



Université de Constantine 3
Faculté d'architecture et d'urbanisme
Département de l'architecture

OPTIMISATION DU CONTRÔLE DU VENT
DANS LES ESPACES URBAINS SOUS CLIMAT HUMIDE
CAS DE LA VILLE DE JIJEL

THÈSE

Présentée pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences.

Spécialité architecture

Option architecture bioclimatique

Par
Samira BOUKETTA

Année Universitaire
2020 – 2021



Université de Constantine 3
Faculté d'architecture et d'urbanisme
Département de l'architecture

N° de Série :

N° d'Ordre :

OPTIMISATION DU CONTRÔLE DU VENT
DANS LES ESPACES URBAINS SOUS CLIMAT HUMIDE
CAS DE LA VILLE DE JIJEL

THÈSE

Présentée pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences.

Spécialité architecture

Option architecture bioclimatique

Par

Samira BOUKETTA

Sous la direction du **Pr. Yasmina BOUCHAHM**

Devant le Jury composé de :

Fatiha BOURBIA	Présidente	Professeur	Université Constantine 3
Yasmina BOUCHAHM	Directrice	Professeur	Université Constantine 3
Ammar KORICHI	Examineur	Professeur	Université Constantine 3
Ammar BOUCHAIR	Examineur	Professeur	Université MSB Jijel
Aïcha BOUSSOUALIM	Examinatrice	Professeur	EPAU
Abida HAMOUDA	Examinatrice	M.C.A	Université de Batna

Année Universitaire
2020 – 2021

A toi maman, je dédie ce travail ... je ne saurais
exprimer mon grand chagrin en ton absence ...
que ce travail soit une prière pour ton âme ...

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens tous particulièrement à remercier toutes les personnes qui ont cru en moi et qui m'ont permis d'arriver au bout de cette thèse.

En premier lieu, je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements au Pr. BOUCHAHM Yasmina qui fut pour moi une directrice de thèse attentive et disponible malgré ses nombreuses charges et tâches. Sa compétence, sa rigueur scientifique m'ont beaucoup appris. Je voudrais lui témoigner ici toute ma gratitude et mon profond attachement.

J'adresse mes vifs remerciements aux membres du jury qui ont pris le temps d'examiner ce travail et qui ont accepté l'invitation d'être présents en cette soutenance.

Mes sincères remerciements vont également à tous mes collègues du laboratoire ABE pour leurs conseils et amitiés, en particulier Pr. BOURBIA Fatiha directrice du laboratoire qui a bien voulu mettre à ma disposition les outils et les instruments de mesure nécessaires, qu'elle trouve ici ma profonde reconnaissance.

Je remercie également toutes les personnes formidables que j'ai rencontrées au laboratoire Project[s] ENSA – Marseille. Je tiens donc à exprimer toute ma reconnaissance à M. BELMAAZIZ Mohammed, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe et de m'encadrer lors de mon dernier séjour scientifique. M. BOUKARA Abdelaziz, CADONI Gianluca et Mme THOMAS Chadia qu'ils soient assurés de ma profonde gratitude.

Enfin, les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille pour tout le soutien. A titre plus personnel, mes ultimes remerciements vont à mon mari sans qui tout cela n'aurait jamais été possible. Je tiens à le remercier pour son soutien moral ininterrompu, sa patience et ses encouragements tout le long de ma thèse.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	Page vii
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xv
RÉSUMÉ	
ABSTRACT	
ملخص	
INTRODUCTION GENERALE & PROBLEMATIQUE	1
1. Introduction	2
2. Problématique	5
3. Hypothèses	8
4. Méthodologie et outils de recherche	9
CHAPITRE I	
ÉLÉMENTS DE CARACTÉRISATION DE LA MORPHOLOGIE URBAINE	
ET SES INTÉRACTIONS MICROCLIMATIQUES	10
1.1. Introduction	11
1.2. Cadre théorique lié aux notions de morphologie urbaine	12
1.3. Différentes approches de mesure et d'évaluation de morphologie urbaine	
.....	15
1.3.1. Les indices et les indicateurs	15
1.3.2. La géométrie fractale	15
1.3.3. La syntaxe urbaine	16
1.4. Typologie de modules caractérisant la morphologie urbaine	16
1.4.1. La bande (ou la rangée)	17
1.4.2. L'îlot	19
1.4.3. La cour (l'îlot inversé)	19
	iii

1.4.4. Le passage	19
1.4.5. La barre	20
1.4.6. Les ensembles	20
1.5. Indicateurs morphologiques déterminants dans la caractérisation de la morphologie urbaine	21
1.5.1. Indicateurs d'interaction de l'espace construit et du physique	21
1.5.2. Indicateurs " morpho-climatiques "	24
1.6. Revue de la littérature sur les interactions de la morphologie urbaine	29
1.6.1. Avec le microclimat des espaces extérieurs	29
1.6.2. Avec le confort thermique dans les espaces extérieurs	39
1.7. Conclusion	43

CHAPITRE II

LA GÉOMÉTRIE URBAINE ET LE CONTRÔLE DU VENT DANS LES ESPACES EXTERIEURS

2.1. Introduction	44
2.2. Introduction à l'aérodynamisme urbaine	45
2.2.1. Vent, couche limite urbaine et rugosité	46
2.2.1. Structure turbulente du vent	50
2.3. Écoulement du vent autour des bâtiments	51
2.3.1. Description de l'écoulement du vent autour d'un obstacle bâti	51
2.3.2. Géométrie des obstacles bâtis	55
2.3.3. L'ombre du vent ou la zone protégée (wind shadowing)	58
2.3.4. Les effets aérodynamiques en milieu urbain	63
2.4. Contrôle du vent en milieu urbain par "les indicateurs géométriques"	66
2.4.1. Prospect équivalent de l'espace H/w	67
2.4.2. La hauteur du bâtiment H	73
2.4.3. Interaction entre la géométrie urbaine / la densité / le vent	76
2.5. Contrôle du vent par la végétation	81
2.5.1. Effet de changement de rugosité	81
2.5.2. Effet de brise - vent	81
2.5.3. Effet d'entonnoirs à vent	81
2.5.4. La porosité aéraulique	83
2.6. Conclusion	86

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE & CAS D'ETUDE	88
3.1. Introduction	89
3.2. Présentation de la ville de Jijel	89
3.2.1. Situation	89
3.2.2. Climat de Jijel	90

3.2.3. Analyse climatique de Jijel	91
3.2.4. Microclimat de la ville de Jijel	97
3.3. Étude typologique et échantillonnage	99
3.3.1. Présentation de la méthode d'approche	99
3.3.2. Méthode de l'analyse typologique	100
3.3.3. Analyse typo-morphologique de l'aire d'étude	102
3.4. Interprétation des résultats de l'enquête	116
3.4.1. Construction du questionnaire	116
3.4.2. Collecte des données	117
3.4.3. Analyse des données de l'enquête	117
3.5. Outil de recherche choisi.....	121
3.6. Conclusion	123

CHAPITRE IV

ÉVALUATION MICROCLIMATIQUE PAR INVESTIGATION

& SIMULATION	124
4.1. Introduction	125
4.2. Investigation	125
4.2.1. Objectifs des campagnes de mesures	125
4.2.2. Instrument de mesure	126
4.2.3. Choix et identification des journées de mesure	127
4.2.4. Choix des points de mesure	133
4.2.5. Déroulement de l'investigation	137
4.3. Discussion des résultats de l'investigation	137
4.3.1. Evaluation de l'effet de la géométrie sur la température de l'air et l'humidité relative	137
4.3.2. Evaluation de l'effet de la géométrie sur la vitesse du vent	141
4.3.3. Relation entre les paramètres climatiques mesurés et les indicateurs géométriques à travers la méthode statistique	145
4.3.4. Synthèse	149
4.4. Simulation numérique	151
4.4.1. Présentation du logiciel de simulation	151
4.4.2. Structure du logiciel	151
4.4.3. Choix du logiciel	153
4.4.4. Démarche et déroulement de la simulation	153
4.4.5. Discussion des résultats de la simulation des cas initiaux	156
4.4.6. Synthèse	169
4.5. Conclusion	169

CHAPITRE V

ÉTUDE D'OPTIMISATION DES INDICATEURS GÉOMETRIQUES

ET LEUR IMPACT SUR LE VENT	171
5.1. Introduction	172

5.2. Etude d'optimisation des indicateurs géométriques par les scénarios proposés	172
5.3. Discussion des résultats des scénarios	176
5.3.1. Selon les différents angles d'incidence O/ N-O	176
5.3.1.1. Scénario N°1 : effet de la largeur de l'espace sur le comportement du vent	176
5.3.1.2. Scénario N°2 : effet de la hauteur de l'espace sur le comportement du vent	190
5.3.1.3. Scénario N°3 : effet de changement du gabarit (profil asymétrique)	195
5.3.2. Synthèse	200
5.3.3. Selon les différents angles d'incidence E /N-E	202
5.3.3.1. Scénario N°1 : effet de la largeur de l'espace sur le comportement du vent	202
5.3.3.2. Scénario N°2 : effet de la hauteur de l'espace sur le comportement du vent	214
5.3.3.3. Scénario N°3 : effet de la différence du gabarit	220
5.3.4. Synthèse	226
5.4. Conclusion	227
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	233
BIBLIOGRAPHIE	239
ANNEXE	260

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Représentation spatiale de la syntaxe urbaine	16
1.2	Disposition en bande et orientation optimales	17
1.3	Différentes configurations de passages	18
1.4	Différentes formes géométriques de l'îlot haussmannien	18
1.5	Différentes formes de cours	18
1.6	Degré d'ouverture des îlots (ouverts – fermés)	18
1.7	Différents types de bandes. (a) bandes ouvertes, (b) bandes fermées	18
1.8	Disposition de barres. (a) barre en série, (b) barre jumelle	18
1.9	Exemples d'ensemble d'habitation. (a) Cité La Montagne –Alger, (b) lotissement du Werkbund – Munich	21
1.10	Principe de lecture pour l'analyse d'un point selon un profil	25
1.11	Lecture directionnelle des obstacles et des ouvertures d'un point (place St Pierre à Nantes)	28
1.12	Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU) liée aux modifications urbaines	32
1.13	Représentation des deux indicateurs morphologiques FVC et H/w	33
1.14	Corrélation en fonction du FVC. (a) : entre ICU et le FVC. (b) : entre FVC et ($\Delta TMR - T$)	33
1.15	Profils des rues choisies et variations de la température de l'air	34
1.16	Valeurs moyennes d'ombrage des surfaces horizontales des rues pendant le mois de décembre (à gauche) et juin (à droite)	36
1.17	Les modèles des trois scénarios simulés	37
1.18	Résultats di scénario B en hiver et en été. (a) relation entre l'albédo et le ratio H/w, (b) la température surfacique moyenne de la rue	38
1.19	Résultats di scénario C en hiver et en été. (a) relation entre l'albédo et le degré de l'irrégularité H_1/H_2 , (b) la température surfacique moyenne de la rue	38
1.20	Localisation des points mesurés et FVC des points A (0.236), E (0.555), F (0.616), K (0.879)	41
1.21	Les isothermes simulées du P.E.T pour le point A et F	41
1.22	Les fréquences du P.E.T prévues en été pour les 06 stations	41
1.23	La température moyenne de l'air au niveau des rues asymétriques	43

2.1	Structure verticale de l'atmosphère urbaine pour des vents supérieurs et inférieurs à 3m/s	48
2.2	Variation de la vitesse du vent selon la rugosité du site	49
2.3	Différents types de tourbillon	51
2.4	Types d'écoulement. (a) écoulement laminaire, (b) turbulent et (c) tourbillonnaire	51
2.5	Champ de pression et dépression autour d'un obstacle	52
2.6	Schéma explicatif de l'écoulement du vent autour d'un bâtiment. Vue de dessus et de face	53
2.7	Écoulement du vent autour des obstacles bâtis. (a) groupement bâti, (b) bâtiments composés, (c) bâtiment isolé	54
2.8	Effet des obstacles. (a) obstacle bas - $H < 15$ m, (b) obstacle haut, (c) obstacles combinés	55
2.9	Trajectoire de l'écoulement du vent autour de deux bâtiments haut et bas	55
2.10	Champ de vitesse autour des bâtiments L et U à $H = 2$ m pour la direction du vent de 0° , 45°	56
2.11	Écoulement du vent autour des formes en U et L	57
2.12	Champ de vitesse autour de bâtiments en U pour la direction du vent de 0° , 30° , 60° et 90°	57
2.13	Le flux du vent autour des formes en U	57
2.14	La zone protégée due au vent (wind shadowing)	58
2.15	Wind shadowing au niveau d'un obstacle rectangulaire et carré	59
2.16	La profondeur de la zone d'ombre du vent selon la forme	59
2.17	Relation entre les caractéristiques géométriques du bâtiment et la profondeur de la zone d'ombre au vent	60
2.18	Effet de la disposition du bâti sur la zone protégée	62
2.19	Effet de l'angle d'incidence par rapport au vent sur la grandeur de la zone	62
2.20	Comparaison entre les dispositions de bâtiments et la profondeur de la zone protégée	62
2.21	Porosité entre bâtiments	63
2.22	Les différents effets aérodynamiques dus au vent	64
2.23	Écoulement du vent produisant l'effet de coin	65
2.24	Effet de Venturi selon l'angle d'ouverture du passage	66
2.25	Types d'écoulement vent selon le profil de la rue	68
2.26	Les profils de la vitesse du vent dans les deux saisons sur 02 axes	69
2.27	Résultats de la simulation de la vitesse du vent en hiver	69
2.28	Les différents scénarios et les résultats de la Vitesse et la T° de l'air	71
2.29	Géométrie de la zone de recirculation	72
2.30	Effet de la direction du vent sur le potentiel de ventilation ; comparaison entre deux cas	72
2.31	Zone d'étude et scénarios	73
2.32	Comparaison des résultats des scénarios	74
2.33	Résultats des vitesses du vent dans les trois modèles	75
2.34	Comportement du vent autour de deux bâtiments de hauteur différente sous deux angles différents	76
2.35	Résultats des vitesses du vent dans les trois modèles	77
2.36	Les deux tissus urbains archétypes (c et d). a : archétype du pavillon ou la tour, b : archétype de la cour	77
2.37	Scénarios simulés	78

2.38	Exemples de cas d'études. (Plans de masse et ouverture au ciel et direction du vent)	79
2.39	Cas d'étude et résultats de la simulation des vitesses du vent	79
2.40	Résultats de simulation des trois formes urbaines	80
2.41	Comparaison des vitesses du vent des formes urbaines simulées	80
2.42	Effet de la densité du bâti sur l'écoulement du vent	80
2.43	Corrélation entre la densité du bâti et les vitesses moyennes du vent	81
2.44	Écoulement entre bâti, (a) sans cour, (b) avec cour	81
2.45	Cas d'étude (a) et les résultats de la simulation ; (b) direction du vent 0° (c) direction du vent 90°	83
2.46	Effet de la porosité végétale sur la variation de la vitesse du vent	85
2.47	Effet des arbres sur le vent	85
2.48	Rapport entre la disposition des arbres et le ratio d'aspect H/w	86
3.1	Situation géographique de la wilaya de Jijel et ses limites	90
3.2	Classement de Jijel selon les zones climatiques d'hiver et d'été en Algérie	91
3.3	Interprétation en graphes des données météorologiques de Jijel (a) période 1999-2015. (b) rose des vents annuelle 2001 – 2016 relevée à la station météorologique de Jijel	94
3.4	Rose des vents mensuelle (mois de février & décembre) période 2001-2015 de la ville de Jijel	95
3.5	Analyse du régime des vents pour la ville de Jijel	96
3.6	Division de la ville de Jijel selon l'altitude	98
3.7	Vues sur la ville de Jijel. (a) Tissu urbain colonial, (b) cadre bâti, (c) Les jardins de la ville, (d) Jet d'eau de la mairie. (e,f) hauteur de la ville	98
3.8	Localisation des différents groupements d'habitat collectif à l'échelle de la ville de Jijel	103
3.9	Quelques exemples de l'habitat collectif existant dans la ville de Jijel. 1 : cité Bab Essour. 2 : cité des 1000 logts. 3 : cité HLM. 4 : cité des 400 logts. 5 : vue sur le Centre ville. 6 : vue sur la ZHUN 2. 7 : cité Mezghitane. 8 : vue sur le Camp Chevalier	107
3.10	Situation du cas d'étude par rapport au Centre ville	114
3.11	Vue du site depuis la mer	114
3.12	Présentation du cas d'étude. Images satellitaires, plan de masse, profil & vues	115
3.13	Typologie de végétation au niveau du cas d'étude	116
3.14	Evaluation de l'environnement physique vécu par les usagers. (A) aspects agréables, (B) aspects désagréables	118
3.15	Evaluation du degré d'influence de l'action du vent sur les usagers	119
3.16	Evaluation du degré d'adaptation des usagers vis-à-vis ces gênes	119
3.17	Evaluation de la disposition des bâtiments	120
3.18	Evaluation de futures attentes en relation avec l'espace extérieur	121
4.1	Instruments de mesure utilisés	126
4.2	Comparaison des valeurs annuelles d'hiver entre 2006 et 2015 avec les moyennes annuelles. (a) vitesse du vent, (b) température de l'air, (c) humidité relative	129
4.3	Comparaison des valeurs des paramètres physiques horaires de la journée du 16 février enregistrées pendant les 03 ans filtrés avec leur	

	moyenne – période d’hiver	129
4.4	Comparaison des valeurs des paramètres physiques horaires de la journée du 28 février enregistrées pendant les 03 ans filtrés avec leur moyenne – période d’hiver	130
4.5	Comparaison des valeurs annuelles d’été entre 2006 et 2015 avec les moyennes annuelles. (a) vitesse du vent, (b) température de l’air, (c) humidité relative	131
4.6	Comparaison des valeurs des paramètres physiques horaires de la journée du 03 juillet enregistrées pendant les 03 ans filtrés avec leur moyenne – période d’été	132
4.7	Comparaison des valeurs des paramètres physiques horaires de la journée du 28 juillet enregistrées pendant les 03 ans filtrés avec leur moyenne – période d’été	132
4.8	Stations de mesures et parcours	133
4.9	Les mesures de la température de l’air et l’humidité relative – période froide	139
4.10	Les indicateurs géométriques des différents points de mesure (H/w et SVF)	139
4.11	Les mesures de la température de l’air et l’humidité relative – période chaude	140
4.12	Vitesses du vent mesurées– période froide	141
4.13	Mouvement de vent sur les profils L1, U1 et U2.....	142
4.14	Mouvement de vent sur les profils L2, U3, barre, L3 et U4	143
4.15	Wind shadowing en hiver /orientation N-O	143
4.16	Vitesses du vent mesurées – période chaude	144
4.17	Mouvement du vent sur les différents points de mesure	145
4.18	Analyse graphique de la relation entre la vitesse de vent et les indicateurs – hiver	146
4.19	Analyse graphique de la relation entre la vitesse de vent et les indicateurs – été	146
4.20	Analyse graphique de la relation entre la température de l’air et les indicateurs – hiver	147
4.21	Analyse graphique de la relation entre la température de l’air et les indicateurs – été	147
4.22	Analyse graphique de la relation entre l’humidité relative et les indicateurs – hiver	147
4.23	Analyse graphique de la relation entre l’humidité relative et les indicateurs – été	147
4.24	Structure du logiciel	152
4.25	Traitement des données	153
4.26	Dessin reproduit sur le logiciel ENVI-met en 2D & 3D	155
4.27	Résultats de la simulation de la vitesse du vent. Orientation N-O	156
4.28	L’écoulement du vent autour des différentes géométries (site entier)	160
4.29	Comparaison entre les vitesses du vent simulées et mesurées des différents points. Période froide	162
4.30	Résultats de la simulation de la vitesse du vent. Orientation N-E	163
4.31	Mouvement du vent autour des différentes géométries (site entier)	166
4.32	Comparaison de la vitesse du vent simulée et mesurée des différents points. Période chaude	168

5.1	Les incidences du vent	176
5.2	Résultats des vitesses du vent simulées sur les profils en U. Scénario 1, incidences N-O	181
5.3	Résultats des vitesses du vent simulées sur les profils en L. Scénario 1, incidences N-O	184
5.4	Vitesses du vent simulées des profils en U. Scénario 2 et 3, incidences N-O	191
5.5	Vitesses du vent simulées des profils en L. Scénario 2 et 3, incidences N-O	196
5.6	Vitesses du vent simulées des profils en U. Scénario 1, incidences N-E ..	203
5.7	Vitesses du vent simulées des profils en L. Scénario 1, incidences N-E ..	209
5.8	Vitesses du vent simulées des profils en U. Scénario 2 et 3, incidences N-E	215
5.9	Vitesses du vent simulées des profils en L. Scénario 2 et 3. Incidences N-E	221

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
1.1	Formes urbaines adaptées aux différents types de climat	14
1.2	Grille d'analyse des indicateurs morphologiques	26
1.3	Valeurs moyennes de rayonnement solaire et d'ombrage sur deux rues des deux sites	35
2.1	Propriétés aérodynamiques typiques pour des zones urbaines homogènes	48
2.2	Différents types de rugosité	50
2.3	La turbulence α selon ZG	51
2.4	Relation entre la zone protégée et la hauteur et la largeur de l'édifice	60
2.5	Types de rue selon les ratios H/w et L/H	68
3.1	Données climatiques moyennes annuelles relevées à la station météorologique de Jijel, (1999-2015)	92
3.2	Premier classement (diagnostic)	105
3.3	Deuxième classification – les types recueillis de la phase précédente	109
4.1	Les caractéristiques de l'instrument	127
4.2	Ecart type de la température de l'air, humidité relative et la vitesse du vent – période d'hiver	128
4.3	Ecart type de la température de l'air, humidité relative et la vitesse du vent – période chaude	130
4.4	Indicateurs morphologiques et géométriques caractéristiques du mouvement de l'air dans l'espace urbain	134
4.5	Caractéristiques géométriques des points de mesure	135
4.6	Test de corrélation de Pearson calculé par Excel	148
4.7	Degré de ventilation sur les différentes géométries	150
4.8	Détails des paramètres introduits au fichier de configuration pour les cas simulés	154
4.9	Distribution de la vitesse du vent et la pression dans les profils simulés	158
4.10	Distribution de la vitesse du vent et la pression dans les profils simulés	164

5.1	Scénarios proposés	174
5.2	Distribution des vitesses du vent sur les profils en U à 14h. Scénario 1, incidences N-O	178
5.3	Distribution de la pression du vent sur les profils en U à 14h. Scénario 1, incidences N-O	179
5.4	Distribution des vitesses du vent en coupe dans l'espace des profils en U à 14h. Scénario 1, Incidences N-O	182
5.5	Distribution de la pression du vent en coupe dans la cour des profils en U à 14h. Scénario 1, Incidences N-O	183
5.6	Distribution des vitesses du vent dans les profils en L à 14h. Scénario 1, Incidences N-O	186
5.7	Distribution de la pression du vent sur les profils en L (14h). Scénario 1, Incidences N-O	187
5.8	Distribution des vitesses du vent en coupe dans l'espace des profils en L à 14h. Scénario 1, Incidences N-O	188
5.9	Distribution de la pression du vent en coupe dans l'espace des profils en L à 14h. Scénario 1, Incidences N-O	189
5.10	Distribution de la pression du vent dans l'espace des profils en U à 14h. Scénario 2 et 3, Incidences N-O	192
5.11	Distribution des vitesses du vent en coupe dans l'espace des profils en U à 14h. Scénario 2 et 3, Incidences N-O	193
5.12	Distribution de la pression du vent en coupe dans la cour des profils en U à 14h. Scénario 2 et 3, Incidences N-O	194
5.13	Distribution de la pression du vent dans l'espace des profils en L à 14h. Scénario 2 et 3, Incidences N-O	197
5.14	Distribution de la vitesse du vent en coupe dans l'espace des profils en L à 14h. Scénario 2 et 3, Incidences N-O	198
5.15	Distribution de la pression du vent en coupe dans l'espace des profils en L à 14h. Scénario 2 et 3, Incidences N-O	199
5.16	Distribution de la vitesse du vent des profils en U à 12h. Scénario 1, Incidences N-E	204
5.17	Distribution de la pression du vent des profils en U à 12h. Scénario 1, Incidences N-E	205
5.18	Distribution de la vitesse du vent en coupe dans l'espace des profils en U à 12h. Scénario 1, Incidences N-E	206
5.19	Distribution de la pression du vent en coupe dans la cour des profils en U à 12h. Scénario 1, Incidences N-E	207
5.20	Distribution de la vitesse du vent des profils en L à 12h. Scénario 1, Incidences N-E	210
5.21	Distribution de la pression du vent des profils en L à 12h. Scénario 1, Incidences N-E	211
5.22	Distribution de la vitesse du vent en coupe dans l'espace des profils en L à 12h. Scénario 1, Incidences N-E	212
5.23	Distribution de la vitesse du vent en coupe des profils en L à 12h. Scénario 1, Incidences N-E	213
5.24	Distribution de la vitesse du vent des profils en U à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E	216
5.25	Distribution de la pression du vent des profils en U à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E	217
5.26	Distribution de la vitesse du vent en coupe dans l'espace des	

	profils en U à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E	218
5.27	Distribution de la pression du vent en coupe dans la cour des profils en U à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E	219
5.28	Distribution de la vitesse du vent des profils en L à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E	222
5.29	Distribution de la pression du vent des profils en L à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E	223
5.30	Distribution de la vitesse du vent en coupe dans l'espace des profils en L à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E	224
5.31	Distribution de la pression du vent en coupe des profils en L à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E	225
5.32	Récapitulation du niveau d'impact des paramètres géométriques de l'espace extérieur sur le vent	229

LISTE DES ABREVIATIONS

Abrév.	
T°	Température de l'air (°)
HR	Humidité relative (%)
V	Vitesse de l'air (m/s)
F.V.C	Facteur de vue de ciel (S.V.F : <i>Sky view factor</i>)
H	Hauteur du bâtiment (m)
w	Largeur de la rue (m)
H/w	Profil de la rue
DoE	Degré d'enclosure
C.O.S	Coefficient d'occupation au sol
Ds	Densité bâtie
Dv	Densité végétale
rhi	Rayon hydraulique équivalent à l'espace ouvert i
Ap	Surface bâtie de la proportion urbaine
As	Surface totale de la proposition urbaine
Po	Porosité urbaine
Li	Longueur de l'espace ouvert i
Vj	Volume moyen de bâtiment j
Vi	Volume moyen de la canopée urbaine
H	La hauteur moyenne des bâtiments adjacents et des espaces non bâtis
α	L'angle vertical déterminé par l'obstacle et l'azimut π
F.V.Ci	Facteur de vue du ciel pour l'élément i calculé sur Solene
dAi	Surface de l'élément i
F.V.C _{unobs}	Facteur de vue du ciel d'une surface sans masque. Pour une surface verticale, il égale à 0.5 parce qu'une surface verticale sans masque voit la moitié du ciel.
r	Coefficient de corrélation
T.M.R	Température moyenne radiante
P.E.T	Température Physiologique Équivalente
I.C.U	Ilot de chaleur urbain
N	Orientation Nord
O	Orientation Ouest
E	Orientation Est
S	Orientation Sud
Z _R	Sous-couche rugueuse
α	La turbulence

RÉSUMÉ

A l'échelle d'une entité urbaine, les préoccupations liées au phénomène vent sont relatives au contrôle des effets aérodynamiques dans les espaces extérieurs qui affectent le confort du piéton, le potentiel de la ventilation de renouvellement de l'air et de refroidissement des bâtiments et la dispersion des polluants.

Dans ce travail de thèse, nous avons abordé la problématique qui souligne les interactions entre les paramètres géométriques de l'espace urbain (profil urbain), la ventilation urbaine et son contrôle. L'objectif principal de cette étude consiste à proposer un guide méthodologique qui permet le contrôle du vent dans les espaces extérieurs principalement dans le contexte humide où le vent est une donnée essentielle avec laquelle il faut composer. A savoir qu'il ne s'agit pas tant de fournir un guide précis autant qu'il est d'offrir les éléments clés pour évaluation et qui peuvent contribuer à l'amélioration de la qualité aéraulique dans les zones urbaines.

Cette méthodologie est formulée sous forme d'indicateurs géométriques déduits de l'étude de la relation géométrie urbaine – vent. Il s'agit d'identifier les paramètres urbains géométriques les plus déterminants sur le comportement des flux d'air en milieu urbain. Par la suite, optimiser ces paramètres en s'appuyant sur la simulation numérique. Plusieurs préoccupations apparaissant liées à cette problématique à savoir : quels profils urbains choisir, quelle orientation préférer, quelle forme de bâtiment adopter ?.

L'étude a été menée sur un cas d'étude à la ville de Jijel contenant une variété de configurations spatiales des bâtiments offrant des prospects variés de l'espace extérieur. L'évaluation microclimatique a été faite par investigation (mesure in situ) pour les deux périodes froide et chaude et par simulation numérique (logiciel ENVI-met V4.3.0). Cet outil très important a permis d'améliorer les caractéristiques géométriques des espaces en proposant des profils urbains H/w variés associés à des angles d'incidence du vent variés selon les orientations N-O, N-E, et d'élargir le choix à travers des scénarios différents.

La comparaison entre les scénarios permet de faire ressortir la performance de chaque profil. Les résultats indiquent que le profil urbain influence le potentiel de la ventilation extérieure. Les dimensions de l'espace entre bâtiments affectaient d'une manière significative la distribution de la pression du vent sur les différentes façades en fonction de la direction du vent. L'effet de la hauteur sur le vent était remarquable non seulement pour le profil régulier, mais aussi pour le profil urbain asymétrique. Aussi, l'orientation du bâti par rapport à la direction du vent est au même titre déterminant, puisqu'elle conduit à l'amplification ou la diminution du potentiel de la ventilation.

Mots clés : *vent, profil urbain, ventilation extérieure, espace urbain, simulation, ENVI-met*

ABSTRACT

On the scale of urban entity, concerns linked to wind phenomenon are relating to the control of aerodynamic effects in the outside areas which affect the pedestrian comfort, the aeration potential of air renewal, of buildings cooling and the dispersion of pollutants.

In this thesis we approached the problem which underlines correlations between the geometric parameters of the urban space (urban profile), urban aeration and its control. The main objective of this study consists in offering a methodological guide that allows the control of the wind in the outside areas in most cases in humid context where the wind is essential data with which you have to deal with. To know that it is not so much a question of providing a definite guide as much as it is to give the key elements for assessment and which can contribute to the improvement of aeraulic quality in the urban zones.

This methodology is formulated in form of geometric indicators deduced from the study of relation urban geometry – wind. It is a question of identifying the most decisive geometric urban parameters on the behaviour of the fluxes of air in urban area. Later, optimize these parameters on the basis of a numerical simulation. Several concerns appearing linked to these problems, i.e.: what urban profiles to choose, which orientation to prefer, which form of building to adopt?

The study was led on a case of study in the city of Jijel containing a variety of space shapes of buildings giving various prospective of the outside space. Microclimatic assessment was made by investigation (measure in-situ) for the two cold and hot periods and by numerical simulation (ENVI-met V4.3.0 software). This very important tool allowed to improve the geometric characteristics of areas by offering urban varied profiles H/w linked to angles of the impact of the varied wind according to orientations North-West, N- East and to enlarge the choice through different scenarios.

The comparison between scenarios allows bringing out the performance of every profile. Results point out that urban profile influences the potential of outside aeration. The dimensions of the space between buildings affected in a significant way the distribution of the wind pressure on the different façades according to the direction of the wind. The effect of the height on the wind was remarkable not only for the regular profile but also for asymmetrical urban profile. Also, the orientation of the building in comparison with the direction of the wind is decisive in the same way, since it leads to amplification or reduction of the aeration potential.

Keywords: *wind, urban profile, outdoor ventilation, urban space, simulation, ENVI-met V4.3.0.*

ملخص

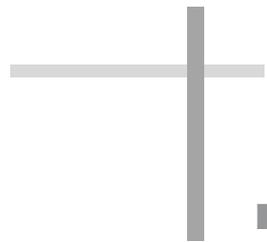
ترتبط الانشغالات المتعلقة بظاهرة الرياح على مستوى كيان حضري، بمراقبة آثار الديناميكا الهوائية في الفضاءات الخارجية التي تؤثر على راحة المشاة وإمكانية تهوية تجديد الهواء وتبريد المباني وتشتت الملوثات. تناولنا في أطروحتنا هذه الإشكالية التي تسلط الضوء على التفاعلات بين المعايير الهندسية للفضاء الحضري (ملاحح حضري)، والتهوية الحضريّة ومراقبتها. ويتمثل الهدف الرئيس من هذه الدراسة في اقتراح دليل منهجي يسمح بمراقبة الرياح في الأماكن الخارجية وبشكل رئيس في السياق الرطب حيث تكون الرياح معطيات أساسية للتعامل معها. وهي ليست مسألة توفير دليل دقيق بقدر ما هي مسألة تقديم العناصر المفتاحية للتقييم والتي يمكن أن تساهم في تحسين نوعية الهواء في المناطق الحضريّة.

وقد صيغت هذه المنهجية في شكل مؤشرات هندسية استنبطت من دراسة العلاقة بين هندسة المدن والرياح. والهدف من ذلك هو تحديد أهم المعايير الحضريّة الهندسية الحاسمة لسلوك تدفقات الهواء في الوسط الحضري. ثم تحسين هذه المعايير بالاعتماد على المحاكاة الرقمية. وقد ظهرت عدة انشغالات متعلقة بهذه الإشكالية وهي: أي ملاحح حضري يجب اختيارها، أي اتجاه يُفضل، وما هو شكل البناء الذي ينبغي اعتماده؟

وقد أجريت الدراسة على دراسة حالة في مدينة جيجل تحتوي على تشكيلة مكانية متنوعة من المباني التي تتنح أفاقا مختلفة للفضاء الخارجي. وقد تم التقييم المناخي الجزئي عن طريق التحقيق (القياس في الموقع) لكل من الفترتين الباردة والساخنة وعن طريق المحاكاة الرقمية (برمجية ENVI met V4.3.0). وقد سمحت هذه الأداة الهامة جدا بتحسين الخصائص الهندسية للمساحات من خلال اقتراح ملاحح حضريّة مختلفة H / w مرتبطة بزوايا هبوب الرياح المتنوعة حسب الاتجاهين الشمالي الغربي والشمالي الشرقي، وتوسيع الاختيار من خلال سيناريوهات مختلفة.

وقد سمحت المقارنة بين السيناريوهات بإبراز أداء كل ملاحح. وبينت النتائج أن الملاحح الحضري يؤثر على إمكانات التهوية الخارجية. كما تؤثر أبعاد المسافة بين المباني بشكل كبير على توزيع ضغط الرياح على الواجهات المختلفة تبعاً لاتجاه الرياح. كما لوحظ تأثير الارتفاع على الريح ليس فقط بالنسبة للملاحح العادية ولكن أيضاً للملاحح الحضريّة غير المتناظرة. كما أن اتجاه المباني بالنسبة لاتجاه الرياح هو حاسم على قدم المساواة، لأنه يؤدي إلى تضخيم أو تخفيض إمكانات التهوية.

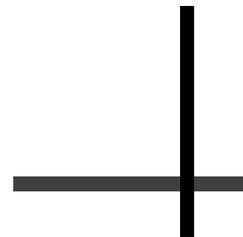
الكلمات الرئيسية: الرياح، ملاحح حضريّة، تهوية خارجية، فضاء حضري، محاكاة، برمجية ENVI- V4.3.0 met



Introduction générale

&

problématique



1. INTRODUCTION

De tout temps à travers l'histoire, le mode d'organisation de l'espace bâti montre que l'homme a su composer avec le climat, à travers une perception intelligente des phénomènes naturels, d'en tirer parti et d'apporter des réponses ingénieuses dans chaque espace où il s'installe, adaptées à son mode de vie et à son environnement. En effet, « *les constructions de chaque région étaient le fruit merveilleux de l'heureuse alliance de l'imagination du peuple et des exigences du paysage* »¹.

A l'image de ces réflexions ancestrales pertinentes, la ville traditionnelle ou médina a su contrôler les phénomènes climatiques. En climat méditerranéen humide, les médinas ont pu fournir des espaces agréables adaptés aux conditions climatiques en offrant ainsi abri, protection contre la pluie intense et les vents en hiver, et fraîcheur, ombre, ventilation en été, et par l'orientation des espaces vers le côté est/sud-est, une orientation protégée et favorable. En effet, « *la condition climatique est primordiale, la qualité de la lumière, de l'air, de la température est tellement agréable au moins les trois quarts de l'année, que beaucoup de gestes sont recherchés en plein air. L'abri des pièces ou des appartements sera réservé aux besoins d'adossement dans le travail ou la conversation, et aussi aux rangements, ainsi naturellement qu'au repli à l'abri de la chaleur de l'été, de la pluie à d'autres saisons et de l'humidité la nuit, car nous sommes au bord de la mer, et même l'été, les nuits sont loin d'être sèches* »².

En outre, « *les villes traditionnelles et anciennes ne se ressemblent jamais, entre elles ; leurs formes dépendent des cultures, des régions, des sites et des climats* »³.

¹ : Fathy, H. (1970). *Construire avec le peuple*. Edition Sindbad. Paris, p.51.

² : Ravéreau, A. (1989). *La Casbah d'Alger, et le site créa la ville*. Édition Sindbad. Paris, p.44.

³ : Saidouni, M. (2001). *Éléments d'introduction à l'urbanisme : histoire, méthodologie, réglementation*. Casbah éditions. Alger, p.31.

En climat aride, se décèlent des formes urbaines opposées, l'aspect morphologique compact garantit la protection contre la chaleur du soleil et l'abri contre les vents de sable.

Les urbanistes et les architectes ont pour tâche de comprendre l'agencement de ces formes urbaines et de les organiser sous forme de compositions urbaines. Ils sont sollicités pour élaborer des méthodes de conception permettant d'adapter les constructions à leur environnement climatique, en tirant au maximum profit de celui-ci sans pour autant le dégrader. Depuis 2000 l'an av. J.C., l'architecte et l'ingénieur militaire Romain Vitruve⁴ dans son traité « *De architectura* », a étudié le plan des villes et les maisons individuelles⁵ en fonction de différents paramètres climatiques. D'après lui, « *la disposition d'une maison aura été avantageusement choisie, si, pour la bâtir, on a eu égard au pays et au climat. Qui ne voit, en effet, qu'une maison doit être différemment construite en Égypte qu'en Espagne, autrement dans le royaume de Pont qu'à Rome; que tel pays, tel climat exige une ordonnance particulière, [..]. L'aspect du ciel, par rapport à l'étendue, de la terre, fait naturellement sentir à notre globe une influence différente, [..], et le cours du soleil; il en résulte que l'emplacement des maisons doit être approprié à la nature des lieux et à la différence des climats* »⁶.

Actuellement, plusieurs exemples de projets urbains ont vu le jour, où les aspects climatiques ont été intégrés avec succès dans le processus de planification. Le plan de Chandigarh en Inde, illustre la prise en charge du climat dans la composition urbaine. « *Les orientations préférentielles étaient par rapport aux vents dominants et par rapport aux meilleures conditions d'ensoleillement. Il a été décidé que l'orientation optimale des rues serait beaucoup plus influencée par les vents que par le soleil, vu la forte chaleur et l'humidité de la région. En effet, ces conditions requièrent une ventilation continue d'où la nécessité d'une forte porosité urbaine* »⁷. L'exemple de Parc-Bit se trouve à Majorque en Espagne ayant un climat méditerranéen. « *Il a été conçu en trame radiale afin de permettre la ventilation par le biais des brises marines, cependant, les espaces extérieurs relativement larges, sont protégés du vent par la végétation, à la fois le long des rues et dans les places et les espaces publics afin de garantir l'ombre* »⁸.

⁴ : Marcus Vitruvius Pollion (70 av .J.-C. / 25 ap. J.-C.), architecte et ingénieur militaire romain. Il a écrit « *De architectura* » : ouvrage consacré à l'architecture formé de dix livres.

⁵ : Dans le 6^e et le 7^e livres.

⁶ : Pollion M. Vitruve, De l'architecture- livre sixième « *De la disposition des maisons appropriées aux localités* », In : <http://remacle.org/bloodwolf/erudits/Vitruve/livre6.htm#I>, consulté le 02/08/2012.

⁷ : Ali-Toudert, F. (2000). *Intégration de la dimension climatique en urbanisme*. Mémoire de magister. EPAU. Alger, p.160.

⁸ : Herzog, T. (1996). *Solar Energy in Architecture and Urban Planning*. Ed. New York.

