitesse du vent externe, l'efficacité d'un tour à vent à quatre côtés à section circulaire était inférieure à celle d'un capteur carré. L'auteur a conclu que c'était une conséquence des arêtes vives de tour à vent carré, qui créait une large zone de séparation du flux avec un gradient de pression plus élevé à travers l'appareil.

De plus, Maneshi et al. [71] ont effectué l'analyse numérique pour comparer les performances de ventilation des tours à vent modernes à quatre côtés avec des sections carrées et circulaires à deux directions du vent de  $0^\circ$  et  $45^\circ$ . De même, il a été constaté que la tour à vent à section carrée était plus efficace à un angle d'incidence d'air de  $45^\circ$ .

#### 4.4.2 Hauteur de tour à vent :

La hauteur de tour à vent a un effet significatif sur le taux de ventilation, car les tours à vent plus grands auront un vent plus fort qui le traversera et, par conséquent, un débit d'air d'alimentation plus élevé. Cependant ce n'est pas le cas pour toutes les conditions car le champ d'écoulement au sommet des bâtiments est très compliqué. Par exemple, lorsque les

ouvertures des tours à vent sont placées dans des zones de recirculation, cela se traduit par une réduction considérable des performances du système. Les tours à vent traditionnels sont généralement plus grands que les capteurs contemporains, en particulier dans les régions chaudes et arides où il y a moins de vents porteurs de poussière à des altitudes plus élevées [72–74]. De plus, les tours à vent doivent être surélevés pour pouvoir exploiter suffisamment du vent dans les zones urbaines denses. Cependant, les coûts de construction et d'entretien, les limitations de planification et les aspects esthétiques doivent être soigneusement pris en compte lors de la conception de tours plus hautes [65].

Ghadiri et al. [75] ont utilisé un outil CFD pour évaluer les performances de ventilation de la tour à vent traditionnel dans la région chaude et sèche de Yazd, en Iran. Le modèle de tour à vent carré à quatre côtés avec différentes hauteurs de 3,5 à 10,5 m a été simulé pour étudier son influence sur la vitesse de l'air et les modèles de température à l'intérieur du bâtiment. L'objectif principal de l'étude était de déterminer la hauteur optimale pour les tours à vent traditionnels avec une section transversale en forme de H. Les résultats des calculs ont démontré que les performances de ventilation de tour à vent étaient considérablement affectées par la hauteur de la tour. L'étude a conclu que la hauteur optimale des tours à vent traditionnels de la ville de Yazd était de 6 m.

### 4.4.3 Conception de toit de la tour à vent :

Les modèles de flux d'air autour de tour à vent sont influencés par la forme et la taille de son toit [76]. Les toits plats sont le type le plus courant dans la conception traditionnelle et moderne des tours à vent.

Deh-ghan et al. [77] ont évalué expérimentalement et analytiquement l'effet de différentes géométries de toit (plat, incliné et incurvé) sur les performances de ventilation naturelle d'une tour à vent unilatéral à différentes vitesses et directions du vent (figure I.17). L'étude a mené des essais en soufflerie à l'échelle et des mesures des coefficients de pression autour de toutes les surfaces de tour à vent et du débit d'air induit. Des modèles analytiques ont également été développés pour valider la précision des mesures expérimentales, et une corrélation souhaitée entre les résultats a été obtenue. Il a été constaté qu'à un angle d'incidence du vent élevé, la tour à vent à toit incliné présentait le différentiel de coefficient de pression le plus élevé entre les surfaces intérieures et l'environnement extérieur. Les

résultats obtenus ont indiqué qu'à un angle du vent de 0, la tour à vent à toit incurvé a démontré de meilleures performances car il était capable de fournir un débit d'air plus élevé que les tours à vent à toit plat et incliné de 10 % et 4,5 % respectivement.

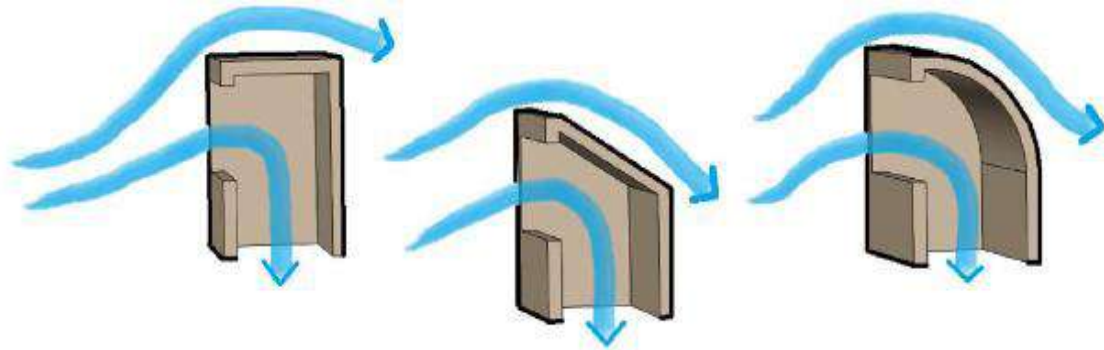


Figure I.17 : Schéma d'un tour à vent avec des configurations de toit plat, incliné et incurvé.

[77]

#### 4.4.4 Cloisons et ouvertures intérieures :

Le nombre de cloisons internes, ainsi que la taille et la position des ouvertures de tour à vent, ont des effets significatifs sur ses performances de ventilation.

Des cloisons internes séparent la tour en canaux plus petits pour réduire la sensibilité aux différentes directions du vent et augmenter la résistance structurelle de tour à vent.

Une grande variété de cloisons internes peut être trouvée dans les tours à vent traditionnels (figure I.18) tandis que la conception des tours à vent modernes est plus simple (principalement en forme de X ou à quatre côtés).

Les ouvertures d'entrée de tour à vent sont principalement configurées en fonction de l'orientation de la direction du vent dominant. La topographie, l'emplacement et le débit d'air requis sont des facteurs déterminants sur la taille des ouvertures et le nombre de cloisons internes [64,65].

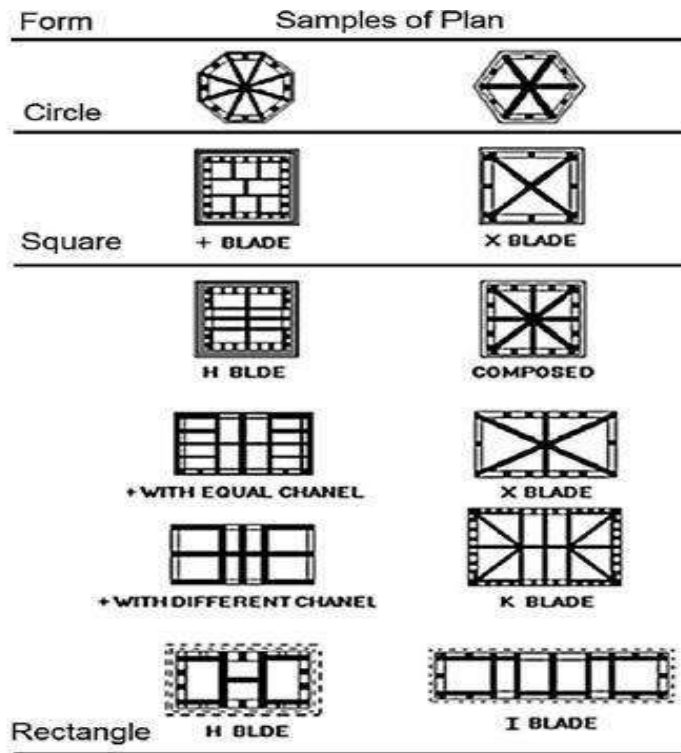


Figure I.18 : Différentes sections transversales et pales internes (cloisons) dans les tours à vent traditionnels. [78]

L'angle de transition et les performances de ventilation d'un tour à vent à deux côtés dans différentes conditions du vent ont été étudiés dans [79].

La visualisation de la fumée a été utilisée pour étudier la distribution du débit dans la tour à vent. L'étude a révélé que l'angle de transition de l'ouverture au vent et la fenêtre étaient aux angles du vent de  $55^\circ$  et  $39^\circ$ .

Le taux de ventilation le plus élevé a été observé à un angle du vent de  $90^\circ$  et la tour à vent est fonctionnée comme une cheminée pour un angle du vent supérieur à  $55^\circ$ . La figure (I.19) représente la vue de dessus de la distribution du débit visualisée à l'intérieur et autour de tour à vent à deux côtés.

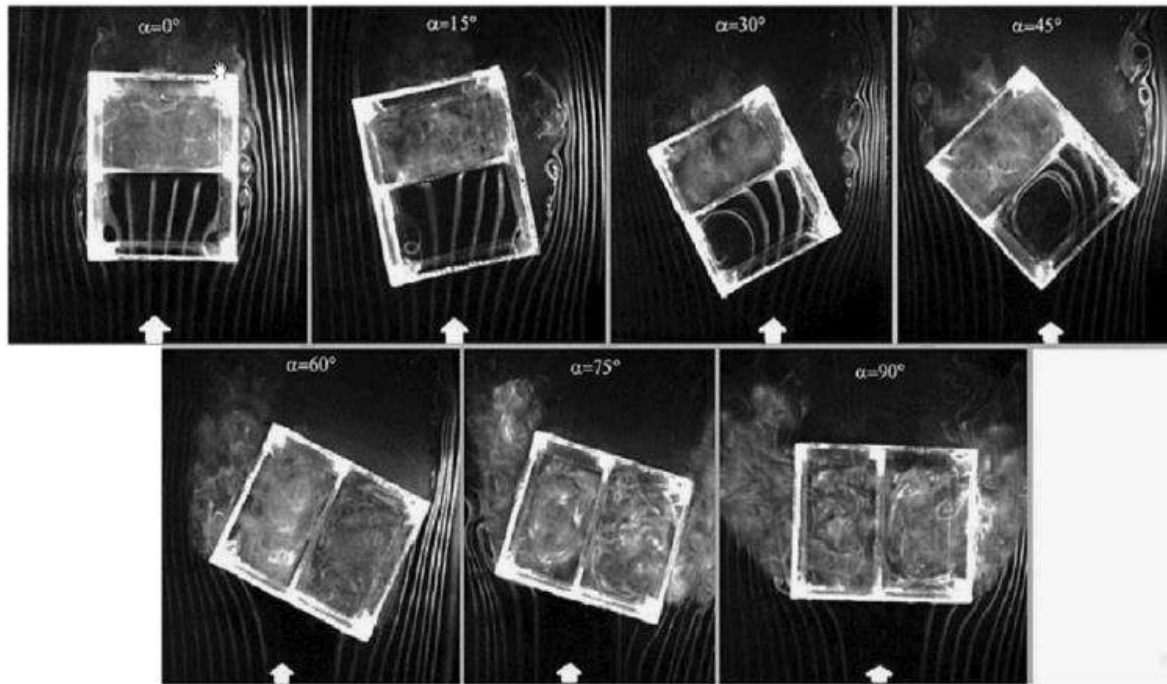


Figure I.19 : Vue de dessus des modèles d'écoulement autour et à l'intérieur de tour à vent à deux côtés à différents angles du vent ( $\alpha$ ), la direction du vent est indiquée par une flèche. [79]

#### 4.5 Avantages et les inconvénients d'un tour à vent :

Les avantages et les inconvénients sont les suivants :

##### 4.5.1 Avantages :

- Fournir une ventilation naturelle, en captant l'air frais exempt de poussière et d'impuretés des couches supérieures de l'espace extérieur, et en le faisant circuler à travers les espaces intérieurs, et contribue à augmenter la vitesse de l'air à l'intérieur du bâtiment.
- Aide à réduire le bruit de l'extérieur.

##### 4.5.2 Inconvénients :

Les principaux inconvénients des tours à vent sont :

- la vitesse du vent qui devient parfois très lente – la tour à vent ne fonctionne pas à basse vitesse.
- la hauteur de tour à vent – les tours à vent hauts fonctionnent mieux (les tours à vent plus hauts pourraient attraper des vents plus puissants), mais il n'est pas possible de rendre les tours à vent très hauts à cause des structures et de l'architecture. [80]



## **5. Conclusion :**

Grâce à ce chapitre nous avons atteint une évaluation des performances thermiques d'un échangeur de chaleur air / sol, et la tour à vent qui est principalement liée aux paramètres suivants:

Les paramètres d'un échangeur de chaleur air/sol sont : la vitesse d'écoulement de l'air, la longueur, le diamètre et la profondeur des tubes, Conductivité thermique du sol, Temps de fonctionnement de l'échangeur (continu/intermittent).

Les paramètres de la tour du vent sont : Section et Hauteur et Conception de toit tour à vent et Cloisons et ouvertures intérieures.

Pour optimiser la performance du système d'échangeur de chaleur air/sol couplé au capteur du vent dans la région d'Ouargla, nous s'impose une simulation pour trouver les optimaux paramètres, et c'est ce que nous verrons dans le deuxième chapitre.

**Chapitre II : Modélisations et  
optimisation des systèmes  
passifs**

### Introduction

Les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation des bâtiments sont responsables d'environ la moitié de l'énergie consommée dans les bâtiments [81]. L'intégration efficace d'éléments passifs dans le bâtiment peut réduire considérablement la demande de climatisation dans les bâtiments tout en maintenant le confort thermique [82].

Les dispositifs passifs sont des éléments tels que la cheminée solaire, l'échangeur air -sol, la tour à vent qui peuvent être intégrés dans le bâtiment pour produire de la ventilation et du chauffage ou du refroidissement sans avoir besoin d'un système de ventilation mécanique [83–86].

Dans ce chapitre, nous allons présenter un modèle d'échangeur air/sol couplé à un tour à vent qui permet d'apporter un confort thermique et de réduire la consommation d'énergie. Avec des données expérimentales de F.Z. Sierra-Espinosa et al [87], nous avons réalisé une simulation numérique tridimensionnelle, le calcul numérique est mené à l'aide du code de calcul Fluent version 6.3.16. Les équations régissant sont résolues par la méthode des volumes finis pour un écoulement turbulent basé sur le model  $k-\epsilon$ . On va tout d'abord fournir les caractéristiques du maillage de notre domaine d'étude et les critères de simulations qui vont permettre de résoudre les équations de conservation.

Puis en utilisant la méthode de Taguchi pour obtenir le modèle optimal de tour du vent. Une tour à vent a été fabriquée avec les dimensions obtenues, nous allons présenter une étude expérimentale d'une tour du vent sous le climat d'Ouargla. Une simulation numérique d'un système passif a été réalisée.

Le système passif consiste en une tour à vent couplée à un échangeur air-sol. L'analyse CFD des champs d'écoulement et d'énergie a été fait avec l'utilisation des données météorologiques.

### 1. Méthodologie :

Cette étude utilise une approche subjective pour discuter des systèmes d'échangeurs de chaleur air/sol couplés à un tour à vent et particulièrement sur les aspects de conception en tenant compte des effets de divers paramètres du système.

La méthodologie suivie pour vérifier les hypothèses émises et atteindre les objectifs tracés repose sur deux outils de recherche ; « l'investigation » à travers les mesures in situ et la simulation. Notre méthodologie se base premièrement donc sur une optimisation d'un système de tour à vent. L'obtention d'un modèle du système de tour à vent avec des dimensions qui permettent d'obtenir les meilleurs résultats.

Cette étape est suivie d'une étude expérimentale de tour à vent sous un climat semi-aride. Grâce à la collaboration existant entre le département de Génie Mécanique et le Département des énergies Renouvelables, la partie liée à la simulation de l'échangeur de chaleur a été étudiée par les étudiants de deuxième année du master option énergies renouvelables.

À la suite de cette étude, les dimensions optimales de l'échangeur de chaleur ont été déterminées, après avoir défini les dimensions optimales pour chaque système, nous avons combiné les deux systèmes afin de voir quelles améliorations en résulteraient en termes de champ dynamique et de champ de température.

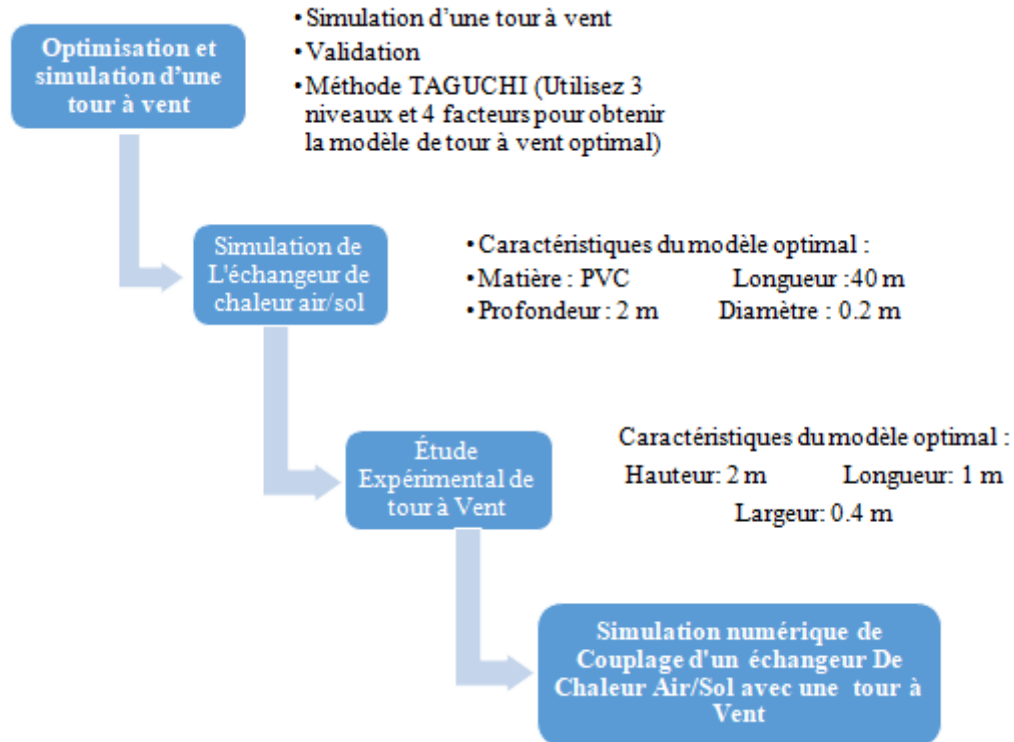


Figure II.1 : Méthodologie de Travail.

