

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université : **ABOU BACKR BELKAID - Tlemcen**
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magistère

Spécialité : Énergétique

Option : Dynamique Des Transferts

Travail présenté par : Mr. SAKHRI Nasreddine

Étude Numérique d'Un Système de Ventilation Naturelle de Type Tour à Vent dans les Régions Arides (Cas de la ville de Béchar)

Devant le jury :

Mr. AZZI. A	MC (U. ABB Tlemcen)	Président
Mr. KORTI. A. N	MC (U. ABB Tlemcen)	Examineur
Mr. ALIANE. K	MC (U. ABB Tlemcen)	Examineur
Mr. DRAOUI. B	Pr (U. Béchar)	Encadreur
Mr. SAÏM .R	Pr (U. ABB Tlemcen)	Invité

Année universitaire : 2014/2015

Dédicaces

A

Mes chers parents

Ma famille, Mes frères et Ma sœur

Mes proches et Mes amis

Tous ceux qui m'ont aidé et encouragé

SAKHRI Nasreddine

Remerciements

Dieu merci tout d'abord.

Le présent travail a été réalisé sous la direction du professeur **DRAOUI Belkacem**, qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements de m'avoir guidé et encouragé tout au long de ce travail.

Je remercie le Docteur **AZZI. A** qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury, malgré ses multiples occupations, qu'il veuille trouver ici, l'expression de ma gratitude pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Je suis très sensible à l'honneur que me font messieurs **KORTI .N** et **ALIANE. K**, en acceptant, malgré leurs nombreuses charges, de participer à ce jury.

Je tiens à remercier également Mr **SAÏM. R** et les enseignants du laboratoire **ETA** (Université de Tlemcen) et du laboratoire **ENERGARID** (Université de Béchar) pour leurs aides et leurs encouragements.

Je dois les remerciements à tous ceux qui ont inspiré, aidé et contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé

La ventilation naturelle est une solution permanente en présence du vent dans l'assurance du confort thermique dans les zones arides tel que la ville de Béchar (Sud Ouest de l'Algérie). La technique de la tour à vent est mise en question afin de prouver son efficacité dans la ventilation des locaux d'habitation en la comparant avec la ventilation transversale. L'étude prise en compte l'environnement extérieur (Macro climat) et intérieur (Micro climat) et l'interaction entre les deux régions. Les équations qui gouvernent l'écoulement de l'air dans la couche limite atmosphérique (CLA) et à l'intérieur de la pièce sont résolues à l'aide d'un code CFD basée sur la méthode des volumes finis (MVF). Les résultats sont par la suite validés avec les études expérimentales disponibles dans la littérature. Les résultats sont satisfaisants ce qui prouve l'efficacité de la technique des tours à vent.

Mots clefs : ventilation naturelle, zones arides, tour à vent, confort thermique, vent, conditions climatiques.

ملخص

تعد التهوية الطبيعية في وجود الرياح حلاً دائماً لتوفير الرفاهية الحرارية خاصة في المناطق الجافة على غرار مدينة بشار (جنوب غرب الجزائر). وضعت تقنية برج الرياح موضع الدراسة لتوضيح فعاليتها في تهوية المساكن وذلك بمقارنتها مع تقنية التهوية المتقابلة. أخذت الدراسة في الحسبان المحيط الخارجي (Macro climat) و الداخلي (Micro climat) والتداخل و التأثير بينهما. المعادلات التي تحكم تدفق و سريان الهواء في الطبقة الجوية الحدية (CLA) و داخل الغرفة حلت عن طريق كود CFD مبني على أساس طريقة الاحجام المنتهية (MFV). في الاخير النتائج المحصل عليها قورنت مع الدراسات التجريبية المتوفرة في المراجع لتأكيدھا. النتائج المحصل عليها كانت مرضية ما يثبت فعالية تقنية ابراج الرياح.

الكلمات المفتاحية : التهوية الطبيعية, المناطق الجافة, برج الرياح, الرفاهية الحرارية, الرياح, الظروف الجوية.

Abstract

Natural ventilation is considered as permanent solution in presence of wind to ensure the thermal comfort especially in arid zones as a city like Béchar (South West of Algeria). The wind tower technique is questioned to improve its effectiveness in ventilating dwelling by compare it with transversal ventilation. The study takes in consideration the exterior (Macro climat) and interior environment (Micro climat) and the interaction between the two regions. The governing equations of air flow in the atmospheric boundary layer (CLA) and inside the room are resolved by a CFD code based on finite volumes method (MFV). The results are finally validated by comparison with the experimental studies available in the literature. The results were satisfied which improve the efficiency of wind tower technique.

Key words: Natural ventilation, arid zones, wind tower, thermal comfort, wind, climatic conditions.

Sommaire

	Introduction générale	01
	Chapitre 01	État de l'art 03
	Chapitre 02	Généralités 09
2.1	Introduction	10
2.2	Climat et paléoclimat	10
2.3	Classification des climats terrestres.....	10
2.3.1	Classifications génétiques	10
2.3.2	Classifications empiriques	11
a)	Classification des climats de Martonne	11
b)	Classification des climats de Köppen	12
2.4	Les climats terrestres	12
1-	Climats équatoriaux	13
2-	Climats tempérés	13
3-	Climats polaires	13
4-	Climats Neigeux	13
5-	Climats arides	13
2.5	Le climat de l'Algérie	14
2.5.1	Températures	15
2.5.2	Précipitations	15
2.5.3	Les vents	16
2.6	Répartitions des zones climatiques de l'Algérie	17
2.7	Climat de Béchar	18
2.8	Confort thermique	21
	Métabolisme	21
	Degré d'isolement des vêtements	22
	Humidité relative (HR)	22
	Température de confort ou température opérative	23
	Vitesse de l'air	24
	Indices de confort	25
	Zones de confort	26
2.9	Qualité de l'Air Intérieur QAI	26
2.10	Amélioration de la qualité de l'air intérieur par ventilation	27
2.11	Économie d'énergie par ventilation naturelle	28
2.12	Ventilation naturelle	28
2.13	Types de ventilation naturelle	29
2.13.1	Ventilation d'un seul côté mono exposé	29
2.13.1.1	Ouverture unique en façade	29
2.13.1.2	Deux ouvertures en façade	30
2.13.2	Ventilation transversale	30
2.13.3	Tour à vent et variantes	31
2.13.4	Ventilation par cheminées	31
2.13.5	Ventilation par atrium	32
2.13.6	Ventilation par puits canadiens	32
2.13.7	Ventilation par façade double peaux (FDP)	33

2.14	Avantages et inconvénients de la ventilation naturelle	33
2.15	L'origine du vent	34
2.16	Évaluation du gisement national du vent	35
	Chapitre 03 Les tours à vent	39
3.1	Introduction	40
3.1	Revue historique	40
3.2	La ventilation naturelle en utilisant la tour à vent	44
3.3	Variation Micro et Macro climatique	45
3.4	Conception de la tour à vent	46
3.4.1	Éléments de la tour à vent	46
3.4.2	Hauteur de la tour à vent	47
3.4.3	Dimensionnement et positionnement des ouvertures	48
3.4.4	Tours à vent unidirectionnelles et multidirectionnelles	49
3.4.4.1	Tour à vent unilatérale (mono face)	50
3.4.4.2	Tour à vent bidirectionnelle (à deux faces)	51
3.4.4.3	Tour à vent à trois faces	51
3.4.4.4	Tours à vent à quatre faces et hexaédrique	51
3.4.5	Tours à vent rectangulaires et circulaires	52
3.4.6	Sections transversales (canal de passage)	53
3.5	Techniques de refroidissement en utilisant les tours à vent	54
3.5.1	Refroidissement par évaporation	54
3.5.1.1	Tour à vent avec colonnes mouillées et surfaces mouillées	54
3.5.1.2	Tours à vent avec refroidissement souterrain	55
3.5.2	Les tours à vent avec cheminée solaire	55
3.5.3	Ventilation nocturne structurelle	56
3.5.4	Les tours à vent intégrés à la cour ouverte	57
3.5.5	Les tours à vent intégrés aux toits incurvés	58
3.6	Tours à vent commerciales	59
	Chapitre 04 Modélisation numérique de la ventilation naturelle	60
4.1	Introduction	61
4.2	L'ingénierie du vent	61
4.3	CFD dans l'ingénierie du vent	61
4.3.1	Méthodologie de la CFD	62
4.4	La couche limite atmosphérique (CLA)	63
4.5	Les effets du vent sur les bâtiments	65
4.6	Écoulement turbulent	66
4.7	Les équations gouvernantes	67
4.7.1	Conservation de la masse	68
4.7.2	Les équations de Navier-Stokes	69
4.8	Méthodes de discrétisation	69
4.8.1	Méthode des différences finies	70
4.8.2	Méthode des éléments finis	70
4.8.3	Méthode des volumes finis	70
4.9	Les schémas de discrétisation	71
	Conservatisme	72
	Bornage	72
	Transportation	72

4.10	Maillage numérique	73
4.11	Modélisation de la turbulence	73
4.11.1	Les modèles de turbulence	74
4.11.2	Modèles des Équations de Navier-Stokes à Reynolds Moyennés (RANS)	75
a)	Modèle $k - \varepsilon$ standard	76
b)	Modèle $k - \varepsilon$ à faible nombre de Reynolds	77
c)	Modèle RNG $k - \varepsilon$	77
d)	Modèle MMK $k - \varepsilon$	77
e)	Modèle $k - \omega$	78
f)	Modèle des tensions de Reynolds (RSM)	78
4.11.3	Modèle $k - \varepsilon$ non linéaire	78
4.11.4	Simulation des grands vortex (LES)	79
4.12	Fonction ou loi de la paroi	79
4.13	Modélisation de la ventilation naturelle	80
4.13.1	Les écoulements à travers l'enveloppe du bâtiment	80
4.13.2	Modèles mathématiques d'écoulement à travers l'enveloppe	81
4.13.2.1	Modèle pseudo-stationnaire avec approximation de Boussinesq	83
(a)	Ventilation due à l'effet du vent	83
(b)	la ventilation due à l'effet de flottabilité	84
©	Les effets combinés du vent et des forces de flottabilité	85
4.13.2.2	Modèle pseudo-stationnaire sans approximation de Boussinesq	85
	Chapitre 05 Résultats et interprétations	86
5.1	Introduction	87
5.1.1	Domaine d'étude	87
5.1.2	Maillage	89
5.1.3	Conditions aux limites et conditions initiales	89
5.1.4	Modèle de turbulence	90
5.2	Comparaison entre la ventilation par tour à vent et la ventilation transversale	91
5.2.1	Résultats de la simulation	91
5.3	Étude de la ventilation naturelle par tour à vent avec différentes hauteurs	97
5.3.1	Résultats de la simulation	98
5.4	Étude de l'influence de changement de la géométrie sur la performance de la tour à vent	108
5.4.1	Comparaison de profil de la pression	111
5.4.2	Comparaison de profil de la vitesse moyenne	112
5.4.3	Comparaison de profil de l'intensité de la turbulence	112
	Conclusion	114
	Références bibliographiques	116
	Annexes	

Liste des figures

Figure N°	Titre de la figure	Page
Fig.2.1	Zones caractérisées par leur valeur de l'indice d'aridité de Martonne, calculé pour la période 1951-2000	12
Fig.2.2	Définition des climats arides selon Köppen	14
Fig.2.3	Carte pluviométrique annuelle (mm) de l'Algérie du nord. Projection Lambert Nord Algérie	16
Fig. 2.4	Cartes annuelles de la vitesse du vent en Algérie à 10 m d'altitude	17
Fig.2.5	Carte des zones climatiques de l'Algérie	18
Fig.2.6	Situation de la ville de Béchar	18
Fig.2.7	Température extérieure à Béchar pour les périodes (1965 - 1984) et (2001 - 2005)	19
Fig.2.8	Correspondance entre les indices PMV et PPD	25
Fig.2.9	Plage de confort sur le diagramme de l'air humide	26
Fig.2.10	Répartition de la pression du vent sur un bâtiment	28
Fig.2.11	Ventilation mono-exposée simple ouverture	29
Fig.2.12	Ventilation mono-exposée à double ouvertures	30
Fig.2.13	Ventilation transversale	30
Fig.2.14	tour à vent	31
Fig.2.15	Ventilation par cheminée	31
Fig.2.16	Ventilation par atrium	32
Fig.2.17	Ventilation par puits canadiens pour maison individuelle	32
Fig.2.18	Différentes modes de fonctionnement d'une façade double peaux	33
Fig.2.19	Répartition des plus importants gisements en Afrique	35
Fig.2.20	Cartes annuelles de la vitesse du vent en Algérie à 10 m de haut	37
Fig.2.21	Carte des vitesses des vents projetée sur la carte topographique de l'Algérie	37
Fig.2.22	Rose de vent annuelle de la vile de Béchar (1977-2006)	38
Fig.3.1	Malqaf dans une maison Pharaonique (maison de Neb-Amun (1300 Avant J. C)	40
Fig.3.2	Maison avec deux attrapes-vent dessinée sur un papyrus trouvés dans les tombes du Nouvel Empire en Égypte vers 1500 Avant J. C	40
Fig.3.3	Capteur du vent inclu dans la tente Bédouin	41
Fig.3.4	Takhtabush d'une maison traditionnelle au Caire, Égypte	41
Fig.3.5	Vues extérieure et intérieure du Malqaf	42
Fig.3.6	Qa'ah de Muhib Ad-Din, Caire (1350)	42
Fig.3.7	Maison de Abdel-Rahman Nassif à Jedah, Arabie Saoudite	43
Fig.3.8	Centre des visiteurs du parc national de Zion, Etats-Unis	44
Fig.3.9	Principe de fonctionnement de système tour à vent	45
Fig.3.10	Variations micro et macro climatiques	45
Fig.3.11	Structure d'une tour à vent traditionnelle	46
Fig.3.12	Tours à vent de Dowlat ABAD, Iran et de Bastakiya, UAE	47

Fig.3.13	Exemple de logement rural dans le sud de l'Iran avec une tour à vent pour faire usage de la Brise côtière	48
Fig.3.14	Pression positive sur la façade au vent et une pression négative sur la façade sous le vent	49
Fig.3.15	Tours à vent traditionnelles avec un nombre différent d'ouvertures : (a) à un côté, (b) à deux côtés, (c) à quatre côtés, (d) octaèdre	50
Fig.3.16	Ventilation transversale d'une chambre avec une tour à vent unilatérale	50
Fig.3.17	Ventilation transversale avec une tour à vent bidirectionnelle	51
Fig.3.18	Ventilation à travers une structure avec une tour à 4 faces	52
Fig.3.19	Tours à vent rectangulaire et circulaire montées sur le toit	52
Fig.3.20	Différence de pression à travers une tour à vent circulaire et carrée	53
Fig.3.21	Différentes sections transversales des tours à vent traditionnelles	53
Fig.3.22	Différents systèmes d'évaporation utilisés dans les tours à vent	54
Fig.3.23	Tour à vent intégrée avec refroidissement souterrain	55
Fig.3.24	système de Tour à vent intégrée avec une cheminée solaire	56
Fig.3.25	Fonctionnement d'un système de tour à vent en sa partie diurne et nocturne	57
Fig.3.26	Maison traditionnelle qui combine la cour ouverte avec les tours à vent	57
Fig.3.27	Tours à vent multidirectionnelles intégrées avec un toit incurvé	58
Fig.3.28	Tours à vent commerciales	59
Fig.3.29	Tour à vent commercial avec un ventilateur solaire	59
Fig.4.1	Variation de la vitesse du vent avec la hauteur et l'état du terrain dans la CLA	63
Fig.4.2	Effets du vent incident en direction normale sur une structure	65
Fig.4.3	Flux d'air autour d'une structure cubique	66
Fig.4.4	Vitesse instantanée (moyenne et fluctuante) dans un écoulement turbulent	66
Fig.4.5	Volume de contrôle en 2D	70
Fig.4.6	Hierarchie des modèles de turbulence classés en fonction de leur niveau décroissant de complexité	74
Fig.4.7	Les différents paramètres dans l'étude de la ventilation naturelle	81
Fig.5.1	Dimensions du domaine d'études selon les recommandations de [Revuz, 2011]	87
Fig.5.2	Vue latérale et en plan du domaine d'étude	88
Fig.5.3	Maillage du domaine d'étude à (y=56m)	89
Fig.5.4	Comparaison de la pression statique en 3D	91
Fig.5.5	Comparaison de la pression statique au plan (y=56m)	92
Fig.5.6	Comparaison de la pression dynamique (Pa) (y=56m).	92
Fig.5.7	Comparaison de la pression totale (Pa) (y=56m).	92
Fig.5.8	Vue en 3D du profil de vitesse	93
Fig.5.9	Comparaison du profil de la vitesse moyenne (m/s), (y=56m).	93
Fig.5.10	Comparaison du profil de la vitesse suivant l'axe X (m/s), (y=56m).	93

Fig.5.11	Comparaison du profil de la vitesse suivant l'axe Z (m/s), ($y=56m$).	94
Fig.5.12	Comparaison du profil de température (K), ($y=56m$).	94
Fig.5.13	Comparaison de l'intensité de la turbulence (%),($y=56m$).	94
Fig.5.14	Comparaison du profil de l'énergie cinétique turbulente k (m^2/s^2), ($y=56m$).	95
Fig.5.15	Profil de la pression statique (Pa) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).	98
Fig.5.16	Profil de la pression dynamique (Pa) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).	99
Fig.5.17	Profil de la pression totale (Pa) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).	100
Fig.5.18	Profil de la vitesse moyenne (m/s) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).	101
Fig.5.19	Profil de la vitesse suivant l'axe X (m/s) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).	102
Fig.5.20	Profil de la vitesse suivant l'axe Z (m/s) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).	102
Fig.5.21	Profil de la température statique (K) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).	103
Fig.5.22	Profil des vecteurs vitesses (m/s) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$	104
Fig.5.23	Profil de l'intensité de la turbulence (%) de la tour à vent avec $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).	105
Fig.5.24	Profil de l'énergie cinétique turbulente (m^2/s^2) de la tour à vent avec $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).	106
Fig.5.25	Visualisation des lignes de courant à l'intérieur et autour d'une tour à vent isolée avec toit plat	108
Fig.5.26	Profil de la pression statique (Pa) de la tour à toit plat et incliné ($y=56m$).	111
Fig.5.27	Profil de la pression dynamique (Pa) de la tour à toit plat et incliné ($y=56m$).	111
Fig.5.28	Profil de coefficient de pression de la tour à toit plat et incliné ($y=56m$).	111
Fig.5.29	Profil de la vitesse moyenne (m/s) de la tour à toit plat et incliné ($y=56m$).	112
Fig.5.30	Profil de l'intensité de turbulence (%) de la tour à toit plat et incliné ($y=56m$).	112

Liste des tableaux

Tableau N°	Titre du tableau	Page
Tab.2.1	Classification génétique du climat terrestre	11
Tab.2.2	Données climatiques de la ville de Béchar (1998-2008)	20
Tab.2.3	Équivalents métaboliques pour quelques activités	21
Tab.2.4	Pression saturante de la vapeur d'eau à différentes températures	23
Tab.2.5	Températures opératives acceptables pour des taux d'humidité de 30 et de 60 %	24
Tab.2.6	Relation entre vitesse de l'air et dégradation en température	24
Tab.2.7	Relevé des moyennes de vitesse du vent (2004-2009) en Algérie	36
Tab.5.1.	Paramètres de la simulation de la tour avec $H_{\text{tour}} = 3, 6, 9 \text{ et } 12 \text{ m}$	97
Tab.5.2	Comparaison des coefficients de décharge, de perte moyenne d'ouverture à 0° d'angle d'incidence du vent obtenues par l'expérience de [Dehghan et al, 2013] dans la soufflerie en utilisant des modèles des tours à vent à toit plat et incliné à une échelle de 1:40	109
Tab.5.3	Paramètres de simulation de la tour à vent à toit plat et incliné	110
Tab.A1	Principales catégories sous une forme donnée par M. Kottek <i>et al.</i> (2006)	
Tab. A3	Les majeurs événements dans l'ingénierie du vent	

Nomenclatures

A	Surface externe entourant le volume contrôle	s^2
A_{ouvert}	Surface de l'ouverture	m^2
A_t	Section transversale de la tour	m^2
C_{int}	Concentration de polluants dans l'air intérieur	ppm
C_{ext}	Concentration de polluants dans l'air extérieur	ppm
clo	Unité d'habillement (l'équivalent de $0.15 m^2 \text{ } ^\circ C/W$)	
C_d	Coefficient de décharge	
C_p	Coefficient de pression surfacique d'un bâtiment	
D	Diamètre de l'ouverture	m
E	Épaisseur de l'ouverture	m
e_{tot}	Énergie totale	W
f	Paramètre de Coriolis	
g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
h	Différence relative de hauteur entre les deux ouvertures	m
h	Enthalpie	Kj/Kg
h'	Hauteur de la pièce (micro climat)	m
H	Hauteur de la tour	m
$H_{Domaine}$	Hauteur du domaine d'étude (macro climat)	m
I	Intensité de la turbulence	%
I_u	Intensité de la turbulence suivant l'axe x	%
k	Énergie cinétique de la turbulence	m^2/s^2
k_p	Coefficient de perte moyenne d'ouverture	
k_*	Constante de <i>Von Karman</i>	
$L_{Domaine}$	Longueur du domaine d'étude (macro climat)	m
$l_{Domaine}$	Largeur du domaine d'étude (macro climat)	m
L'	Longueur de la pièce (micro climat)	m
l'	Largeur de la pièce (micro climat)	m
$l_m(x, y)$	Longueur spécifique de mélange	m
m_{vap}	Masse d'eau dans l'air intérieur	g/m^3
m_{sat}	Masse d'eau dans l'air saturé en eau	g/m^3
MET	Équivalent Métabolique (équivalent à $58 W/m^2$)	
P	Pression	Pa
P_s	Pression statique	Pa
P_{sa}	Pression de l'air sortant	Pa
P_{vap}	Pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air	Pa

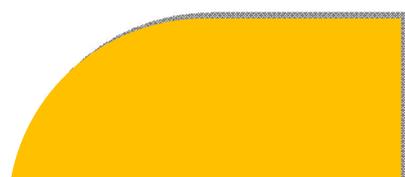
PMV	Indice de Vote Moyen Prévisible (<i>Predicted Mean Vote</i>)	
PPD	Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits (<i>Predicted Percentage Dissatisfied</i>).	
Q_i	Flux de chaleur	W
Q_V	Débit volumique totale	m^3/s
q_1	Débit volumique à travers l'ouverture 1	m^3/s
q_2	Débit volumique à travers l'ouverture 2	m^3/s
Re	Nombre de Reynolds	
Re_0	Nombre de Reynolds de l'ouverture	
S_ϕ	Terme source	
T_i	Température intérieure	K ou $^\circ C$
T_e	Température extérieure	K ou $^\circ C$
T_{ea}	Température de l'air extérieure entrant	K ou $^\circ C$
T_{sa}	Température de l'air extérieure sortant	K ou $^\circ C$
t	Temps	s
t_a	Température de l'air ambiant du local	K ou $^\circ C$
t_p	Température radiante moyenne de la surface des parois du local	K ou $^\circ C$
t_c	Température de confort ou température opérative	K ou $^\circ C$
$U(z)$	Vitesse moyenne du vent à la hauteur z	m/s
U_{ref}	Vitesse moyenne du vent à la hauteur de référence	m/s
U^+	Vitesse sans dimension	
u_τ	Vitesse de frottement à la paroi	m/s
u_*	Vitesse de frottement	m/s
U, V et W	Vitesses instantanées suivant l'axe x, y et z	m/s
$\bar{u}, \bar{v},$ et \bar{w}	Vitesses moyennes suivant l'axe x, y et z	m/s
u', v' et w'	Vitesses fluctuantes suivant l'axe x, y et z	m/s
V	Volume de contrôle	m^3
v_x, v_y et v_z	Vitesse du vent suivant l'axe x, y et z	m/s
y^+	Distance de la paroi sans dimension	
z_0	Hauteur de rugosité	m
z_{ref}	Hauteur de référence	m
\vec{B}	Vecteur quelconque	
\vec{n}	Vecteur unitaire normal à la surface	
\hat{n}_j	Vecteur normal de la surface extérieure	

Lettres Grecques

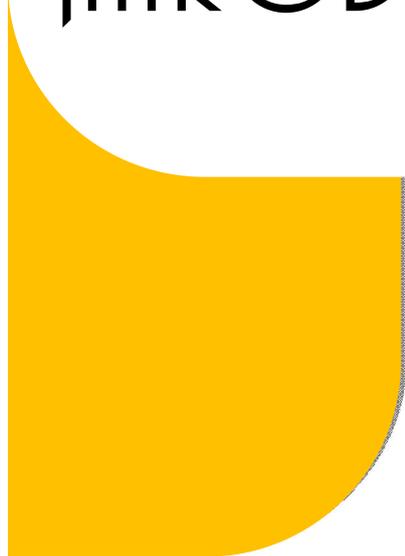
ρ	Densité de l'air	Kg/m^3
ρ_e	Densité extérieure	Kg/m^3
ρ_i	Densité intérieure	Kg/m^3
τ_u	Contrainte de cisaillement suivant l'axe x	Kg/ms^2
τ_v	Contrainte de cisaillement suivant l'axe y	Kg/ms^2
τ_w	Contrainte de cisaillement suivant l'axe z	Kg/ms^2
Ω	Vitesse angulaire de la rotation de la Terre	
λ	Latitude	m
\bar{u}	Vitesse moyenne	m/s
μ	Viscosité dynamique	m^2/s^2
ν	Viscosité cinématique	m^2/s
μ_t	Viscosité turbulente	m^2/s^2
ν_t	Viscosité turbulente isotrope	m^2/s
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	m^2/s^3
τ_{ij}	Contrainte visqueuse	Pa
δ_{ij}	Fonction de Kronecker	
ϕ	Variable ou quantité quelconque (flux de chaleur,)	
Γ	Diffusivité de la variable ϕ	
τ_w	Contrainte de cisaillement de la paroi	Kg/ms^2
γ	Angle d'inclinaison contre le vent incident	°
1,2	Nombre de l'ouverture	

Abréviations

ACH	Nombre de Changement d'air par heure
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
CLA	Couche limite atmosphérique
CFD	Computational Fluid Dynamics
CWE	Computational Wind Engineering
DTR	Document Technique Réglementaire
MVF	Méthode des Volumes Finis
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONM	Office National Météorologique
FAO	World food organisation
2D, 3D	Deux et Trois dimensions



INTRODUCTION GÉNÉRALE



La ventilation naturelle est considérée parmi les moyennes passive et renouvelable pour assurer un confort thermique dans les locaux d'habitations dans le passé, le présent et le futur toujours en présence des vents.

La ville de Béchar, appartient aux zones arides (chaud et sec), une des régions qui présente un gisement important des vents, ou l'assurance du confort est possible par une ventilation naturelle bien conçue.

La tour à vent est une ancienne technique utilisée par différente population pour assurer le confort thermique en absence des sources d'énergies.

L'étude vise à prouver l'efficacité de la technique du tour à vent en la comparant avec un mécanisme très utilisé ; Il s'agit de la ventilation transversale.

L'influence du changement de la hauteur et la géométrie de la tour sera étudié aussi pour démontré son influence sur la performance de la tour à vent.

La présentation de ce mémoire est comme suit :

Chapitre 01 : état de l'art.

Chapitre 02 : sera consacré aux généralités qui comprennent des notions sur le climat, le confort, et les conditions climatiques de l'Algérie et de la ville de Béchar. La ventilation naturelle est discutée en détails plus le gisement national et local des vents.

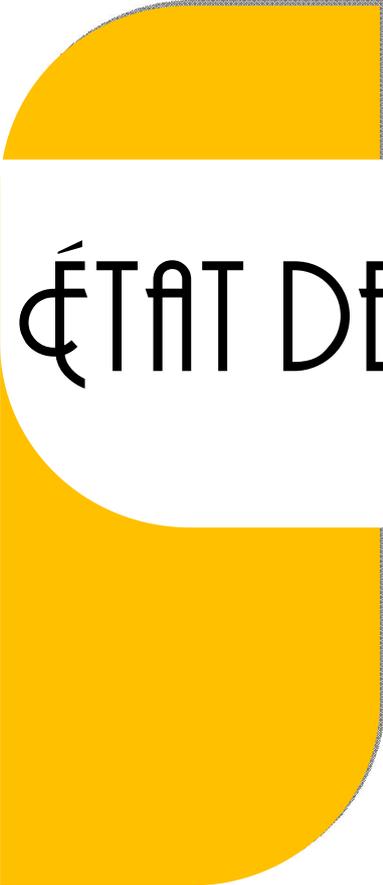
Chapitre 03 : la technique de la tour à vent avec un revue historique, ces différents types et les techniques de refroidissement additionnelles qui peuvent s'intégrés avec cette technique constituent le contenu du deuxième chapitre.

Chapitre 04 : la modélisation numérique de la ventilation naturelle sera discutée dans ce chapitre avec les équations qui gouvernent l'écoulement de l'air dans la couche limite atmosphérique et à l'intérieure du bâtiment, et les méthodes de discrétisation ainsi que les modèles de turbulence.

Chapitre 05 : Le dernier chapitre qui décrit les procédures de la simulation, les conditions initiales et aux limites, et les résultats de l'étude numérique avec leurs interprétations.

Le travail se termine par une **conclusion générale** qui fait la synthèse de l'étude et des recommandations pour les futurs travaux de recherches.

La partie **annexe** contient la répartition climatique de Köppen, les roses de vent mensuel de la willaya de Béchar et les majeurs événements dans l'ingénierie du vent.



CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART

La conception architecturale des bâtiments mise en évidence l'avantage potentiel des systèmes de ventilation naturelle pour le confort des occupants. La ventilation naturelle est devenue une solution intéressante pour non seulement réduire la consommation d'énergie et de coût, mais aussi pour fournir un confort thermique et une bonne qualité de l'air intérieur. Un exemple d'une telle ventilation innovante est la tour à vent.

La tour à vent (Wind tower), capteur de vents (Wind catcher), ou la tour éolienne, sont des appellations qui décrivent ces grandes structures qui s'élèvent dans le ciel **[Montazeri et Azizian, 2008]**. Elle est définie comme un dispositif de ventilation par entraînement du vent utilisé dans le but d'augmenter le taux de ventilation et d'ACH à l'intérieur des Bâtiments **[Montazeri et Azizian, 2011]**. Les tours à vent ont été utilisées dans les régions chaudes et arides au Moyen-Orient depuis des siècles pour fournir un refroidissement passif. Fathy **[Fathy, 1986]** suggère que les solutions traditionnelles dans l'architecture vernaculaire peuvent être adoptées ou intégrées à une nouvelle technologie pour les rendre compatibles avec les exigences modernes.

Elmualim **[Elmualim, 2006]** a déclaré que la ventilation naturelle des bâtiments au moyen des tours à vent a permis un contrôle et une fiabilité par rapport à une ventilation transversale.

Allard **[Allard, 1998]** définit la qualité de l'air optimale comme l'air libre de contaminants ou de matières nocives qui peuvent présenter un risque pour la santé des occupants, ce qui pourrait causer une irritation et d'inconfort. McCarthy **[McCarthy, 1999]** a déclaré que la ventilation naturelle permet la livraison d'air frais pour les occupants à l'aide des méthodes durables et énergétiquement efficaces.

Hughes et Ghani **[Hughes et Ghani, 2010]** ont confirmé qu'un léger changement dans la pression de l'air peut créer suffisamment d'air pour améliorer le confort thermique des habitants.

Hughes and Cheuk-Ming **[Hughes et Cheuk-Ming, 2011]** ont utilisé des études expérimentales et numériques pour étudier les forces motrices pour un système de ventilation naturelle. Le travail a examiné la relation entre les deux forces motrices pour le système de tour éolienne. Les résultats confirment que le vent est la principale force motrice de la tour par rapport aux gradients de température.

Jones et Kirby [**Jones et Kirby, 2009**] ont utilisé une approche semi-empirique pour prédire la performance d'un dispositif de tour à vent. Ils ont également conclu que l'effet de flottabilité n'est significatif qu'aux vitesses du vent relativement faible.

Kleiven [**Kleiven, 2003**] a mis en évidence l'importance de minimiser la résistance dans le trajet d'écoulement d'air à travers la structure.

Roaf [**Roaf, 2008**] a étudié différents types des tours à vent avec les fonctions qui varient considérablement d'une région à l'autre, en fonction des facteurs tels que les conditions climatiques micro-macro et les attentes de confort des occupants.

Asfour et Gadi [**Asfour et Gadi, 2006**] ont décrit le fonctionnement d'un dispositif de ventilation qui varie de manière continue tout au long de la journée. La tour à vent attrape le vent dominant et le dirige vers le bas à une vitesse plus élevée. Ils constatent aussi que la température de l'air extérieur inférieure refroidit la masse du bâtiment au cours de la nuit, ce qui fournit un refroidissement additionnel du lendemain.

Elizalde et Mumovic [**Elizalde et Mumovic, 2008**] ont mis en évidence l'effet des structures urbaines sur les conditions climatiques micro et macro. L'état du vent en milieu urbain détermine le potentiel de la ventilation naturelle des bâtiments. En général, la vitesse du vent est réduite de 10 à 20% dans les régions urbaines, bien que les vitesses de vent élevées peuvent se produire en raison des canyons urbains et accélère l'écoulement du vent.

Montazeri et al. [**Montazeri et al, 2010**] ont déclaré que l'efficacité des tours à vent est tributaire de la création de la différence de pression maximale entre les orifices d'entrée d'air et de sortie du dispositif passif.

Karakatsanis et al. [**Karakatsanis et al, 1986**] ont évalué avec des tests en soufflerie le coefficient de pression et le débit de ventilation d'un bâtiment en utilisant la tour à vent. Les résultats montrent une dépendance de débit d'air de ventilation (de la tour vers le bâtiment) avec le coefficient de pression des ouvertures du bâtiment.

Les tours à vent peuvent être divisés en une seule face, deux faces, quatre faces, hexaèdre, octaèdre. Il est essentiel qu'un système de ventilation naturelle donne de bons résultats pour toutes les conditions de vent. A'zami [**A'zami, 2005**] suggère que les structures avec des tours à vent multidirectionnelles sont souvent construites dans des conditions où il n'y a pas de direction des vents dominantes prévisibles.

Ghadiri et al. [**Ghadiri et al, 2012**] ont étudié le comportement de la ventilation naturelle d'une tour à vent à quatre faces afin d'évaluer l'influence des paramètres utilisés dans le processus de simulation sur les résultats obtenues.

Les tours unilatérales sont construits dans de nombreuses régions du Moyen-Orient, principalement sur des maisons dans les zones où il ya un vent dominant.

Montazeri et Azizian [**Montazeri et Azizian, 2008**] ont évalué la performance d'une tour unilatérales avec des testes expérimentales en soufflerie avec visualisation de la fumée. Les travaux ont également étudié l'effet de la localisation de la tour du vent. Pour un modèle de tour isolé (sans densité urbaine), il a été constaté que l'efficacité maximale est atteinte à un angle d'incidence d'air de 0°.

Montazeri et al. [**Montazeri et al, 2010**] ont évalué la performance de la ventilation naturelle expérimentalement et numériquement d'un système similaire de ventilation passive mais pour une tour à vent bidirectionnelle pour analyser l'effet des distributions de coefficient de pression au niveau des ouvertures. Une bonne corrélation entre les différentes méthodes d'analyse a été observée. Les résultats obtenus ont montré que le coefficient de pression varie en conséquence avec l'angle d'incidence du vent. L'efficacité maximale est atteinte à une angle d'incidence de l'air de 90°.

La performance des tours à vent à multi-ouverture à été étudié par Montazeri et Azizian [**Montazeri et Azizian, 2011**]. L'étude a démontré l'influence du nombre d'ouvertures sur la performance hydrodynamique des systèmes de tours à vent.

Des études ont indiqué que la tour du vent à quatre côtés est le type le plus utilisé dans le Moyen-Orient [**Mahnaz et Shemirani, 2009**]. Alors que les tours hexaédriques sont limitées et peuvent être trouvées raccordées à des réservoirs d'eau en Iran. La tour à vents à six faces est plus haute à toutes les autres, et a été conçu sous la forme d'un hexagone pour avoir plus de flexibilité contre les vents [**A'zami, 2005**].

Gage et Graham [**Gage et Graham, 2000**] ont réalisé des tests en soufflerie pour comparer les performances d'une tour à vent à quatre et à six faces et d'analyser l'effet de la vitesse et la direction du vent. Les résultats ont confirmé que la pression motrice de la tour est réduite lorsque la vitesse d'écoulement à travers le dispositif est accrue. Le travail a conclu que, dans des conditions de vent variables, les tours à vent multidirectionnelles avec plus de quatre ouvertures ont une performance plus cohérente et plus prévisible et fiable. Toutefois, avec un vent dominant, les tours à quatre faces vont générer la différence de pression la plus

élevée entre les orifices d'entrée et de sortie lorsqu'il est orienté à 45° par rapport à la direction du vent.

Elmualim et Awbi [Elmualim et Awbi, 2002] ont comparé les performances de la ventilation naturelle des tours à vent avec des sections carrées et circulaires en utilisant l'analyse expérimentale et numérique. L'étude analyse la répartition de la pression, la vitesse du vent interne et le débit volumique d'air atteint par le dispositif pour différentes vitesses et directions du vent. Une bonne corrélation entre les deux méthodes d'analyse a été observée. Les performances des deux dispositifs s'est révélée être essentiellement fonction de la vitesse et de la direction du vent dominant.

La Refroidissement par évaporation est une méthode traditionnelle utilisée dans les anciens bâtiments du Moyen-Orient afin d'améliorer la ventilation naturelle. Ce type de refroidissement est particulièrement efficace dans des climats relativement chauds et humides [Bouchahm et al, 2011]. Il est essentiel de refroidir l'air afin d'améliorer le confort thermique des occupants [Bahadori, 1994].

Bouchahm et al. [Bouchahm et al, 2011] ont étudié expérimentalement l'influence de l'intégration d'une tour à vent avec un système d'évaporation sur la réduction de la température et l'augmentation du taux d'humidité dans un bureau dans la région de Ouargla au sud-est de l'Algérie. La longueur de la colonne mouillée et le nombre de répartitions internes ont été également étudié. Par augmentation du nombre de répartitions, la température de l'air sera significativement réduite et cela est dû à l'augmentation de la surface d'échange.

Plusieurs études numériques [Saffari et Hosseinnia, 2009], [Kalantar, 2009] ont été conduites avec des codes de champs sur l'influence du système de refroidissement par évaporation sur la performance des tours à vent. Le nouveau système sera plus performant et surtout dans les zones arides telles que l'Iran et le sud de l'Algérie.

Hosseinnia et al. [Hosseinnia et al, 2013] ont démontré avec une étude numérique l'influence du changement du nombre et de la forme des colonnes mouillées (dispositif de contact air-eau). Plusieurs modèles ont été étudiés. L'étude a conclu que plus on augmente le nombre de répartitions internes, plus la vitesse de l'air à l'intérieur de la tour augmente.

Asfour et Gadi [Asfour et Gadi, 2011] ont étudié l'effet d'intégrer le système de tour à vent avec le toit incurvé et avec la forme de dôme.

Une autre technique de ventilation naturelle efficace et passive, il s'agit de la cheminée solaire. S. Suleiman [**Suleiman et Himmo, 2012**] et N. K. [**Bensal et al, 1994**] ont étudié l'effet d'intégrer la cheminée solaire avec un système de tour à vent. Les résultats ont indiqué que la combinaison des deux systèmes améliore les taux de ventilation d'une façon considérable, mais il faut toujours prendre en compte des considérations d'emplacement des deux dispositifs.

Kaiser et al. [**Kaiser et al, 2013**] ont étudié numériquement la possibilité d'intégrer un dispositif de transfert de chaleur à l'entrée de la tour à vent afin de réduire la température de l'air entrant. Le nouveau système était capable de réduire la température de 15 K.



CHAPITRE 2

GÉNÉRALITÉS

2.1. Introduction

Le présent chapitre vise à établir quelques notions d'ordre général directement reliée au cœur du sujet étudié. En effet, nous nous proposons d'établir des définitions claires de certains concepts en rapport avec la ventilation naturelle qui constitue la base de notre travail. Il s'agit entre autre des concepts tel que le climat, le vent, le confort thermique, etc.

2.2. Climat et paléoclimat

D'après l'*Organisation météorologique mondiale*, OMM : « La climatologie est l'étude du climat, de ses variations et de son impact sur diverses activités dont celles qui affectent la santé humaine, la sécurité et le bien-être » [Foucault, 2009].

On désigne par climat, en générale l'état physique, à longue échéance de l'atmosphère et plus précisément sa partie basse ; la troposphère qui contient la plus grande partie de masse atmosphérique. Les principaux éléments du climat sont : La température, l'humidité, les précipitations, l'insolation, le vent et la pression atmosphérique. [ONM / www.météo.dz].

Ce sont surtout les durées envisagées qui différencient la *météorologie* de la *climatologie*. Quand la première se contente d'une étude sur quelques jours, voir quelques semaines du temps qu'il fait en endroit précis. La seconde envisage la même étude mais sur une durée bien plus longue.

En opposition au terme climat qui englobe L'état météorologique de la terre sur une très longue durée, en utilise le terme *Climats* pour désignée la spécificité météorologique d'une région donnée (climat méditerranéen, climat tropical, climat aride, etc.).

Le terme *paléoclimat(s)* désigne le(s) climat(s) du passé.

2.3. Classification des climats terrestre

Deux voies ont été utilisées, l'une, dite empirique ou physiologique, consiste à les définir grâce à certaines de leurs caractéristiques ; l'autre, dite génétique, se base sur les phénomènes qui contrôlent les climats [Foucault, 2009].

2.3.1 Classifications génétiques

Les classifications génétiques sont fondées sur les mécanismes qui engendrent les climats : la circulation générale atmosphérique. Le tableau 1.1 illustre les éléments d'une

classification génétique. Ses grandes divisions font référence à la circulation atmosphérique ; les correspondances approximatives avec les zones de végétation (biomes) sont indiquées.

Climats zonaux	Principaux types de climats	Biomes principaux
Climat des basses pressions intertropicales	Climats intertropicaux	Forêt pluviale
	Climats subtropicaux	Savane
Climats des hautes pressions subtropicales	Climats arides	Déserts, steppes tropicales
	Climats méditerranéens	Arbustes à feuilles persistantes
Climats des basses pressions tempérées	Climats tempérés tièdes	Forêts caducifoliées
	Climats tempérés froids	Forêts de résineux
Climats des hautes pressions polaires	Climats subpolaires	Toundra
	Climats des glaces	Pas de végétation

Tableau.2.1. Classification génétique du climat terrestre [Foucault, 2009].

2.3.2. Classifications empiriques

De nombreuses classifications empiriques ont été proposées, mais deux parmi elles sont les plus utilisés, celle de Martonne et celle de Köppen.

a) Classification des climats de Martonne

La classification d'Emmanuel de Martonne (1873-1955) est fondée sur un indice d'aridité qu'il a défini en 1926. Cet indice se calcule par la formule :

$$I = \frac{P}{T_{\text{ann moy}} + 10}$$

P : Total annuel des précipitations (mm)

$T_{\text{ann moy}}$: Température moyenne annuelle (°C).

Élaboré principalement pour qualifier les zones arides, il n'est pas utilisable dans les régions froides : en effet, il n'est pas défini pour $T_{\text{ann moy}} = -10 \text{ °C}$ et il est négatif pour $T_{\text{ann moy}} < -10 \text{ °C}$ (figure 1.1).

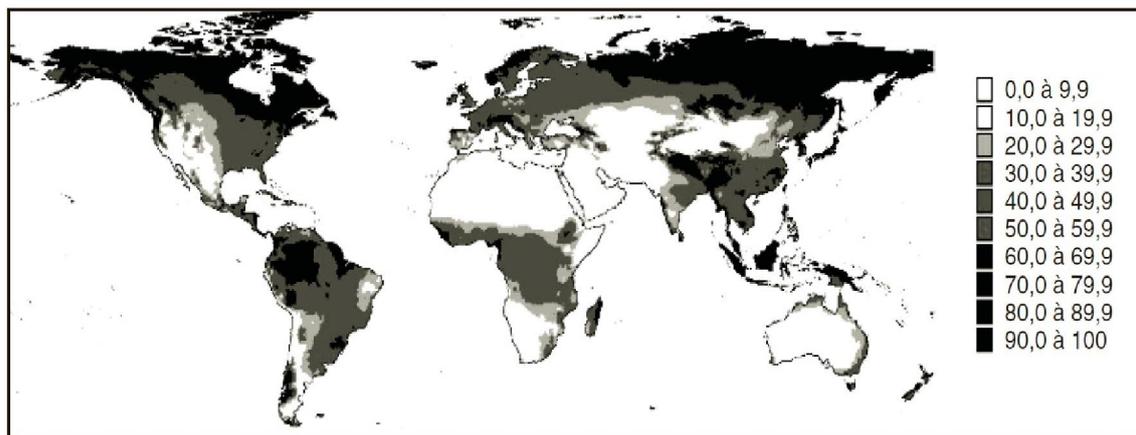


Fig.2.1. Zones caractérisées par leur valeur de l'indice d'aridité de Martonne, calculé pour la période 1951-2000 (source : FAO) [Foucault, 2009].

b) Classification des climats de Köppen

La classification de **Köppen**, (ou de Köppen-Geiger) est encore largement utilisée, parfois sous une forme modifiée (Annexe 1). Köppen (botaniste de formation) a donné beaucoup d'importance aux relations entre le climat et la végétation, ce qui transparaît dans sa classification. Celle-ci utilise 3 critères d'importance décroissante et désignés, pour chaque catégorie, par 3 lettres successives.

- A** Climats tropicaux pluvieux (en allemand : *trpissche regenklimate*)
- B** Climats secs (*Trocken-Klimate*)
- C** Climats humides tempérés (*Warmgemäßigte Regenklimate*)
- D** Climats boréaux subarctiques (*Boreale subarktische Klimate*)
- E** Climats neigeux (*Schneeklimate*)

2.4. Les climats terrestres

Selon la classification de Köppen, le climat terrestre peut se subdiviser en 4 climats majeurs [Foucault, 2009]:

1- Climats équatoriaux

Les climats équatoriaux (ou intertropicaux) se trouvent dans des régions proches de la zone de convergence intertropicale, où le seuil de la température moyenne du mois le plus froid est supérieure à 18 °C et une précipitation élevée.

2- Climats tempérés

Les climats tempérés sont définis par une température moyenne annuelle comprise entre (-3) et 18 °C.

3- Climats polaires

Ces climats sont caractérisés par une température moyenne qui n'excède pas les 10 °C sur toute l'année. Les précipitations y sont très faibles.

4- Climats Neigeux

Caractérisés par une température moyenne du mois le plus froid inférieure à (-3) °C. Les précipitations se présentent généralement sous forme de neige.

5- Climats arides

Pour définir l'aridité d'un climat, il est nécessaire de tenir compte de deux facteurs importants : les précipitations annuelles et le degré d'évaporation. Ce dernier phénomène étant directement relié à la température atmosphérique ; Il est judicieux d'inclure ce paramètre dans la définition de l'aridité. En effet, le phénomène d'évaporation peut être fortement accentué par une température élevée. Un climat devient de ce fait malgré un taux de précipitation annuelle relativement appréciable. Il est donc nécessaire d'établir grâce à une formule empirique une valeur seuil qui indique lequel des deux phénomènes (précipitation et évaporation) est prépondérant.