Les exemples cités ci-dessus, ont indiqué que les considérations climatiques ont toujours eu une part naturelle dans la conception des espaces sous des aspects bioclimatiques. Aujourd'hui cependant, le planificateur doit tenir compte de différents aspects conflictuels et les questions climatiques et énergétiques qui ont un impact relativement faible sur le processus de planification urbaine. En effet, les liens entre l'agencement du tissu urbain et ses consommations énergétiques se manifestent à travers plusieurs aspects. On peut évoquer l'accessibilité à la lumière naturelle qui limite la consommation de l'éclairage artificiel ou la protection contre les vents froids pour réduire les besoins de chauffage. Les liens entre la morphologie d'une zone bâtie et le confort des usagers à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments sont également assez nets. Les vieux centres-villes témoignent préservant les personnes des rigueurs du climat (**Franck et al. 2014**). Cette lacune devient de plus en plus apparente aux urbanistes et spécialistes, qui ressentent la nécessité d'intégrer les considérations climatiques et énergétiques dans le processus de conception urbaine.

Une telle façon de faire est désormais plus possible dans l'urbanisme moderne. L'évolution des villes montre une diversité dans les conditions de leur création et de leurs effets : formes urbaines produites, leurs usages et leurs significations. Ces formes urbaines ne sont pas les mêmes ; elles sont agencées selon des manières différentes, donnant ainsi des espaces urbains souvent n'ont aucune signification vis-à-vis du climat et de l'environnement.

En effet, l'espace urbain se décline sous plusieurs configurations, plusieurs appellations, et ses significations se diffèrent d'une culture à une autre, d'un climat à un autre, et d'un point de vue urbain, architectural, selon plusieurs aspects tantôt majeurs concernant les limites, les formes, les accès, tantôt plus subtiles relatifs aux textures, couleurs, ombre et lumière. Ce sont donc de grandes lignes qui font que les critères de perception, d'appréciation et d'appropriation de cet espace ne s'en retrouvent que plus complexes, et le jugement concernant sa contribution à la qualité de vie urbaine est plus difficile.

Réfléchir donc à la conception durable de l'espace urbain devient une nécessité et une évidence. C'est un point essentiel qui détermine la définition et la création d'un espace urbain de qualité, garant d'une vie urbaine de qualité où se croisent et interagissent les différents acteurs et composantes de la ville, tout en prenant en considération les conditions climatiques et énergétiques en amont et au préalable de la conception.

2. PROBLEMATIQUE

Le développement extrêmement rapide des villes et la croissance urbaine accélérée ont longtemps relégué la conception des espaces publics. Des rapports récents diffusés par les Nations Unies (O.N.U) ont confirmé la relation entre l'urbanisation et la consommation d'énergie, et ont estimé « *qu'environ 75 % de la population dans les pays développés vivent dans les zones urbaines. D'ici 2030, 84 % de la population des pays en développement vivront dans les zones urbaines* »⁹. Pour cette raison, les questions environnementales ont gagné une attention accrue et particulière dans ces zones. En conséquence, l'intérêt porté sur le climat urbain augmente ; il affecte fortement le confort environnemental, la consommation énergétique et la santé publique.

Ce climat urbain, très différent des conditions climatiques dans la zone rurale, « *dépend des facteurs météorologiques tels que la vitesse du vent, la température, l'humidité de l'air, et des facteurs liés à la structure de la ville tels que la densité des constructions, leur géométrie et leur matériaux* »¹⁰. Il résulte aussi des modifications produites par l'activité humaine sur le climat local, ce qui implique des changements aussi rapides de ces paramètres météorologiques, et influence par conséquence le confort des usagers.

La température de l'air et le vent sont parmi les paramètres les plus importants caractérisant une zone urbaine. En effet, « *la température est plus élevée en zone urbaine qu'en zone rurale, provoquant ainsi le phénomène de l'îlot de chaleur urbain* »¹¹ ; effet qui consiste en « *une augmentation de quelques degrés de la température de la ville par rapport aux zones environnantes, (une différence plus prononcée notamment la nuit allant jusqu'au 8-10°C)* » (Givoni 1998)¹². Ce qui signifie que les tissus urbains emmagasinent de la chaleur durant la journée mais ne la libèrent que très peu durant la nuit contrairement aux zones rurales (Bonhomme 2015)¹³. L'atténuation de la vitesse du vent par la présence des bâtiments et la diminution de l'effet de la ventilation naturelle extérieure sont parmi les paramètres qui contribuent à l'intensification de ce phénomène.

⁹ : Le millénaire urbain, Rapport O.N.U dans le cadre de la Session extraordinaire de l'Assemblée générale des Nations Unies, New York, 6-8 juin 2001, In : <http://www.un.org/french/ga/istanbul5/kit2.pdf>.

¹⁰ : Givoni, B. (1998). *Climate consideration building and urban design*. Edition John Wiley and sons, Inc. New York, p.241.

¹¹ : Ibid., p.3.

¹² : Ibid., p.243.

¹³ : Bonhomme, M. et al. (2015). *Evaluation du potentiel d'économie d'énergie grâce aux dispositifs de rafraîchissement urbains, Ilots de Fraicheur Urbains*. Rapport final de recherche. ENSA Toulouse - INSA Toulouse. France, p.8

Il est à noter par ailleurs, que le vent représente un élément assez perceptible du microclimat urbain ; il peut être une source de fraîcheur et de ventilation en été, ou une source de nuisances en hiver en provoquant des états d'inconfort aux usagers en milieu urbain. « *Ce vent urbain, en particulier, peut être contrôlé et modifié par les formes urbaines et leurs géométries* »¹⁴. « *L'orientation des rues, le profil des constructions (forme, hauteur, dimension), leurs densité, leur orientation ainsi que leur configuration, sont alors les paramètres géométriques ayant un impact direct sur l'écoulement du vent en milieu urbain* »¹⁵.

Ces paramètres géométriques ne sont pas pris en considération lors de l'élaboration des plans d'urbanisme (P.O.S et P.D.A.U¹⁶). En effet, la pratique de l'urbanisme est fortement imprégnée par la réglementation. Ces instruments d'urbanisme figent les choix d'avenir à travers la réglementation de l'affectation des différentes activités dans la ville, de l'occupation du sol et sa densité ainsi que la forme urbaine. Aujourd'hui, l'un des plus grands défis posés aux urbanistes et gestionnaires de l'espace est de savoir comment pouvoir intégrer la géométrie urbaine dès la conception et de travailler sur une adaptabilité des espaces urbains vis-à-vis au climat notamment en climat humide.

La problématique des régions à climat humide est généralement liée au taux élevé d'humidité de l'air et à la ventilation urbaine. Les vents sont forts, froids et humides en hiver, et chauds et humide également en été. Ceci peut constituer un facteur de gêne dans les espaces extérieurs prononcé dans le cas du ralentissement de la ventilation et que la chaleur et l'humidité de la ville ne seront pas aisément dispersées. Cette question donc constitue de ce point de vue un aspect important à développer.

Jijel, ville côtière, jouissant d'un climat méditerranéen, est marquée par son ouverture directe sur la mer et un potentiel important des vents dominants provenant du nord-est en été et du nord-ouest l'hiver. D'après la rose des vents annuelle¹⁷, il a été déduit que les vitesses du vent entre 4 à 6 m/s et entre 6 à 8 m/s sont les plus fréquentes et prennent une direction nord à nord-ouest. En ce qui est de l'humidité, le taux élevé d'humidité peut atteindre une moyenne annuelle de 77% en été et dépasse les 78% en hiver¹⁸. Par leur intensité et leur fréquence, ces vents forts, froids et humides en hiver notamment, peuvent

¹⁴ : Op.Cit. Givoni, B. (1998), p.259

¹⁵ : Ibid., p.256

¹⁶ : P.O.S (plan d'occupation des sols), P.D.A.U (plan directeur d'aménagement et d'urbanisme).

¹⁷ : Voir Chapitre 3, cette rose des vents a été établie par les services spécialisés de la station météorologique de Jijel durant la période du 24/02/2001 au 27/08/2016.

¹⁸ : Données climatiques moyennes annuelles relevées à la station météorologique de Jijel (1999-2015). Cité dans le chapitre 3.

constituer un facteur de gêne important et de refroidissement dans les espaces extérieurs.

De ce fait, beaucoup de problèmes ont été constatés dans ces espaces dans la ville de Jijel en rapport avec la fréquentation et l'usage de ces espaces. Ces problèmes sont à l'origine de la mauvaise conception de ces espaces qui ne répond pas aux exigences climatiques spécifiques de la région et ne prend pas en considération le microclimat notamment les vitesses du vent et l'humidité relative. Et comme les conditions de la ventilation dans les zones urbaines dépendent pour une grande partie des plans d'urbanisme locaux, ce paramètre qu'est le vent, a été souvent négligé dans le processus de la conception. Compte tenu de toutes ces lacunes, la généralisation de l'intégration des considérations climatiques notamment le vent en urbanisme exige l'amélioration des connaissances sur le comportement du vent.

Les recherches conduites sur les écoulements d'air en milieu urbain sont nombreuses (**Ghasemia et al. 2015, Hong et al.2015, Varapaev et al. 2014, Weihong et al.2015, Moonena et al. 2012, Meroney 2016, Stathopoulos et Blocken 2016, Yongfeng et al.2012, Yuan et al.2016, Ramponi et al.2015, Tsang et al 2012, Kubota et al.2008, Yang et al.2014, Xing et al.2015, Ng et al.2011, Hefny Salim et al.2015, Lavigne et al 1994, Ng et al 2008, Penwarden et al 1975, etc.**). Ces études abordent le phénomène de ventilation urbaine autour des structures bâties (groupées ou isolées) et son interaction avec d'autres phénomènes thermiques à l'échelle des rues canyons où même à l'échelle d'un tissu urbain. Ces travaux suggèrent que les caractéristiques des écoulements du vent dans une rue peuvent être déterminées à partir de la géométrie de la rue, en particulier celle de son prospect H/w (où H est la hauteur des bâtiments, w est l'espacement entre les bâtiments formant la rue). Dans la plupart de ces études, les écoulements d'air sont visualisés en laboratoires par soufflerie ou modélisés par calcul numérique vu la complexité des phénomènes aérauliques.

Il est important de noter ici que l'effet de la topographie sur les écoulements de l'air a été négligé, les sites sélectionnés sont des sites urbains plats dépouillés de toute complexité topographique. L'effet donc d'une topographie complexe peut pourtant accentuer la force du vent ou au contraire la réduire en augmentant la turbulence. De tel effet vient souvent interagir avec celui de la morphologie urbaine, ce qui en résulte que les caractéristiques des écoulements d'air générés par une topographie complexe restent inconnues. Egalement la quasi-totalité des recherches en soufflerie ou par simulation numérique considèrent des prospects des rues idéals avec des géométries simples et ne

tiennent pas en compte des géométries complexes. Ces études ont montré donc l'impact de la géométrie urbaine sur l'écoulement du vent dans les espaces extérieurs. Mais très peu sont ceux qui ont traité le contrôle du vent dans l'espace urbain extérieur.

A partir des considérations évoquées ci-dessus, diverses questions émergent alors :

- Dans quelle mesure la géométrie de l'espace urbain extérieur peut-elle contrôler les effets nuisibles dus au vent ?
- Quels sont donc les paramètres géométriques du profil urbain à considérer lors de la conception d'un espace urbain vis-à-vis le vent ? et comment peut-on les optimiser ?

3. HYPOTHESES

Pour répondre à cette problématique, on pourra apporter quelques hypothèses comme suit:

- Dans l'espace urbain, le comportement du vent pourra être contrôlé par la géométrie que pourra avoir cet espace (forme, hauteur et dimensions).
- Le profil H/w (où H est la hauteur des bâtiments, w est l'espacement entre ces bâtiments) pourra être le paramètre géométrique à prendre en compte et qui aura un impact sur le vent. La simulation numérique est l'outil qui permettra d'aller vers l'optimisation des caractéristiques géométriques de l'espace extérieur.

Le but de la présente recherche consiste à développer des techniques méthodologiques d'aide à la conception des espaces urbains extérieurs, principalement dans le contexte urbain où le vent est une donnée essentielle avec laquelle il faut composer. Elle vise la recherche de paramètres typo-morphologiques générant des espaces de qualité et leur introduction dans le processus conceptuels afin d'améliorer la conception des espaces urbains, de contrôler son comportement et son écoulement et offrir par conséquent plus de confort pour les usagers.

D'une manière plus précise, il s'agit **d'identifier les paramètres géométriques** les plus importants, qui doivent être considérés en amont de toute conception de ces espaces, lors d'établissement des opérations d'urbanisme sur les tissus urbains.

Par la suite, optimiser ces paramètres en s'appuyant sur la simulation numérique. Cet outil très important, permet d'améliorer les caractéristiques géométriques de ces espaces, et donc proposer une géométrie optimale offrant abri, confort et ventilation.

4. METHODOLOGIE ET OUTILS DE RECHERCHE

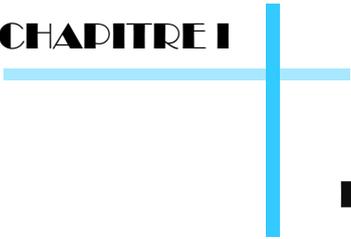
Ce travail repose sur l'idée que les quartiers d'habitat collectifs, dotés d'espaces extérieurs diversifiés du point de vue typo-morphologique, présentent une variété d'ambiances notamment celle aéraulique qui contribue au développement du sentiment de bien-être ou d'un inconfort chez les usagers. L'évaluation de cette ambiance aéraulique et sa corrélation avec la perception des usagers permettrait de définir les caractéristiques de l'espace extérieur.

Afin d'atteindre les objectifs cités et d'aboutir à un résultat, cette étude s'articule autour de deux volets principaux:

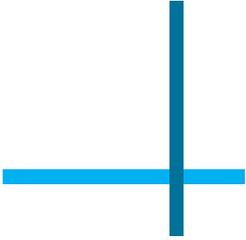
- Une partie théorique dédiée aux repères théoriques issus d'une analyse bibliographique et documentaire, répartie en deux chapitres dans lesquels les différents concepts tirés des références bibliographiques et des recherches précédentes sur lesquelles sera basé notre travail. Cela, afin de mieux cerner et comprendre tous les éléments théoriques de base en rapport avec notre sujet et d'orienter la recherche vers les objectifs ciblés.
- Une deuxième partie pratique sera répartie en trois chapitres. L'outil de travail se résume dans la simulation numérique et la mesure in-situ. La première étape de ce travail pratique vise à analyser les espaces extérieurs des quartiers d'habitat collectif conçus au niveau de l'ACL de Jijel, qui, selon plusieurs auteurs, représentent une référence dans la composition, la hiérarchisation et la diversité typo morphologique. Commenant en premier lieu par répertorier et identifier les caractéristiques de ces espaces. En deuxième lieu, nous interrogeons la perception des usagers, en procédant par des enquêtes in situ et nous effectuons des mesures microclimatiques dans différents espaces choisis. Autrement dit, cette partie comprend la présentation du cas d'étude, la méthodologie de travail (chapitre 3), l'investigation sur terrain et l'interprétation des résultats (chapitre 4) à travers lesquels la simulation numérique sera établie en utilisant le logiciel ENVI-met V4.3.0. Sous la base des résultats obtenus de cette phase, les paramètres géométriques seront améliorés en élaborant des scénarios qui feront l'objet du chapitre 5.

Et enfin une conclusion générale, des recommandations et des perspectives de recherches seront établies afin de répondre aux questionnements et la vérification de l'hypothèse de la recherche.

CHAPITRE I



Éléments de caractérisation de la morphologie urbaine et ses interactions microclimatiques



"Donner forme à la ville, c'est lui imprimer une certaine composition, un jeu des vides et des pleins dans l'espace construit, c'est aussi créer des représentations qui en rendent compte ou qui idéalisent la forme." Denise Pumain (2006)¹⁹

CHAPITRE I : ELEMENTS DE CARACTERISATION DE LA MORPHOLOGIE URBAINE ET SES INTERACTIONS MICROCLIMATIQUES

1.1. Introduction

Le milieu urbain consiste en une configuration complexe constituée par l'adjonction de formes urbaines variées, qui traduisent chacune la conception de la ville et de la vie en commun à une époque donnée. L'ensemble des villes d'aujourd'hui présentent de nombreuses différences dans leur organisation spatiale, qui s'expriment notamment dans les formes de répartition des densités à l'intérieur des villes. Ces différences de répartition s'expliquent en partie par les différences géométriques historiques existant entre ces villes.

Parler d'une ville, c'est d'abord évoquer sa morphologie urbaine qui signifie « *la forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments, ainsi que les espaces qu'ils créent* »²⁰. Elle combine la notion de la forme urbaine, la géométrie urbaine avec les matériaux des surfaces. L'urbanisation accélérée des dernières décennies entraîne la modification du climat de la ville et interagissent avec les paramètres microclimatiques (rayonnement solaire, l'écoulement du vent, température de l'air et des surfaces) transformant ainsi le microclimat, et par conséquent le confort des usagers dans les espaces extérieurs.

Vu la forte liaison entre la morphologie urbaine et ces conditions microclimatiques notamment par rapport au vent, il s'avère pertinent d'étudier, à travers ce chapitre, ces interactions, d'examiner leur impact sur le confort thermique, le confort au vent des piétons à l'extérieur.

¹⁹: Pumain, D., Paquot, T., Kleinschmager, R. (2006). *Dictionnaire La ville et l'urbain*. Éditions Economicaanthropos. Paris.

²⁰ : Steemers Koen, A. et al. (2004). *Morphologie urbaine*. Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces – coordonné par le CRES, Département des bâtiments (<http://alpha.cres.gr/ruros/>), Grèce.

Dans un premier temps, ce chapitre présentera la définition de la morphologie urbaine ainsi que ses différents types de formes associées. Dans un second temps, on définit le lien entre la morphologie urbaine et le microclimat en présentant le bilan énergétique urbain, les flux associés et l'analyse de l'impact de la morphologie urbaine sur ces flux. Ensuite, les indicateurs morphologiques influençant les paramètres de confort (rayonnement solaire et température de l'air et de surface) seront identifiés. Ce croisement des paramètres physiques et morphologiques a pour objectif de distinguer les indicateurs morphologiques les plus déterminants pour répondre aux défis urbanistiques de demain.

1.2. Cadre théorique lié aux notions de morphologie urbaine

De nombreuses définitions ont été accordées au concept de morphologie urbaine pour l'en désigner. Cette notion, difficile à saisir, car éminemment vaste, soumise aux aspects social, culturel, historique, politique, climatique, paysager, urbain et géographique des villes. Les premières recherches morphologiques datent en 1959 en Italie sous la direction de Saverio Muratori, fondateur de la discipline de la typo-morphologie ou morphologie urbaine (école italienne). Celui-ci désire étudier la forme et l'organisation des bâtiments dans la ville afin d'y déceler les savoir-faire anciens.

Tout d'abord, il est indispensable d'écarter toute confusion existante entre les deux notions de morphologie et de forme urbaine. Parlant de morphologie urbaine, cela signifie d'après **Stemers (2004)** « *la forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments ainsi que les espaces qu'ils créent* »²¹. **Allain (2005)** a défini la morphologie urbaine comme « *L'étude de la forme physique de la ville, de la constitution progressive de son tissu urbain et des rapports réciproques des éléments de ce tissu qui définissent des combinaisons particulières, des figures urbaines (rues, places et autres espaces publics...)* »²². Cette définition révèle que l'objet principal de la morphologie urbaine est la forme urbaine, qui selon **Lévy (2005)**²³, est une notion difficilement décrite vu la complexité de sa polysémie, et la diversité des points de vue selon lesquels elle a été perçue.

Etymologiquement du latin forma « moule, type, image » et urbs « ville », la notion de "forme urbaine" est pluridisciplinaire. Elle est utilisée par les urbanistes, architectes, géographes et sociologues urbains et présente un champ extrêmement large de significations. L'expression forme urbaine a été initialement introduite pour décrire

²¹ : Steemers (2004). Op. cit.

²² : Allain, R. (2005). *Morphologie urbaine: géographie, aménagement et architecture de la ville*. Armand Colin édition. Paris, p.05

²³ : Lévy, A. (2005). Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et sociétés*. Vol.4, N° 122, pp. 25-48.

l'évolution des structures physiques de la ville, principalement son cadre bâti durant les années 1960-1970 avec les études typologiques de Aymonino C. en 1970 sur la ville de Venise et Padoue²⁴. Par ailleurs, ce terme peut être saisi de différents angles ; plusieurs approches ont été développées dans ce sens par Lévy (2005)²⁵ qui a pris le soin de les énumérer. On cite donc l'approche de la forme urbaine comme forme du paysage urbain qui s'intéresse à étudier le paysage et ces caractères visuels. Dans cette vision, les travaux de Kevin Lynch sont la référence. Ensuite on trouve l'approche de la forme urbaine comme forme bioclimatique dans laquelle l'espace urbain est abordé selon sa dimension environnementale microclimatique. Escourrou (1980²⁶, 1991²⁷) est l'un des chercheurs qui s'intéresse à la forme bioclimatique, notamment par ses études sur la climatologie et la forme urbaine.

Le climat a longtemps joué un rôle déterminant dans la création de la forme urbaine. L'intégration au climat dans la planification des villes se voit à travers les différentes recherches entreprises par Péneau (1993)²⁸ sur l'ajustement climatique des villes. De sa part, Golany (1996)²⁹ a souligné l'importance de l'intégration au climat dans le choix des formes urbaines à travers la création d'une proposition indiquant la relation entre les différents profils climatiques et la forme urbaine résultante [Tableau 1.1]. Il a aussi précisé la relation entre le vent et la morphologie urbaine à travers l'orientation des rues et l'élargissement des voies.

Par ailleurs, l'approche de la forme urbaine comme forme des tracés urbains s'intéresse à la forme géométrique des plans des villes. L'approche de la forme urbaine comme forme des tissus urbains, quant à elle, a trait à étudier des interrelations entre les éléments composants le tissu (parcellaire/viaire/espace libre/espace bâti). En dernier lieu, la forme urbaine a été considérée comme forme sociale qui s'attache à étudier les divers groupes sociaux (démographiques, ethniques) occupant l'espace urbain. Au delà de ces divergences sur les phénomènes décrits par le terme de forme urbaine, il existe une

²⁴ : Raynaud, D. (1999). Forme urbaine: une notion exemplaire du point de vue de l'épistémologie des sciences sociales. *Actes du Colloque "Langages singuliers et partagés de l'urbain"*, L'Harmattan, Paris, pp. 93-120.

²⁵ : Lévy, A. (2005), Op.Cit, pp. 30-31.

²⁶ : Escourrou, G. (1980). L'influence de l'urbanisation sur les précipitations de la région parisienne. *Cahiers de géographie Physique*, N°4, Université de Lille.

²⁷ : Escourrou, G. (1991). Le climat et la ville. Nathan Université.

²⁸ : Péneau, J.P. (1993). *Ajustement climatique et traces urbains au siècle des lumières*. Université de Nantes. Centre d'Histoire des sciences et des Techniques.

²⁹ : Golany, G. (1996). Urban Design Morphology and Thermal Performance. *Atmospheric Environment*. Vol 30, N° 3, pp. 45-65.

multiplicité des concepts de formes urbaines qui se traduit en anglais par plusieurs désignations à savoir urban form, urban design, urban shape.

Tableau 1. 1 : Formes urbaines adaptées aux différents types de climat.
Source: Golany (1996) cité par Wang (2015)

Type de climat	Profil principal	Type de forme urbaine proposée
Chaud-humide (ex. zone équatoriale)	<ul style="list-style-type: none"> • Chaleur diurne et saisonnière avec faible amplitude de température • Pluie importante • Plus agréable en haut altitude 	Ouvert, dispersé
Froid-humide (ex. sud Canada)	<ul style="list-style-type: none"> • Neigeux • Venteux en condition de tempête de neige • Soirs très froids 	Mélange de forme ouvertes et fermées
Chaud-sec (ex. Moyen-Orient et Afrique du Nord)	<ul style="list-style-type: none"> • Fort rayonnement solaire • Grande amplitude de température entre le jour et la nuit • Tempêtes et pluies torrentielles • Nuages bas • Déshydratation intense • Salinisation élevée • Evaporation supérieure aux précipitations. 	Forme compacte
Froid-sec (plaines intérieures)	<ul style="list-style-type: none"> • Stressant • Inconfortable • Fort vent froid et sec 	Forme compacte
Côtes (d'une rivière, d'un désert)	<ul style="list-style-type: none"> • Venteux et orageux • Brise systématique • Humidité élevée • Erosif 	Pour les régions humides : forme moyenne dispersée Pour les régions sèches : ouvert à la mer, forme compacte et protégée vers intérieur
Montagne	<ul style="list-style-type: none"> • Venteux et circulation importante de l'air • Humidité relative plus élevée que les basses terres • Climat sain et modéré 	Forme semi-compacte

Plus récemment, la morphologie urbaine fait l'objet de plusieurs études mais abordée sous divers angles, notamment en ce qui concerne la consommation énergétique et l'efficacité énergétique des formes urbaines (Arantes et al. 2016, Benamor 2017, Samba 2018, Schoetter et al. 2019), la problématique environnementale et climatique (Fouchier 1998, Sénécal 2006, Lotteau 2017, Carpentieri et al. 2015, Chen et al. 2015, Colombert 2008, Bouzir 2018), planification urbaine et caractérisation des tissus urbains et des villes

(Attila 1998, Brunner 2005, Dupont et al. 2012, Rheault 2016), microclimat urbain (Donkyou et al 1997, Tebbani 2018, Wang 2015, Mouffok 2018, Blocken et al. 2013, Xie et al. 2008), mobilité urbaine (Wester 2017, Tran et al 2014, Badariotti 2014, Le Feon 2014). Dans ce travail de recherche, la morphologie urbaine sera abordée selon sa dimension microclimatique liée à l'écoulement du vent autour des formes physiques de la ville.

1.3. Différentes approches de mesure et d'évaluation de la morphologie urbaine

Plusieurs approches morphologiques se sont apparues pendant les années 70. Elles s'intéressent, dans la majorité, à établir des indicateurs et des indices quantitatifs de forme.

1.3.1. Les indices et les indicateurs

Un indice est l'expression cumulée de plusieurs indicateurs. L'indice de forme est un paramètre, un coefficient ou combinaison de coefficients permettant de donner des renseignements chiffres sur la forme. **Maignant (2005)**, dans son étude sur la compacité et forme urbaine, décrit trois (03) indices classiques d'étude des formes, connus sous les noms de Miller, Morton et Gravelius³⁰. «Ce type d'indices est très utilisé dans les calculs d'optimisation de formes. Les trois indices renseignent sur la compacité des formes, car plus la forme est compacte, plus son indice tend vers 1»³¹. Par contre un indicateur est un paramètre, ou valeur dérivée d'un paramètre, une variable qualitative ou quantitative qui donne des informations sur un phénomène. «Un indicateur est une donnée sélectionnée dans un ensemble statistique plus important qui possède une signification et une représentativité particulières. C'est aussi un instrument capable de convoier de l'information sous forme synthétique, par le biais de différentes représentations (nombres, graphiques, cartes thématiques, etc.) ».³²

1.3.2. La géométrie fractale

La géométrie fractale³³ est considérée comme indicateur de la morphologie urbaine. Les fractales sont des outils de classement des phénomènes urbains et constituent un grand pas dans la compréhension de leur complexité. Cette géométrie fractale peut être donc

³⁰ : Ces indices n'ont pas de dimensions et leur valeur représente une donnée absolue.

³¹ : Maignant, G. (2005). Compacité et forme urbaine, une analyse environnementale dans la perspective d'un développement urbain durable. *Colloque sur le développement urbain durable, gestion des ressources et gouvernance. Université de Lausanne*. 21-23 Septembre, p.03.

³² : Ibid., p.02.

³³ : Le terme est un néologisme forgé par Benoît Mandelbrot en 1975 à partir du latin fractus, qui dérive lui-même du verbe Frangere qui veut dire casser, mettre en pièces, ou briser en fragments irréguliers. Donc fractal signifie fragmenté, fractionné, irrégulier ou interrompu, (Salat, S. 2011, p.58)

utilisée pour caractériser quantitativement les propriétés morphologiques des tissus urbains, en particulier ceux traditionnels des villes historiques, qui sont un immense laboratoire pour examiner les relations de l'homme, du climat et des villes (**Dechaicha 2013, Frankhauser 2017**).

1.3.3. La syntaxe urbaine

La syntaxe urbaine s'élabore à travers la déclinaison savante de la distribution des éléments : la géométrie des tracés, des axialités et des trames [Figure 1.1]. Elle a pour objectif de mesurer les configurations spatiales, d'étudier la relation entre la structure spatiale et l'environnement bâti et urbain, de les analyser, simuler et planifier par la suite. Selon Salat (2011)³⁴ les composants fondamentaux de la syntaxe urbaine sont les bâtiments en trois dimensions (3D), les parcelles en deux dimensions (2D), et les voies (1D).

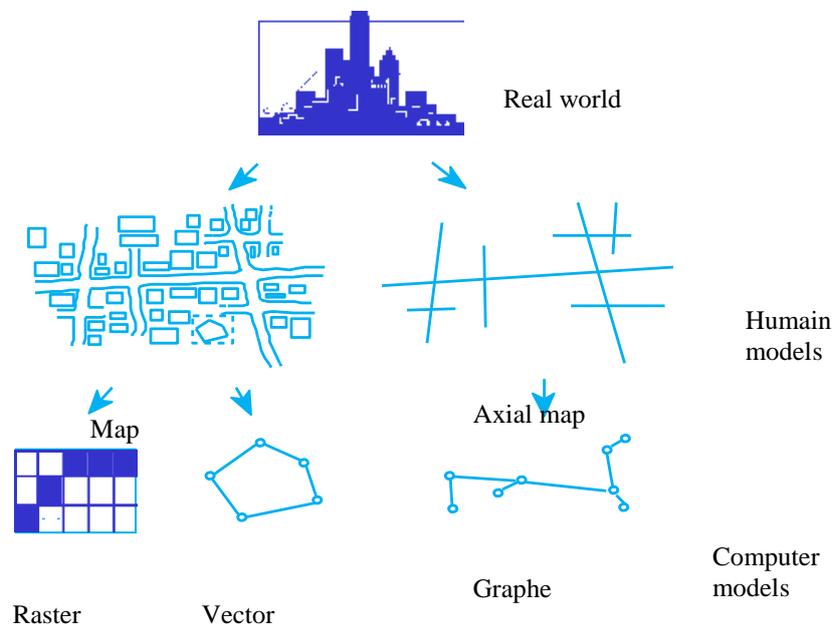


Figure 1. 1: Représentation spatiale de la syntaxe urbaine.
Source : Claramunt (2005)³⁵

1.4. Typologie de modules caractérisant la morphologie urbaine

Construire des villes signifie donner forme à des ensembles et à des espaces avec les éléments plastiques que sont les maisons. Cette expression d'Albert Brinckmann³⁶ en 1908 révèle que la ville est plus qu'une simple juxtaposition de bâtiments ; elle est constituée de

³⁴ : Salat, S. (2011). *Les villes et les formes sur l'urbanisme durable*. Édition C.S.T.B et Hermann. Italie, p.41.

³⁵ : Claramunt, C. (2005). *Syntaxe spatiale : vers de nouvelles formes de représentation d'une certaine logique de la cité*. *Septièmes Rencontres de Théo Quant, Besançon. France*.

³⁶ : Albert Erich Brinckmann (1881-1958), était historien d'art allemand de renommée internationale et éditeur. Il était l'un des plus importants critiques d'art allemands dans la première moitié du 20^{ème} siècle, et a reçu de nombreux prix et distinctions internationales prestigieuses.

modules structurants, que l'on peut aussi appeler modules de morphologie urbaine. Ces éléments apparaissent dans le plan d'une ville sous diverses formes et géométries : en tant que bande, îlot, cour, passage, barre, bâtiment isolé ou ensemble. Ces modules, comme indique **Bürklin et al. (2008)**³⁷, exercent une influence directe sur le tissu urbain par leurs caractéristiques formelles et spatiales. En réalité, il existe une grande variété d'imbrications et de modules. Les principaux modules de morphologie urbaine sont :

1.4.1. La bande (ou la rangée)

La bande (ou rangée) compte parmi les modules les plus anciens et importants de la composition urbaine. Les bandes peuvent se présenter sous des formes qui s'écartent du principe de simple juxtaposition linéaire en allant vers la forme brisée ou même en courbe selon le tracé de la rue. On trouve en effet des bandes ouvertes dans lesquelles se trouve l'espace libre, d'autre fermées sans espace libre, des bandes simples ou doubles [Figure 1.7]. Les bandes représentent une grande partie de la structure spatiale de base de nos villes. Ainsi, les conditions d'éclairage et d'ensoleillement des maisons varient selon l'orientation, la topographie ou la typologie des rangées. Quant à la ventilation, cette typologie offre une meilleure ventilation selon **Ng (2005)**³⁸. Afin de minimiser l'obstruction du flux d'air, les blocs de construction sont de préférence disposés sous une forme linéaire avec l'axe principal parallèle au vent dominant [Figure 1.2]. Cependant, une bande ouverte est aussi favorable et permet de mieux capter le vent.

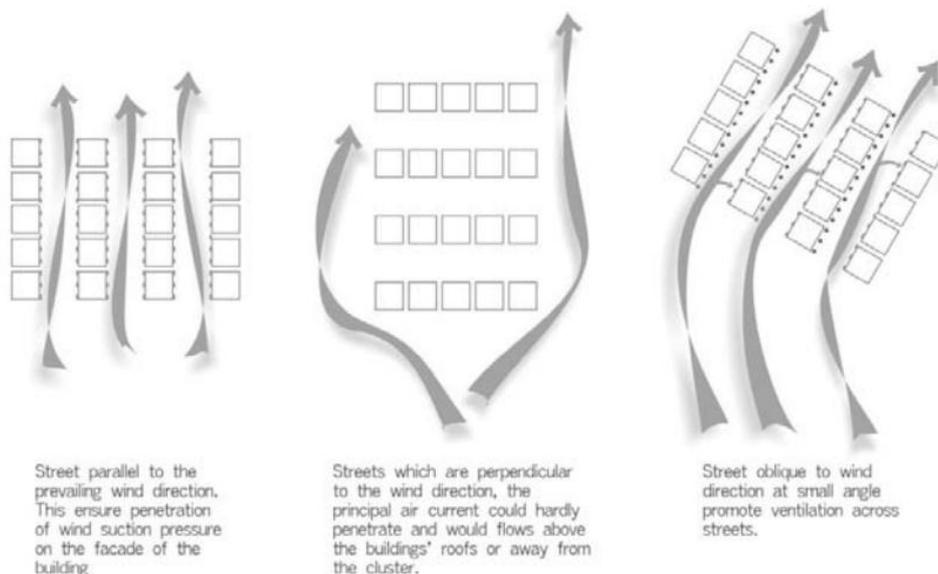
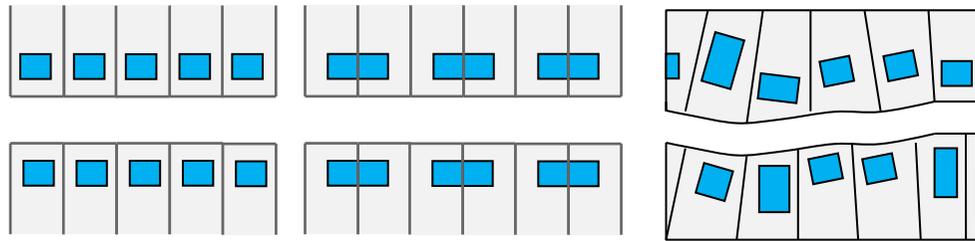


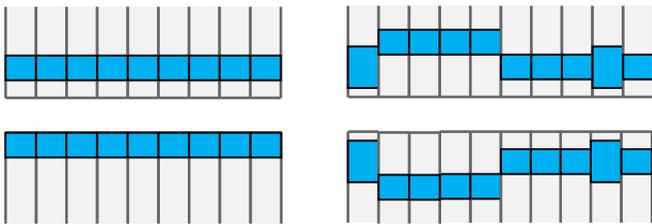
Figure 1. 2 : Disposition en bande et orientation optimales
Source Ng (2005).

³⁷ : Bürklin, T. et Peterek, M. (2008). *Basics Morphologie urbaine*. Edition Birkhäuser. Berlin, p.09.

³⁸ : Ng, E. (2005). Feasibility Study for Establishment of Air Ventilation Assessment System. *Final report*. The Chinese University of Hong Kong.



(b) Bandes ouvertes (simples, doubles, linéaire ou en courbe)



(a) Bandes fermées sous une ligne continue formant un tissu serré

Figure 1. 7 :
Différents types de
bandes. (a) bandes
ouvertes, (b) bandes
fermées. Source :
Bürklin et al. (2008).

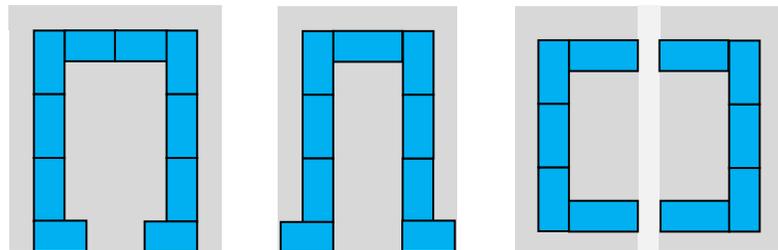


Figure 1. 5: Différentes formes de cours
Source : Bürklin et al. 2008

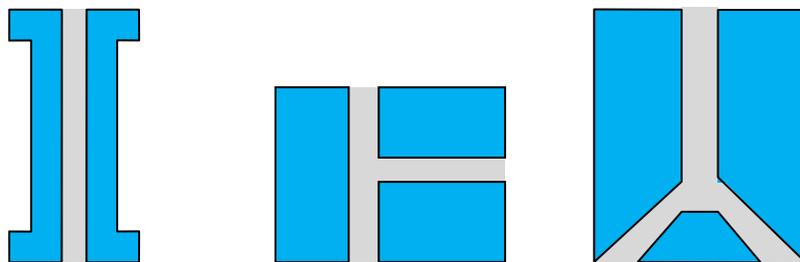


Figure 1. 3: Différentes configurations de passages
Source : Bürklin et al. 2008

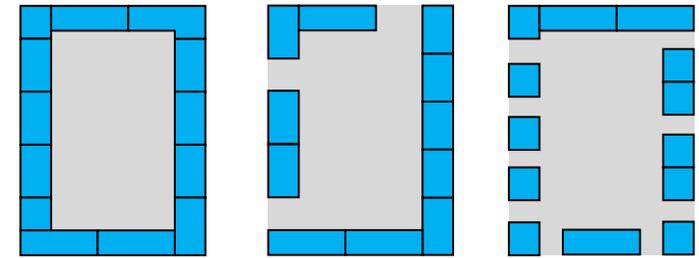


Figure 1. 6: Degré d'ouverture des îlots (ouverts – fermés)
Source : Bürklin et al. 2008

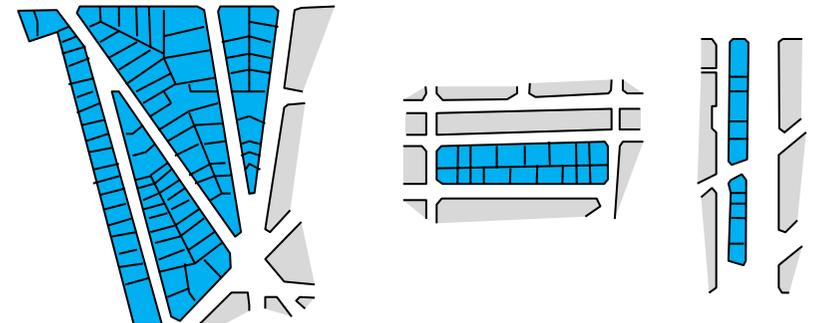


Figure 1. 4: Différentes formes géométriques de l'îlot haussmannien
Source : Panerai et al. 1999

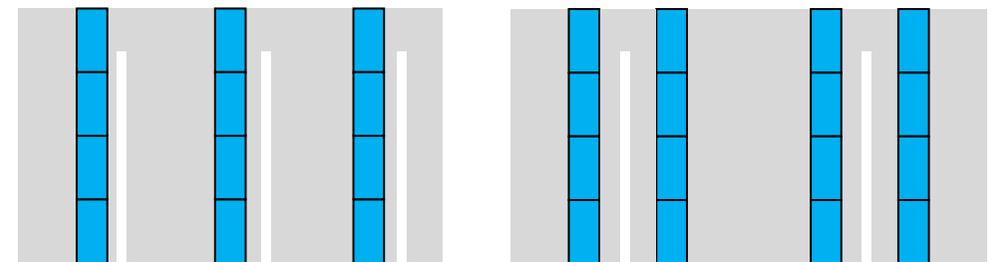


Figure 1. 8: Disposition de barres. (a) barre en série, (b) barre jumelle. Source : Bürklin et al. 2008

1.4.2. L'îlot

Il est l'un des éléments les plus anciens et importants de l'urbanisme et qui a marqué la structure de la ville européenne jusqu'au début du 20^e siècle [Figure 1.3]. L'îlot désigne un groupe de maisons, d'immeubles délimités par des rues dans une ville. Mais l'îlot est d'abord un ensemble de parcelle limité par des voies. Il est caractérisé par son ouverture. D'après **Allain (2005)**³⁹, il existe des îlots fermés autour d'un noyau comportant des espaces privatifs (cour, jardin, espace vert, etc.), des îlots ouverts visuellement quand les limites du bâti laissent voir l'intérieur de l'îlot à travers des proches ou des ruelles [Figure 1.6], et des îlots hyperdenses qui peuvent être entièrement bâtis.