## 2. Simulation numérique de tour à vent :

### 2.1 Description du système :

Un modèle de tour à vent tridimensionnel de et de section rectangulaire. Il est divisé en deux canaux égaux et séparés par une paroi verticale. Comme le montre la figure (II.2), la largeur, la longueur et la hauteur de la tour à vent sont respectivement de 13.2 cm, 26 cm et 56 cm.

Le fonctionnement de tour à vent peut être expliqué par le fait que lorsque le vent fait face à un obstacle, et en raison de la densité de l'air dans la direction du vent, il y aura une pression positive ; cependant, de l'autre côté, une partie de pression négative. Il y a donc un flux de la pression positive vers la pression négative qui provoque la ventilation. Selon ce fait, dans la tour à vent, l'ouverture dans la direction du vent absorbe l'air à l'intérieur du bâtiment et l'air intérieur avec une pression négative sort par la sortie de tour à vent.

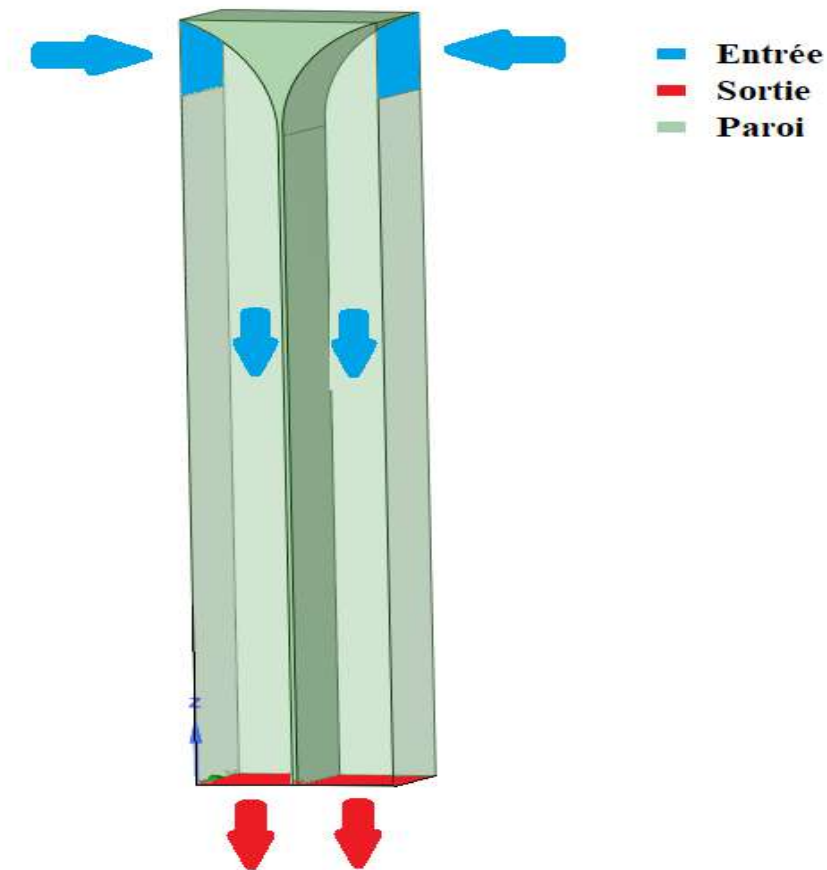


Figure II.2 : Tour à vent.

## 2.2 Hypothèses considérées :

La description physique devient rapidement très compliquée. Il convient donc de faire un certain nombre d'hypothèses, permettant d'arriver à un temps de calcul correct, et les hypothèses utilisées dans ce travail sont:

- L'écoulement de l'air est turbulent.
- L'écoulement permanent.
- Le fluide est newtonien et incompressible.
- La température de l'air à l'entrée du canal d'écoulement est égale à la température ambiante.

**2.3 Les Équations régissantes :**

**2.3.1 Équation de continuité :**

En mécanique des fluides, L'équation de continuité est d'intérêt très général puisqu'elle traduit le principe de conservation de la masse au sein d'un écoulement

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \tag{II.1}$$

Où  $\rho$  est la densité,  $t$  est le temps et  $\vec{V}$  fait référence à la vectrice vitesse du fluide.

Pour l'écoulement stationnaire (aucune variation dans le temps des différentes grandeurs caractérisant l'écoulement et le fluide), alors on a :

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \tag{II.2}$$

**2.3.2 Équation de conservation de quantité de mouvement :**

Le bilan de la quantité de mouvement pour un fluide incompressible avec une viscosité constante conduit à l'équation de Navier Stokes, qui est la suivante :

**L'accélération = force de pression + force de viscosité + force de poids +force de contraintes de turbulence**

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla \tau \tag{II.3}$$

Où  $p$  représente la pression,  $\vec{g}$  est le vecteur de l'accélération gravitationnelle,  $\mu$  représente la viscosité dynamique moléculaire et  $\tau$  la divergence des contraintes de turbulence qui explique les contraintes auxiliaires résultant des fluctuations de vitesse.

**2.3.3 Equation de L'énergie Cinétique Turbulente :**

$$\underbrace{\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i}}_{\text{Convection}} = \underbrace{\mu_t \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}}_{\text{Génération}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\mu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right)}_{\text{Diffusion}} - \underbrace{\rho \varepsilon}_{\text{Destruction}} \tag{II.4}$$

Convection                      Génération                      Diffusion                      Destruction

2.3.4 Équation du taux de dissipation :

$$(II.5) \underbrace{\rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}}_{\text{Convection}} = \underbrace{c_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k}\right) \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}}_{\text{Génération}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right)}_{\text{Diffusion}} - \underbrace{c_{2\varepsilon} \rho \left(\frac{\varepsilon^2}{k}\right)}_{\text{Destruction}}$$

Convection

Génération

Diffusion

Destruction

Les valeurs  $c_{1\varepsilon}$ ,  $c_{2\varepsilon}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  sont des constantes.

**2.4 Les conditions aux limites :**

Les conditions aux limites sont les conditions imposées à la frontière externe du domaine étudié. Elles sont nécessaires pour que le problème mathématique soit correctement traité. OÙ la figure (II.3) montre l'entrée, la sortie et les murs de la tour à vent.

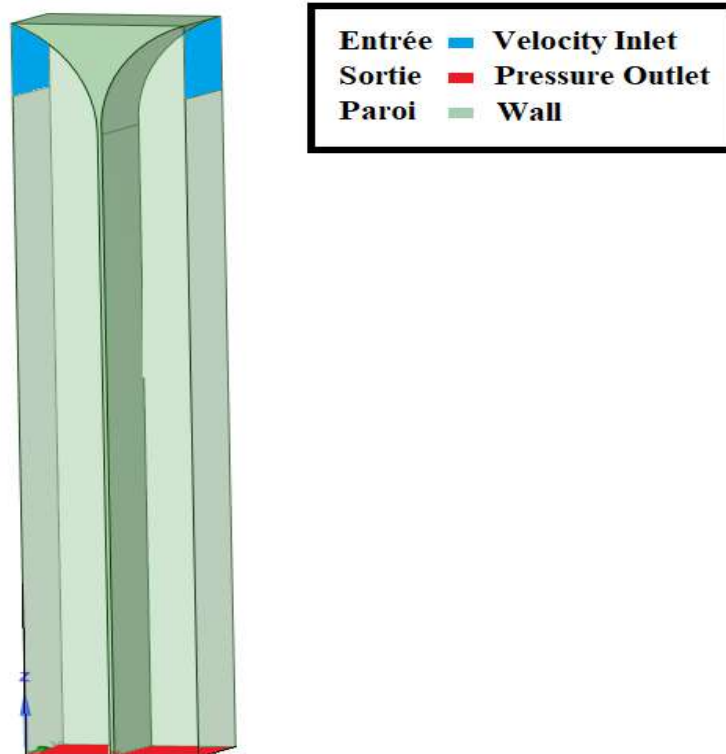


Figure II.3 : Frontière de la tour du vent.



Le Tableau (II.1) suivant montre les conditions aux limites pour une tour à vent.

Tableau II.1 : Les conditions aux limites de tour à vent.

Facteur	Domaine
vitesse à l'entrée	4.7 m/s
la pression à la sortie	$P_{atm}$
Paroi	wall
modèle de turbulence	model k- $\epsilon$
Type de solveur	Pressure based
Gravité	9,81 m/s <sup>2</sup>

L'entrée et à la sortie du système, La condition est fixée et elle est de type Dirichlet. Alors la condition à l'entrée de système est égale la vitesse du vent et à la sortie de système est égale la pression atmosphérique.

Les parois extérieures de tour à vent sont considérées adiabatiques.

## 2.5 Choix du Maillage :

Dans tous les problèmes des méthodes numériques, le maillage a une influence directe sur les résultats, Il est important que le maillage soit resserré dans toutes les zones où les variables présentent des forts gradients. Dans une analyse préliminaire pour déterminer la taille optimale de maille, nous avons mené un test de maillage sur une configuration de base semblable à celle de F.Z. Sierra-Espinosa et al [87]. Pour obtenir des résultats numériques acceptables, nous avons choisi quatre densités différentes de maillage, à savoir 1, 0,8, 0,5 et 0,4.

Tableau II.2 : Test d'indépendance du maillage.

Maillage	Grid size	Nombre de nœuds	Nombre d'éléments
Maillage 1	1	39466	201536
Maillage 2	0.8	76760	405063
Maillage 3	0.5	283786	1564936
Maillage 4	0.4	555747	3119334

La géométrie du système et le maillage adopté dans cette étude est un maillage non structuré Figure (II.4).

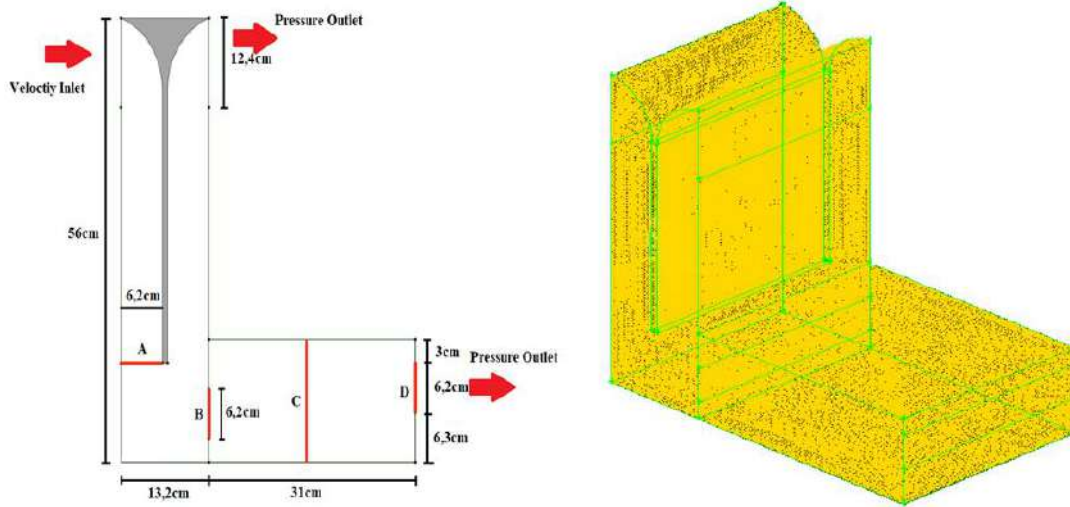


Figure II.4 : La géométrie du système et le maillage choisi dans cette étude.

Après le calcul précédent, les résultats ont été comparés et il n'y avait pas de différence de vitesse de l'air dans les cas étudiés. L'analyse a montré que l'indépendance du maillage assure une influence minimale du nombre de cellules sur les résultats numériques. On a choisi le maillage 3 qui donne un bon résultat avec un nombre minimal d'itérations.

La figure (II.5) représente l'évolution de la vitesse aux positions "B" et "D" pour différents maillages testés.

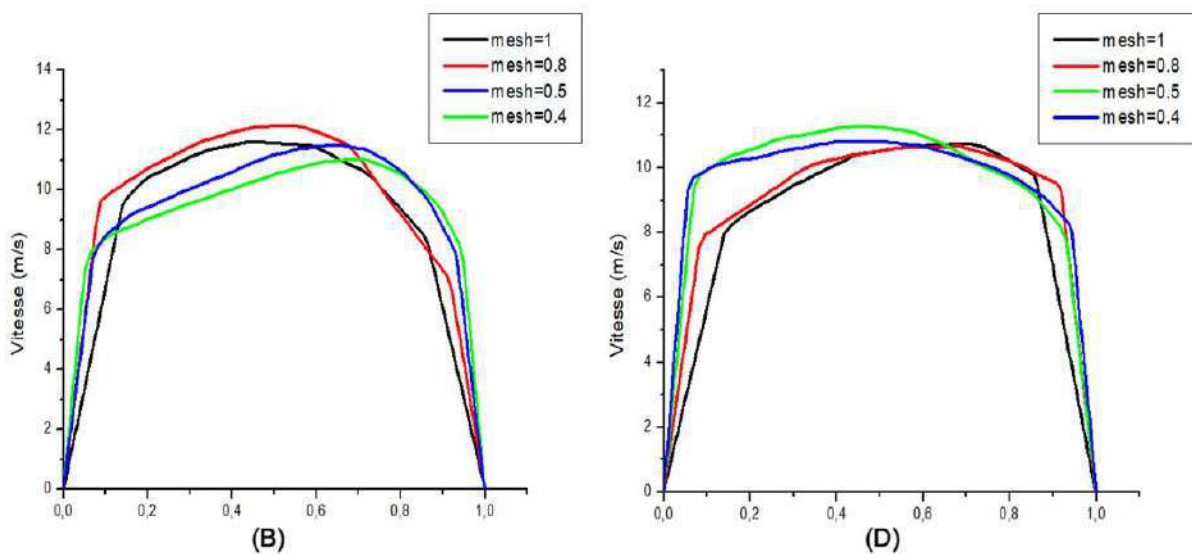


Figure II.5 : Test de maillage.

Les deux courbes indiquent que la vitesse dans une région après l'entrée de tour à vent converge pour les deux maillages les plus fins. Ils paraissent clairement que la variation de la vitesse devient faible à partir d'un maillage de (mesh = 0.5), ce qui permet de constater que le maillage optimal correspond à cette valeur.

### 3. Plan de taguchi (ou plan de taguchi orthogonal) :

La méthode Taguchi, inventée par Gen'ichi Taguchi: né le 1er janvier 1924 à Tōkamachi, il est un ingénieur et statisticien japonais. Depuis les années 1950, il développe une méthode en vue d'utiliser la statistique comme outil pour améliorer la qualité des produits manufacturés. [88]

Un plan de Taguchi est un plan d'expériences qui vous permet de choisir un produit ou un procédé qui fonctionne de manière plus cohérente dans son environnement d'exploitation. Les plans de Taguchi partent du principe que les facteurs à l'origine de la variabilité ne peuvent pas tous être contrôlés. Ces facteurs incontrôlables sont appelés facteurs de bruit. Les plans de Taguchi essaient d'identifier les facteurs contrôlables (facteurs de contrôle) qui minimisent l'effet des facteurs de bruit. Pendant l'expérimentation, vous manipulez les facteurs de bruit de manière à imposer une variabilité, puis vous déterminez les paramètres de facteurs de contrôle optimaux qui rendent le procédé ou le produit plus robuste ou plus résistant face à la variation provoquée par les facteurs de bruit. Un procédé conçu dans cette optique produira des résultats plus cohérents. Un produit conçu dans cette optique aura des performances plus cohérentes, quel que soit l'environnement dans lequel il sera utilisé. [89]

Les plans de Taguchi orthogonaux se concentrent sur les effets principaux. Certains des applications sont intégrées dans le logiciel Minitab pour permettre d'étudier les interactions. Minitab calcule les tableaux de réponses et les résultats du modèle linéaire. [88]

#### 3.1 Mise en application de la méthode Taguchi :

Afin de planifier la fabrication d'un tour à vent efficace avec une productivité maximale, nous devons prendre en compte l'effet de plusieurs facteurs. Ces facteurs doivent être choisis correctement pour prédire la valeur de vitesse appropriée pour la ventilation intérieure naturelle. L'objectif principal de notre étude est d'utiliser la méthode Taguchi pour trouver les conditions optimales de fonctionnement de tour à vent sous les conditions climatiques d'Ouargla.

3.1.1 Facteurs :

Les facteurs choisis dans notre étude sont les dimensions de tour à vent et les paramètres physiques externes qui ont un impact significatif sur le comportement de l'écoulement d'air. Quatre facteurs ont été déterminés : la longueur (**a**), la largeur (**D**), la hauteur (**H**) de tour à vent et la vitesse de l'air ambiant (**V**).

3.1.2 Choix du plan d'expérience :

Un plan orthogonal pour Taguchi a été sélectionné pour la planification de l'expérience. C'est un plan qui aide à trier les facteurs les plus importants en faisant ressortir les plus influents. Il est un plan factoriel complet, ces essais montrent clairement l'influence des paramètres d'entrée avec leurs interactions.

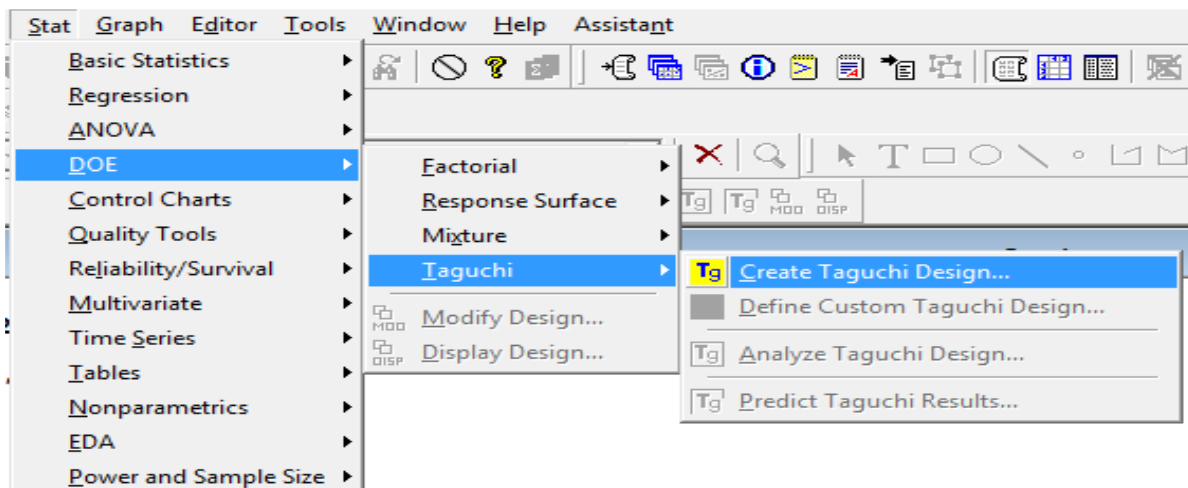
La recherche bibliographique nous permet de déterminer les fourchettes dont varient généralement les paramètres de notre étude. Les limites de ces fourchettes sont résumées dans Le Tableau (II.3).