Si on désigne par P_{th} (en mm de précipitations) la valeur seuil et par $T_{ann\ moy}$ la température annuelle moyenne (en °C) :

- $2 \times T_{ann\ moy}$, si au moins les $\frac{2}{3}$ des précipitations ont lieu en hiver,
- $2 \times T_{ann\ moy} + 28$, si au moins les $\frac{2}{3}$ des précipitations ont lieu en été,
- $2 \times T_{ann\ moy} + 14$, dans les autres cas.

Le climat est alors considéré comme aride si les précipitations annuelles P_{ann} sont inférieures à $10 P_{\text{th}}$. Par exemple, si $T_{\text{ann moy}} = 18^\circ\text{C}$ et $P_{\text{ann}} = 500 \text{ mm}$ avec des pluies d'été, on a $P_{\text{th}} = 36 + 28 = 64$, et comme $P_{\text{ann}} < 640$, ce climat est considéré comme aride.

Deux subdivisions sont pratiquées dans ce type de climat (figure 2.2):

- ⇒ Si $P_{\text{ann}} > 5 P_{\text{th}}$, on a un climat de steppe (BS) ;
- ⇒ Si $P_{\text{ann}} < 5 P_{\text{th}}$, on a un climat de désert (BW).

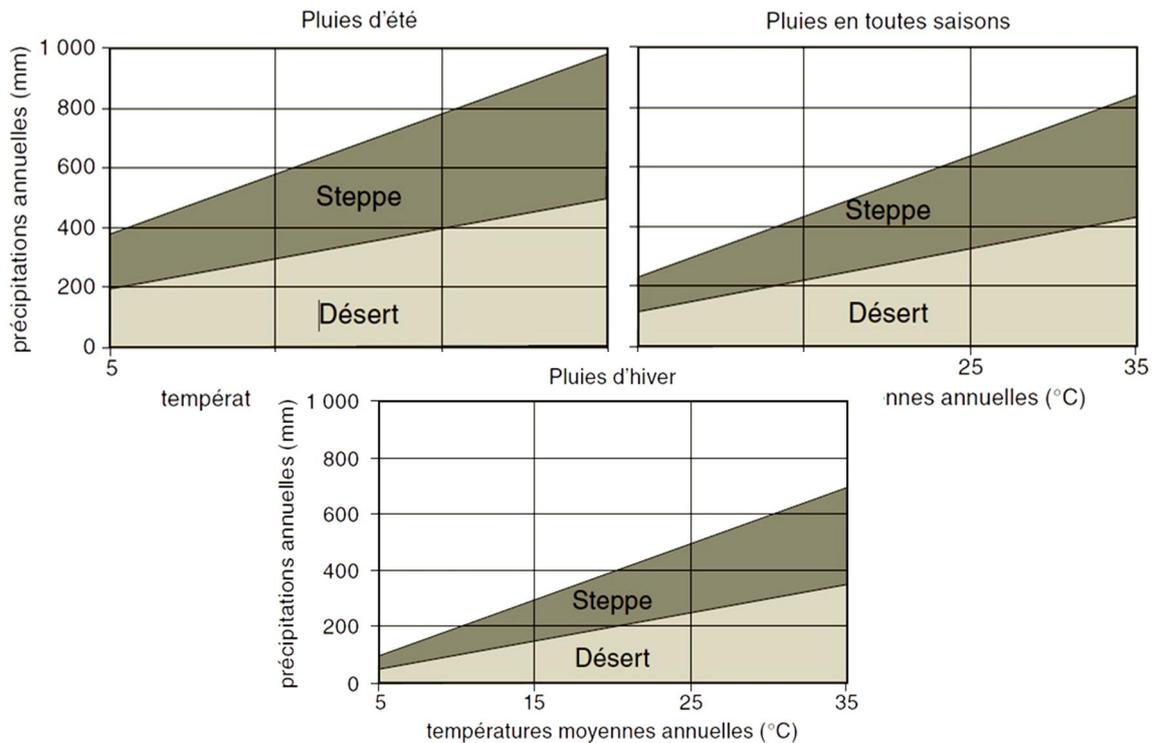


Fig.2.2. Définition des climats arides selon Köppen [Foucault, 2009].

2.5. Le climat de l'Algérie

L'Algérie est un pays de la zone subtropicale du Nord africain. Son climat est très différent entre les régions (Nord-Sud, Est-Ouest). Le climat de l'Algérie sur toute la frange nord qui englobe le littoral et l'atlas tellien appartient à la zone bioclimatique méditerranéenne et est exposée aux variations du front polaire (masse d'air froid en hiver et influence de l'air saharien en été), ce qui explique l'aridité estivale en opposition à une saison fraîche relativement pluvieuse (étés torrides et secs, hivers humides et relativement froids) ; semi aride sur les hauts plateaux au centre du pays, et désertique dès que l'on franchit la chaîne de l'atlas saharien [ONM / www.météo.dz].

2.5.1 Températures

Au nord, dans les villes côtières, les températures hivernales moyennes varient entre 8 et 15 °C. Elles grimpent à 25 °C au mois de Mai pour atteindre une moyenne de 28 à 30 °C en Juillet et Août.

Au centre et à l'ouest, dans les hauts plateaux, la température estivale varie de 30 °C à 38 °C. Dans l'est, la zone des Aurès, les hivers sont très froids, la température atteint parfois les (-18) °C sous abri. Les étés sont très chauds, ou il peut faire parfois 50 °C à l'ombre.

En hiver comme en été, la diminution de la température est de 0.5 °C chaque 100 m d'altitude. Les régions comprises entre les deux atlas et les atlas eux-mêmes, avec des altitudes relativement élevées (800-1200 m), connaissent des températures hivernales les plus basses d'Algérie (exception faite des hautes montagnes). Au Sud de l'Atlas saharien (du fait de son éloignement de la mer) et dans la partie centrale du Hodna (du fait de la faible altitude), les maxima se situent entre 37 °C et 40 °C.

Le sud de l'Algérie ou se situent les zones arides ; la température est de 15 à 28 °C en hiver, 40 à 45 °C en été. Dans les régions les plus chaudes comme Adrar et Ain Salah, la température peut même dépasser le seuil de 55-60 °C au mois de Juillet. Le sud est caractérisé par des régimes thermiques relativement homogènes mais très contrastés, de type continental [**HOUEROU et al, 1977**].

Le réchauffement planétaire a influé sur le changement du climat dans la région, Des augmentations remarquables de température ont été mises en question. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental pour les Changements Climatiques Prédiction pour le sud de l'Europe (qui comprend la frange nord de la Méditerranée de l'Algérie, le Maroc et la Tunisie) montrent que la région pourrait s'attendre à une augmentation de 2 °C en hiver et de 2 à 3 °C en été. Autres modèles climatiques suggèrent que l'augmentation de la température pourrait être de l'ordre de 4 °C tout au long de l'année. Une augmentation de 3 à 4 °C pourrait avoir des effets sur l'environnement tels que l'augmentation de l'aridité [**Zaimeche et Sutton, 2007**].

1.5.2 Précipitations

En Algérie, les précipitations sont caractérisées par une variabilité spatio-temporelle très marquée. A une décroissance de la pluviométrie du Nord au Sud se superpose une décroissance d'est en ouest. Ceci est illustré par la différence des taux de précipitations

annuelles enregistrés entre ces différentes régions. Le quart nord-est enregistre en moyenne un taux de précipitation annuelle variant entre 600 et 1150 mm. Très haut de ça, des taux de pluviométrie enregistre dans le reste du pays dans lequel le taux de précipitation annuelle est de l'ordre de 250 à 500 mm dans le quart nord ouest et peut chuter au dessous des 100 mm de précipitations annuelles au sud de l'atlas saharien. Cette valeur étant habituellement considérée comme marquant le début du désert [ONM / www.météo.dz].

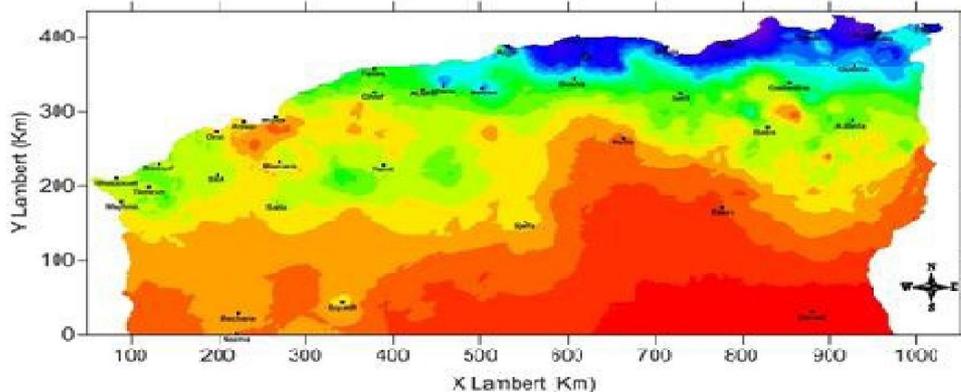


Fig.2.3. Carte pluviométrique annuelle (mm) de l'Algérie du nord. Projection Lambert Nord Algérie [ONM / www.météo.dz].

2.5.3 Les vents

Du fait de sa situation géographique, l'Algérie est généralement assez venteuse. 78 % de la surface est caractérisée par des vitesses supérieures à 3 m/s avec environ 40 % de ces vitesses sont supérieures à 5 m/s. Cartes du vent (figure 2.4) montrent que les vitesses de vent les plus élevées sont réparties dans le sud tandis que le nord est généralement moins venteux. Il a été constaté également que la région du sud-ouest a un grand potentiel avec des vitesses supérieures à celles du Nord. 4 m/s pour le site de Béchar, 5 m/s pour le site de Tindouf et même au-dessus de 6 m/s pour le site d'Adrar [Kasbadji Merzouk, 2006].

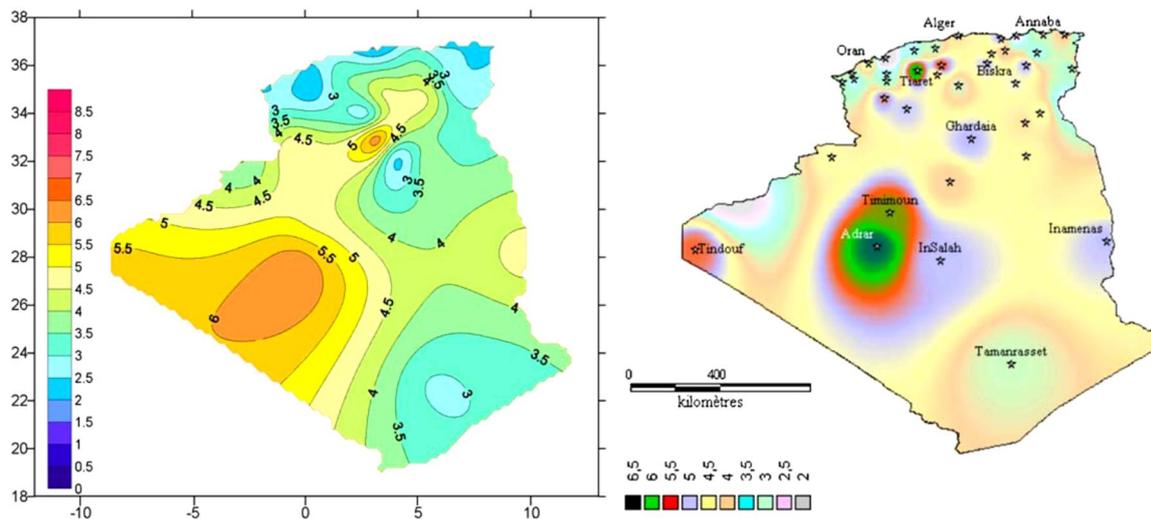


Fig.2.4. Cartes annuelles de la vitesse du vent en Algérie à 10 m d'altitude [Kasbadji Merzouk, 2006].

2.6. Répartitions des zones climatiques de l'Algérie

Le découpage administratif de Mars et Avril 1998 présenté dans le Document technique Réglementaire DTR, C 3.2 *fascicule 1* (chauffage) et C 3.4 *fascicule 2* (climatisation) ; répartie l'Algérie en :

- 4 zones climatiques et une sous zone au Nord.
- 3 zones climatiques au Sud.

Pour chaque zone, on distingue les sites d'altitude inférieure à 500 m, comprise entre 500 et 1000 m et supérieure à 1000 m.

- ⇒ **La zone A** comprend le littoral et une partie du versant Nord des chaînes côtières (climat méditerranéen maritime).
- ⇒ **La zone B** comprend la plaine et les vallées comprises entre les chaînes côtières et l'Atlas Tellien, excepté celle de la vallée de Chleff qui constitue une sous-zone climatique indiquée par **B'** (climat méditerranéen continental).
- ⇒ **La zone C** incluse les hauts plateaux compris entre l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien, avec des altitudes supérieures à 500 m (climat méditerranéen de montagne).
- ⇒ **La zone D1**: Elle comprend le nord et le centre du Sahara au-delà de l'Atlas Saharien et jusqu'à 31° de latitude.
- ⇒ **La zone D2** est située entre les latitudes 31° et 26°, principalement la willaya d'Adrar.

⇒ La zone D3 comprend la région située au-delà de la wilaya d'Adrar et jusqu'aux frontières sud du pays. Elle inclut principalement le Tassili et le Hoggar.

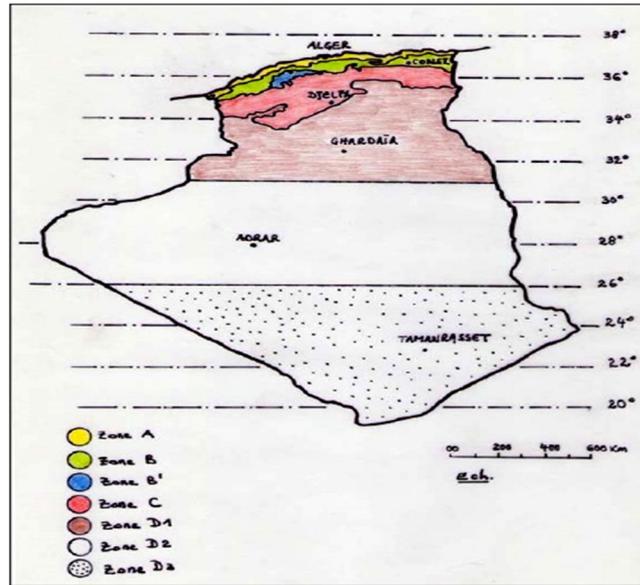


Fig.2.5. Carte des zones climatiques de l'Algérie [B.Belgaïd].

2.7. Climat de Béchar

Situé dans le sud-ouest de l'Algérie, Béchar est la 3^{ème} plus grande wilaya en Algérie, avec ces 350.000 km² de surface.

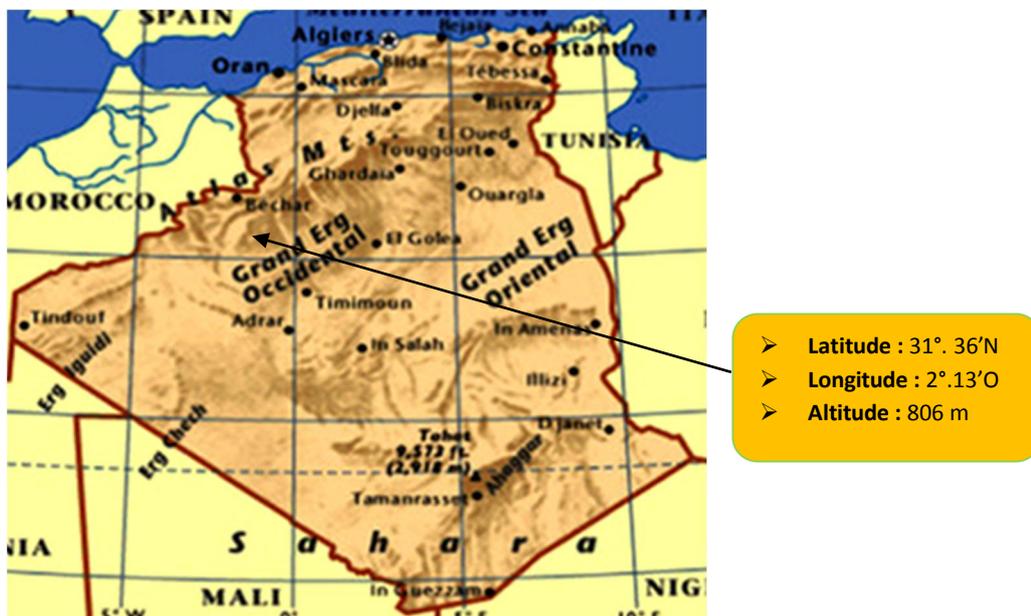


Fig.2.6. Situation de la ville de Bechar.

La ville de Béchar est achevale entre les zones climatiques D2 et D3. Deux saisons principales (été et hiver) sont bien constatées. Avec une forte insolation, dépassant les $3500 h/an$, et un intense rayonnement solaire direct qui peut atteindre $800 W/m^2$ sur un plan horizontal. Le climat de Béchar présente un régime thermique très contrasté, en été, la température à l'ombre dépasse facilement les $323 K$ (50 °C) et atteint environ $288 K$ (15 °C) la nuit ce qui contribue à des larges amplitudes thermiques. Alors que l'humidité relative reste faible et d'environ 27% , couplé à l'absence de nuages. Les températures atteignent leurs Maxima en mois de Juillet (figure 2.7) [Mokhtari, 2009]. Par ailleurs, en hiver la température extérieure peut descendre à $(-5)\text{ °C}$ la nuit. Les précipitations sont rares et irrégulières, interviennent souvent sous forme d'averses ou de pluies orageuses.

La ville de Béchar est considérée parmi les zones les plus venteuses en Algérie. Les vents y sont chauds et on assiste pendant les demi-saisons à de violents vents de sables et tourbillons qui peuvent atteindre $100 km/h$.

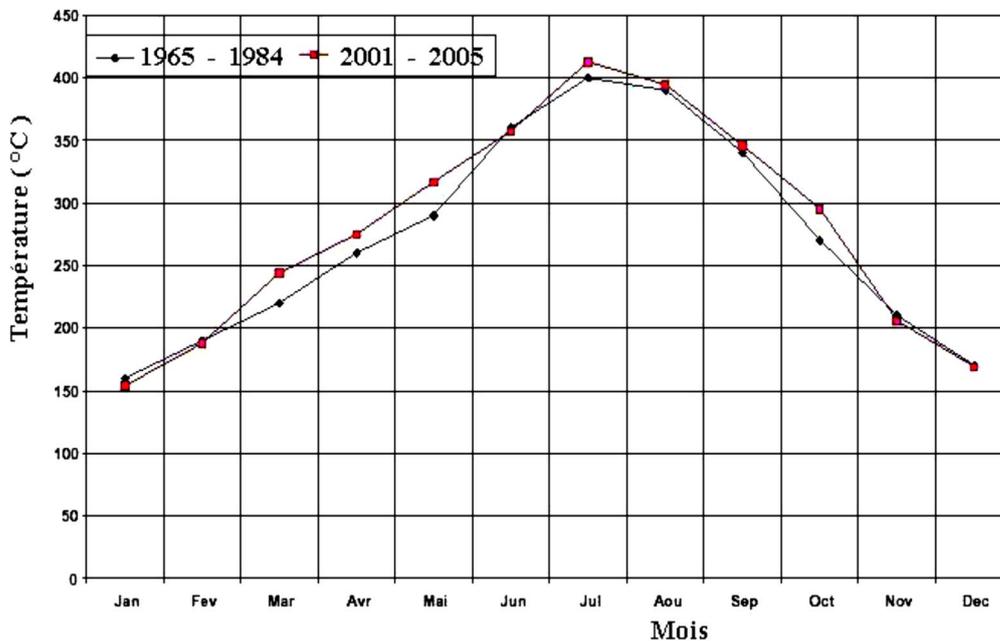


Fig. 2.7. Température extérieure à Béchar pour les périodes (1965 - 1984) et (2001 - 2005) [R. Benziada, 2006].

La ville de Béchar, est caractérisée par un été long, chaud et sec, de longues périodes de surchauffe où l'inconfort est fortement ressenti. L'analyse climatique de la distribution mensuelle de la température et de l'humidité relative de la ville de Béchar indique que la majeure partie de l'année se situe en dehors de la zone de confort, ce qui implique des conditions de vie difficiles.

Cet état est aggravé en été par la chaleur dégagée des appareils de climatisation, les moyens de transport terrestre et surtout l'absence des espaces de végétations et des plans d'eau (albédo : 0,35) ; et d'autre part par la basse vitesse de refroidissement des masses de béton qui, en raison de leur haute inertie thermique, restituent, la nuit, la chaleur accumulée pendant le jour. Le résultat sera donc l'élévation de la température dans la ville par rapport son environnement et de la réduction du taux d'humidité relative.

Les bâtiments dans la région doivent être conçus selon les exigences d'été; celles de l'hiver seront satisfaites en conséquence. Il est donc plus approprié de viser la période de surchauffe pour déterminer les techniques de refroidissement passif qui aident à réduire les températures internes pour atteindre des ambiances confortables [R. Benziada, 2006].

	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{moy} (°C)	Précipitation (mm)	Vitesse du vent (m/s)	Humidité relative HR (%)
<i>Janvier</i>	16	4	10	9	2,5	46
<i>Février</i>	19	7	13	7	3,1	40
<i>Mars</i>	22	10	16	8	3,6	29
<i>Avril</i>	26	14	20	8	4,6	29
<i>Mai</i>	29	18	24	5	5,2	26
<i>Juin</i>	36	23	30	4	4,5	19
<i>Juillet</i>	40	27	34	1	4,2	14
<i>Aout</i>	39	26	33	2	3,9	17
<i>Septembre</i>	34	22	28	6	3,2	26
<i>Octobre</i>	27	16	21	9	2,4	33
<i>Novembre</i>	21	9	15	13	2,4	43
<i>Décembre</i>	17	5	11	8	2,4	46

Tableau.2.2. Données climatiques de la ville de Béchar (1998-2008). [Chadel et Abdelmalek, 2010].

2.8. Confort thermique

Le confort thermique est un état d'esprit, avec lequel on exprime une satisfaction envers son environnement thermique [Victor CANDAS]. Le confort thermique est une notion complexe difficile à assurer et qui n'est pas limitée à la seule valeur de la température. Il dépend aussi de critères subjectifs, psychologiques et socioculturels. Par ailleurs la perception du froid et du chaud dépend du sexe, de l'âge, de la constitution, de la santé, de la nourriture...

Le confort qui doit assurer un équilibre entre les occupants d'un local et une ambiance thermique optimale, ni trop chaude, ni trop froide, dépend de plusieurs facteurs liés à la fois à l'individu et à l'environnement. La norme 55 de l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) définit une zone de confort basée sur six variables qui sont :

- le métabolisme des individus dépendant de leur activité,
- le degré d'isolement des vêtements portés,
- l'humidité relative de l'air,
- la température de l'air ambiant,
- la température due au rayonnement des parois,
- la vitesse d'écoulement de l'air.

❖ Métabolisme

Le corps humain produit de la chaleur interne permettant de maintenir la température autour de 37 °C. À ce métabolisme de base du corps au repos, s'ajoute un métabolisme correspondant au niveau d'activité de l'individu. Pour caractériser ce « métabolisme de travail » une unité désignée par MET ou équivalent métabolique a été créée. On estime à 1 MET ou 58 W/m^2 l'énergie dont a besoin le corps quand on est assis ou faiblement occupé (lecture, téléphone). Le tableau 2.3 donne quelques estimations de l'énergie dépensée pour quelques activités.

<i>Niveau du MET</i>	<i>Activité</i>
< 3 METS	Marche lente, jardinage
Entre 3 et 6 METS	Marche rapide, nage, frottement du sol
> 6 METS	Course, tennis en simple, vélo en montée

Tableau.2.3. Équivalents métaboliques pour quelques activités.

Dans les bureaux à forte densité d'occupants, il y a une forte augmentation de la quantité de chaleur dégagée.

La régulation physique de la température du corps s'effectue principalement par convection, rayonnement, évaporation et dans une moindre mesure par conduction, respiration, sécrétions. La température de la peau est de 32 à 33 °C mais peut descendre à 15 jusqu'à 20 °C au niveau des pieds.

❖ Degré d'isolement des vêtements

L'habillement représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'air ambiant. Le niveau d'habillement est caractérisé par une valeur relative exprimée en «clo», unité d'habillement, 1 clo est l'équivalent de $0.15 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$. Par exemple une tenue comportant un pantalon léger, une chemise à col ouvert et à manches courtes, des chaussettes légères et des chaussures correspond à 0,7 clo, alors qu'une tenue formée d'une chemise à manches longues, d'un pantalon, d'un pull-over à manches longues, de chaussettes épaisses et de chaussures sera caractérisée par 1 clo.

❖ Humidité relative (HR)

L'humidité relative de l'air (HR) ou degré hygrométrique est le rapport exprimé en pourcentage entre la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air, P_{vap} et la pression de vapeur saturante, P_{sat} à la même température ou encore le rapport de la masse d'eau en g/m^3 de l'air intérieur (m_{vap}) sur la masse d'eau en g/m^3 d'air saturé en eau (m_{sat}). La pression de vapeur saturante à une température donnée est la pression maximum d'eau sous forme de vapeur que l'air peut contenir.

$$HR = \frac{P_{vap}}{P_{sat}} \times 100 = \frac{m_{vap}}{m_{sat}} \times 100$$

L'humidité relative augmente avec la température (tableau 2.4). On appelle point de rosée la température à laquelle, dans des conditions barométriques courantes, l'air devient saturé en vapeur d'eau. Lorsque le point de rosée est atteint, il y a condensation de la vapeur d'eau.

Une humidité relative de 40 à 60 % correspond à un confort optimal, une humidité relative de 30 à 40 % à un bon confort.

Il est difficile de percevoir avec précision le taux d'humidité de l'air. L'inconfort apparaît dans des conditions extrêmes soit pour $HR < 30 \%$ et $HR > 70 \%$.

<i>Température (°C)</i>	<i>Pression saturante (mbar)</i>
- 60	0.001
- 40	0.13
- 20	1.03
- 10	2.6
0	6.1
10	12.3
20	23.4
30	42.4
40	73.8
50	123
60	139
100	1013

Tableau.2.4. Pression saturante de la vapeur d'eau à différentes températures.

❖ **Température de confort ou température opérative**

La température de l'air intérieur ressentie par un individu dépend de la température de l'air ambiant du local (t_a) et de la température radiante moyenne de la surface des parois du local (t_p). La température de confort (t_c) ou température opérative est ainsi définie comme la moyenne entre t_a et t_p pour une vitesse de l'air supérieure ou égale à 0,2 m/s.

$$t_c = \frac{t_a + t_p}{2}$$

La température de confort n'est pas toujours homogène du fait des gradients verticaux et horizontaux de la température de l'air et de l'asymétrie du rayonnement des parois (parois chaudes, parois froides).

La température de confort optimale est liée au taux d'humidité de l'air. Par exemple une température de 24 °C et une humidité relative de 80 % donne une impression de moiteur (pas d'évaporation à la surface de la peau) alors que la même température liée à une humidité relative de 20 % est très supportable. Le tableau 2.5 indique la température acceptable en été et en hiver en fonction du taux d'humidité.

Conditions			Température opérative acceptable (°C)
Saison	Degré d'isolement des vêtements	Humidité relative	
Été	0.5 clo	30 %	24.5 – 28
		60 %	23 – 25.5
Hiver	1 clo	30 %	20.5 - 25.5
		60 %	20 - 24

Tableau.2.5. Températures opératives acceptables pour des taux d'humidité de 30 et de 60 %.

❖ Vitesse de l'air

La vitesse de l'air influence les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau. Il est recommandé qu'elle ne dépasse pas 0,2 m/s, et qu'elle soit de 0,13 m/s pour une personne assise en grand confort. Cependant, en été où les ambiances sont chaudes et humides, des déplacements d'air plus importants peuvent être tolérés (par exemple 1,25 à 2,5 m/s correspondant à une brise légère). Le confort d'un espace occupé dépend autant de la chaleur que de la fraîcheur. De l'air avec une vitesse de 0.075 m/s est défini par le terme d'air tranquille [René vottone, 1998].

Le tableau 2.6 illustre la relation entre la vitesse de l'air et la dégradation en température engendré par cette circulation.

Vitesse de l'air (ms ⁻¹)	Température réduite (°C)
0,1	0
0,3	1
1	3
3	6
6,5	8

Tableau.2.6. Relation entre la vitesse de l'air et la réduction en température [René vottone, 1998].

❖ Indices de confort

Sur la base d'expériences menées en chambre climatique deux indices de confort ont été établis, le **PMV** (*Predicted Mean Vote*) et le **PPD** (*Predicted Percentage Dissatisfied*).

Ils permettent de définir des plages de température de confort pour différents types de locaux et de situations.

Le **PMV** ou Indice de Vote Moyen Prévisible est basé sur des calculs statistiques de l'avis moyen d'un groupe important de personnes sur la sensation de confort thermique ressentie.

Il est déterminé en se référant à l'échelle suivante de sensations thermiques allant de - 3 à + 3 et qui prend en compte les 6 paramètres du confort thermique :

+ 3 : chaud, + 2 : tiède, + 1 : légèrement tiède,

0 : neutre, - 1 : légèrement frais, - 2 : frais, - 3 : froid.

Une valeur du **PMV** de 0 correspond à un confort thermique optimal. La zone de confort s'étale de - 1 à + 1.

L'indice **PPD** ou Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits indique le pourcentage d'insatisfaits en fonction de l'indice **PMV**. La figure 2.9 donne la correspondance entre les indices **PMV** et **PPD**.

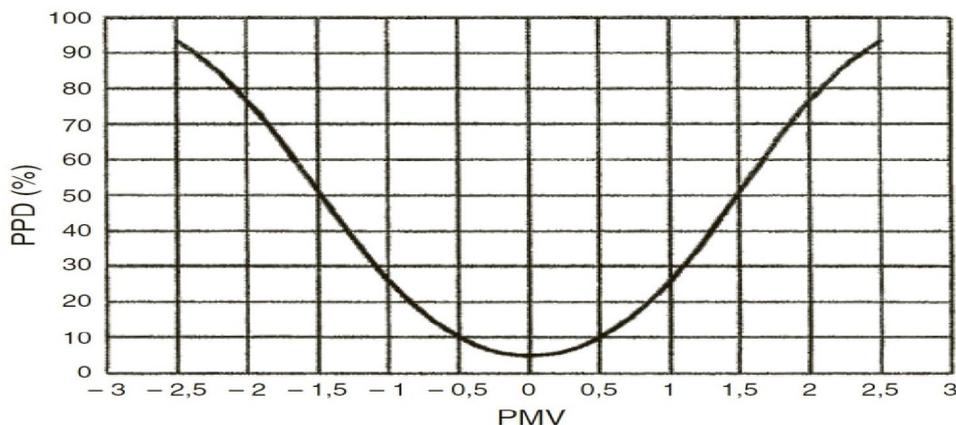


Fig.2.8. Correspondance entre les indices **PMV** et **PPD**.

Un **PMV** compris entre - 1 et + 1 correspond à 25 % d'insatisfaits. Pour obtenir une situation de confort thermique le **PPD** doit être inférieur à 10 % ce qui correspond à un **PMV** compris entre - 0,5 et + 0,5.

Des tableaux ont été élaborés donnant la valeur du **PMV** pour différentes valeurs des 6 paramètres du confort thermique. Par exemple avec les paramètres suivants : niveau d'activité : $70 W/m^2$, habillement (été) : 0,5 clo, température opérationnelle : 24 °C, vitesse

relative de l'air : 0,30 m/s, humidité relative : 50 %, le **PMV** est de 0,6 ce qui correspond à une prévision de 15 % d'insatisfaits.

❖ Zones de confort

Les zones de confort sont définies comme étant des environnements hygrothermiques pour lesquels 80 % des personnes sont satisfaites. Le diagramme (figure 2.9) indique la zone de confort admissible en fonction du degré hygrométrique et de la température intérieure.

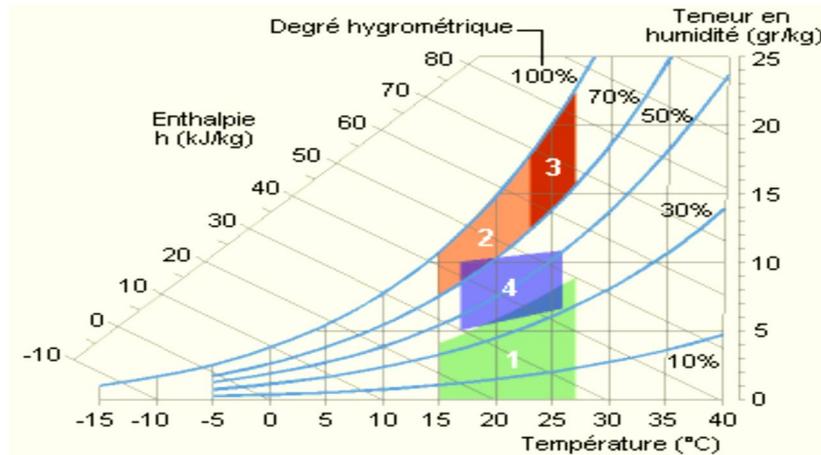


Fig.2.9. Plage de confort sur le diagramme de l'air humide [R. Fauconnier, 1992].

- **1** : Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.
- **2 et 3** : Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de micro champignons.
- **3** : Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.
- **4** : Polygone de confort hygrothermique.

2.9. Qualité de l'Air Intérieur QAI

La qualité de l'air intérieur (QAI ou IAQ, *Indoor Air Quality*) est une véritable préoccupation de santé publique, tant sur le plan national qu'international. Du fait de la crise pétrolière, la politique d'économie d'énergie s'est traduite par une meilleure isolation des locaux et a ainsi contribué à réduire le renouvellement d'air et à accroître la dégradation de l'air intérieur. De nombreuses études ayant pour objet de comparer la concentration de quelques polluants dans l'air intérieur (C_{int}) et dans l'air extérieur (C_{ext}) ont mis en évidence des rapports C_{int}/C_{ext} souvent supérieurs à 1.

L'évolution des modes de vie a conduit l'ensemble de la population à passer un temps de plus en plus long à l'intérieur des locaux. Un adulte passe de 80 à 90 % de son temps à l'intérieur d'espaces clos soit environ par jour 12 à 14 heures dans son habitat, 6 à 8 heures dans un local professionnel, 0,5 à 2 heures dans les transports et 1 heure dans des endroits divers (lieux de loisir, de sport...). Les personnes âgées et les très jeunes enfants restent souvent plus de 97 % de leur temps en espace clos.

La santé est intimement liée à l'exposition de l'homme à son environnement. L'exposition chronique à faibles doses sur une longue période est suspectée d'être responsable, en particulier, de l'augmentation des cancers, de l'asthme et de maladies cardiovasculaires. L'OMS a montré que la pollution de l'air intérieur de l'habitation figure au huitième rang des facteurs de risque les plus importants et qu'elle correspondrait à 2,7 % de la charge mondiale de morbidité. En 17/10/2013, l'OMS La pollution de l'air extérieur classée comme cancérigène provoque le cancer du poumon et de la vessie.

De nombreuses plaintes pour inconfort et nuisances ont souvent pour origine une mauvaise qualité de l'air intérieur.

La pollution intérieure est caractérisée par une grande diversité de polluants. On distingue généralement :

- la pollution chimique (monoxyde de carbone, oxydes d'azote, ozone, métaux lourds, composés organiques volatils ou non volatils...) ;
- la pollution physique (particules, amiante, ondes électromagnétiques, radon...) ;
- la pollution biologique (moisissures, acariens, blattes, bactéries, virus...).

À ces pollutions spécifiques de l'air intérieur, il faut ajouter la pollution de l'air extérieur, actuellement assez bien maîtrisée, grâce à la mesure de nombreux indicateurs de pollution dont la plupart des effets sanitaires sont connus.

2.10. Amélioration de la qualité de l'air intérieur par ventilation

Les concentrations de contaminants dans les milieux clos et semi-clos peuvent être réduits en diluant l'air intérieur avec de l'air extérieur. Une telle dilution peut se produire en tout ou partie par infiltration ou extraction, par ventilation naturelle et ventilation mécanique [Thad Godish, 2004]. Une vingtaine d'études concernant plus de 30 000 personnes ont constaté

que le taux de ventilation doit être à 10 l/s et par personne pour une bonne qualité de l'air. [Tong Yang et al, 2012].

2.11. Économie d'énergie par ventilation naturelle

La ventilation naturelle peut compenser la consommation d'énergie nécessaire au refroidissement. Dans une comparaison directe réalisée au Royaume-Uni entre des locaux de bureaux naturellement ventilés et d'autres à air-conditionner. Il apparaît clairement que la ventilation naturelle permet de réaliser des économies en coût d'énergie évaluée à 0.77 jusqu'à 2.05 £/m² (approximativement 1.30 à 3.60 \$/m²) par année [Emmerich et al, 2001].

2.12. Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est définie comme étant un apport d'air extérieur sous l'effet de phénomènes purement naturels. Les gradients de pression et de température sont les deux mécanismes responsables de ce phénomène.

a) Gradients de pression

Lorsque le vent rencontre un obstacle qui peut être à l'occasion une structure d'habitation, il se crée dans les zones de contact une surpression due à une accumulation plus ou moins rapides des molécules d'air. Si cette surface de contact présente des ouvertures (fenêtres, portes, cheminées, etc.), il résultera un écoulement d'air gouverné par une différence de pression entre la zone de contact (coté au vent) et les autres surfaces de la construction (coté sous le vent) [BANSAL et al, 1993].

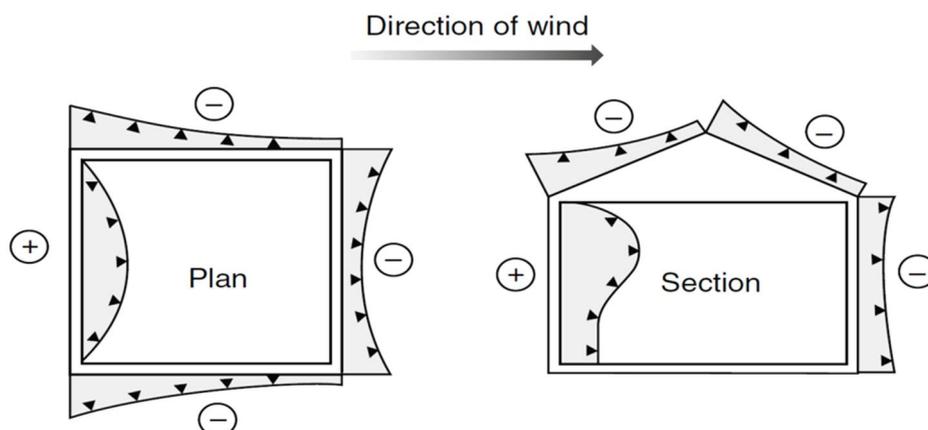


Fig.2.10. Répartition de la pression du vent sur un bâtiment [Tong Yang et al, 2012].

b) Gradients de température

L'existence d'une différence de température entre l'intérieur d'une habitation et l'air environnant produit une différence de densité entre les deux milieux. Sachant que l'air chaud et donc plus léger remonte toujours vers le haut, il suffit de placer judicieusement des ouvertures sur le bas des façades et en haut de l'habitation.

Si la température à l'intérieur est supérieure à celle de l'extérieur, les parties supérieures de la construction auront une pression plus élevée que celle des parties inférieures. L'air pénètre par les ouvertures inférieures et s'échappe par le haut. Dans le cas où la température de l'air intérieur est plus faible qu'à l'extérieur, le flux d'air est inversé [BANSAL et al, 1993].

La ventilation naturelle est le cœur de la conception bioclimatique dans les climats arides et semi-arides. Elle permet de limiter l'utilisation d'un système de ventilation mécanique et d'éviter le plus souvent le recours à la climatisation [Benoudjafer, 2010].

2.13. Types de ventilation naturelle

2.13.1. Ventilation d'un seul côté mono exposé

C'est le cas où il n'y a d'ouvertures que d'un seul côté, généralement une seule façade de l'espace à ventiler, tandis que l'autre côté est cloisonné.

2.13.1.1. Ouverture unique en façade

L'efficacité de cette configuration étant faible, il faut se limiter, en général, à une profondeur de la pièce inférieure ou égale à 2 fois la hauteur sous plafond. On considère qu'une profondeur de 6 mètres est le maximum pour avoir une ventilation efficace dans toute la zone.

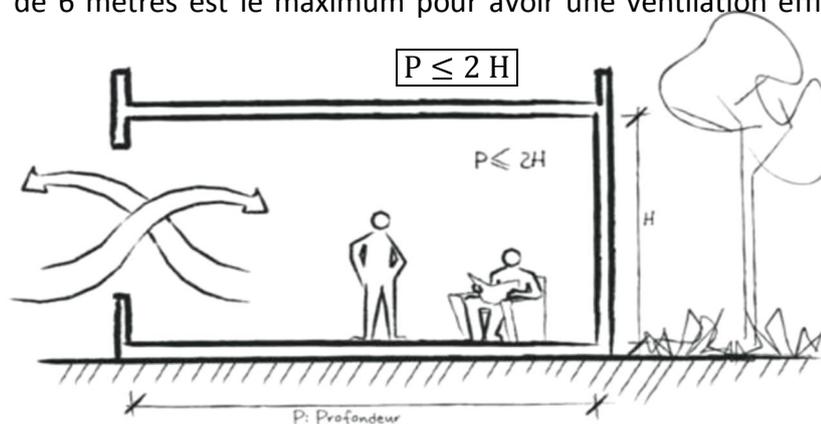


Fig.2.11. Ventilation mono-exposée simple ouverture [Sellier, 2012].

Ou : P : Profondeur de la pièce (m).

H : hauteur de sous plafond (m).

2.13.1.2. Deux ouvertures en façade

Il est également possible d'avoir une ventilation mono-exposée avec deux ouvertures placées à une hauteur différente. Le tirage thermique est renforcé pour ce type, car il y a une séparation physique entre l'entrée et la sortie d'air. Ce type de configure est utilisé lorsque la profondeur de la pièce a ventilée est inférieur ou égale deux fois et demi la hauteur sous plafond.

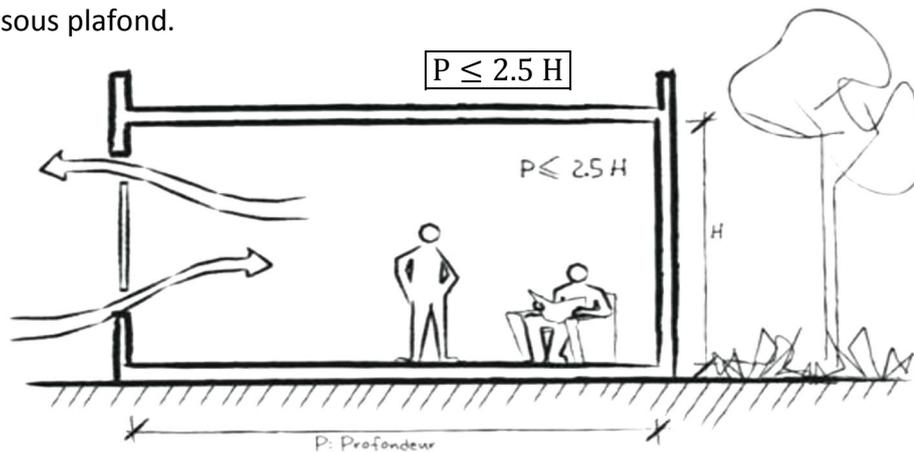


Fig.2.12. Ventilation mono-exposée à double ouvertures [Sellier, 2012].

2.13.2. Ventilation transversale

Ce cas correspond à une ventilation obtenue par la disposition d'ouvertures dans deux façades opposées du bâtiment. Elle résulte essentiellement de la force du vent.

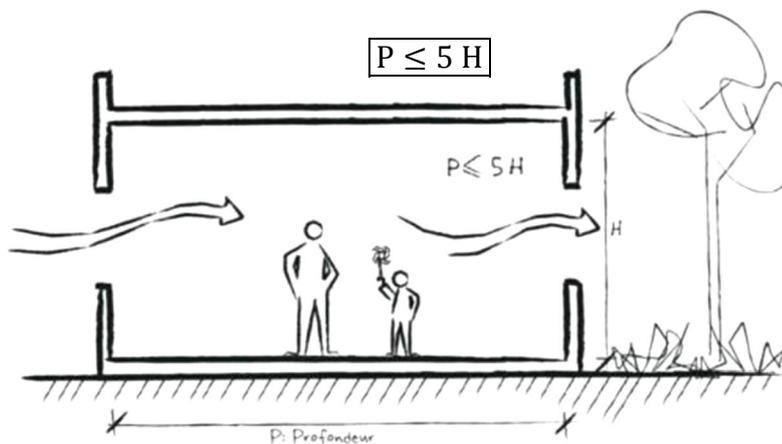


Fig.2.13. Ventilation transversale [Sellier, 2012].

2.13.3. Tour à vent et variantes

Les tours à vent sont des dispositifs utilisés traditionnellement au Moyen-Orient et plus particulièrement en Iran, où ils sont également appelés **badgir**. C'est une sorte de cheminée ajoutée à la structure du bâtiment et qui capte le vent en altitude, où la vitesse du vent est généralement plus élevée. La différence de pression étant alors plus importante, le débit de ventilation s'en trouve augmenté.

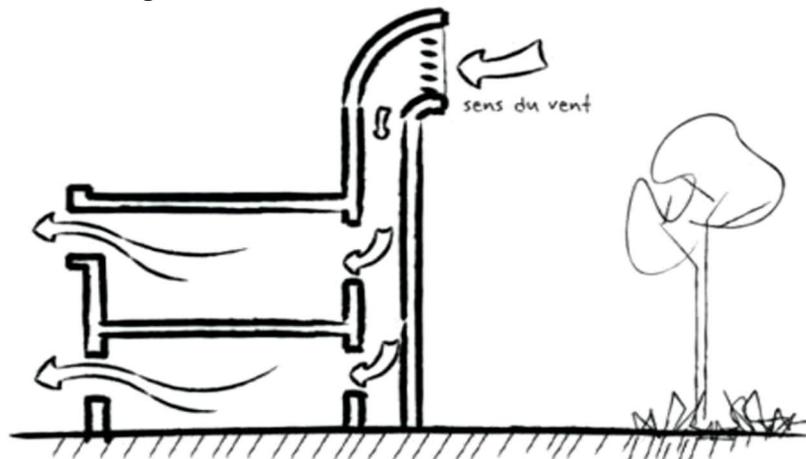


Fig.2.14. tour à vent [Sellier, 2012].

2.13.4. Ventilation par cheminées

C'est une ventilation qui repose sur l'effet de tirage thermique, et qui peut être renforcée par le vent si la sortie est conçue dans des zones de pression négative (coté sous le vent). L'air traverse la structure ciblée, puis ressort par le conduit vertical de la cheminée. La circulation de l'air est ainsi maintenue.