Outre le degré d'ouverture, l'îlot cache en réalité des types morphologiques et peut se présenter sous formes géométriques très variables et quasiment infinies à savoir triangulaires, rectangulaires, carrés, ou encore polygonale [Figure 1.6]. Chaque forme géométrique conditionne la volumétrie, l'éclairage, l'ensoleillement, les ambiances et la qualité des espaces intérieurs. Une recherche sur le microclimat urbain dans le quartier du Panier en période chaude (Marseille) a montré que la morphologie du bâti (à savoir densité, la hauteur des constructions, largeur des rues, etc.) et l'orientation des avenues par rapport au soleil et aux vents dominants sont les éléments qui modifient le microclimat dans ce tissu historique (**Briche 2016**).

1.4.3. La cour (l'îlot inversé)

Au niveau de l'organisation urbaine, une disposition autour d'une cour est souvent perçue comme une inversion de l'îlot. Il s'agit de bâtiments regroupés autour d'un espace libre central [Figure 1.5]. Ces espaces libres qui composent le tissu ancien sont devenus actuellement des places publiques. **Belmaaziz (2015)** a étudié la qualité des ambiances microclimatiques dans le quartier du Panier (Marseille) pendant la période d'été. Certains phénomènes de surchauffe ou de rafraîchissement constatés lors de l'analyse des résultats sont dus aux caractéristiques spatiales de ces espaces urbains (hauteur/largeur).

1.4.4. Le passage

En principe le passage (ou galerie) est une rue couverte. Ce mot renvoie d'abord à l'idée d'un chemin qui mène d'un endroit à un autre en passant entre des bâtiments. Les passages peuvent être rectiligne, courbes ou composer des angles, ils peuvent suivre à peu près n'importe quelle forme linéaire et aussi se ramifier [Figure 1.4]. En augmentant leur largeur aux intersections, on peut créer des placettes. **Katarzym et al. (2004)** ont évalué

³⁹ : Allain, R. (2005). Op. Cit. p.101.

l'écoulement du vent dans des passages dans une recherche menée à Warsaw (Pologne). Les passages les plus larges sont confortables, par contre l'endroit le plus désagréable pour les piétons est les passages réduits recevant des vitesses fortes.

1.4.5. La barre

Les barres sont des modules de morphologie urbaine linéaires et isolés qui se libèrent volontairement de la rue. Elles se disposent perpendiculaires à la rue en unité parallèle, ou en barre jumelle, où entre les bâtiments, alternent les espaces libres [Figure 1.8]. Ces variations de disposition, permettent de modeler l'espace urbain. L'orientation des barres par rapport au vent est importante. L'effet de l'écoulement du vent sur les barres engendre ce qu'est nommé par l'effet de barre. Selon **Chatelet et al. (1998)** ce phénomène pourra exister dans le cas de la hauteur $H < 25$ m, et la longueur minimum de la barre $L > 8H$. Les barres isolées, ou groupées et alignées sans un grand espacement subissent également le même effet.

1.4.6. Les ensembles

On entend par ensemble *un regroupement de bâtiments défini plus par une composition interne que par un plan d'urbanisme*⁴⁰, créant ainsi une organisation complexe dense. Les ensembles sont avant tout des programmes d'habitation, mais ils peuvent aussi toucher d'autres fonctions comme les bâtiments d'enseignements (campus universitaire), les centres hospitaliers ou les parcs d'activités [Figure 1.9], et qui peuvent atteindre une densité urbaine élevée. Riche en composition, l'ensemble recrée son propre espace urbain interne ou se forment des lieux de rencontres et d'échanges attractifs adaptés aux piétons.

La relation entre la morphologie des quartiers résidentiels et le comportement du vent a fait l'objet de plusieurs recherches. La densité, les hauteurs des bâtiments et leur configuration étaient parmi les paramètres les plus étudiés (**Du 2009, Schnabel et al. 2017, Zheng et al. 2016, Jin et al. 2017, Ying et al. 2016, Wang 2018, Kaihua et al. 2018**).

En résumé, la connaissance des qualités et des structures de chaque module de morphologie urbaine, permet d'appréhender les relations spatiales d'une échelle à une autre. Ce n'est qu'au niveau du quartier ou d'une ville que les relations et les interactions entre ces modules donneront forme à ces espaces.

⁴⁰ : Bürklin et al. (2008). OpCit., p.59.

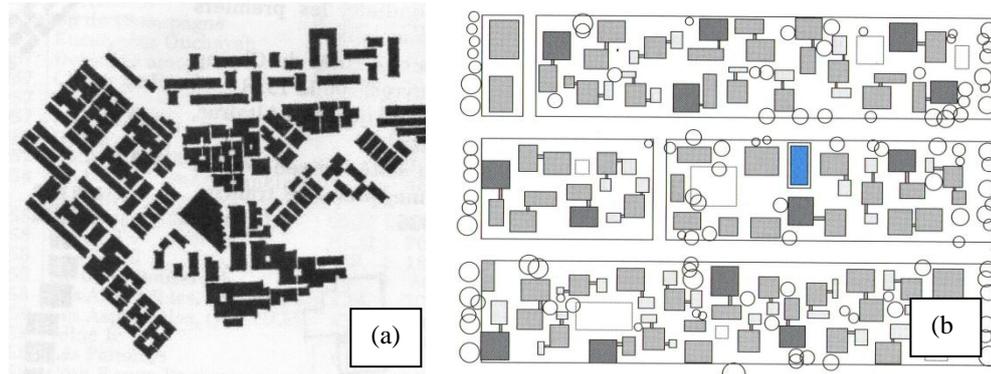


Figure 1. 9: Exemples d'ensemble d'habitation.
(a) Cité La Montagne –Alger, (b) lotissement du Werkbund – Munich
Source : (a) Deluz 2010, p.258, (b) Bürklin et al., 2008, p.63

1.5. Indicateurs morphologiques déterminants dans la caractérisation de la morphologie urbaine

La variation et la diversité des microclimats dans les espaces urbains semblent influencées par la diversité et la complexité de la morphologie urbaine. Dans ce contexte, plusieurs paramètres ont été étudiés pour analyser la relation entre la morphologie et le microclimat urbain (Adolphe 2001, Ait-Ameur 2002, Benzerzour 2004, Ouameur 2007, Colombert 2008, Bouyer 2009, Tsoka 2011, Athamena 2012, Tebbani 2018, Mouffok 2018). Mais dernièrement dans les domaines opérationnels liés à la question de la qualité environnementale, on assiste à une utilisation de plus en plus persistante du terme indicateur. Son rôle principal est de réduire le nombre de paramètres nécessaires pour rendre compte d'une situation, et de simplifier l'interprétation des résultats auprès des intervenants sur le cadre bâti⁴¹.

Afin d'approcher la multiplicité des ces indicateurs morphologiques, nous exposons les travaux qui ont tenté de les définir et qui ont pour objectif d'évaluer les interactions de la morphologie urbaine, du cadre bâti et du microclimat.

1.5.1. Indicateurs d'interaction de l'espace construit et du physique

Ils tentent de caractériser le cadre bâti et son influence sur les phénomènes physiques. Selon la lecture pertinente faite par Benzerzour (2004)⁴², ils se déclinent en

⁴¹ :Berezowska–Azzag, E. (2011). *Projet urbain guide méthodologique : connaitre le contexte du développement durable*. Édition Synergie,p.119.

⁴² : Benzerzour, M. (2004). *Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique"*. Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, pp.235-243.

deux catégories : les indicateurs morpho-physiques et les indicateurs physico-morphologiques. Dans cette optique, les travaux de **Bottema (1997)**⁴³ visent d'approcher les aspects aérodynamiques de la forme urbaine. Les indicateurs considérés sont la rugosité absolue, la rugosité relative, la porosité et la sinuosité du tissu urbain.

Il est généralement question dans ces travaux de caractériser par des indicateurs morphologiques la variation des paramètres climatiques (direction et vitesse du vent, températures d'air et de surfaces, variation de l'humidité de l'air), des bilans énergétiques, de l'irradiation solaire, de la pollution atmosphérique ou sonore ou encore de l'éclairement naturel dans les espaces et les ensembles urbains. On cite ici trois travaux **Groleau et al. (1995)** qui a étudié les caractéristiques solaires de trois tissus urbains en fixant les indicateurs de la hauteur moyenne des bâtiments, la densité bâtie, l'homogénéité des bâtiments, la directionnalité et l'orientation, l'exposition moyenne des façades et leur déviation, la largeur moyenne de la rue, le prospect H/w, degré d'ouverture de l'espace urbain et sa typologie. Selon une démarche similaire, **Adolphe (2001)** a proposé la définition d'un certain nombre d'indicateurs basés sur une lecture morphologique des fragments urbains⁴⁴. Il réduit ainsi la complexité de la morphologie urbaine à un modèle défini par quatre indicateurs classés selon les phénomènes physiques dont ils sont caractéristiques: densité, rugosité (absolue et relative), sinuosité, porosité, sans aller jusqu'à valider la pertinence de ces indicateurs.

Dans son étude paramétrique menée à Toulouse et Blagnac – France, **Aït-Ameur (2002)** a analysé plusieurs échantillons urbains (rues, places,...etc.). *L'objectif de cette recherche était de développer une méthodologie permettant de matérialiser la relation entre la morphologie urbaine et le climat*⁴⁵. L'auteur a pu établir une synthèse paramétrique [Tableau 1.2] où les indicateurs morphologiques ainsi que les paramètres climatiques (température de l'air, humidité relative, température rayonnante et la vitesse du vent) ont été représentés. Cette synthèse illustre les différents indicateurs morphologiques responsables des variations microclimatiques près du sol et montre également les différents facteurs climatiques concernés par la variation de ces paramètres. A l'échelle du tissu

⁴³ : Bottema, M. (1997). Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion. *Atmospheric Environment*. Vol 31, N° 18, pp. 3059-3075.

⁴⁴ : Adolphe, L. (2001). Modelling the link between built environment and urban climate : towards simplified indicators of the city environment. *Seventh International IBPSA Conférence. Rio de Janeiro-Brésil*, pp 679-684.

⁴⁵ : Ouameur, A.F. (2007). Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics : étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec. Thèse de doctorat, Université LAVAL. Québec, p 03.

urbain, tout en faisant référence au tableau ci-dessous, les indicateurs considérés, selon des critères morphologiques bien déterminés, sont la densité du bâti, la minéralisation, le taux de percement horizontal du tissu urbain et la rugosité du tissu urbain. Ces deux derniers indicateurs sont fortement liés à l'implantation du bâti, la nature des textures (minérale, végétale), et ont un impact microclimatique sur la vitesse du vent.

D'autre part, un nombre important d'indicateurs ont été sélectionnés à l'échelle de l'espace public afin d'analyser la géométrie urbaine, le mode d'organisation spatiale et les types d'aménagement dans l'espace. En se concentrant sur le paramètre de la vitesse du vent, les indicateurs morphologiques sont : prospect équivalent qui est en fonction de la hauteur des façades et la largeur de l'espace H/w , longueur équivalente est liée à la largeur et la longueur de l'espace w/L , facteur d'obstruction minérale qui est en relation avec la hauteur de la façade et la distance du point à la façade, densité végétale qui prend en considération la répartition des surfaces végétales dans l'espace, taux d'emprise des obstacles urbains dans l'espace qui est influencé par le nombre des obstacles dans l'espace et leur hauteur.

Tebbani (2018) de sa part a travaillé sur l'effet de la morphologie et la végétation sur les échanges radiatifs dans les espaces extérieurs afin d'évaluer le confort thermique. Un ensemble d'indicateurs de la performance urbaine ont été utilisés. Les indicateurs choisis à l'échelle du tissu urbain sont : densité bâtie, rugosité et porosité urbaine. A l'échelle de l'espace public on cite : facteur de vue de ciel (SVF), ratio H/L , degré d'enclosure (DoE) et l'albédo moyen des surfaces.

On retrouve aussi des travaux qui ont tenté une validation d'un certain nombre d'indicateurs morphologiques du point de vue de leurs effets microclimatiques. **Salat (2011)**⁴⁶ a présenté dans ce sens des indicateurs liés à la morphologie à l'intérieur du tissu urbain à savoir : forme des bâtiments, forme des rues et des réseaux à l'intérieur de la ville. L'indice de forme des rues qui est un paramètre déterminant pour le vent en milieu urbain. Il influe tant sur le refroidissement naturel des villes que sur la dispersion des polluants. Il a aussi proposé des indicateurs qui aident à décrire la morphologie urbaine et modéliser son interaction avec le climat et l'énergie : le volume urbain, la variation avec la hauteur des surfaces et des périmètres des coupes horizontales, et enfin la directionnalité et les coupes verticales. Le volume urbain est défini comme l'enveloppe générale de la ville et son plafond ou vélum sont déterminés par la densité du bâti et le gabarit des immeubles.

⁴⁶ : Salat, S. (2011). Op.Cit. p.489.

Selon **Allain (2005)**⁴⁷, « *le vélum est influencé par les plafonds réglementaires, les règles de hauteurs et les C.O.S. La silhouette de la ville ou skyline est la représentation en coupe de ce volume urbain. A plus grande échelle, on parle de profil urbain ou de ligne des toits* ».

L'autre indicateur est la variation avec la hauteur des surfaces et des périmètres des coupes horizontales. La variation de ce facteur de forme décrit l'ouverture progressive de la ville au ciel, son degré d'occlusion, les gains d'énergie radiante diurne, et les pertes d'énergie radiante de longueurs d'onde élevées vers le ciel diurne. Egalement, elle montre la dispersion des polluants sous l'effet du vent. Ce paramètre important, permet de décrire une densité construite moyenne en trois dimensions et qui peut être utile suivant les phénomènes à étudier (effets du vent, radiations solaires, etc.). « *L'occlusivité du tissu ne dépend donc pas uniquement de son degré d'ouverture au ciel mais également de sa section horizontale ainsi que du rapport entre le périmètre et la hauteur de ses éléments bâtis. La circulation de l'air et du vent dépend également de ces paramètres morphologiques*⁴⁸ ».

Les facteurs climatiques directionnels principaux sont la radiation solaire et la direction du vent. Ces deux facteurs interagissent avec la direction et la largeur des rues. L'effet d'obstruction des bâtiments dans une direction donnée peut être évalué par une coupe verticale ou une hauteur moyenne afin de caractériser le profil des hauteurs.

1.5.2. Indicateurs ‘ morpho-climatiques ‘

Même si **Ait-Ameur (2002)** a tenté une validation d'un certain nombre d'indicateurs, du point de vue de leur influence sur les paramètres microclimatiques dans des espaces urbains, la conclusion de sa recherche est restée au stade de « l'énumération ». L'objectif était de développer une méthodologie permettant de matérialiser la relation entre la morphologie urbaine et le climat par des paramètres physiques appelés indicateurs "morpho-climatique".

D'après l'auteur⁴⁹, c'est « *un système d'indicateurs regroupe un ensemble de variables qualitatives et quantitatives caractéristiques d'un effet environnemental. Pour qualifier l'effet, on peut dire qu'il n'est ni une forme, ni une intention, ni un objet et ni un discours. Il est un médiateur qui permet, dans le projet, de confronter les formes et les intentions. Les*

⁴⁷ : Allain, R. (2005). Op.Cit. p.113.

⁴⁸ : Salat, S. (2011).Op. Cit., p.185.

⁴⁹ : Ouameur, A. F. (2007). Op.Cit. p.03.

effets dont il est question dans cette recherche, sont d'ordre « morpho-climatique ». Le terme morpho-climatique, vraisemblablement absent dans le langage de la morphologie urbaine et dans celui du domaine climatique, semble approprié pour caractériser l'existence d'une incidence entre l'ambiance climatique et le contexte morphologique et urbaine. Ainsi, une terminologie nouvelle peut être affectée au système d'indicateurs proposé, sous l'appellation « système d'indicateurs morpho-climatique »⁵⁰.

Cette tentative de définition a été par la suite développée par **Benzerzour (2004)**, en allant vers la proposition d'un indicateur morpho-climatique appelé « l'indice d'ouverture directionnelle du vide urbain ». L'indicateur proposé a élargit le concept de canyon à l'évaluation de l'ouverture [Figure 1.10 & 1.11]. Plus l'ouverture est importante plus le point ou l'espace analysé est perméable aux paramètres de l'environnement climatique.

Pour pouvoir, par cet indicateur, interpréter le potentiel de régulation des paramètres microclimatiques et environnementaux, il suffit de superposer l'ouverture directionnelle du fragment analysé à la propagation du phénomène étudié. Les phénomènes microclimatiques peuvent donc être caractérisés en relation avec l'ouverture directionnelle des fragments ou espaces urbains. Pour le cas du vent, l'ouverture directionnelle peut accentuer ou réduire l'effet du vent, en lisant cela sur chaque direction. De même pour l'ensoleillement, la hauteur et l'azimut du soleil peuvent être aussi représentés par l'ouverture directionnelle.

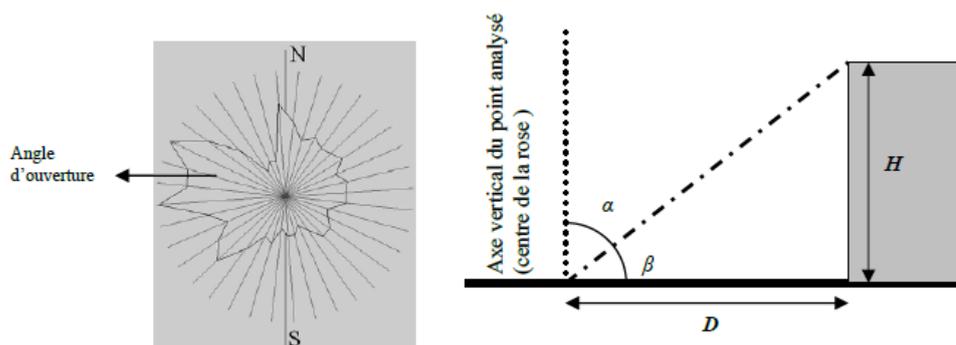


Figure 1. 10: Principe de lecture pour l'analyse d'un point selon un profil
Source : Benzerzour (2004), p. 249

⁵⁰ : Ouameur, A. F. (2007). Op.Cit., p.04.

Tableau 1. 2: Grille d'analyse des indicateurs morphologiques
Source : Ait Ameer (2002). Cité In : Ouameur (2007), p. 05

	Eléments morphologiques			Evaluation		Eléments microclimatiques				
	Critères morphologiques	Indicateurs morphologiques	Facteurs morphologiques influents	Méthode d'évaluation	Equation	Variabilité	Critères climatiques			
							Ta	Tr	h	Vs
Tissu urbain	Occupation des parcelles	Densité du bâti	Emprise au sol	Morphologie	$Ds = \sum_{n=1}^{i=n} (APi/As)$	Espace	-			
		Minéralisation	Aménagement minéraux et végétaux	Morphologie	$M = [Smin - (\sum_{n=1}^{i=n})].1/2$	Espace	-	-	-	
	Répartition parcellaire au sol	Taux du percement horizontal du tissu urbain	Dimension horizontale des espaces vides	Morphologie	Ph $= \frac{S \text{ creux publics} + S \text{ creux privés}}{S \text{ totale}}$	Espace		-		-
Espace public	Hauteur globale du tissu tridimensionnel	Rugosité du tissu urbain	Emprise au sol Hauteur végétale Texture et minéraux Végétation Mobilier urbain	Morphologie	$Rm = \left[\sum_{n=1}^{i=n} (Ai * hi) \right] / \left[\sum_{n=1}^{j=n} Aj + \sum_{n=1}^{i=n} Ai \right]$	Espace				-
		Prospect équivalent	Hauteur des façades Largeur de l'espace	Relevé sur terrain ou sur SIG	Pe = Hm / Lp	Espace		-		-
	Dimensions urbaine Géométrie urbaine Mode d'organisation spatiale	Longueur équivalente	Largeur de l'espace Longueur de l'espace	Relevé sur terrain ou sur SIG	Le = St/ Lp	Espace				-
		Facteur d'obstruction minérale	Hauteur de la façade Distance du point à la façade	Projection sphérique à l'axe zénithal	Fm = cos (α)	Espace		-		-
		Facteur d'ombre porté	Distance urbaine horizontale Azimute de la rue Azimute hauteur du soleil	Projection sphérique à l'axe zénithal	Fop = l=d =[(tanα.cos(a-a*))]/tan (β)].1/2	Point dans l'espace, heure de saisie		-		
		Fraction de masque	Couverture de l'espace au ciel	Projection sphérique à	h = H-[(tan(β)/cos (a-a*)].d	Point dans l'espace,		-		

		Azimute de l'espace Azimute hauteur du soleil	l'axe zénithal		heure de saisie				
Type d'aménagement dans l'espace	Densité minérale	Répartition de la surface minérale dans l'espace	Projection sphérique à l'axe zénithal ou horizontal	Min = aire de minéral / aire totale	Point dans l'espace		-	-	
	Densité végétale	Répartition de la surface végétale dans l'espace		Vg = aire du végétal / aire totale de l'espace	Point dans l'espace		-	-	-
	Taux d'emprise des obstacles urbains dans l'espace	Nombre d'obstacle dans l'espace Hauteur des obstacles	Relevé sur terrain	$Te = (\sum_{n=1}^{i=n} Si \cdot Hi) / \sum_{n=1}^{i=n} Si$	Espace				-
Nature des surfaces de captage	Taux de vitrage de la façade	Répartition des surfaces vitrées	Projection sphérique à l'axe zénithal	Vr = aire du vitrage / aire totale de la façade	Point dans l'espace		-		
	Albédo des surfaces	Nature des matériaux Disposition des façades	Relevé sur terrain		Point dans l'espace		-		

Où :

Ds : densité bâtie ;

Ap : surface bâtie de la proportion urbaine ;

Po : porosité urbaine ;

Vj : volume moyen de bâtiment j ;

H : la hauteur moyenne des bâtiments adjacents et des espaces non bâtis ;

α : est l'angle vertical déterminé par l'obstacle et l'azimut π ;

rhi : rayon hydraulique équivalent à l'espace ouvert i ;

As : surface totale de la proposition urbaine ;

Li : la longueur de l'espace ouvert i ;

Vi : volume moyen de la canopée urbaine ;

L : la largeur moyenne de la rue ;

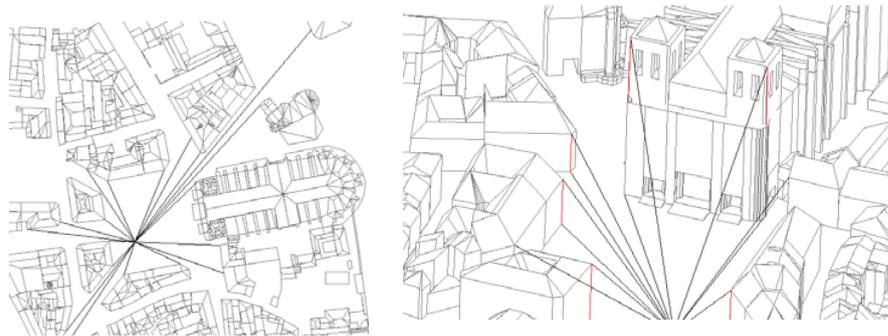


Figure 1. 11 : Lecture directionnelle des obstacles et des ouvertures d'un point (place St Pierre à Nantes). Source : Benzerzour (2004), p. 249

A son tour **Tsoka (2011)**⁵¹ a utilisé un système d'indicateur pour l'évaluation de la relation entre la morphologie, le microclimat et l'ambiance thermique, applicable sur trois éco-quartiers. L'indicateur morpho-climatique appliqué dans cette étude est exprimé en fonction de visibilité vers le ciel, et plus spécifiquement en fonction du FVC, appelé dans ce cas « surface totale pondérée du Facteur de Vue du Ciel 'F.V.C' » ou en anglais « *total weighted facade area of S.V.F* ». Pour une façade donnée, plus le F.V.C est important, plus le taux d'énergie diffus apporté sur cette façade est grand. Le calcul de ces indicateurs au sein de quartier urbain permettra d'évaluer l'impact de la morphologie sur le microclimat urbain. Selon **Tsoka (2011)**, il est calculé pour les façades qui ont la même orientation avec l'équation suivante :

$$A_{FVC} = FVC_i / FVC_{unobs} dA_i \dots \dots \dots Eq.(1)$$

Avec :

FVC_i : Facteur de vue du ciel pour l'élément i calculé sur Solene

dA_i : Surface de l'élément i

FVC_{unobs} : Facteur de vue du ciel d'une surface sans masque. Pour une surface verticale, il égale à 0.5 parce qu'une surface verticale sans masque voit la moitié du ciel.

⁵¹ : Tsoka, S. (2011). *Relations entre morphologie urbaine, microclimat et confort des piétons : Application au cas des éco-quartiers*. Thèse de Master STEU. Cerma. ENSA Nantes, p.35.

1.6. Revue de la littérature sur les interactions de la morphologie urbaine

1.6.1. Avec le microclimat des espaces extérieurs

1.6.1.1. L'espace urbain

L'espace urbain est pluriel par la complexité de ses usages, de ses enjeux, des concepts qu'il supporte, la diversité de ses formes, et de ses intervenants et la diversité également des approches qui en traitent. C'est un sujet commun à plusieurs disciplines et domaines d'études, sociologie, sciences politiques, urbanisme, etc. Intervenir donc sur l'espace urbain, c'est d'abord comprendre sa complexité et travailler sur toutes les composantes de cet espace à la fois. Ceci permet d'identifier les contradictions, les conflits entre usages différents puis de les gérer.

L'espace urbain a connu plusieurs appellations : espace libre, espace vide, espace interstitiel, espace public, espace ouvert,...etc. Cette richesse de qualificatifs s'explique par l'évolution des attributions et des fonctions qu'a connues cet espace. **Choay (1998)** a indiqué que « *les espaces extérieurs urbains, appelés encore espaces collectifs urbains ou espaces publics, sont constitués par l'ensemble des lieux ouverts à tous, ils sont généralement sous la responsabilité des collectivités publiques ou parfois de droit privé. Ils sont le plus souvent en plein air mais peuvent être partiellement couverts* »⁵².

De ce fait, l'espace extérieur est un espace accessible à tout le monde et à n'importe quel moment, n'obéissant ainsi à aucune réglementation horaire et n'excluant aucun usager, « *c'est un espace de vie et de socialisation où se déroulent les activités propres à la vie collective d'une ville* »⁵³. Mais en réalité, l'espace extérieur urbain aménagé ou non n'est pas toujours ouvert à tous, il est potentiellement ouvert à tous du fait de son attribution à des fins très précises : ludiques, de détente ou bien de loisirs, donc on le destine à des catégories d'utilisateurs spéciales et on en exclut d'autres⁵⁴.

Souvent les espaces extérieurs ont été définis comme le négatifs des espaces bâtis, aujourd'hui tous les spécialistes s'accordent pour qualifier les espaces extérieurs urbains comme des espaces positifs possédant leurs propres fonctions et jouant un rôle fondamental dans la définition des espaces bâtis en leurs attribuant leurs formes et leurs caractères. Ils prennent de formes multiples à m'exemple de place ou esplanade, rue,

⁵² : Choay, F. & Merlin, P. (1988). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*. Ed. PUF. Paris, p18.

⁵³ : Muret, J-P. et al. (1987). *Les espaces urbains, concevoir, réaliser, Gérer*. Edition le Moniteur, p. 25.

⁵⁴ : Soukehal, I. (2011). *L'Espace Enfant dans la ville, entre le conçu et le vécu Cas de la ville nouvelle Ali Mendjeli Constantine*. Mémoire de magister. Université de Batna, p. 17

boulevard ou avenue, mais aussi voie périurbaine ou voie rapide, parking, jardin, square, grand parc urbain. Ils peuvent prendre aussi les formes les plus simples ou les plus saugrenues telles que talus planté, délaissé végétalisé, îlot directionnel, îlot central de giratoire, terre-plein, etc. Tous ces espaces, aussi différents soient-ils, participent de façon importante à l'image de la ville.

Globalement nous pouvons présenter l'espace extérieur comme ayant deux dimensions : une dimension physique concernant les formes, l'occupation de l'espace, l'intégration à la structure et à l'armature urbaine et une autre dimension symbolique relative aux valeurs, au social à l'identité, l'image. Ces deux dimensions sont interdépendantes ; *la forme spatiale, les composantes de l'espace influe sur l'image mentale et la perception des usagers et façonnent ainsi l'identité de l'espace et son histoire. Cette interaction se fait dans les deux sens puisque c'est l'histoire du lieu, son identité et ses valeurs symboliques qui vont constituer les éléments de base pour la conception et la configuration de l'espace*⁵⁵.

1.6.1.2. Le climat et le microclimat urbain

Plusieurs définitions du climat ont été attribuées. Il s'agit de « *l'état moyen de l'atmosphère en un point de la surface terrestre, il est s'établit à partir des moyennes de variables climatiques comme la température, les précipitations, l'humidité obtenues sur au moins 30 ans (normales trentenaires)* »⁵⁶. Selon **Chémery (2006)**, le climat est « *la combinaison des états de l'atmosphère (température, vent..) en un lieu donné et sur une période définie (mois, année, millénaire)* »⁵⁷.

Le climat d'une région est défini à partir de normales météorologiques, établies à partir des stations du réseau synoptique dont les caractéristiques dépendent de la latitude, de la longitude, de la continentalité, de la proximité à une masse d'eau, à un courant marin chaud ou froid, de la l'altitude, de la présente de relief, etc. Egalement, la localisation de la ville a un impact conséquent sur les modifications climatiques susceptibles d'être observées à une échelle locale. Sur ce sujet, **Givoni (1998)**⁵⁸ explique que « *the location of a town within a given region may have the most permanent effect on the urban climate and comfort of the inhabitants [...]. Different locations within a given region may very greatly*

⁵⁵ : Essbai, S. (2010). *Espace public et qualité de vie : Éléments de conception et de composition spatiale*. Mémoire de magister. Ecole Nationale d'architecture-Rabat, p.68.

⁵⁶ : Dorier –Apprill, E. (2006). *Ville et environnement*. Editions Sedes. Paris, p.316.

⁵⁷ : Chémery L. (2006). *Petit atlas des climats*. Editions Larousse. France,p.120.

⁵⁸ : Givoni, B. (1998), Op.Cit., p.276.

in their temperature, wind conditions, humidity, precipitation, fog, inversion prevalence, and so on. Such variations may be caused by differences in distance from the sea, altitude, direction of slopes, and the general topography of the area”

Aussi, **Pagney (2000)**⁵⁹ indique que les rapports terre-mer sont des facteurs géographiques influençant le temps (ou la météo) et le climat. Comme explique **Escourrou (1981)**⁶⁰, l'influence des océans et des mers se manifeste sur une bande côtière par la présence de brises, qui sont liées aux comportements thermiques différents de la mer et de la surface terrestre. A Jijel, vu la proximité de la mer (une cote avoisinant 120 km), l'influence des brises de mer se voit ressentie, et engendre des changements non négligeable notamment a ce qui est des taux d'humidité et des régimes du vent.

Le climat d'une ville se définit par une succession de microclimat engendrés par les différents espaces urbains composant la ville comme les rues, les places, le cadre bâti, le espaces verts et en eau. Cette fragmentation horizontale et verticale résulte de mécanismes physiques complexes entre rayonnement solaire, la surface et l'atmosphère dans un espace urbanisé et hétérogène. Ces effets climatiques essentiellement thermiques résultent, selon **Escourrou (1981)**, d'une modification du bilan radiatif observé au sein de ce type d'espace. La construction de bilans thermiques et énergétiques se fait à l'échelle de la couche limite urbaine (urban boundary layer) et la canopée urbaine (urban canopy) [Figure 1.12]. L'analyse des interactions physiques de surface dans l'espace urbain impose une échelle d'étude qui se trouve au-dessous de celle de la canopée urbaine.

1.6.1.3. Paramètres influant sur le microclimat

L'interaction de la morphologie urbaine et l'environnement microclimatique a reçu beaucoup d'intérêt ces dernières années. Plusieurs études portent sur l'impact des indicateurs morphologiques sur le microclimat. En s'appuyant sur les indicateurs déterminants dans la caractérisation de la morphologie urbaine, on cite le Facteur de Vue du Ciel F.V.C (ou le S.V.F) qui est un paramètre sans dimension correspondant à l'angle solide sous lequel le ciel est vu d'un certain point [Figure 1.13].

⁵⁹ : Pagney, P.(2000). *La climatologie*. 7e éd. Presse Universitaire de France. Paris, p. 127.

⁶⁰ : Escourrou, G. (1981). *Climat et environnement, les facteurs locaux du climat*. Masson, p.168.

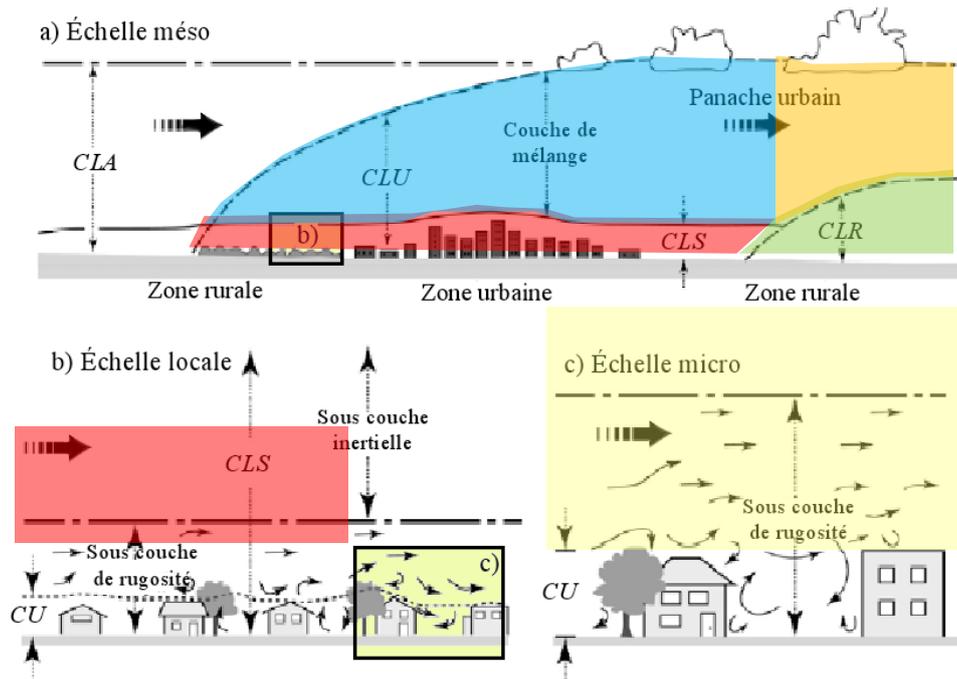


Figure 1. 12: Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU) liées aux modifications urbaines
Source : Leroyer (2006)⁶¹ d'après Oke (1987)⁶²

Cette définition a été donnée par Oke (1988), en précisant “the sky view factor is a dimensionless parameter used to express this. For a horizontal surface with an unobstructed horizon $\psi=1.0$ and overlying hemisphere it subtends is completely open to the sky. Lesser values indicate the fraction of the sky that remains in the view of the surface, and $(1-\psi_s)$ is the fraction occupied by screening obstacles”⁶³. Autrement dit, le F.V.C. dépend du rapport géométrique des surfaces et varie en fonction de dimensions urbaines (hauteur de constructions, distance entre les façades). Il vaut 1 au cas où aucun obstacle n'empêche la vue (champ isolé) alors qu'il diminue quand la vue est obstruée.

Krüger et al. (2011)⁶⁴ a évalué le microclimat le long d'une rue piétonne en Brésil, en utilisant le F.V.C. Pour se faire, 18 points ont été sélectionnés et placés dans la majorité sur l'axe de la rue. L'analyse du F.V.C montre que la corrélation entre l'îlot de chaleur urbain diurne et le F.V.C était faible, voire nulle ($R^2 = 0,10$). Cependant, la corrélation

⁶¹ : Leroyer, S. (2006). *Simulations numériques de l'atmosphère urbaine avec le modèle submeso: application à la campagne clu-escompte sur l'agglomération de Marseille*. Thèse de Doctorat. L'École Centrale de Nantes, p.39.

⁶² : Oke, T.R. (1987). *Boundary layer climates*. 2e édition. London, p.372.

⁶³ : Oke, T.R. (1988). *Street design and urban canopy layer climate*. Energy and building. vol.11, p.108.

⁶⁴ : Krüger, E.L., Minella, F.O. et Rasia, F. (2011). *Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brésil*. Building and Environment. N°46, p.621-634.

entre $(\Delta TMR - T)$ et le F.V.C était de 0,59 ($R^2 = 0,35$) [Figure 1.14]. Ce résultat souligne que la TMR, qui est influencé par le rayonnement solaire, est dans ce cas fortement affectée par le F.V.C que la température ambiante. Dans la même ligne qu'**Allegrini et al. (2015)** ont travaillé sur l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat et la demande énergétique. L'indicateur utilisé c'est le F.V.C et les résultats ont que les températures de surface des façades des bâtiments sont principalement influencées par la distance qui les sépare.

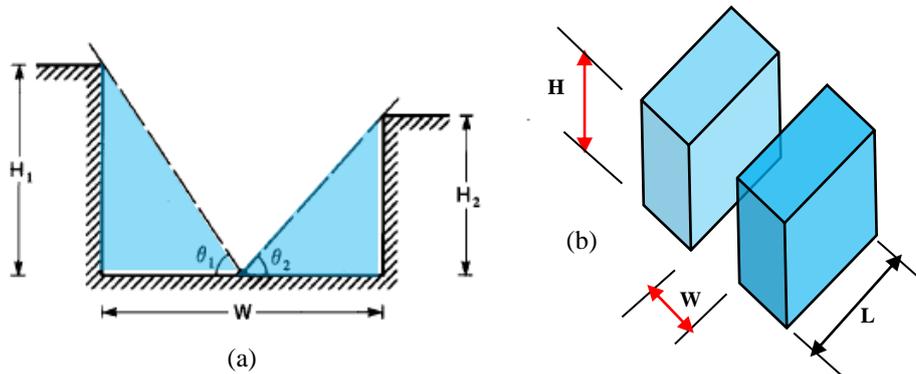


Figure 1. 13: Représentation des deux indicateurs morphologiques FVC et H/w
Source : (a) Oke (1988), p.108, (b) auteur

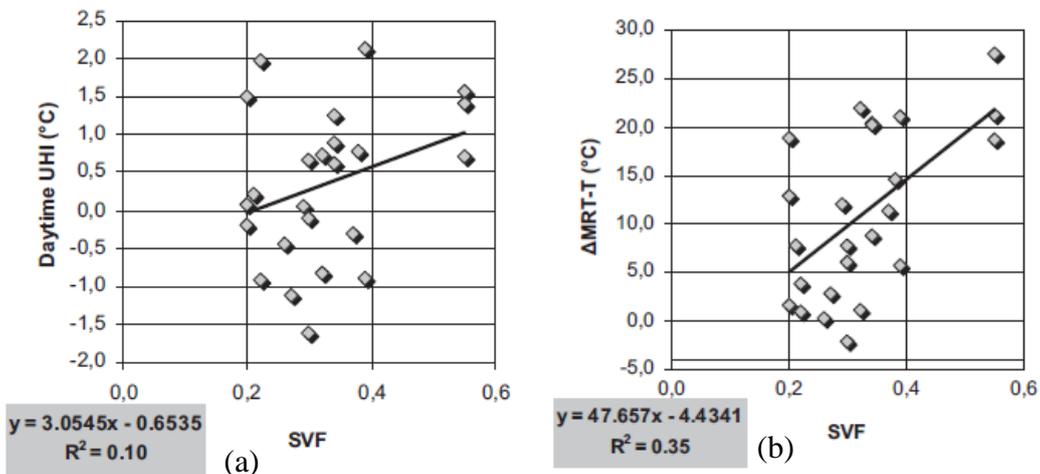


Figure 1. 14 : Corrélation en fonction du FVC. (a) : entre ICU et le FVC. (b) : entre FVC et $(\Delta TMR - T)$. Source : Kruger et al. (2011), p.626

Dans un objectif similaire, **Wei et al. (2016)** Visaient à travers leur recherche à analyser la relation entre les paramètres de morphologie urbaine notamment le F.V.C et le microclimat dans les espaces extérieurs. En conséquence, il a été démontré que les paramètres de morphologie urbaine ont un lien significatif avec les variables de

microclimat. La simulation indique que les radiations sont plus importantes et se produisent dans les zones ayant un taux de FVC élevé. De plus, l'obscurité dans la journée a un impact dominant sur les TMR et les températures. La nuit par contre dans les zones urbaines où le FVC est élevé, les températures de l'air et les TMR sont basses en raison de l'ouverture.