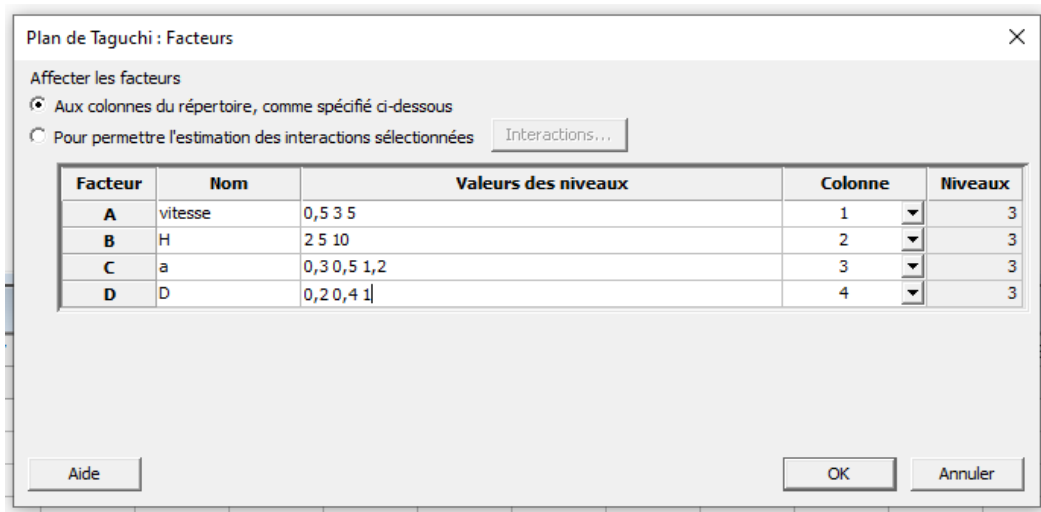
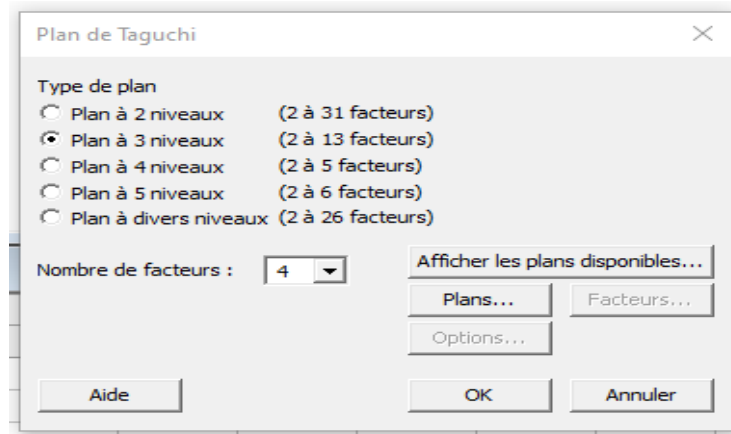
**Tableau II.3 :** Niveaux des facteurs.

Facteurs	Niveaux		
	Min	Moyen	Max
V (m/s)	0.5	3	5
H (m)	2	5	10
D (m)	0.2	0.4	1
a (m)	0.3	0.5	1.2

3.1.3 Procédure de la Méthode Taguchi dans Minitab :

Après avoir déterminé les facteurs et les niveaux, nous utilisons le programme **MINITAB**, selon les étapes suivantes :





La forme géométrique pour tour à vent selon la méthode Taguchi sera donc comme suit :

Tableau II.4 : Dimensions Géométriques De 9 Essai.

N° Essai	Vitesse (m/s)	H(m)	A(m)	D(m)
1	0.5	2	0.3	0.2
2	0.5	5	0.5	0.4
3	0.5	10	1.2	1
4	3	2	0.5	1
5	3	5	1.2	0.2
6	3	10	0.3	0.4
7	5	2	1.2	0.4
8	5	5	0.3	1
9	5	10	0.5	0.2

Ensuite, une simulation numérique est effectuée pour les 9 formes géométriques de tour à vent, comme le montre la Figure (II.6).

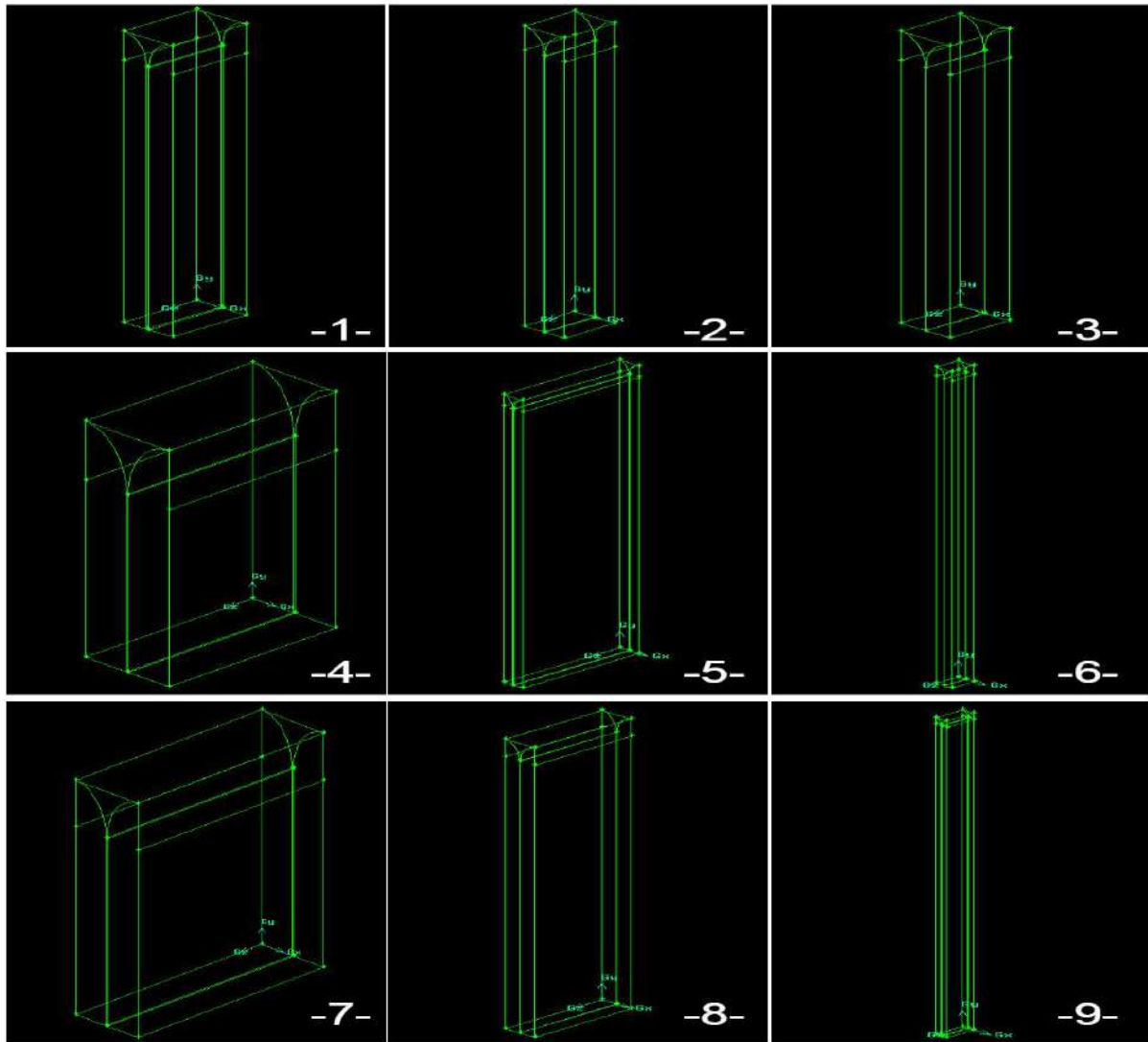


Figure II.6 : les neuf formes géométriques de tour à vent.

Les résultats de la méthode de Taguchi sont présentés au (Chapitre III), parmi lesquels figurent les dimensions optimales de tour à vent comme indiqué dans le Tableau (II.5).

Tableau II.5 : Les dimensions optimales de tour à vent.

Vitesse De L'air Ambient $V$ (m/s)	Hauteur $H$ (m)	$D$ (m)	$a$ (m)
0.5	2	1	0.4

### 3.2 Organigramme de la méthode de Taguchi :

L'organigramme de la méthode de Taguchi est présenté ci-dessous :

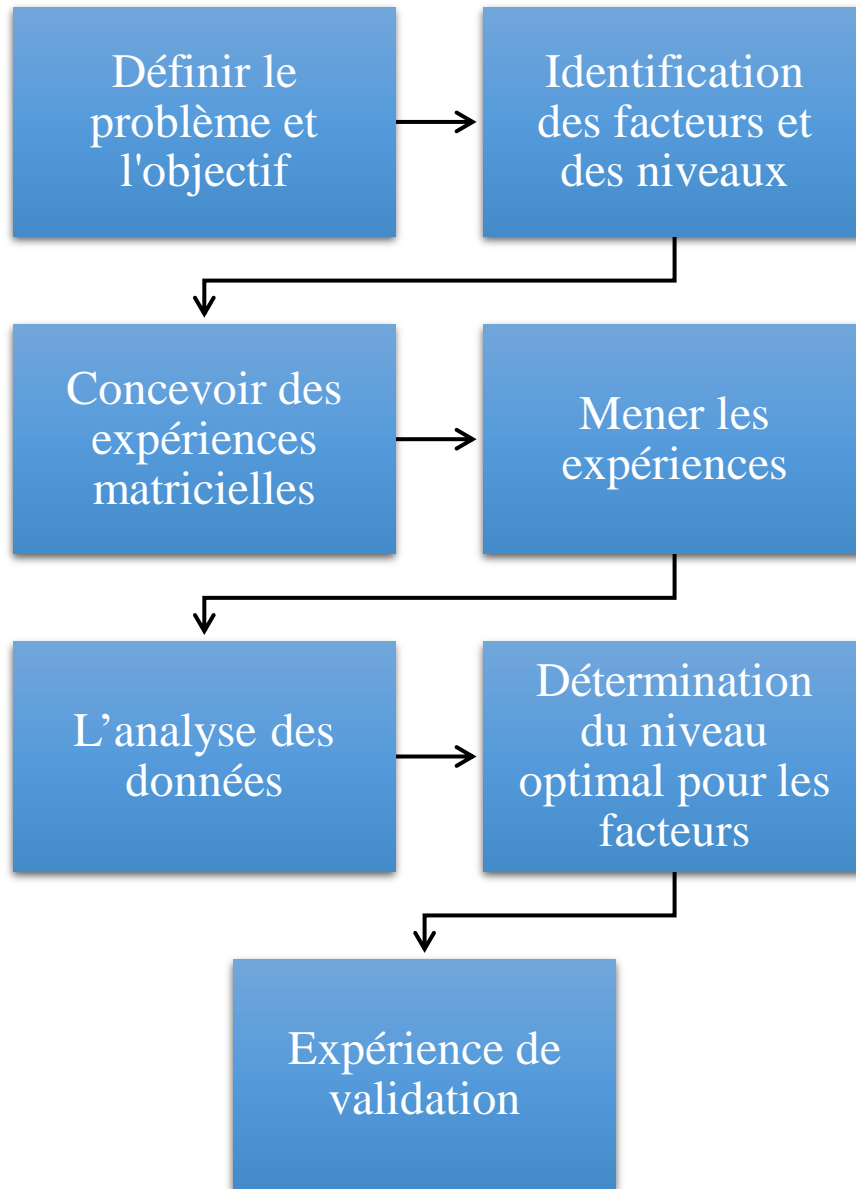


Figure II.7 : Organigramme de la méthode de Taguchi.

**4. Etude expérimental :**

**4.1 Localisation géographique de la zone d'étude :**

La ville de Ouargla est située approximativement à 32 degrés de latitude nord et 5 degrés est, à une altitude de 135 m au niveau de la mer, au sud-est de l'Algérie. Les caractéristiques climatiques sont présentées dans le Tableau (II.6).

Tableau II.6 : Les Caractéristiques Climatiques à Ouargla 2019.

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Vitesse Moyenne Du Vent (m/s) [92]	3.8	3.9	4.1	4.4	4.5	4.5	4.2	3.9	3.9	3.7	3.6	3.6
Température Ambiante Moyenne (°C) [90]	10.8	12	16.9	23.2	26.7	35.3	37.4	36.9	31.8	17.2	16.2	13.8
Température Du Sol (°C) a 2 m [93]	22.6	19	17.2	17.7	20.6	24.6	30.4	34.2	36	35.4	32.5	28.7

La nature du sol du site est (**Limon argilo-sableux**). Les propriétés thermo physiques de ce type de sol sont données dans le Tableau (II.7)

Tableau II.7 : Propriétés thermo physiques du sol du site. [93]

Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité calorifique Cp (J/kg K)	Conductivité thermique K (w.m/k)	Profondeur de pénétration (m)
1868	1995.4	1.74	2

**4.1.1 La Direction du vent :**

La rose des vents pour Ouargla montre combien d'heures par an le vent souffle dans la direction indiquée au Figure (II.8). Exemple SO : Le vent souffle du sud-ouest (SO) au nord-est (NE) [91]. Le vent vient le plus souvent de l'est pendant 6,3 mois, du 21 avril au 29 octobre, avec un pourcentage maximal de 61 % le 21 juillet. Le vent vient le plus souvent du



nord pendant 5,7 mois, du 29 octobre au 21 avril, avec un pourcentage maximal de 37 % le 1 janvier. [92]

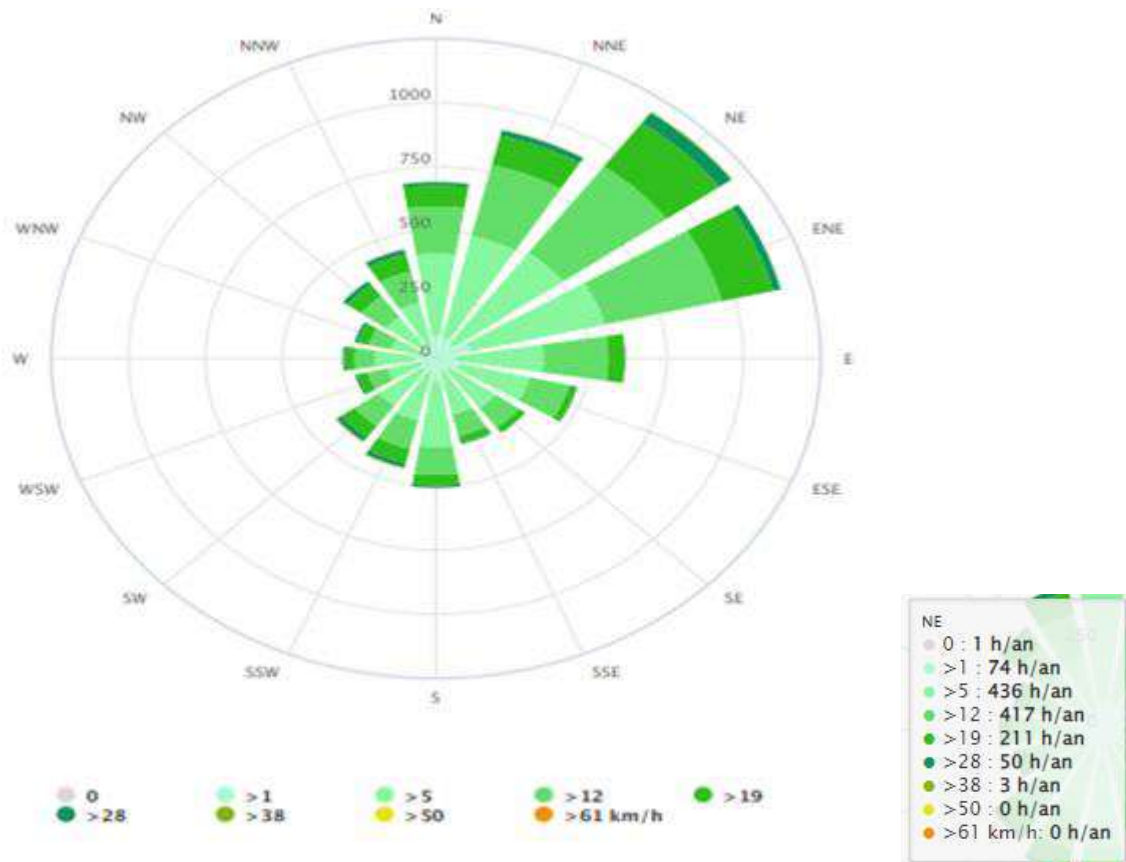


Figure II.8 : La direction de la vitesse du vent à Ouargla. [11]

### 4.2 Tour à vent :

Le modèle expérimental de tour à vent a une section rectangulaire divisée de l'intérieur en deux parties et une hauteur 2 m et longueur 1 m et largeur 0.4 m et il contient un toit qui permet à l'air d'entrer des deux côtés et une sortie par le bas de la tour à vent comme indiqué sur la figure (II.9), et fabriqué en matériau de bois.



Figure II.9 : Tour à vent.

#### 4.3 Appareillages de mesures :

Dans cette étude expérimentale sur la tour à vent, nous avons fait des tests pour fournir des données de mesure réelle. Les mesures ont été effectuées au laboratoire **V.P.R.S** à l'université Kasdi Merbah - Ouargla. Afin d'estimer l'efficacité de tour à vent, les expériences ont été réalisées durant une période de climat tempéré avec un ciel clair, et les mesures sont prises entre 8h et 17h avec un pas de temps égal une heure.