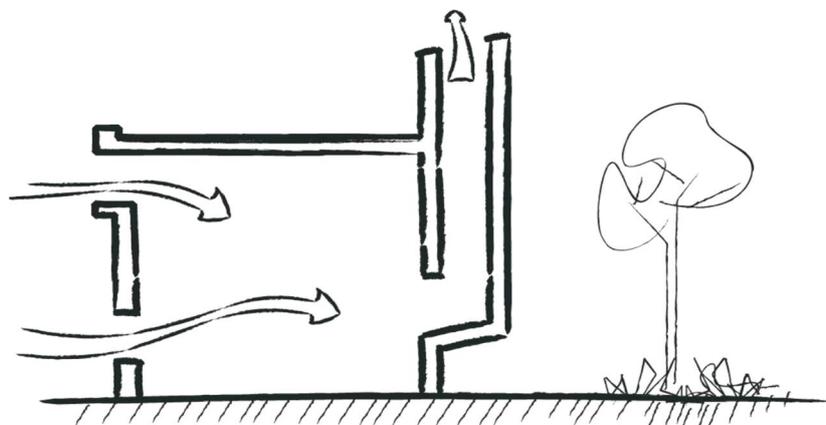


Fig.2.15. Ventilation par cheminée [Sellier, 2012].

2.13.5. Ventilation par atrium

L'atrium joue un rôle dans la ventilation naturelle, car il agit comme une cheminée solaire géante. L'intérêt de l'atrium est que le volume du bâtiment que l'on peut ventiler naturellement est doublé puisque l'entrée d'air se fait des deux côtés du bâtiment, tandis que l'extraction se fait au milieu (effet équivalent à une rangée de cheminées placées au centre du bâtiment).

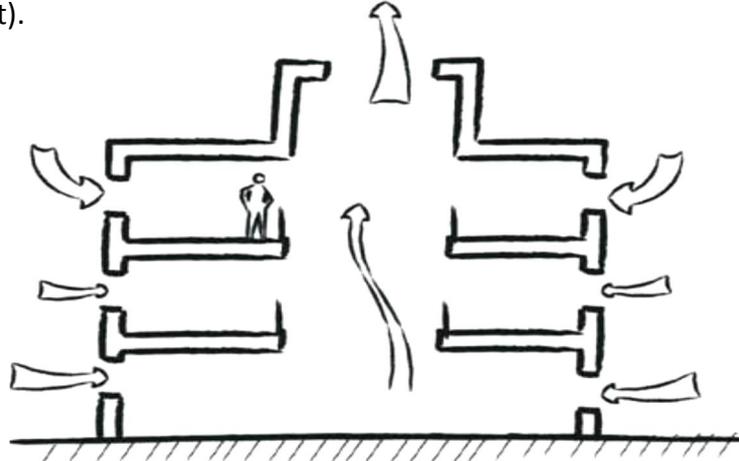


Fig.2.16. Ventilation par atrium [Sellier, 2012].

2.13.6. Ventilation par puits canadiens

La ventilation par puits canadien peut fonctionner naturellement ou à l'aide d'un tirage par ventilateur. Dans tous les cas l'air transite par de longs conduits qui passent dans la terre. Ceci permet de tempérer l'air par échange avec la terre : en hiver, l'air froid est réchauffé et en été l'air chaud est rafraîchi. Le système est basé sur le simple constat que la température de la terre est plus ou moins constante à partir d'une certaine profondeur. A deux mètres environ, elle se maintient autour de 15 °C pendant l'été et de 5 °C pendant l'hiver.

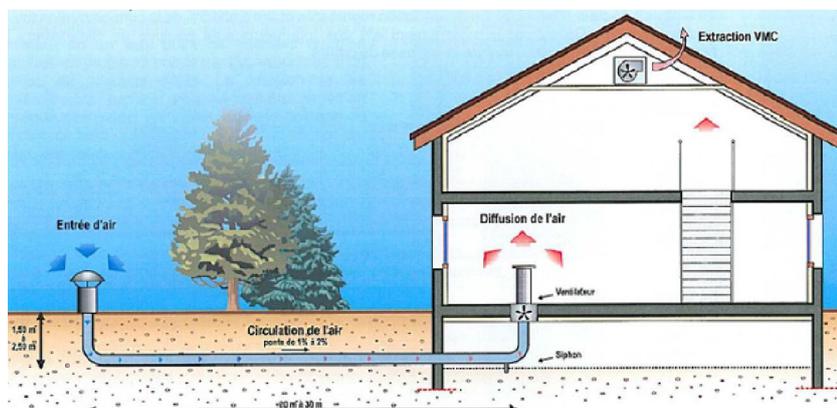


Fig.2.17. Ventilation par puits canadien pour maison individuelle [www.eole-fr.com].

2.13.7. Ventilation par façade double peau (FDP)

Le principe permet en théorie d'apporter une bonne luminosité aux locaux sans compromettre les performances thermiques du bâtiment.

Une FDP est le plus souvent constituée de deux parois en verre avec des protections solaires entre les deux. La cavité constituée entre les deux unités vitrées est ventilée afin d'extraire les gains solaires et d'éviter qu'ils ne réchauffent l'intérieur du bâtiment. C'est notamment ce phénomène qui rend la façade double peau plus performante qu'une simple façade, fût-elle entièrement en triple vitrage.

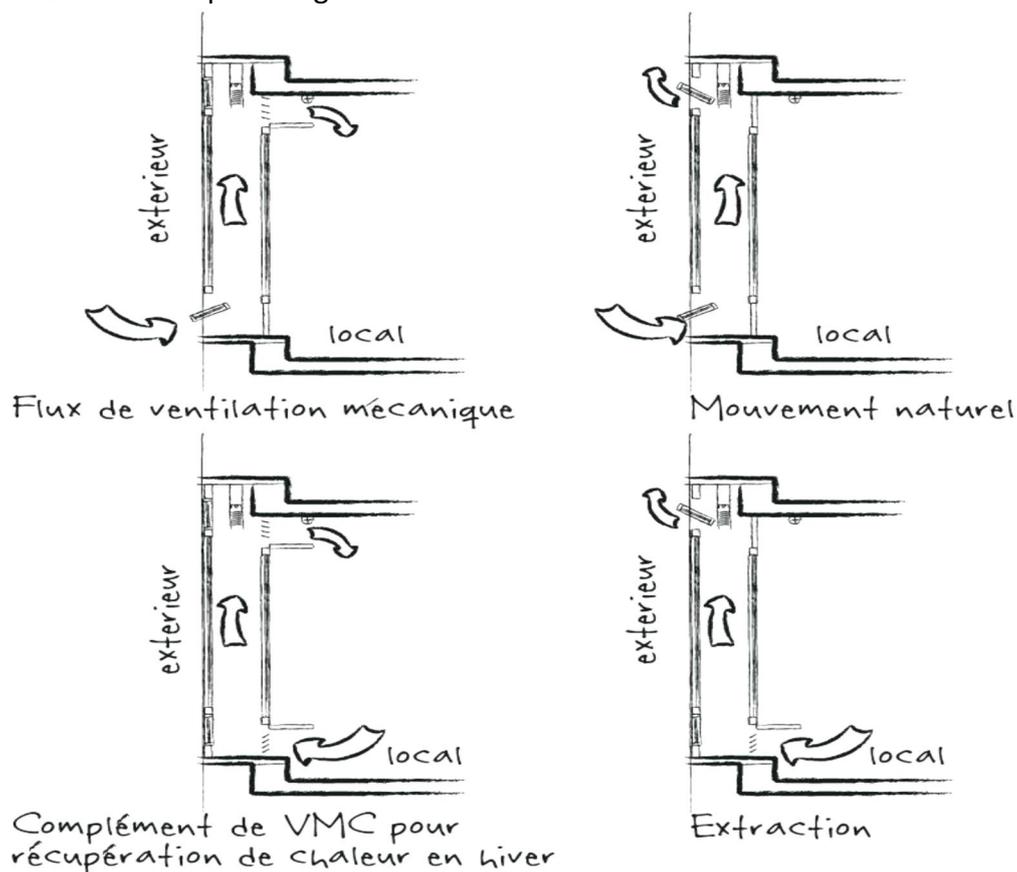


Fig.2.18. Différents modes de fonctionnement d'une façade double peau [Sellier, 2012].

2.14. Avantages et inconvénients de la ventilation naturelle

La technique de la ventilation naturelle présente généralement les avantages suivants:

- Faible consommation d'énergie.
- Faible cout de maintenance.
- Propre, non-polluante et produit peu ou pas de bruit.
- Ces installations sont relativement peu coûteuses à installer et simple d'utilisation.

- ❑ Création de conditions ambiantes saines.

La ventilation naturelle n'a pas que des avantages, elle présente également certains inconvénients [Elzaidabi, 2008] :

- Inaptitude à être utilisée dans tous les climats.
- Ne convient pas à tous les types de bâtiments car elle peut nécessiter des travaux importants d'aménagement.
- Difficile à contrôler. Il n'est pas possible, par exemple de prédéfinir une température.

2.15. L'origine du vent

Du fait de la position de la terre par rapport au soleil et de sa forme aplati, le rayonnement solaire absorbé à l'équateur est nettement supérieur à celui absorbé aux pôles.

Cette différence engendre un important gradient de température qui induit des différences de densité entre les masses d'air proches de l'équateur et celles qui en sont plus éloignées. Cela provoque le déplacement d'importante quantité d'air à travers les couches atmosphériques, et donc l'apparition du vent [KASBADJI, 2006].

Les premières études ponctuelles concernant les variations temporelles et spatiales de la vitesse du vent ont été publiées en 1942. En débouché en 1981 sur la publication du premier atlas du vent à Washington (USA).

Les premiers travaux Algériens sur le potentiel éolien ont été publiés par Said en 1984 [KASBADJI, 2006]. D'autres travaux sur le même sujet ont été publiés par la suite dont les travaux de Benssad, en 1985, Hammouche, en 1990, Kasbadji Merzouk en 1994 et F. Youcef Ettoumi en 2002 [KASBADJI, 2006].

2.16. Évaluation du gisement national du vent

Le nord de l'Afrique est pourvu des meilleurs potentiels éoliens du continent [HElimax, 2004].



Fig.2.19. Répartition des plus importants gisements en Afrique [HElimax, 2004].

Les paramètres du vent sont mesurés généralement à la hauteur normalisée à 10 m de hauteur du sol.

Le tableau suivant représente les moyennes mensuelles et annuelles des vitesses du vent, relevées à travers le territoire national.

	alt	lat	Long	Jan	Fev	Mrs	Avr	Mai	Jun	Juil	Aut	Spt	Oct	Nvb	Dec	Ann
Adrar	280	27.8	- 0.2	6.2	6.4	6.5	6.5	6.9	6.1	6.7	6.2	6	5.8	5.9	5.8	6.3
Ain-Sefra	1174	32.8	- 0.6	4.6	5.1	5.1	5.4	5.2	4.9	4.3	42	4.1	4	4.2	4.9	4.7
Alger	25	36.8	3.1	2.2	2.2	2.2	2.1	1.9	1.8	1.6	1.5	1.6	1.4	1.9	2.4	1.9
Annaba	4	36.8	7.8	2.5	2.4	2.5	2.2	2.1	2.2	2.4	2.3	2.3	1.8	2.4	2.5	2.3
Batna	822	35.2	6.3	2.9	31	3.6	3.2	2.7	3	3	3.1	3	2.7	2.6	3.3	3
Bechar	881	31.7	- 2.3	3.2	3.2	4.1	4.6	5	4	4.1	4	37	2.8	2.9	3.1	3.7
Bejaia	2	36.7	5.1	3.7	3.4	2.9	2.8	2.5	2.4	2.4	2.3	2.7	3.2	3.6	4.1	3
Biskra	87	34.8	5.7	3.9	4.3	4.9	5.3	5.1	4.3	3.8	3.7	39	3.3	4	4.1	4.2
Bou-Saada	461	35.3	4.2	5.5	5.1	6.3	5.1	4.3	3.2	2.5	2.6	2.8	3.1	4.7	5.5	4.2
Chleff	143	36.2	1.3	31	3.5	3.3	2.6	3	2.7	2.1	2.4	2.7	2.9	3	3.1	2.9
Constantine	694	36.3	6.6	4	3.3	3.5	2.7	2.5	2.1	1.8	2	2	2.1	2.8	3.4	2.7
Djanet	967	24.3	9.5	3	2.9	3.5	4.1	4	4.2	4.1	4.2	3.5	3.2	2.4	2.4	3.5
Djelfa	1144	34.7	3.2	3.2	5	5.2	5.6	4.7	5.1	4	4.2	4	3.9	3.6	3.5	4.3
El Colea	397	30.6	2.9	2.8	3.8	4.3	4.2	4.7	39	3.3	3.2	3.7	3.5	2.6	3	3.6
El oued	61	33.5	6.8	2.6	2.7	3.6	4	3.9	3.8	3.5	3.5	3	2.6	2.3	2.6	3.2
Ghardaïa	450	32.4	3.8	3.5	3.2	4.4	4.5	3.9	3.5	2.9	2.7	3	2.8	2.8	3.5	3.4
Guelma	4	36.5	7.7	2.4	2.3	2.5	2.2	2.1	2.2	2.4	2.3	2.3	1.9	2.4	2.5	2.3
Griss	90	35.2	0.2	2.7	23	2.3	2	2.1	1.7	1.5	2	1.9	1.9	2.6	2.7	2.1
H-Messaoud	142	31.7	6.2	3.2	3.3	4.1	4.2	4.8	4.1	3.4	3.7	3.9	3.5	2.8	3.1	3.7
H-R'mell	774	32.9	3.3	5.7	6.3	7.6	8.1	7.8	6.6	5.3	5.4	54	4.8	4.5	5.7	6.1
Illizi	558	26.5	8.4	3.7	3.7	4.1	4.1	4.5	4.9	4.6	4.6	4.3	3.9	3.7	3.4	4.1
Inamenass	562	28	9.6	3.9	4.5	5	5.2	6	5.7	4.6	4.8	4.7	4.4	3.9	3.8	4.7
Insalah	293	27.2	2.5	5.3	4.9	5.5	5.1	5.6	5.3	5.6	5.3	4.9	4.6	4.7	4.3	5.1
Jijel	11	36.8	5.9	2.6	2.9	3.3	2.8	2.1	2.1	2.1	2	2.1	2.2	2.5	3.1	2.5
Laghouat	765	33.8	2.9	3.4	3.4	3.9	4.3	3.8	3.6	3	2.9	2.8	2.6	2.7	3.3	3.3
Oran	90	35.6	- 0.6	2.7	2.8	3.2	3	3	2.9	2.6	2.3	2.3	2.1	2.4	2.7	2.7
Ouargla	142	31.9	5.4	3.1	3.3	4.3	4.2	4.9	4.7	4	4.1	4.3	3.5	2.8	2.8	3.8
Sétif	1040	36.2	5.3	3.4	3.8	3.8	3.7	3.3	34	3.2	3.3	3.4	3	3.2	3.1	3.4
Tamanrasset	1378	22.8	5.4	3.4	2.9	2.9	2.9	3.1	3.2	3.3	3.2	3	2.9	2.5	2.6	3
Tébessa	811	35.4	8.1	3.2	3.2	3.5	3.1	2.9	2.5	2	2.1	2.3	2.4	2.9	3.3	2.8
Tiaret	989	35.3	1.5	3	4.1	3.8	3.2	3.5	3	2.6	2.8	2.9	2.9	36	4	3.3
Timimoune	312	29.2	0.3	5	5.6	5.3	5.9	6.1	4.8	4.9	4.9	4.5	4.1	4.4	4	5
Tindouf	431	27.7	- 8.1	4.6	5.4	5.3	7	7.3	7.3	5.6	6.2	6.7	4.7	4.3	4	5.7
Tlemcen	247	35	- 1.5	3.7	3.2	3.3	2.3	2.1	1.8	1.5	1.6	1.4	2.4	3.9	3.9	2.5
Touggourt	85	33.1	6.1	2.9	3.1	3.9	4.1	4.2	3.7	3.4	3.7	3.2	2.9	2.9	2.9	3.4

Tableau.2.7. Relevé des moyennes de vitesse du vent (2004-2009) en Algérie [Chellali et al, 2011].

Il apparait d'après le tableau 7 que l'Algérie dispose d'un potentiel éolien élevé. 78 % de la surface du pays est caractérisée par des vitesses supérieures à 3 m/s .

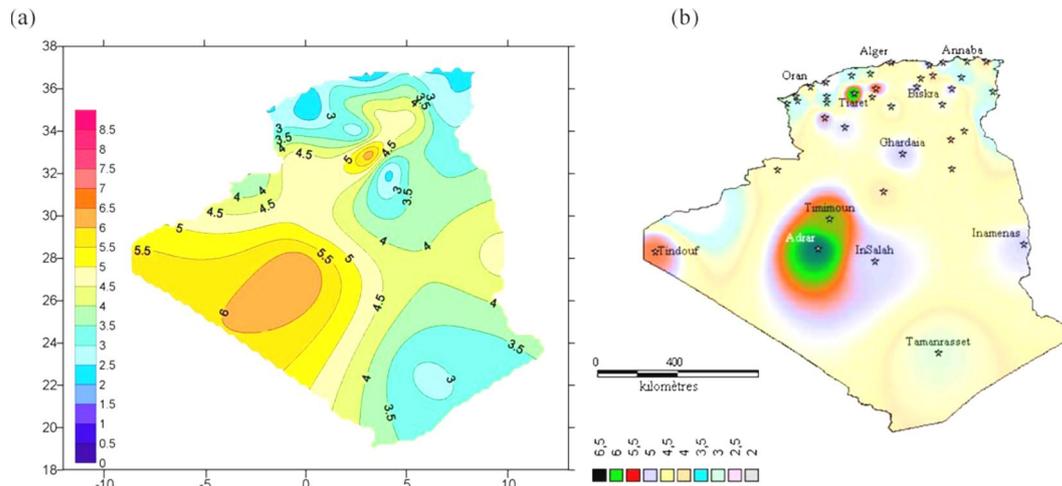


Fig.2.20. Cartes annuelles de la vitesse du vent en Algérie à 10 m de haut [KASBADJI, 2006].

Le document 1.20 illustre une projection de la distribution de la vitesse du vent sur la carte de l'Algérie. Il y apparait clairement que la partie sud du pays profite d'un gisement éolien nettement supérieur à la partie nord. On constate également que le quart sud-ouest du pays est la région la plus venteuse avec des vitesses supérieures à 4 m/s à Bechar, et à 5 m/s à Tindouf et même à 6 m/s pour Adrar. Toujours d'après le tableau 2.7, on constate que les mois d'Avril, Mai, et Juin sont les plus venteux, particulièrement dans les régions intérieures. Il nous reste à préciser que le gisement éolien d'une région donnée est influencé par la topographie de cette région. Cela est illustré par la figure 2.21.

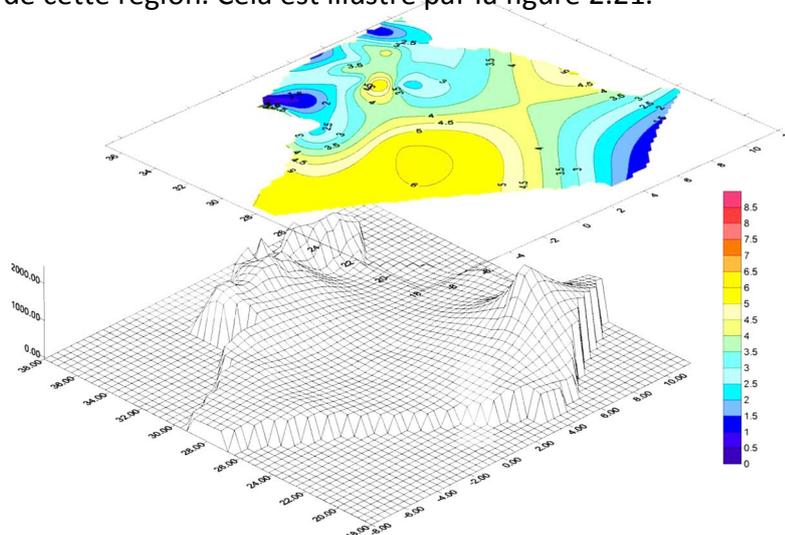


Fig.2.21. Carte des vitesses des vents projetée sur la carte topographique de l'Algérie [Chellali et al, 2011].

Le présent mémoire est consacré à l'étude numérique d'une structure de ventilation naturelle sur les bases de données atmosphériques récoltées dans la région de Bechar. C'est pourquoi nous nous intéressant plus particulièrement au gisement éolien de cette région. La ville de Béchar étant située dans le sud-ouest de l'Algérie, elle profite du potentiel venteux de la région. La moyenne annuelle de la vitesse du vent est de 3.7 m/s (tableau 2.7). Les vents dominants soufflent du nord vers le sud, et plus précisément du Nord-est vers le sud-ouest. Cela constitue un gisement important pour la production d'électricité par l'énergie éolienne, et pour l'amélioration du confort thermique par ventilation naturelle.

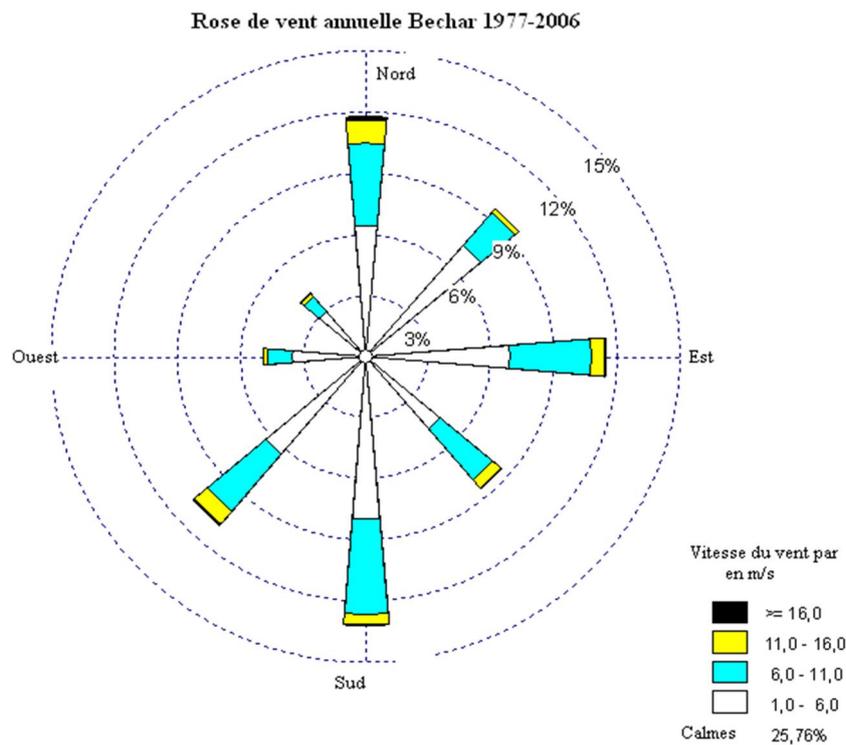
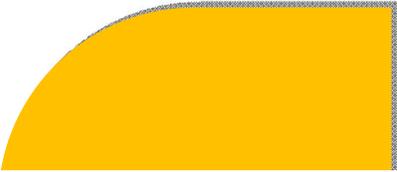


Fig.2.22. Rose de vent annuelle de la vile de Béchar (1977-2006) [Imessad, 2014].



CHAPITRE 3

LES TOURS À VENT



3.1. Introduction

Nous avons exposé au chapitre précédent différentes techniques de ventilation naturelle. Le but étant d'éclairer le lecteur sur le contexte général de cette thèse. Le présent chapitre revient sur l'une de ces techniques afin d'en détailler le fonctionnement. Il s'agit de la ventilation naturelle par tour à vent.

3.1. Revue historique

Les tours à vents comme des éléments architecturaux et traditionnelles sont considérées comme solution qui répond aux problèmes environnementaux locaux, et y ont subi beaucoup de changement dès leurs apparition jusqu'aux jours actuelles.

L'idée courante considère les tours à vent comme une technique purement Persienne utilisés depuis plusieurs décennies, mais des gravures trouvées prouvent que l'idée des tours à vent revient aux premiers périodes pharaoniques (1300 Avant J. C) [Fathy, 1986]. L'idée des tours à vent est plus ancienne que nous croit [Beazley et al, 1982].

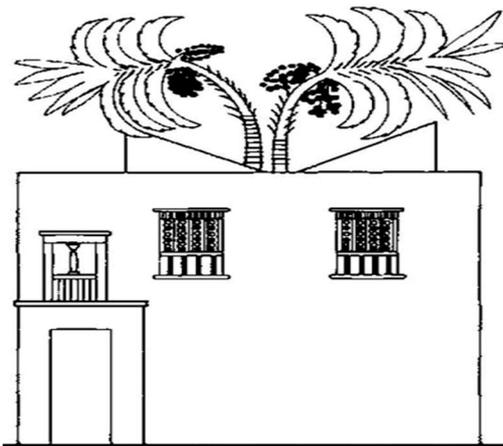


Fig.2.1. *Malqaf* dans une maison Pharaonique (maison de Neb-Amun (1300 Avant J. C) [El-Shorbagy, 2010].

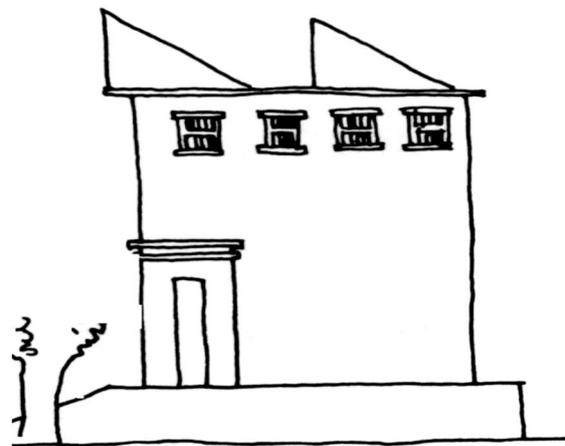


Fig.2.2. Maison avec deux attrapes-vent dessinée sur un papyrus trouvés dans les tombes du Nouvel Empire en Égypte vers 1500 Avant J. C [Beazley et al, 1982].

Une conception innovatrice à été créée en Bédouin Cyrénaïque entre 5 et 7^{eme} siècle Avant J. C afin de favoriser leurs conditions de vie. Un capteur du vent, inclus dans les toiles de tente soutenu par trois poteaux en bois (figure 3.3) [Beazley et al, 1982].

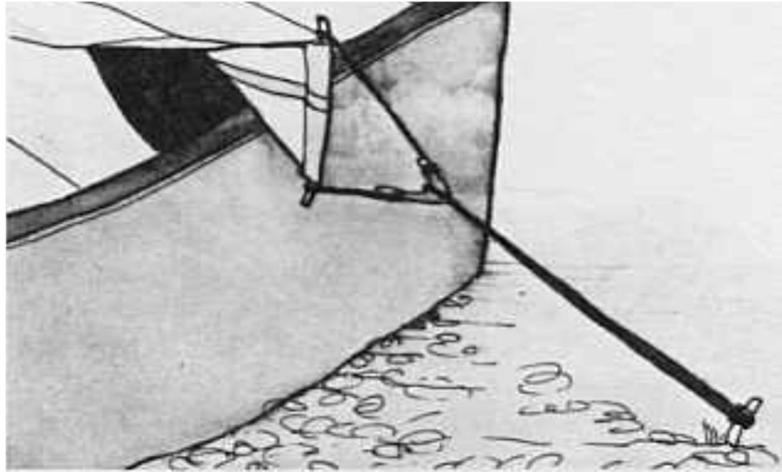


Fig.3.3. Capteur du vent inclu dans la tente Bédouin [Beazley et al, 1982].

Les maisons du début période arabo-islamique ont été équipées d'un *Takhtabush*, une chambre avec un côté ouvert sur la cour toute en assurant une ventilation du local.



Fig.3.4. *Takhtabush* d'une maison traditionnelle en Caire, Égypte [<http://www.knoji.com>].

En deuxième siècle islamique (période des Mamluk), une nouvelle technique de ventilation a été intégrée aux maisons Cairotes, il s'agit du *Qa'ah*.

Le *Qa'ah* (hall d'accueil) [Petersen, 2002] est composé de *dorq'ah* (partie centrale du *qa'ah*) avec une hauteur sous plafond couverte par le *shokhshekah* (lanterne en bois sur le dessus) munie d'ouvertures pour permettre l'air chaud de s'échapper. La surface supérieure du *shokhshekah* est de forme plate afin d'augmenter l'exposition aux rayons solaires pour accélérer le tirage thermique des couches d'air supérieures [El-Shorbagy, 2010].

Le *Malqaf* était le moyen d'assurance de la circulation d'air à l'intérieur de l'habitat. Une tour à vent unidirectionnelle construite au nord du *qa'ah* avec une ouverture contre les vents dominants.



Fig.3.5. Vue extérieur et intérieur du *Malqaf* [El-Shorbagy, 2010].

La maison de Muhib Ad-Din (1350) en Caire montre le système qui combine *malqaf*, *dorq'ah* et le lanterne dans une seule structure pour assurer une meilleure circulation d'air frais dans le *qa'ah*.

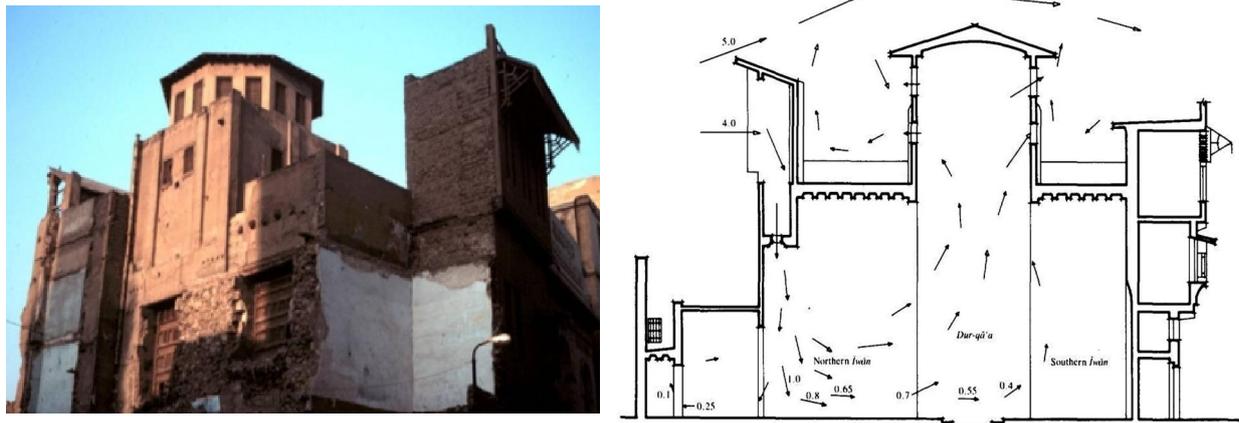


Fig.3.6. *Qa'ah* de Muhib Ad-Din, Caire (1350) [El-Shorbagy, 2010].

Les voyageurs du 17e siècle ont décrit des tours à vent à Ispahan, Shiraz, Lar, Kashan et Tabriz et il semble qu'elles ont été largement utilisées à cette époque en Iran. Sans aucun doute Yazd, connue sous le nom de *Shahr-i badgirha*, (ville des tours à vent) a été au centre de l'évolution du grand tour à vent. La technologie du tour à vent été ensuite transféré au pays du golf tels que Manama (Bahreïn), Dubaï et plus tard au Pakistan moderne [Beazley et al, 1982].

Au début du 20^{ème} siècle, les jeunes architectes dans le monde arabo-islamique, poussés par leur passion pour l'architecture traditionnelle et vernaculaire, ont essayé de reproduire les meilleurs éléments de cette dernière. La tour à vent été parmi les techniques réutilisé.

La maison d'Abdel-Rahman Nassif (1974) en Jiddah, Arabie-Saoudite incorpore toute un système climatique qui contient la cour (courtyard), *malqaf*, *qa'ah* (zone d'hôte), *dur-qā'a* (partie centrale du *qa'ah*), et le lanterne en bois.

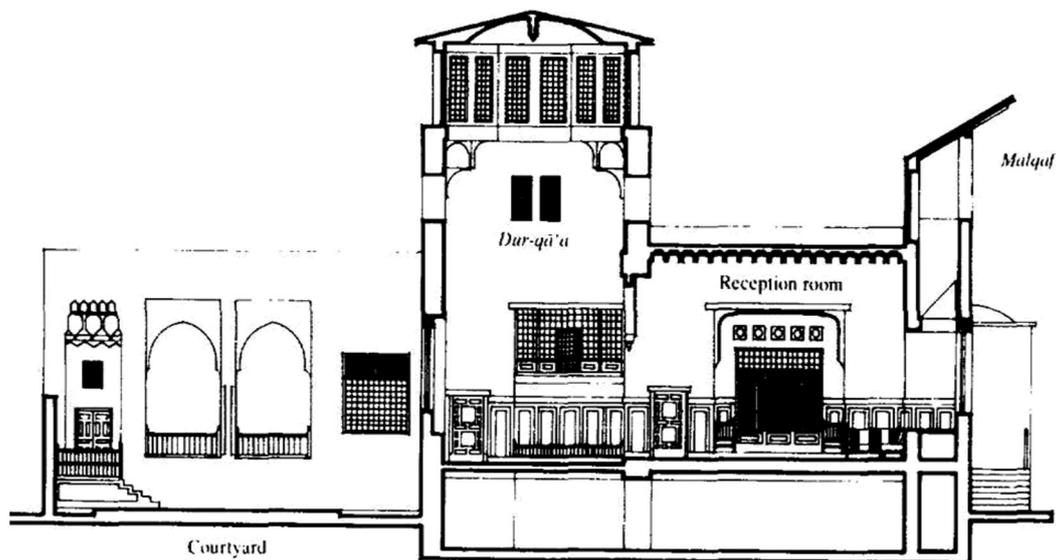


Fig.3.7. Maison de Abdel-Rahman Nassif à Jedah, Arabie Saoudite [El-Shorbagy, 2010].

L'université de Qatar (1973), Le Musée d'art contemporain de Téhéran en Iran (1977), et beaucoup d'autres exemples peuvent être largement observés en terme d'utilisation des tours à vent.

L'idée de tour à vent a attiré l'attention des architectes occidentaux. Ils ont relancé la tour à vent traditionnelle en tant que forme et fonction et y employé dans leurs bâtiments modernes en bois (figure 3.8).

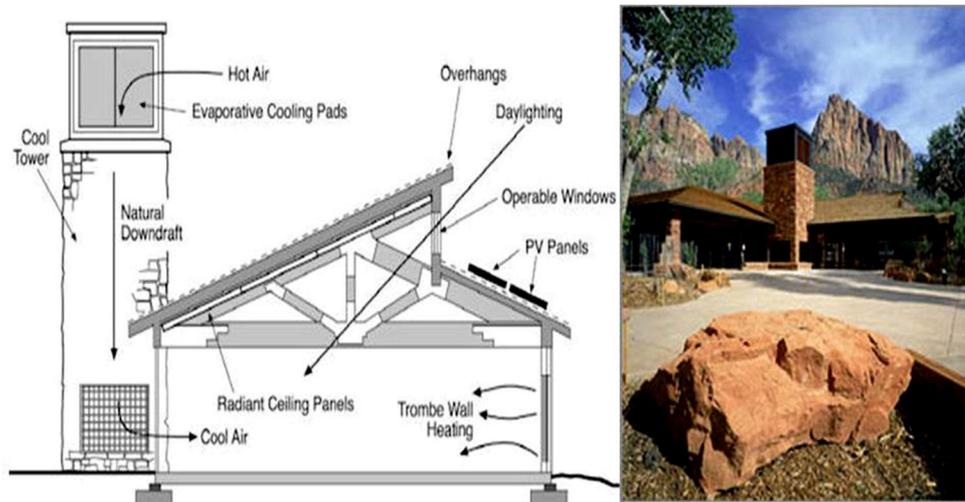


Fig.3.8. Centre des visiteurs du parc national, Etats-Unis [El-Shorbagy, 2010].

L'évolution technologique offre chaque jour des innovations qui mènent à la réduction de la taille, toute en améliorant le rendement et l'efficacité des tours à vent.

Les tours à vent commerciales sont devenues parmi les solutions prometteuses dans le concept d'économie d'énergie. Les nouvelles techniques varient d'extracteurs de fumées, tours à vent avec éclairage solaire, etc. [Elzaidabi, 2008].

3.2. La ventilation naturelle en utilisant la tour à vent

Le système de tour à vent utilise les différences naturelles de pression autour d'une structure, causée par le vent et les gradients de température pour diriger l'écoulement d'air à travers le bâtiment [Elmualim, 2006]. La tour à vent attrape le vent dominant, en le dirigeant vers le bas à une certaine vitesse. L'air s'écoule et quitte le bâtiment par les ouvertures (fenêtres ou orifices de sortie).

La principale force motrice pour la tour est le vent extérieur, qui fournit 76 % de plus de ventilation à l'intérieur que les forces motrices de flottabilité [Hughes et Ghani, 2010].

Le vent change de direction sur une certaine plage et sur une base horaire, journalière et saisonnière. Le champ de pression sera également modifié. L'orifice d'entrée de la tour peut changer de pression positive à une pression négative. Dans ce cas, l'ouverture fonctionne comme un conduit d'évacuation [Hughes et al, 2012].

En absence du vent, la force motrice de la tour est la *flottabilité* ou *effet de cheminée* qui est le résultat de la différence de température de l'air entre le milieu intérieur (structure à ventilé) et le milieu extérieur. L'air chaud (moins dense) se lève et s'échapper par la partie supérieure de la tour. Par conséquent, l'air extérieur sera aspiré pour remplacer l'air qui s'est échappé (par succion).

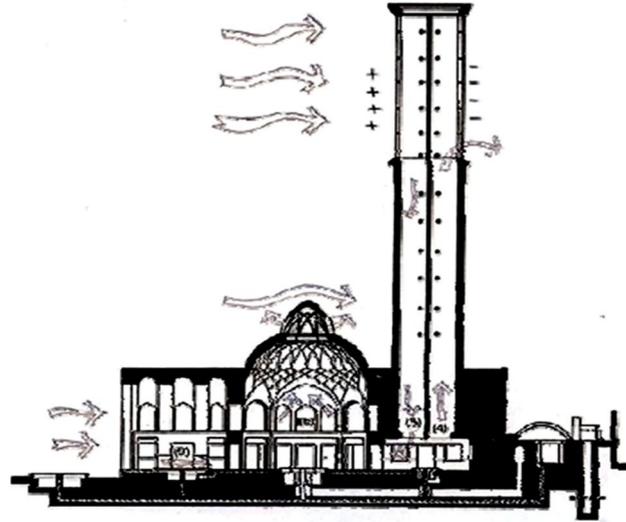


Fig.3.9. Principe de fonctionnement de système tour à vent [Maleki, 2011].

3.3. Variation Micro et Macro climatique

Le micro climat se réfère aux conditions climatiques spécifiques dans une zone relativement petite, par exemple une pièce ou un espace fermé qui peut être contrôlé et modifié. Les conditions atmosphériques dans un microclimat (température, humidité, etc.) peuvent différer des conditions existantes sur les zones qui l'entourent, le macro climat.

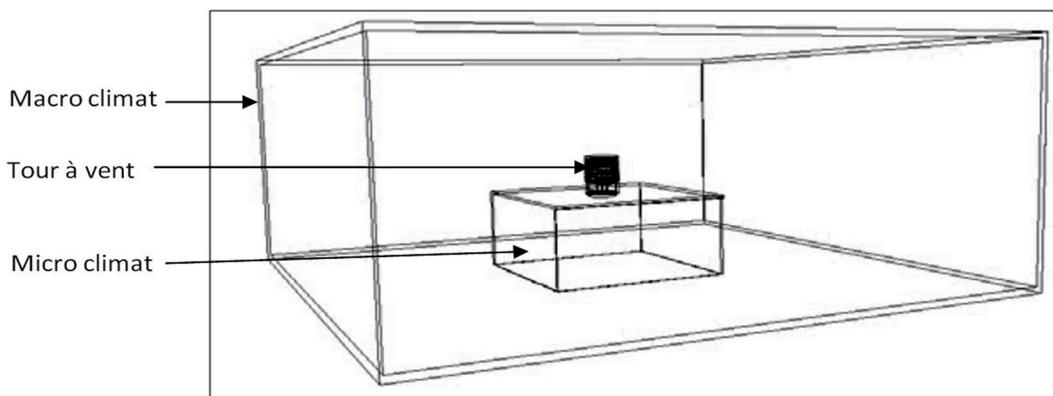


Fig.3.10. Variations micro et macro climatique [Hughes et al, 2012].

3.4. Conception de la tour à vent

La conception du système de la tour à vent a été basée sur :

- Topographie ;
- conditions climatiques ;
- variation de hauteur ;
- section du canal d'air (canal de passage) ;
- nombre d'ouvertures ;
- taille et positionnement des ouvertures ;
- forme de la tour ;
- matériaux de construction ;
- Emplacement de la tour par rapport au bâtiment ;
- expérience personnelle des architectes ;
- position sociale des occupants.

3.4.1. Éléments de la tour à vent

Une tour à vent est formée de bas en haut des pièces suivantes: cheminée, traqué, boyau, la chaîne, et l'étagère [Maleki, 2011].

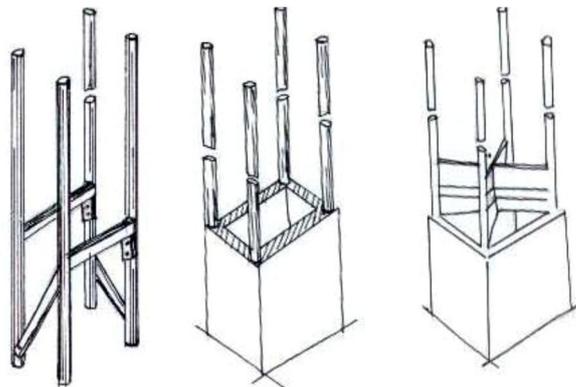


Fig.3.11. Structure d'une tour à vent traditionnelle [Maleki, 2011].

a. Cheminée

La partie de la cheminée est habituellement une forme de pyramide incomplète. Les différentes proportions de la partie supérieure sont disposées avec cette partie. Dans

certaines échantillons, sa hauteur est aussi haute que la hauteur d'une personne ; elle est de quelques mètres de haut.

b. Tige (Stalk)

Partie située entre le plateau et la salle. La hauteur de la tige dépend de la hauteur de la tour et des conditions climatiques. La tige est généralement décorée.

c. Catgut et la chaîne

Le catgut et la chaîne sont situés entre la tige et le plateau.

d. plateau ou étagère

Le sommet de la tour à vent, la plate-forme qui comprend les canaux de passage d'air.

3.4.2. Hauteur de la tour à vent

La tour à vent doit être suffisamment élevée au-dessus de la structure afin de prévenir la turbulence au niveau du toit. La hauteur de la tour à vent (distance entre l'entrée et l'orifice de décharge d'air) influe également sur le taux de ventilation [Kalantar, 2009]. Les hauteurs varient de 5 à 33 mètres [Gage et Graham, 2000]. Cependant, l'élévation de la tour doit être pondérée contre les préoccupations esthétiques et les limites de la planification.

Les tours à vent dans les régions chaudes et sèches sont hautes, où le vent à des altitudes plus élevées contient moins de poussière et de pollution.



Fig.3.12. Tours à vent de Dowlat ABAD, Iran et de Bastakiya, UAE [Maleki, 2011].

Dans les régions chaudes et humides, les résidences sont construites à proximité de la plage ou la température à la surface du sol est faible et le courant du vent est souhaitable. Les tours à vent dans ces zones ne montent pas très haut, ils se lèvent d'un seul niveau au-dessus du toit (figure 3.13) [Maleki, 2011].

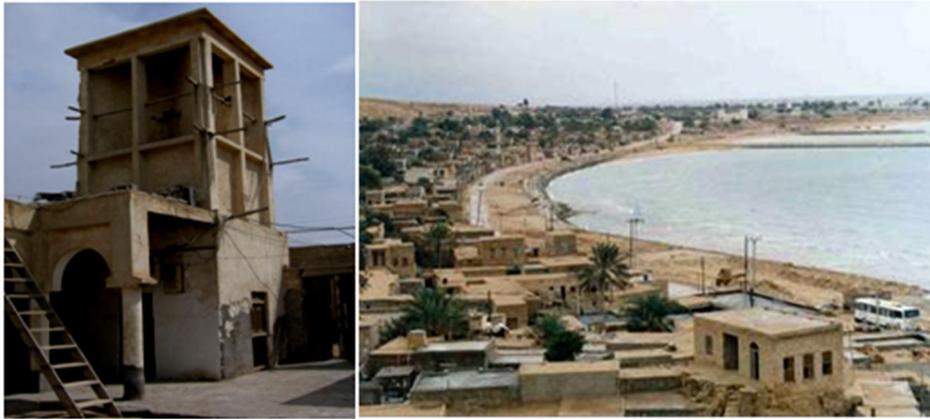


Fig.3.13. Exemple de logement rural dans le sud de l'Iran avec une tour à vent pour faire usage de la Brise côtière [Sartipipour, 2012].

Dans les zones urbaines denses, les tours à vent sont très élevés pour être capable d'attraper assez d'air. Cependant, des tours plus hautes sont coûteuses à construire et à entretenir.

3.4.3. Dimensionnement et positionnement des ouvertures

Le dimensionnement et le positionnement des ouvertures de la tour à vent contribuent à son opération de refroidissement. Les ouvertures d'entrée de la tour sont prévues dans la direction du vent dominant et la sortie sur le côté opposé, afin de profiter de la différence de pression créée par la vitesse et la direction du vent. La tour est plus efficace lorsqu'il est situé au bord du côté au vent du toit où la pression positive est la plus grande et moins efficace sur le côté sous le vent.

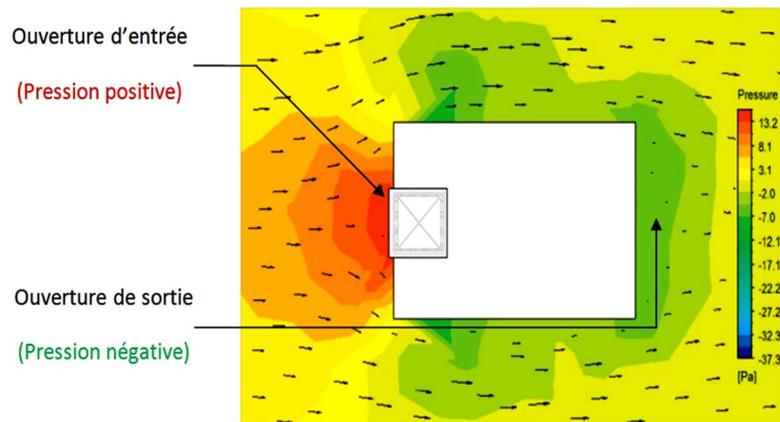


Fig.3.14. Pression positive sur la façade au vent et négative sur la façade sous le vent [Hughes et al, 2012].

Toutefois, la position idéale pour une tour à vent multi- directionnelle est donc au centre de la structure. La taille de l'ouverture dépend des facteurs tels que l'emplacement, la topographie et le débit d'air requis. Ce système est basé sur l'effet Bernoulli. Le débit d'air augmente à mesure qu'il s'écoule à travers une section transversale plus petite [Hughes et al, 2012].