Les paramètres géométriques des rues comme l'orientation et le rapport de la hauteur sur la largeur de la rue ou de l'espace H/w ont une influence directe sur le microclimat et le confort thermique en espaces extérieurs. Ceci a été prouvé par **Ali-Toudert (2005)**⁶⁵ dans son étude focalisée en climat aride en étudiant l'effet du rapport H/w sur la température de l'air. La température de l'air a été jugée modérément plus faible dans les canyons urbains par rapport à un emplacement libre (comme le point 8) avec une différence de $\Delta T_{\max} = 2K$ pendant le jour [figure 1.15] et 1.5 K la nuit. Les rues ayant des ratios élevés procurent l'ombre et réduisent considérablement l'inconfort thermique à la rue. Leur efficacité dépend de l'orientation. Selon cette étude, une orientation N-S est la plus confortable, alors qu'une orientation NO-SE reste beaucoup plus meilleure que celle NE-SO.

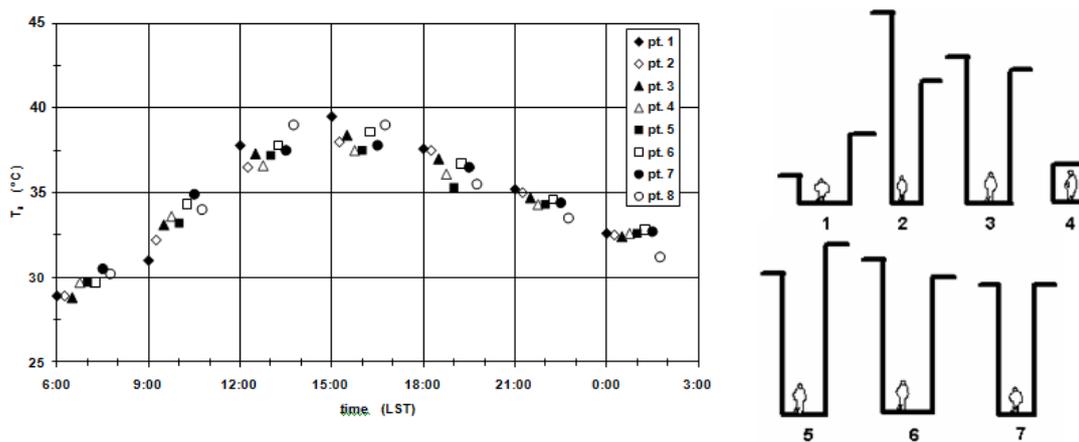


Figure 1. 15 : Profils des rues choisies et variations de la température de l'air
Source : Ali Toudert (2005)

Par ailleurs, une analyse d'ombrage paramétrique a été effectuée par **Andreou (2014)** afin d'examiner l'effet d'un certain nombre de paramètres tels que la géométrie de la rue, rapport H/w et l'orientation, sur le microclimat et les conditions d'accès solaires dans les canyons urbains. Deux sites ont été choisis (en Grèce) ayant des caractéristiques différentes en termes de géométrie de la rue et la densité urbaine. Le premier est un village

⁶⁵ : Ali-Toudert, F. (2005). Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate. Université de Freiburg. p.160.

traditionnel (le rapport H/w de la rue est compris entre 4 et 2) et le second est relativement construit (le rapport H/w est compris entre 0.7 et 0.9).

Le tableau 1.3 présente les valeurs moyennes d'ombrage et le rayonnement solaire incident pour les surfaces horizontales et les façades sud des deux sites⁶⁶. Le rapport H/w rues et leurs orientations ont été pris en considération. La température de l'air, l'humidité de l'air et la vitesse de l'air sont mesurées dans les deux sites durant l'été et l'hiver et ont été comparées aux résultats de la simulation. Les orientations des rues étudiées sont N-S, E-O, N-E/S-O, et N-O/S-E. Les valeurs du rapport H/w examinés sont 0,6/ 0,8/ 1/ 1,3/ 2,0 et 3,0.

Les résultats montrent que les températures de l'air dans le site traditionnel sont inférieures à celles dans le site contemporain. En outre, l'effet d'oasis était ressenti sur le site traditionnel pendant la journée, ce qui est attribué à des valeurs élevées d'ombrage. À l'intérieur des rues couvertes, la différence de température de l'air, entre paroi et surface du sol se balance entre 7°C et 17°C. En hiver, le manque d'insolation entraîne une baisse des températures de l'air et de surface pendant la journée. L'ensoleillement est plus élevé dans le site contemporain durant l'été. La température de l'air dans les rues du site contemporain est supérieure ou égale à la température ambiante pendant le jour. D'autre part, les résultats ont précisé que l'augmentation du rapport H/w conduit à l'augmentation des pourcentages d'ombrage notamment pour les orientations N-S [Figure 1.16]. D'autre part, pour les rues orientées sur l'axe E-O, l'augmentation des valeurs du rapport H/w n'a pas d'effet considérable (jusqu'à 2.0).

Tableau 1. 3: Valeurs moyennes de rayonnement solaire et d'ombrage sur deux rues des deux sites. Source : Andreou (2014)

Average daily solar exposure							
		Street 1 (contemporary site)			Street 2 (traditional site)		
		Horizontal surface		Facade	Horizontal surface		Facade
Month	Avail on horizontal Wh/m ²	Avg shade	Incident Wh/m ²	Avg shade	Avg shade	Incident Wh/m ²	Avg shade
Jan	1997	78%	233	31%	100%	0	88%
Feb	1948	75%	272	22%	99%	10	75%
Mar	2347	59%	592	29%	97%	52	67%
Apr	3413	44%	1518	25%	90%	346	58%
May	3997	31%	2315	31%	85%	667	59%
Jun	4723	23%	3074	38%	78%	1079	58%
Jul	5151	25%	3206	38%	81%	1059	58%
Aug	5397	38%	2889	31%	88%	741	61%
Sep	4492	50%	1600	20%	93%	295	62%
Oct	2966	68%	507	24%	99%	25	68%
Nov	2045	69%	221	21%	100%	0	82%
Dec	1693	88%	110	36%	100%	0	85%

⁶⁶ : Andreou, A. (2014). *The effect of urban layout, street geometry and orientation on shading conditions in urban canyons in the Mediterranean*. Renewable Energy. N°63, pp.587-596.

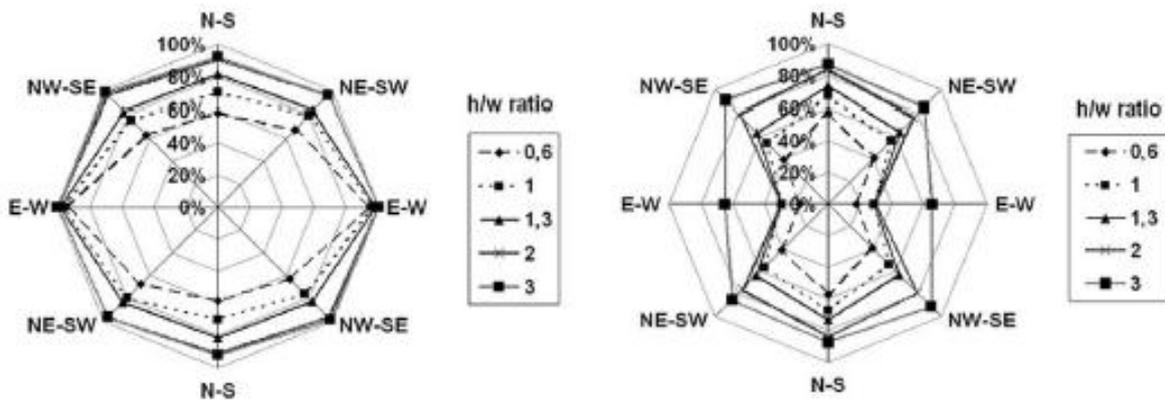


Figure 1. 16: Valeurs moyennes d'ombrage des surfaces horizontales des rues pendant le mois de décembre (à gauche) et Juin (à droite)

De leur part, **Amirtham et al. (2016)** ont pris en considération les paramètres de FVC, le ratio d'aspect H/w, les matériaux et la couverture verte pour évaluer les conditions microclimatiques au niveau de neuf sites urbains situés dans la ville de Chennai sous un climat humide et chaud. Les résultats indiquent qu'il y avait une corrélation significative avec la géométrie de la rue, le ratio H/w et la présence de végétation et l'orientation. Dans la ville de Dacca à climat tropical humide, **Sharmin et al. (2017)** s'intéressent à étudier l'impact de la géométrie urbaine sur le microclimat en comparant les formes urbaines traditionnelles aux zones résidentielles récentes à travers l'indicateur H/w. Les résultats révèlent qu'il a une différence moyenne de température de l'air de 3,3 °C et une différence maximale de 6,2°C entre les deux sites, ainsi qu'une différence moyenne de température de rayonnement de 10°C. La simulation a montré également que les caractéristiques géométriques urbaines sont donc susceptibles de provoquer des variations importantes des conditions microclimatiques dans des situations réelles.

Cependant, la contribution de **Tebbani (2018)** s'est focalisée sur l'impact des indicateurs morpho-climatiques sur microclimat dans six espaces urbains dans la ville d'Annaba (Algérie) à climat méditerranéen. La méthode statistique utilisée a permis d'évaluer la relation entre les paramètres microclimatiques mesurés (Température de l'air, humidité relative et vitesse de l'air) et les indicateurs morphologiques qui sont la densité volumique et surfacique, la rugosité urbaine, la compacité, la porosité, SVF, H/w. Les résultats de l'analyse ont montré qu'il existe une régression linéaire entre la température de l'air et la rugosité et entre la vitesse de l'air et la densité surfacique et la rugosité.

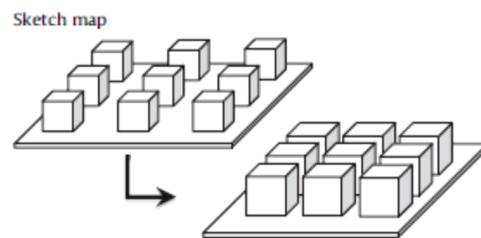
La façade sur la rue est le lieu privilégié d'expression du langage architectural surtout dans ce qu'on appelle les « immeubles urbains » qui forment un front continu à

l'alignement. Mais le décalage des hauteurs est fréquent du fait qu'il est très influencé par les règlements d'urbanisme. Par ailleurs, cette variation dans les hauteurs verticales influence la température de l'air. Dans ce sens, une étude a été faite par **Yang et al. (2015)**⁶⁷ dans laquelle ils ont vérifié l'impact de l'hétérogénéité de la hauteur des bâtiments, leur densité, H/L et H/w sur la température surfacique de la rue et l'albédo par simulation. Le site étudié est constitué des bâtiments ayant des hauteurs différentes. La simulation a été faite pour deux journées représentatives de la saison hivernale et estivale de la ville de Hong Kong. Trois scénarios ont été élaborés [Figure 1.17]:

- Scénario A : effet de la densité des bâtiments en gardant $H/L=1$
- Scénario B : effet de la hauteur du bâtiment. Sur la base de la densité typique de Hong Kong déterminée à partir de données SIG⁶⁸, la hauteur des bâtiments est augmentée en atteignant la hauteur d'un gratte-ciel (H/L compris entre 1 et 6)
- Scénario C : effet de l'irrégularité de la hauteur des bâtiments ($H_1/w=6$)

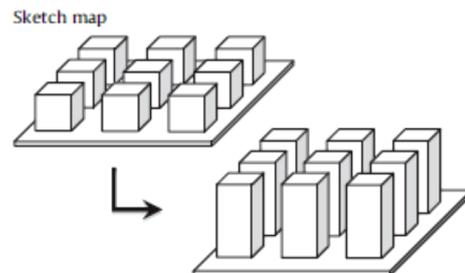
Scenario A: Building density ($H/L = 1$)

No.	Plan area index λ_p
A-1	0
A-2	0.11
A-3	0.25
A-4	0.44
A-5	0.64
A-6	0.79



Scenario B: Building height ($\lambda_p = 0.44$)

No.	H/L
B-1	1
B-2	2
B-3	3
B-4	4
B-5	5
B-6	6



Scenario C: Building staggered arrangement ($\lambda_p = 0.44, H_1/W = 6$)

No.	H_1/H_2
C-1	6:1
C-2	6:2
C-3	6:3
C-4	6:4
C-5	6:5
C-6	6:6

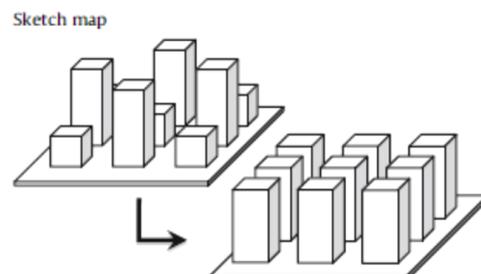


Figure 1. 17: Les modèles des trois scénarios simulés.
Source : Yang et al. (2015)

⁶⁷ : Yang, X., Li, Y. (2015). *The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and street surface temperature*. Building and Environment. N°90, pp.146-156.

⁶⁸ : Logiciel SIG

Les résultats de simulation pour les différents scénarios montrent que la densité urbaine moyenne des bâtiments absorbe remarquablement le rayonnement solaire. Son albédo est le plus faible qui est le cas du scénario A [Figure 1.18]. Le scénario B permet de confirmer que l'albédo se diminue avec l'augmentation de la hauteur des bâtiments. Par contre, le scénario C a vérifié que l'écart des hauteurs influe sur le rayonnement absorbé, autrement dit, plus les bâtiments ont des hauteurs différentes et présentant un écart important dans les hauteurs, plus le rayonnement solaire absorbé est important. Par conséquent, l'albédo urbain moyen est faible pour une ville de moyenne densité ayant un écart important dans la hauteur des bâtiments [Figure 1.19].

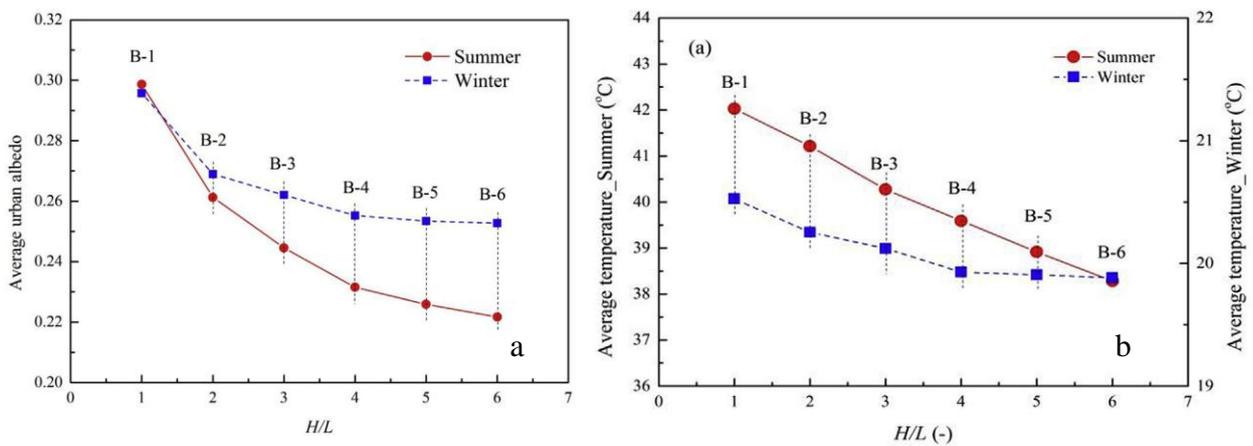


Figure 1. 18: Résultats de scénario B en hiver et en été. (a) relation entre l'albédo et le ratio H/w, (b) la température surfacique moyenne de la rue

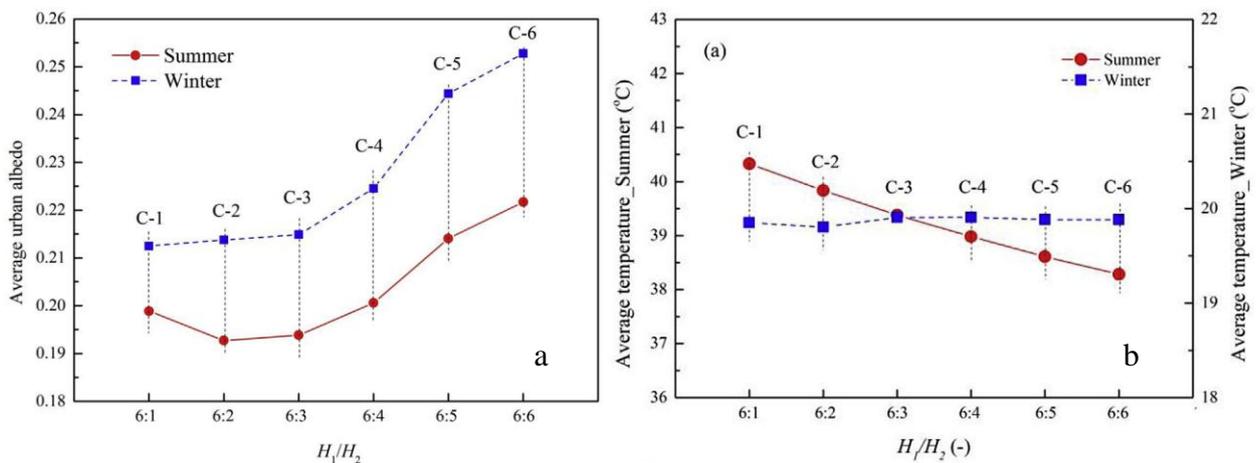


Figure 1. 19 : Résultats de scénario C en hiver et en été. (a) relation entre l'albédo et le degré de l'irrégularité H₁/H₂, (b) la température surfacique moyenne de la rue

1.6.2. Avec le confort thermique dans les espaces extérieurs

La définition du confort thermique est très complexe en raison de l'interaction de plusieurs variables environnementales et personnelles. Il a été défini selon **Fanger (1972)**⁶⁹, comme étant ‘l'état de l'esprit qui exprime la satisfaction avec l'environnement thermique’. Pour **Givoni (1978)**⁷⁰, le maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement est l'une des principales exigences pour la santé, le bien-être et le confort. Il affirme que les conditions dans lesquelles on obtient cet équilibre est l'état du corps lorsqu'il atteint l'équilibre avec son environnement, dépendant de la conjugaison de nombreux facteurs. En effet, le confort thermique résulterait à la fois d'aspects physiques mesurables et de processus cognitifs menant à une évaluation personnelle et subjective de la sensation thermique.

Les études de **Boussoualim et al. (2002)**, **Adolphe et al. (2002)** et **Nikolopoulou (2004)** montrent que l'usage des espaces extérieurs, le comportement et les activités des individus sont fonction des conditions climatiques. La quantité et l'intensité de chaque activité sont affectées par le niveau d'inconfort éprouvé par les individus lorsqu'ils sont exposés aux conditions climatiques à l'extérieur. Cela explique que le confort thermique résulte, selon **Vinet (2000)**⁷¹, d'une interaction complexe entre les paramètres microclimatiques et les paramètres relatifs à l'individu. Son évaluation nécessite tout d'abord la connaissance de quatre paramètres microclimatiques qui sont : la température moyenne radiante, la vitesse de l'air, la température de l'air et l'humidité de l'air. La température moyenne radiante est un paramètre critique en ce qui concerne l'évaluation du confort thermique en espaces extérieurs. Elle intègre les flux de courte et de grande longueur d'onde absorbée par le corps humain, influençant ainsi son bilan énergétique. La T_{mrt} est le facteur clé quant au calcul d'indices de confort puisque elle a un impact important sur le bilan thermique de l'homme⁷².

Plus récemment, l'intérêt de plusieurs recherches s'oriente vers l'impact de la morphologie urbaine des espaces extérieurs sur le confort thermique. L'enquête par questionnaire près des usagers, les mesures microclimatiques in situ et la simulation

⁶⁹ : Fanger, P. (1972). *Thermal comfort*. Copenhagen. Denmark. Danish Technical Press.

⁷⁰ : Givoni, B. (1978). *L'homme l'architecture et le climat*. Edition du Moniteur. Paris, p.39

⁷¹ : Vinet, J. (2000). *Contribution à la modélisation thermo-aéroulque du microclimat urbain : caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs*.Thèse de doctorat. Ecole polytechnique de Nantes.

⁷² : Ali Toudert, F. et Mayer, H. (2006). *Numerical effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in a hot and dry climate*. Building and Environment. N°41, pp. 94-108.

numérique semblent être les outils employés. **Tebbani et Bouchahm (2016)** ont analysé le confort thermique dans six espaces extérieurs selon deux indices: statistique par l'évaluation de la sensation thermique effective STE, et mathématique par l'évaluation de la sensation thermique prévisible où un modèle de confort, Comfa comfort formula qui a été initialement développé pour l'extérieur. Les indicateurs morphologiques pris en compte sont S.V.F, H/w, S.P.O (surface partielle ombrée) et Dv (densité de la végétation). Les premiers résultats obtenus de cette étude affirment l'impact de la morphologie urbaine sur la variation temporelle et spatiale des zones de confort. L'impact des bâtiments sur le confort varie d'un espace à un autre, cet impact est relié au deux indicateurs S.P.O et S.V.F.

Une autre étude a été menée **Matzarakis et al. (2011)**⁷³ au centre de Taiwan, qui vise à analyser les effets des espaces ombragés sur le confort thermique extérieur à long terme. L'investigation et la simulation par le logiciel Ray-Man ont été effectuées sur six endroits [Figure 1.20] caractérisés par différents niveaux d'ombrage – de A à F –sauf le point K (sur le toit d'un bâtiment et sans ombre). L'indicateur évalué c'est le FVC, par contre les indices du confort sont la TMR et le PET. Les résultats de l'analyse indiquent que la station F, caractérisée par une grande ouverture au ciel (FVC 0,616), a présenté une haute fréquence en été (PET>30). Cependant la station A, ayant une valeur faible de FVC (FVC=0.236), a tendance à avoir une faible fréquence en été, une plus haute fréquence en hiver (PET<26) et moyennement pour la saison printanière où le PET 26-30° [Figure 1.21 & 22]. Ce qui prouve que les endroits localisés à l'ombre et caractérisés par une faible ouverture au ciel donnent le meilleur confort thermique, en revanche, avoir une grande ouverture au ciel peut contribuer à l'augmentation du rayonnement solaire en hiver et un inconfort thermique en saison chaude.

Dans ce même contexte, **Bourbia et Awbi (2004)** ont analysé l'interaction entre la géométrie du canyon urbain et le rayonnement solaire incident. L'effet de la hauteur du bâtiment et de la largeur de la rue sur l'ombrage des surfaces des rues et du sol pour différentes orientations a été mené et évalué sur différents canyons urbains de la ville d'El-Oued (Algérie). Les résultats montrent qu'il y a moins de variations de température de l'air par rapport à la température de surface qui dépend vraiment de la géométrie de la rue et du

⁷³ : Matzarakis, A., Hwang, R. L., Lin, T. P. (2011). *Seasonal effects of urban street shading on long-term outdoor thermal comfort*. Building and Environment, N°46, pp.863-870.

facteur de vue du ciel. En d'autres termes, il existe une forte corrélation entre la géométrie de la rue, le facteur de vue du ciel et les températures de surface.

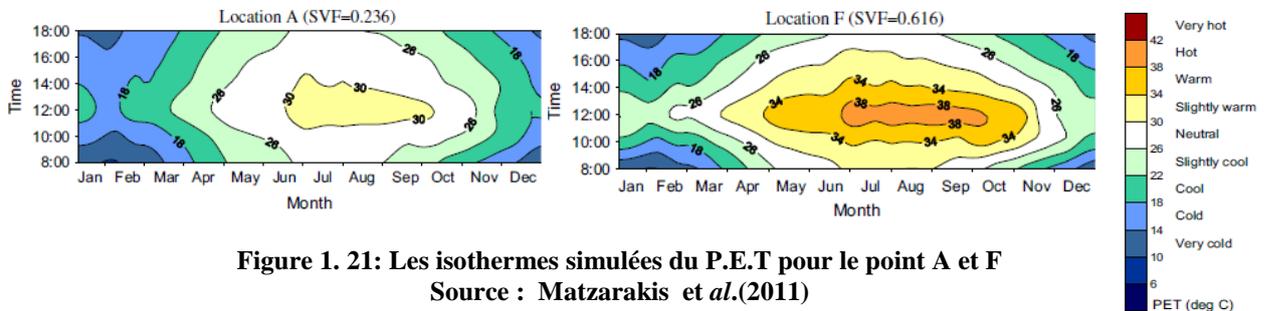
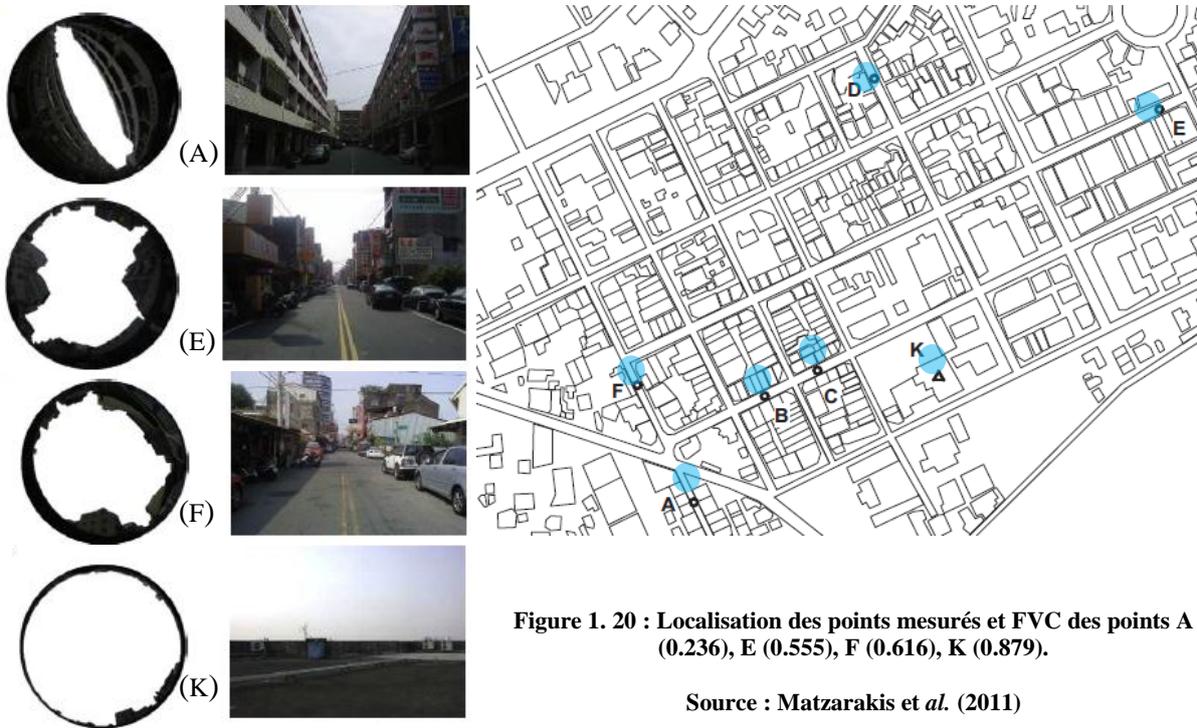


Figure 1. 21: Les isothermes simulées du P.E.T pour le point A et F
Source : Matzarakis et al.(2011)

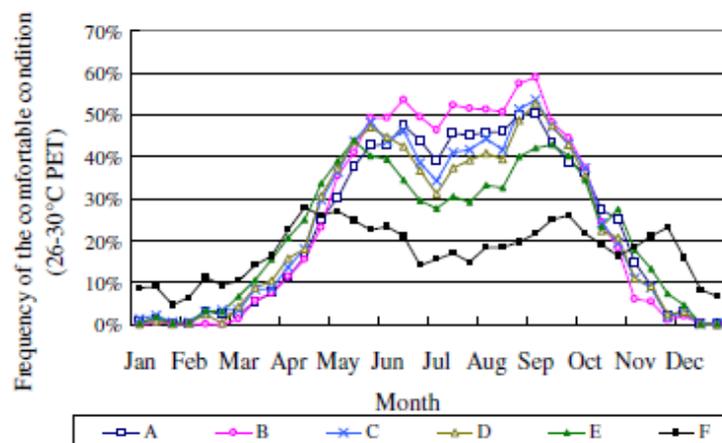


Figure 1. 22: Les fréquences du P.E.T prévues en été pour les 06 stations
Source : Matzarakis et al. (2011)

Ali-Toudert et Mayer (2007)⁷⁴ ont travaillé sur des rues ayant différents profils et orientations. Ils ont traité l'effet du profil vertical des rues H/w (y compris les formes asymétriques avec une grande ouverture au ciel ou avec galeries et dispositifs d'ombrage sur façades) sur le confort thermique. Ce dernier a été évalué en fonction de l'indice de confort PET. Les résultats ont montré que le profil asymétrique implique des conditions beaucoup plus stressantes thermiquement que la rue typique [Figure 2.29]. Quant aux façades surplombantes, elles sont plus efficaces thermiquement, pour des orientations Nord-Sud et Nord-Ouest - Sud-Est [. Les surfaces qui sont couvertes sont généralement moins stressantes quant au confort thermique que celles d'une rue non couverte.

Le travail d'**Horrison et al. (2015)** visent à analyser l'impact du FVC et du H/w sur les paramètres du confort thermique dans neuf sites urbains en climat tropical à travers la simulation par le logiciel RayMan pro. Il en résulte que la géométrie urbaine, l'orientation, et la couverture du sol ont un impact sur la sensation thermique dans ce climat tropical. En outre, les résultats de l'étude montrent clairement le rôle du FVC et son impact sur la réémission du rayonnement et la formation de l'îlot de chaleur urbain.

L'apport de la configuration des rues dans l'amélioration du confort thermique au niveau du piéton a été effectué dans l'étude menée par **Algeciras et al. (2016)** sur des rues canyons caractérisées par des prospectifs différents (H/w = 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 4, 5) et des orientations solaires différentes (N – S, NE – SO, E – O, NO – SE). Les résultats de simulation par le logiciel RayMan confirment que la distribution spatiale des conditions thermiques au niveau de la rue dépend fortement du facteur de H/w et de l'orientation de la rue. Les résultats montrent également que le confort thermique extrême était au niveau des rues à orientation N – S et E – O, car l'orientation N – S est une stratégie valable pour atténuer le stress thermique en été. Les rues dont le prospect varie entre 1 et 1,5 offrent une performance thermique tout à fait acceptable en été et en hiver. Les modèles de PET discutés donnent des informations sur les endroits les plus appropriés pour les piétons dans la rue.

⁷⁴ : Ali-Toudert, F., Mayer, H. (2007). *Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons*. Solar Energy. N°81, pp. 742-754.

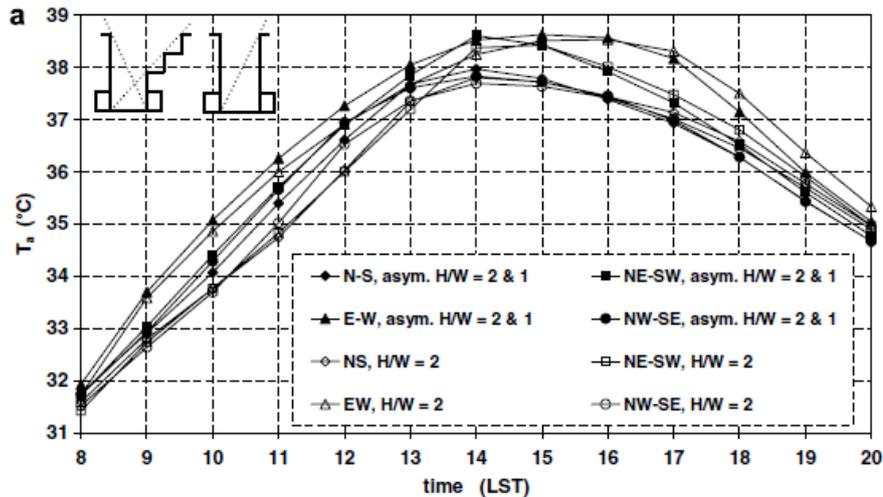


Figure 1. 23: La température moyenne de l'air au niveau des rues asymétriques.
Source : Ali-Toudert et al. (2007).

1.7. Conclusion

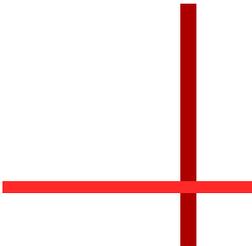
Ce chapitre a traité la relation entre la morphologie urbaine, le microclimat et les conditions du confort thermique dans les espaces extérieurs. Les formes urbaines peuvent être décrites par une multiplicité d'indicateurs. Le but principal donc est d'identifier les indicateurs les plus importants qui doivent être intégrés dans le processus de conception des espaces publics urbains. Les recherches abordées ont présenté des méthodes, d'outils et d'approches différentes afin de traiter les interactions entre la morphologie urbaine, le microclimat et le confort thermique dans les espaces extérieurs. Les indicateurs morphologiques prises en compte lors de l'analyse sont: la géométrie des rues c'est-à-dire H/w, facteur de vue du ciel c'est-à-dire SVF, la densité bâtie, la rugosité, l'albédo des surfaces. Certains de ses travaux focalisent leur analyse sur un ou deux indicateurs, d'autres essaient de les combiner et les intégrer dans une même étude.

A partir d'une analyse détaillée des travaux et des recherches antérieurs faits dans ce domaine, il a été constaté qu'il existe un ensemble d'indicateurs morphologiques qui présentent de nombreux intérêts pour évaluer les espaces extérieurs des villes existantes ou des projets d'aménagement, les plus importants sont le FVC, le H/w et H/L. Ils permettent en particulier d'optimiser, dans les phases amont du projet, la morphologie urbaine de la nouvelle réalisation, et de donner des indications pour la conception des espaces publics confortables en termes de température, d'ensoleillement mais aussi du vent. Pour cela, nous proposons d'introduire dans la suite du travail les paramètres géométriques les plus déterminants de l'écoulement du vent.

CHAPITRE II

A red crosshair graphic consisting of a horizontal line and a vertical line intersecting at the right end of the horizontal line.

La géométrie urbaine **et le contrôle du vent** **dans les espaces** **extérieurs**

A red crosshair graphic consisting of a horizontal line and a vertical line intersecting at the center of the vertical line.

«...From the viewpoint of modifying the urban wind conditions offers the greatest potential.....In particular, such urban elements as the orientation of streets with respect to the wind direction, size, height and density of buildings.....and so have great impact on the urban wind conditions ». Givoni (1998)

CHAPITRE II : LA GEOMETRIE URBAINE ET LE CONTROLE DU VENT DANS LES ESPACES EXTERIEURS

2.1. Introduction

Le vent est un phénomène d'une grande complexité, il est la manifestation la plus claire de la circulation atmosphérique. C'est un paramètre climatique très sensible, énormément variable et difficile à figurer. Son appréhension par les moyens de mesure et de représentation est difficile à la fois par rapport au temps et à l'espace.

En milieu urbain, le vent devient souvent responsable de la détermination des microclimats urbains ; la ville est une mosaïque d'espaces très contrastés, et le lieu de très nombreuses discontinuités spatiales (relief, rugosité, température, évaporation...) et exerçant un impact sur tous les éléments du climat. Ces particularités urbaines vont participer à la modification du comportement du vent (vitesse et direction). L'étude de ce comportement en milieu urbain est indispensable pour intégrer ce phénomène dans la conception urbaine.

Pour ce faire, il convient d'identifier les paramètres urbains géométriques et morphologiques les plus déterminants sur le comportement des flux d'air et qui permettent son contrôle par la suite. Ceci fera l'objectif principal de ce chapitre dans lequel nous nous intéressons tout d'abord à présenter quelques notions élémentaires utiles à la compréhension du vent, pour ensuite aborder le vent comme phénomène atmosphérique et physique. Egalement, l'accent sera mis sur le comportement du vent à l'échelle urbaine en commençant par son comportement élémentaire et qui concerne l'écoulement autour d'un obstacle isolé dans son environnement, pour mieux saisir en deuxième le mécanisme d'un écoulement plus complexe autour d'un groupement d'obstacles. Ainsi, un intérêt sera porté

sur les paramètres géométriques et morphologiques les plus déterminants - responsables ainsi de l'apparition de certains effets aérodynamiques pouvant nuire au confort extérieur des usagers -, et qui seront résumés à travers l'exposition de quelques recherches ayant trait à ce sujet.

2.2. Introduction à l'aérodynamisme urbaine

2.2.1. Vent, couche limite urbaine et rugosité

Le vent est en fait la résultante de plusieurs phénomènes qui engendrent différents types de forces, à l'origine de mouvements d'air. Pour être tout à fait rigoureux il y a même trois forces différentes très bien expliquées par **Nourry (2008)**⁷⁵ qui sont les forces de pression, la force de Coriolis et les forces de frottement. Dans un premiers temps, il faut savoir que le vent est indissociable du soleil. En effet c'est grâce au soleil que les principaux mouvements d'air peuvent avoir lieu. L'air va être chauffé par les rayons du soleil mais d'une façon non uniforme⁷⁶, principalement à cause de la forme sphérique de la Terre. Autrement dit, ces trois forces interviennent dans la formation du vent. La première force de pression est responsable des grands déplacements d'air, la seconde, force de Coriolis donne les grandes directions du vent et la troisième, la force de frottement est plutôt responsable des caractéristiques locales du vent.

Pour résumer sa définition, le vent est un déplacement d'air horizontal généré par des différences de pression entre des masses d'air : l'air s'écoule des zones de hautes pressions (anticyclone) vers les zones de basses pressions (dépression). L'écoulement n'est pas rectiligne mais il prend une forme de « S », à cause de la force de Coriolis⁷⁷ (**Izard & Guyot 1979**)⁷⁸. **Chémery (2006)** a également précisé que *“cette force provoque une déviation qui entraîne l'air de l'hémisphère Nord d'un mouvement horaire autour des anticyclones vers un mouvement antihoraire autour des dépressions et dans le sens inverse dans l'hémisphère Sud”*⁷⁹. **Gandemer (1979)** le définit par contre comme le mouvement horizontal de l'air qui tend à équilibrer les zones de pression différentes dans l'atmosphère. Plus la haute pression est proche de la basse pression, plus le vent est fort. A faible hauteur, dans les premiers 500m, il présente une agitation ou turbulence importante.

⁷⁵ : Nourry, L.M. (2008). *Vents Invention et Evolution des Formes*. Éditions ENSAB-GRIEF-PUR. Paris, pp.10-11.

⁷⁶ : Cette non-uniformité est aussi due à la présence d'océans ou de continents l'épaisseur des nuages.

⁷⁷ : En climatologie, la force de Coriolis est une force de déflexion influençant les objets mobiles dans un système rotatif. Elle agit perpendiculairement à la direction du mouvement d'un corps en déplacement et elle est due à la rotation de la terre. [Burroughs (2000), p. 186].

⁷⁸ : Izard, J.L., Guyot, A. (1979). *Archi Bio*. Editions Parenthèses. Paris, p. 22.

⁷⁹ : Chémery, L. (2006). *Op.Cit.*, p. 35.

En effet, le processus d'urbanisation génère des changements radicaux de la nature de la surface et des conditions atmosphériques. Au-dessus d'une ville, le vent est extrêmement variable notamment dans la couche limite de surface **Olgyay (1998)**. Elle est le siège d'intenses activités turbulentes d'origines thermiques, dynamiques et reçoit les influences météorologiques, topographiques et anthropiques. Quand cette couche est poussée par le vent à l'extérieur de la ville, elle donne naissance à ce qui est appelé le panache urbain. Elle est alors séparée de la surface par une couche influencée par les caractéristiques de la campagne. En revanche, lorsque le vent est faible, une bulle d'air chaud se forme, il s'agit du dôme urbain. **Menut (1997)** a effectué une étude de la couche limite en région parisienne a montré que le flux de chaleur sensible surfacique est supérieur en milieu urbain et a mis en évidence l'îlot de chaleur urbain dont le maximum apparait en période nocturne pour une valeur moyenne de 5°C.