##### 4.3.1 Mesure de la vitesse de l'air :

La vitesse de l'air à l'entrée et la sortie de tour à vent sont mesurés à l'aide d'un anémomètre à fil chaud connecté à un appareil de type Chauvin Arnoux C.A 1051 (Figure II.10).



Figure II.10 : Chauvin Arnoux C.A 1051.

## **5. Simulation CFD 3D d'un échangeur air-sol couplée avec tour du vent :**

### **5.1. Le Modèle physique :**

Le domaine d'étude est représenté par Figure (II.11) est essentiellement composé d'un tuyau en PVC (Poly Chlorure de Vinyle) Le tuyau enterré a une longueur 40 m et un diamètre intérieur 0.2 m a été obtenu à partir l'étude de référence [93] La section d'entrée de l'échangeur air/ sol est reliée avec la tour à vent, son fonctionnement peut être expliqué comme suit : l'air chaud entre dans la tour à vent par son ouverture en haut et il va vers le bas Ensuite, il passe dans le tuyau enterré où il se refroidit à cause de l'échange de chaleur avec le sol.

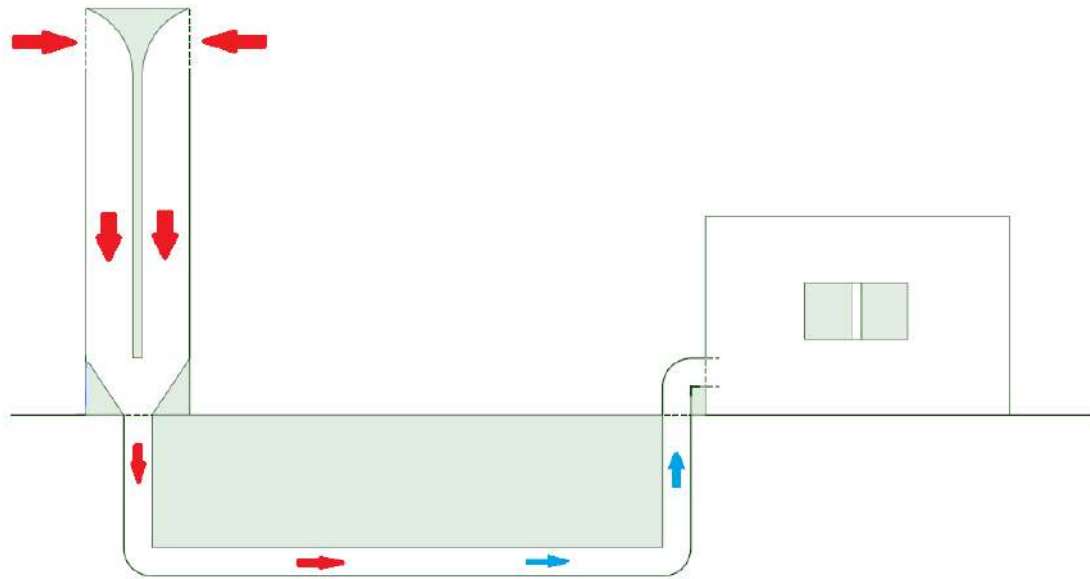


Figure II.11. Le modèle physique de l'échangeur air-sol couplée avec tour du vent.

## 5.2. Hypothèses Considérées :

Les hypothèses considérées dans la formulation mathématique sont basées sur :

- Le sol est considéré homogène
- On suppose une température uniforme au long du périmètre de la surface de conduite (Pas d'influence de l'échange sur la température du sol).
- On néglige dans cette étude les échanges thermiques latents (évaporation ou condensation d'eau).
- Le fluide est newtonien et incompressible.
- Le fluide est supposé visqueux.
- L'écoulement permanent.
- Les forces de pesanteur sont négligées
- Les propriétés thermo-physiques ( $\rho$ ,  $\mu$ ,  $k$ ,  $C_p$ , ...) de l'air et du sol et pvc sont supposées constantes.

Tableau II.8 : Les propriétés thermo-physiques de l'air. [94]

	La masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	La capacité calorifique (J/kg .K)	La conductivité thermique (W/m .K)	La viscosité dynamique (kg/m .s)
Air	1.225	1006.43	0.0242	1.7894001
PVC	1380	900	0.16	/

### 5.3 Les équations régissantes :

L'écoulement de l'air dans le système est régi par des équations de base exprimant en Coordonnées cartésiennes, qui sont respectivement l'équation de continuité, les équations de Navier-Stokes et l'énergie cinétique turbulente et taux de dissipation mentionné précédemment dans le parti de la simulation numérique de la tour du vent et l'équation de l'énergie et l'approximation de Boussinesq est illustrée ci-dessous :

#### 5.3.1 Équation de conservation de l'énergie :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = (\alpha + \alpha_t) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.6})$$

Avec  $\alpha_t = \frac{\nu_t}{Pr_t}$  étant la diffusivité thermique de tourbillon et  $\nu_t$  C'est la viscosité cinématique de tourbillon

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} \quad (\text{II.7})$$

**Pr :** est le nombre de Prandtl

$$Pr_t = \frac{\mu c_p}{K} \quad (\text{II.8})$$

#### 5.3.2 L'approximation de Boussinesq :

L'approximation de Boussinesq est un moyen de résoudre les problèmes de convection naturelle, vous pouvez obtenir une convergence plus rapide avec le modèle Boussinesq que vous pouvez obtenir en configurant le problème avec la densité du fluide en fonction de la température. Ce modèle traite la densité comme une valeur constante dans toutes les équations résolues, à l'exception du terme de flottabilité dans l'équation de momentum :

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0(1 - \beta(T_m - T_0))g \quad (\text{II.9})$$

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta \Delta T) \quad (\text{II.10})$$

Où  $\rho_0$  est densité du flux (constante),  $T_0$  est la température de fonctionnement,  $T_m$  est la Température moyenne.

$\beta$  est le coefficient de dilatation thermique (1/k)

$$\beta = \frac{1}{T_m} \quad (\text{II.11})$$

#### 5.4 Les conditions aux limites :

Les conditions aux limites sont les conditions imposées à la frontière externe de l'échangeur air-sol couplée avec tour du vent. Elles sont nécessaires pour que le problème mathématique soit correctement traité. OÙ le Tableau (II.9) montre ces conditions.

**Tableau II.9 :** Les conditions aux limites.

Facteur	Domaine
<b>l'entrée</b>	vitesse à l'entrée
<b>la pression à la sortie</b>	$P_{\text{atm}}$
<b>Paroi</b>	l'échangeur air-sol et tour du vent
<b>modèle de turbulence</b>	k- $\epsilon$ model
<b>Gravité</b>	9,81 m/s <sup>2</sup>

#### 5.5. Maillage de modèle physique :

La première étape d'une simulation CFD est la génération de la grille et la définition des cellules sur lesquelles les variables de sont calculées dans tout le domaine de calcul. La plupart des codes CFD fonctionné avec un maillage structurel ou non structurel.

Un maillage non structurel est constitué de cellules de formes diverses, mais généralement des triangles ou quadrilatères en 2D et des tétraèdres ou en 3D. Il permet une géométrie hybride plus complexe avec des volumes tétraédriques, asymétriques et courbes Figure (II.12), réalisant ainsi une modélisation 3D plus réaliste du problème à résoudre, Étant donné que le maillage non structurel offre une flexibilité pour gérer des géométries complexes, il est généralement plus approprié que le maillage structurel pour les géométries complexes.

Toutes les simulations dans ce travail sont effectuées sur la base d'un maillage non structurel en raison de la géométrie complexe du modèle étudié.

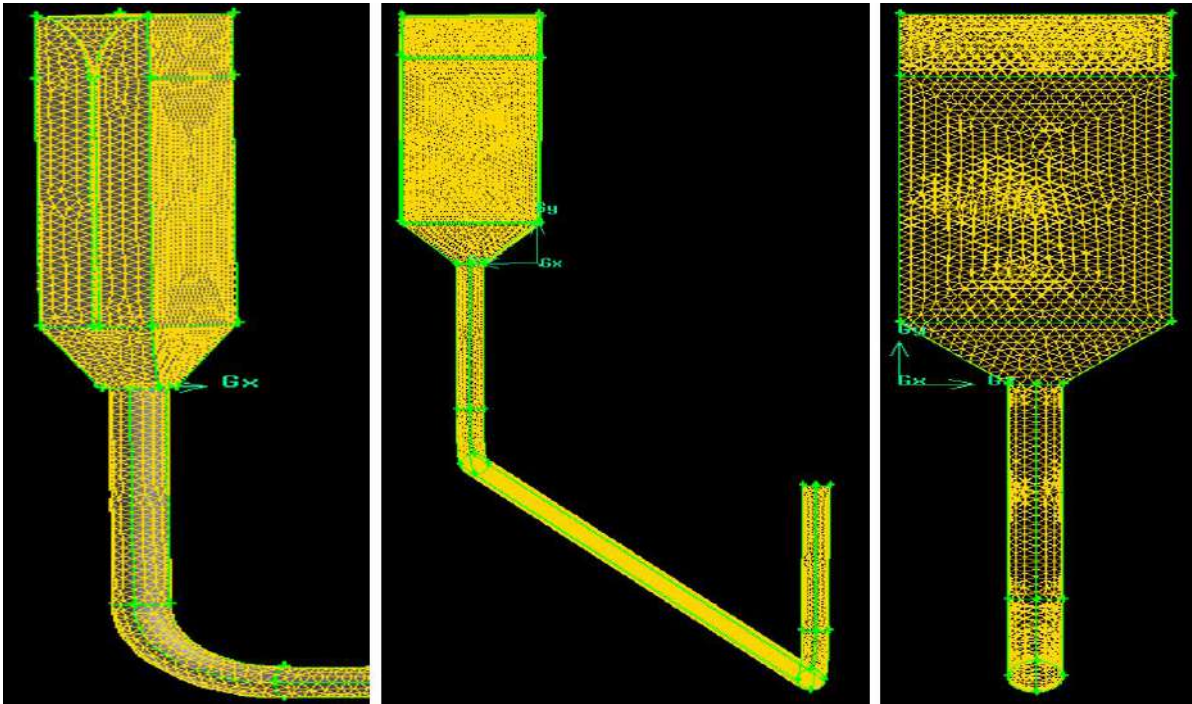


Figure II.12 : Maillage de modèle physique.

### 5.6. Organigramme de calcul :

L'organigramme de notre modèle est présenté ci-dessous

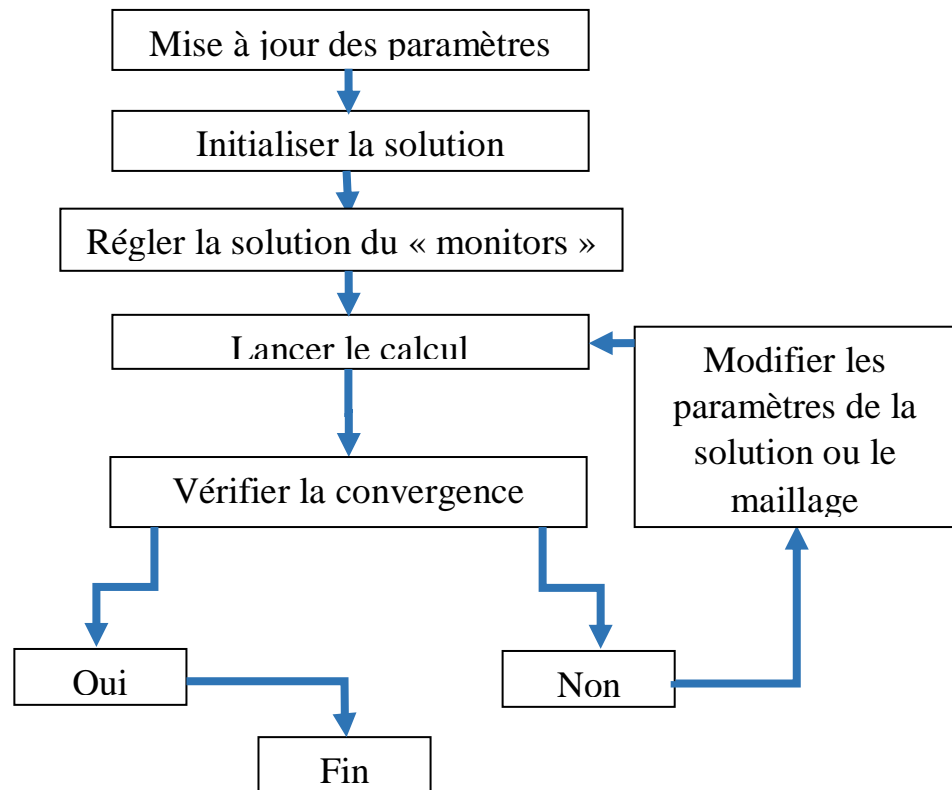


Figure II.13 : Organigramme de calcul.

## **6. Conclusion**

En utilisant des résultats expérimentaux et des modèles comme base pour valider les résultats, la modélisation et la simulation CFD aident à évaluer les performances en ayant un coût moins élevé que les méthodes expérimentales.

Dans ce chapitre, nous avons fourni :

- Une simulation de tour à vent a été réalisée, où maillage idéal a été sélectionné avec un pas de 0.5, ce qui nous a donné des résultats très acceptables.
- Obtention du modèle de tour à vent optimal avec une hauteur 2 m, une longueur 1 m et une largeur 0,4 m en utilisant la méthode de Taguchi.
- Conception de modèle expérimental de tour vent optimale en bois.
- Un modèle physique d'un échangeur air-sol couplée avec une tour du vent qui sera utilisé pour réaliser la validation des résultats et nous avons créé le modèle géométrique et son maillage qui allaient être inclus dans le domaine du calcul pour les simulations.

Pour La discussion des résultats expérimentaux et des simulations seront dans le troisième chapitre.



**Chapitre III : Résultats et  
*discussions***

## Introduction

Ce chapitre décrit les résultats de la simulation numérique et expérimentale de l'écoulement dans le système de tour à vent et dans l'échangeur d'air au sol. Dans une première étape, on expose les résultats concernant la tour à vent uniquement, une validation des résultats a été effectuée par des données extraites de la littérature. Puis, on a discuté les résultats obtenus après avoir utilisé la méthode Taguchi. Ensuite, les résultats expérimentaux de la tour à vent ont été analysés sous les conditions climatiques de la région d'Ouargla. De plus, des simulations numériques ont été menées pendant une période d'un an pour étudier l'effet de la vitesse du vent sur la température de sortie du système l'échangeur air-sol couplé avec la tour à vent.

### 1. Simulation numérique de la tour à vent :

#### 1.1. Convergence des Solutions :

Pour déterminer la convergence de la solution, On considère qu'une solution numérique converge quand les résidus des différentes quantités physiques deviennent inférieurs à  $10^{-3}$  pour toutes les équations.

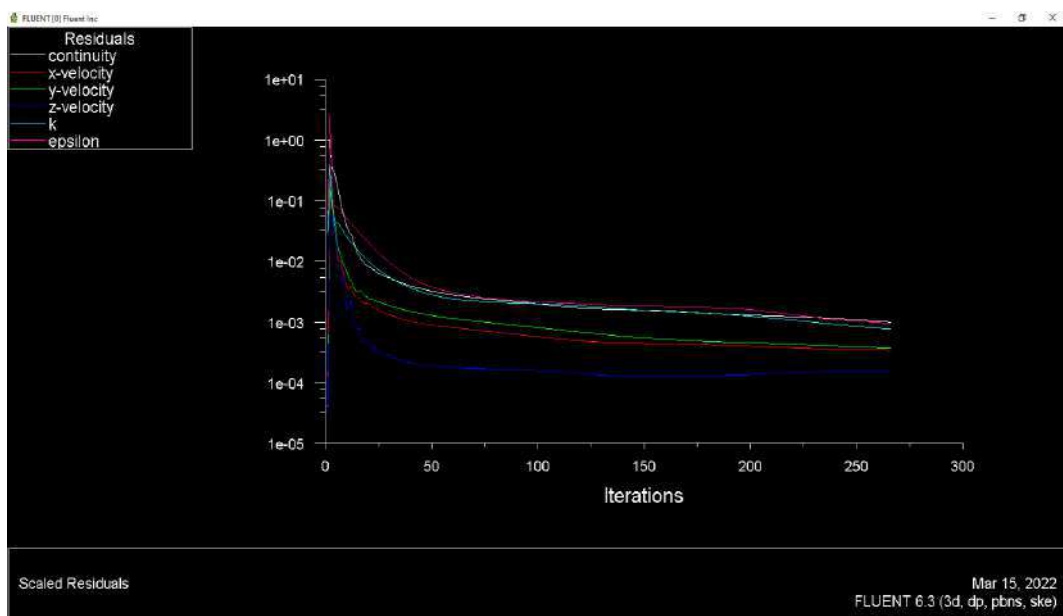


Figure III.1 : Évolution de résidu.

Comme on peut le voir sur la Figure (III.1), les résidus commencent à se stabiliser à 266 itérations.

1.2. Validation :

Afin de confirmer la validation de notre modèle numérique, nous avons utilisé les paramètres géométriques et thermo-physiques indiqués dans la figure (III.2) et le tableau (III.1). On a fait une comparaison entre les résultats numériques obtenus et les résultats expérimentaux de F.Z. Sierra-Espinosa et al [87]. F.Z. Sierra-Espinosa et al ont effectué une étude expérimentale dans laquelle ils ont comparé les performances de ventilation naturelle d'une tour à vent installée dans une chambre au Nord du Mexique.