3.4.4. Tours à vent unidirectionnelles et multidirectionnelles

Les tours à vent peuvent être divisés en tour à une face, deux faces, quatre faces, hexaèdre, et octaèdre. Il est essentiel qu'un système de ventilation naturelle se comporte bien dans toutes les conditions du vent. Les tours multidirectionnelles sont souvent construits dans des conditions où il n'ya pas de direction des vents dominants prévisible [A'zami, 2005]. Les tours multidirectionnelles sont divisées par des cloisons pour créer différentes conduites d'air. Une des conduites fonctionne comme entrée pour approvisionner le vent, les autres fonctionnent comme sortie pour extraire l'air chaud et vicié.

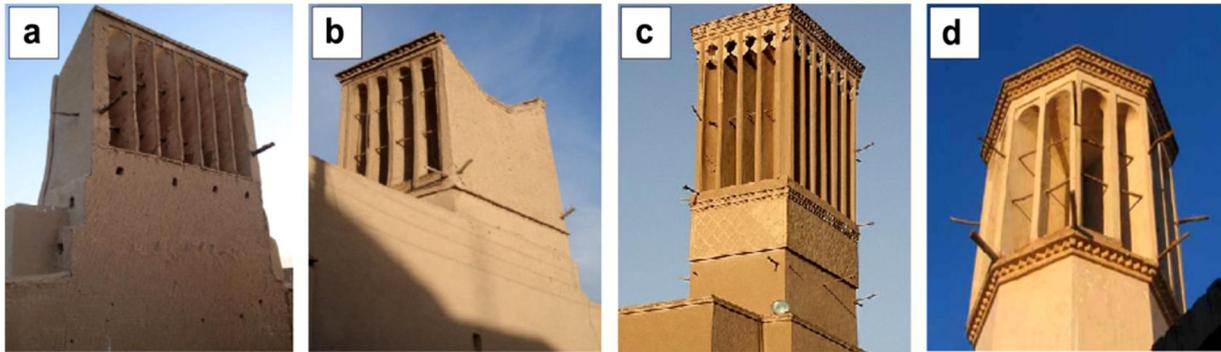


Fig.3.15. Tours à vent traditionnelles avec un nombre différent d'ouvertures : (a) à une face, (b) à deux faces, (c) à quatre faces, (d) octaèdre [Hughes et al, 2012].

En règle générale, le débit d'air induit diminue en augmentant le nombre d'ouverture. D'autre part, la sensibilité de la tour contre l'angle du vent incident diminue en augmentant le nombre d'ouvertures [Montazeri et Azizian, 2011].

3.4.4.1. Tour à vent unilatérale (mono face)

Les tours à vent unilatérale sont construites dans nombreuses régions au Moyen-Orient, principalement sur des maisons dans les zones où il ya des vents dominants [Montazeri et Azizian, 2008]. Le dispositif unidirectionnel ne fonctionne pas lorsque le vent souffle sur des angles d'incidence d'une direction autre que sa gamme de conception, sauf si l'entrée d'air est à un niveau suffisamment élevé pour que les forces de flottabilité minimisent au maximum les conditions de vent défavorables. Dans ce cas, la tour fonctionne comme une cheminée solaire et le flux d'air sera inversé.

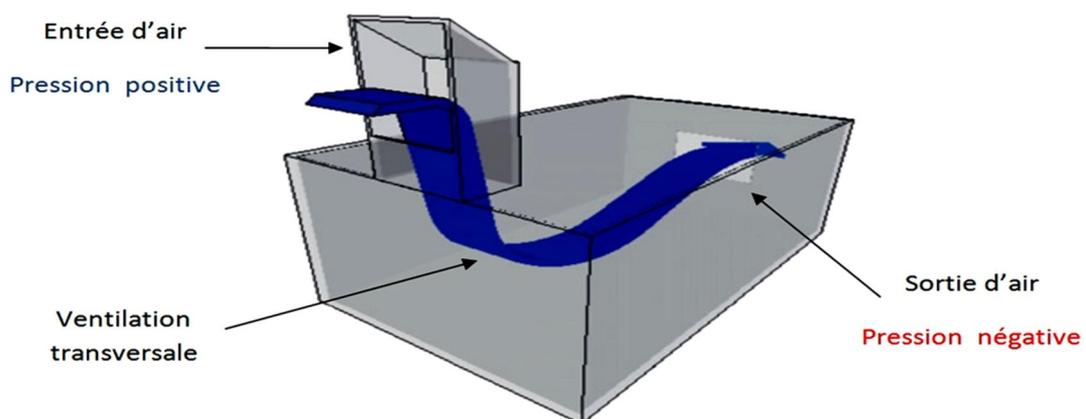


Fig.3.16. Ventilation transversale d'une chambre avec une tour à vent unilatérale [Hughes et al, 2012].

3.4.4.2. Tour à vent bidirectionnelle (à deux faces)

Une tour à vent bidirectionnelle à deux ouvertures et deux canaux est souvent utilisée dans les zones où il y a un fort vent dominant [Hughes et al, 2012]. Elle est divisée en deux dans le but d'assurer une alimentation en air neuf et l'extraction de l'air vicié (figure 3.17).

L'inconvénient des tours à vent multidirectionnelles est le court-circuit de l'air. Le court-circuit est un phénomène où l'air qui entre par l'ouverture d'alimentation sort à travers l'autre ouverture sans écouler à l'intérieur du bâtiment. Pour une tour bidirectionnelle, il n'y a pas de court-circuit d'air pour des faibles angles d'incidence de l'air. Toutefois, pour des angles d'incidence plus élevés, le court-circuit apparaît dans le système de tour à vent et atteint sa valeur maximale à un angle d'incidence de 60° [Hughes et al, 2012].

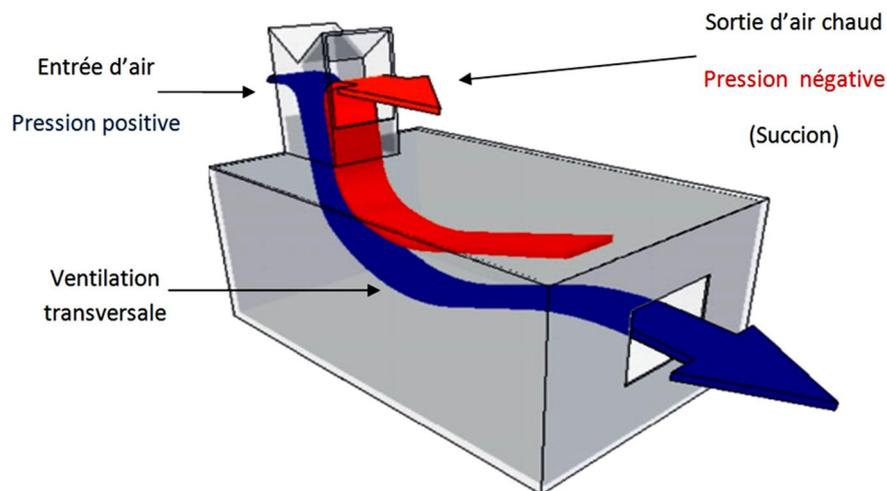


Fig.3.17. Ventilation transversale avec une tour à vent bidirectionnelle [Hughes et al, 2012].

3.4.4.3. Tour à vent à trois faces

Ce type n'est pas fréquent, mais peut être trouvée en Tabas (Iran) [Ghadiri et al.].

3.4.4.4. Tours à vent à quatre faces et hexaédrique

Les tours à vents à quatre côtés sont les plus utilisées dans le Moyen-Orient [Mahnaz et Shemirani, 2009], alors que les tours à vent hexaédriques sont limitées [A'zami, 2005].

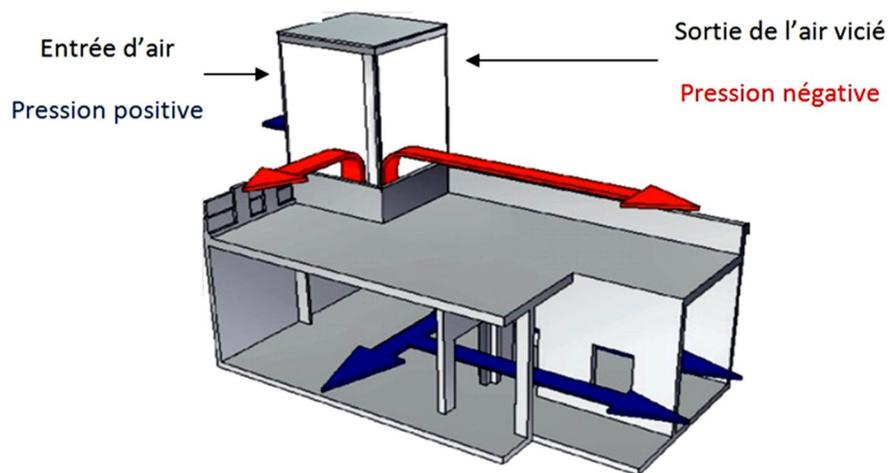


Fig.3.18. Ventilation à travers une structure avec une tour à 4 faces [Hughes et al, 2012].

3.4.5. Tours à vent rectangulaires et circulaires

Des tours à vent traditionnelles dans le Moyen-Orient sont d'habitude de forme rectangulaire et circulaire (figure 3.19).

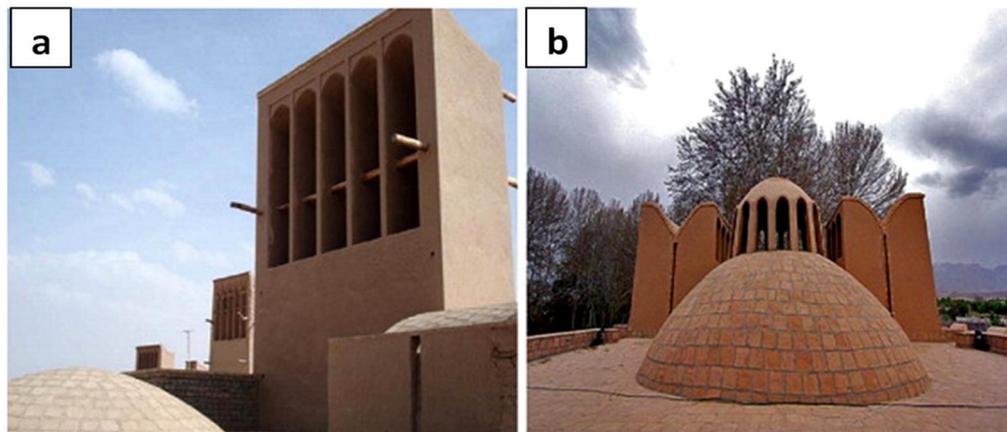


Fig.3.19. Tour à vent rectangulaire et circulaire montées sur le toit [Dehghan et al, 2013].

Les bords tranchants de la tour carrée créent une grande région de séparation de flux et une différence de pression plus grande à travers le dispositif qui est la résultante de la forme aérodynamique de la tour à vent carrée par rapport à la forme circulaire [Elmualim et Awbi, 2002].

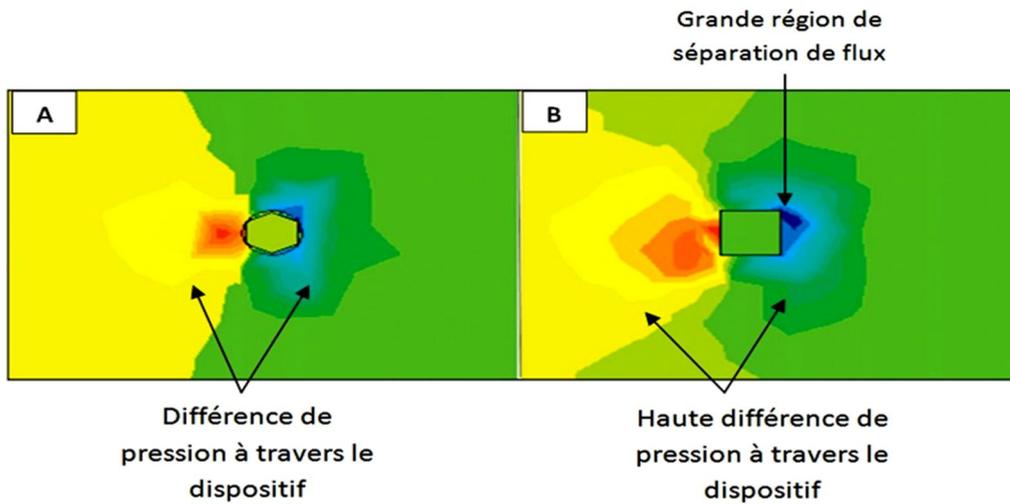


Fig.3.20. Différence de pression à travers une tour à vent circulaire et carré [Hughes et al, 2012].

3.4.6. Sections transversales (canal de passage)

Les sections transversales des tours à vent peuvent avoir plusieurs formes qui varient de circulaire, carrées et rectangulaires. Chaque type de section peut subdivisée en un nombre de répartitions (2, 3, 4, etc.).

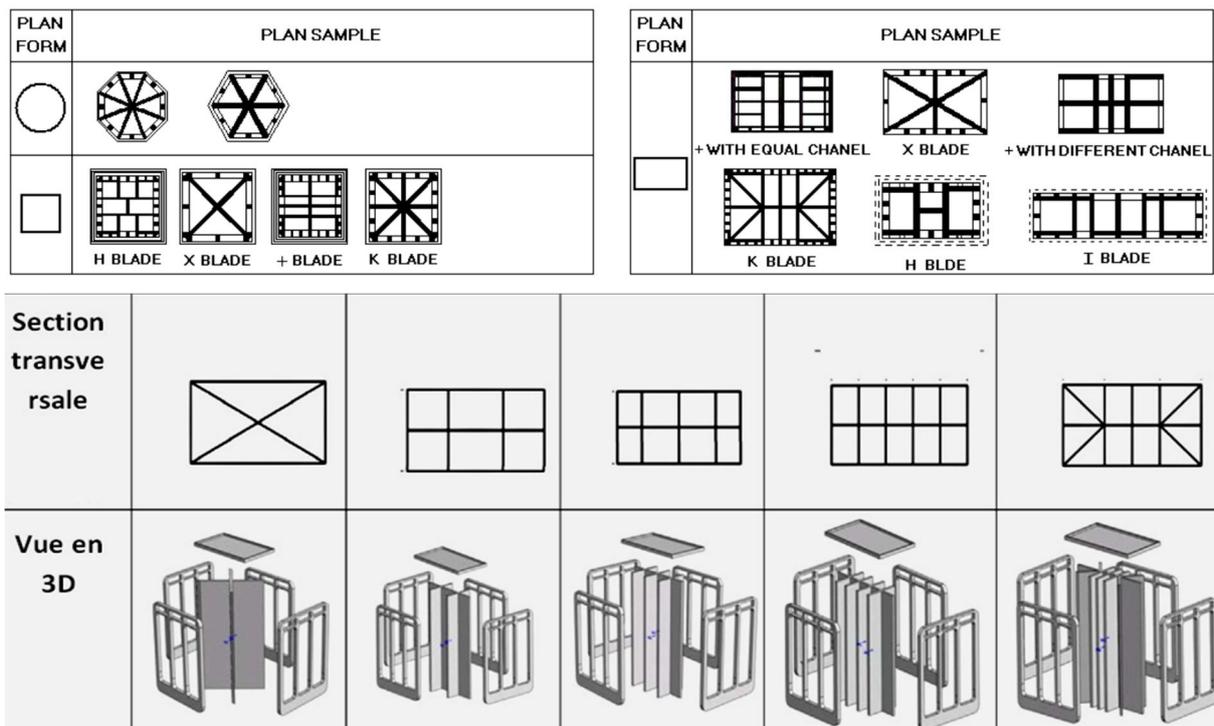


Fig.3.21. Différentes sections transversales des tours à vent traditionnelles [Ghadiri et al.] [Hosseinnia et al, 2013].

3.5. Techniques de refroidissement en utilisant les tours à vent

Différentes techniques de refroidissement peuvent être incorporées à une tour à vent afin d'améliorer sa performance thermique.

3.5.1. Refroidissement par évaporation

Le refroidissement par évaporation passif est une méthode traditionnelle pour améliorer la performance thermique du système de ventilation naturelle. Ce type de rafraîchissement est particulièrement efficace dans les régions chaudes et sèches et dans des climats relativement humides. La réduction de température entre l'intérieur et l'extérieur peut atteindre jusqu'à 10 °C dans les zones arides en utilisant cette technique [Omidreza et al, 2012].

L'air extérieur est rafraîchi en bas de sa température de rosée en le saturant avec l'humidité. L'air passe par des colonnes mouillées ou à travers des conduites d'eau souterraines avant de faire entrée dans la structure (figure 3.23).

3.5.1.1. Tour à vent avec colonnes mouillées et surfaces mouillées

Les tours à vent incorporant des colonnes mouillées sont équipées de rideaux de tissu ou des conduits d'argile, espacés de 5-10 cm l'un de l'autre et accrochant verticalement à l'intérieur de la colonne (figure 3.22). Les rideaux sont mouillés en vaporisant des gouttes d'eau par un système de bec au sommet de la tour. Les tours à vent avec des surfaces mouillées sont équipées des blocs d'évaporation à l'entrée de la tour.

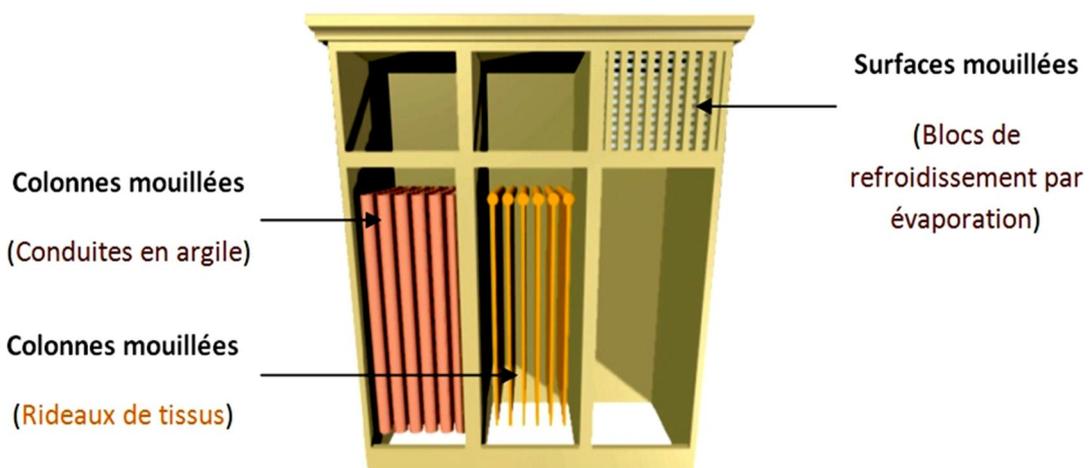


Fig.3.22. Différents systèmes d'évaporation utilisés dans les tours à vent [Hughes et al, 2012].

3.5.1.2. Tours à vent avec refroidissement souterrain

En Iran, Les tours à vent traditionnelles ont été raccordés avec un Qanât ou un réseau d'eau souterrain ou même avec un puits canadien (échangeur air-sol).

La tour est placée au-dessus de la maison avec son ouverture faisant face loin de la direction du vent dominant. Le flux d'air à travers le puits vertical produit une pression inférieure au côté sous le vent de la structure. En conséquence, l'air frais est tiré par succion du tunnel ou Qanât pour remplacer l'air chaud et vicié qui quitte la structure. L'air chaud qui passe dans le Qanât (plusieurs mètres sous le sol) sera en contact avec l'eau qui abandonne sa chaleur latente de vaporisation et s'évapore dans l'air qui sera relativement plus froid donc un effet de refroidissement supplémentaire.

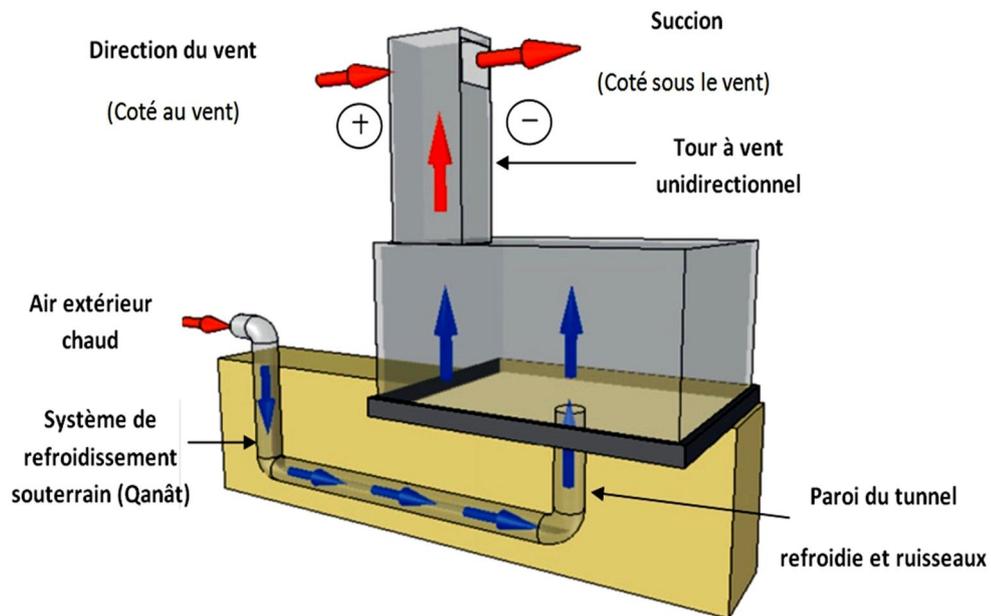


Fig.3.23. Tour à vent intégrée avec refroidissement souterrain [Hughes et al, 2012].

3.5.2. Les tours à vent avec cheminée solaire

Les Cheminées solaires sont utilisées pour améliorer la ventilation naturelle par l'effet de tirage thermique.

La convection forcée aura lieu lorsque le flux est induit par une force extérieure telle que la pression négative générée par le courant d'air à la sortie de la tour (effet de venturi)

[Hughes et al, 2012]. La flottabilité ou la convection naturelle se produit lorsque l'air est entraîné par la présence d'un gradient de température. L'énergie solaire chauffe la paroi de la cheminée solaire et réchauffe l'air qu'elle contient. Par conséquent, l'air chaud monte et sort par la partie supérieure de la tour (courant ascendant d'air) et aspire l'air frais par les ouvertures ou les fenêtres.

Une cheminée solaire assistée par un système de tour à vent est capable de créer un flux d'air de 1.4 Kg/s à 700 W/m^2 de rayonnement solaire incident par rapport à 0.75 Kg/s créée par une tour à vent seule (à 1 m/s de vitesse du vent) [Bansal et al, 1994].

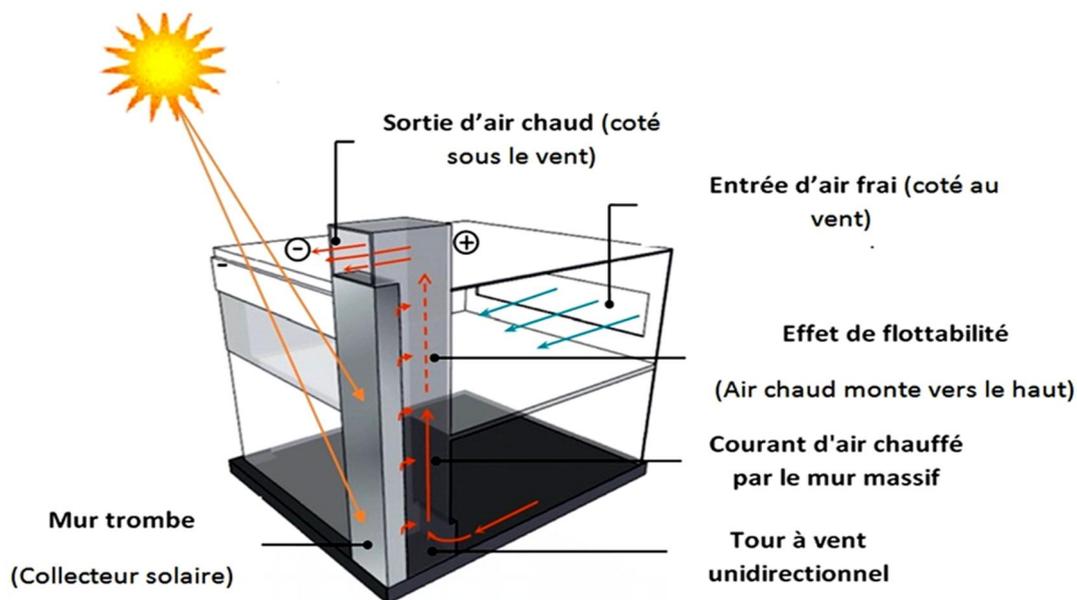


Fig.3.24. système de Tour à vent intégrée avec une cheminée solaire [Hughes et al, 2012].

3.5.3. Ventilation nocturne structurelle

La ventilation nocturne structurelle est une stratégie de refroidissement passif qui repose uniquement sur les forces induites par le vent ou la flottabilité [Hughes et al, 2012].

La fraîcheur de nuit est stockée dans les murs et les cloisons de la tour et refroidit l'air induit au cours de la journée, ce qui le rend plus dense donc il s'enfonce à travers la base de la tour et dans la structure [Hughes et al, 2011].

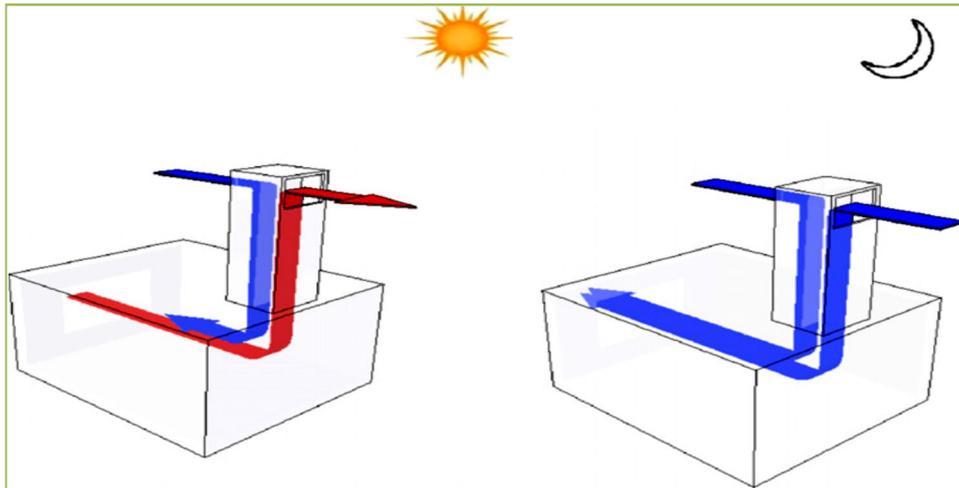


Fig.3.25. Fonctionnement d'un système de tour à vent en sa partie diurne et nocturne [Hughes et al, 2012].

3.5.4. Les tours à vent intégrés à la cour ouverte

La cour est exposée au rayonnement solaire pendant le jour. Par conséquent, l'air dans la cour se réchauffe et monte en raison des forces de flottabilité. Pour le remplacer, l'air froid au niveau du sol s'écoule à travers les ouvertures des espaces de vie, et créant ainsi un flux d'air intérieur.

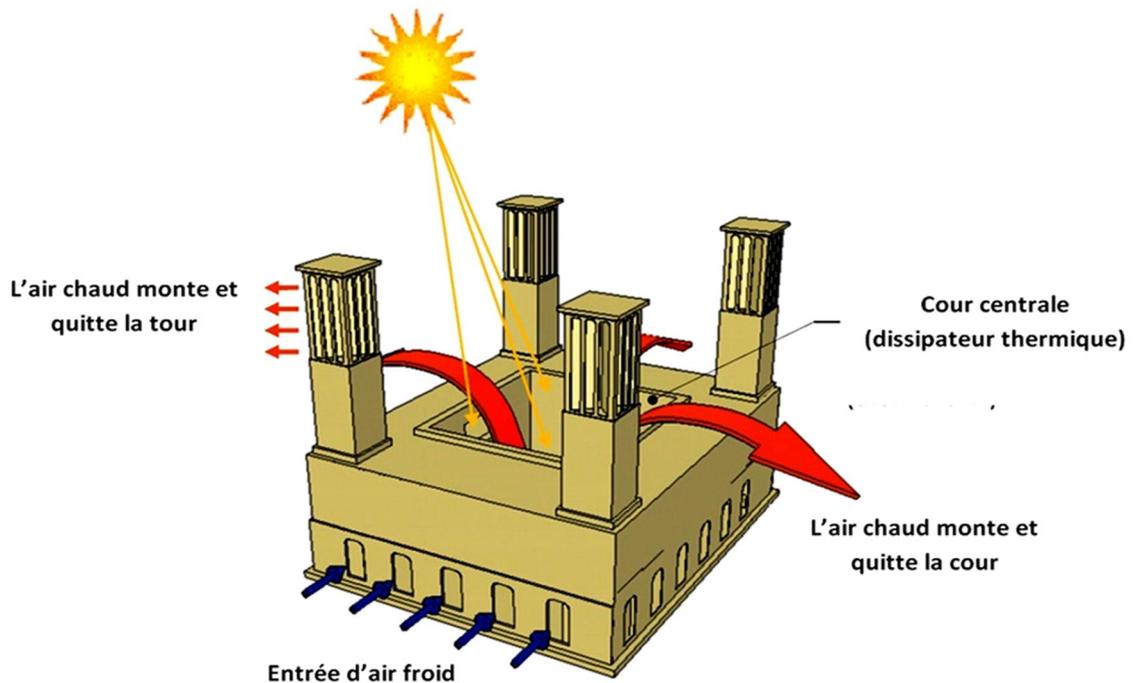


Fig.3.26. Maison traditionnel qui combine la cour ouverte avec les tours à vent [Hughes et al, 2012].

Pendant la nuit, le processus de refroidissement est inversé. L'air de la surface refroidie s'enfonce dans la cour et entre dans les salles à travers les ouvertures de bas niveau et sort à travers les ouvertures de niveau supérieur. Ce système peut fonctionner efficacement dans des climats chauds et secs, où la ventilation pendant le jour n'est pas souhaitable.

3.5.5. Les tours à vent intégrés aux toits incurvés

Dans les régions arides, les toits incurvés ou en forme de dôme sont généralement préférable par rapport aux toits plats. Utilisés depuis 3000 Avant .J.C [Hughes et al, 2012], les toits incurvés ont une surface beaucoup plus grande pour libérer la chaleur (refroidissement rapide).

En général, le toit passif est positionné de manière centrale dans la partie supérieure de la structure. L'air chaud à l'intérieur du bâtiment se dresse au dôme (flottabilité) et sort par les ouvertures (ou les événements) de toit incurvé. L'augmentation de la vitesse d'air s'écoulant sur le toit incurvé abaisse la pression externe et aspire l'air chaud à l'extérieur du dôme, et l'air frais pénètre par les fenêtres ou les ouvertures de la tour à vent

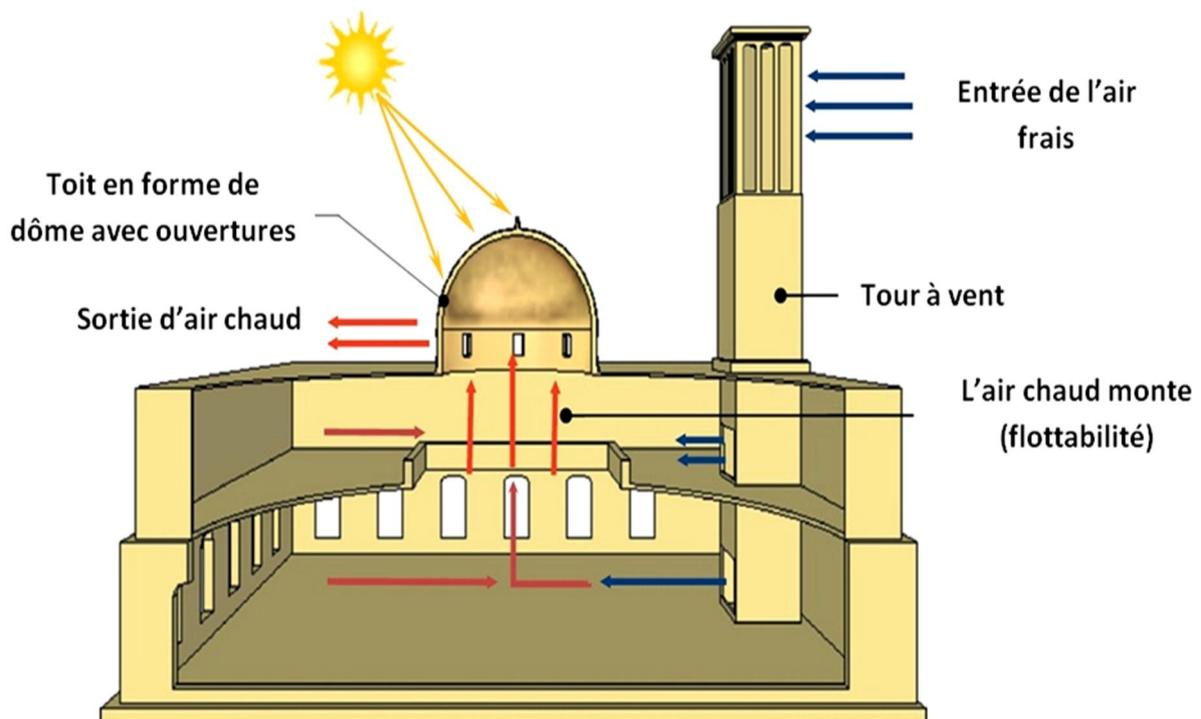


Fig.3.27. Tour à vent multidirectionnelles intégrées avec un toit incurvé [Hughes et al, 2012].

3.6. Tours à vent commerciales

Les principes des tours à vent traditionnelles ont été intégrés avec la technologie moderne en tant que dispositifs utiles pour améliorer la qualité de l'air. Elles offrent une ventilation naturelle et la lumière à n'importe quel espace dans un bâtiment.

Les tours à vent modernes sont généralement compact et plus petit en taille par rapport aux traditionnelles. Le dispositif se prolonge à partir du dessus d'une structure afin de capter l'air au niveau du toit, en le transportant à travers une série de lamelles vers l'espace fermé sous l'action de la pression, et en même temps la pression négative extrait l'air vicié de la chambre.



Fig.3.28. Tours à vent commerciales [www.monodraught.com].

La tour à vent assisté d'un ventilateur solaire est une technologie qui vise à assurer la passivité du système toute en améliorant les débits d'air obtenus afin d'atteindre les débits de ventilation désirée même en présence des contrainte (vitesse et direction du vent).

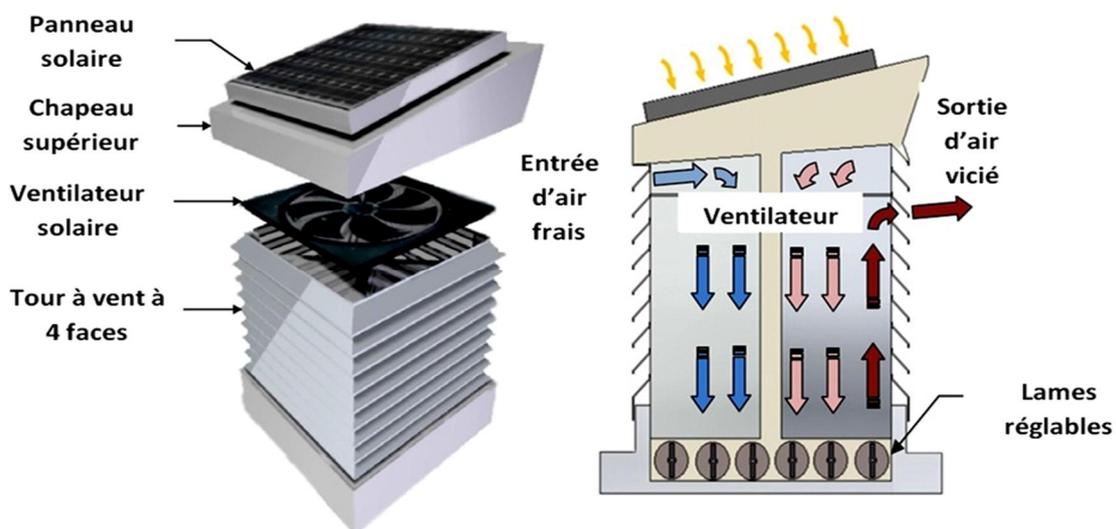


Fig.3.29. Tour à vent commercial avec un ventilateur solaire [Hughes et al, 2012].



CHAPITRE 4

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA VENTILATION NATURELLE

4.1. Introduction

L'optimisation des effets de la ventilation naturelle repose sur une bonne connaissance des phénomènes qui la gouvernent. Nous allons donc essayer au cours de ce chapitre d'exposer l'ensemble de ces phénomènes de manière claire. Il ne s'agit pas d'une simple description, mais bien d'une utilisation d'outils mathématiques pour modéliser les différentes approches de ce problème. Les équations de la mécanique des fluides constituent la base de cette étude. La complexité de ces équations permet rarement d'obtenir des solutions analytiques sauf dans des cas très simples dont les écoulements turbulents ne font pas partie. Hors, ce type d'écoulement représente généralement les cas réels. Il est donc nécessaire pour obtenir la résolution des équations fournies par le modèle utilisé, de recourir à des méthodes numériques. Il est bon de préciser que nous avons choisi de nous placer dans le cas macro climat, c'est pourquoi nous avons abordé dans la première partie de ce chapitre l'étude de l'ingénierie du vent et de la couche limite atmosphérique.

4.2. L'ingénierie du vent

L'ingénierie du vent est la branche de science qui étudie et traite les interactions entre le vent et les Hommes et leurs activités à la surface de la terre [<http://www.aiv.asso.fr/index.html>].

L'évaluation des effets du vent sur les structures nécessite la connaissance des interactions complexes qui impliquent la météorologie, l'aérodynamique et la construction des structures. La majorité des bâtiments et structures dans le domaine de l'ingénierie du vent sont considérés comme des corps non profilés. Un corps est désigné sous non profilés, lorsque les lignes de courant d'écoulement aérodynamiques sont détachées de la surface du corps. Ceci est rencontré avec la formation de l'écoulement séparé autour du corps, créant un large sillage de fuite turbulent [Tong Yang, 2004].

4.3. CFD dans l'ingénierie du vent

Computational Fluid Dynamics (CFD) fournit divers outils pour enquêter les flux et les écoulements complexes des fluides. Le domaine spatial est discrétisé en petites cellules pour former un maillage.

Des méthodes numériques sont ensuite appliquées à reformuler les équations de Navier-Stokes comme une série des équations algébriques. Ces équations sont résolues numériquement sur le domaine, avec des conditions aux limites déterminées pour simuler les effets de l'environnement.

L'application de la CFD aux problèmes des écoulements du vent dans l'ingénierie a débuté dans les années 1980. *Computational Wind Engineering (CWE)* est la branche de CFD qui traite la simulation des effets du vent, comme les charges provoqués par le vent sur les structures, la ventilation naturelle, la circulation du vent autour des obstacles, l'effet de flottabilité à l'intérieur des enveloppes, etc.

L'utilisation du CFD offre une certaine flexibilité qui est peut-être d'une nature différente de la flexibilité offert par les souffleries. En plus, il est possible d'extraire avec la CFD des données partout dans le domaine. Ces données peuvent être intégrées dans la conception virtuelle d'un bâtiment [Revuz, 2011]. Cependant, il est de plus en plus évident que la CWE peut fonctionner comme un outil autonome dans nombreuses circonstances, et parfois il est le seul outil valable [Cochran et Derickson, 2011].

Les trois principales catégories de la CFD dans l'ingénierie du vent comprennent:

- 1- Simulation Numérique Directe (Direct Numerical Simulation) (DNS)
- 2 - Simulation des grands vortex (Large Eddy Simulation) (LES)
- 3 - Équations de Navier-Stokes à Reynolds Moyennés (Reynolds Averaged Navier-Stokes) (RANS) [Cochran et Derickson, 2011].

4.3.1. Méthodologie de la CFD

Quatre étapes peuvent être distinguées dans le processus de CFD:

1. Géométrie : La structure et le domaine qu'elle contient sont construits à cette étape.
2. Maillage : A ce stade clé, le domaine spatial est divisé en volumes de contrôle (CV) pour former une grille ou un réseau.
3. Modèle mis en place : conditions aux limites, le modèle de turbulence, les propriétés des matériaux, les paramètres du solveur, etc. sont choisis à ce stade.
4. Solveur : le code CFD discrétise les équations de Navier-Stokes, et les résout sur le domaine discrétisé.

4.4. La couche limite atmosphérique (CLA)

La couche limite atmosphérique (CLA) est la couche de l'écoulement turbulent entre la surface de la terre et le vent non perturbé. La 5 à 10 % inférieure de la CLA est considérée comme la sous-couche rigoureuse. Cette couche est affectée par les forces de friction exercées par le sol, c'est à dire des clôtures, des arbres, des bâtiments, etc.

La vitesse moyenne du vent augmente avec la hauteur au-dessus du sol, tandis que l'intensité de la turbulence diminue. La différence dans les conditions de terrain affecte directement l'ampleur de la force de frottement et provoque également des variations de la vitesse du vent (figure 4.1).

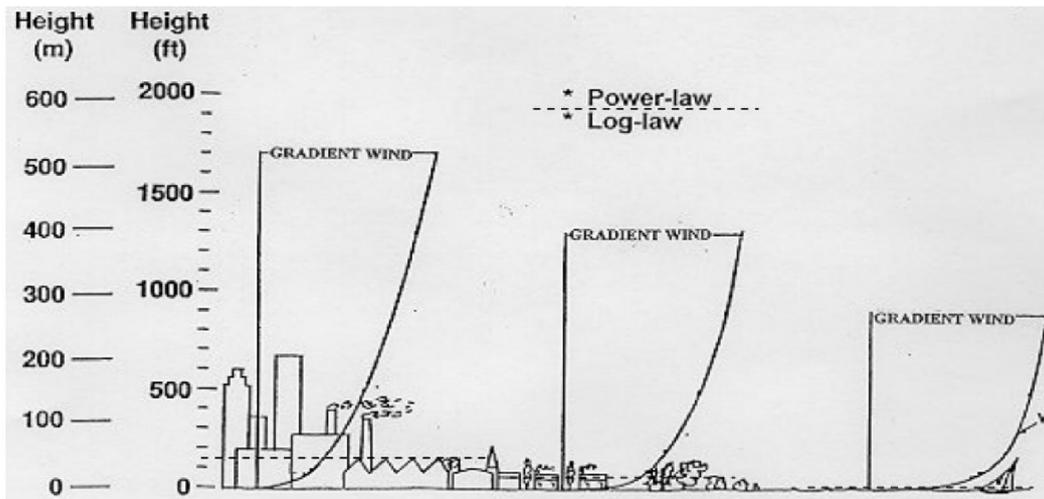


Fig.4.1. Variation de la vitesse du vent avec la hauteur et l'état du terrain dans la CLA [Tong Yang, 2004].

Les équations qui gouvernent l'écoulement du vent dans la couche limite atmosphérique neutre et stable sont les suivantes:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = fV + \frac{\partial \tau_u}{\partial z} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = -fU + \frac{\partial \tau_v}{\partial z} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_w}{\partial z} \quad (4.3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.4)$$

Où u, v, w sont les composantes de vitesse le long des axes x, y, z respectivement. ρ est la densité de l'air, P est la pression, et g est l'accélération de la pesanteur. τ_u, τ_v, τ_w sont les contraintes de cisaillement.

Les premiers termes sur le côté droit dans les équations (4.1) et (4.2) expriment la force de Coriolis agissant sur le débit d'air provoqué par la rotation de la Terre.

Le paramètre de Coriolis, f , est donné par:

$$f = 2\Omega \sin|\lambda| \quad (4.5)$$

Où Ω est la vitesse angulaire de la rotation de la Terre, et λ représente la latitude.

Dans la région de la sous-couche rigoureuse, la variation verticale de la contrainte de cisaillement peut être négligée sans perte significative de précision en ce qui concerne le développement du profil de vitesse moyenne [Tong Yang, 2004].

Au-dessus de la sous-couche rigoureuse se trouve la sous-couche inertielle. Dans cette région, les flux turbulents moyens sont constants avec la hauteur.

La loi logarithmique représentant la variation de la vitesse moyenne avec la hauteur au-dessus de la surface du sol peut être exprimée comme:

$$U(z) = \frac{u_*}{k_*} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4.6)$$

Ou :

$U(z)$: est la vitesse moyenne du vent à la hauteur z .

u_* : est la vitesse de frottement.

k_* : est la constante de Von Karman ($k_* = 0.41$).

z_0 : est la hauteur de rugosité déterminée par l'état de surface.

La zone extérieure d'écoulement d'air montre peu de dépendance avec la nature de la surface, et les forces de Coriolis dues à la rotation de la terre deviennent importantes.

L'augmentation de la hauteur conduit à l'augmentation de la force de Coriolis et la réduction de contrainte de cisaillement [Tong Yang, 2004]. Une représentation empirique de la loi du profil de vitesse moyenne dans la couche externe peut être donnée par la relation suivante:

$$\frac{U(z)}{U_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^\alpha \quad (4.7)$$

Où : U_{ref} est la vitesse moyenne du vent à la hauteur de référence z_{ref} . L'exposant α dépend de la gamme de hauteur étant recouverte et la rugosité de surface.

L'CLA est caractérisée par des nombres de Reynolds élevés (Re), ce qui signifie que les effets d'inertie dominent les effets visqueux. Le nombre de Reynolds est défini par:

$$Re = \frac{L\bar{u}}{\nu} \quad (4.8)$$

Où \bar{u} et L sont la vitesse moyenne et l'échelle caractéristique de la longueur de l'écoulement, et ν est la viscosité cinématique.

4.5. Les effets du vent sur les bâtiments

L'étude de l'écoulement autour des bâtiments montre que ce champ est fondamentalement en trois dimensions: l'écoulement d'air diverge dans les deux directions transversales du vent et dans la direction verticale sur le toit (figure 4.2.a). Trois phénomènes aéroélastiques se produisent sur la structure: le vortex, le tremblement et l'excitation galopante (figure 4.2.b) [Revuz, 2011].

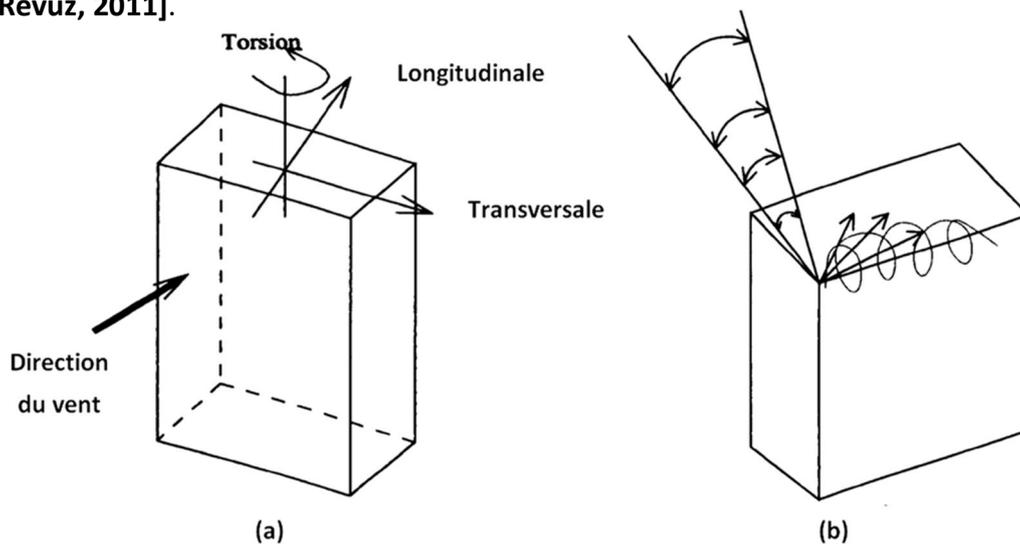


Fig.4.2. Effets du vent incident en direction normal sur une structure [Revuz, 2011].