Selon **Oke (1976)** cette couche s'étale verticalement sur plusieurs dizaines de mètres au-dessus de bâtiments et se constitue de trois sous-couches commençant par la sous-couche inertielle dont les flux turbulents verticaux sont homogènes et elle qui est affectée directement par la vitesse du frottement et la hauteur des bâtiments. Quant à la couche limite de canopée urbaine, sa limite supérieure correspond à peu près à la hauteur des toits et son climat est déterminé par la nature de son environnement, notamment la géométrie urbaine et la nature des matériaux. Au niveau de cette sous-couche le milieu est hétérogène et l'écoulement du vent est ainsi fortement perturbé aux abords des bâtiments (**Bozonnet 2005**). Cette couche correspond à l'échelle de notre étude. Au-dessous de la précédente se trouve la sous-couche de rugosité qui s'étend sur une hauteur de 1.5 à 4 fois la hauteur des éléments de rugosité. Cette sous-couche est le siège de flux turbulents hétérogènes dus à l'influence directe des bâtiments [Figure 2.1]. **Dupont (2001)** indique aussi que les sillages engendrés par les obstacles interagissent entre eux, créant une turbulence importante.

La limite de sous-couche rugueuse Z_R relevée par différentes études montre qu'elle varie entre 2 à 5 fois la hauteur moyenne Z_H . Pour définir l'écoulement près du sol, la hauteur Z_D et la longueur de la rugosité Z_0 peuvent être estimées à partir de valeurs caractéristiques pour différents types de zones urbaines (**Oke 1987, 2004**). Les différentes zones sont caractérisées par le niveau moyen des bâtiments ainsi que par le type de construction, industriel ou résidentiel [Tableau 2.1].

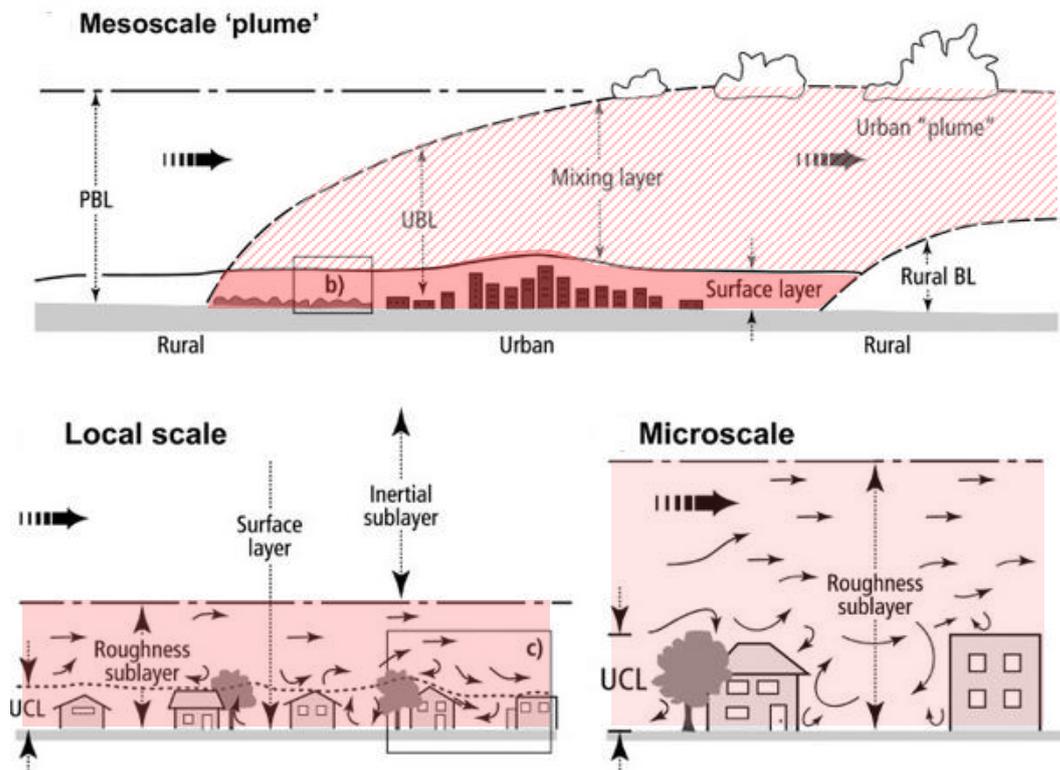


Figure 2. 1: Structure verticale de l'atmosphère urbaine pour des vents supérieurs et inférieurs à 3m/s
Source: Oke (1988).

Tableau 2. 1: Propriétés aérodynamiques typiques pour des zones urbaines homogènes.
Source: Bozonnet (2005).

Densité	Z_H (m)	Z_D (m)	Z_O (m)
Densité et hauteur faible : Résidentiel à 1 ou 2 niveaux avec jardins et petits arbres, entrepôts, zones industrielles.	5 – 8	2 – 4	0.3 – 0.8
Densité et hauteur moyenne : Résidentiel à 2 ou 3 niveaux ou de moins de 5 niveaux.	7 – 14	3.5 – 8.0	0.7 – 1.5
Forte Densité et grande hauteur Bâtiments d'au moins 6 niveaux, centres- villes.	11 – 20	7 – 15	0.8 – 1.5
Immeuble de grande hauteur : Situés en zone urbaine dense.	> 20	> 12	> 2.0

Le vent présente une vitesse instantanée très variable, avec des variations de vitesses que sont les turbulences, autour d'une vitesse moyenne qui évolue en fonction de l'altitude et de la nature et la taille des aspérités du terrain, qui constituent des rugosités variables (Chatelet et al.1998). A partir d'une certaine hauteur Z_G au-dessus du sol (couche limite),

la vitesse moyenne du vent est constante V_{Gm} et dans cette couche la vitesse moyenne V_{Zm} évolue approximativement selon la relation⁸⁰ :

$$\frac{V_{ZM}}{V_{GM}} = \left(\frac{Z}{Z_G} \right)^\alpha \times (4-1) \dots \dots \dots Eq.(2)$$

Z_G et α étant essentiellement fonction du type de rugosité du sol. α c'est la turbulence

Différents types de rugosité définis pour caractériser la nature des écoulements [Tableau 2.2]. On peut conclure que :

- Le bord de mer a la plus faible rugosité, son influence est inférieure à 300m d'altitude, son gradient progresse rapidement près du sol.
- Le périurbain est de rugosité moyenne, son influence est aux alentours de 330m.
- La ville est de rugosité forte, son gradient progresse jusqu'à 400m d'altitude.
- Pour une même altitude par exemple environ 10m, la vitesse moyenne évolue du simple au double entre la ville et le bord de mer. Les taux de turbulences sont plus élevés en ville (30%) qu'en zone dégagée (20%)⁸¹.

De manière générale, le vent étant freiné par les obstacles, lorsque la densité et la taille de ceux-ci sont importantes, la vitesse est moindre qu'en sites dégagés [Figure 2.2].

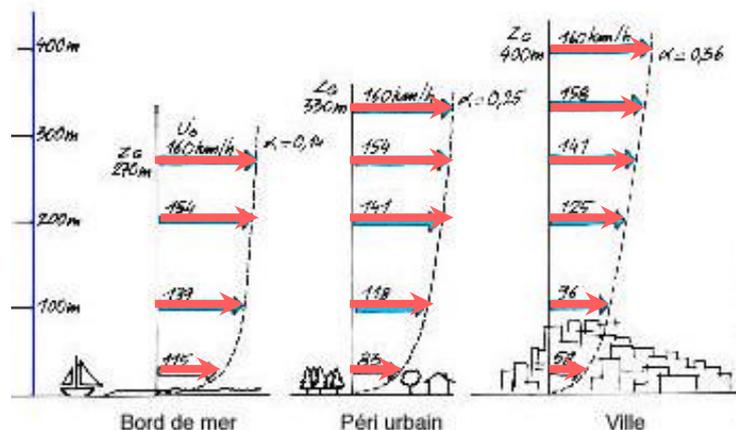


Figure 2. 2 : Variation de la vitesse du vent selon la rugosité du site.

Source : Chatelet et al. (1998)

⁸⁰ : Chatelet, A., Fernandez, P., Lavigne, P.(1998). *Architecture Climatique ; une contribution au développement durable*. Tome 2 : Concepts et Dispositifs. Edition Edisud, p. 45.

⁸¹ : Guyot, A. *Intervention de cours : le vent - l'architecture et l'aménagement urbain en PDF*. Ecole d'architecture de Marseille Luminy. [http:// : www.marseille.archi.fr](http://www.marseille.archi.fr).

Tableau 2. 2: Différents types de rugosité
 Source : Guyot, [http// : www. Marseille.archi.fr](http://www.Marseille.archi.fr)

Type de rugosité	Nature du sol	Influence en altitude	Vitesse (km/h)	Vitesse (noeuds)
Faible	Mer, rase campagne	250-300 m	Important	Faible < 20%
Moyenne	Foret, banlieue	300-350 m	Moyenne	Moyenne env 25%
Forte	Ville, centre-ville	350 m et plus	Faible	Elevée > 25%

2.2.2. Structure turbulente du vent

La turbulence est qualifiée par l'écart type des variations de vitesse instantanée α (Chatelet et al. 1998). Elle dépend essentiellement de la rugosité et croit avec celle-ci [Tableau 2.3]. Au niveau du sol, la turbulence est de l'ordre de 20% de la vitesse moyenne. Selon Turbelin (2000), les turbulences sont d'origine dynamique ou thermique. En effet, la stabilité thermique de l'air influe sur l'intensité de la turbulence, l'air en contact des surfaces froides tend à supprimer la turbulence mécanique alors que celui des surfaces chaudes augmente la turbulence.

Mais en milieu urbain, la turbulence est perçue comme une discontinuité dans l'écoulement de l'air due aux obstacles. Elle peut être définie comme étant des mouvements aléatoires de l'air se superposant au mouvement moyen. La turbulence d'obstacle naît de la rencontre du vent et d'un obstacle qui va le forcer à changer de direction. Son intensité va être proportionnelle à la force du vent, et dépendre de la forme de l'obstacle. En effet, les turbulences du côté au vent n'auront lieu qu'en cas de discontinuité du relief, et seulement dans la proximité de celui-ci. Par contre, sous le vent, la turbulence sera beaucoup plus intense (Turbelin 2000). L'écoulement dans ce cas devient turbulent. On distingue aussi l'écoulement tourbillonnaire dans lequel le mouvement est très désordonné [Figure 2.4]. Bien que globalement tout l'écoulement d'air se déplace dans la même direction, certaines particules peuvent remonter le courant et former ainsi des tourbillons [Figure 2.3].

A partir du moment où les filets d'air⁸² suivent des trajectoires rectilignes et parallèles entre elles on parle de l'écoulement laminaire [Figure 2.4]. Les filets d'air se déplacent globalement dans la même direction avec une même vitesse d'ensemble. Ce type d'écoulement, uniforme et très peu turbulent.

⁸² : Une suite de particules d'air suivant la même trajectoire et visualisée par des fils de laines s'appelle « filet d'air ».

Tableau 2. 3: La turbulence α selon Z_G
 Source : Nikolopoulou 2004⁸³.

Surface	Hauteur (m)	α
Terrain plat	270	0,14
Boisé, banlieue	330	0,25
	400	0,28
Ville densément bâtie.	400	0,36
	500	0,40

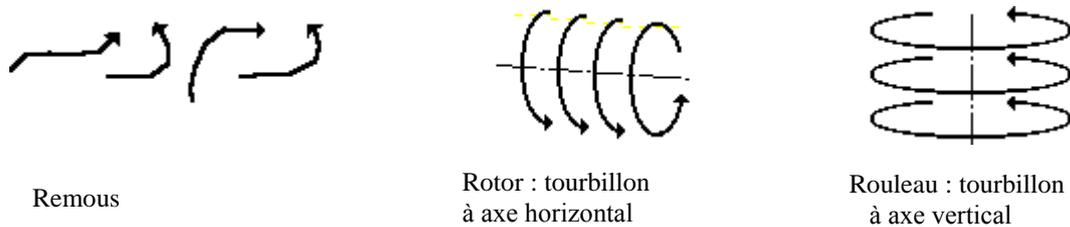


Figure 2. 3: Différents types de tourbillon
 Source : Turbelin (2000).

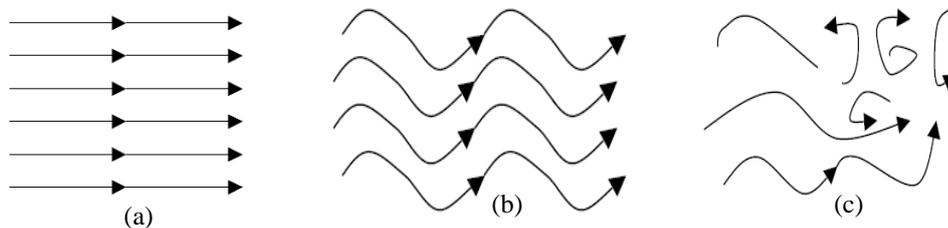


Figure 2. 4: Types d'écoulement. (a) écoulement laminaire, (b) turbulent et (c) tourbillonnaire.
 Source : Turbelin(2000).

2.3. Écoulement du vent autour des bâtiments

2.3.1. Description de l'écoulement du vent autour d'un obstacle bâti

Afin de garantir une ventilation naturelle, toute construction tend à créer des zones d'abri et d'exposition au vent correspondant à des zones de pressions positives (surpression) ou négatives (dépressions). Cette différence de pression dirige le courant d'air autour du bâti et le mouvement d'air tend à équilibrer ces zones [Figure 2.5]. En effet, la répartition de la pression générée par le vent sur un bâtiment est déterminée principalement par la forme du bâtiment et ses dimensions (notamment la hauteur, la

⁸³ : Nikolopoulou, M. (2004). *Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain: une approche bioclimatique*. Projet R.U.R.O.S : Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces. Édition C.R.E.S., Grèce.

largeur, la longueur et l'inclinaison du toit), la nature de l'environnement et les obstacles immédiats du site ; la vitesse moyenne et la structure de turbulence du vent incident (Hoxey et al.1993, Baetke et al.1990, Krishna 1995, Mochida & Lun 2008, Toja-Silva et al. 2018).

Suite aux améliorations apportées récemment à d'autres aspects de la conception, l'effet des bâtiments à grandes hauteurs sur le vent a constitué la problématique de plusieurs recherches. Le vent provoque des pressions aérodynamiques sur les surfaces de ces bâtiments et affecte le confort des piétons et les caractéristiques de l'environnement microclimatiques aux alentours. A ce propos, Sao et al. (2019), indique que les faces au vent sont soumises à des coefficients de pression positifs dus à la force constante du vent et la dissipation directe du vent. En raison de la séparation des courants de friction et de la génération de tourbillons, les faces sous le vent sont exposées à une pression d'aspiration. Selon Dani et al. (2015) cette pression a créé une zone turbulente qui affectera la zone située au pied et aux alentours du bâtiment entre 1m et 60m. Cette zone recevra de grandes vitesses pouvant atteindre 5 m/s.

L'écoulement du vent autour d'un obstacle unique et isolé est bien connu. Néanmoins le groupement de plusieurs éléments bâtis le rend plus complexe car l'assemblage de deux bâtiments seulement suffit pour modifier sa trajectoire. Il est donc attendu qu'une situation urbaine complexe va créer des modèles de flux compliqués et toute généralisation devient difficile. Dans ce contexte, quelques connaissances de base sur l'aérodynamisme des bâtiments peuvent être rappelées. Il faut d'abord signaler que les masses d'air contournent le bâtiment selon un écoulement qui varie avec la géométrie et les dimensions du bâti. Les caractéristiques de cet écoulement sont déterminées par la position des bâtiments par rapport à la provenance du vent.

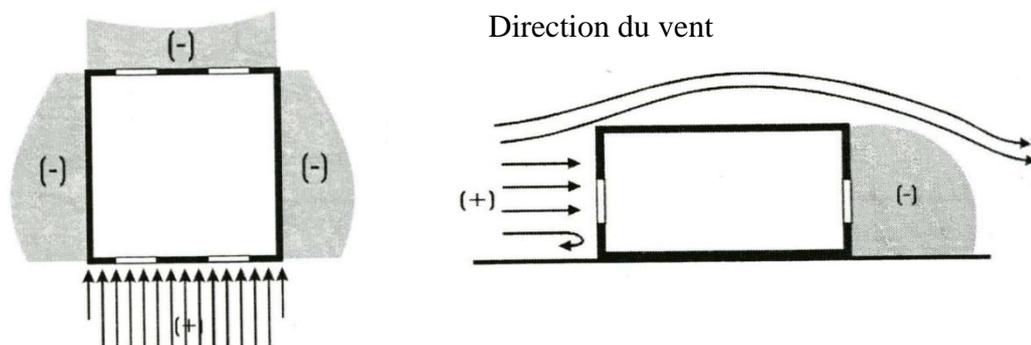
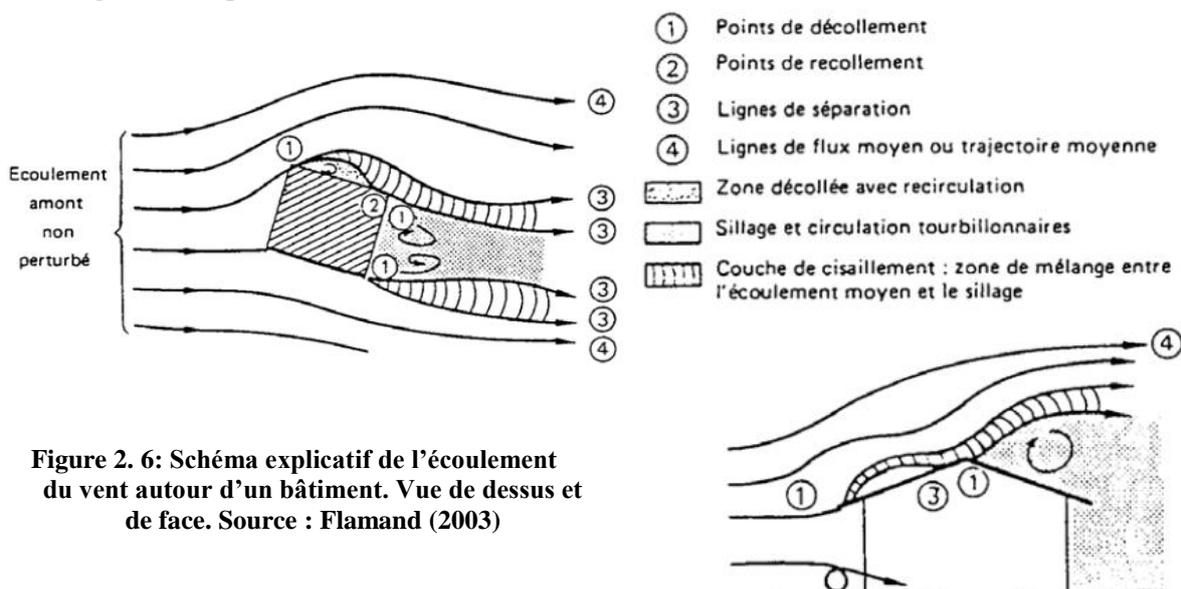


Figure 2. 5: Champ de pression et dépression autour d'un obstacle
Source : Olgyay (1998)

Plus précisément, lorsque le vent s'écoule autour des bâtiments, perpendiculairement à une des façades, différentes zones perturbées peuvent être distinguées: sur la façade au vent une zone de surpression ; sur les côtés et la partie supérieure un décollement et une couche limite turbulente ; sur la façade sous le vent une zone de dépression turbulente [Figure 2.6]. Théoriquement, on peut ainsi distinguer une zone en amont du bâtiment dans laquelle le vent suit un écoulement laminaire ou tous les filets fluides sont quasiment parallèles. De part et d'autre du bâtiment, le vent prend de la vitesse mais reste en régime laminaire dans la zone de détournement de l'écoulement moyen. Au niveau de la zone tourbillonnaire, le vent devient turbulents et les filets fluides perdent leur parallélisme et prennent des directions différentes. Le long des murs, se trouve une zone de cisaillement liée aux phénomènes visqueux et une zone décollée avec recirculation et qui dépend des aspérités le long des murs [Figure 2.6]. Sur les angles vifs du bâtiment se localise la zone de décollements **Barré (2000) & Flamand (2003)**.

Par simulation numérique, **Phuc et al. (2018)** compare l'écoulement du vent autour d'un bâtiment isolé, avec l'écoulement autour de deux bâtiments combinés et autour d'un groupement bâtiments en milieu urbain [Figure 2.7]. Autour du bâtiment rectangulaire isolé, l'écoulement est marqué par un flux uniforme. Le champ de flux autour du bâtiment est généré par un flux turbulent. Au 2^e cas, le flux devient complexe et génère un grand flux tourbillonnaire distinctif qui interfère avec le flux décollé sur le toit. Quant au 3^e cas, un écoulement turbulent important se produisait dans la zone tourbillonnaire en raison de la forte influence des immeubles avoisinants avec un décollement sur les angles et le toit. Aussi une distribution de la pression du vent caractérisée par de fortes pressions positives et négatives se produisait simultanément.



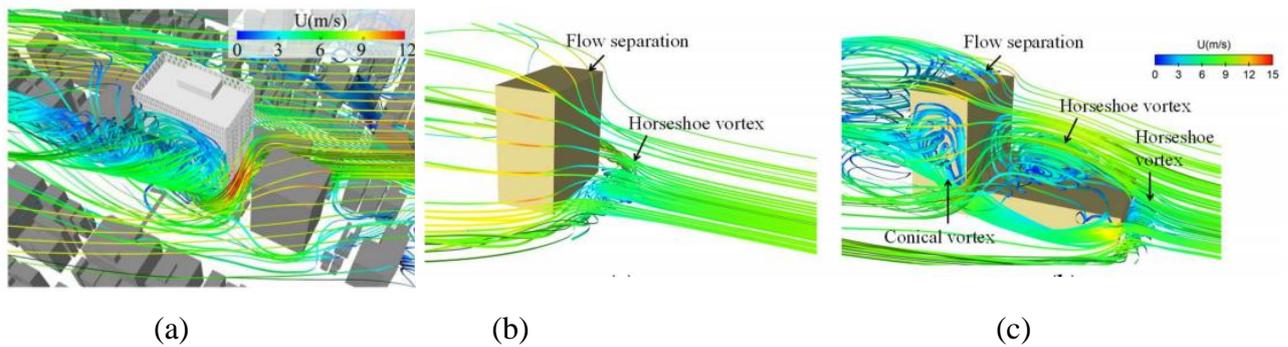


Figure 2. 7 : Ecoulement du vent autour des obstacles bâtis. (a) groupement bâti, (b) bâtiments composés, (c) bâtiment isolé. Source : Phuc et al. (2018)

Chatelet et al. (1998) rajoutent dans ce contexte qu'en cas des obstacles bas dont la hauteur ne dépasse pas 15m, le vent a tendance à passer par-dessus [Figure 2.9] et les filets d'air vue de dessus sont peu perturbés. En revanche, lorsque les obstacles sont hauts, les filets d'air sont perturbés dès le niveau des piétons. La figure 2.8(b) et la figure 2.9 illustrent le fait qu'un tourbillon peut se produire aussi face au vent, en zone de surpression. Une coupe verticale d'un édifice haut présente verticalement un tourbillon au vent et sous le vent. A cause de la vitesse, les surpressions sont d'autant plus importantes que la hauteur est grande. Cela concorde avec le sens du tourbillon qui va de (+) vers (+) sur la façade et les tourbillons en arrière de la coupe sont souvent plus complexes, car on peut observer un effet de sillage.⁸⁴

Donc on peut en conclure que l'effet d'abri créé par un obstacle donné est fonction de sa hauteur et de sa longueur. Cet effet est surtout important tout près de l'obstacle et du sol. L'étendue de la zone turbulente correspond à environ trois fois la hauteur de l'obstacle, la turbulence étant plus forte derrière l'obstacle que devant celui-ci. Donc plus la hauteur est élevée plus les surpressions sont importantes. Dans le cas des obstacles combinés et formés de plusieurs assemblages, il sera difficile de décrire l'écoulement du vent. Pour ce faire, il faut repérer et localiser les zones de surpression au vent et les zones de dépression sous le vent, puis représenter les courants d'air qui naissent des pressions les plus élevées vers les plus basses. La figure 2.8 (c) illustre ce cas, car un vent va se déplacer des surpressions vers les dépressions dans une rue que beaucoup croyaient en air calme⁸⁵.

⁸⁴ : Chatelet, A., Fernandez, P., Lavigne, P. (1998). Op.Cit., p. 47.

⁸⁵ : Ibid., p. 48.

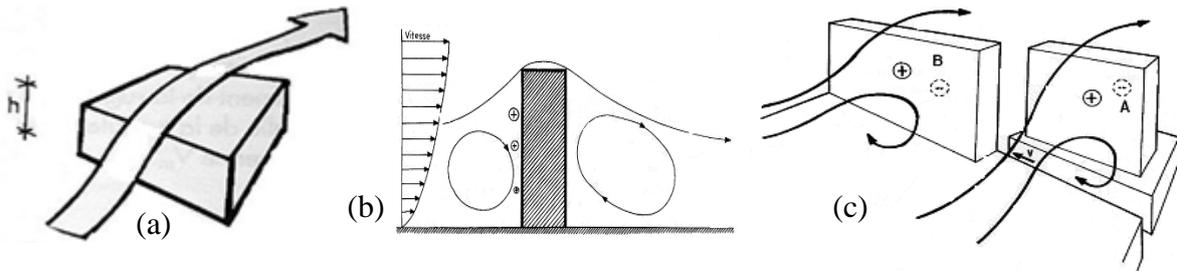


Figure 2. 8: Effet des obstacles. (a) obstacle bas - $H < 15$ m, (b) obstacle haut, (c) obstacles combinés
Source : Chatelet et al. (1998).

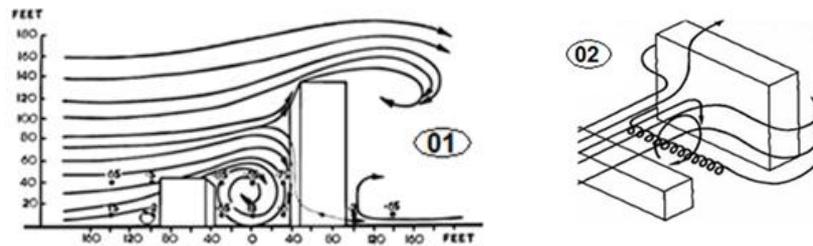


Figure 2. 9: Trajectoire de l'écoulement du vent autour de deux bâtiments haut et bas.
Source: 1- Blocken et al. (2004)⁸⁶, 2- Nikoloupou (2004).

2.3.2. Géométrie des obstacles bâtis

En milieu urbain, les mouvements d'air sont fortement perturbés par de nombreux obstacles de formes diverses notamment celles irrégulières. Leur géométrie influe sur la force et la nature de l'écoulement. Ceci est le cas des bâtiments ayant des géométries en forme de L et U. La description de l'écoulement du vent autour de ces formes et distribution de pression est difficile à évaluer et estimer.

Certains chercheurs ont réalisé des travaux dans ce sens. **Gomes et al. (2006)** ont analysé le champ de pression autour des bâtiments ayant de formes irrégulières, en particulier de forme de L et U à travers l'expérimentation en soufflerie et la simulation numérique par CFD. Certaines directions du vent ont été choisies pour lesquelles le champ de vitesse a été évalué. Il a été constaté que la distribution de la pression peut changer considérablement avec la forme du bâti et l'angle d'incidence du vent [Figure 2.10]. En outre, les flux obtenus à travers la simulation numérique dans le voisinage immédiat des faces intérieures de ces bâtiments sont irréguliers. **Brown et DeKay (2000)** ont fait une comparaison du comportement du vent autour des formes en L et U. L'écoulement du vent dans les cours semi-fermés dépend de leur ouverture et de leur orientation par rapport au

⁸⁶ : Blocken, B., Carmeliet, J. (2004). *Pedestrian wind environment around buildings: literature review and practical examples*. Journal of thermal envelope and building science. 28(2). pp.107- 159.

flux incident [Figure 2.11]. Cela détermine la pression et le phénomène qui se développe à l'intérieur. De l'autre côté **Reiter (2008)** a évalué le vent autour de deux bâtiments séparés par un passage formant L en choisissant une incidence du vent perpendiculaire. Les résultats de simulation montrent que la zone la plus critique pour l'écoulement se localise dans le passage en présentant des vitesses du vent élevées. Une autre étude expérimentale de la répartition de la pression du vent a été réalisée par **Amin et al. (2011)** sur des modèles de bâtiments en forme de L et T avec un intervalle d'incidence du vent allant de 0° à 180° . Il en résulte que la forme et les dimensions des modèles affectaient de manière significative la distribution de la pression du vent sur les différentes faces et que le coefficient de pression varie considérablement en fonction de la direction du vent. **Merlier (2015)** travaille sur l'interaction entre le vent et les différentes morphologies du bâtiment en particulier la forme en U [Figure 2.13]. En effectuant la simulation, la zone de surpression créée dans la cour induit un écoulement ascendant qui pourrait intensifier le détachement de la couche de cisaillement par rapport au bloc en U. de même, la nature du flux et la formation des tourbillons en amont, dans la cour ou en aval du bâtiment dépendent de la longueur et l'orientation par rapport à l'incidence du vent. Suivant cet axe aussi, **Sanyal et Dalui (2018)** ont également estimé par simulation le flux du vent autour des formes en U [Figure 2.12]. Avec le changement d'angle d'incidence (0° , 30° , 60° et 90°), les trois faces intérieures ont subi des pressions négatives et variables en raison de la formation des tourbillons dans la cour.

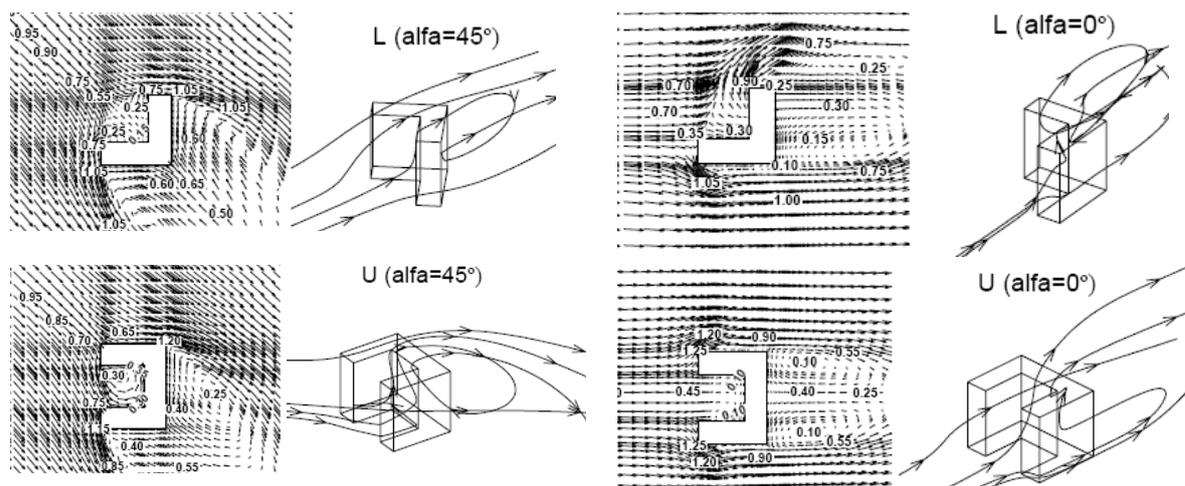


Figure 2. 10: Champ de vitesse autour des bâtiments L et U à H= 2m pour la direction du vent de 0° , 45° , Source : Gomes et al., 2006.

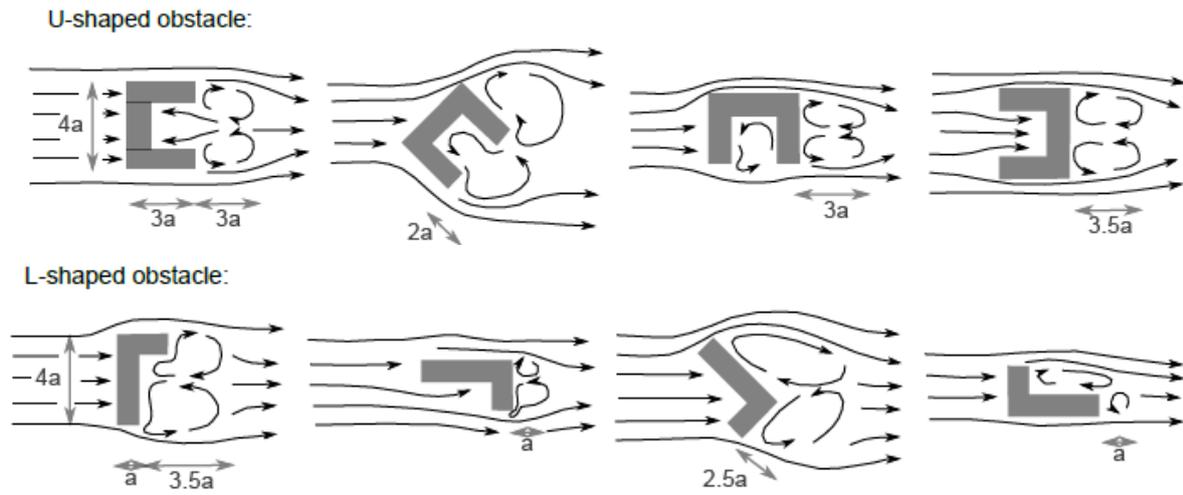


Figure 2. 11 : écoulement du vent autour des formes en U et L
Source : Brown et DeKay (2000)

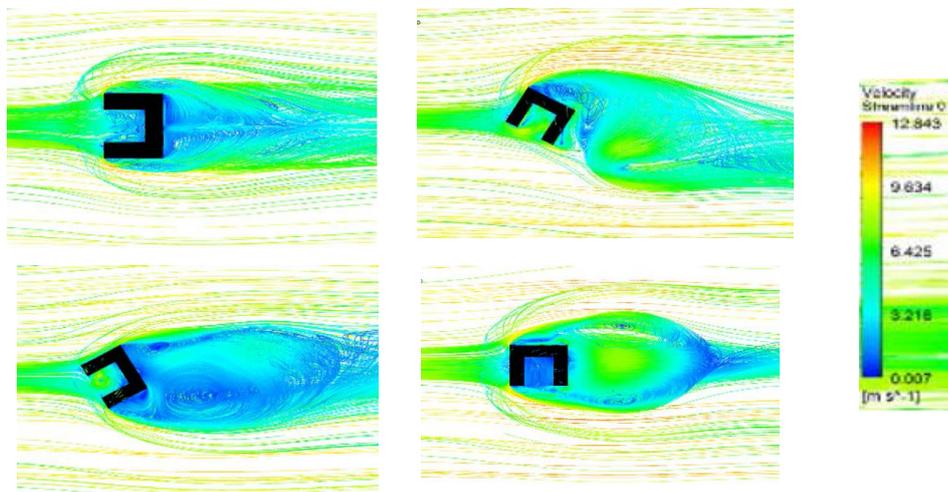


Figure 2. 12: Champ de vitesse autour de bâtiment en U pour la direction du vent de 0°, 30°, 60° et 90°. Source : Sanyal et al. (2018)

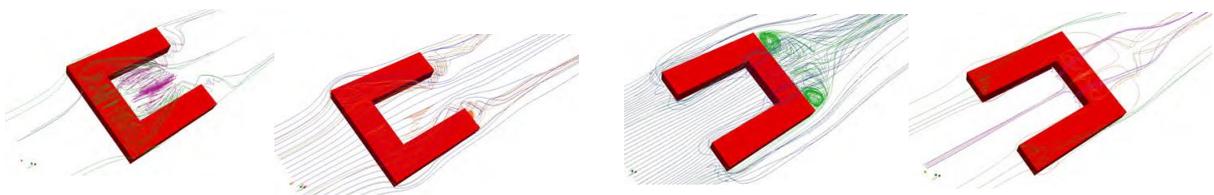


Figure 2. 13 : Le flux du vent autour des formes en U
Source : Merlier (2015)

Cependant, les obstacles peuvent éventuellement avoir une forme circulaire. Lorsque le vent rencontre un obstacle parfaitement aérodynamique comme un arbre à masse foliaire

dense, le fluide s'écoule tout autour parfaitement⁸⁷. **Kormaníková et al. (2018)** indique que la forme circulaire du bâti permet efficacement de changer la situation de vent turbulent en une plus calme. Le sillage du côté sous le vent du bâtiment circulaire est moins turbulent et le flux de vent est dirigé de la manière très souple.

2.3.3. L'ombre du vent ou la zone protégée (wind shadowing)

Ces obstacles influent aussi sur l'intensité des vitesses du vent et créent ce qu'on appelle l'ombre du vent. La zone abritée donc est un terme météorologique décrivant les effets que la géométrie et la proximité des obstacles réduisent les vitesses du vent locales au-dessous de ceux qui auraient été observés en l'absence des constructions (**Olgay 1998**). La réduction de la vitesse de vent à la suite des obstacles qu'ils soient naturels ou construits est un effet qui se prolonge à une distance considérable en arrière vent en abri des caractéristiques de l'écoulement [Figure 2.14]. D'après **De Herde et al. (2006)**, l'influence d'un obstacle peut se faire sentir jusqu'à une distance équivalente à 4 -12 fois sa hauteur. Chose confirmée par **Brown et DeKay (2000)** en faisant la simulation de l'effet du vent autour d'un cube et un parallélépipède isolés dans laquelle la zone protégée se prolongent derrière l'obstacle et sa varie selon l'incidence du vent [Figure 2.15] . **Yao (2016)** montre également que dans la zone de sillage derrière de l'obstacle se produit des turbulences et par conséquent la vitesse du vent est réduite jusqu'à ce que l'écoulement rencontrera d'autres obstacles. La largeur et la longueur du flux de sillage dépendent de la largeur et la hauteur du bâtiment.

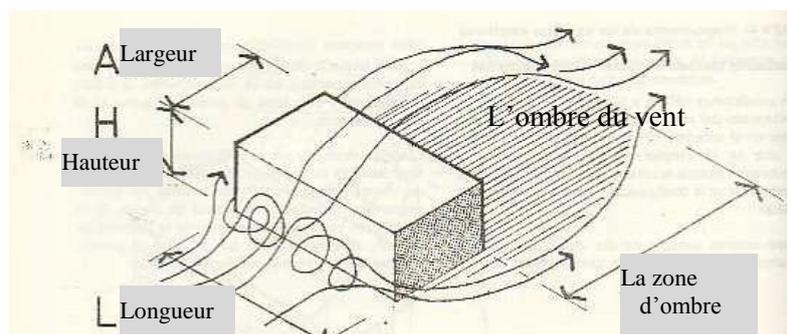


Figure 2. 14: La zone protégée dû au vent (wind shadowing)
Source : Olgay (1998)

⁸⁷ : Chatelet, A., Fernandez, P., Lavigne, P. (1998). Op.Cit., p. 46.

Rectangular-shaped obstacles:

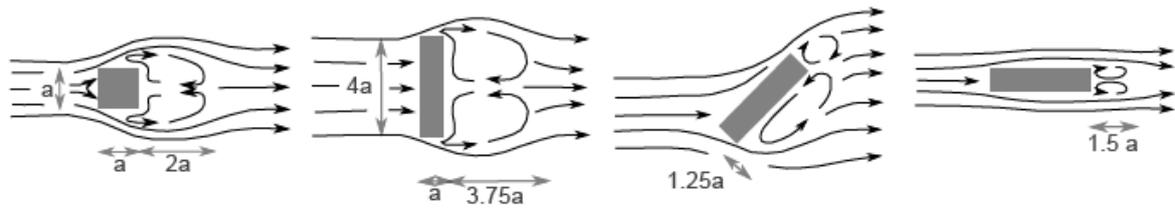


Figure 2. 15 : Wind shadowing au niveau d'un obstacle rectangulaire et carré
Source : Brown et DeKay (2000)

D'une manière générale, cette distance d'éloignement doit être bien étudiée au niveau des plans de masse. L'optimisation du plan de masse consiste à développer des mécanismes de brassage de l'air et à canaliser les écoulements aérauliques en tenant compte de la nature des régimes des vents. Il est approprié de préciser que cette zone de protection est distinguée des augmentations localisées de la vitesse du vent, qui peuvent se produire quand le vent est accéléré dans et autour des rangées de bâtiments élevés (gratte-ciel), serrés, ou espacés. Cette distance est fonction des caractéristiques géométriques des bâtiments, de leur orientation par rapport au vent, de leur disposition, de leur porosité.