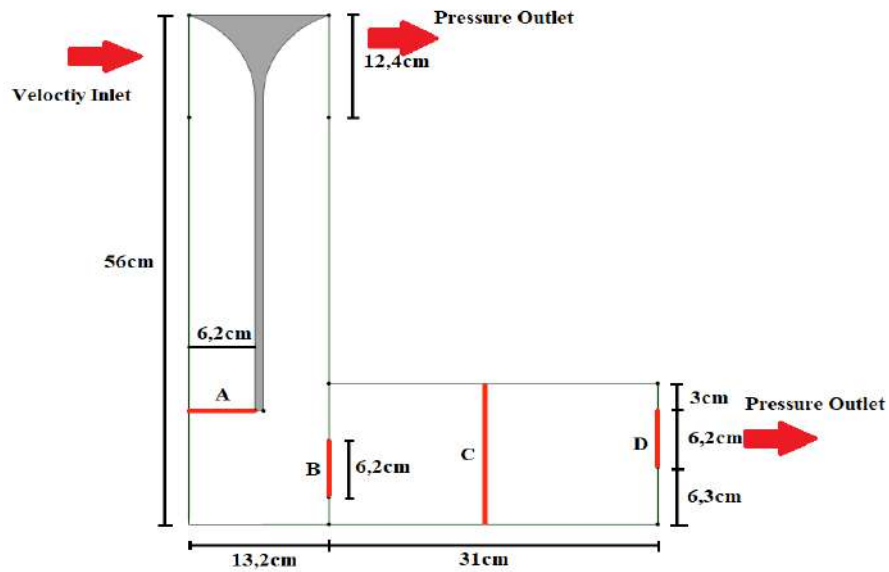


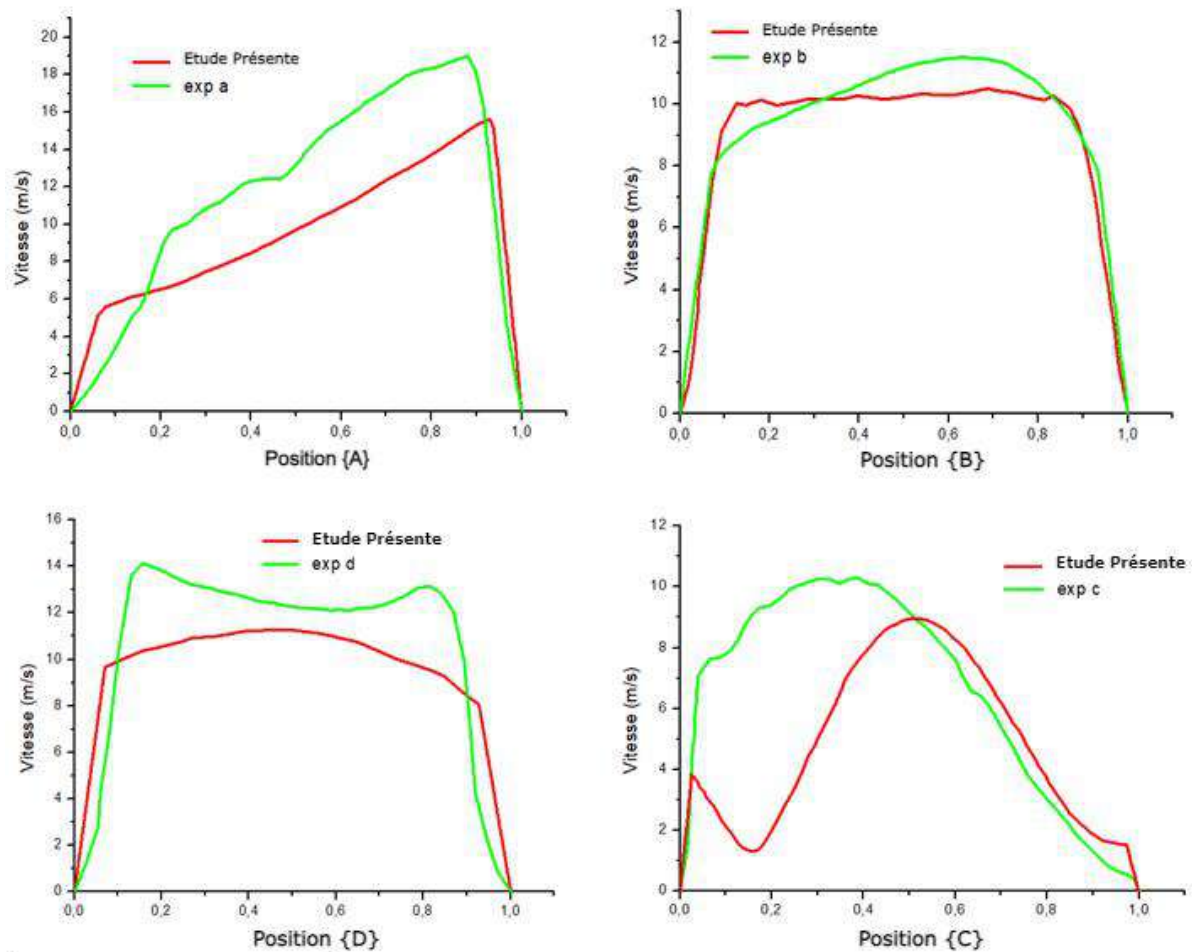
Figure III.2 : Dimensions géométriques d'un la chambre avec tour à vent.

Les calculs ont été effectués selon Dynamique des fluides computationnelle (CFD) en utilisant le programme FLUENT.

Tableau III.1 : Paramètres thermo physiques de l'air. [87]

Vitesse (m/s)	La masse volumique $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	La viscosité dynamique $\mu$ ( $\text{kg}/\text{m.s}$ )	Pression (Pa)
4.7	1.1840	$1.8435 \times 10^{-5}$	$1.01325 \times 10^5$

La figure (III.3) montre la comparaison entre notre modèle et l'étude expérimentale sur la chambre et tour à vent réalisée par F.Z. Sierra-Espinosa et al [87]. La vitesse est calculée dans les lignes **A**, **B**, **C** et **D** à l'intérieur de la chambre et de la tour à vent.



La Figure III.3: Comparaison de la variation de vitesse en fonction de position dans différents endroits.

La validation entre nos résultats et les résultats expérimentaux montre qu'il y a un bon accord entre les deux courbes, avec une erreur relative maximale et minimale acceptable. L'écart entre les différents résultats (d'étude présente et de simulation numériques) est illustré dans le tableau suivant.

Tableau III.2 : Ecart entre les résultats d'étude présente et les résultats numériques expérimentaux par F.Z. Sierra-Espinosa.

Les Points	Min/Max	La Vitesse (m/s)			Différence %	
		Expérimental (F.Z. Sierra-Espinosa)	Numérique (F.Z. Sierra-Espinosa)	étude présente	étude présente et Expérimental (F.Z. Sierra-Espinosa)	Numérique et Expérimental
<b>Point (A)</b>	Min	6,35887	6,87893	6,56237	3%	7,56%
	Max	6,70597	7,25511	9,72902	31%	7,57%
<b>Point (B)</b>	Min	9,78419	10,23984	10,05477	3%	4,45%
	Max	11,49584	11,2697	10,30909	12%	2,01%
<b>Point (C)</b>	Min	8,92017	8,93183	9,22636	3%	0,13%
	Max	1,32146	7,30162	9,05346	85%	81,90%
<b>Point (D)</b>	Min	12,2543	10,98007	11,25334	8%	11,60%
	Max	14,13532	13,45838	10,40391	26%	5,03%

En remarque d'après la Figure (III.3, A) que lorsque l'air passe à travers la section d'entrée, il accélère et affronte la paroi et change sa direction, le flux d'air se déplace vers le bas, parallèlement à la paroi droite de la tour.

On observe une grande différence de magnitude de la vitesse entre la paroi droite et la paroi gauche avant d'entrer dans la pièce, la vitesse de l'air se réduit sur la paroi de séparation et prend un profil quasi laminaire, comme le montre la figure (III.3, B).

L'air change sa direction vers le plafond puis change sa direction jusqu'à ce qu'il atteigne la fenêtre opposée. Ce courant principal se diffuse sur une grande partie de la hauteur de la pièce et forme deux cellules de recirculation, l'une dans la partie supérieure de la pièce et l'autre dans la partie inférieure de la pièce, elles sont décrites par la Figure (III.3, C).

## 2. Plan d'expérience – Méthode de Taguchi :

### 2.1 Profil de vitesse pour les neuf essais :

La figure (III.4) présente les courbes du profil de la vitesse à la sortie de la tour à vent des différents facteurs utilisés dans la présente étude.

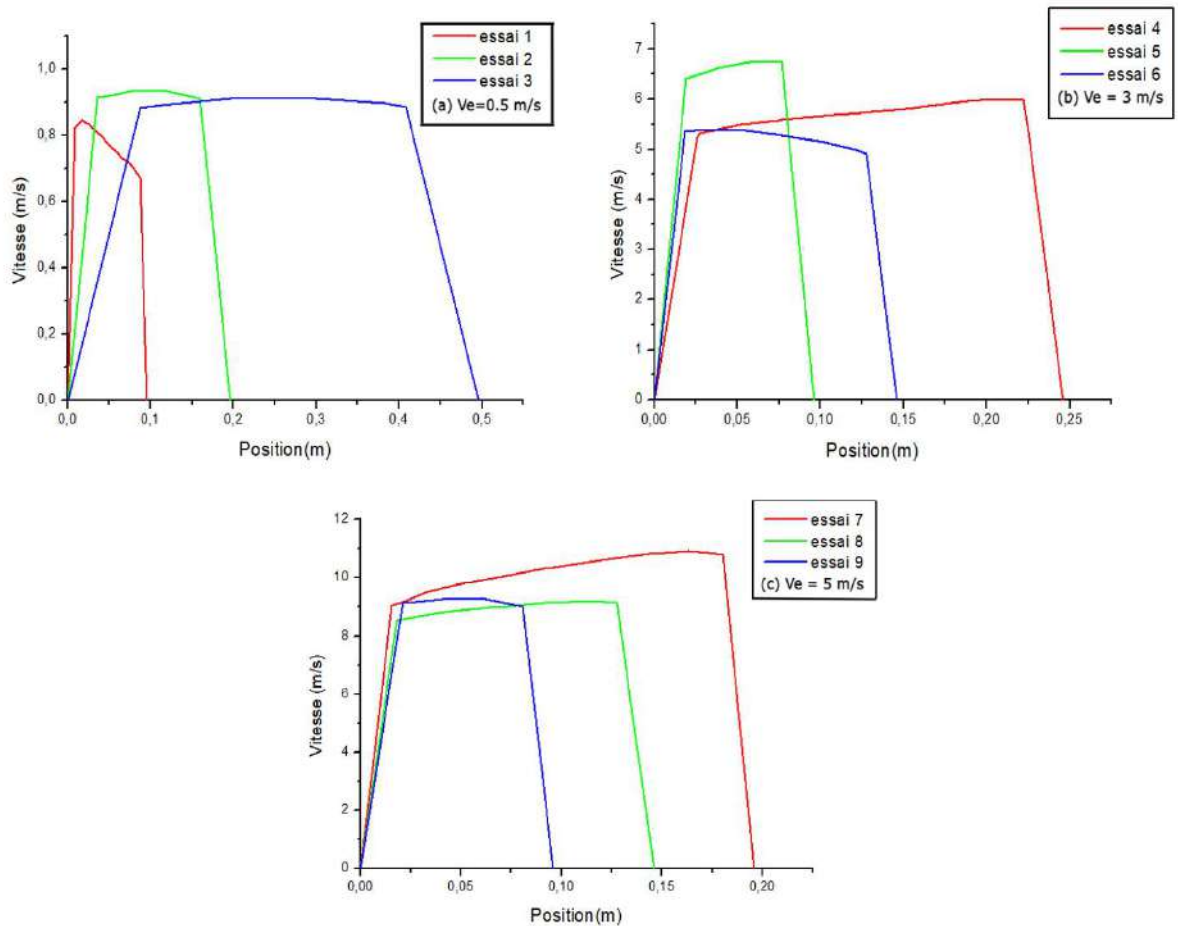


Figure III.4 : La variation de la vitesse en fonction de la position à la sortie de la tour à vent.

La figure (III.4) montre que les dimensions géométriques du système et les valeurs de vitesse à l'entrée ont un impact significatif sur les résultats et l'efficacité du système. Pour déterminer la forme optimale, on a déterminé l'effet de chaque paramètre.

## 2.2 Les Facteurs du modèle :

Après avoir introduit les résultats des 9 essais dans le logiciel Minitab, on a obtenu les courbes des effets des facteurs pour le rapport signal/bruit. La figure (III.5) montre effets des facteurs sur la qualité du système (rapport signal / bruit) de tour à vent.

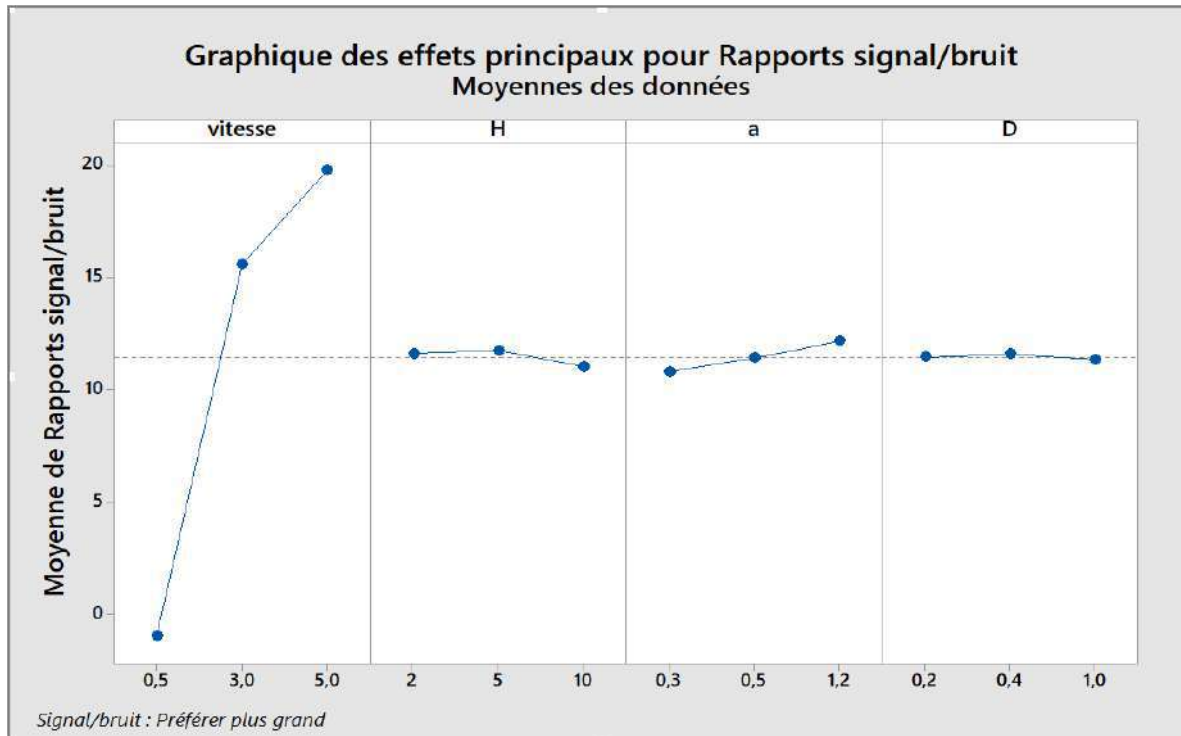


Figure III.5 : Effets de facteurs pour rapport signal / bruit.

Où l'on remarque que :

Plus la vitesse du vent et la longueur de la tour à vent (**a**) sont élevés, plus rapport signal / bruit est élevée. La largeur (**D**) a un effet négligeable sur le rapport signal/bruit. Le rapport signal/bruit augmente avec l'altitude jusqu'à 5 m ; il diminue à partir de 5 m jusqu'à 10 m.

➤ Équation du modèle optimal de tour à vent

$$V_s = -0.081 + 1.9781 V_e - 0.0917 H + 1.148 a - 0.367 D \quad (\text{III.1})$$

**V<sub>s</sub>** : vitesse à la sortie

**V<sub>e</sub>** : vitesse à l'entrée

(**H**) hauteur, (**a**) longueur et (**D**) largeur de la tour à vent.

Après le choix de la vitesse d'entrée de l'air, qui est égal à 0,5 m/s, et de la hauteur de la tour à vent, qui est égal à 2 m. Les autres facteurs sont déterminés à l'aide de l'équation obtenue, les résultats sont exposés dans le tableau suivant :

Tableau III.3 : Les facteurs optimaux de tour à vent.

$V_e$ (m/s)	H (m)	a (m)	D (m)	$V_s$ (m/s)
0.5	2	0.4	1	0.8170

### 3. Les résultats expérimentaux de la tour à vent :

#### 3.1 Variation des vitesses :

La figure (III.6) représente la Variation de la vitesse de l'air à l'entrée et à la sortie de la tour en fonction du temps correspondant à la période de 15 à 17 Mai 2022. Les essais qui ont été réalisés permettent d'observer un bon écart entre la vitesse de l'air à l'entrée et à la sortie de la tour à vent.

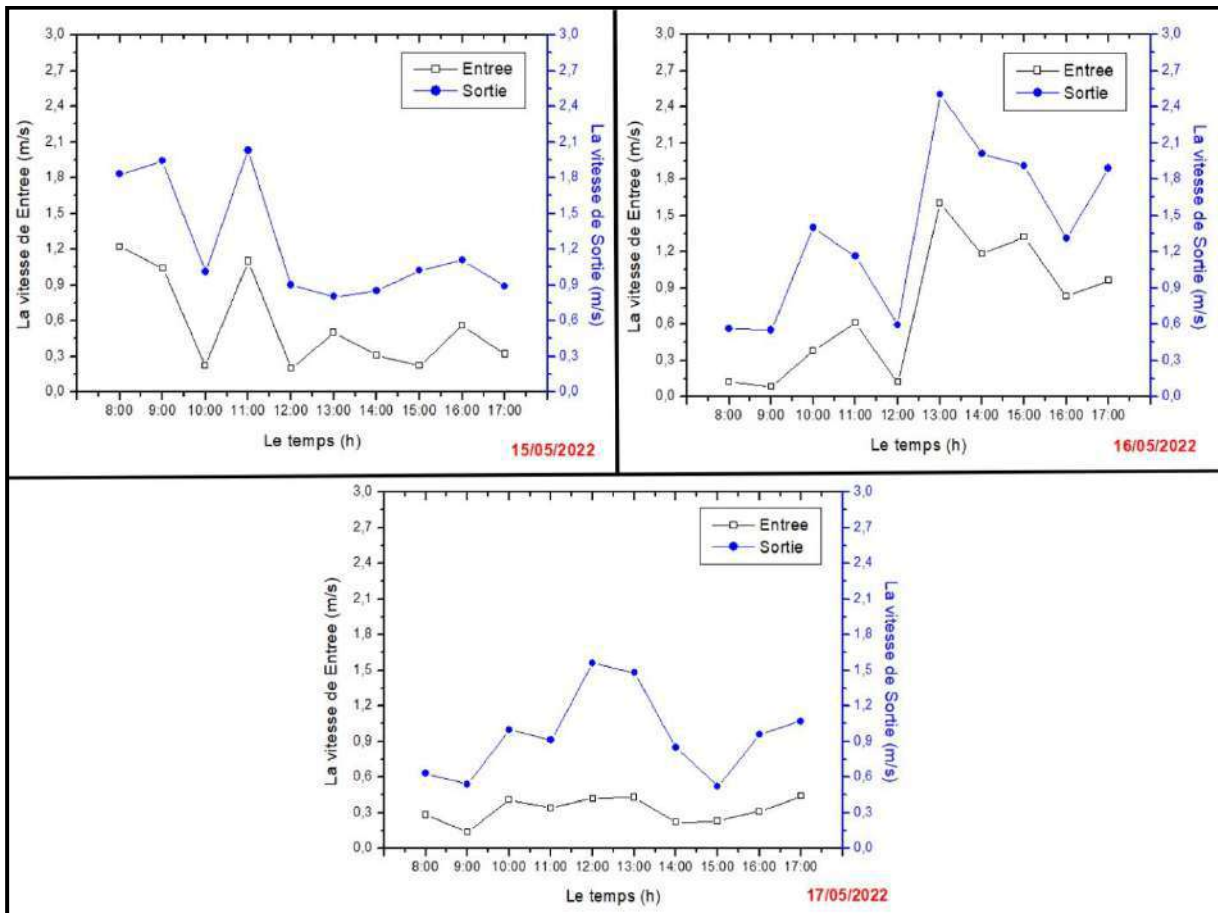


Figure III.6 : Variation de la vitesse de l'air à l'entrée et à la sortie de la tour en fonction du temps (de 15 à 17 /05/2022).