Lorsque le vent à vitesse moyenne dans la Couche Limite Atmosphérique CLA rencontre la face au vent d'une structure, un gradient de vitesse entraîne une augmentation des vitesses de vent plus haut de la face. Dans ce cas, l'air est amené à reposer environ $(2/3)$ de la hauteur de la face au vent, appelé «Point de stagnation» (figure 4.3).

Au-dessus du point de stagnation, l'air circule en ascendant et sur le toit de bâtiment [Straw, 2000]. En-dessous du point de stagnation, l'air qui est obligé de descendre jusqu'au sol, possède une grande énergie cinétique.

La présence du vortex sur la face au vent et la position du point de stagnation conduisent à une répartition de la pression très différente. Dans une couche limite de cisaillement, la pression maximale est située au niveau du point de stagnation avec un coefficient de pression élevé [Straw, 2000].

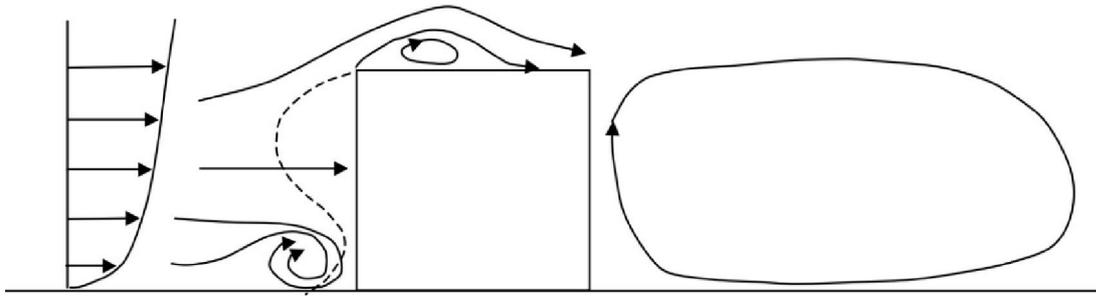


Fig.4.3. Flux d'air autour d'une structure cubique [Straw, 2000].

4.6. Écoulement turbulent

La formation de la turbulence dépend de la rugosité de la surface et le rapport de vitesse à un nombre de Reynolds de deux couches de fluide [Tong Yang, 2004]. Dans un écoulement turbulent, le flux varie avec le temps et la position. La vitesse moyenne dans le temps est le facteur principal pour décrire l'écoulement à grand débit, mais n'explique pas précisément le comportement instantané. Les quantités instantanées peuvent être exprimées comme la somme de la valeur moyenne et la déviation instantanée de la moyenne.

La vitesse instantanée, U , est la somme de la composante moyenne, \bar{u} , et une composante turbulente, u' montrées dans l'équation (4.9).

$$U = \bar{u} + u' \quad (4.9)$$

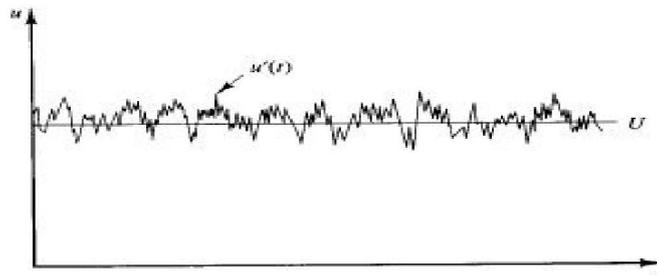


Fig.4.4. Vitesse instantanée (moyenne et fluctuante) dans un écoulement turbulent [Versteeg et Malalasekera, 1995].

Les composantes des vitesses instantanées dans les coordonnées cartésiennes :

$$U = \bar{u} + u' \quad V = \bar{v} + v' \quad W = \bar{w} + w' \quad (4.10)$$

\bar{u} , \bar{v} , et \bar{w} : sont les vitesses moyennes. u' , v' , w' sont les vitesses fluctuantes.

L'intensité de la turbulence I , un autre paramètre, est calculée comme suit:

$$I = \frac{\sqrt{\frac{\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2}}{3}}}{U} \quad \text{Ou} \quad I_u = \frac{\sqrt{\overline{(u')^2}}}{U} \quad (4.11)$$

La transition et la séparation de la couche limite, les taux de transfert de la chaleur et de masse à la surface dépendent tous de l'intensité de la turbulence entre autres choses [Tong Yang, 2004].

Pour décrire la turbulence, deux paramètres importants : le nombre de Reynolds Re et son échelle de longueur L .

$$Re = \frac{\sqrt{k}}{\nu} L = \frac{k^2}{\varepsilon \nu} \quad (4.12)$$

$$L = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (4.13)$$

k est l'énergie cinétique de la turbulence. Son taux de dissipation est ε .

4.7. Les équations gouvernantes

Les équations fondamentales ou équations d'état qui gouvernent la dynamique des fluides, comme l'équation de continuité, de quantité de mouvement et l'équation d'énergie, sont en principe les énoncés mathématiques de trois principes physiques fondamentaux, qui peuvent être considérés comme suit:

- ⇒ Conservation de la masse (équation de continuité)
- ⇒ La deuxième loi de Newton (équation de quantité de mouvement ou équations de Navier-Stokes)
- ⇒ Conservation de l'énergie (la première loi de la thermodynamique)

Ces principes fondamentaux peuvent être exprimés en fonction d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles (EDP). En résolvant ces équations, la vitesse, la température et la pression sont prédits.

La forme fonctionnelle de l'équation d'état (4.17) dépend de la nature du fluide [Tong Yang, 2004]. Dans les fluides compressibles, les équations d'État font le lien entre l'équation de l'énergie (4.16), de conservation de la masse (4.14) et les équations de quantité de mouvement (4.15) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j + P \delta_{ij} - \tau_{ij}) = 0 \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e_{tot}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_i e_{tot} + u_i P + Q_i - u_i \tau_{ij}) = 0 \quad (4.16)$$

$$f(P, \rho, T) = 0 \quad (4.17)$$

Avec :

ρ : Densité.

P : Pression.

u : Vitesse instantanée.

τ_{ij} : Contrainte visqueuse.

δ_{ij} : Fonction de Kronecker ($i = j, \delta_{ij} = 1$ ou $i \neq j, \delta_{ij} = 0$)

x_i, x_j : Coordonner de la variable.

T : Température thermodynamique.

e_{tot} : Énergie totale, définie par : $e_{tot} = e + \frac{u_i u_j}{2}$.

Q_i : Flux de chaleur.

Les équations N-S simplifiées pour un fluide newtonien incompressible dans la notation des tenseurs cartésiens peuvent être écrites comme:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \partial u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (4.18)$$

Le tenseur des contraintes est donné par:

$$\tau_{ij} = -P \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.19)$$

Les liquides et les gaz circulant à faible vitesse se comportent comme des fluides incompressibles [Tong Yang, 2004]. Les équations gouvernantes pour un fluide incompressible deviennent alors:

4.7.1. Conservation de la masse [Straw, 2000] :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (4.20')$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (4.20'')$$

4.7.2. Les équations de Navier-Stokes [Straw, 2000] :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4.23)$$

Pour un écoulement turbulent plus complexe avec un nombre de Reynolds élevé, tels que ceux trouvés dans la grande majorité des situations d'ingénierie du vent, les équations de Navier-Stokes doivent être en moyenne pour être appliquées.

Afin de produire un ensemble d'équations de moyenne temporelle de Navier-Stokes, l'équation (4.9) est transformée et ensuite intégrée dans le temps pour obtenir des équations moyennes d'écoulement. Les résultats suivants le calcul de la moyenne donnent [Straw, 2000] :

$$\begin{aligned} \overline{VU} &= \overline{(V + v')(U + u')} \\ &= \overline{VU} + \overline{Vu'} + \overline{v'U} + \overline{v'u'} \\ &= VU + \overline{v'u'} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Où la barre supérieure indique le temps d'utilisation moyenne.

Les équations moyennées du mouvement deviennent alors :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} &= 0 \quad (4.25) \\ \frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho VU)}{\partial x} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right] - \rho \overline{u'v'} \right\}_x \end{aligned} \quad (4.26)$$

Les équations moyennées du mouvement sont communément connus comme les équations de Reynolds. Le terme entre crochets dans l'équation (4.26) est la contrainte visqueuse.

4.8. Méthodes de discrétisation

Il ya un certain nombre de méthodes numériques qui peuvent être utilisés dans le processus de discrétisation pour produire les équations qui doivent être résolus, dont les principales sont:

- Méthode des différences finies;
- Méthode des éléments finis;
- Méthode des volumes finis.

4.8.1. Méthode des différences finis

La méthode de différences finies à pour but de décrire certaines inconnues (φ , par exemple) à l'aide d'échantillons de points aux points du nœuds d'une grille de lignes de coordonnées. Les développements de Taylor tronquée sont souvent utilisés pour générer des approximations aux différences finies de dérivés de termes φ . Ces dérivés apparaissant dans les équations régissant sont remplacés par des différences finies.

4.8.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis utilisent des fonctions par morceaux simples (par exemple linéaires ou quadratiques) valables sur des éléments pour décrire les variations locales des variables inconnues.

4.8.3 Méthode des volumes finis

Développé à l'origine comme une formulation aux différences finies spéciale, la méthode des volumes finis est devenue l'une des techniques numériques les plus populaires dans les codes CFD. L'algorithme numérique se compose d'un certain nombre d'étapes [Versteeg et Malalasekera, 1995] :

- L'intégration formelle des équations régissant l'écoulement du fluide sur tous les volumes de contrôle (finis) du domaine de solution;
- Discrétisation impliquant la substitution d'une variété d'approximations de type-différence-fini pour les termes dans l'équation intégrée représentant les processus tels que la convection, la diffusion, etc. Cela convertit les équations intégrales en un système d'équations algébriques ;
- Solution des équations algébriques par une méthode itérative.

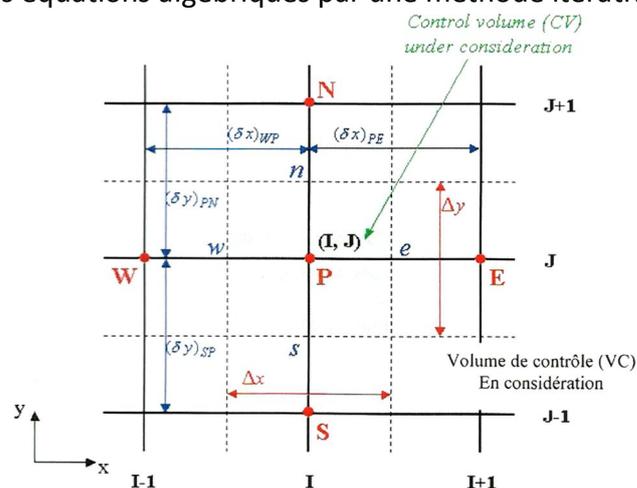


Fig.4.5. Volume de control en 2D [SEHLI, 2012].

La technique des volumes finis consiste à diviser le domaine de calcul en une série de sous domaines appelés volumes de contrôle. Ces volumes enveloppent tout le domaine de calcul sans chevauchement de telle façon que la somme de leurs volumes soit égale exactement au volume du domaine de calcul. Un point est positionné au centre de chaque volume et est appelé centre du volume de contrôle, il sera noté P (figure 4.5) les nœuds des volumes voisins seront notés suivant leurs positions N, S, W, et E (se rapportant aux directions North, South, West et East respectivement).

Dans la méthode des volumes finis, les lois de conservation (de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) sont exprimées localement sous une forme intégrale. La méthode repose sur le théorème de *Gauss* ou appelé aussi méthode d'*Ostrogradski* et qui permet de transformer une intégrale de volume en une intégrale de surface.

$$\iiint_V \frac{\partial B_j}{\partial x_j} dV = \iint_A B_j n_j dA \quad (4.27)$$

Où \vec{B} est un vecteur quelconque et \vec{n} est le vecteur unitaire normal à la surface A entourant le volume V .

La conservativité locale des flux numériques, une caractéristique rend la méthode des volumes finis très attrayant lors de la modélisation des problèmes comme en mécanique des fluides, transfert de la chaleur et de masse, Etc. [Eymard et al, 2006]

4.9. Les schémas de discrétisation

La précision de la solution numérique d'un modèle CFD dépend de la qualité de discrétisation appliquée aux équations gouvernantes. La forme différentielle générale de toutes les équations gouvernantes peut être écrite comme suit [Tong Yang, 2004] :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \frac{\partial(\rho u_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial y}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (4.28)$$

Où

Γ est la diffusivité d'une variable ϕ , et S_ϕ est le terme source.

Sur la base de la méthode des volumes finis par application du théorème de Gauss (théorème de la divergence), l'intégration de l'équation précédente sur un volume de contrôle en trois dimensions nous conduit à:

En fonction du temps

Convection

Diffusion

Terme Source

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \int_A \rho u_j \hat{n}_j \phi dA = \int_A \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \hat{n}_j dA + \int_V S_\phi dV$$

Ou:

\hat{n}_j est le vecteur normale de la surface extérieure.

A et V sont respectivement la surface externe et le volume du volume de contrôle.

La considération principale en dérivant l'équation discrète de cette manière est que cela représente les termes de convection et de diffusion explicitement. Les propriétés fondamentales d'un schéma de discrétisation sont le conservatisme, le bornage ou limitation et la transportation, qui sont nécessaires pour produire des résultats physiquement réalistes.

Conservatisme

Pour assurer la conservation d'une quantité ϕ pour l'ensemble du domaine de solution, le flux de ϕ à travers une certaine face d'un volume de contrôle doit être la même que celle entrant dans le volume adjacent à travers la même face.

Bornage

À l'intérieur du domaine de solutions, les techniques numériques itératives sont utilisées pour résoudre l'ensemble d'équations algébriques à chaque point nodal. Les quantités calculées doivent être bornés dans les valeurs physiques limites maximales et minimales des variables de flux.

Transportation

La force relative des termes de convection et de diffusion définit la directivité de l'influence dans le schéma de discrétisation. Dans une situation purement diffusion, le terme de diffusion affecte la distribution d'une quantité transportée le long de ses gradients dans toutes les directions, à savoir l'influence de la source à tous les nœuds voisins serait égale. Toutefois, dans le cas des conditions de convection pure, seul le nœud adjacent soit fortement influencé par la source en amont/aval en fonction de la direction d'écoulement.

Les schémas du premier ordre tels que «Upwind» et «hybride» produisent des solutions bornées dans les limites physiques, mais ils impliquent une fausse diffusion importante, ou des gradients bavures pointus [Tong Yang, 2004]. Le schéma d'interpolation quadratique en

amont pour convection cinétique (**QUICK**) est une approximation précise à troisième ordre, qui présente de nombreux avantages car elle satisfait aux exigences du conservatisme et transportation, mais introduit un sur-ou sous- problèmes non-physique dus à l'absence de la propriété de bornage. Il a été démontré que parfois le **QUICK** conduit à des quantités de turbulence négatives [Tong Yang, 2004]. Une version modifiée de **QUICK** donne le schéma de transport de convection curvative compensé (**CCCT**) de second ordre précision, qui fournit un bornage et donc une stabilité de calcul. Le schéma **CCCT** utilise un facteur de mélange pour améliorer la performance d'interpolation du schéma **QUICK** près des limites. Pour choisir un schéma de discrétisation, un compromis entre la simplicité, la facilité de mise en œuvre, la précision et l'efficacité de calcul doit être fait.

4.10. Maillage numérique

Trois types de maillage numériques peuvent être utilisés dans les codes de CFD : maillages structurées, non structurées et hybride [Tong Yang, 2004].

Dans les maillages structurés, le nombre de cellules qui partagent un sommet commun est uniforme à l'intérieur du domaine. Le domaine géométrique est décomposé en sous-domaine ou Blocs, dans lequel une grille structurée est généré.

Maillages non-structurés appliquent un mélange de cellules de calcul tétraédriques, pyramidales, prismatiques et hexaèdres. Ils sont plus souples et plus faciles à produire que d'une grille structurée et mieux pour la discrétisation adaptative (raffinement local). L'inconvénient de maillages non structurées est l'irrégularité de la structure de données, qui signifie que le développement de discrétisation précises et des méthodes de résolution efficaces est plus difficile que pour les réseaux structurés [Tong Yang, 2004].

Un troisième type de maillage est constituée de l'union des réseaux qui se chevauchent au niveau local qui couvrent le domaine. La souplesse de ce type de maillage, particulièrement utiles pour des flux dans lesquels les parties limitrophes se déplacent par rapport aux autres.

4.11. Modélisation de la turbulence

Les modèles de turbulence sont des méthodes numériques appliquées pour obtenir des équations régissant au temps-moyennées pour différentes types d'écoulements turbulents. Le but de chaque modèle est la possibilité de s'appliquer aux plus grandes

nombre de situations et types d'écoulements turbulents et d'offrir des solutions réalistes afin de prédire ces différentes caractéristiques (viscosité turbulente, énergie cinétique turbulente, taux de dissipation de l'énergie cinétique, etc.).

4.11.1. Les modèles de turbulence

Les recherches théoriques et expérimentales indiquent que les écoulements turbulents sont si complexes et variées qu'il n'y a pas de modèle universel valable pour tous les types.

Plusieurs modèles de turbulence sont disponibles, qui varient en complexité, précision et domaine d'application. Ils sont classés en quatre catégories principales:

- Modèles à zéro équation.
- Modèles à deux équations
- Relaxation en second ordre
- Simulation des grands vortex (LES)

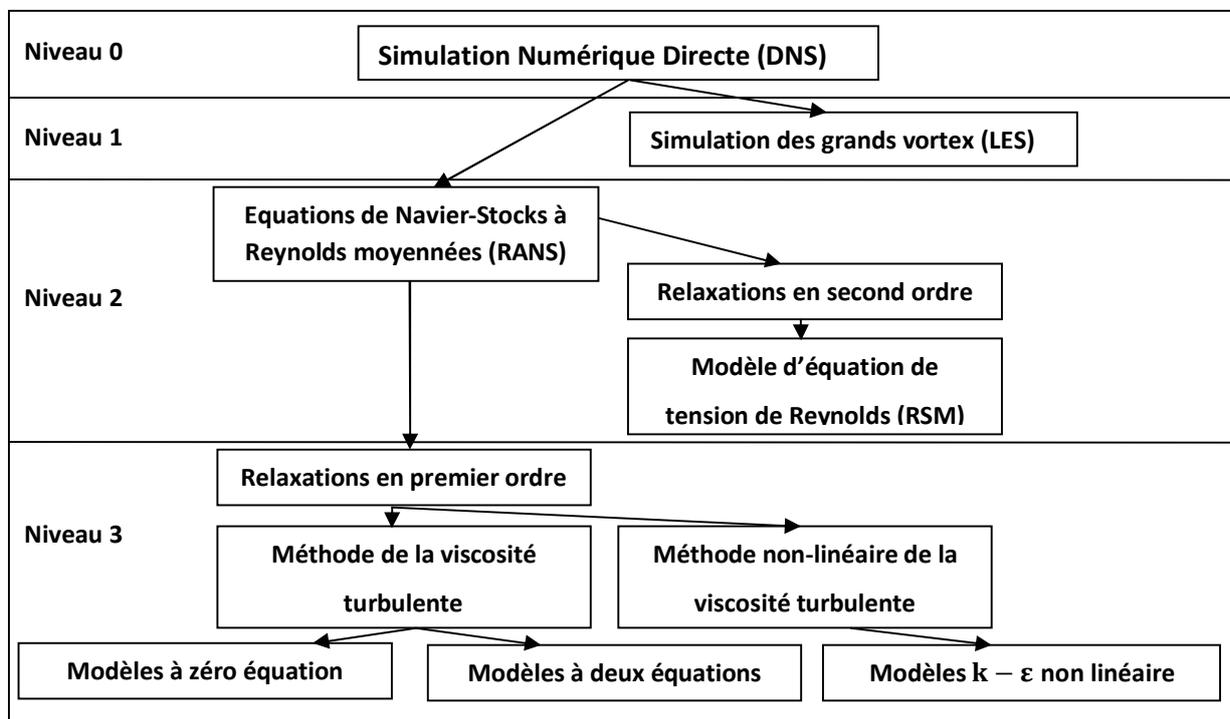


Fig.4.6. Hiérarchie des modèles de turbulence classés en fonction de leur niveau décroissant de complexité [Tong Yang, 2004].

Les deux premiers modèles appartiennent aux relaxations de premier ordre, qui sont basées principalement sur l'hypothèse de viscosité turbulente [Tong Yang, 2004]. Le concept de viscosité turbulente (proposé par Boussinesq en 1877) suppose qu'il existe une analogie

dans l'écoulement entre l'action de la tension visqueuse et les contraintes (tensions) de Reynolds. Selon la loi de viscosité de Newton, la tension visqueuse est proportionnelle aux taux de déformation des éléments de fluide. Pour un fluide compressible :

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.29)$$

μ est la viscosité dynamique du fluide. Boussinesq propose que les tensions de Reynolds peuvent se relier aux taux moyennes de déformation suivant la loi suivante :

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.30)$$

μ_t est la viscosité turbulente. Les deux équations sont analogues avec l'apparition du nouveau terme μ_t .

4.11.2. Modèles des Équations de Navier-Stokes à Reynolds Moyennés (RANS)

Les équations de Navier-Stokes à Reynolds moyennées (RANS) sont développées à partir des équations de Navier-Stokes à trois dimensions dépendant du temps, qui décrivent les tourbillons instationnaires par leurs effets moyens sur les flux, à travers les tensions de Reynolds.

Le modèle de longueur de mélange (modèle à zéro équation) utilise une équation algébrique pour calculer la contribution visqueuse de tourbillons. la description de flux est au niveau de l'écoulement moyen, en dehors de la longueur spécifique de mélange, $l_m(x, y)$, qui est décrit comme une fonction de position par moyen d'une formule algébrique simple. La viscosité turbulente (ν_t) est alors:

$$\nu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \quad (4.31)$$

Dans les écoulements turbulents bidimensionnels simples, la tension (turbulente) de Reynolds est en relation linéaire avec les gradients de vitesse moyenne et décrit par:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\rho \overline{u'v'} = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \frac{\partial U}{\partial y} \quad (4.32)$$

Ce modèle simple est seulement capable de calculer les propriétés de l'écoulement moyen et la contrainte de cisaillement turbulente. Il est incapable de décrire les flux avec séparation et recirculation, qui sont les caractéristiques d'écoulement trouvés dans l'ingénierie du vent. Les modèles $k - \varepsilon$ calculent un champ moyen, la vitesse de l'état d'équilibre et la pression. Ils représentent les fluctuations de la vitesse et de la pression à travers des variables modélisées, qui sont l'énergie cinétique (k) et son taux de dissipation (ε).

a) Modèle $k - \varepsilon$ standard

L'écoulement turbulent incompressible tridimensionnel d'un fluide newtonien est régi par les équations de conservation de la masse et de Navier-Stokes. En introduisant la procédure moyenne de Reynolds, l'ensemble des équations exprimées en notation de tenseur cartésien est [Tong Yang, 2004] :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) \quad (4.34)$$

P est la pression moyenne. Le tenseur de Reynolds est modélisé en utilisant le concept de viscosité turbulente:

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (4.35)$$

La viscosité turbulente isotrope ν_t est déterminée en utilisant l'expression suivante:

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (4.36)$$

Qui implique la distribution de k et de son taux de dissipation ε .

Pour le modèle $k - \varepsilon$ [Tong Yang, 2004], la distribution de k et ε sont déterminées à partir des modèles des équations de transport suivantes:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \varepsilon \quad (4.37)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.38)$$

Les coefficients du modèle $k - \varepsilon$ sont les suivants:

$$C_\mu = 0.09; C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

Le modèle standard $k - \varepsilon$ est le modèle de turbulence le plus couramment utilisé et validé dans les applications de l'ingénierie. La popularité de ce modèle est en raison de sa robustesse dans un large éventail de flux pertinents pour l'industrie, les coûts de calcul relativement faibles et généralement plus stable numériquement que les autres modèles de turbulence plus complexes [Versteeg et Malalasekera]. Toutefois, la faiblesse de ce modèle est d'affecter sa performance globale dans le domaine de l'ingénierie du vent:

- ⇒ L'énergie cinétique turbulente est surestimée dans les régions d'impact de l'écoulement et le rattachement conduisant à une mauvaise prédiction de transfert de chaleur et la mise au point de l'écoulement de la couche limite autour des bords

d'attaque et les corps non profilés. Le modèle $k - \varepsilon$ RNG propose une modification de l'équation de transport pour ε et peut également améliorer les prévisions dans ce domaine [Tong Yang, 2004].

⇒ Les flux très tourbillonnants sont souvent mal prédits et souvent sous-estimé en raison des champs de contraintes complexes et des régions de recirculation. Un modèle $k - \varepsilon$ non-linéaire ou un modèle algébrique de tension de Reynolds seraient plus performant [Tong Yang, 2004].

⇒ La séparation de flux des surfaces sous l'action des gradients de pression adverses est souvent mal prédite. le flux réel est susceptible d'être beaucoup plus proche de la séparation (ou plus séparé) que les calculs suggèrent [Tong Yang, 2004].

Plusieurs modifications du modèle standard $k - \varepsilon$ qui ont été proposées afin d'améliorer son performance pour des applications spéciales.

b) Modèle $k - \varepsilon$ à faible nombre de Reynolds

Ce modèle utilise un traitement différent dans la région proche de la paroi par rapport du modèle standard $k - \varepsilon$. Le modèle $k - \varepsilon$ à un nombre de Reynolds élevé utilise la loi universelle de la paroi pour un traitement spécial près du mur, ce que l'on appelle « Loi de paroi » (Wall function) est introduit et dépend de la distance unitaire normale à la paroi. Il nécessite donc des cellules supplémentaires (raffinement du maillage) dans cette région et un cout de calcul supplémentaire.

c) Modèle RNG $k - \varepsilon$

Le modèle de Groupe Re-Normalisé (RNG) $k - \varepsilon$ (Re-Normalization Group), est l'équation de transport pour la génération de turbulence la même que celle pour le modèle standard $k - \varepsilon$, mais les constantes du modèle sont différentes, et le terme supplémentaire dans l'équation de ε , représenté par le coefficient C_{1RNG} , rend ce modèle se comportent différemment du modèle standard $k - \varepsilon$ [Tong Yang, 2004].

$$C_{\mu} = 0.085; C_{\varepsilon 1} = 1.42; C_{\varepsilon 2} = 1.68; \sigma_k = \sigma_{\varepsilon} = 0.72.$$

d) Modèle MMK $k - \varepsilon$

Le modèle MMK (Murakami-Mochida-Kondo) est également une révision du modèle $k - \varepsilon$ standard pour améliorer ses performances. Il a été développé pour résoudre les problèmes

spécifiques de flux avec séparations et rattachement que l'on trouve dans l'ingénierie du vent [Tong Yang, 2004]. La constante standard du modèle C_μ devient fonction du taux de la vorticité. Par conséquent, lorsque ce ratio est inférieur de 1 (par exemple, débit au point de stagnation), la viscosité turbulente est réduite.

e) Modèle $k - \omega$

Le modèle $k - \omega$ introduit par Wilcox [1993] fonctionne très bien près de la paroi (couche limite), notamment dans le cadre de forts gradients de pression adverses (les applications aérospatiales). Cependant, il est très sensible à la valeur de courant libre de ω (ou $\omega = \frac{3}{k}$).

f) Modèle des tensions de Reynolds (RSM)

Lors de la modélisation du champ de déformation complexe résultant de l'action du tourbillon, les forces du corps tels que la flottabilité ou la complexité géométrique extrême, et les modèles de viscosité turbulente avec l'hypothèse de champs de contraintes simples sont jugés insuffisants [Tong Yang, 2004]. Une relation plus subtile est invoquée dans le modèle RSM, aussi appelé le modèle de fermeture du second ordre ou du second moment. Six tensions de Reynolds et le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente sont déterminées par la solution de six autres équations couplées, simultanément avec une équation pour ε . Ce modèle donne de meilleures prévisions des flux avec des quantités anisotropes distinctes, mais le coût de calcul et le manque de stabilité numérique sont des inconvénients pratiques par rapport aux autres modèles RANS.

4.11.3. Modèle $k - \varepsilon$ non linéaire

Le modèle $k - \varepsilon$ non-linéaire résout seulement deux équations de transport, ce qui est le même nombre résolu par son modèle standard (linéaire). En revanche, en raison de la relation constitutive non-linéaire de la tension et la vitesse du tenseur de déformation, ce modèle est théoriquement capable de simuler l'anisotropie de la turbulence. Il est donc un moyen économique de la comptabilisation de l'anisotropie des contraintes de Reynolds sans résoudre l'ensemble des équations de transport de tension de Reynolds [Tong Yang, 2004].

4.11.4. Simulation des grands vortex (LES)

Dans la simulation des grands vortex (LES), les mouvements turbulents instationnaires tridimensionnels les plus grandes sont directement représentés, alors que les effets des petits mouvements sont modélisés.

Par rapport aux modèles RANS, LES l'avantage de décrire les grands structures turbulentes instables, et donc peut être utilisé à des phénomènes stables tels que les charges aérodynamiques instationnaires sur les structures et la génération du son. LES peut être considéré plus précis et plus fiables que les modèles de tensions de Reynolds (RSM), dans la prévision des flux sur des corps non profilés [Tong Yang, 2004].

4.12. Fonction ou loi de la paroi

Dans un écoulement turbulent, la présence d'une paroi provoque de nombreux effets différents. Près de la paroi, le nombre de Reynolds se rapproche de zéro, et les contraintes de cisaillement normales moyennes de la couche limite deviennent grandes.

Avec un nombre de Reynolds élevé, le modèle standard de turbulence $k - \varepsilon$ ne cherche pas à reproduire directement les profils logarithmiques de la couche limite turbulente. À la place, il applique la loi de paroi dans la couche adjacente (soi-disant couche-logarithmique). La loi de paroi est caractérisée en termes de variables sans dimension qui concerne les conditions aux limites à la paroi.

La vitesse de frottement à la paroi u_τ est définie comme $(\tau_w/\rho)^{1/2}$ où τ_w est la contrainte de cisaillement de la paroi. U est la vitesse moyenne dans le temps parallèlement à la paroi et y est la distance normale de la paroi. La vitesse U^+ et la distance de la paroi y^+ sans dimension sont définies comme :

$$U^+ = \frac{U}{u_\tau} \quad (4.39)$$

Et

$$y^+ = \rho \frac{u_\tau}{\mu} y \quad (4.40)$$

Lors de l'utilisation de ce modèle, la valeur de y^+ au premier point de maillage doit être dans la limite de validité des lois de paroi, $30 < y^+ < 500$ pour le modèle universelle [Tong Yang, 2004]. Les lois universelles de paroi sont valables pour des parois lisses. Pour les parois rugueuses, les lois de parois peuvent être modifiées par mise à l'échelle d'une longueur de rugosité équivalente.

4.13. Modélisation de la ventilation naturelle

Les mécanismes d'entraînement responsables de la ventilation naturelle sont les forces de pressions externes autour du bâtiment et de température. Donc, il est important de prendre en compte l'environnement extérieur. Ceci implique la modélisation de la région autour d'un bâtiment et le flux d'air interne simultanément [Straw, 2000].

Trois approches sont utilisées dans la modélisation de la ventilation naturelle :

- Utilisez un domaine de calcul qui comprend les régions intérieures et extérieures d'un bâtiment;
- Répartir les environnements intérieurs et extérieurs en sous-domaines, résoudre les individuellement et correspondre à des solutions locales ;
- Limiter le domaine de calcul à l'environnement intérieur.

Le présent travail utilise la première approche qui modélise à la fois les environnements intérieurs et extérieurs est en même temps l'interaction entre les deux régions.

Afin de modéliser les régions internes et externes, il est nécessaire d'utiliser un domaine de calcul suffisamment large.

4.13.1. Les écoulements à travers l'enveloppe du bâtiment

La différence de pression ΔP résulte de la combinaison de deux mécanismes, la flottabilité et l'effet du vent sur la structure.

Le coefficient de pression surfacique d'un bâtiment C_P est défini par [Montazeri et Azizian, 2008]:

$$C_P = \frac{P - P_s}{0.5 \rho V_{ref}^2} \quad (4.41)$$

Ou :

P : Pression de surface mesurée à chaque emplacement.

P_s : Pression statique.

ρ : Densité de l'air.

V_{ref} : Vitesse du vent de référence.

4.13.2. Les modèles mathématiques d'écoulement à travers l'enveloppe

Le flux à travers l'enveloppe du bâtiment est généralement considéré indépendant des flux internes, ou l'introduction des relations mathématiques simples pour calculer le flux nécessaire est possible toute en connaissant certaines propriétés du bâtiment et les conditions météorologiques dominantes [Tong Yang, 2004]. Ces modèles mathématiques sont classés comme modèles purement empiriques et modèles semi-empiriques. Les modèles semi-empiriques contiennent généralement plusieurs hypothèses simplificatrices. On considère le modèle à une seule zone, avec deux ouvertures (Ou le diamètre D de l'ouverture est très grand par rapport à l'épaisseur E . $D \gg E$).

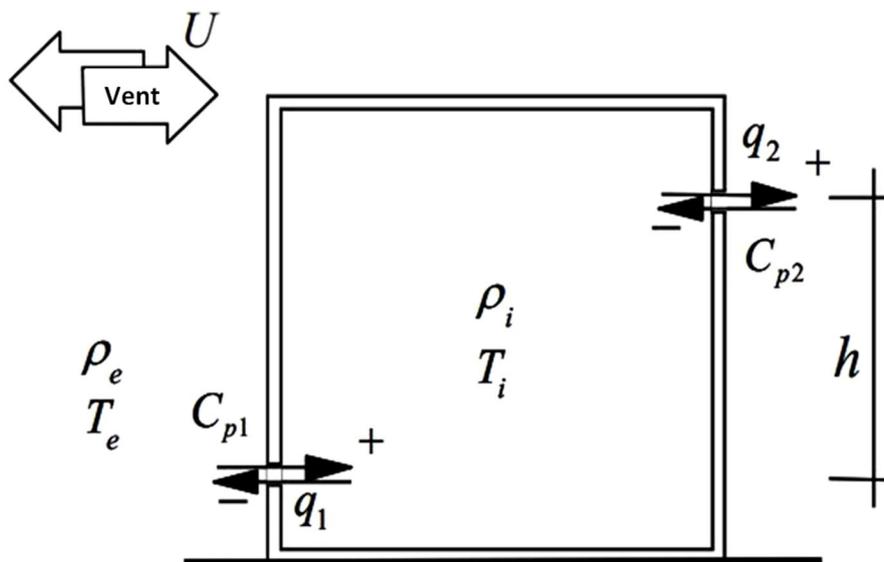


Fig.4.7. Les différents paramètres dans l'étude de la ventilation naturelle [Tong Yang, 2004].

U est la vitesse moyenne du vent.

La température et la densité intérieure et extérieures sont respectivement : T_i, ρ_i et T_e, ρ_e .

C_{p1} et C_{p2} sont les coefficients de pression surfaciques des ouvertures.

h est la différence relative de hauteur entre les deux ouvertures.

q_1, q_2 sont les débits volumiques à travers chaque ouvertures.

La plupart des flux sont instationnaires, en raison de la présence de la turbulence du vent. Lorsque le flux de masse à travers l'ouverture est instationnaire (varie avec le temps), les solutions analytiques aux équations de mouvement sont très rares, même pour les

ouvertures les plus simples. Cependant, l'intérêt principal dans la pratique est la relation entre le débit volumique moyen et les différences entre la pression statique externe moyenne sur les côtés entrée et sortie de flux. Les caractéristiques d'écoulement peuvent être décrits par $q = f(\Delta P)$ ou en termes adimensionnels par $C_d = f(Re_0)$, où Re_0 représente le nombre de Reynolds de l'ouverture.

En présence du vent, la ventilation est la plus susceptible d'être stationnaire dans la moyenne. Le taux de ventilation stationnaire indique alors qui est dû aux valeurs moyennes de la pression interne et externe en moyennés sur une période suffisamment longue (généralement 10 à 15 minutes), et par conséquent, ils peuvent être traités comme indépendante du temps. Pour n'importe quel orifice de ventilation avec conditions externes stables donnés, C_d est une fonction de la forme de l'ouverture et son nombre de Reynolds Re_0 , qui est défini en termes de vitesse moyenne à l'intérieur de l'ouverture et le diamètre de cette dernière.

Le coefficient de décharge d'une ouverture est défini par [PEI-CHUN LIU, 2012] :

$$C_d \equiv \frac{Q_V}{A_{ouvert}} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P}} = \text{constant} \quad (4.42)$$

Où Q_V est le débit volumique. A_{ouvert} représente la surface de l'ouverture et ΔP est la différence de pression à travers l'ouverture.

Les modèles théoriques contiennent des hypothèses et approximations effectuées sur l'équation d'écoulement et l'équation de continuité:

Les hypothèses de l'équation d'écoulement

- I. L'hypothèse d'écoulement pseudo-stationnaire constitue la base de la plupart des modèles mathématiques de flux à travers l'enveloppe. Elle affirme que les caractéristiques d'écoulement moyenne dans le temps de chaque ouverture sont les mêmes que ce qu'il serait si les fluctuations de pression et de débit ne sont pas présentes.
- II. L'hypothèse d'écoulement quasi-stationnaire indique que, à chaque instant le flux se comporte comme s'il était vraiment stationnaire. Donc, une ventilation vraiment stable se produit lorsque les différences de pression dues aux différences de température sont beaucoup plus importantes que ceux causés par le vent.

L'hypothèse de l'équation de continuité pour deux cas différents

- I. On suppose parfois que l'approximation de Boussinesq est valide, c'est la différence entre les densités interne et externe peut être négligé dans l'équation de continuité.
- II. L'approximation de Boussinesq n'est pas utilisée.

4.13.2.1 Modèle pseudo-stationnaire avec approximation de Boussinesq

Ce modèle suppose que les quantités moyennes dans le temps suivent la même relation que pour un écoulement vraiment stationnaire. En appliquant l'approximation de Boussinesq, l'équation de continuité (conservation de la masse) de l'enveloppe d'un bâtiment devient:

$$q_1 + q_2 = 0 \quad (4.43)$$

La ventilation du bâtiment peut être induite par les effets du vent seuls, les effets de flottabilité seuls, ou la combinaison des deux effets.

(a) Ventilation due à l'effet du vent

La ventilation par entrainement du vent est composée d'une composante moyenne entraînée par la différence moyenne de pression à travers les ouvertures de ventilation, et une composante fluctuante entraînée par les pressions fluctuantes et des flux instables autour des ouvertures. La plupart des modèles d'écoulement à travers l'enveloppe ne tiennent compte que de la pression moyenne.

Afin de prédire la ventilation par entrainement du vent dans un bâtiment, nous avons besoin de savoir [Tong Yang, 2004] :

- La distribution surfacique des coefficients de pression et la façon dont cette dernière varie en fonction de la direction du vent.
- Les caractéristiques de flux stationnaire des ouvertures.
- Les positions des ouvertures.

Une caractéristique d'un écoulement stationnaire à travers une ouverture est la relation entre le débit d'écoulement et la différence de pression à travers l'ouverture. Dans le cas simple d'une enveloppe avec deux ouvertures acérées ; C_d est constant. Le taux de ventilation due au vent seul est proportionnel à la vitesse du vent et de la différence de

coefficient de pression dC_p à travers les deux ouvertures, qui est principalement influencé par la direction du vent. Les ouvertures sont supposées être identiques à la même caractéristique d'écoulement. Donc, le débit de ventilation entraînée par le vent est définie par:

$$Q_V = C_d A_{ouvert} U_{ref} \sqrt{\frac{dP}{\rho}} = C_d A_{ouvert} \sqrt{\frac{dP}{\rho}} \quad (4.44)$$

Ou :

C_d : coefficient de décharge (indépendant de Re_0 pour ouvertures à arêtes acérées).

dP : est la différence de pression statique moyenne à travers les ouvertures (Pa).

ρ : Masse volumique (kg/m^3).

(b) Ventilation due à l'effet de flottabilité

pour le même cas, le taux de ventilation en raison de différence de température est proportionnelle à la racine carrée de dT et h .

La densité moyenne est définie par:

$$\rho_a = \frac{\rho_e + \rho_i}{2} \quad (4.45)$$

Et la différence de densité est la suivante:

$$d\rho = \rho_e - \rho_i \quad (4.46)$$

Le débit de ventilation est donné par:

$$Q_V = C_d A_{ouvert} \sqrt{\frac{(d\rho)gh}{\rho_a}} = C_d A_{ouvert} \sqrt{\frac{(dT)gh}{T_e}} \quad (4.47)$$

Où:

T_e : est la température externe/extérieure (K).

T_i : est la température intérieure (K).

dT : est la différence de température, $T_e - T_i$ (K).

h : Distance verticale entre les deux ouvertures (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2).

(c) Les effets combinés du vent et des forces de flottabilité

Le débit volumique entraîné par le vent en combinant les effets de flottabilité est décrit comme:

$$Q_V = C_d A_{ouvert} U \sqrt{\left| \frac{dC_P}{2} + \frac{(d\rho)gh}{\rho_a U^2} \right|} \quad \text{ou} \quad Q_V = C_d A_{ouvert} U \sqrt{\left| \frac{dC_P}{2} - \frac{(d\rho)gh}{\rho_a U^2} \right|} \quad (4.48)$$

Où le signe (+) ou (-) indique que la force du vent complète ou neutralise l'effet de flottabilité.

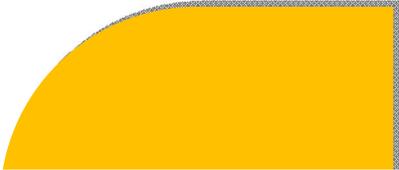
4.13.2.2 Modèle pseudo-stationnaire sans approximation de Boussinesq

L'équation de continuité sans l'approximation de Boussinesq est exprimée comme suit [Tong Yang, 2004] :

$$\rho_1 q_1 + \rho_2 q_2 = 0 \quad (4.49)$$

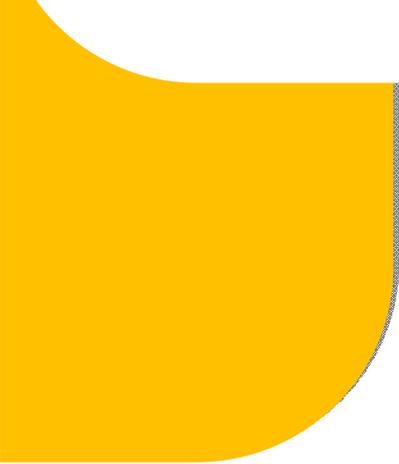
L'équation (4.44) est également appliquée pour le seul cas de l'effet du vent, mais l'équation (4.47) pour la flottabilité devient:

$$q_1 = C_d A_{ouvert} \sqrt{\frac{2(d\rho)*gh}{\rho_e} \frac{\rho_i}{(\rho_e+\rho_i)}} \quad \text{et} \quad q_2 = C_d A_{ouvert} \sqrt{\frac{2(d\rho)*gh}{\rho_i} \frac{\rho_e}{(\rho_e+\rho_i)}} \quad (4.50)$$

A yellow decorative shape consisting of a semi-circle on the left side and a straight vertical edge on the right side, positioned to the left of the chapter title.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

A yellow decorative shape consisting of a semi-circle on the right side and a straight vertical edge on the left side, positioned to the right of the chapter title.

5.1. Introduction

Le Cinquième chapitre sera consacré à l'étude numérique de la ventilation naturelle par tour à vent et une présentation des résultats de la simulation, comparés avec les résultats expérimentaux et numériques disponibles dans la littérature.

Le modèle de la tour est considéré en 3 dimensions [Montazeri et Azizian, 2008]. Pour notre cas, la ville de Béchar présente des vents dominants où l'orientation de la tour sera Nord ou Sud (Annexe 2).

L'étude numérique est divisée en trois parties. La première partie est une comparaison entre la ventilation transversale et la ventilation par tour à vent. La deuxième partie est une étude numérique de la performance de la tour à vent avec différentes hauteurs en l'occurrence 3, 6, 9, et 12 m. La troisième partie est une solution de deux problèmes fréquents dans les tours à vent : le problème de stagnation et de séparation de flux.

Les hypothèses simplificatrices présent en compte sont :

- ⇒ L'ensemble (domaine + tour + pièce) est en 3D.
- ⇒ L'écoulement de l'air dans le macro et le micro climat est instationnaire.
- ⇒ l'air est considéré Newtonien, homogène et isotrope.
- ⇒ L'écoulement de l'air est incompressible.
- ⇒ L'angle d'incidence de l'air est 0° .
- ⇒ Les schémas de discrétisation du second ordre Upwind sont utilisés.
- ⇒ Les vents dominants sont suivant l'axe x .

5.1.1. Domaine d'étude

Le domaine extérieur ou le macroclimat est composé essentiellement de l'air atmosphérique. Les dimensions du domaine ont été choisies selon les travaux de certains auteurs [Revuz 2011] et [Franke et al.] :

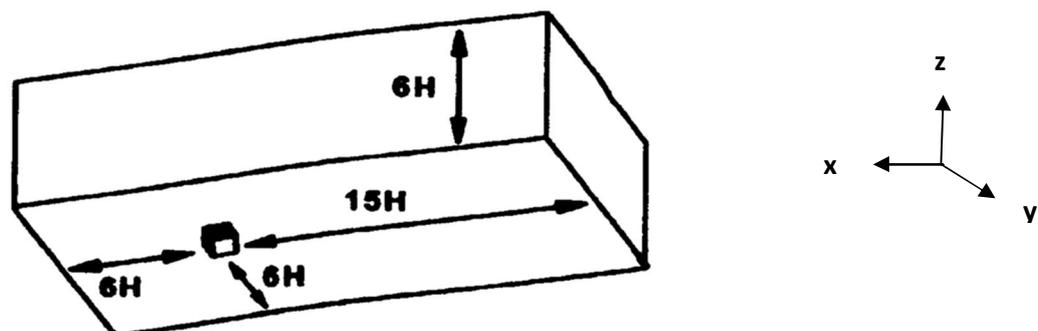


Fig.5.1. Dimensions du domaine d'études selon les recommandations de [Revuz 2011].