2.3.3.1. Les caractéristiques géométriques des bâtiments

La profondeur de la zone de protection se diffère d'une forme à une autre, mais reste dépendante des dimensions de l'obstacle notamment la longueur car la profondeur de la zone protégée augmente avec l'augmentation de la longueur du bâtiment [Figure 2.17]. Selon **Merlier (2015)** plus l'obstacle est large, plus la zone d'ombre est longue et large, mais plus l'obstacle est long, plus cette zone est courte [Figure2.16]. Aussi, la profondeur de la zone d'ombre est influencée par la hauteur. Lorsqu'en augmentant la hauteur du bâtiment on augmente la profondeur et la hauteur de la zone de l'ombre de vent [Tableau 2.4]. De même, en diminuant la relation entre la largeur et la hauteur, on augmente l'ombre de vent.

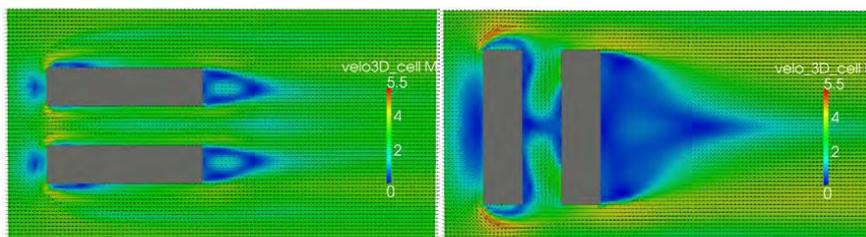


Figure 2. 16 : La profondeur de la zone d'ombre du vent selon la forme
Source : Merlier (2015)

Tableau 2. 4: Relation entre la zone protégée et la hauteur et la largeur de l'édifice
 Source: Olgay (1998)

Coupe		Longueur du bâtiment 'L'				
		2H	4H	8H	16H	24H
	Hauteur = largeur	2.5	3.75	5.25	8	8.75
	Hauteur = 2* largeur	2	2.75	3.75	6	7
	Hauteur = 3* largeur	2.25	3.25	4.25	5.75	5.5
	2* Hauteur = largeur	2.5	4	6	8	9
	3* Hauteur = largeur	2.25	3.75	5.5	6.25	7
	Couverture 2 versants 45°	1.5	2.5	4.5	6.5	7.5
	Couverture 2 versants 30°	2	2.5	4	6.25	8.25
	Couverture en pente 15°	2.5	4	6.5	9	11.5
	Couverture en pente 15°	2	3.25	5	8.75	10.75

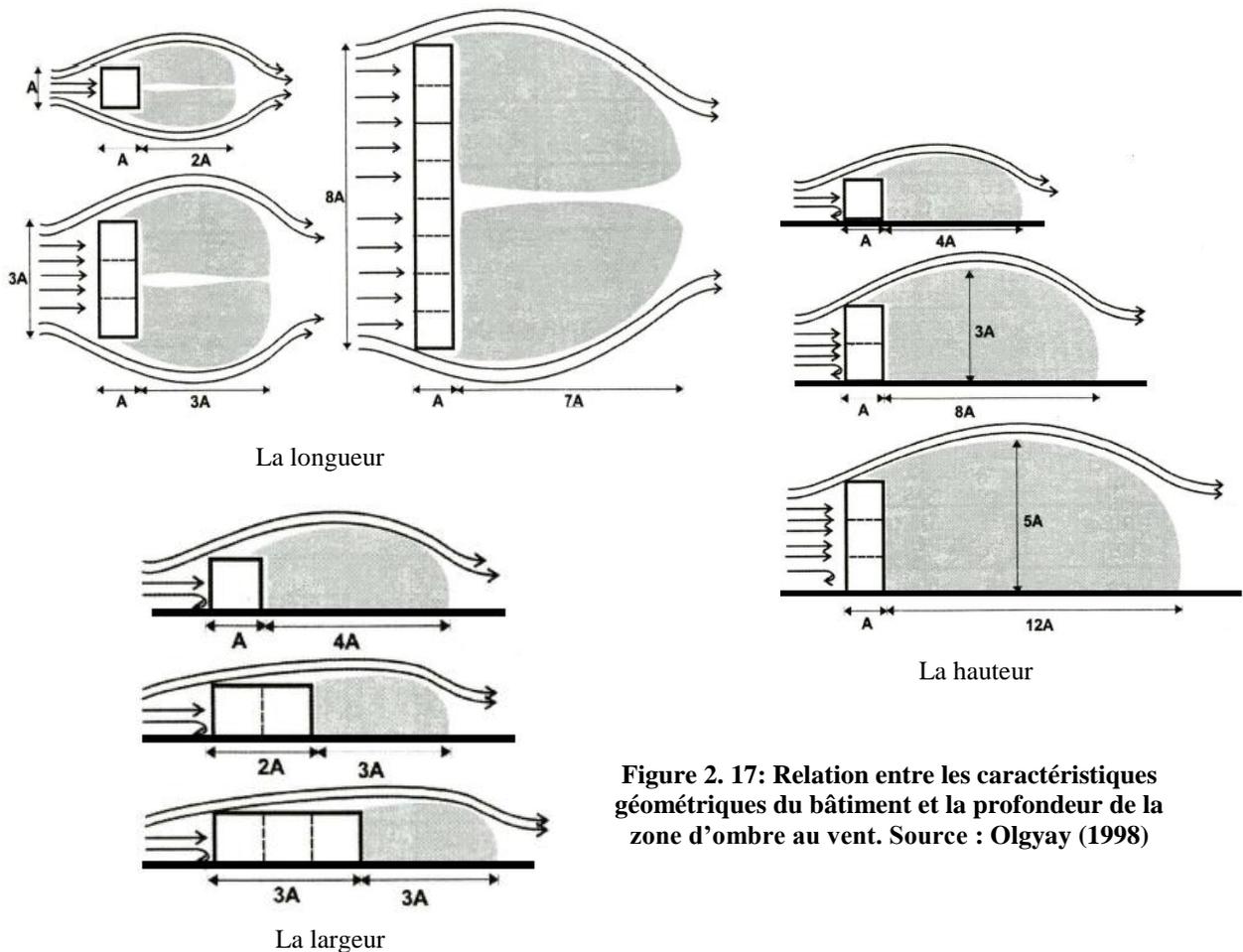


Figure 2. 17: Relation entre les caractéristiques géométriques du bâtiment et la profondeur de la zone d'ombre au vent. Source : Olgay (1998)

2.3.3.2. L'orientation par rapport au vent

L'orientation des bâtiments se fait suivant l'effet de la radiation solaire et la direction des vents dominants, mais malheureusement ce qui est remarqué c'est que la bonne orientation solaire est la plus appropriée lors de la conception par contre la direction du vent est négligée ou moins appropriée. La ventilation est optimisée lorsque les bâtiments sont orientés dans la direction des vents dominants. Seule la façade face au vent est en haute pression, les autres orientations restent en basse pression. Bien que la plus grande pression du côté exposé au vent d'un bâtiment soit produite quand la façade est perpendiculaire à la direction de vent [Figure 2.19].

Dans cet axe, **Givoni (1978)** a montré que si des fenêtres sont placées à 45° à la direction du vent, la vitesse moyenne d'air d'intérieur est augmentée et une meilleure distribution de mouvement d'air d'intérieur sera fournie⁸⁸. Autrement dit, l'orientation des bâtiments affecte les conditions de ventilation. La circulation naturelle de l'air est induite soit par une zone de passage des vents dominants, soit par les courants d'air d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression. Les variations des angles d'incidence ont des conséquences sur la proportion de la zone de l'ombre de vent (**Klemm et al. 2004**). L'angle d'incidence de 90° produit l'ombre de vent maximale **Olgyay (1998)**.

2.3.3.3. La disposition des bâtiments

Lorsque les bâtiments sont mal placés les uns par rapport aux autres, les zones protégées ou calmes entre bâtiments peuvent se juxtaposer et empêcher l'air de s'écouler vers les rangées derrières et créer des zones d'air mortes. La disposition des bâtiments en échiquiers permet une meilleure distribution de l'écoulement de l'air et diminue les effets des zones d'air stagné ou mort (**De Herde et Liébard 2006, Ng 2005**) [Figure 2.18]. Aussi, lorsque les constructions sont implantées diagonalement sur les parcelles, les zones de haute et de basse pression englobent alternativement le bâti, assurant ainsi une ventilation transversale.

Nugrahanti et al. (2018) ont effectué une comparaison entre cinq configurations comportant des dispositions de bâtiments différentes. Entre toutes les dispositions proposées (parallèle, quinconce), la disposition en zig-zag semble la plus optimale [Figure 2.20]. Elle permettait au vent de se déplacer dans les espaces entre bâtiments et le diriger vers les structures suivantes en réduisant la zone d'ombre. Cependant, la disposition parallèle a créé une vaste zone d'ombre vue que l'espace entre les deux rangées est étroit

⁸⁸ : Givoni, B. (1978). L'homme l'architecture et e climat. Editions du Moniteur. Paris, p.297.

en offrant donc une mauvaise ventilation. Ils ont déterminé également que la distance entre les bâtiments doit être supérieure à 01 fois la hauteur du bâtiment pour que l'air puisse la traverser. Dans le cas où cette distance ne soit pas respectée, la ventilation du bâtiment arrière sera affectée. En revanche, l'élargissement de la distance produirait une zone moins protégée et un flux légèrement turbulent. Dans le cas du non-respect de la distance, la ventilation en arrière sera affectée.

Donc afin d'assurer une bonne circulation de l'air, il est important de prévoir des espaces suffisamment grands entre les bâtiments (Ho et al. 2015). En climat humide, la ventilation est primordiale ; on préconise alors des plans de masse aérés dans les limites de l'espace disponible.

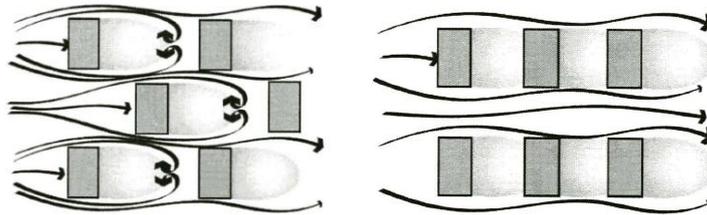


Figure 2. 18: Effet de la disposition du bâti sur la zone protégée
Source : Olgay (1998)

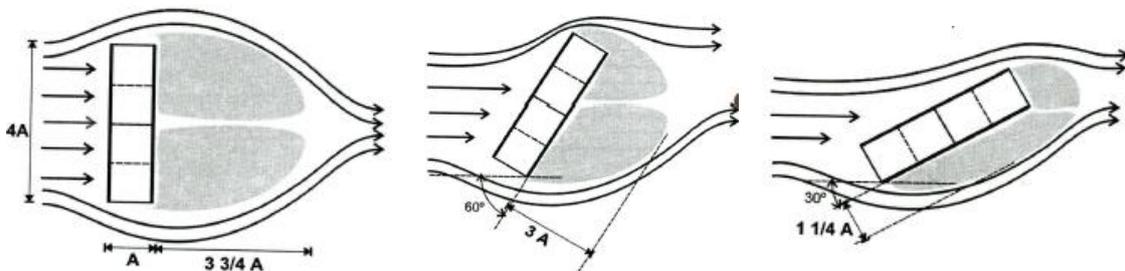


Figure 2. 19: Effet de l'angle d'incidence par rapport au vent sur la grandeur de la zone d'ombre. Source : Olgay (1998)

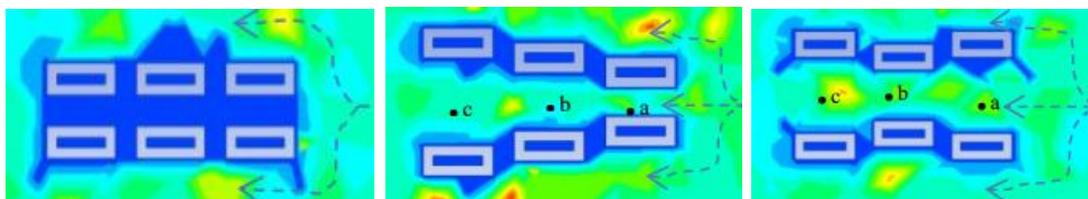


Figure 2. 20 : Comparaison entre les dispositions de bâtiments et la profondeur de la zone protégée
Source : Nugrahanti et al. (2018)

2.3.3.4. La porosité

Il s'agit du niveau de pénétration du vent dans une entité urbaine. Cette porosité est définie exclusivement sur la base des caractéristiques géométriques du tissu urbain. Parmi les caractéristiques urbaines, la géométrie des espaces libres est la plus décisive dans la définition des écoulements de l'air en milieu urbain [Figure 2.21]. Tous les espacements entre bâtiments y sont intégrés pour définir le niveau de pénétration du vent, la nature du flux et sa vitesse (Ng 2005). Cependant, il est à rappeler que c'est la géométrie des bâtiments qui influe sur la géométrie des espaces libres. Ces derniers peuvent être décrits par la densité du plan donnée par le rapport surface toiture/surface sol et l'emprise au sol.

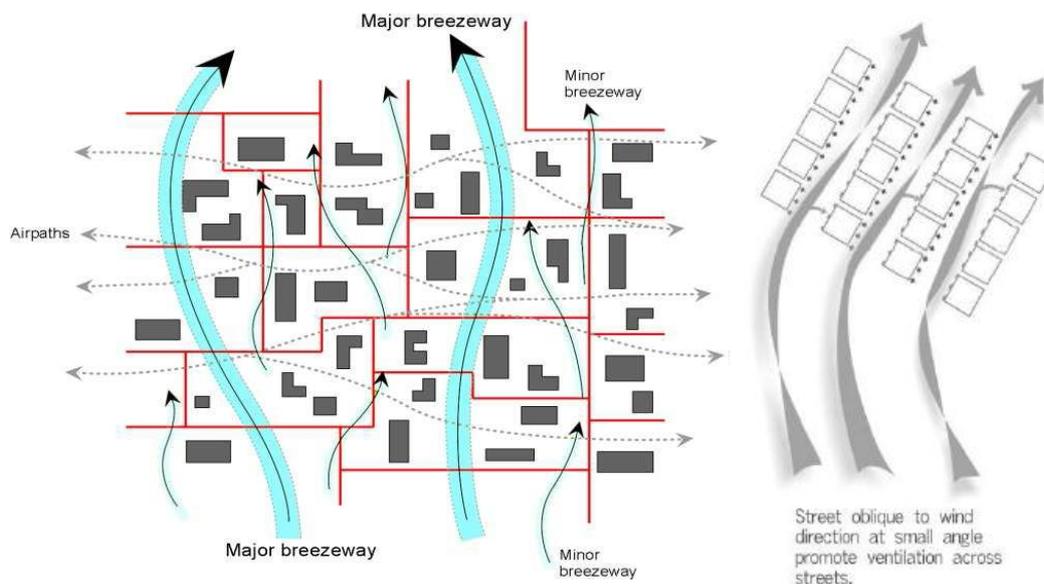


Figure 2. 21 : Porosité entre bâtiments
Source : Ng (2005)

2.3.4. Les effets aérodynamiques en milieu urbain

Les bâtiments modélisent les écoulements par leur forme notamment le type de toit (Rafailidis 1997, Shakeel et al. 2002, Tarrade et al. 2004), leurs dimensions en particulier la longueur et la hauteur et leurs juxtapositions. Toutefois, la disposition des constructions peut engendrer, localement ou sur des étendues importantes, des phénomènes d'accélération du vent, et par conséquent des accidents aérodynamiques peuvent se produire [Figure 2.22].

Ces effets aérodynamiques ont été beaucoup discutés (Chatelet et al.1998, Bottema 1997, Gandemer 1979, Gandemer 1991, Guyot 1977, Guyot 2010) et présentent divers formes. L'effet des trous ou pilotis sous bâtiment se produit quand la hauteur est supérieure

à 15m. L'air passe à travers les trous engendrant un phénomène qui relie l'avant du bâtiment en surpression et son arrière en dépression (**Bouketta 2011**). L'entrée de l'air se fait de façon diffuse, mais la sortie est localisée en jet. La zone d'inconfort n'est pas limitée au volume de liaison mais se poursuit en aval, dans la zone du jet, dans un volume de même ordre que celui du trou. Le deuxième effet se produit aux coins des constructions. Pour que le vent puisse continuer sa trajectoire face à un ensemble compact ou un bâtiment isolé, il doit contourner ce dernier en passant par les arêtes situées entre la face et les plans latéraux en dépression, créant ainsi un effet de coin (**Gomes et al. 2006, Jedrzejewski et al. 2017**) [Figure 2.23].

Par ailleurs, quand le mouvement d'air devient tourbillonnaire sur la façade située sous le vent en s'étalant sur une distance égale à presque deux fois la hauteur ($2 \cdot H$) du bâtiment en question, on parle alors de l'effet de sillage. Cet effet englobe aussi l'effet de coin, ce qui rend la vitesse de l'air en aval excessive et extrêmement inconfortable [Figure 2.22]. Ainsi, l'effet de barre pourra exister dans le cas d'une déviation de l'écoulement du vent au passage d'une barre avec un angle proche de 45° avec une hauteur $H < 25$ m, et longueur minimum de la barre $L > 8H$.

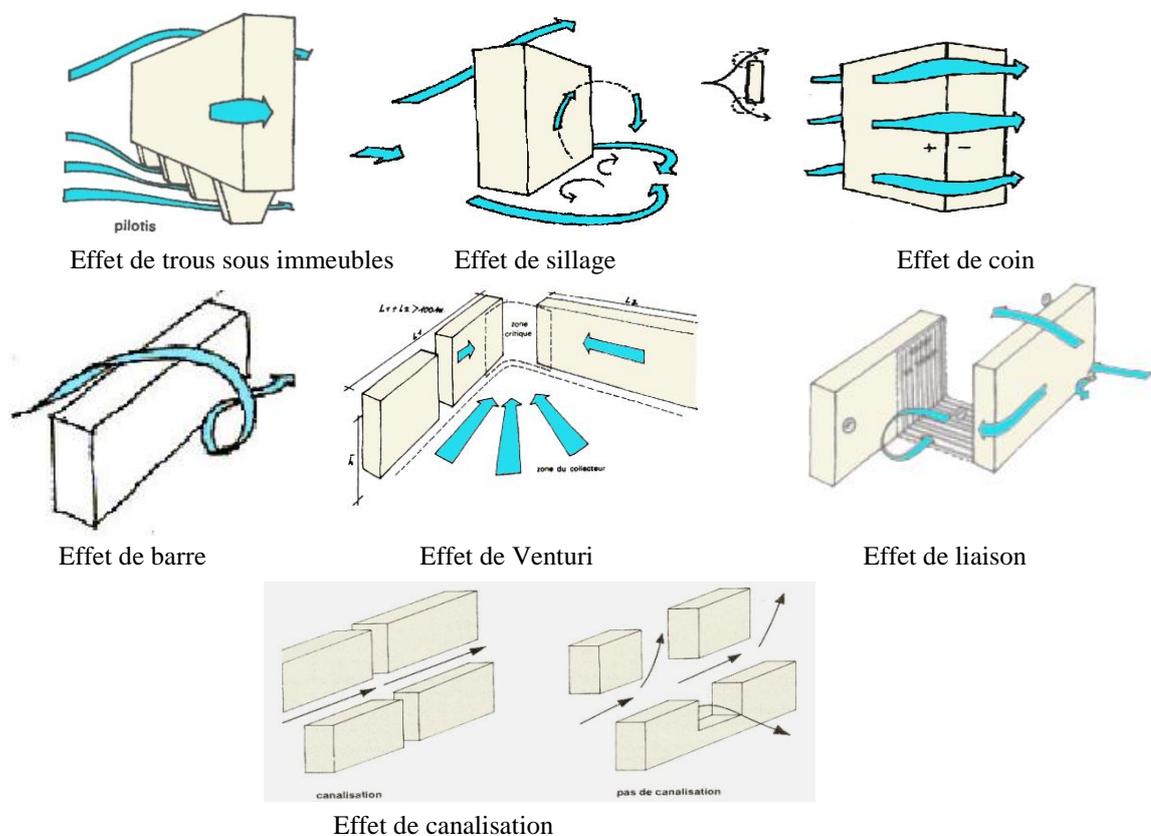


Figure 2. 22: Les différents effets aérodynamiques dûs au vent.
Source : Chatelet et al. (1998)

Les constructions subissent également l'effet de venturi lorsque celles-ci sont disposées en angle créant une ouverture face au vent avec une hauteur moyenne $H > 15$ m et une longueur minimale des deux bras ($L_1 + L_2 > 100$ m), forment une sorte de canal collecteur de vents. Cet angle est la zone la plus critique vis-à-vis du confort aéraulique car la vitesse de l'air y est considérable. Par analogie ce phénomène du nom du physicien italien G.B. Venturi⁸⁹, ressemble à celui de la dynamique des fluides où les particules gazeuses ou liquides se retrouvent accélérées à cause d'un rétrécissement de leur zone de circulation. **Li et al. (2015)** ont travaillé sur la relation entre la production de l'effet venturi et l'angle d'ouverture du passage entre bâtiments. En faisant varier l'angle dans un intervalle de 0° à 180° , les résultats révèlent que le flux dans le passage est principalement déterminé par la combinaison des courants de coin et l'angle d'ouverture du passage [Figure 2.24]. Il est également montré que les passages convergents ont un effet de blocage du vent plus important que les passages divergents. Ce qui explique une mauvaise ventilation en angle de 15° , par contre un angle de 150° présente le meilleur choix pour promouvoir la ventilation au niveau des piétons.

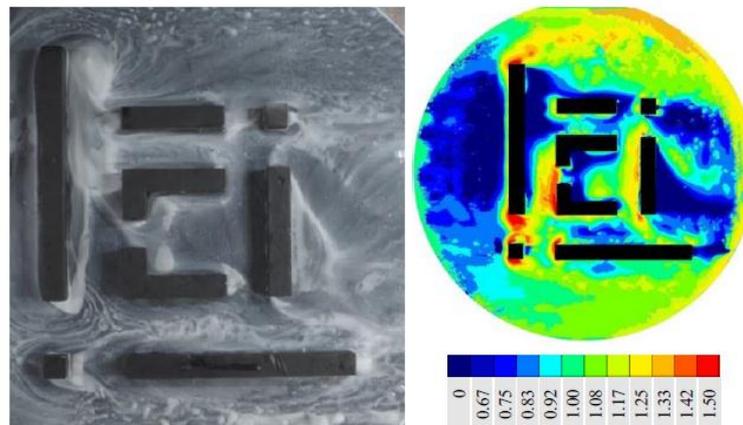


Figure 2. 23 : Écoulement du vent produisant l'effet de coin

Source : Jedrzejewski et al. (2017)

Un autre phénomène qui peut se produire dans les rues c'est bien celui de canalisation. Il correspond à une configuration classique d'une rue délimitée par des constructions en continu de chaque côté ce qui entretient et prolonge tout phénomène situé au début de la rue (**Li et al. 2015, Merlier 2015**). Pour qu'il y ait canalisation, les expériences ont montré qu'il faudrait que les parois du couloir soient d'une hauteur de plus

⁸⁹ : Le nom du physicien italien Giovanni Battista Venturi, est le nom donnée au phénomène de la dynamique des fluides, en utilisant un tube pour la mesure du débit des fluides.

de six mètres, légèrement poreuses (moins de 5 %) et que la largeur du couloir reste inférieure à $2H$. Il faut aussi signaler que dans une disposition décalée de deux constructions parallèles avec une hauteur de 15m et une distance $d \leq H$ va se créer un couloir de liaison au champ de pression existant entre la façade sous le vent du bâtiment amont et la façade au vent du bâtiment en aval. La zone de chevauchement ayant une pression négative liera le flux arrivant des zones positives. Ces effets types cités précédemment ne constituent qu'une base du savoir concernant les principales formes et dispositions d'édifices, car le phénomène vent est très variable.

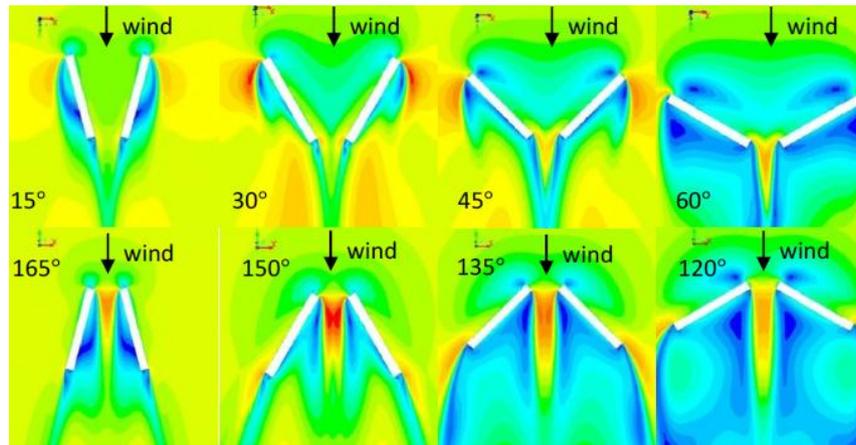


Figure 2. 24 : Effet de Venturi selon l'angle d'ouverture du passage
Source : Li et al. (2015)

2.4. Contrôle du vent en milieu urbain par "les indicateurs géométriques"

Le vent, paramètre de prime importance, représente un élément assez perceptible du microclimat urbain. Il peut être une source de fraîcheur et de ventilation en été, ou une source de nuisances en hiver en provoquant des états d'inconfort aux usagers de l'espace extérieur. Selon **Wang (2015)**, un bon environnement aéraulique devrait conduire à un ressenti confortable et être sûr. **Bottema (1993)** a expliqué la différence entre le vent confortable et le vent sûr. En fait, on ne peut prendre en compte que la vitesse sûre maximale pour les piétons. On constate que l'équilibre et la direction de la marche seront affectés quand la vitesse du vent est supérieure à 15 m/s. Cette situation pourrait être dangereuse pour les personnes âgées. En effet, **Bloken et al. (2012)** s'intéresse à l'évaluation du confort des piétons vis-à-vis du vent et de contrôler la sécurité contre les effets nuisibles du vent en milieu urbain. Le cadre de cette l'étude a pour but de soutenir et d'orienter les études futures de confort et de la sécurité du vent, et de cette façon peut contribuer à l'amélioration de la qualité aéraulique dans les zones urbaines.

A l'échelle d'une entité urbaine, les préoccupations liées au phénomène vent sont relatives au contrôle des effets aérodynamiques dans les espaces extérieurs liés au confort du piéton, la ventilation liée au potentiel qu'elle offre de renouveler l'air et de refroidir les bâtiments ainsi la ventilation pour la dispersion des polluants (**Ali-Toudert 2000**). Ces trois exigences dépendent notamment des caractéristiques des flux d'air à savoir la vitesse du vent, sa direction, sa nature et sa fréquence, associés aux propriétés géométriques du tissu urbain. Les choix formels doivent tenir compte des besoins définis par la nature du climat.

Pour notre recherche nous avons choisi d'évaluer la part des paramètres urbains géométriques influant sur le contrôle de la vitesse du vent. **Givoni (1998)** a souligné que « *Le vent urbain, en particulier, peut être contrôlé et modifié par les formes urbaines et leurs géométries* »⁹⁰. « *L'orientation des rues, le profil des constructions (forme, hauteur, dimension), leurs densité, leur orientation ainsi que leur configuration, sont alors les paramètres géométriques ayant un impact direct sur l'écoulement du vent en milieu urbain* »⁹¹.

2.4.1. Prospect équivalent de l'espace H/w

Etant donné le caractère fluide du vent, le facteur géométrique le plus déterminant dans le contrôle de l'écoulement de l'air est la géométrie de l'espace libre. Autrement dit, tous les espacements qui existent entre bâtiments aussi bien les espacements horizontaux (distances latérales et frontales) que leur relation avec la hauteur, déterminent fortement le niveau d'abri, d'exposition au vent dans l'entité urbaine. Ce profil, selon **Ait-Ameur (2002)**, est le rapport entre la hauteur moyenne de l'espace et sa largeur. Etant donné que l'espace entre les bâtiments n'est pas parfaitement rectiligne, l'auteur propose de prendre en compte la largeur la plus petite.

Ce profil urbain H/w définit la nature de flux et le taux de renouvellement d'air entre bâtiments ; il engendre des modifications du trajet et de la vitesse et l'apparition d'un mouvement tourbillonnaire au pied des constructions en fonction de ces espacements. Selon **Oke (1988)**, le régime du vent peut être catégorisé à l'échelle de la rue suivant trois types de mouvement selon le Tableau 2.5. Il s'agit donc du régime à rugosité isolée (isolated roughness flow), à interférence de sillage (wake interference flow) et du régime rasant (skimming flow). Il détermine l'apparition de chaque régime à une combinaison

⁹⁰ : Givoni, B. (1998). *Op.Cit.*p.259

⁹¹ : Ibid., p.256

d'intervalle des deux ratios d'aspect. Le régime de rugosité isolée du vent, apparaît entre deux bâtiments bien espacés [Tableau 2.5]. La majorité des études le comparent à un mouvement autour d'un bâtiment isolé étant donné qu'il n'existe pas d'interférence entre les flux du vent. Quand le ratio H/w augmente l'écoulement est plus agité, et ce qui conduit à une interférence de sillage. Avec un rapprochement supplémentaire, la cavité de la rue canyon devient plus isolée du mouvement de l'air glissant sur les toits des bâtiments [Figure 2.25].

Tableau 2. 5: Types de rue selon les ratios H/w et L/H
Source : Belgacem (2016)

Type de rue selon H/w	
$H/w < 0.5$	Rue peu profonde
$H/w = 1$	Rue uniforme
$H/w = 2$	Rue profonde
Type de rue selon L/H	
$L/H = 3$	Rue longue
$L/H = 5$	Rue moyenne
$L/H = 7$	Rue courte
Type d'écoulement selon H/w	
$H/w < 0.3$	Rugosité isolée
$0.3 < H/w < 0.7$	Interférence de sillage
$H/w > 0.7$	Rasant

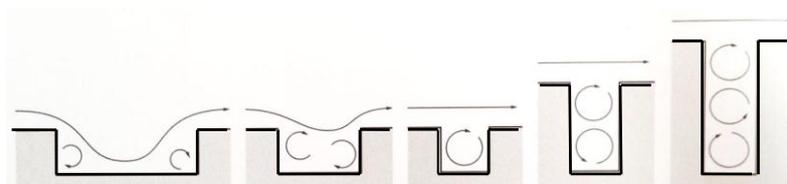


Figure 2. 25: Types d'écoulement vent selon le profil de la rue
Source : Belgacem (2016).

Ceci a été l'objet d'une étude faite sur les performances de ventilation extérieure dans des espaces extérieurs à prospect H/w différents (0.63/ 1.56/ 1.75/ 2.8). **Al-Sallal Khaled et al. (2012)** ont effectué une série de simulation CFD sur trois scénarios dans lesquels ils ont choisi un écoulement laminaire et turbulent. Le site étudié présente des bâtiments hauts (8, 24 et 34 niveaux – point D), des rues étroites (point G et point M), d'autres des rues larges (emplacements C, E, H et K) et d'autres sont des espaces ouverts (les emplacements A, B, F et L). Les résultats indiquent que les vitesses du vent étaient

importantes dans les rues larges et les espaces ouverts qui peuvent atteindre des valeurs maximales de 4,55 m/s en été et 5,06 m/s en hiver. Ceci peut être vu dans l'axe X07 des figures 2.26 & 2.27. Dans les rues étroites, la vitesse du vent reste stable à des valeurs faibles (0,51 m/s en hiver par rapport à 1,52 m/s en été).

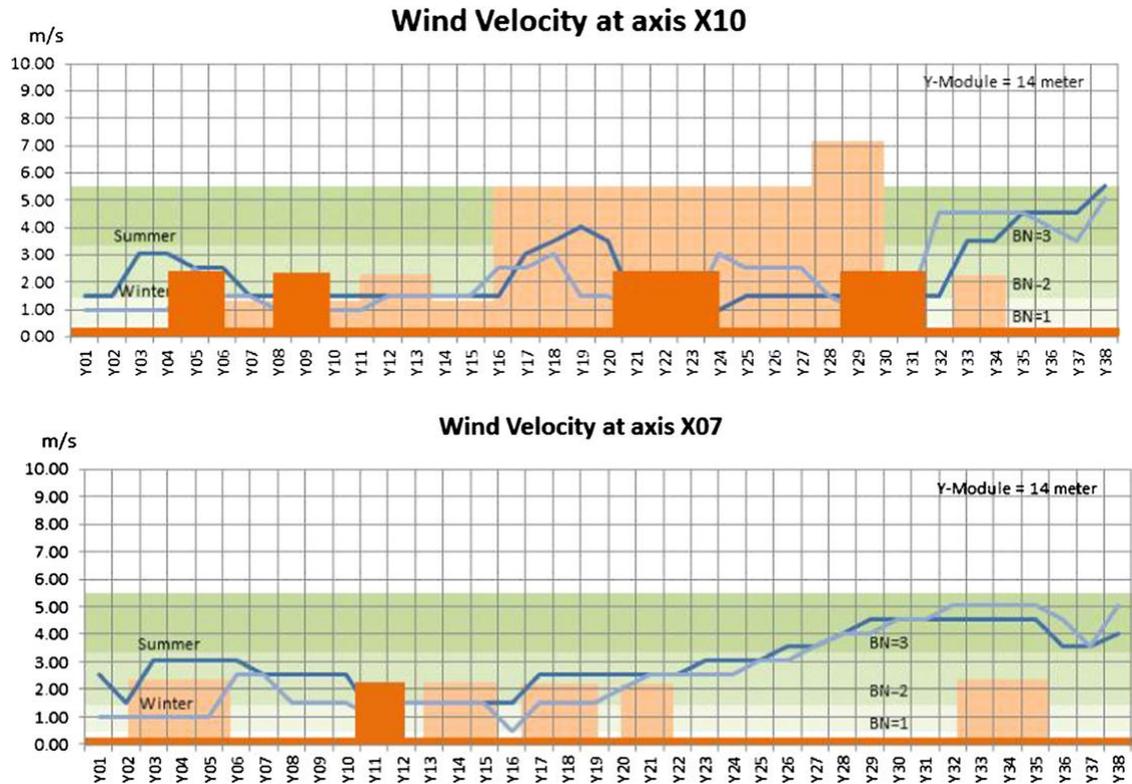


Figure 2. 26: Les profils de la vitesse du vent dans les deux saisons sur 02 axes
Source : Al-Sallal Khaled et al. (2012)

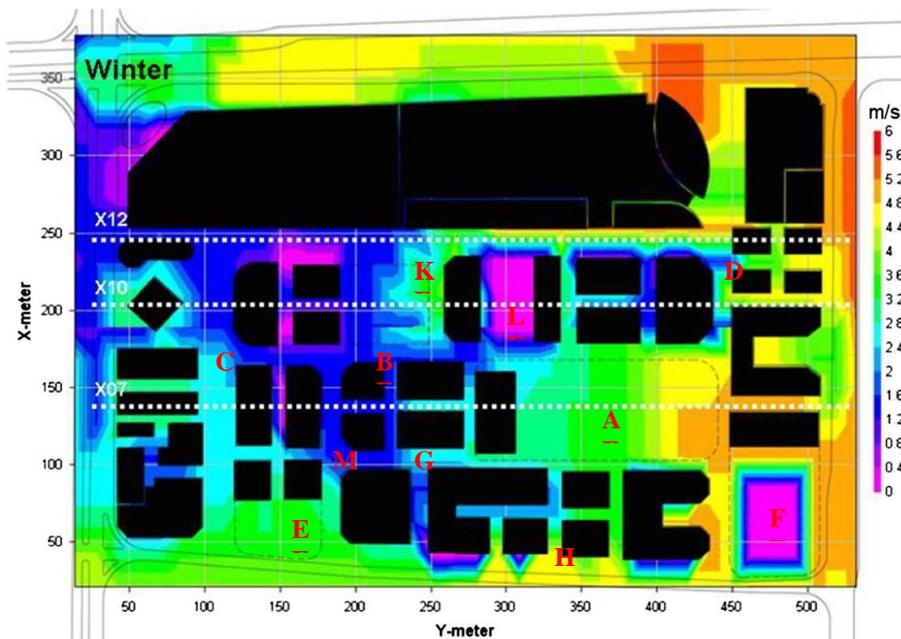
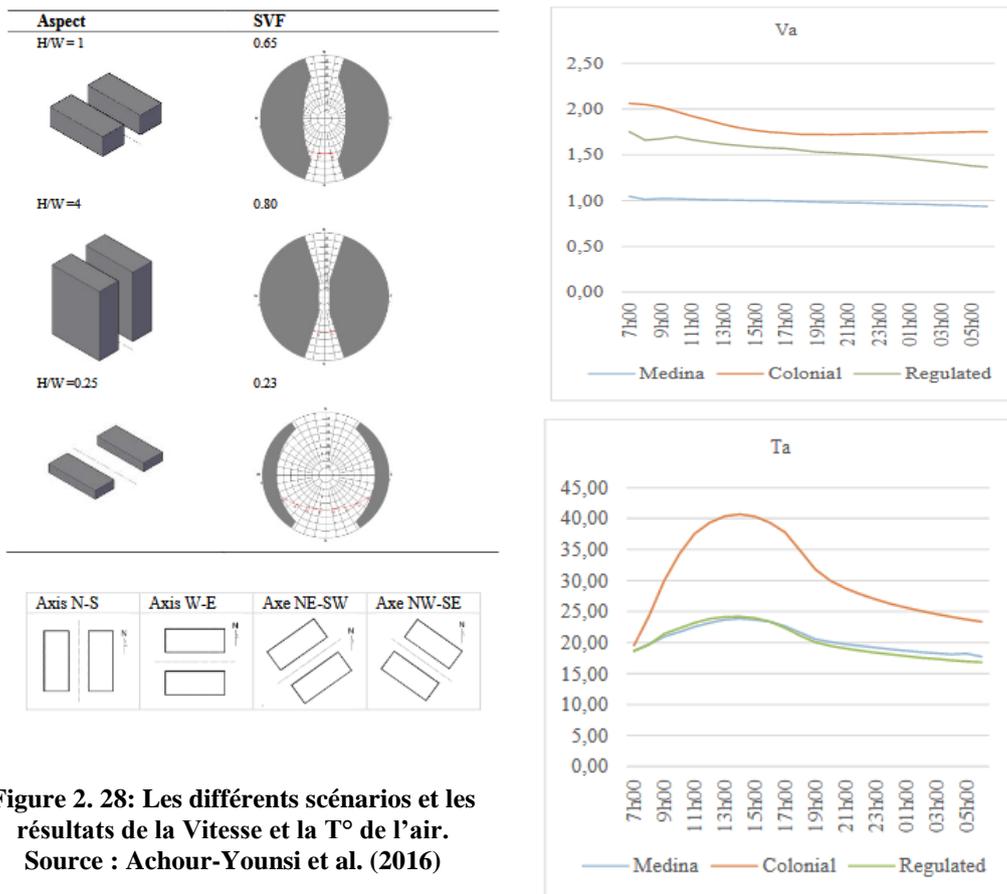


Figure 2. 27: Résultats de la simulation de la vitesse du vent en hiver
Source : Al-Sallal Khaled et al. (2012)

Dans ce même axe, **Kitous et al. (2012)** visent à étudier les mécanismes de circulation de l'air au niveau de la rue. Plus précisément, ils ont focalisé leur étude sur la géométrie de la rue (longueur, hauteur, largeur de la rue) et son impact sur le comportement du vent. L'investigation par mesure a eu lieu entre Février 2005 et Août 2006 dans la vieille ville de Ghardaïa en choisissant des rues à profil différent. Les principaux résultats ont mis en évidence l'impact de la géométrie de la rue et son orientation sur le vent. En effet, l'analyse des données a montré que la longueur et l'asymétrie de la rue influe sur l'intensité des courants d'air : l'écoulement horizontal est plus important dans une rue canyon longue et étroite que dans une rue plus courte et moins profonde. En outre, dans la rue longue et symétrique, les résultats révèlent un phénomène de canalisation important menant à une direction toujours parallèle à l'axe de la rue, même pour une provenance oblique.