Les résultats expérimentaux montrent la faisabilité de la tour du vent, où l'on remarque une augmentation de la vitesse de l'air à sortie, telle qu'elle a été enregistrée. La valeur maximale de la vitesse du vent de 1,6 m/s, mais après le passage de l'air par la tour, la vitesse a atteint 2,5 m/s à la sortie de la tour. Pour la valeur minimale de la vitesse du vent de 0,08 m/s, la tour a permis d'augmenter la valeur de la vitesse à 0,55 m/s, ce qui indique que le système est bien efficace pour les faibles valeurs de vitesse.

#### 4. Simulation numérique d'une tour à vent couplée avec un échangeur air-sol :

Pour calculer et évaluer les performances de l'échangeur de chaleur air-sol, la vitesse a été déterminée dans différents endroits, 6 endroits à l'intérieur de la tour éolienne et 5 à l'intérieur de l'échangeur de chaleur air-sol figure (III.7).

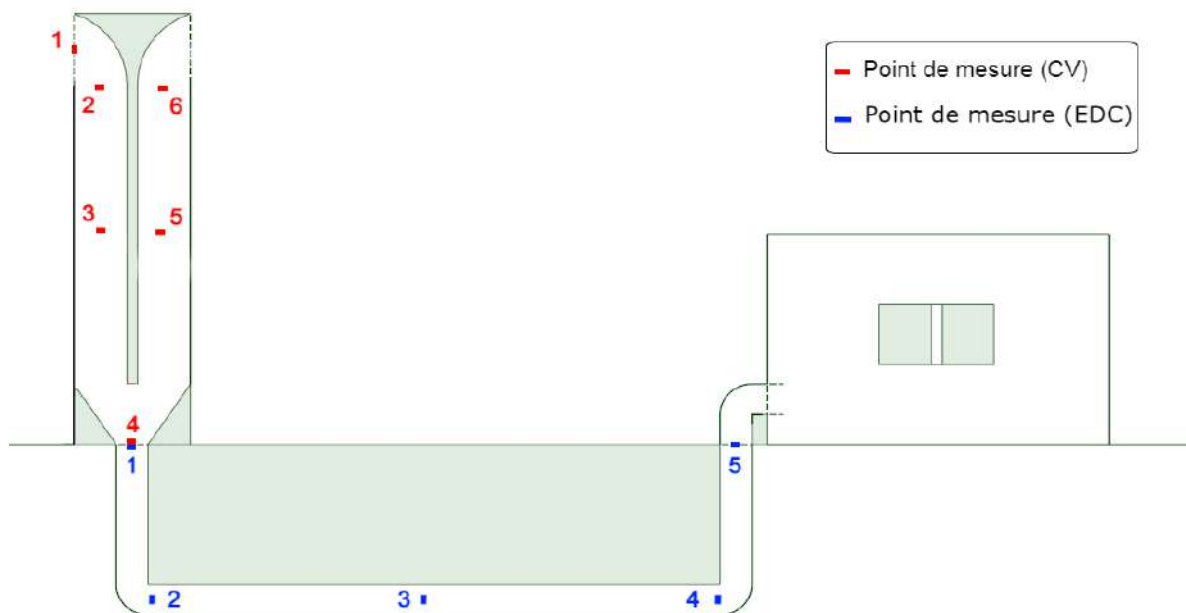


Figure III.7 : Les différents endroits dans le système.

##### 4.1 Profils de vitesse dans différents endroits de la tour à vent :

L'importance d'utiliser une tour à vent est d'améliorer les flux de ventilation naturelle. Les tours à vent dépendent de plusieurs facteurs, dont la vitesse du vent. La valeur de la vitesse du vent n'est pas constante tout au long de l'année. Les profils de vitesse à l'intérieur de la tour et les profils de température à l'intérieur de l'échangeur air-sol ont été établis pendant toute l'année, en période hivernale et estivale.

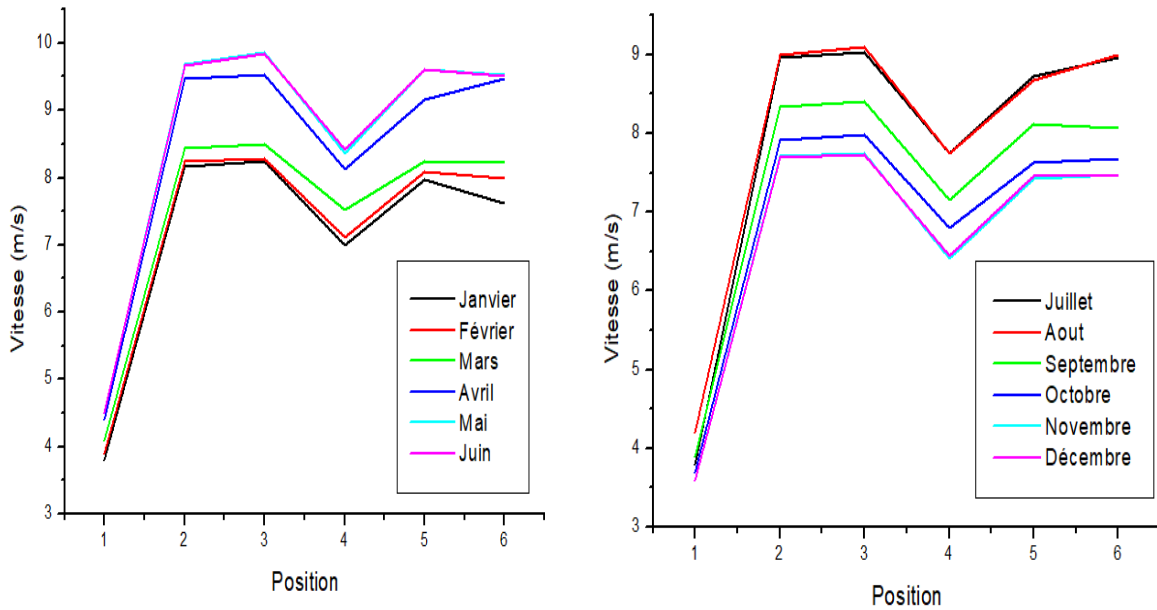


Figure III.8: Profils de vitesse dans la tour du vent.

Sur la figure (III.8), nous remarquons que la vitesse de l'air augmente de la position (1) à la position (3) pour atteindre sa plus grande valeur, et cela est dû à la diminution de la section de passage. Puis une diminution de la valeur de la vitesse est constatée au niveau de la position (4). Cette diminution est due à l'accumulation d'air à celle-ci, ensuite une certaine quantité d'air est évacuée vers la position (5). Les valeurs de vitesse les plus élevées ont été obtenues aux mois de mai et juin, où la vitesse moyenne du vent entrant dans la tour est égale 4.5 m/s et à la sortie de 8.5 m/s.

#### 4.2 Profils de Température de l'échangeur air/sol :

Les figures (III.9) et (III.10) montrent la répartition de la température le long de l'échangeur de chaleur air-sol pendant la période hivernale et estivale.

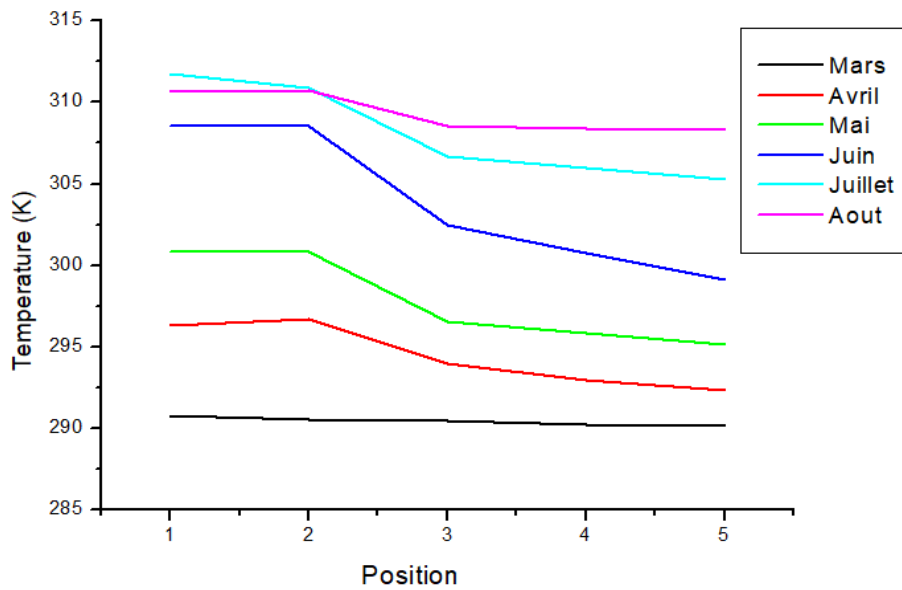


Figure III.9 : Variation de la température de l'air à l'intérieur du tube en période estivale.

Les résultats montrent une diminution de la température à la sortie de l'échangeur due à l'échange de chaleur avec le sol. La température du sol varie, pendant la période estivale, entre 290,35 K en mars et 307,35 K en aout. La température moyenne de l'air à la sortie de l'échangeur était d'environ 298,38 K. On constate que la différence entre la température ambiante et la température de sortie de l'échangeur air-sol est importante. Sa valeur maximale atteint 9,4 K, et nous remarquons que pendant le mois de mars, la température ne varie pas, ce qui est dû à la concordance entre la température du sol et la température ambiante.

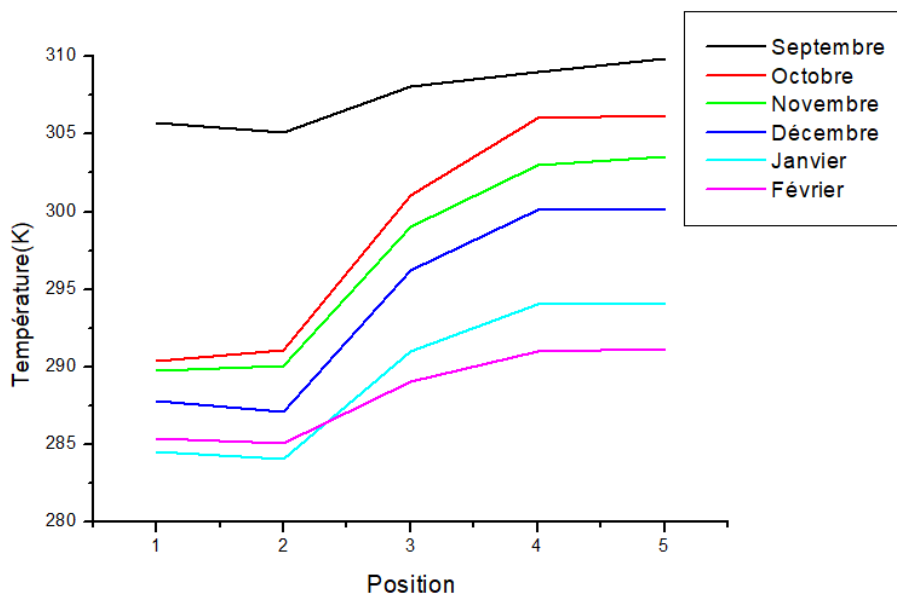


Figure III.10 : Variation de la température de l'air à l'intérieur du tube en période hivernale.

Les résultats montrent que la température à la sortie de l'échangeur augmente en raison de l'échange de chaleur avec le sol. La température du sol pendant la période hivernale varie entre 309,15 K en septembre et 292,15 K en février. La température moyenne de l'air à la sortie de l'échangeur était d'environ 300,54 K. Il apparaît une bonne variation entre la température ambiante et la température de la sortie de l'échangeur air-sol. Sa valeur maximale atteint 15,84 K.

#### 4.3 Champ thermique :

Les figures (III.11 et III.12) représentent respectivement la distribution de la température dans l'échangeur air-sol et dans la tour du vent. Aux mois de juin et de décembre, où nous avons obtenu le plus grand écart de température après la comparaison entre la température ambiante et la température à la sortie de l'échangeur air sol.

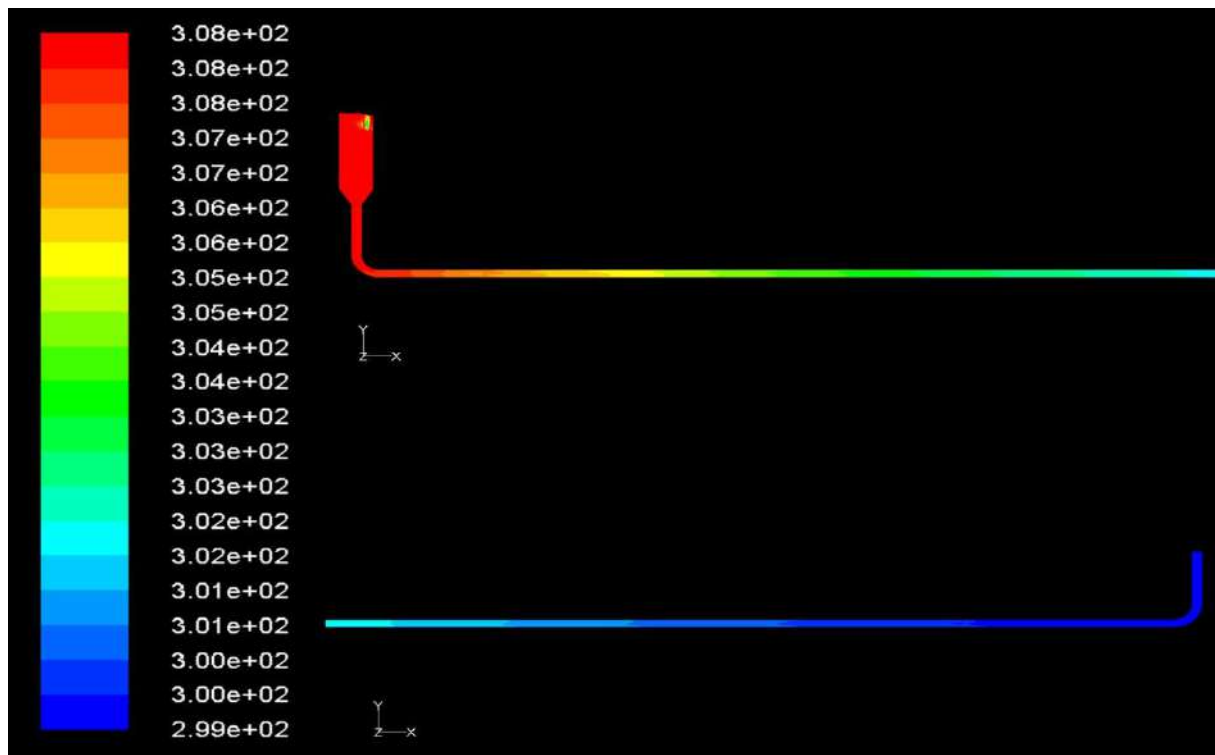


Figure III.11 : Champ thermique au mois de juin.

La figure (III.11) montre clairement la différence de température le long de l'échangeur du tube enterré pour le mois de juin, où la température ambiante moyenne est de 308,15 K et la température de l'air à la sortie de l'échangeur est de 299,15 K, donc une différence de 9 K permettant d'atteindre un bon rendement de 86%.