Les dimensions du domaine sont les suivantes:

$$\text{Dimensions du domaine extérieur} \begin{cases} L_{\text{Domaine}} = 21H + 6m \\ l_{\text{Domaine}} = 12H + 4m \\ H_{\text{Domaine}} = 6H \end{cases}$$

H : représente la hauteur de la tour, prise égale à 9m. Les dimensions du domaine extérieur ou macroclimat seront égales à :

$$\begin{cases} L_{\text{Domaine}} = 195 m \\ l_{\text{Domaine}} = 112 m \\ H_{\text{Domaine}} = 54 m \end{cases}$$

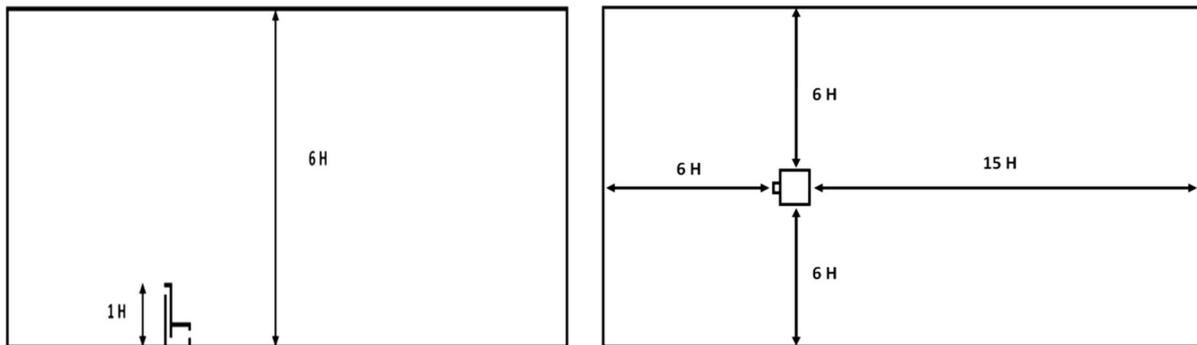
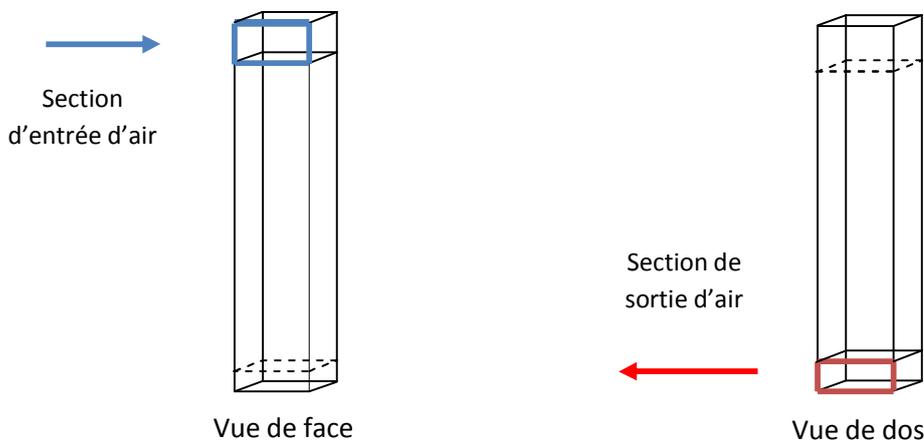


Fig.5.2. Vue latérale et en plan du domaine d'étude.

Les dimensions de la pièce (micro climat) sont :

$$\begin{cases} L' = 5 m \\ l' = 4 m \\ h' = 3 m \end{cases}$$

Et pour la tour à vent :



$$\text{Dimensions de la tour à vent} \begin{cases} A_t(\text{section transversale}) = 1 m^2 \\ \text{Section d'entrée d'air} = 1 m^2 \\ \text{Section de sortie d'air} = 0.5 m^2 \text{ (à base de la conception architecturale)} \\ H = 3, 6, 9, 12 m \text{ (selon le cas)} \end{cases}$$

5.1.2. Maillage

Un maillage non structuré (triangulaire+hexahédrique) est utilisé pour le macroclimat avec un raffinement au niveau du microclimat (pièce ou tour+pièce) (figure 5.3) avec un taux de croissance de 1.2 pour prendre en compte les effets des gradients de pression causé par les vents incident. Un maillage structuré est utilisé au niveau de l'ensemble tour+pièce afin de réduire les couts de simulation.

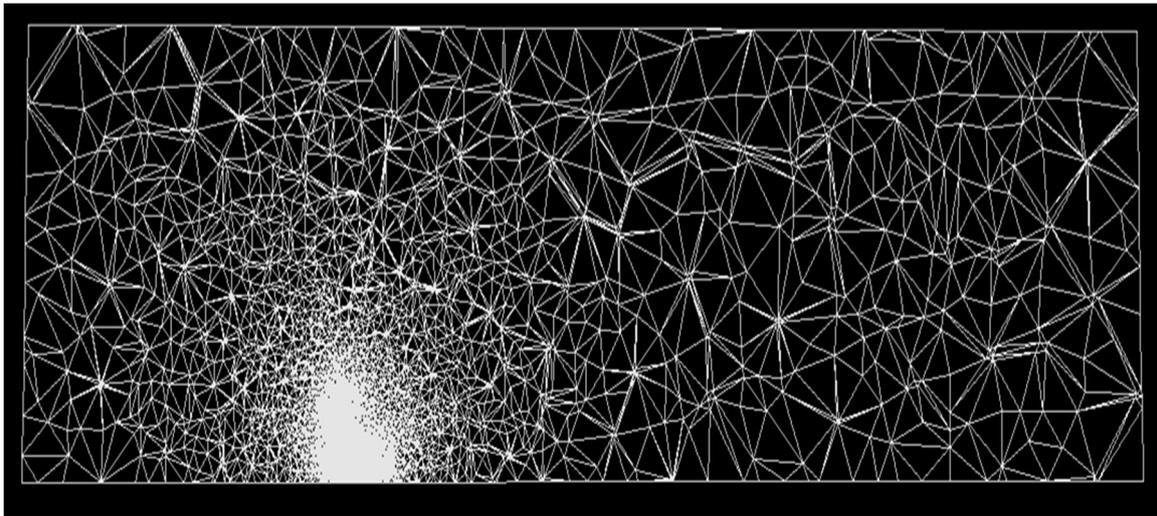


Fig.5.3. Maillage du domaine d'étude à (y=56m).

5.1.3. Conditions aux limites et conditions initiales

Conditions aux limites :

Macroclimat {

- Entrée du domaine : air extérieur dont la vitesse d'entrée : $v_{ea} = 3 \text{ m/s}$ et la température, $T_{ea} = 300\text{K}$.
- sortie du domaine : sortie de pression $P_{sa} = 1\text{atm}$, et $T_{sa} = 300\text{K}$
- les murs latéraux, le plafond et le planché bas sont des murs adiabatiques .

Tour à vent {

- Entrée de la tour à vent : air extérieure $v_{ea} = 3 \text{ m/s}$ et la température, $T_{ea} = 300\text{K}$.
- sortie de la tour : sortie de pression $P_{sa} = 1\text{atm}$, et $T_{sa} = 300\text{K}$.
- Murs de la tour : adiabatiques

Microclimat (enveloppe ou pièce) {

- Les murs sont lisses et adiabatique
- fenêtre : sortie de pression $P_{sa} = 1\text{atm}$, $T_{sa} = 300\text{K}$.

Conditions initiales :

$$\begin{cases} \text{vitesse: } v_x = 3 \text{ m/s; } v_y = v_z = 0. \\ T = 298K \\ P = P_{atm} = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa.} \end{cases}$$

5.1.4. Modèle de turbulence

Trois modèles de turbulences ont été utilisés dans l'étude de la ventilation naturelle par tour à vent. Le premier modèle est le modèle universel $k - \varepsilon$ standard qui prend en charge les effets des gradients de pression et les effets thermiques afin de comparer la ventilation transversale avec la ventilation par tour à vent

Pour la comparaison entre les modèles de tour à vent avec différentes hauteurs (3, 6, 9,12 m), le modèle $k - \omega$ standard est utilisé. Ce modèle est capable d'effectuer un traitement au niveau de la couche limite. Dans cette partie, la rugosité du sol est de l'ordre 0.01 m (1 cm).

Le troisième modèle utilisé est le modèle **LES** (Large Eddy Simulation), qui est utilisé pour comparer le fonctionnement des deux modèles de tour à vent, le premier est une tour à vent à toit plat et l'autre à toit incliné. Le modèle **LES** est capable de capter les tourbillons de différentes taille, donc une bonne résolution des phénomènes de stagnation et de séparation de flux.

La simulation a été réalisée par le code de calcul CFD Fluent dans sa version 6.3.26. Ce logiciel dispose d'un nombre relativement important de modèles (**LES**, $k - \varepsilon$, $k - \omega$, Reynolds stress...), pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides, turbulence, etc. [**Morsli et Bendehina, 2013**].

5.2. Comparaison entre la ventilation par tour à vent et la ventilation transversale

La comparaison entre la ventilation transversale et celle par tour à vent a pour objectif de démontrer l'efficacité de cette technique par rapport à la ventilation transversale qui est considérée parmi les mécanismes de ventilation efficaces et approuvée.

La tour à vent est de 9 m de hauteur. Il est important de noter que l'orifice de sortie de la tour (orifice de décharge d'air) est égale 1 m^2 , par rapport aux autres modèles étudiés ou la section de sortie est prise égale à 0.5 m^2 (*Section de sortie d'air* = $1 \times 0.5 \text{ m}^2$).

Les dimensions de la pièce ou l'enveloppe sont les mêmes dans les deux modes de ventilation. La tour est placée en amont de la structure (au milieu de la façade au vent).

Le modèle $k - \varepsilon$ standard est le modèle utilisé qui prend en compte la charge les gradients de pression provoquée par le vent.

5.2.1. Résultats de la simulation

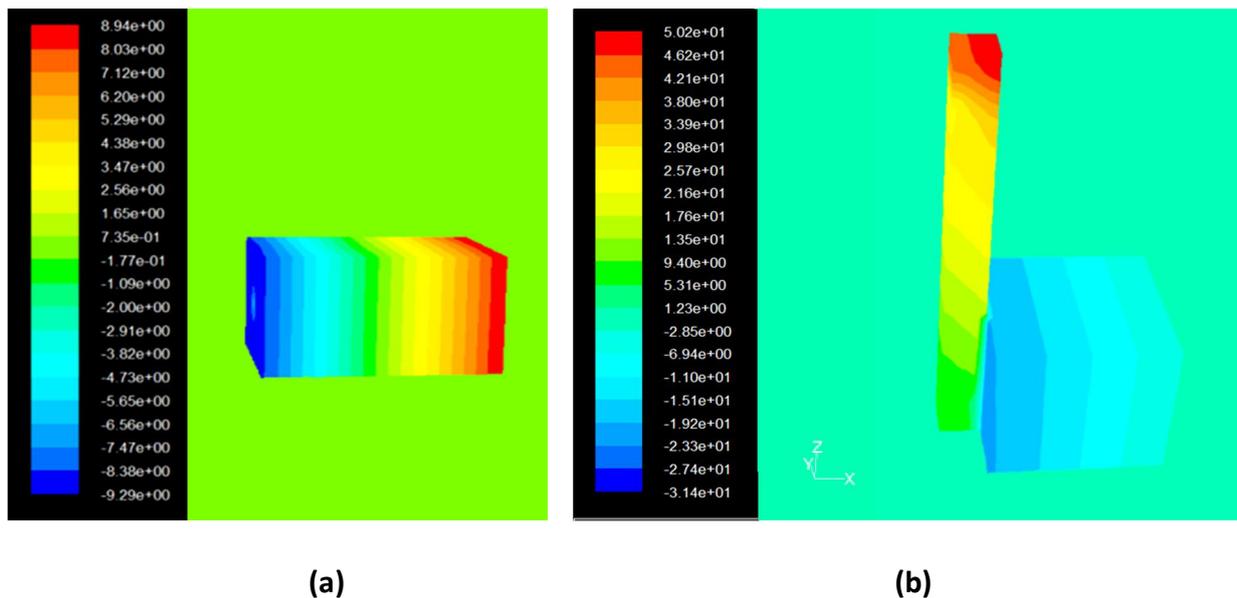


Fig.5.4. Comparaison de la pression statique en 3D entre la ventilation transversale (a) et par tour à vent (b).

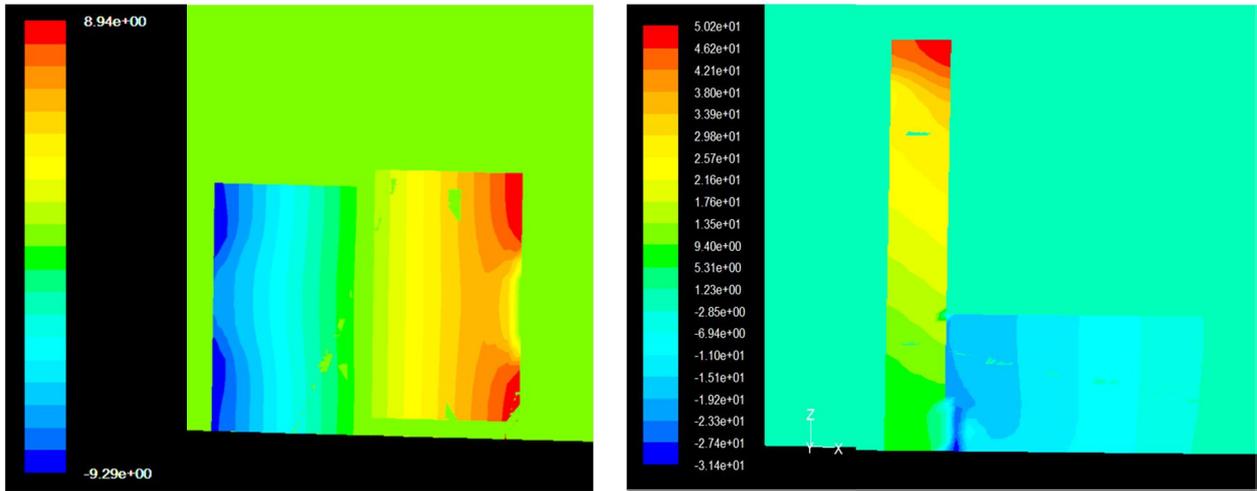


Fig.5.5. Comparaison de la pression statique (Pa) ($y=56m$).

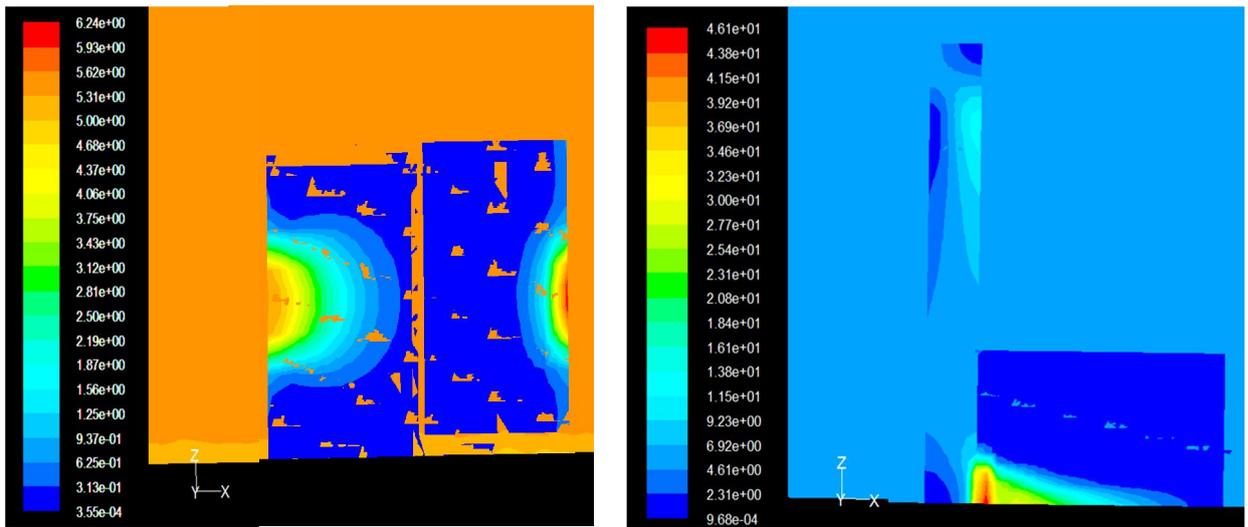


Fig.5.6. Comparaison de la pression dynamique (Pa) ($y=56m$).

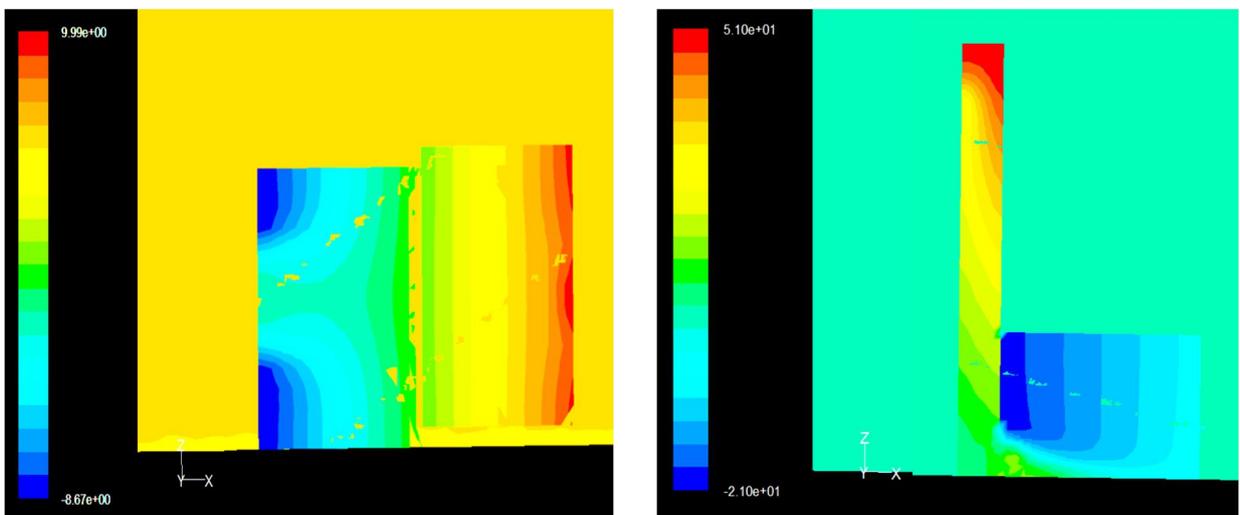


Fig.5.7. Comparaison de la pression totale (Pa) ($y=56m$).

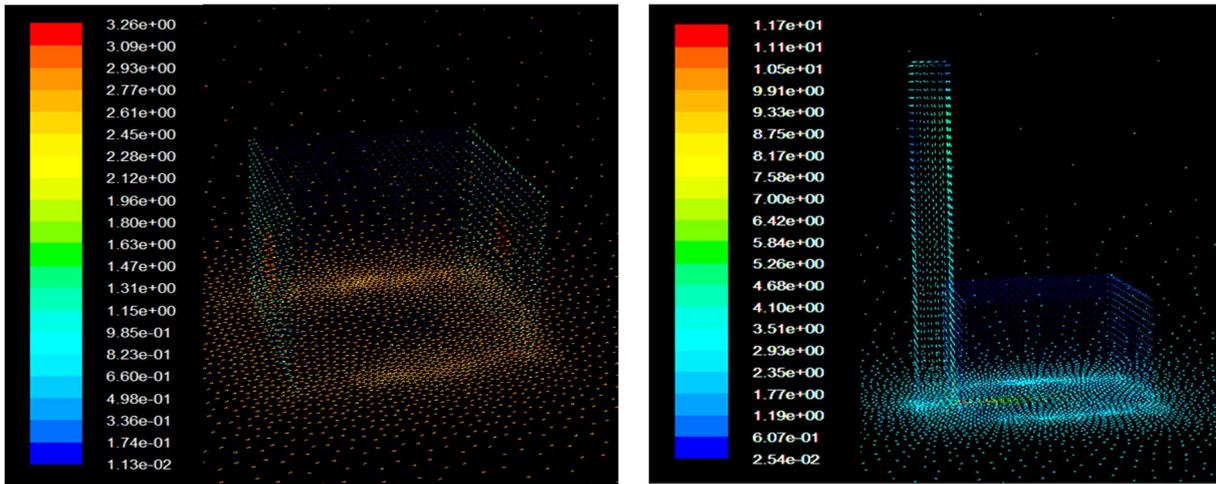


Fig.5.8. Vue en 3D du profil de vitesse.

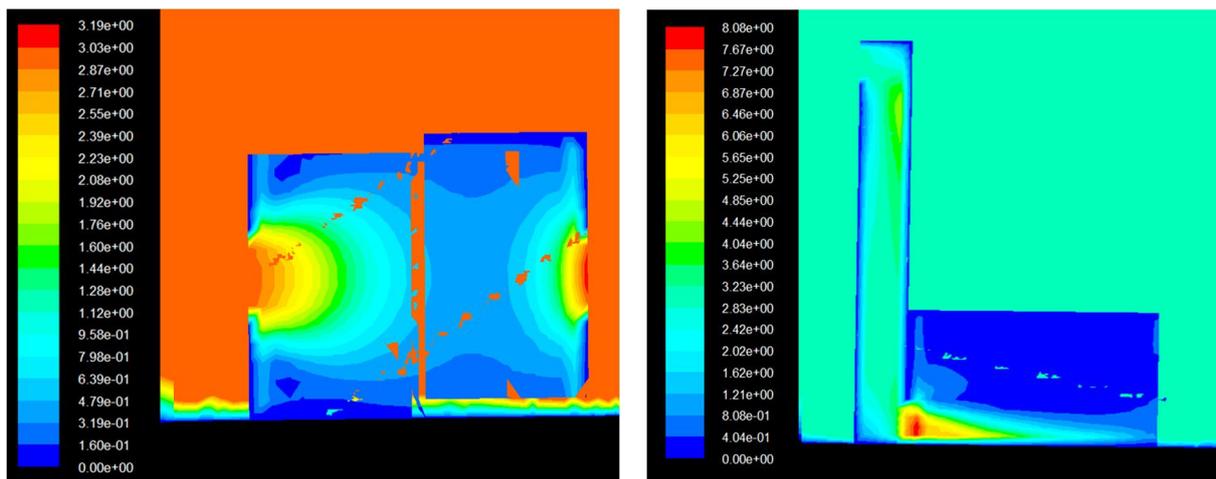


Fig.5.9. Comparaison du profil de la vitesse moyenne (m/s) ($y=56m$).

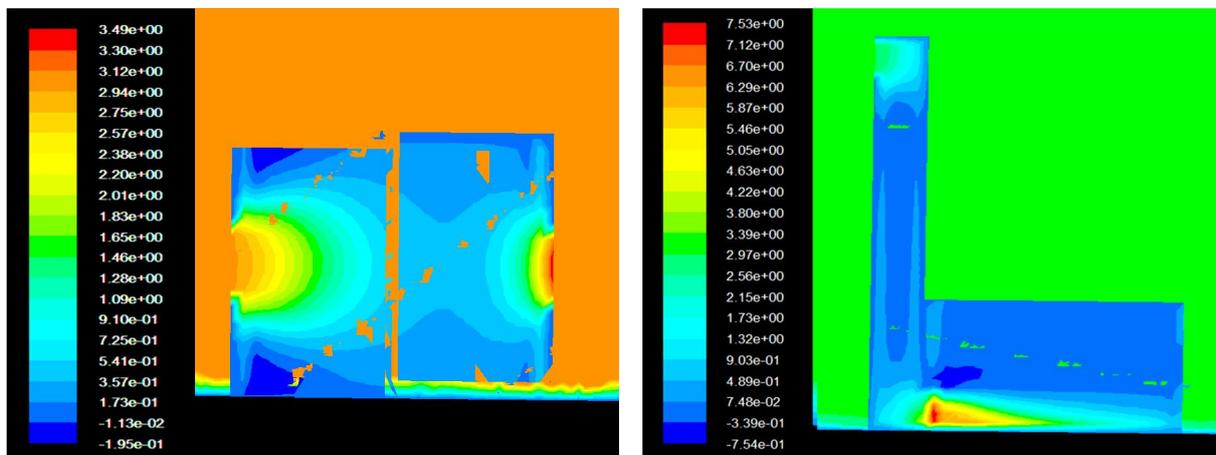


Fig.5.10. Comparaison du profil de la vitesse suivant X (m/s) ($y=56m$).

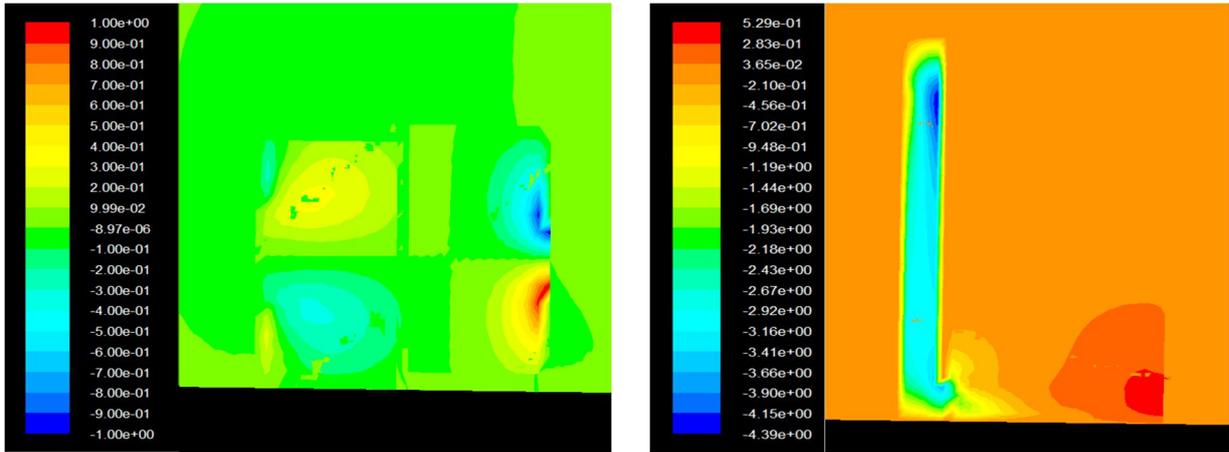


Fig.5.11. Comparaison du profil de la vitesse suivant Z (m/s) (y=56m).

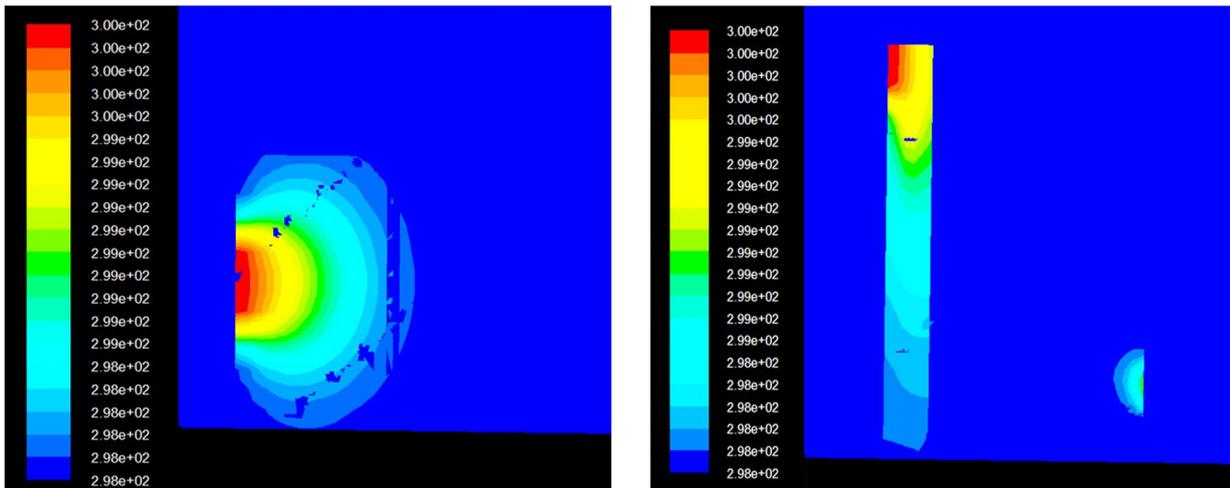


Fig.5.12. Comparaison du profil de la température (K) (y=56m).

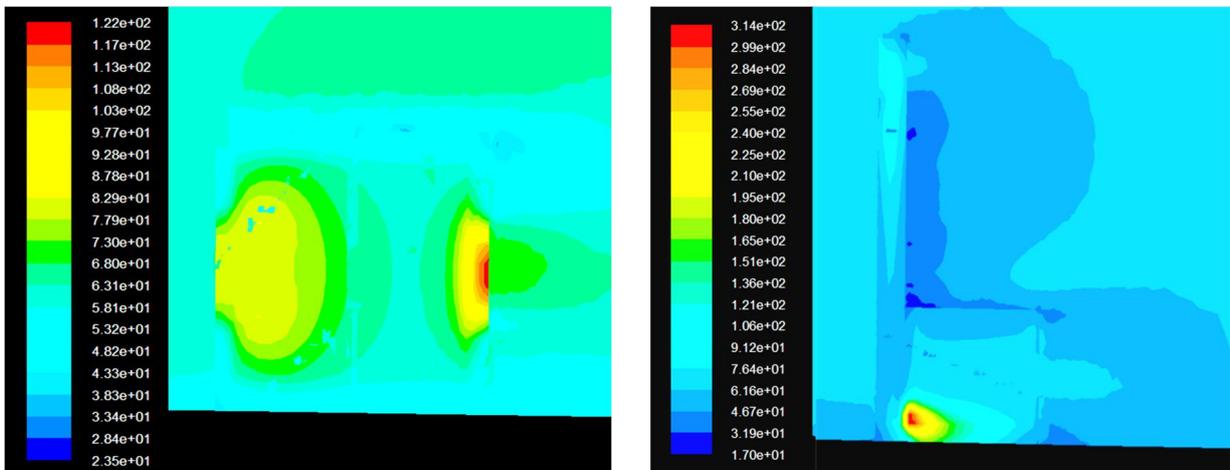


Fig.5.13. Comparaison de l'intensité de la turbulence (%) (y=56m).

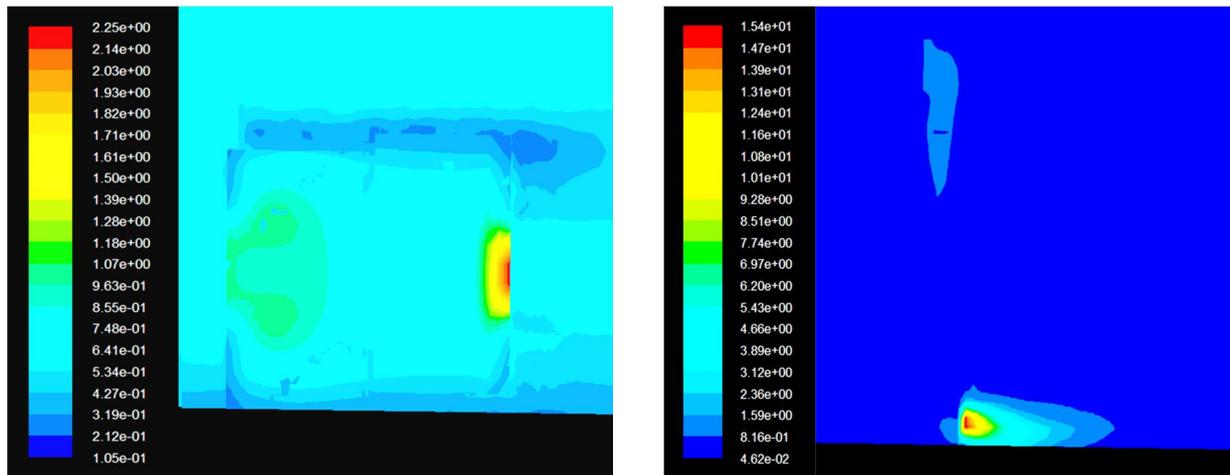


Fig.5.14. Comparaison du profil de l'énergie cinétique turbulente (m^2/s^2) ($y=56m$).

La pression est la principale force motrice de la ventilation naturelle. Pour donner une idée générale, elle sera présentée dans ses trois formes : statique, dynamique et totale.

Par une simple comparaison de la pression statique entre les deux modes de ventilation, on remarque que la pression statique dans la tour est supérieure au niveau de l'orifice d'entrée d'air de la tour (50 Pa) et elle subit une dégradation le long de la tour et atteint sa valeur minimale au niveau de l'orifice de sortie (- 0.27 Pa) et se stabilise au niveau de la pièce après l'injection d'air (- 2.85 Pa). Par contre, la pression statique dans la pièce avec ventilation transversale est de niveau inférieur au niveau de l'ouverture d'entrée d'air et subit un accroissement jusqu'à d'atteindre les valeurs maximales au niveau de l'ouverture de sortie (8 Pa). Les valeurs négatives de la pression représentent la dépression, et les valeurs positives représentent la surpression.

La pression dynamique dans la pièce est supérieure au niveau des ouvertures (environ 5.9 Pa) et atteint ses minima au centre de la pièce. La pression dynamique au niveau de la tour à vent est de l'ordre de (13.8 Pa) sous l'orifice d'entrée d'air (contact air-mur), et elle diminue en traversant la tour et atteint ses maxima au niveau de la sortie de la tour (46.1 Pa). La pression dynamique de l'air introduit dans la pièce commence à décroître dans la partie basse de la pièce jusqu'à atteindre une valeur de (25.4 Pa) au centre de la pièce, et la pression dynamique reste stable dans le haut de la pièce (0.97 Pa).

L'analyse de la pression totale de la ventilation par tour à vent montre une surpression en amont du système (51 Pa) et une dépression en aval du système (environ 10 Pa), avec une répartition uniforme décroissante.

La vitesse de l'air à l'intérieur du système de la ventilation transversale commence par une valeur de (3 m/s) au niveau des deux ouvertures et diminue au centre de la pièce avec des faibles valeurs de vitesse suivant l'axe Z (v_z) qui atteint sa valeur maximale au niveau de l'ouverture de sortie avec une valeur de (1 m/s).

La vitesse de l'air à l'entrée de la tour à vent est environ (3 m/s) avec l'existence de zone de stagnation de flux dans le coin contre le vent incident et une zone de séparation et recirculation de flux au niveau du bord inférieur de l'entrée de la tour (proche de 0 m/s). La vitesse de l'air croît en traversant la tour (4 m/s) et puis se stabilise (3.23 m/s) en descendant vers le bas de la tour pour atteindre sa valeur maximale au niveau de la sortie de la tour (8.08 m/s), et cela est due aux effets de gradient de pression et de densité de l'air. L'air à l'entrée de la pièce commence à diminuer sa vitesse jusqu'à atteindre environ (2 m/s) au niveau de la partie basse du mur contre la sortie de la tour. Une variation de la vitesse (v_z) qui commence par des valeurs inférieures au niveau de la tour et croît au niveau de la pièce jusqu'à atteindre une valeur maximale (0.5 m/s) au niveau de l'ouverture de sortie (fenêtre).

L'intensité de la turbulence est supérieure au niveau des ouvertures d'entrée et de sortie de système de ventilation transversale, mais seulement au niveau de la sortie de la tour qui fait 2.5 fois la valeur de l'intensité de la turbulence dans la ventilation transversale. Le même cas pour l'énergie cinétique turbulente avec 6 fois de plus dans le système de tour à vent.

L'analyse de la température indique la capacité de la tour à vent à réduire la température, presque de (2 °C) seulement par le passage de l'air dans la tour avant sont injection dans la pièce. Par contre, la ventilation transversale introduit l'air directement dans la pièce. Il est important de cité le rôle de l'isolation thermique des murs de la tour qui contribue efficacement dans cette réduction de température.

Le débit de l'air introduit dans le système de ventilation transversale est $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Le système de ventilation par tour à vent fournit un débit de ventilation de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, donc une augmentation significative du débit de ventilation *qui est de l'ordre 30 %*.

5.3. Études de la ventilation naturelle par tour à vent avec différentes hauteurs

La tour se trouve en amont de l'enveloppe à ventilée, de section transversale carrée. Les hauteurs de la tour choisies sont respectivement 3, 6, 9, 12 m. L'orifice d'entrée d'air se trouve dans la partie supérieure de la tour contre les vents dominants et un orifice de décharge d'air. Les dimensions de la pièce sont les mêmes pour tous les modèles ($5\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$) et aussi pour la fenêtre ($1\text{ m} \times 1\text{ m}$). Le modèle de turbulence $k - \omega$ est utilisé pour prendre en compte la loi de paroi. Le sol est de rugosité de 0.01 m.

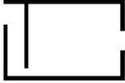
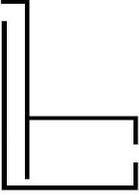
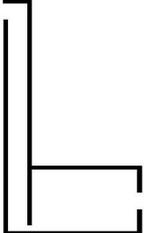
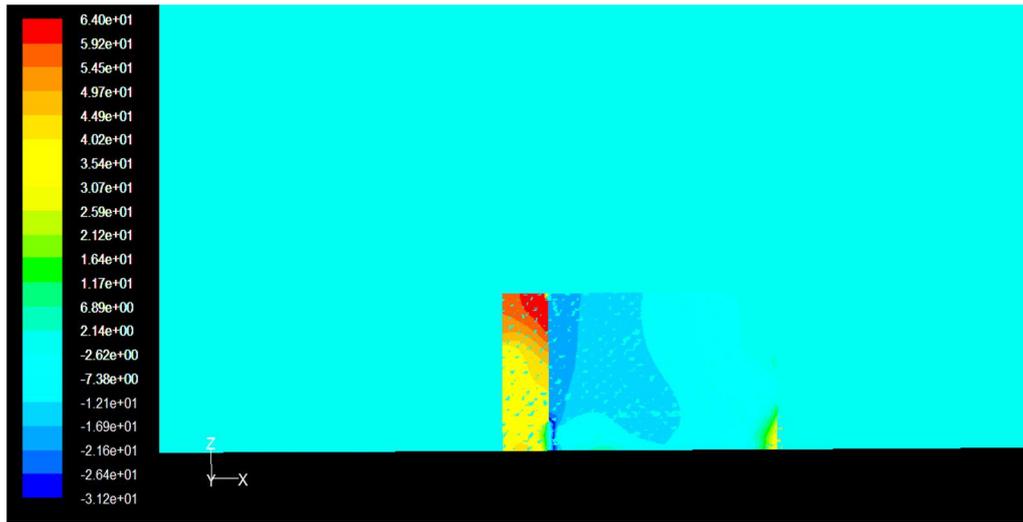
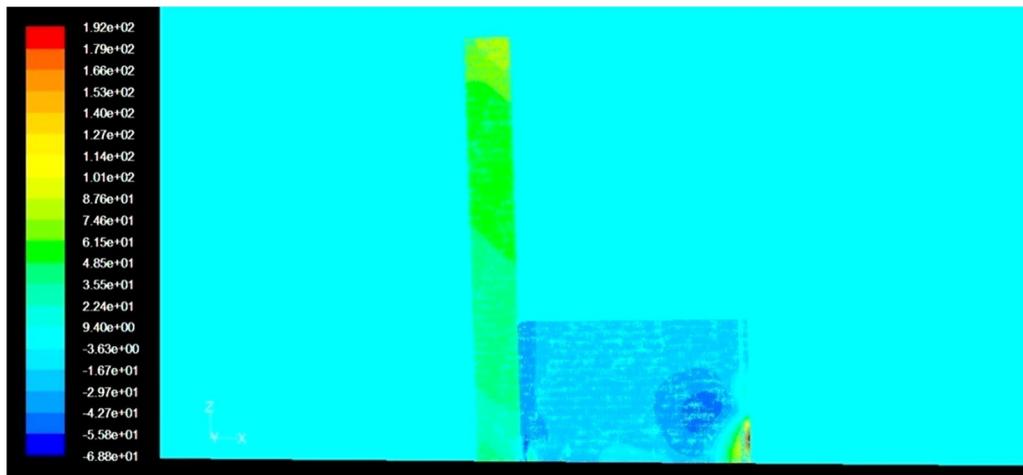
Modèle N°	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4
Hauteur de la tour à vent	H = 3 m	H = 6 m	H = 9 m	H = 12 m
Forme de la tour + pièce				
Vitesse du vent	$v = 3\text{ m/s}$			
Résultats				
Convergence de la solution	Converge	Diverge	Converge	Converge

Tableau.5.1. Paramètres de la simulation de la tour avec H = 3, 6, 9 et 12 m.

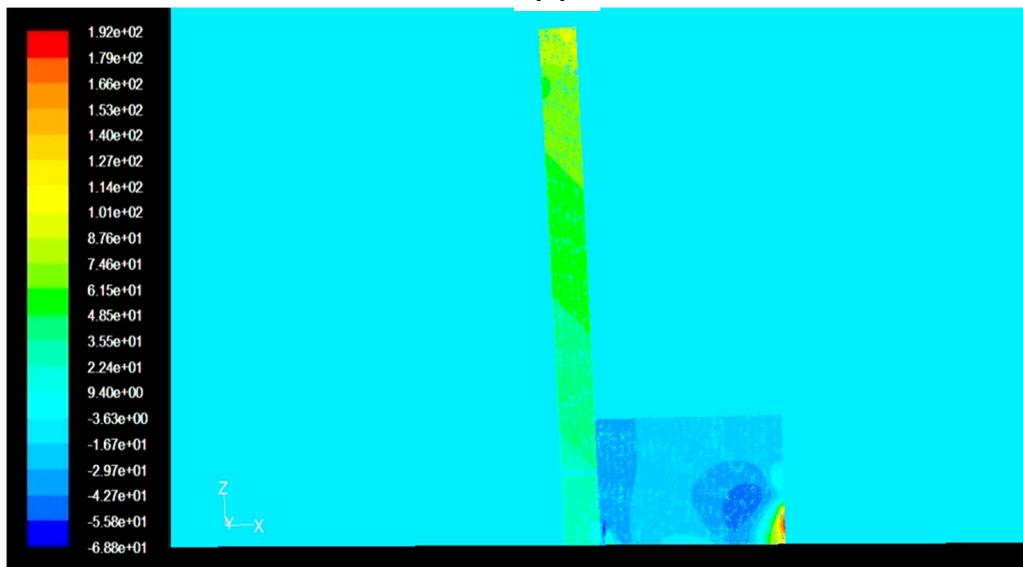
5.3.1. Résultats de la simulation



(a)

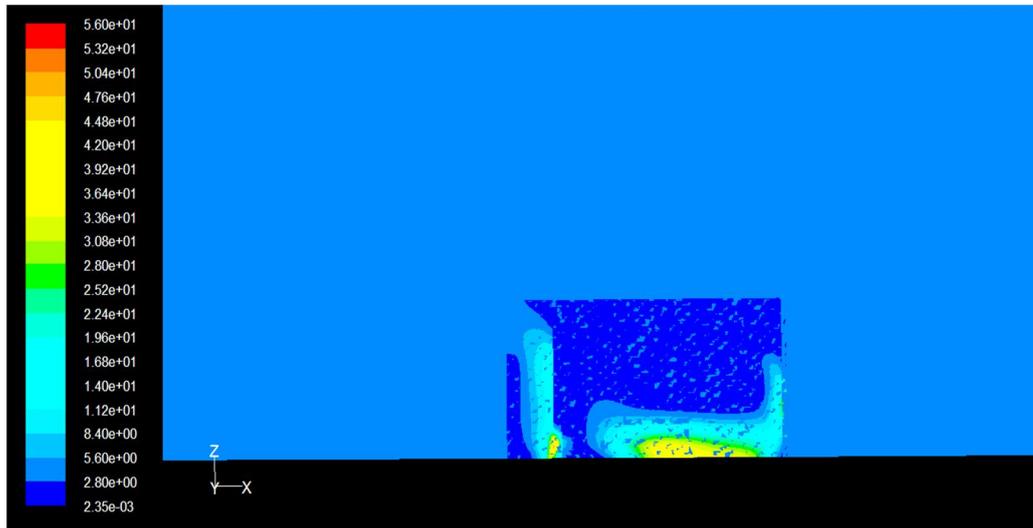


(b)

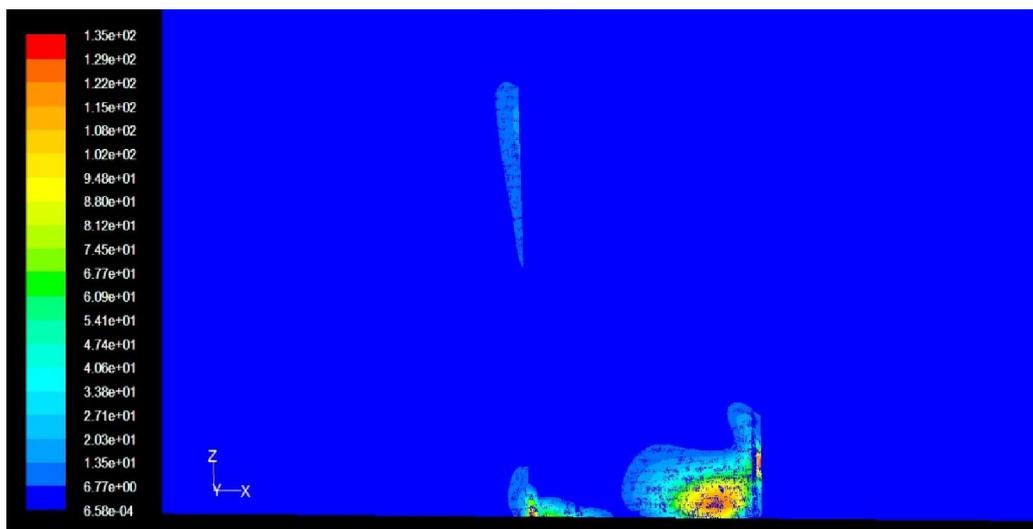


(c)

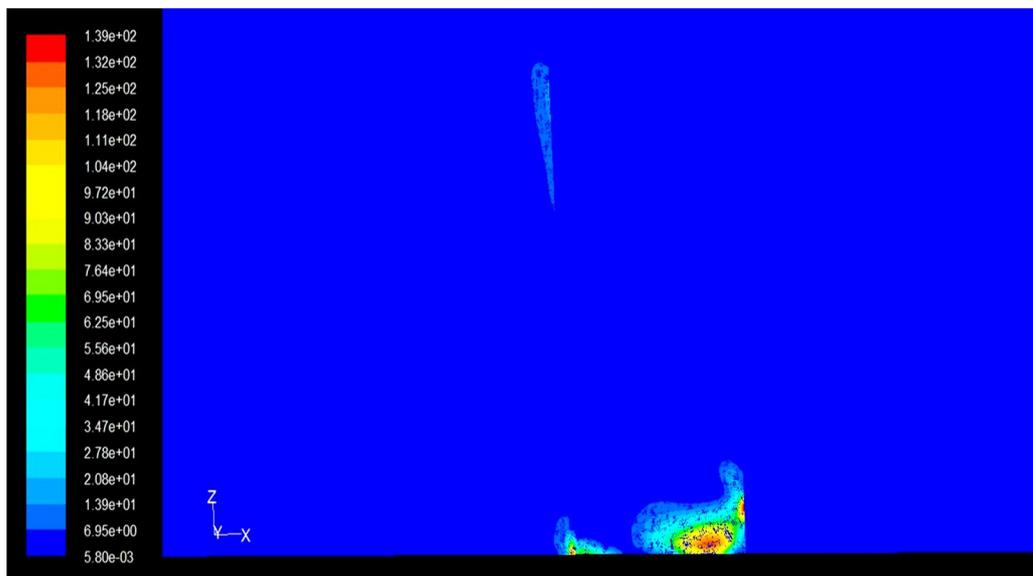
Fig.5.15. Profil de la pression statique (Pa) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).