En outre, **Achour-Younsi et al. (2016)** ont montré l'importance de la géométrie de la rue et de son orientation dans la création d'un environnement aéraulique confortable. Des rues à différents rapports H/w ont été sélectionnées de trois tissus urbains localisés au niveau de la capitale Tunis (tissu traditionnel de la Médina, tissu colonial et récent). Les résultats ont montré que les rues les plus profondes sont les plus confortables. Dans un climat subtropical méditerranéen comme celui de la Tunisie, un rapport H/w élevé pourrait présenter des conditions de confort thermique acceptables en été. Selon cette étude, il semble que l'orientation des rues soit tout aussi importante dans l'évaluation du confort thermique extérieur [Figure 2.28]. Pour toutes les configurations du rapport H/w, le scénario correspondant à l'orientation N-S s'avère confortable alors que l'orientation E-O reste à déconseillée.

Cela a également été validé par **Shishegar (2013)** affirmant que la géométrie des rues (rapports H/w et L/w) l'orientation influencent directement le flux d'air et l'accès solaire dans les canyons urbains et donc le confort thermique au niveau des piétons. Une rue plus large permet un meilleur mélange d'air et par conséquent une meilleure ventilation urbaine. En outre, une meilleure ventilation pourrait être obtenue dans une rue à différentes hauteurs de bâtiment. **Yin et al. (2014)** ont montré que l'augmentation de l'espacement entre constructions favorise la ventilation urbaine.



Jidefor (2019) a analysé le régime d'écoulement du vent en fonction de la géométrie en considérant en particulier le rapport H/w de la rue. Une analyse schématique des régimes d'écoulement d'air a été utilisée pour identifier les comportements d'écoulement dans trois rues à ratio différents (0.44, 0.68, 0.94) situées dans des quartiers résidentiels à forte densité de la ville d'Enugu –Nigeria. Elle s'appuie sur le calcul de la longueur de la région de recirculation L_r qui dépend de la hauteur du bâtiment. La valeur du rapport L_r/H dépend également des turbulences, de la forme des bâtiments et du toit [Figure 2.29]. Les résultats indiquent que la rue large ($H/w=0.44$) est bien ventilée, la rue dont le ratio $H/w = 0.68$ est aussi ventilée, alors que la rue étroite ($H/w=0.94$) est mal ventilée.

L'effet de la largeur de la rue sur la ventilation extérieure a été soigneusement étudié par Ramponi et al. (2015). Trois ensembles de configuration urbaine ayant des largeurs de rues différentes ($w= 8.5m, 16m, 24m$) ont été simulées [Figure 2.30]. En fonction des scénarios proposés de changement de l'incidence du vent, les résultats montrent qu'avec une direction parallèle au niveau de la rue la plus large, les débits sont élevés entraînant par

la suite de faibles débits d'air dans les rues étroites. En revanche, pour la direction du vent perpendiculaire à la rue principale, la rue la plus large réduit le régime d'écoulement donnant plus d'interaction entre le flux au-dessus des bâtiments et le flux dans cette rue.

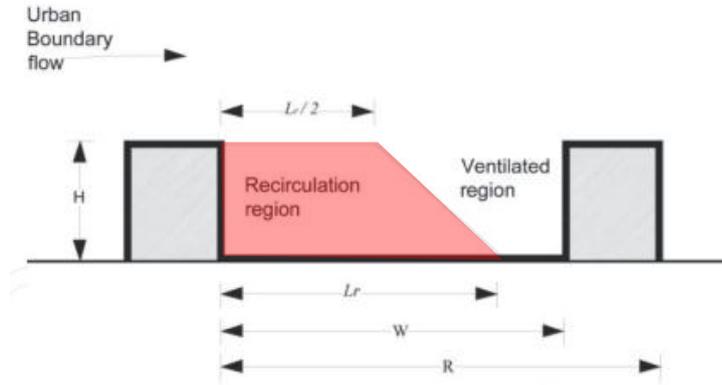


Figure 2. 29 : Géométrie de la zone de recirculation
Source : Jidefor (2019)

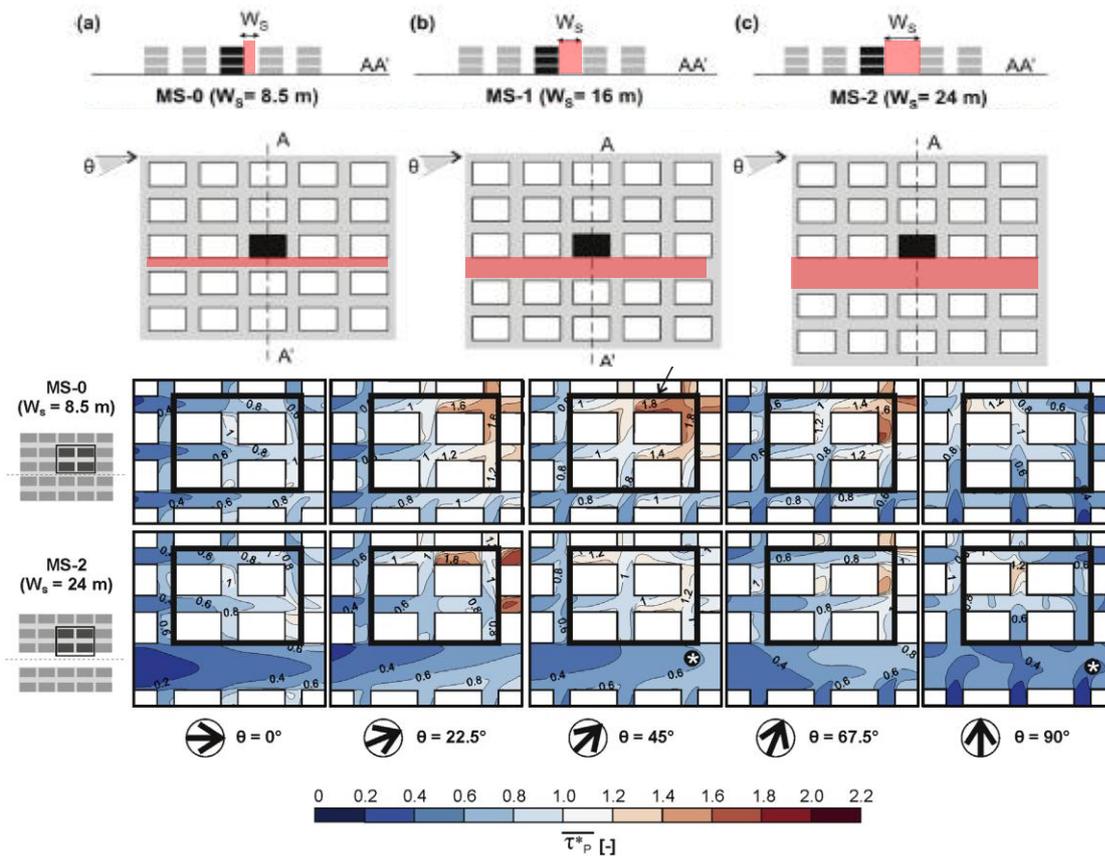


Figure 2. 30: Effet de la direction du vent sur le potentiel de ventilation ; comparaison entre deux cas
Source : Ramponi et al.(2015)

2.4.2. La hauteur du bâtiment H

Actuellement les études s'enchaînent sur cet aspect de la géométrie urbaine qui est la hauteur des bâtiments. L'importance de la troisième dimension dans le processus de planification urbaine a été mise en évidence dans plusieurs études. On présente ici l'étude de **Rajagopalan et al. (2014)** qui a pour objet de vérifier l'effet de la hauteur des bâtiments sur l'écoulement du vent en Malaisie à travers quatre scénarios [Figure 2.31]. Dans le premier, la hauteur est équitable pour tous les bâtiments, le 2^e scénario propose de détacher les niveaux en créant des vides sous pilotis. Quant au 3^e, la hauteur du bâtiment central a été doublée et pour le dernier, les hauteurs sont modifiées pour créer un gabarit pyramidal progressif. Parmi les nombreux scénarios testés, le dernier semble le plus efficace pour améliorer la ventilation extérieure [Figure 2.32]. Ce gabarit pyramidal des hauteurs des bâtiments a pu distribuer uniformément le vent et permis d'atteindre le côté sous le vent de chaque bâtiment. Cela améliore la ventilation naturelle au niveau des piétons.

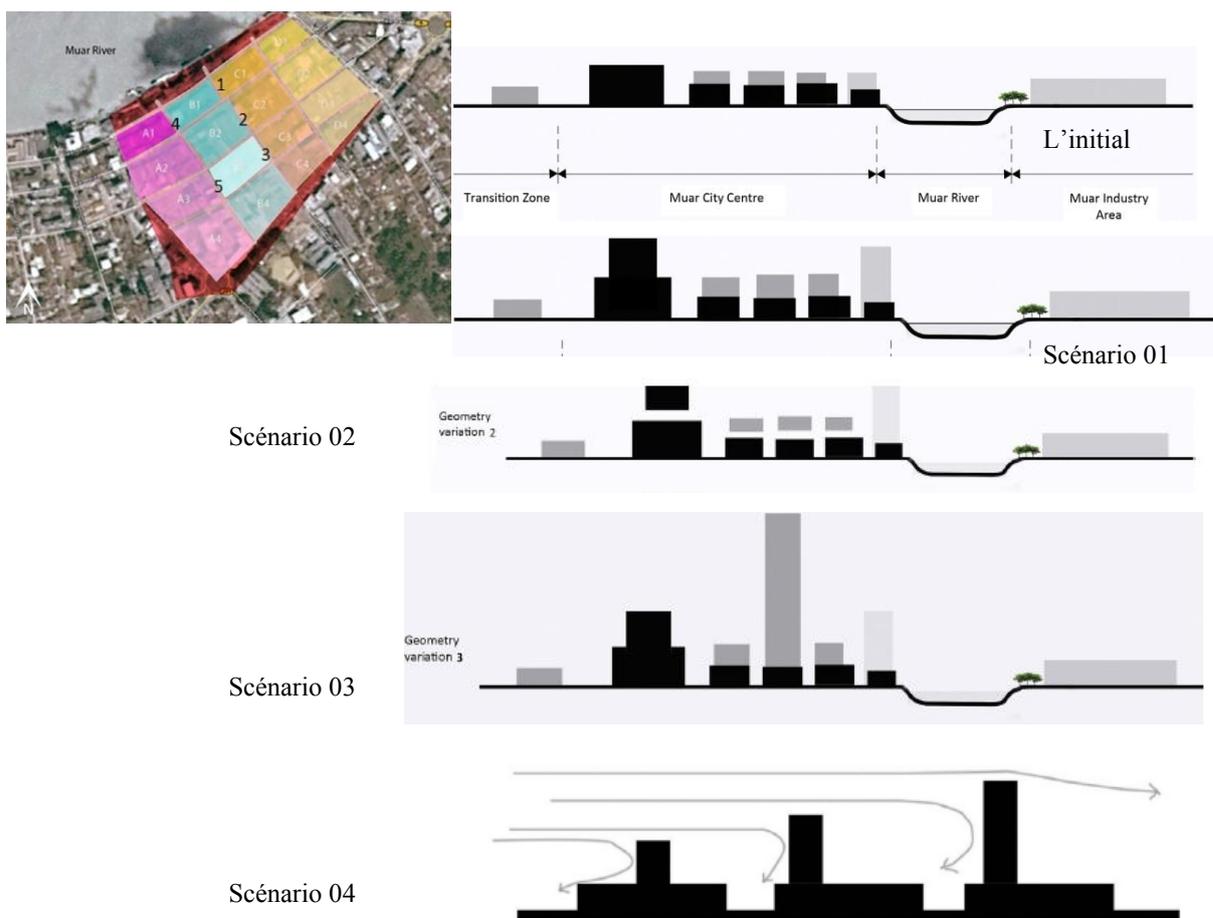


Figure 2. 31: Zone d'étude et scénarios.
Source : Rajagopalan et al. (2014)

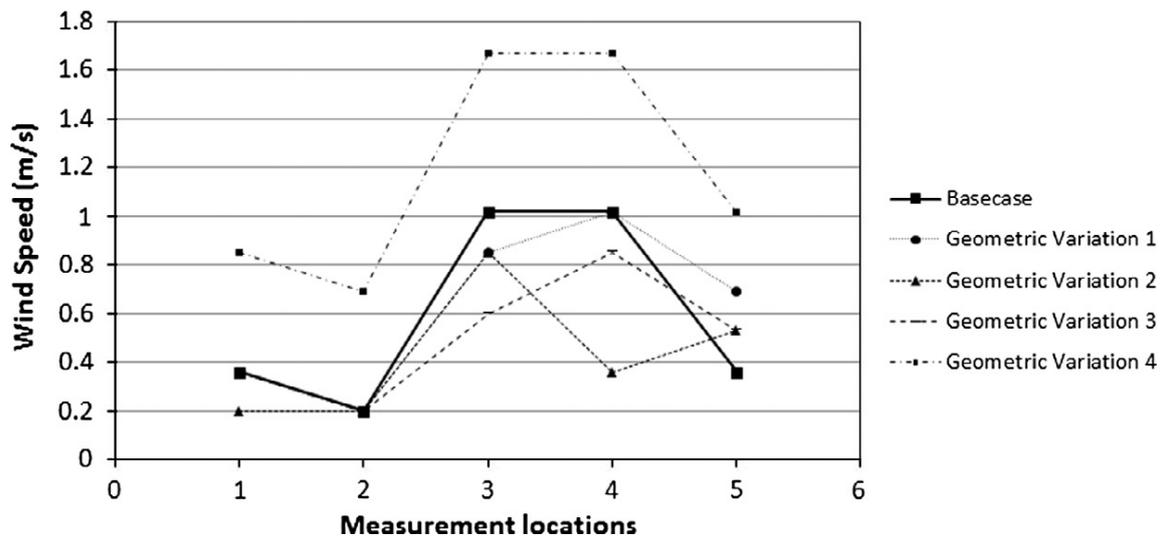


Figure 2. 32: Comparaison des résultats des scénarios.
Source : Rajagopalan et al.(2014)

Une autre étude a été faite par **Wang et al. (2016)** pour l'évaluation de l'effet de la hauteur sur la vitesse du vent dans trois typologies urbaines différentes (type tour, bâtiment avec cour et type isolé). Les hauteurs varient entre 6m et 48m. La distribution de la vitesse du vent et la comparaison entre les deux scénarios montre qu'une hauteur de bâtiment élevée conduit à une vitesse de vent plus élevée au niveau du piéton [Figure 2.33]. Les résultats ont indiqué qu'une hauteur des bâtiments faible pourrait créer un environnement moins venteux dans l'ensemble de la zone urbaine et que des bâtiments élevés créeraient des vents forts dans certaines parties du district. **Ying et al. (2016)** ont examiné par simulation l'influence de la variation de hauteur des bâtiments sur la vitesse du vent autour de 13 types courants d'immeubles de grande hauteur à Hangzhou en Chine. Leurs conclusions confirment également que la zone de confort au niveau du piéton est fortement affectée par le nombre d'étage puisque une hauteur élevée aggrave la zone de confort au pied du bâtiment.

Sergey et al. (2016) ont étudié l'influence de la hauteur des bâtiments sur la distribution de la pression et la ventilation naturelle extérieure. L'étude s'est effectuée en soufflerie sur des bâtiments de faible et moyenne hauteur en raison de l'existence d'un immeuble de grande hauteur à proximité. Des changements dans la répartition de la pression sur le bâtiment de faible hauteur ont été observés, tandis que la pression du vent de la zone sous le vent a augmenté jusqu'à deux fois. Si un bâtiment de faible hauteur est situé à côté d'un bâtiment de grande hauteur, des zones de haute et basse pression sont générées en amont et en aval [Figure2.33]. Lorsqu'il y a un sillage externe (zones de circulation de vortex au-

dessus du bâtiment de grande hauteur) et un sillage interne (recirculation en aval), le schéma d'écoulement est similaire à celui sur le bâtiment isolé (a) et la pression du vent peut avoir une valeur importante. Des changements dans les régimes de ventilation naturelle peuvent se produire en raison de pressions de vent positives sur les toits des bâtiments de faible et moyenne hauteur et peuvent être importants, en particulier quand les espacements entre bâtiments sont réduits

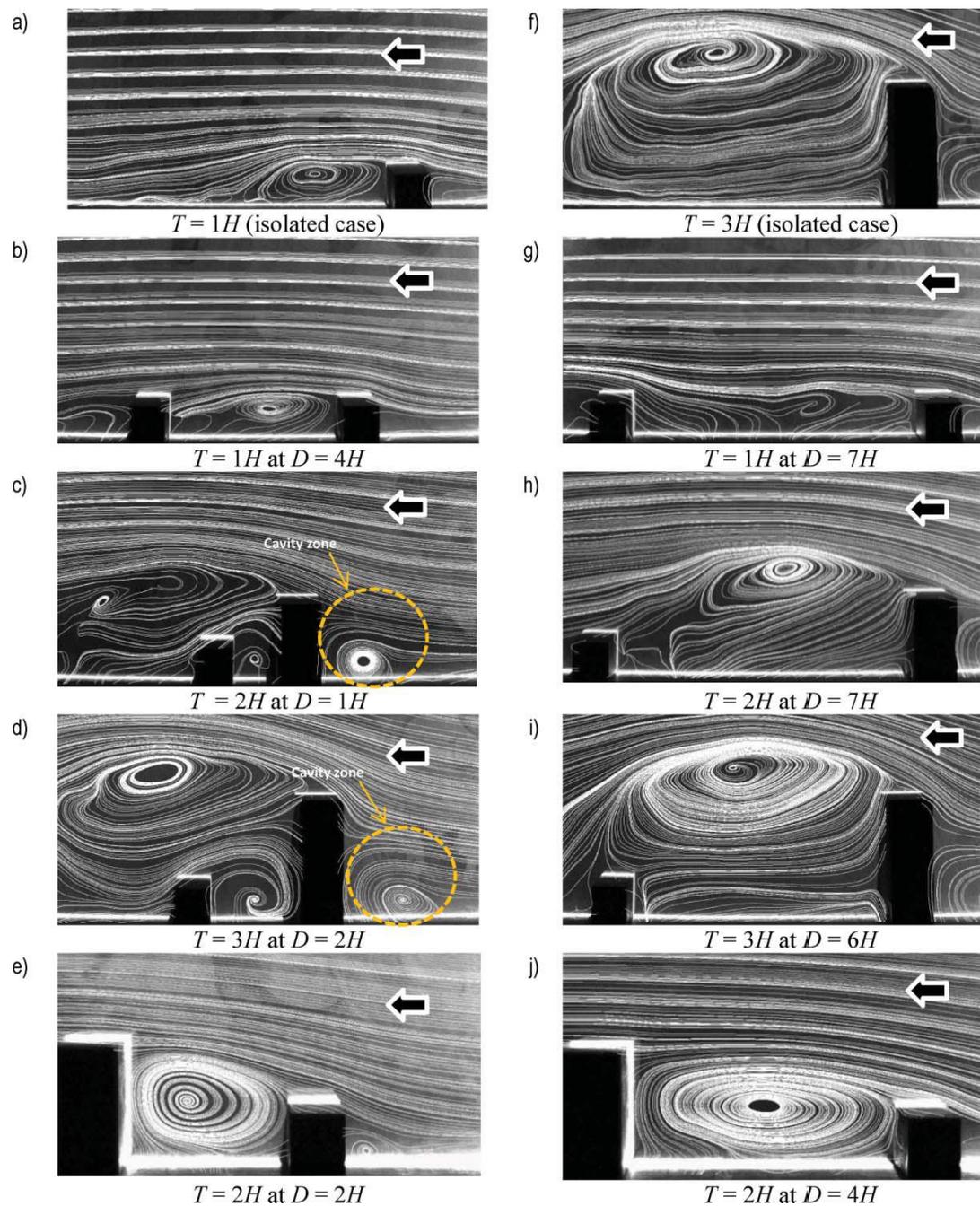
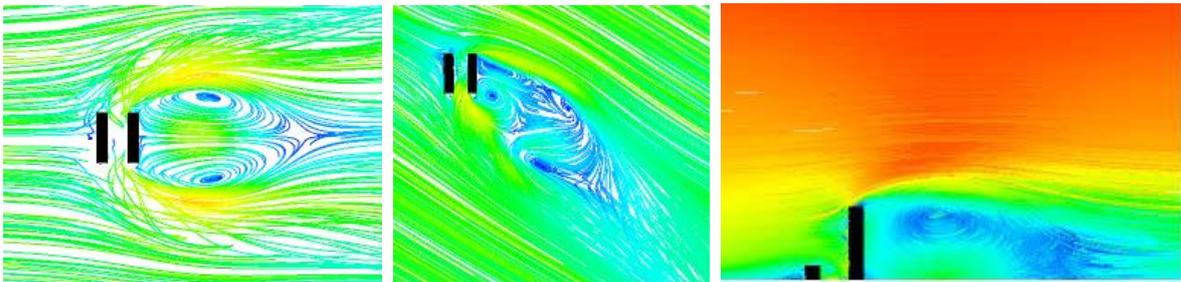


Figure 2. 33 : Ecoulement du vent et la distribution du vent autour des bâtiments à hauteur différente
Source : Sergey et al. (2016)

L'impact du vent sur les bâtiments élevés a été examiné par **Sujit et al. (2015)**. L'étude s'est réalisée sur deux bâtiments de hauteur différente sous des angles d'incidence variés de 0° à 90° . Il a été observé que les effets d'interférence les plus importants se trouvent sur la zone sous le vent. Ces effets d'interférence dépendent grandement de la distance relative, de l'angle d'incidence, ainsi que de la taille et de la forme des bâtiments. Les bâtiments en amont provoquent certains effets de protection en diminuant la charge moyenne de vent sur le bâtiment principal en aval [Figure 2.34]. La configuration oblique a généré une aspiration maximale plus sévère que la configuration normale.



**Figure 2. 34 : Comportement du vent
autour de deux bâtiments de hauteur différente
sous deux angles différents. Source : Sujit et al. (2015)**

2.4.3. Interaction entre la géométrie urbaine / la densité / le vent

La forme des villes a une forte influence sur les phénomènes physiques au sein du tissu urbain. Elle résulte de l'interaction entre morphologie (cadre bâti et réseaux) et d'occupation du sol et qui donne une variété de formes divergentes.

Ratti et al. (2003) ont soulevé la question de la meilleure forme urbaine en se focalisant sur plusieurs critères notamment l'optimisation de l'utilisation du sol et le vent. La figure 2.34 montre deux motifs urbains archétypes fondés sur des pavillons ou des tours (a) et des cours (b). Sur la même surface, on installe des pavillons et des bâtiments à cours (le noir représente le bâti), ayant des coefficients d'emprise au sol et des hauteurs identiques avec les mêmes surfaces de plancher. Dans les deux cas, les zones noires présentent la même superficie [Figure 2.34]. La comparaison des types morphologiques présentés a permis de mettre en évidence que le tissu à cours est plus aéré et moins dense. Par contre les tours et les barres de moyenne et de grande hauteur s'inscrivent généralement dans des tissus existants. La densité qu'elles procurent est alors très élevée,

et créent non seulement de surcroît des tourbillons de vent au pied des rues, mais empêchent l'air d'entrer du fait de leur compacité.

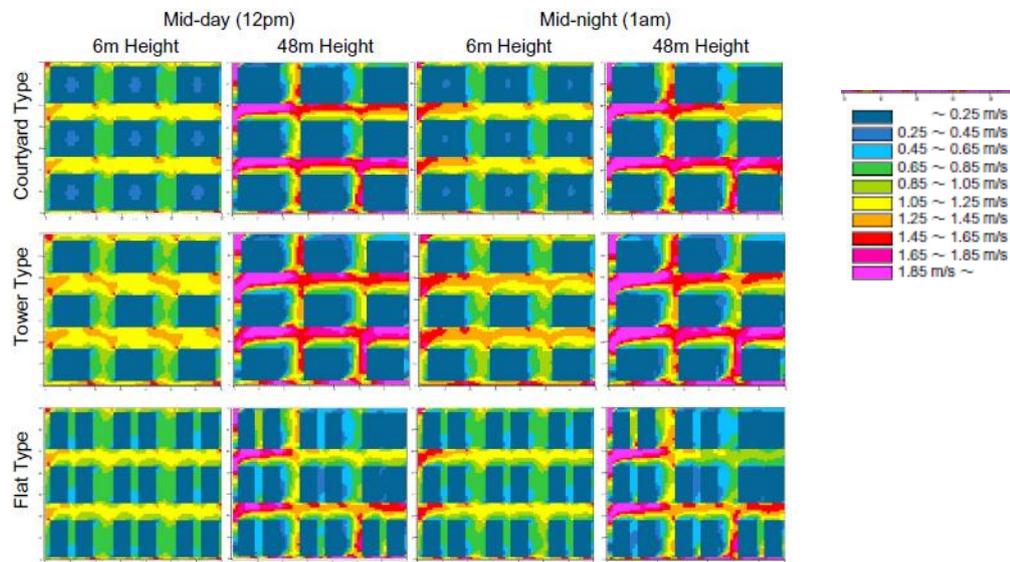


Figure 2. 35: Résultats des vitesses du vent dans les trois modèles.
Source : Wang et al. (2016)

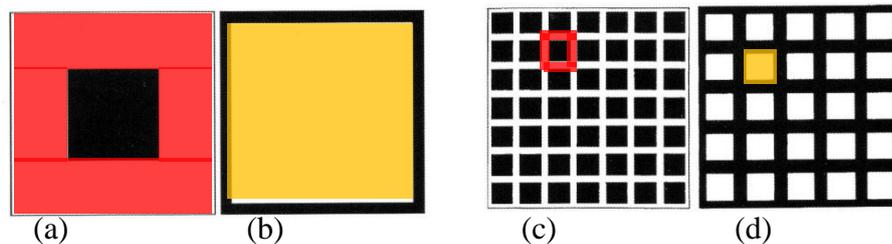


Figure 2. 36: Les deux tissus urbains archétypes (c et d). a : archétype du pavillon ou la tour,
b : archétype de la cour. Source : Ratti et al. (2003)

Ces conclusions ont été vérifiées à travers plusieurs études. **Ramponi et Blocken (2012)** ont vérifié l'impact de la densité urbaine sur la ventilation extérieure sur 03 formes urbaines à densité variée (A (0.1), B (0.3) et C (0.6)). Les résultats ont été analysés selon les deux critères de la densité et la hauteur ($H_1 = 0.06m$, $H_2 = 0.12m$, $H_3 = 0.18m$). Ils précisent que la ventilation diminue d'environ 15% vers le bâtiment central dans la forme urbaine à faible densité A pour les hauteurs H_1 et H_3 [Figure 2.35]. Dans le cas de la forme urbaine très dense C, une réduction du taux de la ventilation est très significative à environ 70% vers le bâtiment central pour les hauteurs H_1 et H_3 . Ceci a été aussi confirmé par **Kubota et al. (2008)** qui ont présenté à travers la soufflerie la relation entre la densité des bâtiments et la vitesse du vent dans 22 quartiers résidentiels choisis dans des villes japonaises, en considérant deux facteurs qui sont la surface bâtie au sol et la hauteur. Les

résultats montrent qu'il existe une relation forte entre la densité du bâtiment et la vitesse moyenne du vent. C'est-à-dire l'augmentation de la densité a diminué la vitesse moyenne du vent.

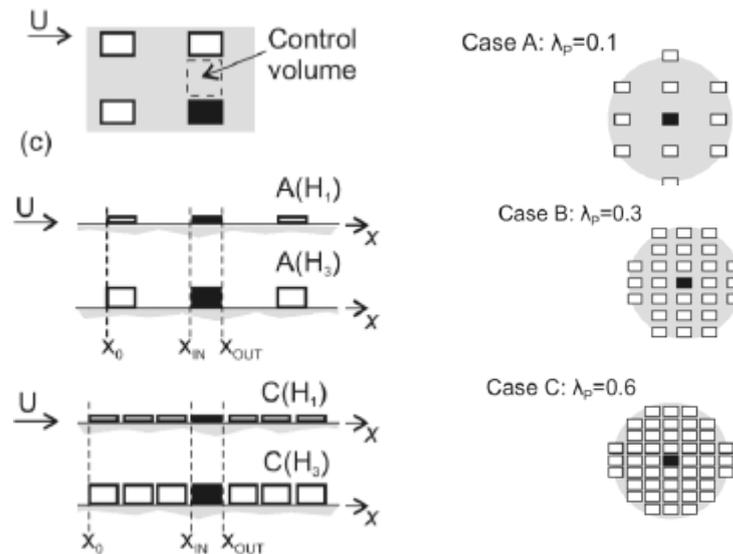


Figure 2. 37 : Scénarios simulés.
Source : Ramponi *et al.*(2012)

De l'autre côté, **Feng et al. (2013)** ont mis l'accent sur l'effet de la géométrie urbaine et la densité sur le vent et la ventilation extérieure. L'investigation s'est déroulée sur dix (10) sites résidentiels de grande hauteur dans la ville de Shanghai dans des conditions climatiques estivales [Figure 2.36]. Les données mesurées ont permis d'acquérir une compréhension quantitative et qualitative sur la situation réelle de ventilation au niveau du piéton et l'impact de la densité bâtie. Au niveau du site, le ratio de la superficie du bâtiment et son volume semble corrélérer négativement avec la vitesse du vent. Mais au niveau du piéton, la vitesse du vent est significativement corrélée avec le degré de fermeture apporté par les bâtiments et/ou la verdure, quantifié par le facteur de vue du ciel (SVF). L'augmentation du SVF de 10 % pourrait augmenter la vitesse du vent de 7 à 8 %.

Dans ce sens, l'effet de la densité et la morphologie urbaine sur le vent a fait l'objet d'une recherche menée par **Wang et al. (2018)** sur sept tissus urbains typiques à Pékin ayant des densités différentes. Les résultats de la simulation ont montré que les formes avec une faible emprise au sol provoquent généralement une ventilation importante [Figure 2.37]. De même, la porosité élevée influe sur le degré de ventilation comme le cas du site A1 et A2. Aussi, **Hu et al. (2018)** ont traité la relation entre la densité et la vitesse du vent sur cinq cas d'étude dont les densités varient entre 0.18, 0.21, 0.25, 0.28, 0.32.

L'espacement entre bâtiments se réduit en augmentant la densité. Les résultats montrent une corrélation linéaire négative entre la densité des bâtiments et les vitesses moyennes du vent [Figure 2.40 & 2.41]. Autrement dit, lorsque la densité des bâtiments résidentiels augmentait de 0,18 à 0,32, les vitesses moyennes du vent dans les rues diminuaient.

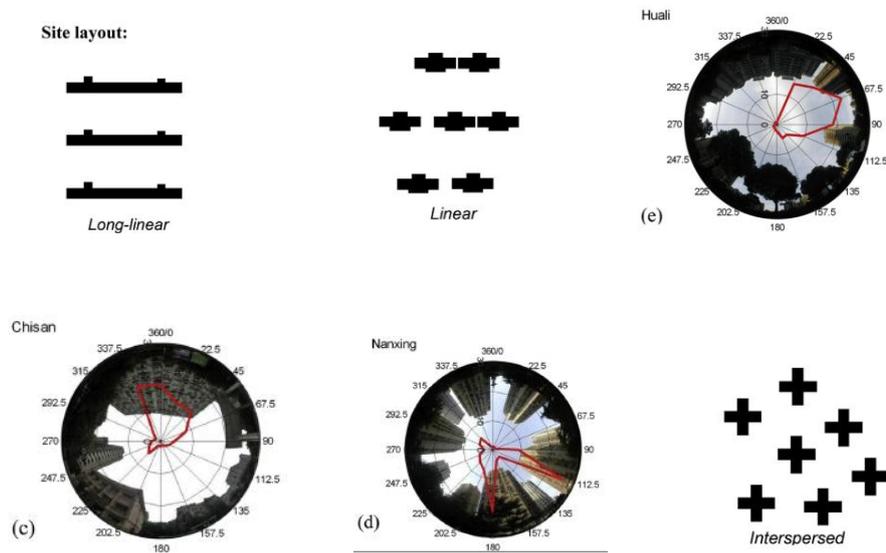


Figure 2. 38: Exemples de cas d'études. (Plans de masse et ouverture au ciel et direction du vent)
Source : Feng et al. (2013)

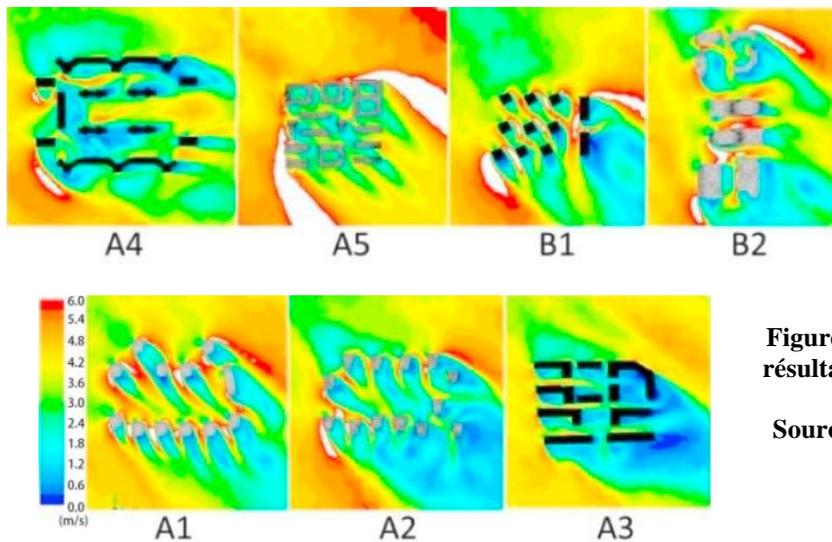


Figure 2. 39 : Cas d'étude et résultats de la simulation des vitesses du vent
Source : Wang et al. (2018)

Cette variété des formes urbaines existantes offrent différents microclimats liés à la ventilation et au comportement du vent au niveau des piétons. Taleghani et al. (2015) ont analysé par simulation l'effet des trois typologies de formes urbaines (isolée, linéaire et en forme de cour) sur la vitesse du vent en choisissant le jour le plus chaud du climat tempéré des Pays-Bas. Les résultats confirment que les vitesses du vent sont influencées par la forme urbaine [Figure 2.38 & 2.39]. La comparaison entre les trois formes urbaines

indique que ces trois formes de compacité différente fournissent des vitesses du vent différentes. La forme isolée avec les orientations E-O et N-S sont exposées au vent et reçoivent les plus grandes vitesses en comparaison avec la forme de cour protégée.

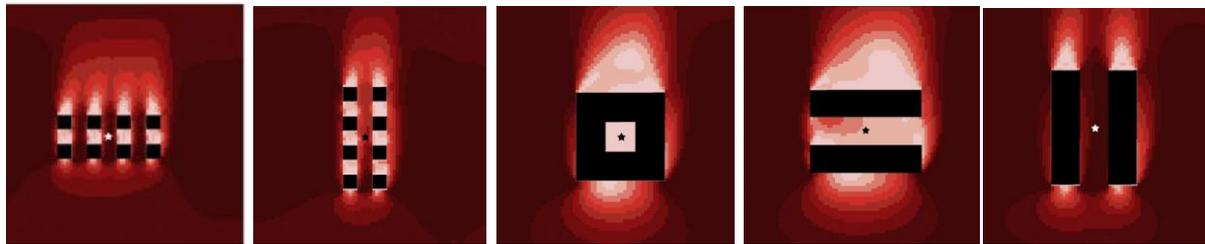


Figure 2. 40: Résultats de simulation des trois formes urbaines. Source :Taleghani et al. (2015)

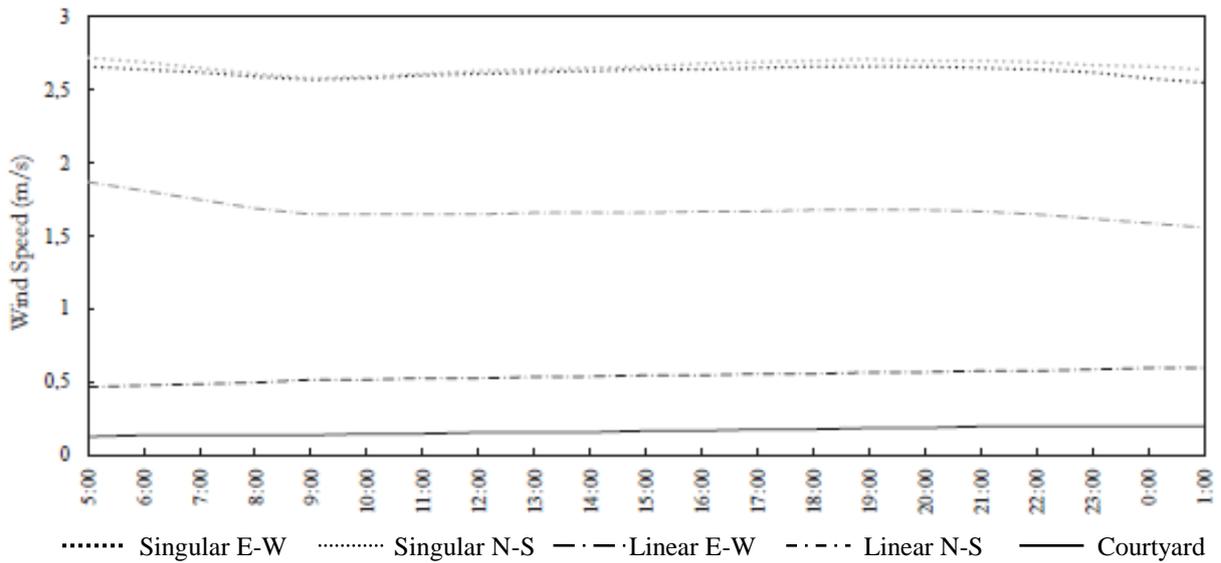
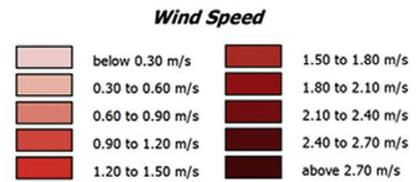


Figure 2. 41: Comparaison des vitesses du vent des formes urbaines simulées
Source :Taleghani et al. (2015)

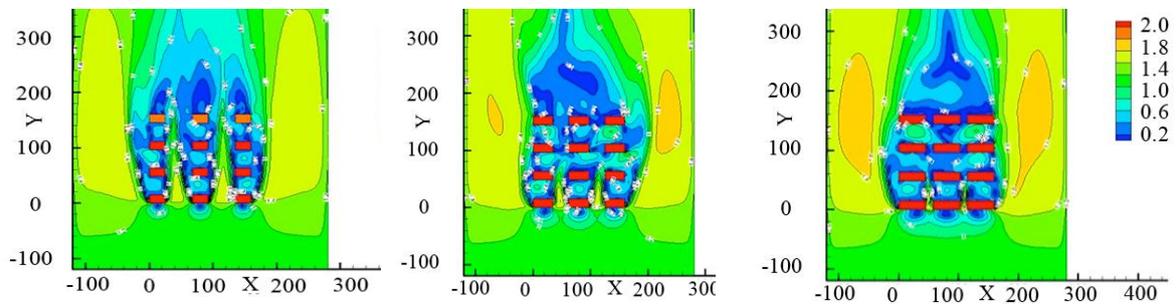


Figure 2. 42 : Effet de la densité du bati sur l'écoulement du vent
Source : Hu et al. (2018)

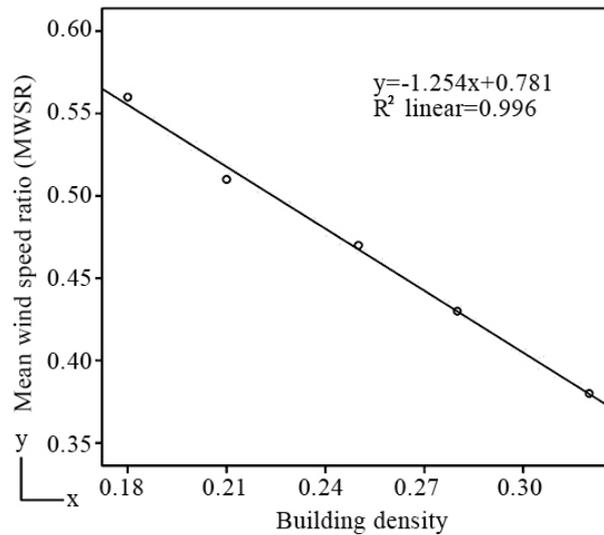


Figure 2. 43 : Corrélation entre la densité du bâti et les vitesses moyennes du vent
Source : Hu et al. (2018)

De son côté, **Merlier (2015)** a analysé deux typologies génériques de bâtiment qui intègre un réseau de cubes sans cour et un autre avec cour dont $H=w$. L'objectif est de mettre en évidence l'effet de la densité de bâtiment sur les écoulements du vent. Les processus aérodynamiques se produisant dans la typologie de cube fermé diffèrent de ceux de la typologie de patio [Figure 2.42]. Ainsi pour les deux configurations testées, le vent est canalisé dans les rues mais présentant des vitesses considérablement élevées dans la première typologie que dans la deuxième en raison de sa porosité. Avec $H/w = 1$, des tourbillons de voûte déformés se développent donc entre les cubes.