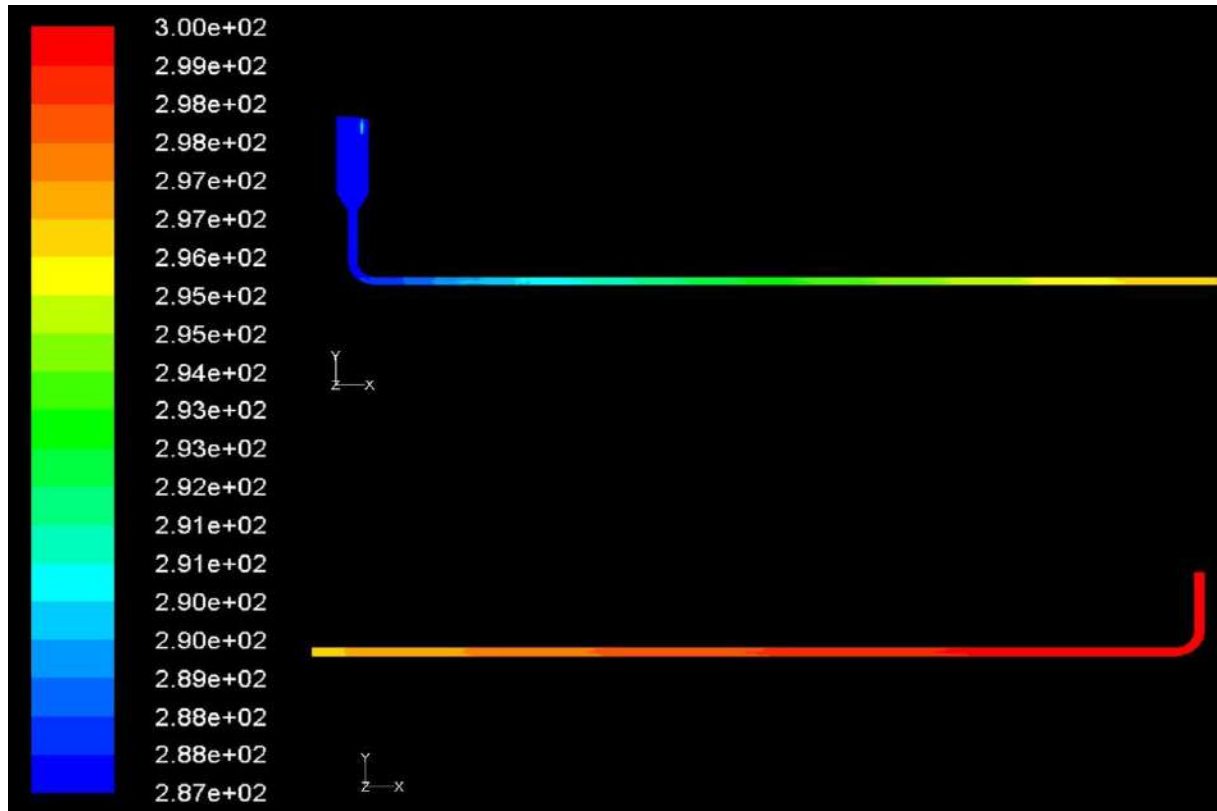


Figure III.12: Champ thermique au mois de décembre.

La figure (III.12) montre clairement le gradient de température le long de l'échangeur pour le mois de décembre, où la température ambiante moyenne est de 290,35 K et la température de l'air à la sortie de l'échangeur est de 306,19 K, soit une différence de 15,8 K et ceci est le résultat d'un très bon échange de chaleur entre le sol et l'air, et on a obtenu un bon rendement qui est de 87%.

#### 4.4 Champ dynamique :

Les figures (III.13 et III.14) présentent les Contour de vitesse dans l'échangeur air-sol et la tour du vent, aux mois de juin et de décembre.

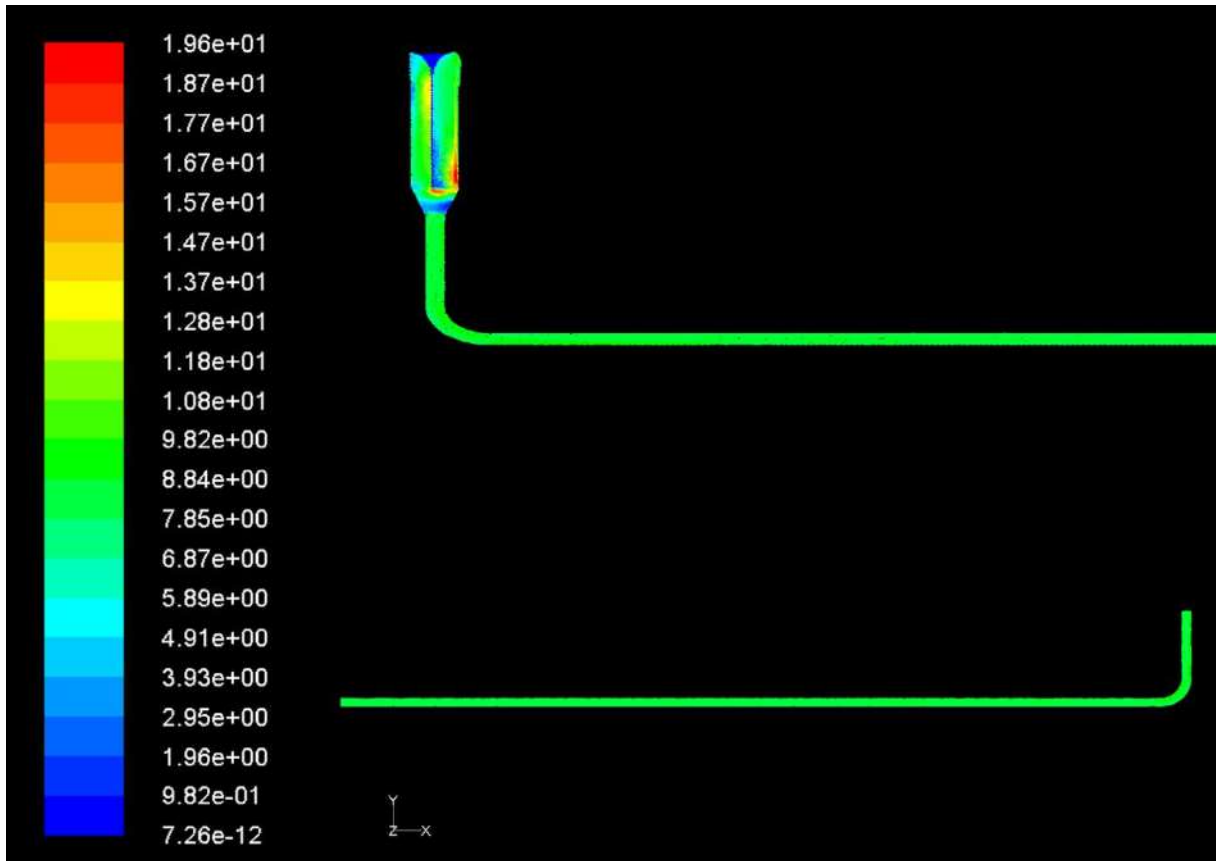


Figure III.13 : Champ dynamique au mois de Juin.

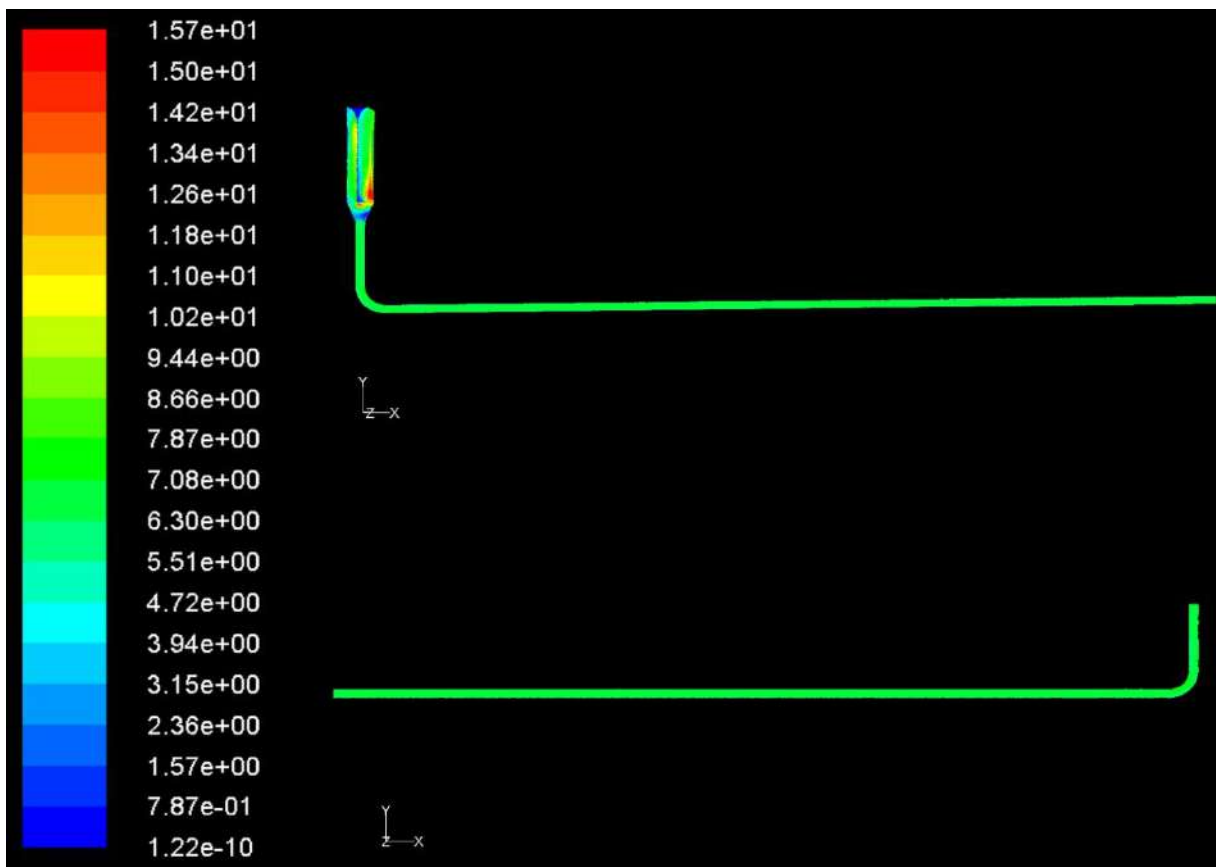


Figure III.14 : Champ dynamique au mois de décembre.

Les figures (III.13 et III.14) montrent la distribution de la vitesse dans notre modèle, où on remarque que la vitesse d'entrée dans la tour au mois de juin égale à 4,5 m/s et au mois de décembre égale à 3.7 m/s. Cette vitesse augmente le long de la tour pour atteindre une valeur d'environ 8 m/s à l'entrée de l'échangeur, ce qui est dû à la réduction de la section transversale de la tour. Ensuite, la vitesse reste presque constante à la sortie de l'échangeur de chaleur air-sol, cela est dû à la régularité très faible de la surface interne de l'échangeur, donc il n'y a pas de perte de vitesse. Nous exploitons cette vitesse grâce à son utilisation dans des grandes espaces telles que les bâtiments administratifs et les serres agricoles.

#### 4.5 Efficacité de l'échangeur :

L'efficacité de l'échangeur air-sol est définie comme étant le rapport entre la différence de la température de l'air (entrant-sortant) et la différence de température du sol et celle de l'air entrant donnée par l'expression suivante : [95]

$$\text{Efficacité du système} = \frac{T_{\text{sortie air}} - T_{\text{entrée air}}}{T_{\text{sol}} - T_{\text{entrée air}}} \quad (\text{III.2})$$

Tableau III.4 : Efficacité du système en période estivale.

Mois	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
<b>Efficacité du système (%)</b>	26	76	77	86	78	64
<b>Efficacité moyenné (%)</b>	67.83					

Tableau III.5 : Efficacité du système en période hivernale.

Mois	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février
<b>Efficacité du système (%)</b>	75	87	86	88	86	85
<b>Efficacité moyenné (%)</b>	84.5					

Les Tableaux (III.4 et III.5) indiquent l'efficacité thermique pendant les périodes estivale et hivernale. La vitesse de l'air était comprise entre 3,6 et 4,5 m/s. La valeur la plus élevée a été obtenue au mois de juin, l'efficacité du système est de 86% pour la saison de

refroidissement et 87% pour la saison de chauffage. Les résultats sont favorables, en raison d'un bon échange de chaleur entre le sol et l'air. La valeur la plus faible de l'efficacité thermique a été observée au mois de mars, avec un rendement de 26%, et cela résulte par la proximité de la température entre le sol et l'air ambiant.

## **5. Conclusion :**

La simulation de la tour éolienne avec la chambre a été réalisée par le logiciel (FLUENT). La validation de ce modèle a été faite par la comparaison entre les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux de F.Z. Sierra-Espinosa et al [87] sous le climat du nord du Mexique. En utilisant la méthode Taguchi pour déterminer l'équation qui permet de contrôler la conception de la tour à vent dans la région d'Ouargla. La tour a été construite avec ses dimensions optimales dans le but de faire des essais expérimentaux, des très bons résultats ont été obtenus, où la différence de vitesse moyenne à l'entrée et à la sortie de la tour était de 0,5 m/s. La simulation numérique permet de connaître l'efficacité du système d'échangeur de chaleur air-sol couplé à la tour éolienne pendant les périodes d'été et d'hiver.

Les résultats montrent que pendant l'été, la différence de la température entre l'entrée et la sortie du système varie de 0.08 à 9.4°C, sachant que la température ambiante moyenne est de 29.5°C.

En période hivernale, l'écart de température du système varie entre 3,2 et 15,8°C pour une température ambiante moyenne de 16,9°C.



## *Conclusion générale*

Les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation des bâtiments sont responsables d'environ la moitié de l'énergie consommée dans les bâtiments. L'intégration des dispositifs passifs dans les bâtiments peut réduire de manière significative la demande de climatisation et assurer le confort thermique. Les dispositifs passifs tels que l'échangeur de chaleur air-sol, la tour à vent et la cheminée solaire sont des éléments qui peuvent être intégrés dans le bâtiment pour produire de la ventilation et du chauffage ou du refroidissement sans avoir le besoin d'un système de ventilation mécanique.

Dans notre étude, on présente une nouvelle conception de système de refroidissement passif qui se compose d'un échangeur de chaleur air-sol (EAHE) assisté d'une tour éolienne. Ce système est destiné à la climatisation pendant la période estivale et le chauffage durant la période hivernale dans les régions semi-arides en Algérie.

Le but de ce travail est de présenter une étude de modélisation et de simulation d'un nouveau système passif composé d'un échangeur de chaleur air-sol couplé avec une tour à vent dans la région d'Ouargla.

Après la simulation numérique du système, une conception optimale de la tour éolienne a été obtenue pour la région d'Ouargla. En appliquant la méthode Taguchi. Plusieurs valeurs ont été proposées pour les facteurs géométriques de la tour (hauteur, largeur et longueur) et les facteurs dynamiques tels que la vitesse du vent. Après le choix de la vitesse d'entrée de l'air, qui est égal à 0,5 m/s, les valeurs optimales de la longueur, la largeur et la hauteur sont de 1 m, 0.4 m et 2 m respectivement. Une étude expérimentale en tour à vent a été réalisée pendant la période du 15 au 17 mai 2022, pour déterminer la vitesse d'air à la sortie. Les résultats obtenus sont très satisfaisants, car la vitesse moyenne de l'air à l'entrée était de 0,5 m/s et à la sortie de la tour à vent était de 1 m/s.

Afin d'améliorer les performances de l'échangeur de chaleur air-sol, une simulation numérique a été effectuée pour un échangeur de chaleur air-sol couplé à une tour du vent. La température moyenne de l'air à la sortie de l'échangeur en période estivale était d'environ 25,23°C et en hiver d'environ 27,4°C, sachant que la température moyenne de l'air ambiant était égale à 29,5°C en été et 16,9°C en hiver. On a constaté un écart important entre la température ambiante et la température de sortie de l'échangeur de chaleur air-sol. Elle atteint

## *Conclusion générale*

---

une valeur maximale de 9,4°C au cours de la période estivale et de 15,84°C en période hivernale.

Les résultats de la simulation montrent que la vitesse à la sortie de l'échangeur de chaleur atteint une valeur de 9,32 m/s. Grâce à cette valeur, ce système peut être utilisé pour la ventilation et le refroidissement de bâtiments multi-étages ou dans les écoles et les hôpitaux.

L'efficacité du système est de 86% pour la saison de refroidissement et 87% pour la saison de chauffage. C'est-à-dire que le système a une bonne efficacité pour améliorer la ventilation naturelle à l'intérieur de la maison et contribue également à créer une température confortable durant l'année.

Pour les travaux futurs nous préconisons :

- La réalisation d'une étude expérimentale d'un échangeur air-sol couplé avec une tour à vent pour examiner ses performances en conditions réelles.
- L'association du système avec une cheminée solaire.
- Réalisation d'une étude technico-économique du système au long de l'année

## *Références*

- [1]- Abderrahmane ,khaled , l'effet du mur d'aile sur la performance de ventilation du capteur du vent, mémoire de master université de ouargla,2019
- [2]- Daghigh R. Assessing the thermal comfort and ventilation in Malaysia and the surrounding regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015;48:681–91. doi:10.1016/j.rser.2015.04.017.
- [3]- Santamouris M, Kolokotsa D. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures, The state of the art. *Energy & Buildings* 2013;57:74–94. doi:10.1016/j.enbuild.2012.11.002.
- [4]- Hossein Ghadiri M, Mohamed MF, N. Ibrahim NL. CFD Analysis of Natural Ventilation Behaviour in Four Sided Wind Catcher. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 2012;6:12–28.
- [5]- Hosseinnia SM, Saffari H, Abdous MA. Effects of different internal designs of traditional wind towers on their thermal behavior. *Energy and Buildings* 2013;62:51–8.
- [6]- Jafarian SM, Jaafarian SM, Haseli P, Taheri M. Performance analysis of a passive cooling system using underground channel (Naghb). *Energy Build* 2010;42:559–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.025>.
- [7]- KHERBACHE FATIMA ZOHRA, Contribution à l'étude et dimensionnement d'une installation a base d'énergie géothermique pour la production d'énergie électrique. Mémoire de Magistère .Université de Tlemcen ,2015
- [8]- B. e. DOUNANE and B. HATHAT, Conception et analyse de fonctionnement d'un échangeur air-sol, Mémoire de Master, Kasdi Merbah Ouargla, p. 101, 2011.
- [9]- Djalab Hamida et Ghadri El hadj, CHAUFFAGE DE SERRE PAR ENERGIE GEOTHERMIQUE. Mémoire de Magistère .Université de M'sila, **2020**
- [10]- <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/terre-energies-renouvelables-place-geothermie-10359/>
- [11]- M. Ghyselink- Bardeau, and A. Wulleumier, Outil d'aide à la décision en matière de géothermie très basse à basse énergie (nappe salluviales et thermalisme) dans la région Midi-Pyrénées. BRGM Rport BRGM/RP-55888-FR, 2007.
- [12]- [https://www.researchgate.net/figure/Schema-simplifie-dun-cycle-binaire\\_fig3\\_258049892](https://www.researchgate.net/figure/Schema-simplifie-dun-cycle-binaire_fig3_258049892)
- [13]- <https://www.pinterest.fr/pin/180495897546384570/>
- [14]- <https://www.sodielec-berger.fr/fr/content/255/88/vmc/puit-canadien-puits-canadien>.
- [15]- I. Benchemsa, L'utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique , Mémoire de master. Université BADJI MOKHTAR ,ANNABA.2016/2017.
- [16]- <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/chauffage-pompe-chaleur-5379/>
- [17]- <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Puits-provencal.html>

[18]- Y. Ahmouda, Etude Numérique des phénomènes d'écoulement et d'échanges thermiques dans un échangeurs air/sol enterré de forme U, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider, Biskra, 2014.