(a)

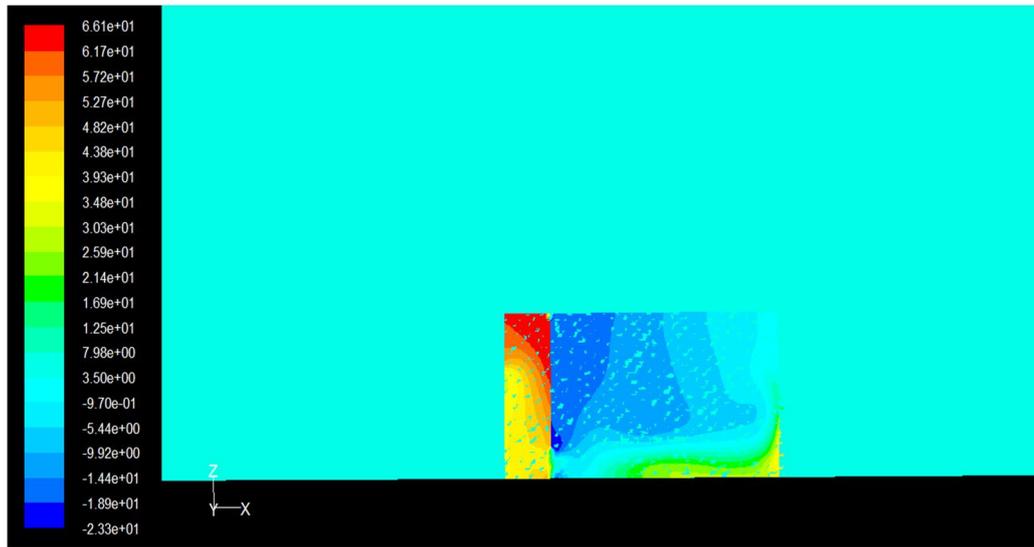


(b)

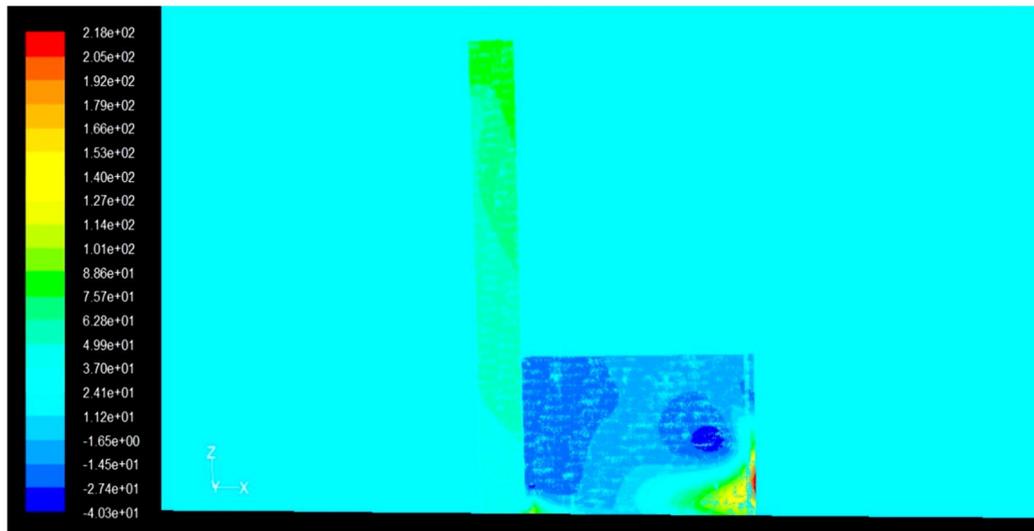


(c)

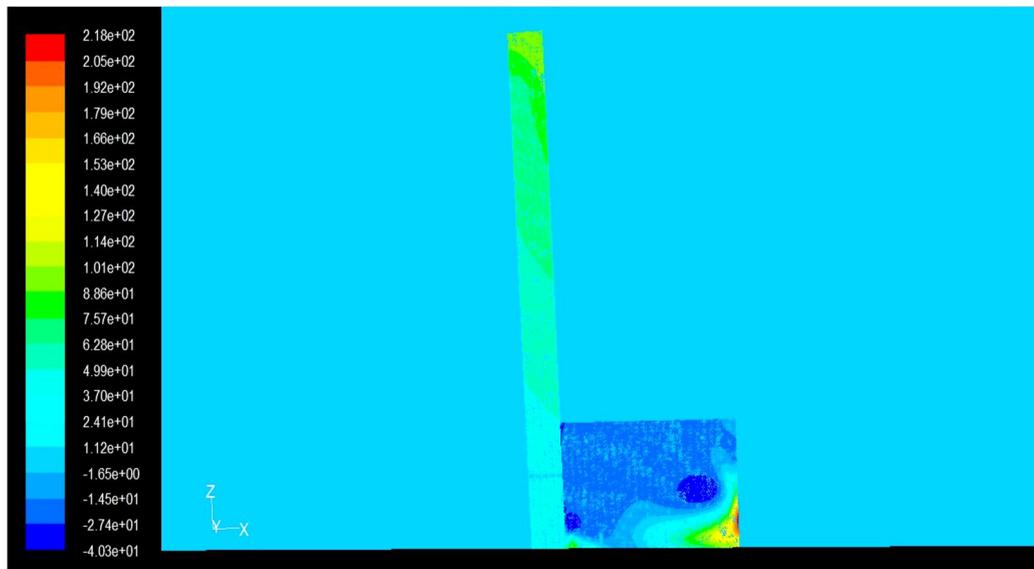
Fig.5.16. Profil de la pression dynamique (Pa) de la tour à vent, $H = 3, 9, et 12m$ ($y=56m$).



(a)

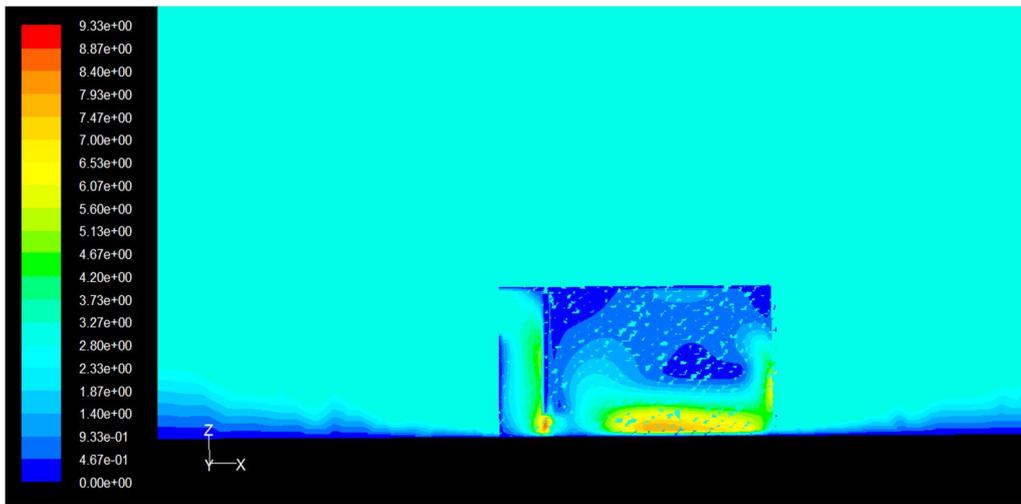


(b)

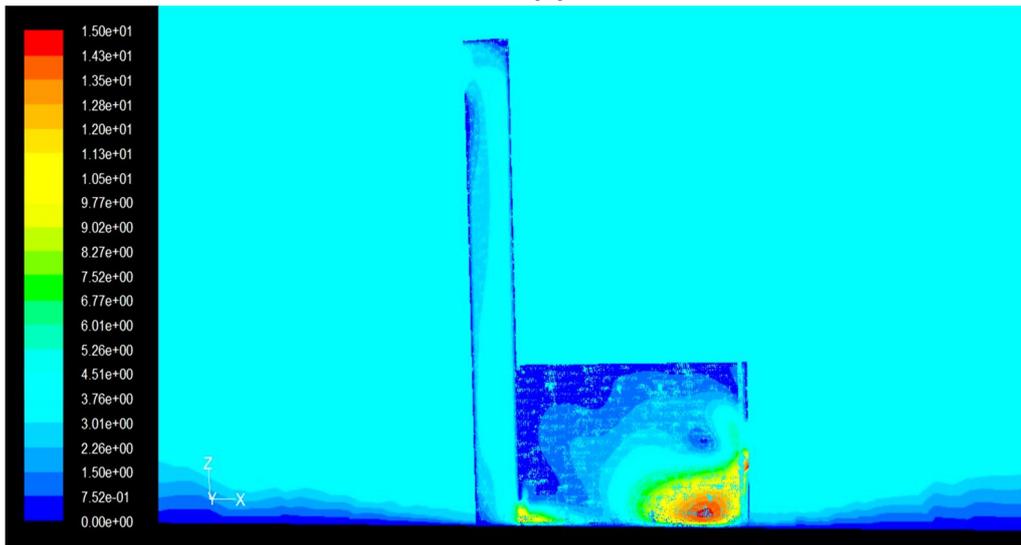


(c)

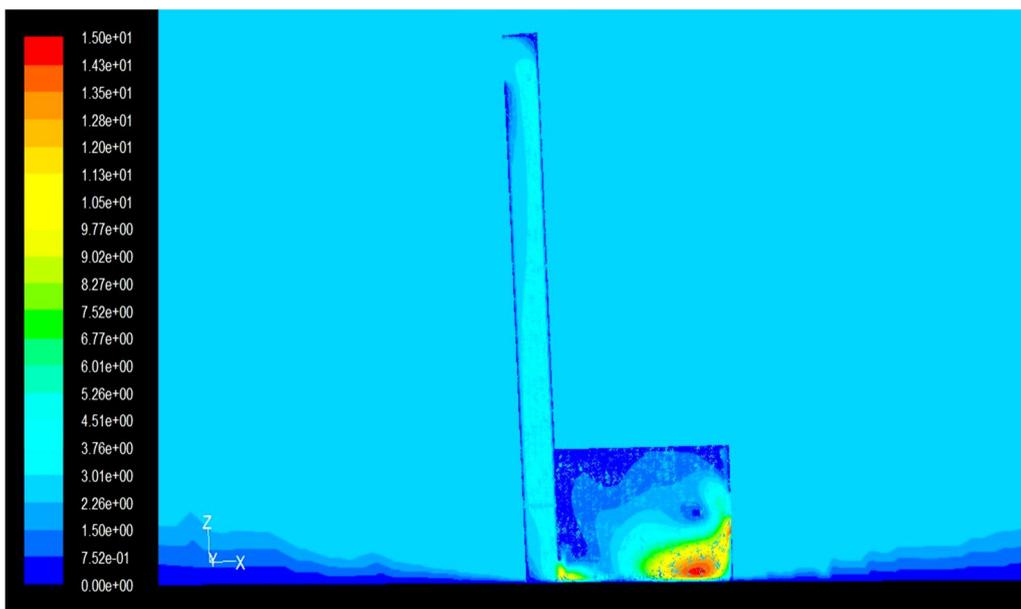
Fig.5.17. Profil de la pression totale (Pa) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12\text{m}$ ($y=56\text{m}$).



(a)



(b)



(c)

Fig.5.18. Profil de la vitesse moyenne (m/s) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).

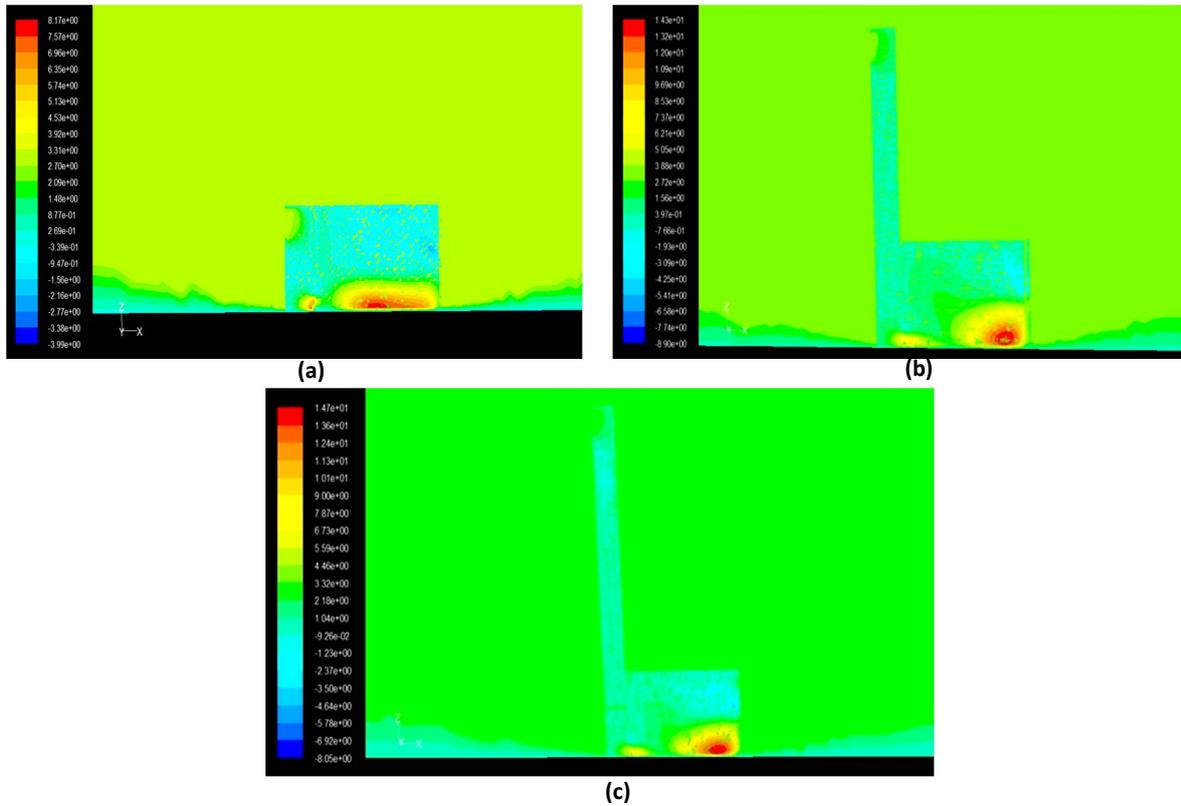


Fig. 5.19. Profil de la vitesse suivant l'axe X (m/s) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).

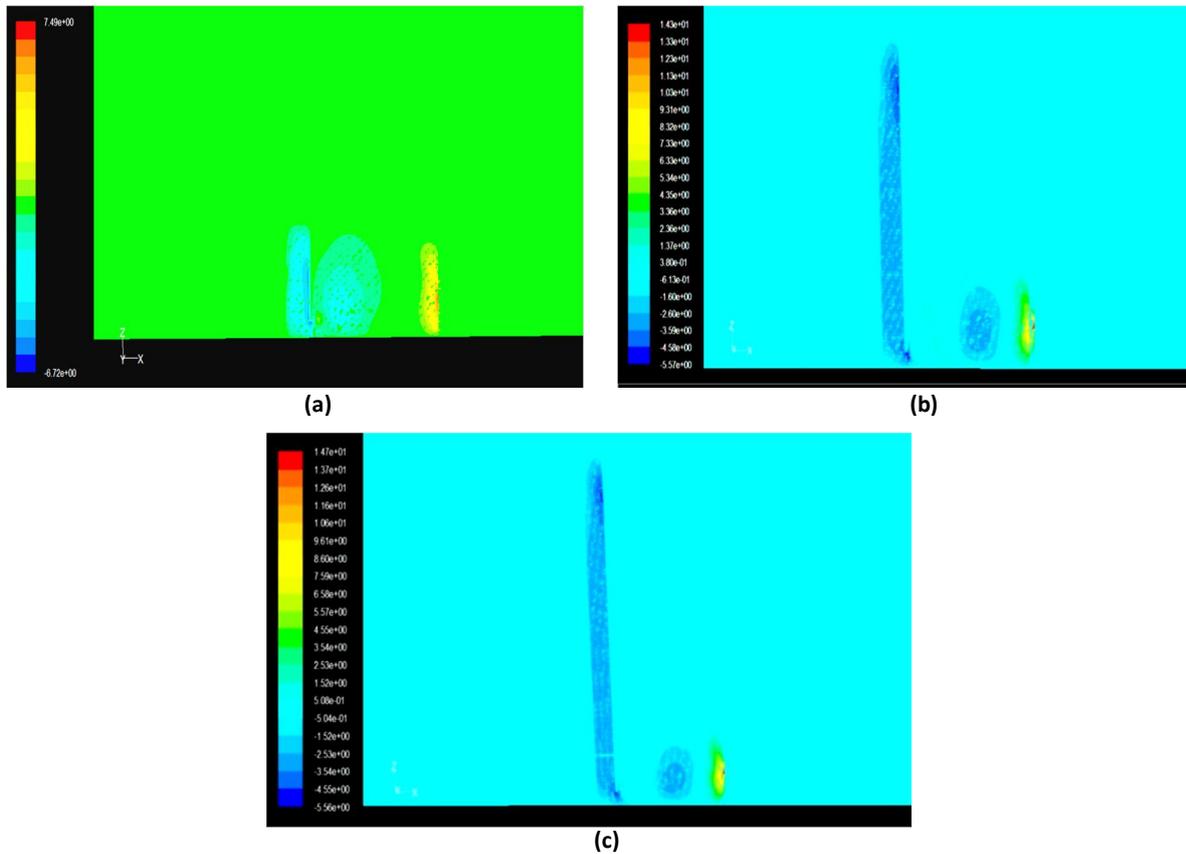
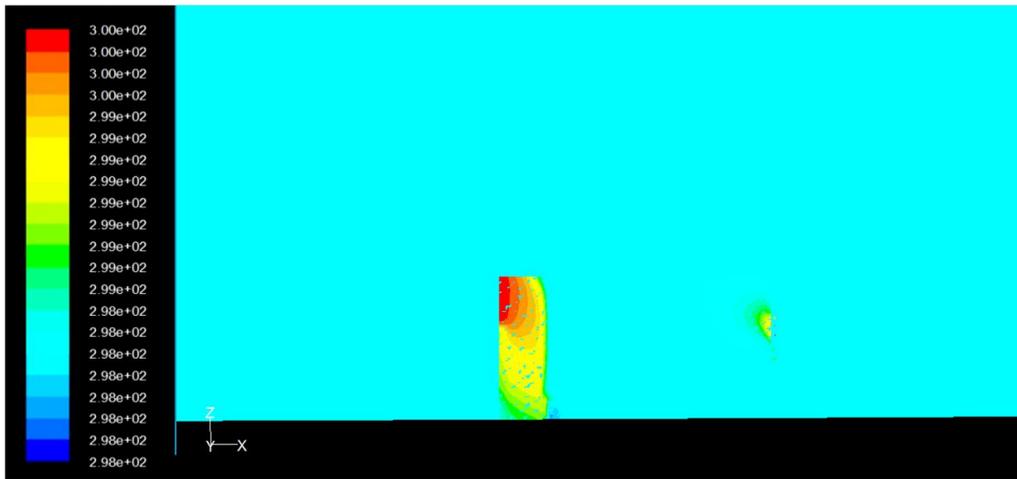
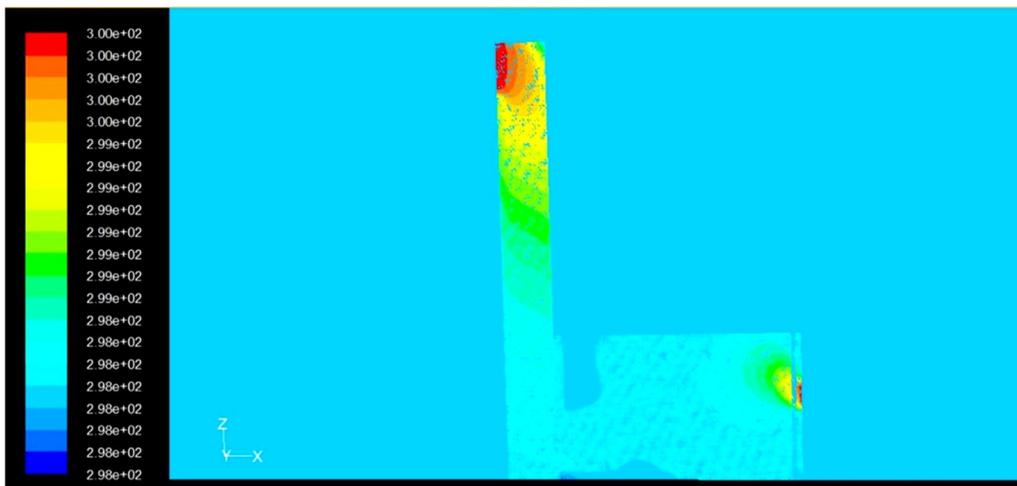


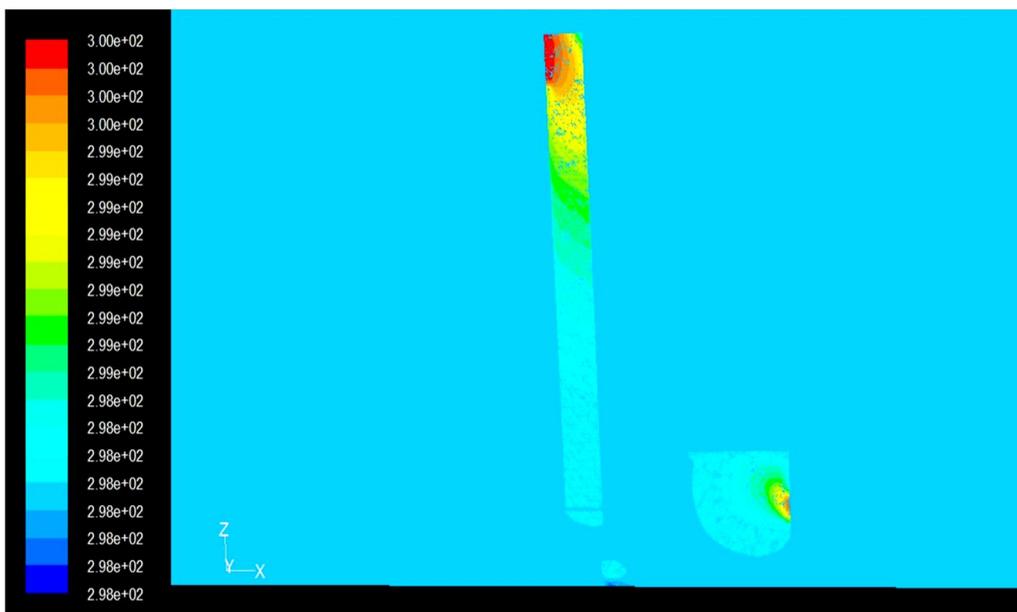
Fig.5.20. Profil de la vitesse suivant l'axe Z (m/s) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).



(a)

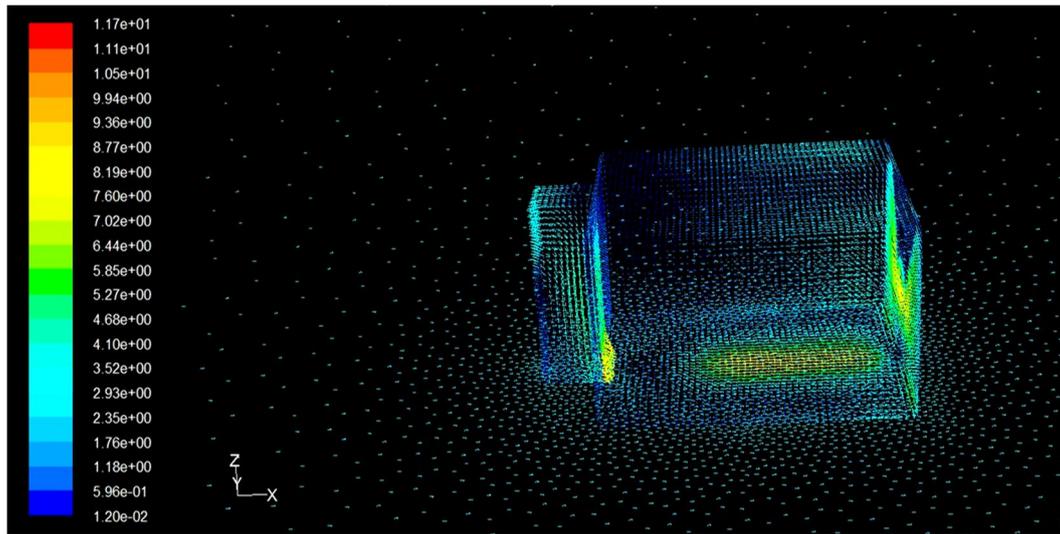


(b)

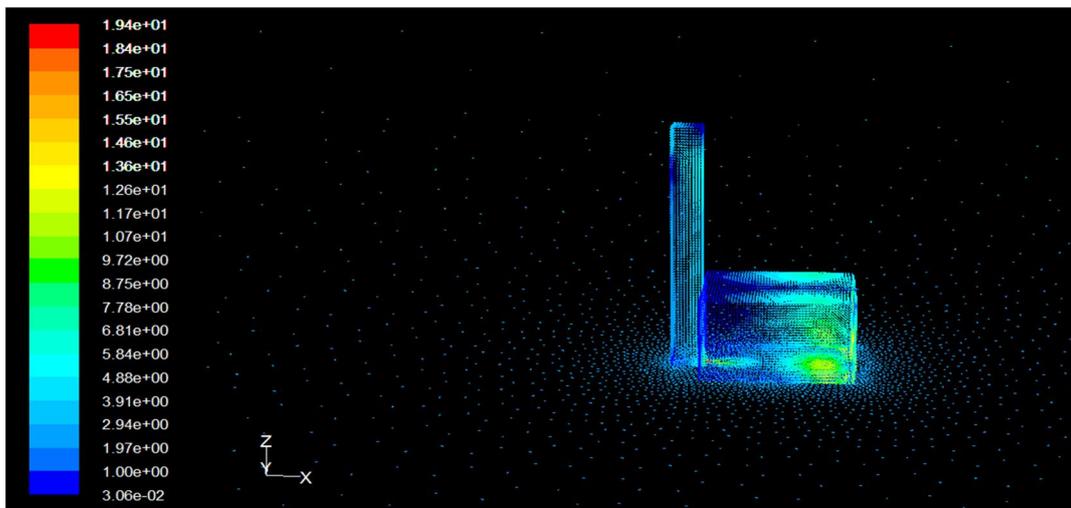


(c)

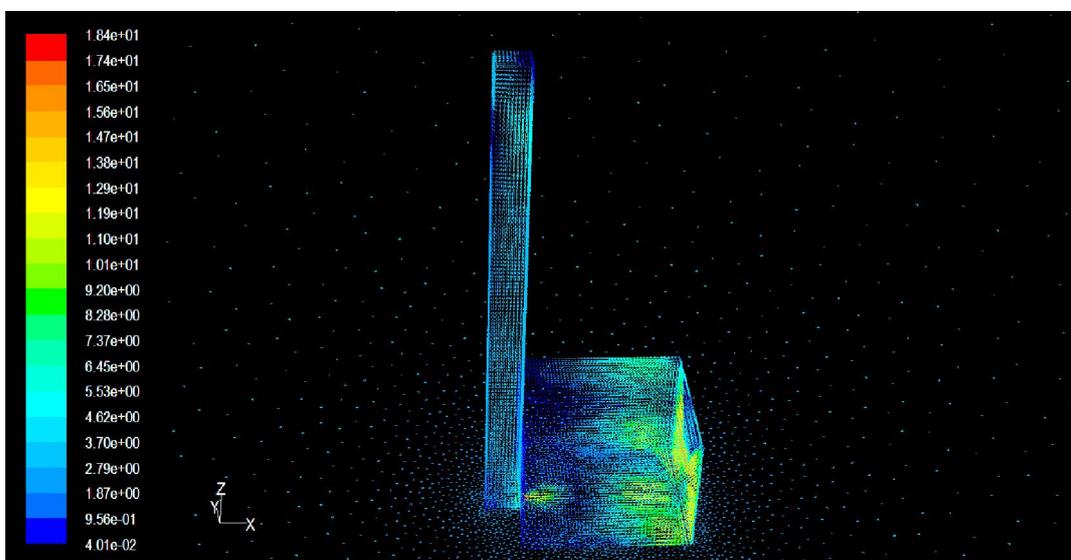
Fig.5.21. Profil de la température statique (K)de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).



(a)

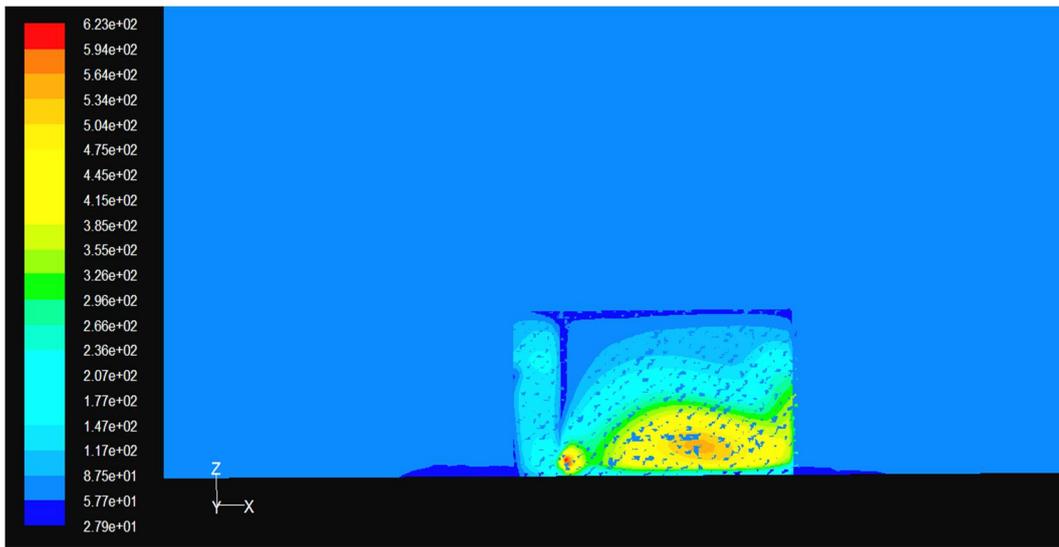


(b)

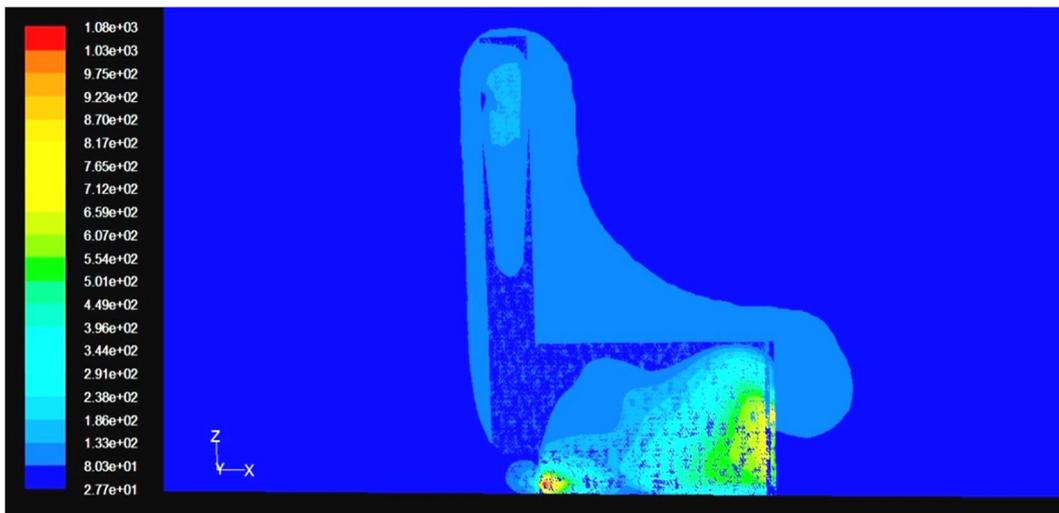


(c)

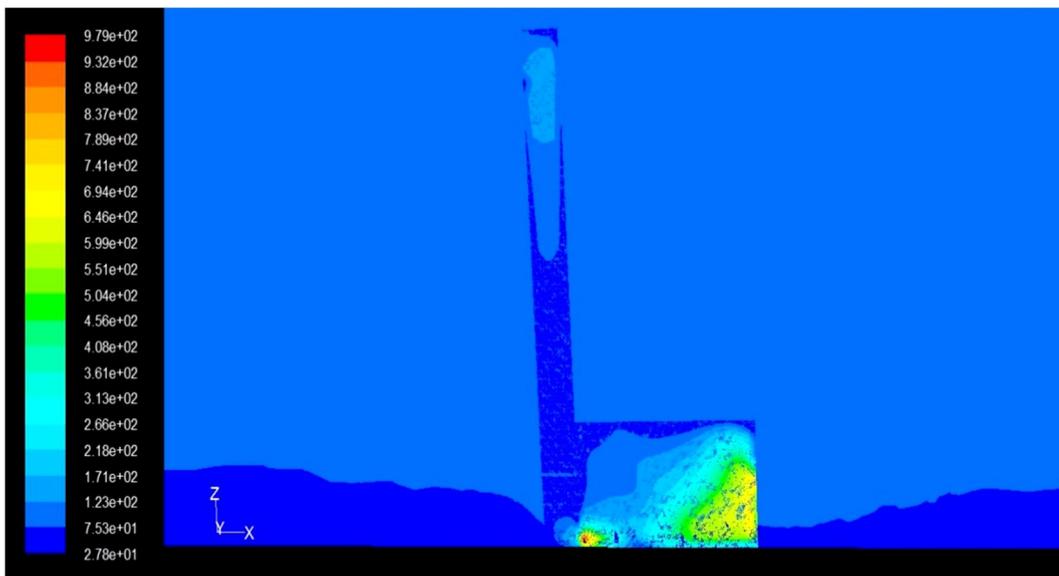
Fig.5.22. Profil des vecteurs vitesses (m/s) de la tour à vent, $H = 3, 9, \text{ et } 12m$.



(a)

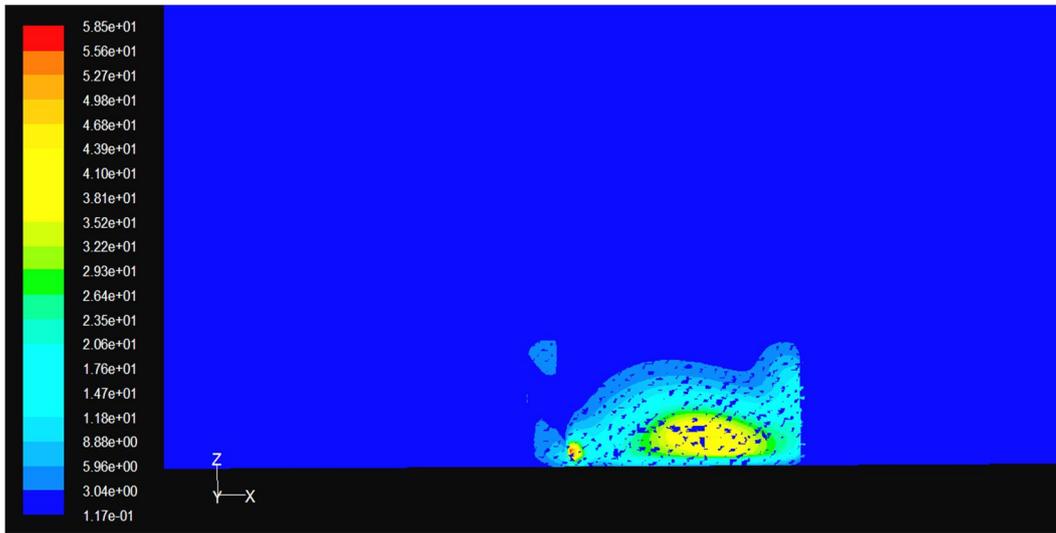


(b)

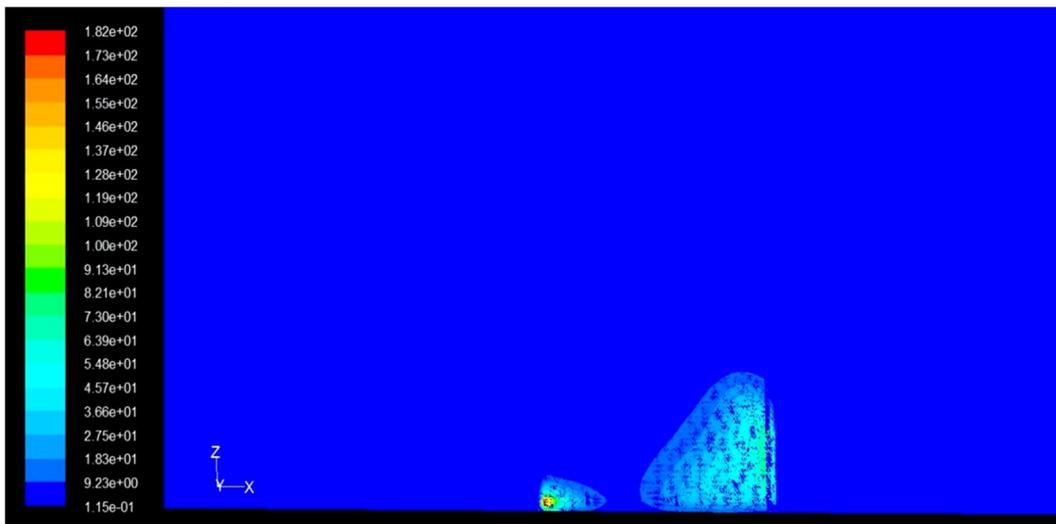


(c)

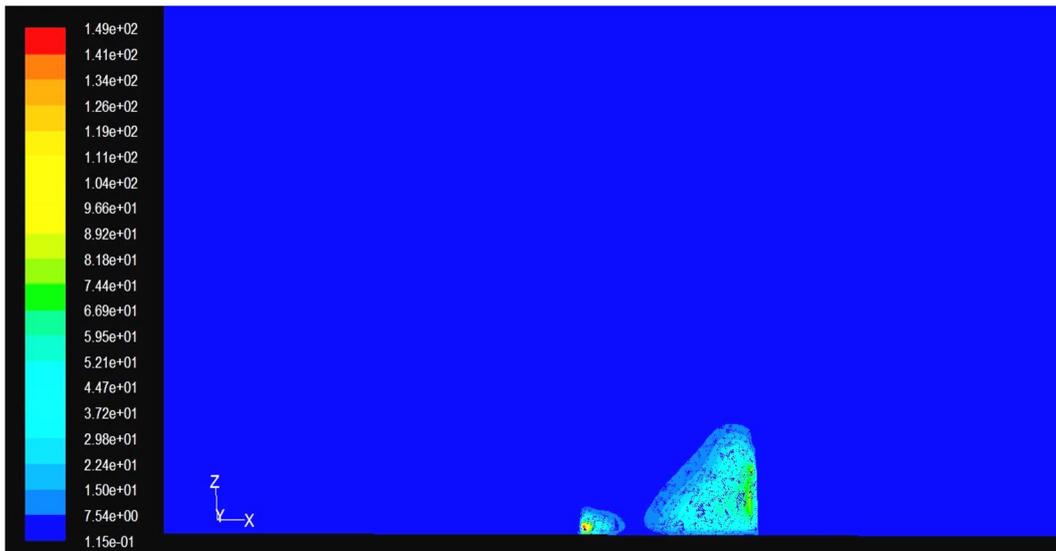
Fig.5.23. Profil de l'intensité de la turbulence (%) de la tour à vent avec $H = 3, 9, \text{ et } 12\text{m}$ ($y=56\text{m}$).



(a)



(b)



(c)

Fig.5.24. Profil de l'énergie cinétique turbulente (m^2/s^2) de la tour à vent avec $H = 3, 9, \text{ et } 12m$ ($y=56m$).

Par augmentation de la hauteur (tour à vent à 9 et 12 m), la pression statique augmente avec la hauteur (entre 90 et 100 Pa) par rapport à (64 Pa) pour la tour à 3 m. La répartition de la pression statique est plus uniforme pour les tours les plus hautes avec une valeur maximale (192 Pa) et (35 Pa) pour la tour à $H = 3$ m. La répartition de la pression statique de la tour à vent à 9 m est la plus uniforme.

Pour la pression dynamique, les deux modèles de 9 et 12 m affiche des valeurs supérieures au niveau de la sortie de la tour, la partie basse de la pièce et la fenêtre d'une valeur de (135 Pa) par rapport à (50 Pa) pour le modèle à 3m.

Les résultats de la pression totale indiquent que la tour à vent à 3 et 12 m affiche une dépression au niveau de la partie supérieur de la sortie de la tour, ce qui n'existe pas dans le modèle à 9 m.

Pour les profils de vitesse, on remarque que plus on augmente la hauteur de la tour, plus la vitesse de l'air au niveau de la sortie de la tour et dans la pièce augmente. Pour l'orifice de sortie de la tour, la vitesse est 8 m/s dans le modèle à 3 m, et plus de 10 m/s pour les autres modèles. La valeur de la vitesse à l'intérieur de la pièce vaut 14 m/s pour les modèles les plus hauts par rapport à 8 m/s pour le modèle à 3 m.

La vitesse suivant l'axe Z (v_z) est positive seulement au niveau de la fenêtre avec des valeurs supérieures pour les modèles de 9 et 12 m de hauteur par rapport au modèle de 3m de presque 2 fois.

L'intensité de la turbulence diminue au niveau de la tour et augmente dans la pièce par augmentation de la hauteur de la tour. La tour à 9 m de hauteur présente la plus grande intensité de turbulence au niveau de la sortie de la tour parmi les trois modèles. Il est important de noter que la tour à vent doit être suffisamment haute (9, 12 m) afin de prévenir la turbulence créée dans la partie haut du toit comme le cas de la tour à 3 m de hauteur [Hughes et al, 2012].

L'effet d'augmentation de la hauteur de la tour influe sur la diminution de la température intérieure de la tour à vent et sa répartition dans la pièce. Le modèle à 9 m de hauteur affiche la meilleure répartition de la température à l'intérieur de la pièce.

5.4. Étude de l'influence du changement de la géométrie sur la performance de la tour à vent

Les tours à vent traditionnelles ont été connues par leur conception simple qui utilise généralement le toit plat par rapport au toit incliné et incurvé.

Le facteur le plus important qui influe sur la capacité de ventilation de la tour à vent est le champ de pression interne induit par le vent. Les coefficients de pressions mesurées indiquent que le champ de pression induite est fortement influencé par la géométrie du toit de la tour et la direction du vent par rapport à l'ouverture de cette dernière [Dehghan et al, 2013].

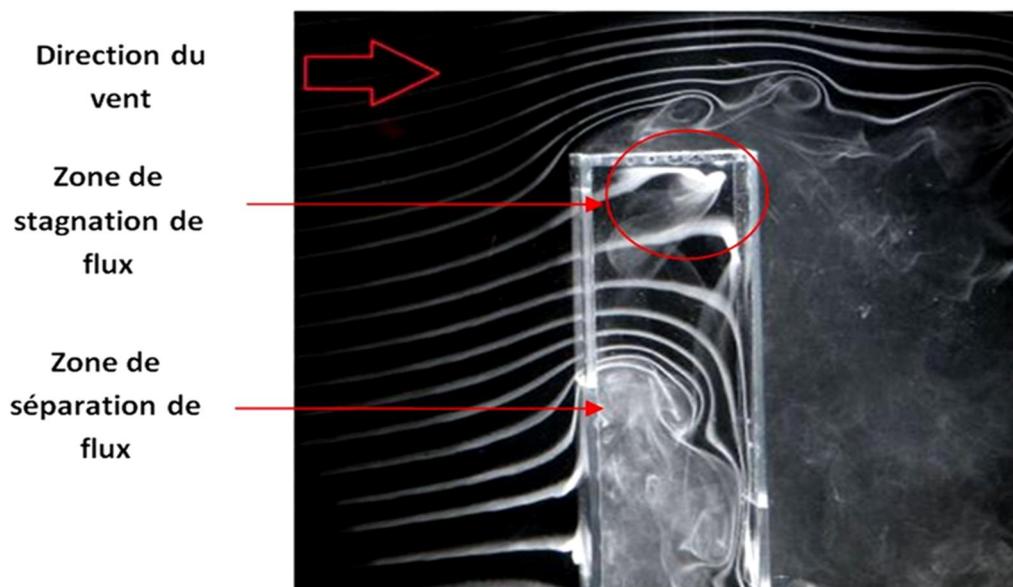


Fig.5.25. Visualisation des lignes de courant à l'intérieur et autour d'une tour à vent isolée avec toit plat [Dehghan et al, 2013].

[Kazemi et al, 2012] ont effectué des tests en soufflerie avec visualisation de fumées sur plusieurs maquettes des tours à vent unilatérales. Les modèles des tours à vent testés, avaient des toits plats, inclinés et courbés.

Les structures de l'écoulement visualisées ont montré une séparation de l'écoulement entrant à partir du bord inférieur de l'ouverture de la tour, ce qui entraîne une formation d'un grand tourbillon de recirculation dans la zone de passage et la réduction de débit d'air effectif. Ils croyaient que la réduction de l'effet de séparation de flux va augmenter la capacité de ventilation de la tour. Ils concluent que la taille de la zone de recirculation (zone

de formation des tourbillons) à l'entrée de la tour devient plus petite avec le toit incliné et courbé que celle avec le toit plat.

Les études expérimentales de [Dehghan et al, 2013] ont démontré que la tour à toit incliné est plus appropriée et moins sensible de la direction du vent extérieur par rapport au toit plat.

Type de la tour à vent	$Q_V (m^3/s)$	ΔC_p	C_d	k_p
Tour à vent à toit plat	0.0316	1.006	0.630	2.52
Tour à vent à toit incliné	0.0321	0.654	0.749	1.59

Tableau.5.2. Comparaison des coefficients de décharge, de perte moyenne d'ouverture à 0° d'angle d'incidence du vent obtenues par l'expérience de [Dehghan et al, 2013] dans la soufflerie en utilisant des modèles des tours à vent à toit plat et incliné à un échelle de 1:40.

Afin de résoudre le problème de stagnation et de séparation du flux numériquement, la partie supérieure de la tour à vent ou le toit, l'orifice d'entrée, les murs latéraux (gauche et droit) et le mur contre le vent incident compose sa majeure partie est mise en question.

Les paramètres de simulation (maillage, les conditions initiales et aux limites, etc.) sont fixés afin de comparer la performance du modèle de la tour à vent à toit plat et incliné. Le modèle de turbulence LES est utilisé. Le tableau 5.3 englobe les paramètres présent-en-compte dans l'étude numérique proposée.

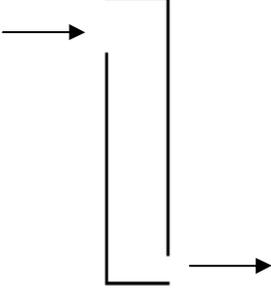
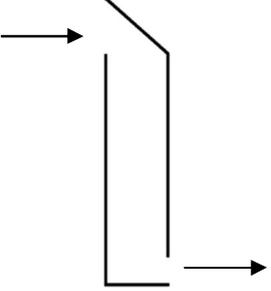
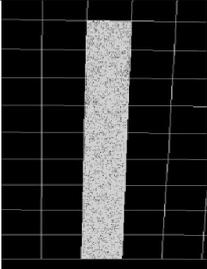
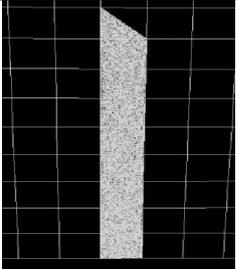
	Modèle 1	Modèle 2
Hauteur de la tour	$H = 9\text{ m}$	$H = 9\text{ m}$
Forme de la tour à vent		
Dimensions de la section transversale (ou canal de passage d'air)	$A_t = 1 \times 1\text{ m}^2$	$A_t = 1 \times 1\text{ m}^2$
Dimensions de la section d'entrée d'air $S_{entrée}$	$S_{entrée} = 1 \times 1\text{ m}^2$	$S_{entrée} = 1 \times 1\text{ m}^2$
Dimensions de la section sortie d'air S_{sortie}	$S_{sortie} = 1 \times 0.5\text{ m}^2$	$S_{sortie} = 1 \times 0.5\text{ m}^2$
Angle d'inclinaison contre le vent incident γ	$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = 45^\circ$
Vitesse de vent	$v = 3\text{ m/s}$	$v = 3\text{ m/s}$
Pression atmosphérique	$P = 1\text{ atm}$	$P = 1\text{ atm}$
Modèle de turbulence	LES	LES
Maillage du domaine d'étude		

Tableau.5.3. Paramètres de simulation de la tour à vent à toit plat et incliné.

5.4.1. Comparaison de profil de la pression

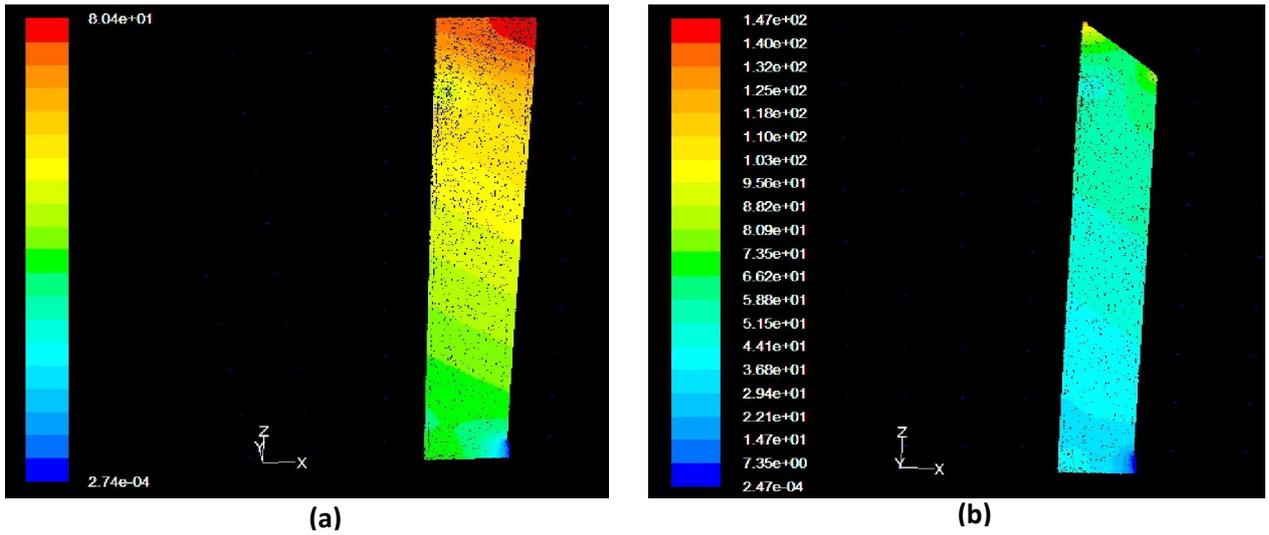


Fig.5.26. Profil de la pression statique (Pa) de la tour à toit plat et incliné ($y=56m$).

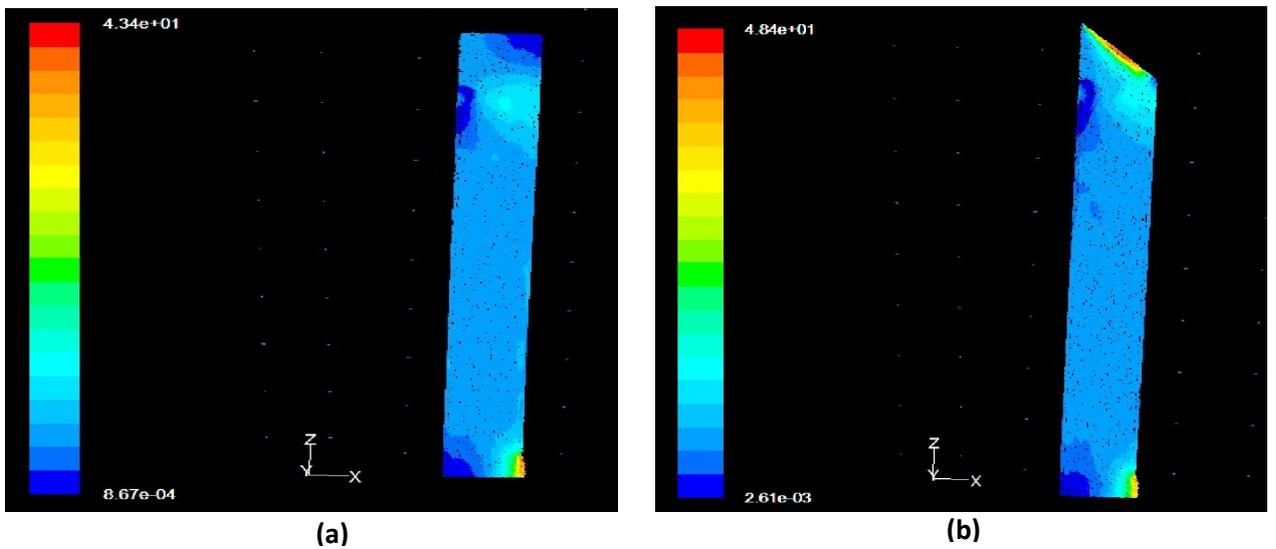


Fig.5.27. Profil de la pression dynamique (Pa) de la tour à toit plat et incliné ($y=56m$).

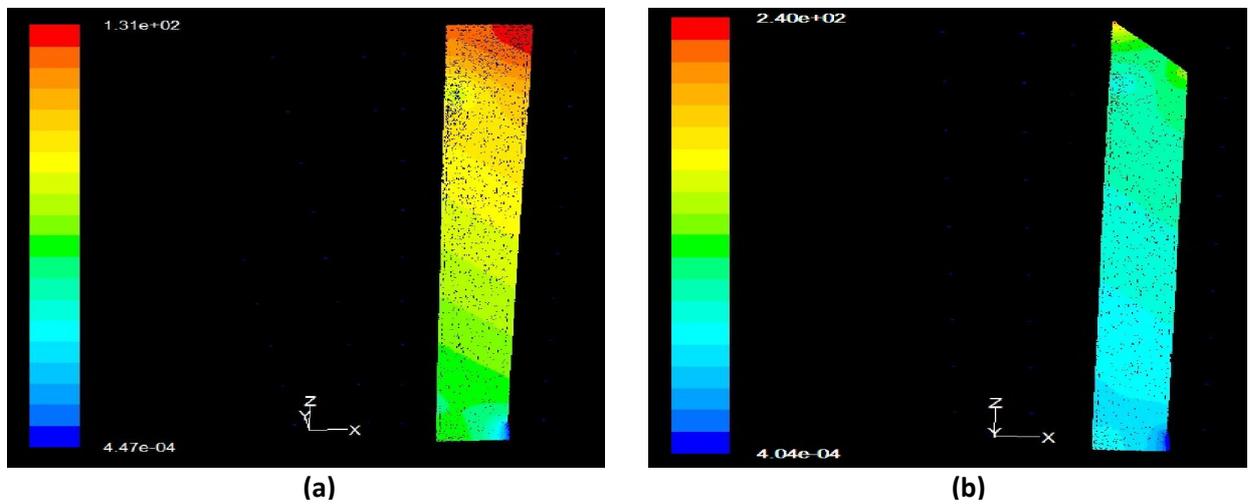


Fig.5.28. Profil de coefficient de pression de la tour à toit plat et incliné ($y=56m$).

5.4.2. Comparaison de profil de la vitesse moyenne

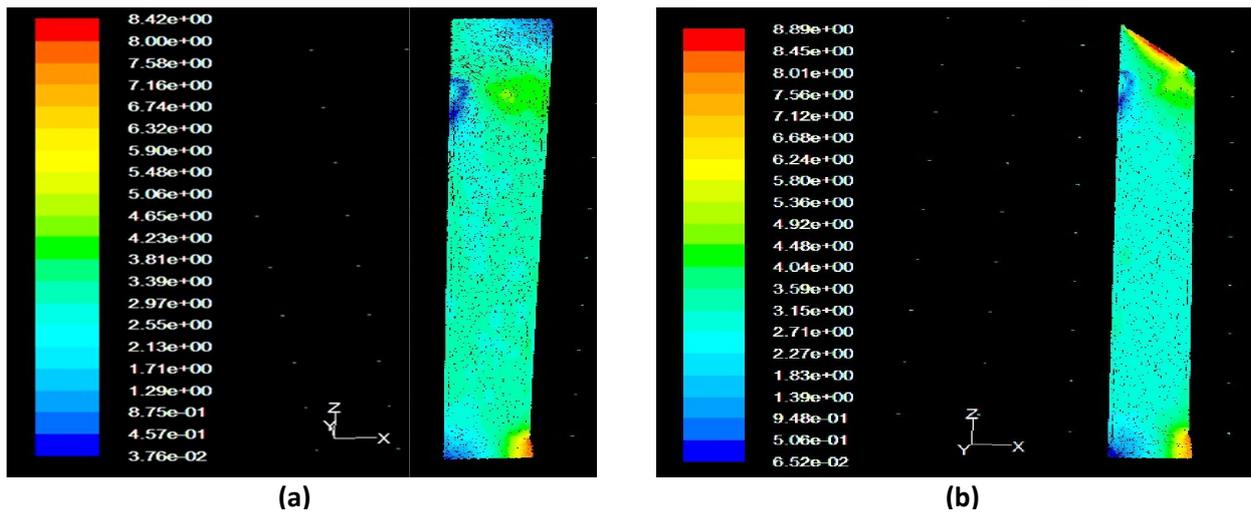


Fig.5.29. Profil de la vitesse moyenne (m/s) de la tour à toit plat et incliné (y=56m).

5.4.3. Comparaison de profil de l'intensité de la turbulence

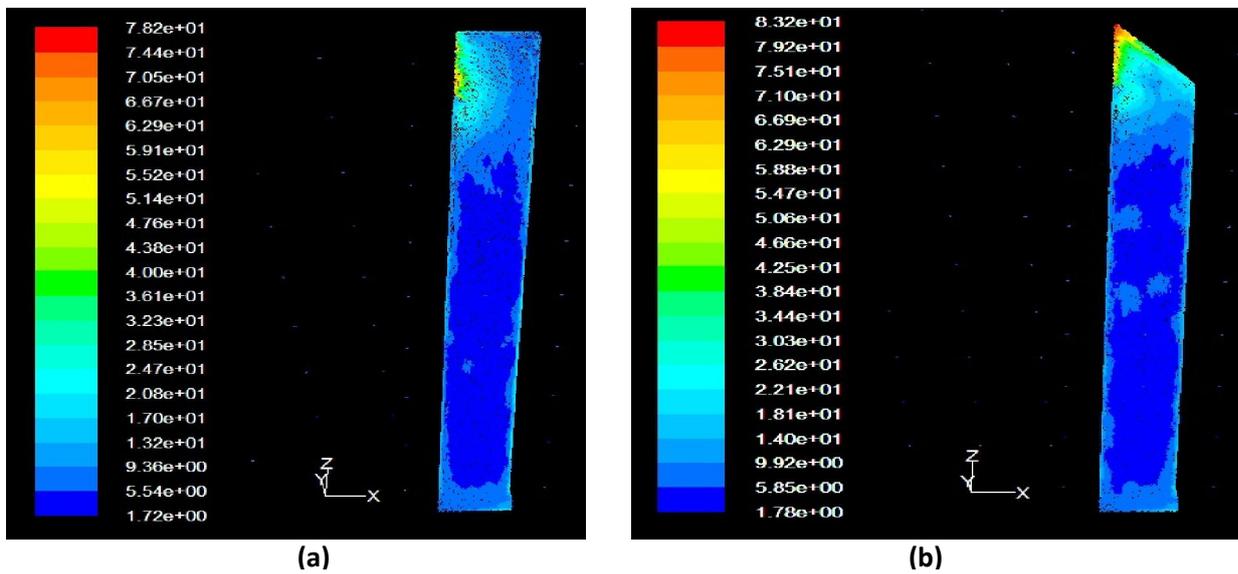


Fig.5.30. Profil de l'intensité de turbulence (%) de la tour à toit plat et incliné (y=56m)..

Sur la base des résultats de la simulation, on remarque une augmentation de la pression statique avec une répartition plus uniforme dans la tour à toit incliné par rapport au toit plat et une dépression au niveau de l'orifice de décharge d'air dans les deux modèles. La pression dynamique est supérieure sur le plan inclinée par rapport au modèle à toit plat.

Une augmentation considérable dans la vitesse de l'air incident sur le plan incliné qui vaut 8.45 m/s par rapport à 1.29 m/s du toit plat. Une zone de stagnation de flux existe dans le modèle à toit plat où la vitesse dans cette zone égale à 0.4 m/s ce qui n'existe pas dans la tour à toit incliné. L'écoulement de l'air est plus uniforme dans la tour à vent à toit incliné.

La zone de séparation de flux dans le modèle à toit incliné diminue par rapport au toit plat. La vitesse de l'air au niveau de l'orifice de sortie de la tour à toit plat vaut 7.58 m/s par rapport à 8.01 m/s du toit incliné ce qui influe sur le débit d'air induit dans la structure à ventiler. L'intensité de la turbulence dans le toit incliné est largement supérieure par rapport à la tour à toit plat.

Les résultats de l'étude numérique confirme les résultats expérimentales obtenues par **[Dehghan et al, 2013]** et **[Kazemi et al, 2012]** avec des débits de ventilation de l'ordre de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ avec le modèle de tour à vent à toit incliné par rapport à $3.79 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le modèle à toit plat. Les tours à vent à toit incliné sont plus performantes par rapport à des tours à vent à toit plat.



CONCLUSION

La ventilation naturelle est un axe principal de l'architecture bioclimatique comme elle était auparavant dans l'architecture vernaculaire et traditionnelle. La tour à vent est une technique parmi plusieurs techniques qui vise à assurer une ventilation naturelle sans aucune consommation d'énergie ; ce qui assure la passivité du système et une efficacité énergétique importante.

Le présent travail vise à prouver l'efficacité d'une telle technique dans l'amélioration du confort thermique dans les zones arides ventées comme la ville de Bechar.

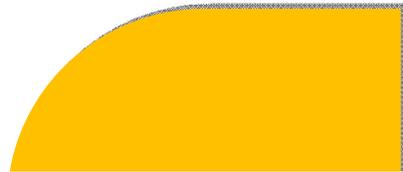
Les résultats ont montré qu'un système de ventilation qui utilise une tour à vent de 9 m de hauteur est capable de fournir plus de 30 % de débit de ventilation par rapport à la ventilation transversale qui la plus utilisée parmi les mécanismes de ventilation naturelle et contribue aussi à la réduction de la température à l'intérieur de la structure de presque de 2 °C seulement par le passage de l'air par la tour. La répartition de la pression à l'intérieur de la structure à ventiler avec la tour à vent est plus uniforme.

Les tours à vent peuvent avoir différentes hauteurs selon la région ou le fonctionnement. Une comparaison entre des tours à vent avec différents hauteurs qui varient de 3, 6, 9 et 12 m, montre que la tour à vent avec 9 m de hauteur est plus appropriée aux conditions climatiques de la ville de Bechar.

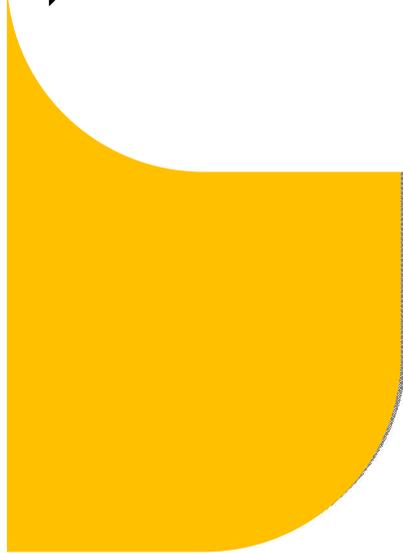
La dernière partie de l'étude était consacrée à l'amélioration de la performance de la tour à vent par la résolution de deux problèmes fréquents qui agissent dans cette technique : le problème de stagnation de flux et le problème de séparation et recirculation de flux. La comparaison était faite sur deux modèles de tour à vent, le premier est à toit plat et l'autre est à toit incliné. Les résultats ont montré que la tour à toit incliné contribue **grandement** à résoudre le problème de stagnation de flux et à réduire la zone de séparation de flux par rapport à la tour à toit plat. L'utilisation du toit incliné contribue aussi dans l'augmentation de la vitesse à la sortie de la tour et par conséquent l'augmentation de débit de ventilation.

L'intensité de la turbulence était plus grande (plus de 80 %) dans la tour à toit incliné par rapport à la tour à toit plat (55 %), contribuant à l'augmentation de l'air introduit dans la structure à ventiler [Straw, 2000].

Comme perspective, nous envisageons d'étudier la tour à vent avec système d'humidification et la combinaison de la tour à vent avec d'autres systèmes de ventilation comme la cheminée solaire et les puits canadiens.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES



[Allard, 1998]

Allard F ; Natural ventilation in buildings : a design handbook ; European Commission. Directorate General for Energy Altener Program ; 1998.

[Asfour et Gadi, 2011]

Omar. S. Asfour, Mmohamed. B. Gadi ; Effect of integrating wind catchers with curved roofs on natural ventilation performance in buildings ; School of the built environment ; University of Nottingham, Nottingham, UK. 2011.

[Asfour et Gadi, 2006]

Asfour O, Gadi .M ; The operation and function of a ventilation device such can vary depending on the time of the day ; Architect Eng Des Manage ; 2006;2:289–304.

[A'zami, 2005]

A'zami A. Badgir in traditional Iranian architecture ; International conference for the built environment ; Greece; 2005.

[Bahadori, 1994]

Bahadori .M ; Viability of wind towers in achieving summer comfort in the hot arid regions of the Middle East ; Renewable Energy ; 1994 ; 5:879–92.

[Bansal et al, 1994]

N. K. Bansal, Rajesh Mathur, M.S. Bhandari ; A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings ; Centre of energy studies, Indian institute of technology, India ; Building and environment. Vol 29. No. 4. pp. 495- 500. 1994.

[Bansal et al, 1993]

N. K. Bansal, Rajesh Mathur, M. S. Bhandari ; Solar Chimney for Enhanced Stack Ventilation. Building and environment. Vol. 28. No. 3. Pp. 373-377. 1993. Pergamon Press Ltd. Great Britain.

[Beazley et al, 1982]

Elisabeth Beazley, Michael Harverson, Susan Roaf ; Living with the desert Working buildings of the Iranian plateau. ARIS & PHILLIPS LTD, Teddington House, Warminster, Wilts, England. 1982.

[Belgaid]

Les zones climatiques de l'Algérie, compilé par B.Belgaid, département d'architecture de Batna. Université de Batna.

[Benoudjafer, 2010]

Benoudjafer Ibtissame ; Amélioration du confort thermique (des ambiances intérieures) du bâtiment dans le contexte Saharien : Cas de la ville de Bechar. Mémoire magistère. 2009-2010.

[Bouchahm et al, 2011]

Bouchahm Y, Bourbia F, Belhamri A ; Performance analysis and improvement of the use of wind tower in hot dry climate ; Renewable Energy ; 2011 ; 36:898–906.

[Chadel et Abdelmalek, 2010]

Chadel. F, Abdelmalek. A .E ; Étude et analyse du logiciel thermexcel (étude de cas) ; PFE Université de Bechar ; 2010.

[Chellali et al, 2011]

Farouk Chellali, Adballah Khellaf, Adel Belouchrani, Abdelmadjid Recioud ; A contribution in the actualization of wind map of Algeria ; Renewable and Sustainable Energy Reviews ; 15 (2011) 993–1002.

[Cochran et Derickson, 2011]

Leighton Cochran, Russ Derickson ; A physical modeler's view of Computational Wind Engineering ; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 99 (2011) 139–153.

[Dehghan et al, 2013]

A. A. Dehghan, M. Kazemi Esfeh, M. Dehghan Manshadi ; Natural ventilation characteristics of one sided wind catchers : experimental and analutical evaluation ; School of civil engineering, Yazd ; University Yazd, Iran. Energy and building 61 (2013) 366-377.

[Elizalde et Mumovic, 2008]

Elizalde T, Mumovic D ; Simulated performance of windcatchers in an urban environment ; Conference on passive and low energy architecture ; Dublin ; 2008.

[Elmualim, 2006]

Elmualim A ; Dynamic modeling of a wind catcher/tower turret for natural ventilation. Build Services Eng Res Technol 2006;27:165–82.

[Elmualim et Awbi, 2002]

Elmualim AA, Awbi HB ; Wind tunnel and CFD investigation of the performance of “wind catcher” ventilation systems ; International Journal Ventilation 2002; 1:53–64.

[El-Shorbagy, 2010]

Dr. Abdel-moniem El-Shorbagy ; Design with nature : Wind catcher as a paradigm of natural ventilation device in buildings. Architecture Department, College of Engineering Effat University, Saudi Arabia. International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS Vol : 10 No: 03 ; June 2010.

[Elzaidabi, 2008]

Abdalla. A. M. Elzaidabi ; Low Energy, Wind Catcher Assisted Indirect - Evaporative Cooling System for Building Applications ; Thèse de doctorat ; Université de Nottingham ; Angleterre ; 2008.

[Eymard et al, 2006]

Robert Eymard, Thierry Gallou, Rapha`ele Herbin ; Finite Volume Methods. This manuscript is an update of the preprint n0 97-19 du LATP, UMR 6632, Marseille. France; October 2006.

[Fathy, 1986]

Hassan Fathy ; Natural energy and vernacular architecture : principals and examples with references to hot arid climate ; Chicago. USA ; 1986.

[Foucault, 2009]

Alain Foucault ; Climatologie et Paléoclimatologie ; Dunod, 2009, Paris. France.

[Franke et al.]

J. Franke, C. Hirsch, A. G. Jensen, H.W Krus ; Recommendation on the use of CFD in wind engineering ; Departement of fluid and Thermodynamics ; University of Siegen, Siegen, Germany.

[Gage et Graham, 2000]

Gage SA, Graham JM; Static split duct roof ventilators ; Build Res Informat 2000;4:234–44.

[Ghadiri et al, 2012]

M. Hossein Ghadiri, Mohd Farid Mohamed, N. Lukman N. Ibrahim ; CFD analysis of natural ventilation behavior in four sided wind catcher ; World academy of science, engineering and technology 72 2012.

[Ghadiri et al.]

M. Hossein Ghadiri, N. Lukman, N. Ibrahim, R. Aayani ; The Effect of Wind catcher Geometry on the Indoor Thermal Behavior. Department of Architecture, University Kebangsaan Malaysia (UKM). Department of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

[HElimax, 2004]

HElimax, "Étude stratégique de déploiement de l'énergie éolienne en Afrique", Rapport final, Canada ; Mars 2004.

[Hughes et Ghani, 2010]

Hughes BR, Ghani AS ; A numerical investigation into the effect of Wind vent louvre external angle. Build Environ 2010; 45 : 1025–36.

[Hughes et al, 2011]

Ben Richard Hughes, Hassam Nasarullah Chaudhry, Saud Abdul Ghani ; A review of sustainable cooling technologies in buildings ; Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 3112– 3120.

[Hughes et Cheuk-Ming, 2011]

Hughes BR, Cheuk-Ming M ; A study of wind and buoyancy driven flows through commercial wind towers ; Build Environ 2011 ; 43 : 1784–91.

[Hughes et al, 2012]

Hughes B. R, Calautit .J.K, Saud A.G; The development of commercial wind towers for natural ventilation: A review; Applied Energy 92 (2012) 606–627.

[Hosseinnia et al, 2013]

S. Mojtaba Hosseinnia, Hamid Saffari, M. Ali Abdous ; Effects of different internal designs of traditional wind towers on their thermal behavior ; School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran 16844, Iran ; Energy and Buildings 62 (2013) 51–58.

[Houerou et al, 1977]

H. N. LE HOUEIROU, J. CLAUDIN, M. POUGET ; ETUDE BIOCLIMATIQUE DES STEPPEES ALGERIENNES (Avec une carte bioclimatique à 1/1.000.000ème) ; 1977.

[Imessad, 2014]

Dr. IMESSAD Khaled ; Centre de Développement des énergies renouvelables **CDER**. Février 2014.

[Jones et Kirby, 2009]

Jones .B, Kirby .R; Quantifying the performance of a top–down natural ventilation Windcatcher ; Build Environ 2009; 44 : 1925–34.

[Kaiser et al, 2013]

John Kaiser Calautit, Ben Richard Hughes, Hassan Nasarullah Chaudhry, Saud Abdul Ghani ; CFD analysis of a heat transfert device integrated wind tower system for hot and dry climate . School of civil engineering, University of Leeds, LS2 9JT, UK ; Applied energy 112 (2013) 576-591.

[Kalantar, 2009]

Vali Kalantar ; Numerical simulation of cooling performance of wind tower (Baud-Geer) in hot and arid region ; Mechanical departement of Yazd University, Yazd, Iran ; Renewable energy 34 (2009) 246-254.

[Karakatsanis et al, 1986]

Karakatsanis .C, Bahadori .M.N., Vickery .B.J ; Evaluation of pressure coefficient and estimation of air flow rates in buildings employing wind tower ; Solar energy. Boundary layer wind tunnel laboratory, the University of Western Ontario, London, Ontario, CANADA. Vol. 37, No. 5, pp 363-374 (1986) ; Pergamon journal Ltd.

[KASBADJI, 2006]

Kasbadji Merzouk N ; Evaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie ; Thèse doctorat, Université Abou bekr Belkaid ; Tlemcen; 2006.

[Kazemi et al, 2012]

M. Kazemi Esfeh, A.A. Dehghan, M. Dehghan Manshadi, S. Mohagheghian ; Visualized flow structure around and inside of one-sided wind-catchers ; Journal of Energy and Buildings 55 (2012) 545–552.

[Kleiven, 2003]

Kleiven .T ; Natural ventilation in buildings: architectural concepts, consequences and possibilities ; Norwegian University of Science and Technology ; 2003.

[Mahnaz et Shemirani, 2009]

Mahnaz M, Shemirani M ; Analysis on typology and architecture of wind catcher and finding the best type, vol. 33 ; University of Tehran Electronic Journals Database p. 27–36; 2009.

[Maleki, 2011]

B. Ahmadkhani Maleki ; WIND CATCHER: PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING SYSTEM IN IRANIAN VERNACULAR ARCHITECTURE ; International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE). September 2011 Issue 8 Volume 3 Number 3 Pages 130-137 ; Seraj Higher Education Institute, Tabriz, Iran.

[McCarthy, 1999]

McCarthy Battle ; Consulting engineers. Wind towers: detail in building ; London: Academy Press; 1999.

[Mokhtari, 2009]

Mokhtari ; Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar ; 2009.

[Montazeri et Azizian, 2011]

Montazeri H, Azizian R ; Experimental and numerical study on natural ventilation performance of various multi-opening wind catchers ; Build Environ 2011; 46 : 370–8.

[Montazeri et al, 2010]

Montazeri H, Montazeri F, Azizian R, Mostafavi S ; Two-sided wind catcher performance evaluation using experimental, numerical and analytical modeling ; Renew Energy 2010 ; 35:1424–35.

[Montazeri et Azizian, 2008]

Montazeri. H. Azizian. R ; Experimental study on natural ventilation performance of one-sided wind catcher ; Departement of mechanical engineering, Yazd university, Yazd, Iran. Building and environment 43(2008) 2193-2202.

[Morsli et Bendehina, 2013]

S.Morsli , A. Sabeur-Bendehina ; Investigation numérique de la combustion turbulente du mélange Propane-Air dans un brûleur ; 21^{ème} Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, 26 au 30 août 2013 ; Laboratoire d'Énergie et Propulsion Navale, Faculté de Génie Mécanique, USTO Oran, Algérie.

[Omidreza et al, 2012]

Omidreza S. Hawk L C. K Sopian M. Y. Sulaiman ; Review of wind catcher technologies ; Renewable and sustainable Energy Reviews 16 (2012) 1477-1495.

[ONM / www.météo.dz]

ONM : Office national de la météorologie www.météo.dz

[PEI-CHUN LIU, 2012]

PEI-CHUN LIU; A modelling study of segmentation of naturally ventilated tall office buildings in a hot and humid climate. Thèse de doctorat ; Université de Nottingham ; Angleterre 2012.

[Petersen, 2002]

Andrew Petersen ; DICTIONARY OF ISLAMIC ARCHITECTURE ; Taylor & Francis e-Library London, 2002.

[R. Benziada, 2006]

R. Benziada ; Étude du Conditionnement Climatique des Locaux dans le Contexte Saharien ; Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Béchar ; 144 p ; 2006.

[René vottone, 1998]

René vottone ; Batir : Manuelle de construction ; Press polytechnique et universitaires romandes de l'école polytechnique fédérale de Lausanne ; 1998.

[R. Fauconnier, 1992]

R. Fauconnier ; "Revue Chauffage Ventilation Conditionnement" ; n° 10/1992.

[Revuz, 2011]

Julia Revuz ; Numerical simulation of the wind flow around a tall building and its dynamic response to wind excitation ; Thèse de doctrat. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering ; University of Nottingham, Angleterre, Avril 2011.

[Roaf, 2008]

Roaf .S ; The traditional technology trap: more lessons from the windcatchers of yazd ; In Conference on passive and low energy architecture ; Dublin ; 2008.

[Saffari et Hosseinnia, 2009]

Hamid Saffari, S.M. Hosseinnia ; Two-phase Euler-Langrange CFD simulation of evaporative cooling in a wind Tower ; Energy and Buildings 41 (2009) 991-1000.

[Sartipipour, 2012]

Mohsen Sartipipour ; Rural Housing in Iran: Past, Present, and Future ; Architecture Research 2(1) ; Department of Architecture, School of Architecture & Urbanism, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, 1983963113, I.R.IRAN ; 2012.

[SEHLI, 2012]

Abedelkarim SEHLI ; Optimisation d'un échangeur air-sol pour la ventilation d'un bâtiment ; Mémoire de magister ; Université de Bechar ; 2012.

[Sellier, 2012]

Dominique Sellier ; Guides Bio-tech. Ventilation naturelle et mécanique ; ARENE Île-de-France. Février 2012.

[Steven et al, 2001]

Steven J. Emmerich W. Stuart Dols James W. Axley ; Natural Ventilation Review and Plan for Design and Analysis Tools ; National Institute of Standards and Technology. August 2001.

[Straw, 2000]

Matthew Peter Straw ; Computation and Measurement of Wind Induced Ventilation ; Thèse de doctorat ; Université de Nottingham ; Angleterre ; Mars 2000.

[Suleiman et Himmo, 2012]

S. Suleiman, B. Himmo ; Direct confort ventilation. Wisdom of the past and technology of the future (wind catcher) ; Architectural engineering department, University of Jordan, Amman 11942, Jordan ; Sustainable cities and society 5 (2012) 8-15.

[Thad Godish, 2004]

Thad Godish ; Air Quality 4th Edition. LEWIS PUBLISHERS. ISBN 0-203-49265-X Master e-book ; by CRC Press LLC ; 2004.

[Tong Yang et al, 2012]

TONG YANG, DEREK J, CLEMENTS CROOME; Natural Ventilation in Built Environment; Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University, Leicestershire, UK. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, 2012, DOI 10.1007/978-1 - 419 - 0851-3.

[Tong Yang, 2004]

Tong Yang ; CFD et essais sur le terrain d'un immeuble de la pleine échelle à ventilation naturelle ; Thèse de doctorat ; Université de Nottingham Angleterre ; Mai 2004

[Versteeg et Malalasekera, 1995]

H. K. Versteeg. W. Malalasekera ; An introduction to computational fluid dynamics CFD: the finite volume method ; Longman Scientific and Technical. London 1995.

[Victor CANDAS]

Victor CANDAS ; Comfort thermique ; Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique BE 9 085-1.

[Zaimeche et Sutton, 2007]

Salah E. Zaimeche & Keith Sutton ; The future of the environment in Algeria, Morocco and Tunisia ; The Journal of North African Studies ; Lectures in geography, Manchester University
Published online: 29 Mar 2007.

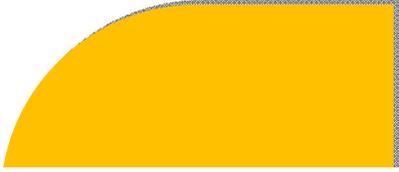
Sites internet :

<http://www.eole-fr.com>

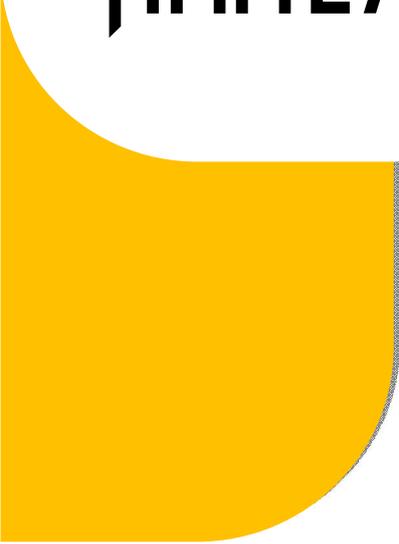
<http://www.knoji.com>

<http://www.monodraught.com>

<http://www.aiv.asso.fr/index.html>



ANNEXES



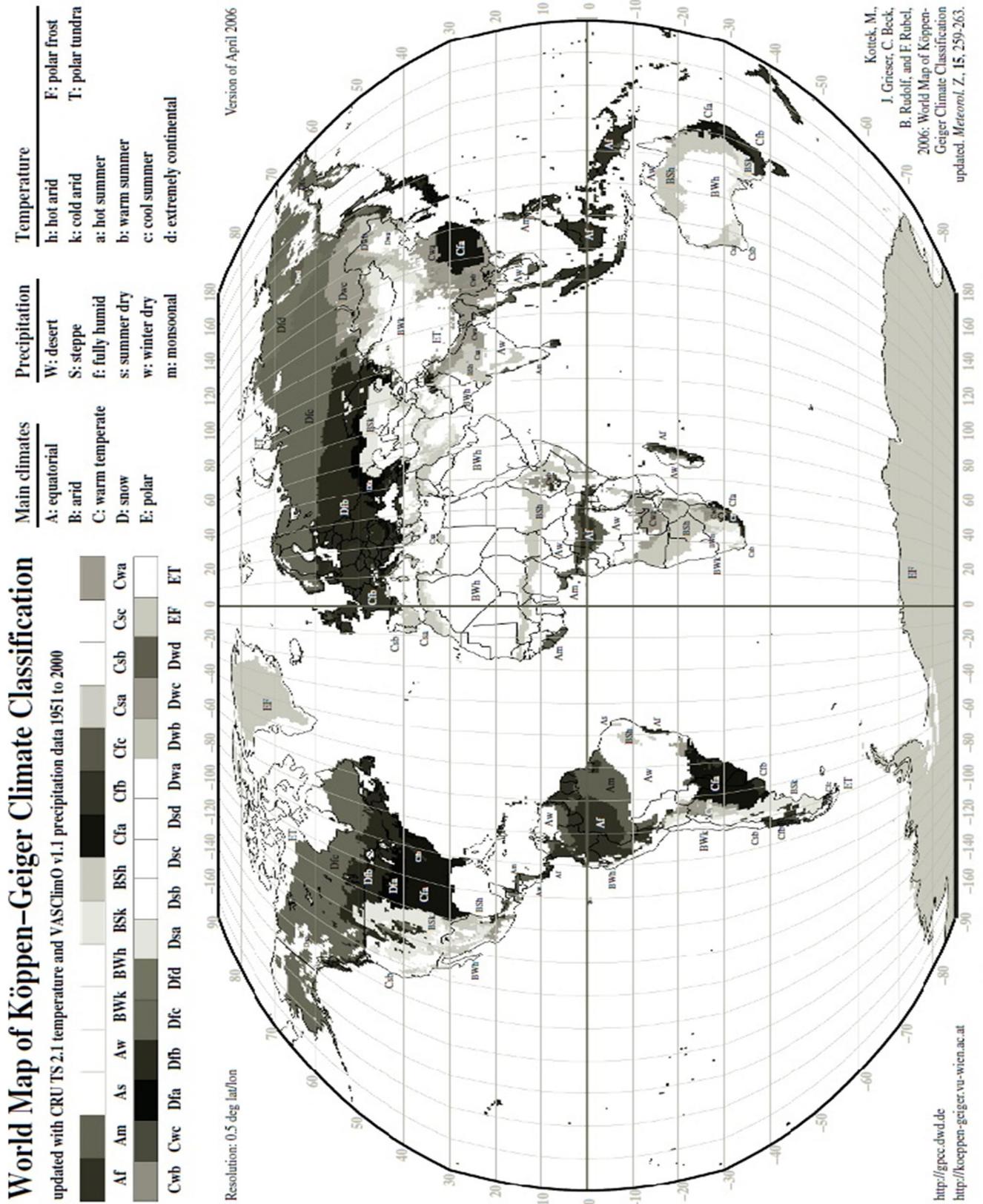


Fig. A1. Carte mondiale des climats selon la classification de Köppen-Geiger [Foucault, 2009].

Types de climat	Sous-types de climat	Caractéristiques (voir légende associé)
A : climats équatoriaux ($T_{\min} \geq +18\text{ °C}$)	Af : forêt humide équatoriale	$P_{\min} \geq 60\text{ mm}$
	Am : mousson équatoriale	$P_{\text{ann}} \geq 25(100 P_{\min})$
	As : savane équatoriale à été sec	$P_{\min} < 60\text{ mm}$ en été
	Aw : savane équatoriale à été humide	$P_{\min} > 60\text{ mm}$ en été
B : climats arides $P_{\text{ann}} < 10 P_{\text{th}}$	BS : climat de steppe	$P_{\text{ann}} > 5 P_{\text{th}}$
	BW : climat de désert	$P_{\text{ann}} \leq 5 P_{\text{th}}$
C : climats tempérés $-3\text{ °C} < T_{\min} < +18\text{ °C}$	Cs : climats tempérés à été sec	$P_{\text{smin}} < P_{\text{wmin}}$, $P_{\text{wmax}} > 3 P_{\text{smin}}$, et $P_{\text{smin}} < 40\text{ mm}$
	Cw : climats tempérés à hiver sec	$P_{\text{wmin}} < P_{\text{smin}}$ et $P_{\text{smax}} > 10 P_{\text{wmin}}$
	Cf : climats tempérés toujours humides (ni Cs ni Cw)	
D : climats neigeux $T_{\min} \leq -3\text{ °C}$	Ds : climats neigeux à été sec	$P_{\text{smin}} < P_{\text{wmin}}$, $P_{\text{wmax}} > 3 P_{\text{smin}}$, et $P_{\text{smin}} < 40\text{ mm}$
	Dw : climats neigeux à hiver sec	$P_{\text{wmin}} < P_{\text{smin}}$ et $P_{\text{smax}} > 10 P_{\text{wmin}}$
	Df : climats neigeux toujours humide (ni Ds ni Dw)	
E : climats polaires $T_{\text{max}} < +10\text{ °C}$	ET : climat de toundra	$0\text{ °C} \leq T_{\text{max}} < +10\text{ °C}$
	EF : climat des glaces	

Tableau.A1. Principales catégories sous une forme donnée par M. Kottek *et al.* (2006) [Foucault, 2009].

Abréviations. P : précipitations en mm, avec Pmin (précipitations du mois le plus sec), Pann (cumul annuel), Psmin (précipitations du mois le plus sec du semestre estival), Pwmin (idem pour le semestre hivernal), Psmax (précipitations du mois le plus humide du semestre estival), Pwmax (idem pour le semestre hivernal) ; T : températures en °C, avec Tann (température moyenne annuelle), Tmax : température moyenne du mois le plus chaud, Tmin : température moyenne du mois le plus froid. Pth (th pour *threshold*, seuil) est égal à $2 \setminus T_{\text{ann}}$ si au moins les 2/3 des précipitations annuelles ont lieu en hiver, $2 \setminus T_{\text{ann}} + 28$ si au moins les 2/3 des précipitations annuelles ont lieu en été, $2 \setminus T_{\text{ann}} + 14$ dans les autres cas.

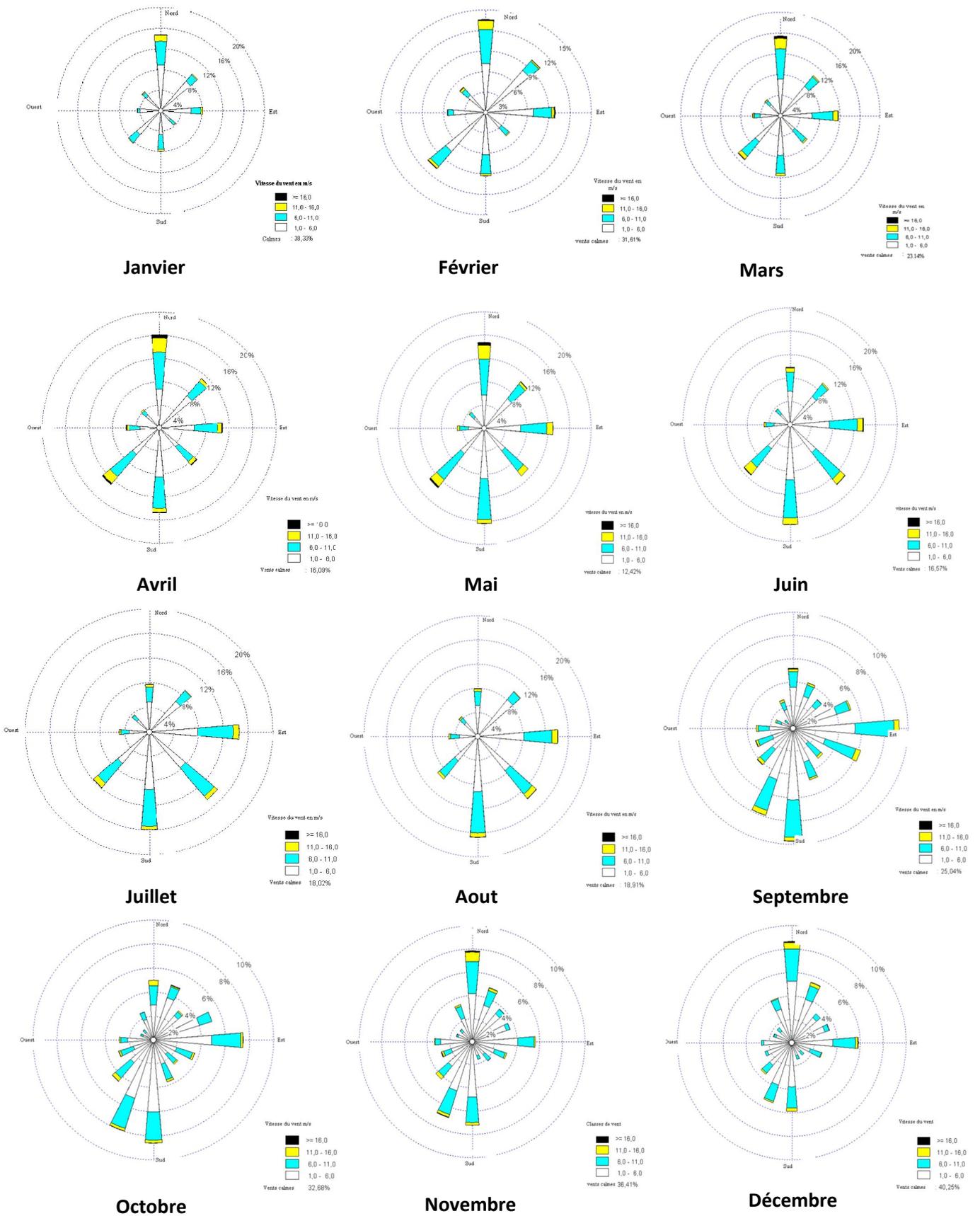


Fig. A2. Roses de vent Mensuelle de la ville de Béchar (1977-2006) [Imessad, 2014].

Année	Événement
1643	Torricelli invente le baromètre
1687	Newton découvre la viscosité, lois du mouvement
1738	Bernoulli définit la conservation de l'énergie appliquée à l'hydrodynamique des fluides
1755	Euler forme l'équation non visqueuse du mouvement des fluides
1806	Beaufort définit l'échelle de Beaufort de la vitesse du vent en fonction de ses effets visibles
1836	Effondrement de Brighton Chain Pier par un mouvement oscillatoire
1845	Stokes formule les équations de Navier-Stokes du mouvement des fluides
1846	Robinson invente l'anémomètre à coupelles
1879	Effondrement du pont de Tay en Scotland
1883	Reynolds développe paramètre sans dimension pour enquêter sur l'apparition de la turbulence
1888	Dines invente l'anémomètre à tube de pression
1904	Prandtl développe le concept de couche limite
1912	Von Karman identifie la formation de tourbillons dans sillages
1914	King donne l'équation de refroidissement des fils chauds
1928	Fisher et Tippet développer la théorie des valeurs extrêmes
1934	Enregistrement maximum 10m rafales (370 km/h) enregistrée au Mont. Washington, États-Unis
1935	Taylor développe la théorie statistique de la turbulence
1940	Rathbun a recueilli des données sur la pleine échelle de l'Empire State Building
1940	Effondrement du Tacoma Narrows Bridge par un mouvement oscillatoire
1954	Cermak construit le premier grand tunnel du vent à couche limite
1954	Jensen formule le modèle de lois d'échelle
1957	Van der Hoven compile le large spectre de fréquences de la gamme des vents
1958	Cermak décrit l'indépendance du nombre de Reynolds pour la modélisation de la couche limite atmosphérique
1961	Davenport illustre l'application des concepts statistiques sur la charge de vent
1963	Première conférence internationale sur les effets du vent sur les bâtiments
1964	Cermak et Davenport font premier test de la conception orientée d'un bâtiment principal dans un tunnel de vent à couche limite; World Trade Center (New York)
1965	Collapse de trois tours de refroidissement à Ferrybridge
1970	invention du terme " ingénierie du vent "
1974	Eaton et Mayne rapportent sur la maison Aylesbury; étude à grande échelle et faible hauteur en Grande-Bretagne
1975	Marshall étudie les pressions à grande échelle sur les maisons Malmstrom
1976	Deaves et Harris développent un modèle mathématique de vents forts
1984	Holmes définit les caractéristiques de réponse de tubes de pression en soufflerie
1986	catastrophe du pont ferroviaire Amarube Tekkyo au Japon
1987	Construction d'un bâtiment expérimental TTU (Université Technologique de Texas)
1988	Le bâtiment Silsoe est construit en Grande-Bretagne
1992	Murakami accueille le premier colloque CWE à Tokyo
1996	Nouveau record de 10 m maximum rafales (408 km /h) enregistré à Barrow Island, en Australie

Tableau. A3. Les événements majeurs de l'ingénierie du vent [Cochran et Derickson, 2011].