[19]- S. Elbouti, A. Mabrouki, Etude d'un échangeurs de chaleur air/sol, Mémoire de master, Université KASDI MERBAH .OUARGLA, 2016.

[20]- S.F. Ahmed\*, al. Physical and hybrid modelling techniques for earth-air heat exchangers in reducing building energy consumption: Performance, applications, progress, and challenges: Solar Energy. 2021.

[21]- Jakhar S, Misra R, Bansal V, Soni MS (2015) Thermal performance investigation of earth air tunnel heat exchanger coupled with a solar air heating duct for northwestern India. Energy Build 87:360–369. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.070>

[22]- Agrawal KK, Misra R, Yadav T et al (2018) Experimental study to investigate the effect of water impregnation on thermal performance of earth air tunnel heat exchanger for summer cooling in hot and arid climate. Renew Energy 120:255–265. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.070>

[23]- Serageldin AA, Abdelrahman AK, Ookawara S (2016) Earth-air heat exchanger thermal performance in Egyptian conditions: experimental results, mathematical model, and computational fluid dynamics simulation. Energy Convers Manage 122:25–38. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.053>

[24]- Misra AK, Gupta M, Lather M, Garg H (2015) Design and performance evaluation of low cost Eeto air heat exchanger model suitable for small buildings in arid and semi arid regions. KSCE J Civ Eng 19:853–856. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-0597-1>

[25]- Gan G (2014) Dynamic interactions between the ground heat exchanger and environments in earth-air tunnel ventilation of buildings. Energy Build 85:12–22. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.030>

[26]- Barakat S, Ramzy A, Hamed AM, el Emam SH (2016) Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system. Energy Convers Manage 111:137–146. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.060>

[27]- Al-Ajmi F, Loveday DL, Hanby VI (2006) The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate. Build Environ 41:235–244. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.027>

[28]- Ahmed SF, Khan MMK, Amanullah MTO et al (2015) Performance assessment of earth pipe cooling system for low energy buildings in a subtropical climate. Energy Convers Manage 106:815–825. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.030>

[29]- Espace Info Énergie de l'Isère 14, avenue Benoît Frachon - 38400 Saint-Martin-d'Hères, [www.infoenergie38.org](http://www.infoenergie38.org)

[30]- Bruno HERZOG , Le Puits Canadien , livre , Eyrolles 2011, France, 2007

[31]- [https://conseils.xpair.com/consulter\\_savoir\\_faire/puits-canadien-ventilation-double-flux/diff%C3%A9rents\\_types\\_tubes.htm](https://conseils.xpair.com/consulter_savoir_faire/puits-canadien-ventilation-double-flux/diff%C3%A9rents_types_tubes.htm)

[32]- H. Benfateh, Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat, Mémoire de Magistère. Université Mohamed Khider, BISKRA, 2009.

[33]- Elmualim AA. Evaluating the performance of windcatchers for natural ventilation. The University of Reading; 2003.

[34]- Zendehboudi A, Zendehboudi A, Hashemi R. An Investigate on the Performance of One-Sided and Four-Sided Windcatchers in the Southwest of IRAN. Int J U- EServ Sci Technol 2014:73–84, (<http://www.earticle.net/Article.aspx?sn=231n=2831>), [accessed 30.12.14].

- [35]- traditional architecture. International Conference Passive Low Energy Cool. Built Environ.. Santorini, Greece, p. 71–76; 2005.
- [36]- Valipour E, Oshrieh R. Survey of traditional wind catchers of the middle east (ASCE). ICSDEC, 2012 2012; 2012. p. 912–20.
- [37]- Roaf S. Air-conditioning avoidance: lessons from the windcatchers of Iran. International Conference Passive LowEnergy Cool Built Environmen, Santorini, Greece:1053–1057; 2005.
- [38]- Bahadori MN, Dehghani-sanij A. Wind Towers: architecture, Climate and Sustainability. Springer; 2014.
- [39]- Fanood MR. The role of four key structures in the creation and survival of cultural landscapes in the desert environment of Iran. J Arch Conserv 2014;1–13. <http://dx.doi.org/10.1080/13556207.2014.985490>.
- [40]- Sayigh A. Sustainability, energy and architecture: case studies in realizing green buildings, 1st ed. Watham: Academic Press; 2013.
- [41]- Mostafaeipour A, Bardel B, Mohammadi K, Sedaghat A, Dinpashoh Y. Economic evaluation for cooling and ventilation of medicine storage warehouses utilizing wind catchers. Renew Sustain Energy Rev 2014;38:12–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.087>.
- [42]- Iyengar K. Sustainable architectural Design: an overview. Taylor & Francis; 2015.
- [43]- Patel D, Rajan S. Design of a passive and wind speed responsive wind catcher for energy efficient buildings. IJIRST –International J Innov Res Sci Technol 2015;1:125–8.
- [44]- Pirhayati M, Ainechi S, Torkjazi M, Ashrafi E. Ancient Iran, the origin land of wind catcher in the world. Res J Environ Earth Sci 2013;5:433–9.
- [45]- Soelberg C, Rich J. Sustainable construction methods using ancient /IBAD GIR/N (Wind Catcher) Technology. Constr Res Congr 2014@sConstruction a Glob Netw, ASCE 2014:1576–85.
- [46]- Foruzanmehr A. The wind-catcher: users' perception of a vernacular passive cooling system. Arch Sci Rev 2012;55:250–8. <http://dx.doi.org/10.1080/00038628.2012.722070>.
- [47]- Solaripedia n.d. Available from: <<[http://www.solaripedia.com/13/205/2086/wind\\_tower\\_dubai\\_bastakiyya\\_with\\_minaret.html](http://www.solaripedia.com/13/205/2086/wind_tower_dubai_bastakiyya_with_minaret.html)>>.
- [48]- Khan N, Su Y, Riffat SB. A review on wind driven ventilation techniques. Energy Build 2008;40:1586–604. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.015>.
- [49]- Saeli M, Saeli E. Analytical studies of the Sirocco room of Villa Naselli-Ambleri: a XVI century passive cooling structure in Palermo (Sicily). J Cult Herit 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2014.06.006>.
- [50]- Nasri M, Hekmatpanah R. Productivity and energy management in desert urban. World Acad Sci Eng Technol 2010;4:379–82.
- [51]- Hughes BR, Calautit JK, Ghani SA. The development of commercial wind towers for natural ventilation: a review. Appl Energy 2012;92:606–27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066>.
- [52]- Mahmoudi M. Wind catcher: the symbol of iranian architecture. Tehran: Yazda; 2007.
- [53]- Mahmoudi M. Analysis on iranian wind catcher and its effect on natural ventilation as a solution towards sustainable architecture ( Case Study: yazd). World Acad Sci Eng Technol, 5 2009; 2009. p. 574–9.
- [54]- Masrouf MM, Abbasi M, Hallaj HM. Study of windcatchers: the mass flow rate and inlet air to the building in traditional windcatchers. Aust J Basic Appl Sci 2012;6:159–65.

- [55]- Dehghani-sanij AR, Soltani M, Raahemifar K. A new design of wind tower for passive ventilation in buildings to reduce energy consumption in windy regions. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;42:182–95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.018>.
- [56]- Panoramio n.d. Available from: <<<http://www.panoramio.com/photo/83605606>>> [accessed 20.01.15].
- [57]- Tourism n.d. Available from: <<<http://tourism.kish.ir/fa/view/ghanat>>> [accessed 25.03.15].
- [58]- Rickasereh n.d. <<http://rickasereh.persianblog.ir/>> [accessed 27.03.15].
- [59]- Kwon C. Form or performance in sustainable architecture. *Int J Sustain Build Technol Urban Dev* 2013;5:21–7. <http://dx.doi.org/10.1080/2093761X.2013.806061>.
- [60]- Hughes BR, Ghani S aaA. Investigation of a windvent passive ventilation device against current fresh air supply recommendations. *Energy Build* 2008;40:1651–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.024>.
- [61]- Jones BM, Kirby R. The performance of natural ventilation windcatchers in schools - A comparison between prediction and measurement. *Int J Vent* 2011;9:273–86.
- [62]- Southwest United States, Springdale & Zion National Park n.d. Available from: <  
<<http://www.mightymac.org/southwest/>>> [accessed 08.04.15].
- [63]- Monodraught. Available from: <[http://www.monodraught.com/documents/downloads/download\\_313.pdf](http://www.monodraught.com/documents/downloads/download_313.pdf)> [accessed 23.02.15]; 2011
- [64]- M.N. Bahadori, A. Dehghani-sanij, *Wind Towers: Architecture, Climate and Sustainability*, Springer, 2014.
- [65]- B.R. Hughes, J.K. Calautit, S.A. Ghani, The development of commercial wind towers for natural ventilation: a review, *Appl. Energy* 92 (2012) 606–627, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066>.
- [66]- A. Hashemi, F. Barmaki, *Eco-architecture IV: harmonisation between architecture and nature*, in: C.A. Brebbia (Ed.), *Eco-architecture IV: Harmonisation Between Architecture and Nature*, WIT Press, 2012, pp. 27–38.
- [67]- S. Mazouz, A. Torkia, Quantitative evaluation of the performance of a wind tower for natural ventilation and passive cooling in a hot and arid area of Southern Algeria: a case of ouled, *J. Architect. Plann.* 26 (2014) 65–75.
- [68]- A. Niktash, B.P. Huynh, A comparison of two computational methods (RANS and LES) in analysing of ventilation flow through a room fitted with a two- sided windcatcher for free flow condition. *ICCM2015*, 14-17th July, Auckland, NZ, 2015, p. 1–8.
- [69]- S. Gage, J. Graham, Static split duct roof ventilators, *Build. Res. Inf.* 28 (2000) 37–41, <https://doi.org/10.1080/09613210050073698>.
- [70]- A.A. Elmualim, H.B. Awbi, Wind tunnel and CFD investigation of the performance of “windcatcher” ventilation systems, *Int. J. Vent.* 1 (2002) 53–64.
- [71]- M. Maneshi, A. Rezaei-Bazkiaei, A.S. Weber, G.F. Dargush, A Numerical Investigation of Impact of Architectural and Climatic Parameters of Windcatcher Systems on Induced. *Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE)*, 9-15 November. Texas, USA. 1-15: 2012. doi:10.1115/IMECE2012-87139.

- [72]- M.R. Fanood, The role of four key structures in the creation and survival of cultural landscapes in the desert environment of Iran, *Journal of Architectural Conservation* (2014) 1–13, <https://doi.org/10.1080/13556207.2014.985490>.
- [73]- H. Montazeri, R. Azizian, Experimental study on natural ventilation performance of one-sided wind catcher, *Build. Environ.* 43 (2008) 2193–2202, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.01.005>.
- [74]- A. Mostafaepour, B. Bardel, K. Mohammadi, A. Sedaghat, Y. Dinpashoh, Economic evaluation for cooling and ventilation of medicine storage warehouses utilizing wind catchers, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 38 (2014) 12–19, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.087>.
- [75]- M.H. Ghadiri, N.L.N. Ibrahim, M. Dehnavi, The effect of tower height in square plan wind catcher on its thermal behavior, *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 5 (2011) 381–385.
- [76]- L.C. Haw, O. Saadatian, M.Y. Sulaiman, S. Mat, K. Sopian, Empirical study of a wind-induced natural ventilation tower under hot and humid climatic conditions, *Energy Build.* 52 (2012) 28–38, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.016>.
- [77]- A.A.A. Dehghan, M.K. Esfeh, M.D. Manshadi, Natural ventilation characteristics of one-sided wind catchers: experimental and analytical evaluation, *Energy Build.* 61 (2013) 366–377, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.048>.
- [78]- M.M. Masrour, M. Abbasi, H.M. Hallaj, Study of windcatchers : the mass flow rate and inlet air to the building in traditional windcatchers, *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 6 (2012) 159–165.
- [79]- M. Afshin, A. Sohankar, M.D. Manshadi, M.K. Esfeh, An experimental study on the evaluation of natural ventilation performance of a two-sided wind- catcher for various wind angles, *Renewable Energy* 85 (2016) 1068–1078, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.036>.
- [80]- Vosoughifar H. R. Consumption reduce by windcatcher // Civil Engineering Seminar. 2005. Kerman, Iran. P. 2.
- [81]- pérez-lombard l, ortiz j, pout c. a review on buildings energy consumption information. *energy build* 2008;40:394–8.
- [82]- alemu at, saman w, belusko m. a model for integrating passive and low energy airflow components into low rise buildings. *energy build* 2012;49:148–57.
- [83]- kwang tan ay, hien wong n. influences of ambient air speed and internal heat load on the performance of solar chimney in the tropics. *sol energy* 2014;102:116–25.
- [84]- ramponi r, angelotti a, blocken b. energy saving potential of night ventilation: sensitivity to pressure coefficients for different european climates. *appl energy* 2014;123:185–95.
- [85]- al-waked r, behnia m. enhancing performance of wet cooling towers. *energy convers manage* 2007;48:2638–48.
- [86]- cortinovis gf, paiva jl, song tw, pinto jm. a systemic approach for optimal cooling tower operation. *energy convers manage* 2009;50:2200–9.
- [87]- v.a. reyesa, f.z. sierra-espinosab, flow field obtained by piv technique for a scaled building-wind tower model in a wind tunnel. *energy and buildings*.107 (2015) 424-433
- [88]- dali youcef souhila,démarche qualité dans la formulation des bétonspar la méthode taguchi, mémoire de master, université abou bekr belkaid - tlemcen, 2017
- [89]-<https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/>
- [90]- sabrin korichi et al, performance analysis of horizontal ground source heat pump for building cooling in arid saharan climate: thermal-economic modeling and optimization on trnsys, *renewable energy environmental sustainability*.2021

[91] [https://www.meteoblue.com/fr/meteo/historyclimate/climatemodelled/ouargla\\_alg%c3%a9rie\\_2485801](https://www.meteoblue.com/fr/meteo/historyclimate/climatemodelled/ouargla_alg%c3%a9rie_2485801)

[92] [https://fr.weatherspark.com/y/148003/m%c3%a9t%c3%a9o-moyenne-%c3%a0-ouargla\\_alg%c3%a9rie-tout-au-long-de-l'ann%c3%a9e](https://fr.weatherspark.com/y/148003/m%c3%a9t%c3%a9o-moyenne-%c3%a0-ouargla_alg%c3%a9rie-tout-au-long-de-l'ann%c3%a9e)

[93]- Aissa gounni et al, 3D CFD study of geothermal heat exchanger in region of Ouargla, universite kasdi Merbah, Ouargla, 2022.

[94]- Sayeh menhoudj et al, study of the energy performance of an earth/air heat exchanger for refreshing buildings in algeria, energy and buildings .158 (2018) 1602–1612.

[95]- Mr. Omar HAMDY, Contribution à l'étude de l'efficacité d'un système géothermique (air-sol) placé dans une zone aride « casde la région de Biskra », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2020.



## Résumé

Dans les premiers mètres de profondeur, la température du sous-sol varie en fonction des saisons. À partir de quelque mètre de profondeur, la température naturelle du sous-sol reste généralement constante. Par conséquent, la géothermie à faible profondeur exploite cette réserve de chaleur pour assurer les besoins de chauffage en hiver ou de refroidissement des bâtiments en été. L'objectif de l'étude est de réaliser un refroidissement passif, par l'utilisation d'un système d'échangeur de chaleur air-sol associé à un système de tour à vent. Tout d'abord, une approche d'optimisation basée sur la simulation et la méthode de Taguchi est appliquée pour obtenir les dimensions optimales de la tour à vent, sous le climat de Ouargla. Les dimensions suivantes ont été obtenues : une hauteur de 2 m, une longueur de 1 m et une largeur de 0,4 m. Ensuite, une simulation numérique tridimensionnelle de l'échangeur air/sol couple avec la tour à vent a été réalisée à l'aide du programme FLUENT pendant une durée d'un an. Les résultats obtenus ont montré une bonne variation de température entre l'entrée et la sortie du système, car elle atteignait sa valeur maximale en été de 9,4 °C en hiver de 15,84 °C. Après avoir déterminé l'efficacité du système, il s'est avéré qu'il atteint 0,68 en période estivale et en période hivernale 0,8.

**Les mots clé :** tour de vent, Echangeur Air /sol, ventilation naturelle, méthode de Taguchi, dynamique des fluides computationnelle CFD.

## ملخص

في الأمتار الأولى من عمق الأرض، تختلف درجة حرارة تحت سطح الأرض حسب الفصول. بداية من بضعة أمتار من العمق، تظل درجة الحرارة الطبيعية للتربة ثابتة على عموماً. لذلك، فإن احتياطي درجة الحرارة يستغل عن طريق الطاقة الحرارية الجوفية الضحلة وهذا لتلبية احتياجات التدفئة أو التبريد في المباني. الهدف من الدراسة هو تحقيق التبريد السلبي، باستخدام نظام مبادل حراري جو-أرضي مرتبط بنظام برج الرياح. أولاً، يتم تطبيق نهج التحسين القائم على المحاكاة وطريقة Taguchi للحصول على الأبعاد المثلى لبرج الرياح في ظل مناخ ورقلة. تم الحصول على الأبعاد التالية: ارتفاع 2 م ، طول 1 م وعرض 0.4 م بعدها، تم إجراء محاكاة رقمية ثلاثية الأبعاد للمبادل الحراري هواء/ الأرض مقترن برج الرياح باستخدام برنامج FLUENT لمدة سنة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها وجود تباين جيد في درجة الحرارة بين مدخل ومخرج النظام حيث بلغت أقصى قيمة لها في صيف 9.4C وفي شتاء 15,84°C. بعد تحديد المرادوية للنظام اتضح انها تبلغ في الفترة الصيفية 68 % وفي الفترة الشتوية 80 %.

**كلمات المفتاحية :** برج الرياح مبادل الحراري هوائي ارضي تهوية طبيعية طريقة Taguchi, تصميم تجريبي الديناميكا الموانع الحسابية CFD.