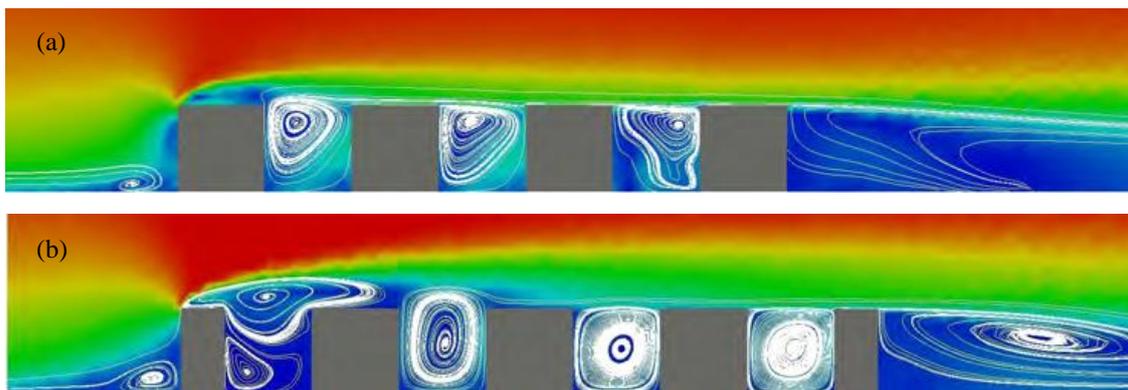


Figure 2. 44 : Ecoulement entre bâti, (a) sans cour, (b) avec cour
Source : Merlier (2015).

2.5. Contrôle du vent par la végétation

Pour mieux comprendre le contrôle du vent par la végétation, on est amené à présenter les différents résultats et approches faites en ce domaine de recherche. Ce thème a fait l'objet d'un certain nombre de recherches (**Gandemer et Guyot 1981, Bottema 1992, Heisler et Dewalle 1988, Redon 2017**). Cependant, il est à signaler que peu de données concernant l'impact des arbres sur le vent dans un environnement urbain sont disponibles dans la littérature. Le végétal et le vent interagissent pour définir des ambiances urbaines, en particulier dans le domaine de l'aérodynamique ; cette interaction doit être analysée selon deux points de vue ; les effets du vent sur le végétal urbain et les effets du végétal sur le vent en milieu urbain.

2.5.1. Effet de changement de rugosité

En milieu urbain on trouve donc une variation brutale de la rugosité entre les masses bâties et celles végétales. Cette variation se traduit par des changements microclimatiques et en particulier par une variation de la vitesse d'air. Selon **Kent et al. (2017)** les arbres apportent une rugosité au sol qui influe sur les écoulements d'air et notamment sur les vitesses d'air. L'influence sur la vitesse du vent estimée jusqu'à 100 m est moindre lorsque la végétation est de hauteur plus faible et représente une proportion plus petite de la surface. Ils précisent aussi que la vitesse du vent au-dessus d'un parc urbain est ralentie.

2.5.2. Effet de brise - vent

D'après **Vinet (2000)** les résultats d'une étude en soufflerie effectuée a permis d'examiner l'effet de différentes configurations d'arbres brise-vent sur les infiltrations et sur les charges de vent sur les bâtiments bas. Les résultats montrent qu'une seule rangée, à forte densité, réduit les infiltrations d'air d'environ 60 %, quand les arbres sont plantés à une distance des bâtiments d'environ 04 fois leur hauteur. Les brise-vent composés de grands arbres offrent une protection double de celle des arbres d'une taille deux fois inférieure. Cette solution pourrait être mise en œuvre dans des espaces dégagés en ville pour offrir une zone de calme par rapport à un vent dominant.

2.5.3. Effet d'entonnoirs à vent

La plantation des arbres peut permettre de canaliser le vent, et même d'augmenter sa vitesse, afin de favoriser la ventilation naturelle du bâtiment. Cependant, nous pouvons noter que des arbres isolés peuvent engendrer une augmentation locale de la vitesse du vent. En effet, au lieu de réduire la vitesse du vent, on constate une augmentation des

courants d'air à la base des arbres⁹². Dans ce contexte, une étude qui consiste à étudier l'effet de la disposition des arbres sur le vent dans les espaces extérieurs a été menée par **Hong et al. (2015)** à Pékin sur six (06) configurations [Figure 2.43]. Les conclusions indiquent que la disposition des arbres et leurs orientations par rapport au vent ont des effets significatifs sur l'écoulement du vent. Aussi, Les configurations qui contiennent un espace central carré articulé par les bâtiments et les arbres et orientés vers le vent dominant peuvent offrir une meilleure exposition aux courants d'air.

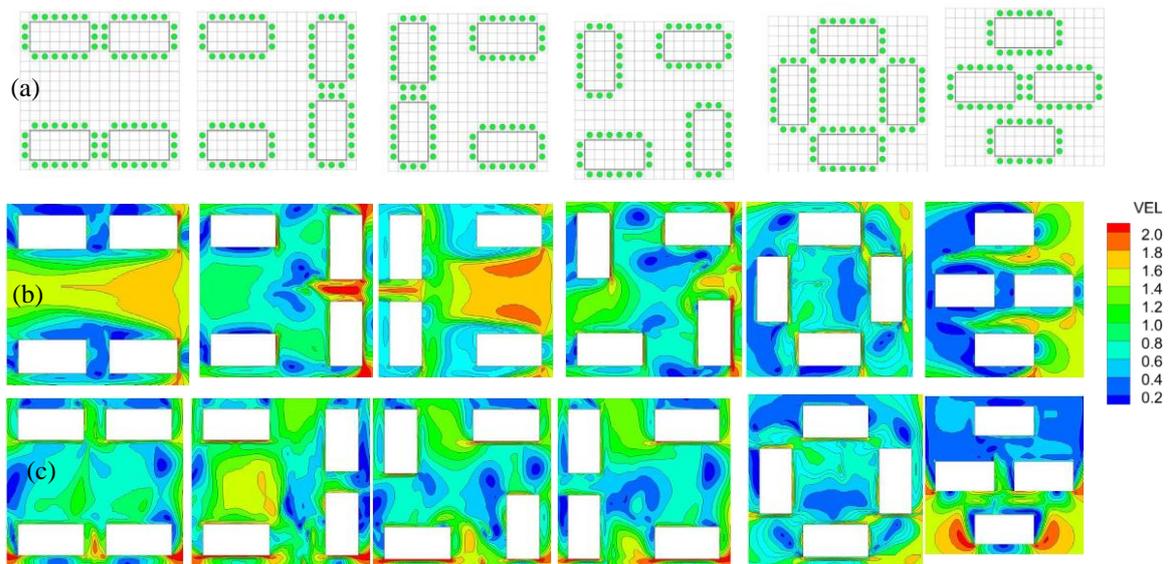


Figure 2. 45: Cas d'étude (a) et les résultats de la simulation ; (b) direction du vent 0°
(c) direction du vent 90°. Source : Hong et al. (2015)

2.5.4. La porosité aéraulique

L'efficacité de l'effet brise - vent dépend de la porosité effective du feuillage, c'est-à-dire le rapport de surface des trous sur la surface totale de la masse pondéré par un coefficient de perte de charge. Il est donc intéressant de noter que cette porosité est variable suivant l'essence du végétal, la forme et l'épaisseur de la masse végétale et la saison (**Gandemer et al. 1981, Izard et al. 1979**). Dans la ville, l'essentiel de la rugosité est en général assuré par les formes urbaines elles-mêmes, sauf dans les parcs où celle-ci est le fruit des massifs boisés. Mais le plus souvent, l'arbre dans la ville se présente en nombre limité, en position assimilable à l'isolement.

⁹² : Vinet, J. (2000). Op.Cit, p.78.

Dans un parc urbain au Taiwan **Hsieh et al. (2016)** ont effectué une étude concernant les effets de la densité des plantations sur le vent urbain pendant la période chaude sous un climat subtropical. Les mesures ont été établies sur les points B1, B2, B3 et C dotés de végétation dont le SVF varie selon la masse foliaire entre 0.23, 0.10, 0.08, 0.19 respectivement. Il a été constaté que les obstructions affectaient le champ de vent en réduisant sa vitesse [Figure 2.44]. En effet, une plantation excessivement dense sans tenir compte du couloir de vent peut entraîner une obstruction à la circulation de l'air. En d'autres termes, une mauvaise disposition des arbres peut réduire les mouvements du vent, ce qui aura un effet négatif sur le confort thermique, en particulier dans les zones en aval. De l'autre côté, les couloirs de vent devraient être pris en compte dans le choix de la disposition et la taille des plantations afin de promouvoir la ventilation.

Morakinyo et al. (2016) ont analysé l'effet des arbres sur le changement de direction et des vitesses du vent sous des conditions climatiques chaudes et humides. Plusieurs configurations de plantation ont été proposées dans des canyons urbains symétriques profonds et peu profonds avec de différents rapports d'aspect et une orientation nord-sud (à 45° et 90°). La disposition, la taille et la hauteur du tronc étaient les paramètres pris en compte lors des simulations [Figure 2.45]. Les résultats numériques ont révélé qu'en fonction de la direction du vent, les arbres (quelle que soit la configuration) réduisent la vitesse du vent. Avec une direction de vent oblique, la vitesse du vent à l'intérieur du canyon est environ dix (10) fois plus élevée qu'avec une direction de vent perpendiculaire. En raison de l'augmentation de la vitesse du vent avec une direction de vent oblique, le PET est devenu plus faible. Il est intéressant de signaler que la masse foliaire semble avoir plus d'influence que la hauteur du tronc.

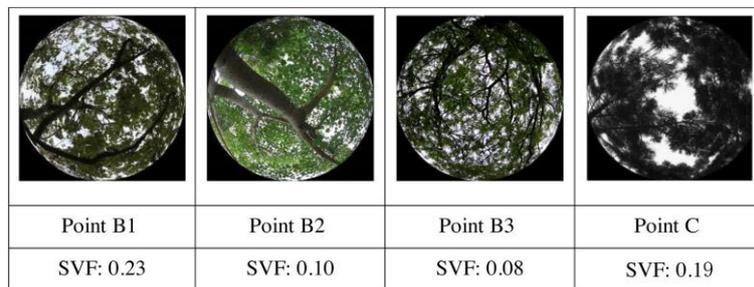
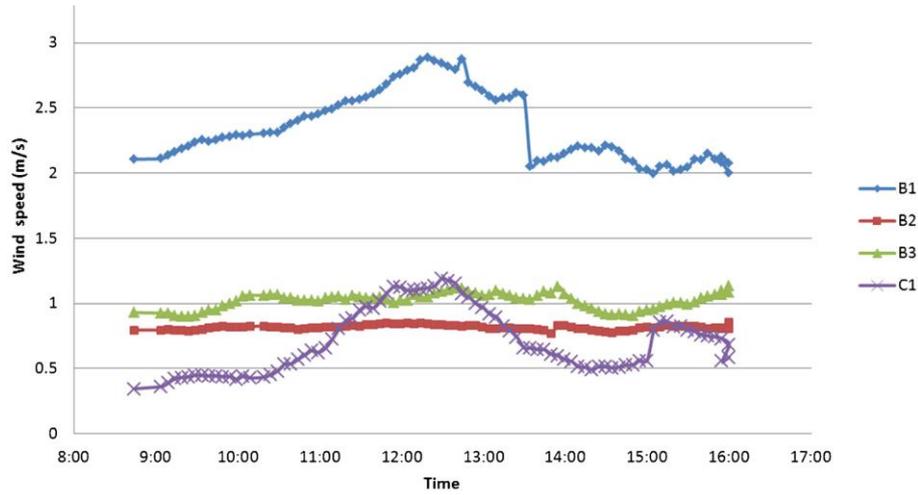


Figure 2. 46 : Effet de la porosité végétale sur la variation de la vitesse du vent
Source : Hsieh et al. (2016)

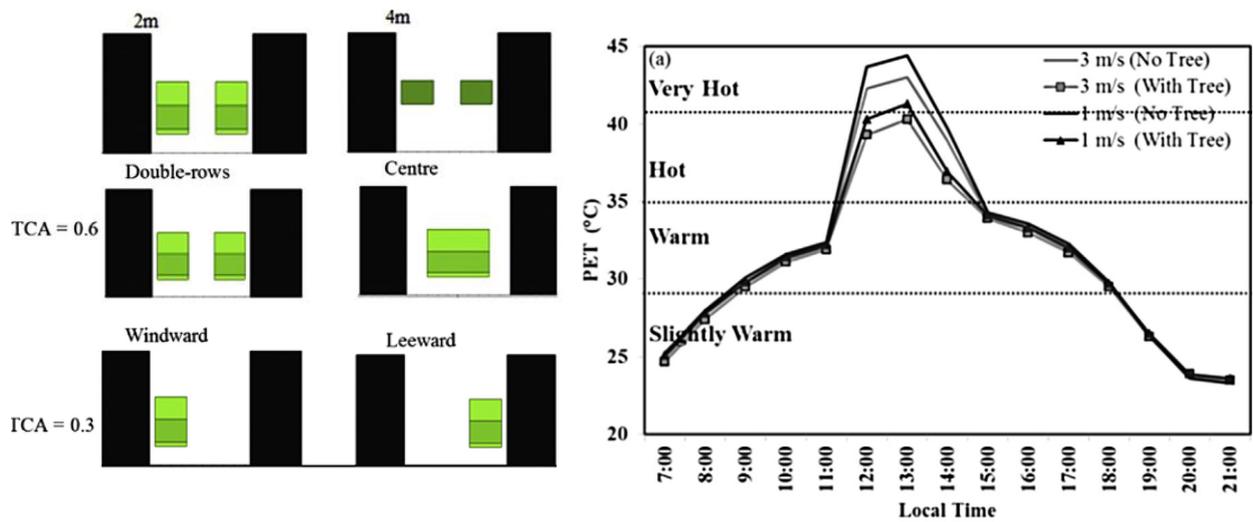


Figure 2. 47 : Effet des arbres sur le vent
Source : Morakinyo et al. (2016)

Les effets dynamiques des arbres sur le vent en zone urbaine ont été soigneusement examinés par Hefny Salim et al. (2015). Le cas d'étude se constitue d'un réseau de rue

canyon composé de 108 cubes dont le ratio d'aspect H/w varie entre 1 et 2 [Figure 2.46]. De nombreux paramètres tels que la direction du vent, la densité du feuillage et la configuration urbaine ont été considérés dans cette étude. Les résultats montrent que dans le canyon contenant des arbres les vitesses du vent sont réduites à l'intérieur et au-dessus des canyons de la rue par rapport aux cas sans arbres.

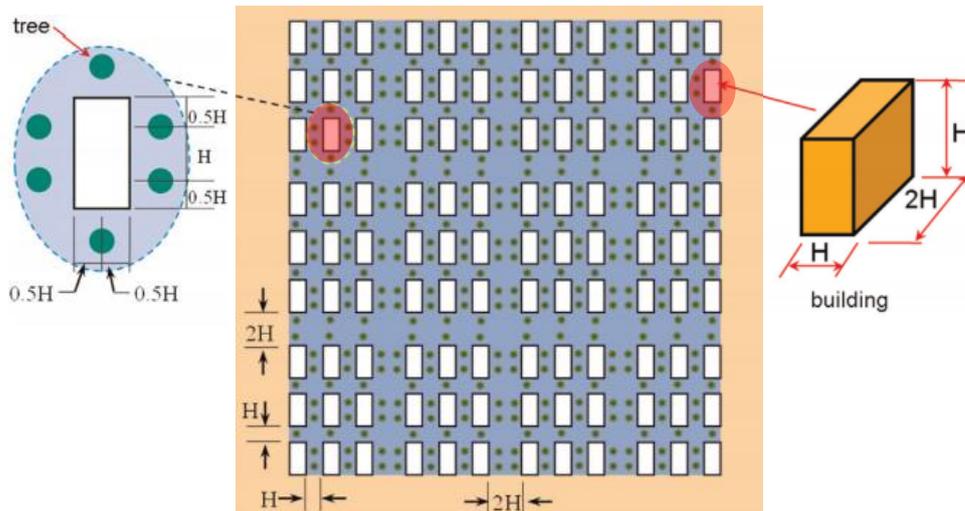


Figure 2. 48 : Rapport entre la disposition des arbres et le ratio d'aspect H/w
Source : Hefny Salim et al. (2015).

2.6. Conclusion

Le but principal de ce chapitre est de répertorier les paramètres géométriques liés à l'espace urbain et d'appréhender le degré d'influence de ces paramètres sur le contrôle du comportement du vent dans l'espace urbain.

Tous d'abord, à l'issue de ce chapitre, nous avons pu conclure que le comportement du vent en milieu urbain présente d'énormes irrégularités comparativement au caractère relativement stable du rayonnement solaire. Ces complexités sont le résultat essentiel du caractère turbulent causé par la rugosité du sol ainsi que les interactions entre les masses bâties.

En analysant les principaux résultats d'études et des recherches menées dans le domaine de la géométrie urbaine, ce chapitre a souligné l'importance de certains paramètres géométriques qui conditionnent le mouvement aéraulique. Souvent plus un espace est fermé et plus les bâtiments l'entourant sont hauts, plus la vitesse du vent au sol est faible comparée à la vitesse au dessus des structures bâties, ou dans un site non perturbé (espace libre). Les relations entre flux d'air en espace libre et espace construit dépendent

de la taille, de la hauteur et de l'espacement des obstacles. La densité des constructions fait baisser la vitesse du vent du fait d'un accroissement de la rugosité urbaine. Ces changements sont très versatiles, d'un espace à un autre suivant la taille, le relief limitrophe et l'influence de l'urbanisation sur la direction du vent.

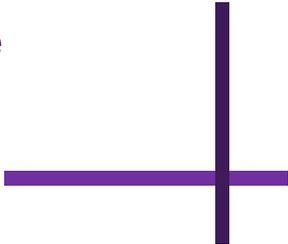
De même, le rôle que peut jouer la végétation a été abordé comme élément additif visant à renforcer ce contrôle. En effet, la végétation possède des propriétés qui lui permettent de modifier localement le vent et d'affaiblir son action à savoir la taille, la forme, le volume, densité, etc. Dans la partie suivante, nous déterminons le cas d'étude et la démarche du travail.

CHAPITRE III

A decorative graphic consisting of a horizontal purple line and a vertical purple line intersecting at a right angle. The horizontal line is positioned below the text 'CHAPITRE III' and the vertical line is positioned to the right of it.

Méthodologie

& cas d'étude

A decorative graphic consisting of a horizontal purple line and a vertical purple line intersecting at a right angle. The horizontal line is positioned below the text '& cas d'étude' and the vertical line is positioned to the right of it.

" La ville est un fait naturel, comme une grotte, un nid, une fourmilière. Mais elle est aussi une œuvre d'art consciente qui enferme dans une structure collective de nombreuses formes d'art plus simples et plus individuelles ". Aldo Rossi, 1966⁹³

CHAPITRE III : METHODOLOGIE & CAS D'ETUDE

3.1. Introduction

Ce chapitre consiste à présenter la méthodologie de travail à suivre et développe les questions relatives aux outils de recherche employés. Nous présentons d'abord le site d'intervention. Nous avons pris pour centre d'intérêt la ville de Jijel dans son environnement climatique et microclimatique. De même, nous consacrons ce chapitre à la présentation descriptive du cas d'étude et la motivation du choix.

Il explique également la démarche adoptée pour choisir le cas d'étude. Elle porte sur un diagnostic de l'ensemble des quartiers d'habitat collectifs situés sur le périmètre urbain de la ville de Jijel pour entamer par la suite une analyse qualitative de la typologie des espaces extérieurs. Cette étape préalable nous a permis de sélectionner le cas d'étude contenant des espaces extérieurs diversifiés pouvant être soumis à la mesure. Egalement, nous tenons à présenter ici une synthèse de cette analyse typo-morphologique et les différents indicateurs choisis.

3.2. Présentation de la ville de Jijel

3.2.1. Situation

S'étalant sur une superficie de 2.396,63 km², avec une façade maritime de 120 Kms, la wilaya de Jijel est située au Nord – Est de l'Algérie, entre les méridiens 5° 25 et 6°30 Est de Greenwich, et entre les parallèles 36°10 et 36°50, hémisphère Nord⁹⁴. Elle est distante d'environ 359 km de la capitale Alger, 96 km de Bejaïa et 146 km de Constantine.

⁹³ : Rossi, A. (1966). L'Architecture de la ville. Edition Infolio, Italie.

⁹⁴ : P.D.A.U de la commune de Jijel, révision 2009.

La région appartient au domaine Nord atlantique connu localement sous le nom de la chaîne des Babors. Elle est délimitée :

- Au Nord par la Mer Méditerranée,
- Au Sud par les wilayas de Mila, Constantine et Sétif,
- À l'Est par la wilaya de Skikda,
- A l'ouest par la wilaya de Béjaïa [Figure 3.1].

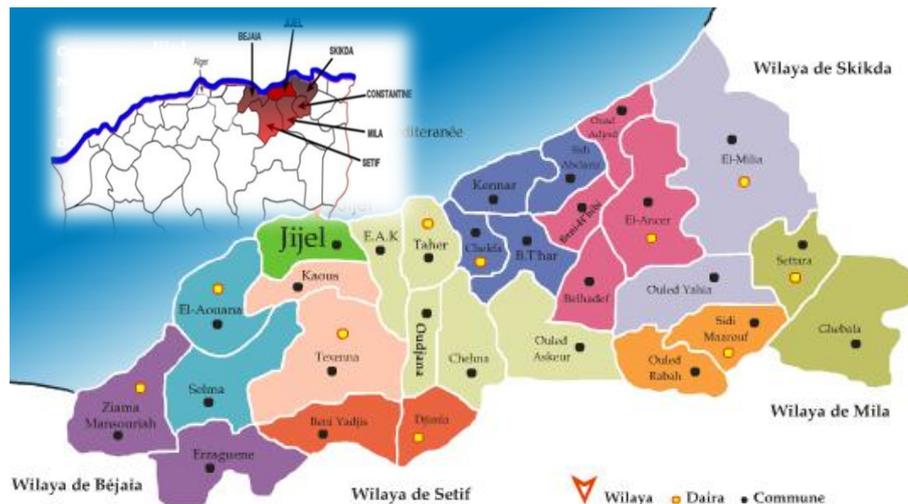


Figure 3. 1: Situation géographique de la wilaya de Jijel et ses limites.
Source : Direction du tourisme de Jijel, www.wilayadejijel.net/.

3.2.2. Climat de Jijel

La région de Jijel présente, par sa situation au bord du littoral, la totalité des caractéristiques climatologiques des régions méditerranéennes maritimes. Elle est considérée comme l'une des régions les plus pluvieuses de l'Algérie. Elle appartient au climat méditerranéen, pluvieux et doux en hiver, chaud et humide en été. Elle fait partie de la zone climatique d'hiver H1A littoral-mer qui a des hivers doux avec des amplitudes faibles, et d'été E1 littoral qui a des étés chauds et humides, avec un faible écart de températures diurnes (**Ould Henia 2003**).

Le plus souvent, on observe une transition brutale entre les saisons. Les pluies hivernales surviennent à la mi-automne. Le printemps est clément, marqué par un beau temps et des températures douces et des journées ensoleillées. Le climat ne se stabilise qu'à la fin du mois de mai où il devient carrément chaud et humide.

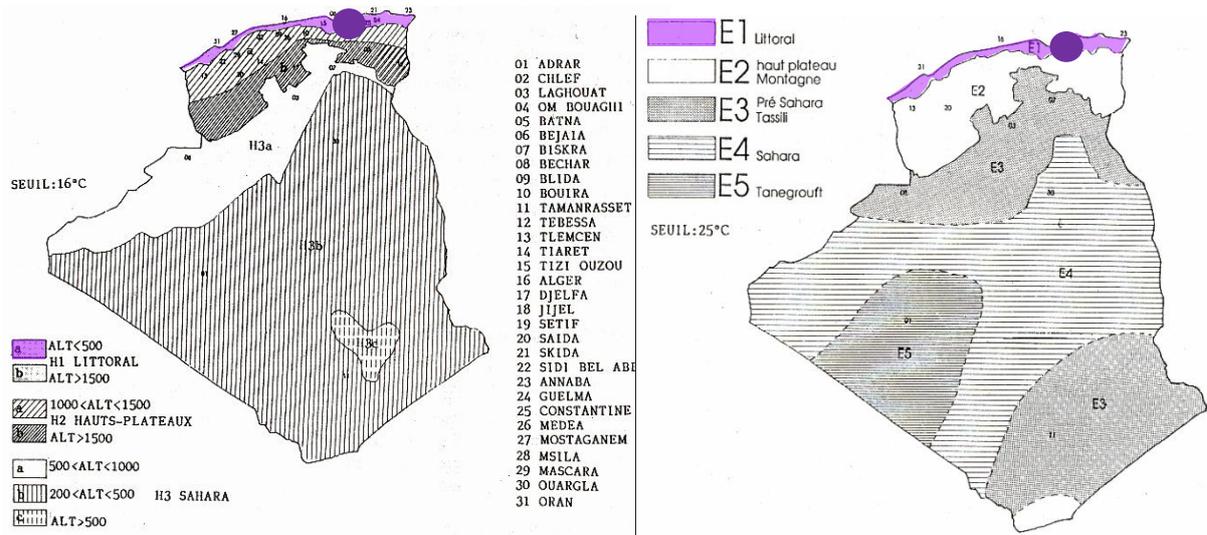


Figure 3. 2 : Classement de Jijel selon les zones climatiques d’hiver et d’été en Algérie
 Source : Ould Henia (2003)

3.2.3. Analyse climatique de Jijel

L’insertion d’un projet dans un contexte climatique donné nécessite une collecte de données climatiques de la région considérée. Le plus souvent, il faut se rapprocher des services météorologiques les plus proches du site considéré pour pouvoir rassembler les éléments permettant d’entreprendre une analyse climatique correcte. Les principaux éléments climatiques à considérer donc sont : le rayonnement solaire, la température de l’air, l’humidité, le vent et les précipitations (pluie, neige, grêle). L’interprétation en graphes des données météorologiques de la ville de Jijel, de la période entre 1999 & 2015 [Figure 3.3], a permis de ressortir les résultats suivants :

Par rapport à la température de l’air, la saison chaude s’étale du mois de Juin au mois de Septembre avec des températures maximales comprises entre 28.2°C– 31.8°C [Tableau 3.1]. Les températures mensuelles diurnes et nocturnes sont faibles, la température la plus élevée étant enregistrée au mois d’Août (le mois le plus chaud), avec une valeur moyenne mensuelle de 26.3°C, une maximale de 31.8°C et une minimale de 20.6°C.

La saison relativement froide (douce) qui s’étale du mois d’Octobre jusqu’au mois d’Avril avec des températures comprises entre 16.2°C– 20.9°C. Les températures mensuelles diurnes sont faibles durant cette période, tandis que les températures mensuelles nocturnes sont assez basses. Au mois de Janvier (le mois le plus froid), les températures atteignent

leurs valeurs minimales avec une valeur moyenne mensuelle de 11.6°C, une maximale de 16.2°C et une minimale de 6.2°C.

En ce qui est de l'humidité de l'air, le taux d'humidité relative est très élevé durant les deux périodes :

- En hiver, la moyenne annuelle des humidités relatives est de 78 % enregistrée au mois de Janvier.
- En été, le taux d'humidité relative le plus élevé est de 77 % enregistré au mois de Mai.

Cette augmentation du taux d'humidité pendant toute l'année (une moyenne annuelle qui dépasse les 70%) dans la région Djijelienne, s'explique par la présence de la mer, la montagne et trois barrages. En été, on remarque non seulement des températures élevées, mais aussi une sensation de moiteur. Il est donc nécessaire de favoriser la ventilation naturelle.

Tableau 3. 1: Données climatiques moyennes annuelles relevées à la station météorologique de Jijel, (1999-2015). Source : Station météorologique de Jijel, 2016

		J	F	M	A	M	JU	JL	AO	S	O	N	D
Températures °C	T.moy. Max (C°)	16.2	16.4	18.9	20.9	24.0	28.2	30.8	31.8	28.8	26.5	20.4	17.4
	T. moy. Min (C°)	6.2	6.4	8.3	10.2	13.6	17.0	19.6	20.6	18.4	15.7	10.8	7.9
	T.moy. annuelle (C°)	11.6	11.7	13.8	16.2	19.0	22.8	25.7	26.3	23.9	21.1	16.0	12.7
HR	HR.moy. annuelle (%)	78.0	76.1	75.8	76.1	77.0	73.6	71.8	71.1	74.8	74.0	76.3	77.1
Vent m/s	Vent moy. annuel (m/s)	2.5	2.8	2.7	2.3	2.2	2.2	2.4	2.3	2.1	1.9	2.3	2.4
Précips mm	Cumul précips.moy. ann (mm)	141	90	74	58	47	9	2	16	60	66	145	167

En ce qui concerne le vent, il est généralement le bienvenu en été, particulièrement en ambiance humide car il rafraîchit l'atmosphère et le déshumidifie, tandis que les vents d'hiver sont des sources importantes de refroidissement⁹⁵. Pour la saison hivernale, la vitesse moyenne du vent varie entre 2.4 m/s au mois de Décembre et 2.8 m/s au mois de Février. Pour la saison estivale, la vitesse du vent varie entre 2.4 m/s au mois de Juillet et 2.1 m/s au mois de septembre. La courbe des vitesses des vents est irrégulière ; d'où on remarque :

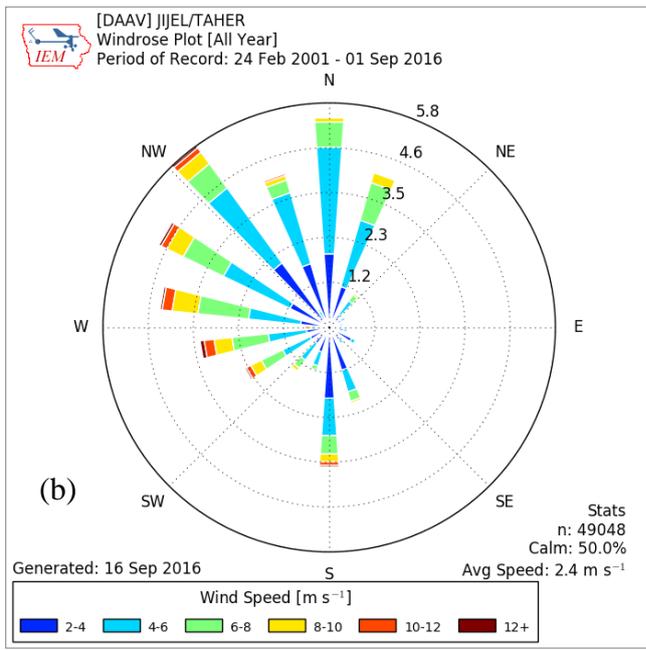
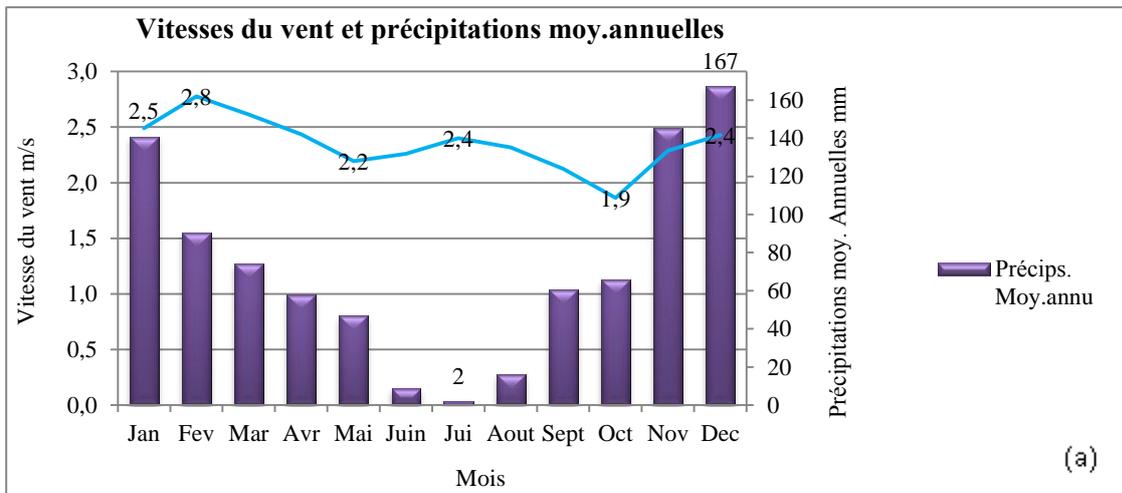
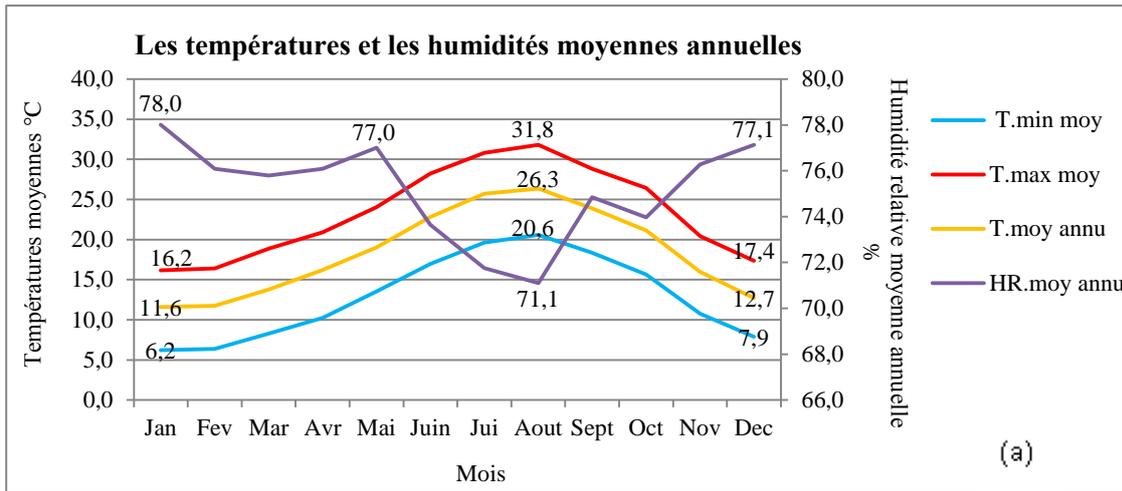
- Une certaine stabilité du mois de Janvier jusqu'au mois d'Avril,
- Une chute brutale au mois de Mai puis une légère hausse jusqu'au mois de Juillet, encore une autre chute jusqu'au mois d'Octobre et enfin un accroissement à nouveau au mois de décembre.

En été, la terre est plus chaude que la mer pendant la journée, et plus froide la nuit. Les variations de pression ainsi créées, provoquent un système de brises dirigées vers la terre pendant la journée et vers la mer pendant la nuit. Etant donnée que la région est très humide, il paraît nécessaire d'exploiter ces vents, en faisant des agencements intérieurs adéquats des espaces et des dispositions extérieurs afin de bénéficier de cette fraîcheur.

D'après la rose des vents (mois de décembre) établie par les services spécialisés de la station météorologique de Jijel durant la période du 24/02/2001 au 27/08/2016 [Figure 3.5], on peut déduire :

- Les vents dominants de l'hiver sont de direction N à O.
- Les vitesses du vent entre 4 à 6 m/s et entre 6 à 8 m/s sont les plus fréquents et prennent une direction N à N-O
- La vitesse moyenne du vent est de 2.4 m/s
- La fréquence des vents calmes est de 50 %.
- La fréquence des vents forts est de 1% sur les directions N-O à O.

⁹⁵ : De Herde, A., Liébard, A., Op.Cit., p. 18a.



Température de l'air °C:
T.moy. max = 31.8°C - Aout
T.moy. min = 6.2 °C - Janvier

Humidité relative %
HR. Moy. ann= 77 % - Mai

Vitesse des vents m/s: *V moy ann= 2.4m/s - Juillet , et 2.8 m/s - Février*

Précipitations mm: *Précip. moy = 167 mm - Décembre*

Figure 3. 3: Interprétation en graphes des données météorologiques de Jijel (a) période 1999-2015. (b) rose des vents annuelle 2001 – 2016 relevée à la station météorologique de Jijel
 Source : (a) Station météorologique de Jijel, 2016

(b) : http://mesonet.agron.iastate.edu/sites/windrose.phtml?station=DAAV&network=DZ_ASOS

Par ailleurs, une analyse climatique des vitesses du vent a été effectuée par le logiciel ecotect et weather tool [Figure 3.4] en s'appuyant toujours sur les données de la station météorologique de Taher –Achouat (Jijel). Elle indique que :

- Le jour le plus venteux est le 15 Février (49 fois)
- Le jour le moins venteux est le 03 Septembre (246 fois)
- Le plus forte rafale de vent est pour le 24 Octobre (297 fois)
- La moyenne la plus chaude en journée c'était en 21 Juillet (202)
- La moyenne journalière la plus froide est le jour du 15 Janvier (15 fois)

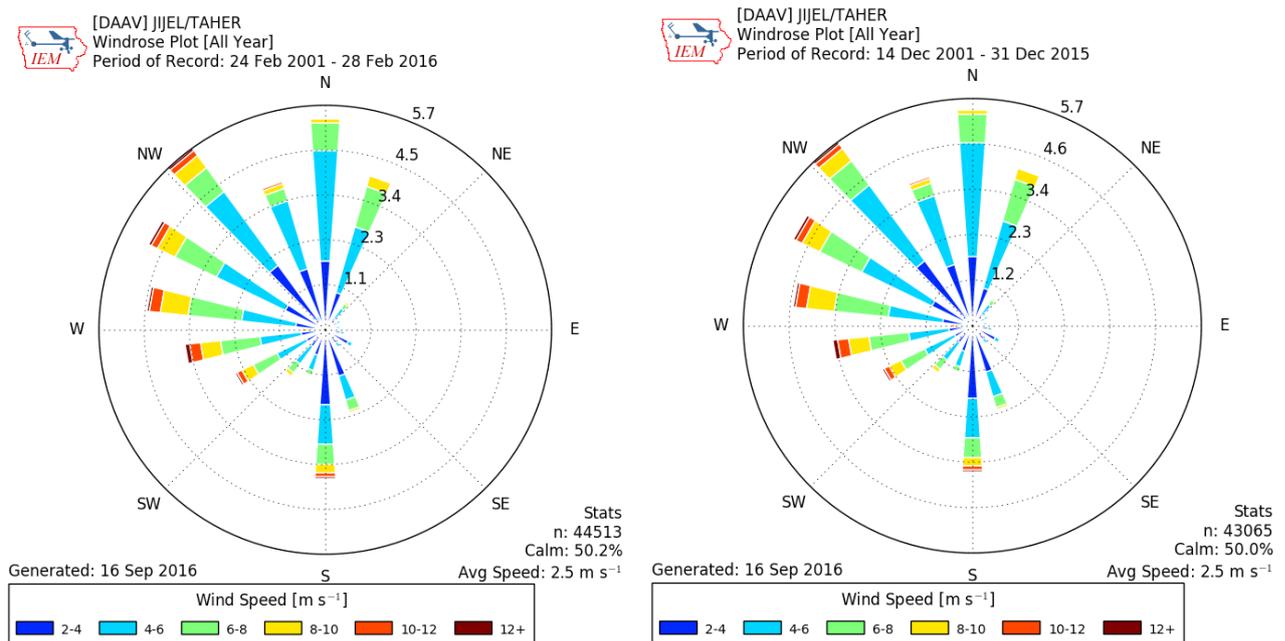


Figure 3. 4: Rose des vents mensuelle (mois de Février & Décembre) période 2001-2015 de la ville de Jijel

Source :

http://mesonet.agron.iastate.edu/sites/dyn_windrose.phtml?station=DAAV&network=DZ_ASOS&units=mps&nsector=36&fmt=png&year1=2001&month1=2&day1=1&hour1=12&minute1=0&year2=2015&month2=2&day2=31&hour2=12&minute2=0

Parlons des précipitations, la région connaît une longue période abondante en précipitations s'étalant du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mars (c'est la période hivernale). Les précipitations maximales sont enregistrées au mois de Décembre avec 167 mm (le mois le plus pluvieux) [Figure 3.3]. Cependant, les précipitations sont rares du mois de Juin au mois d'Août qui est la période d'été. La précipitation minimale est enregistrée au mois de Juillet avec 2 mm (le mois le plus sec). Vu la forte pluviométrie de la ville de Jijel, la protection des constructions contre les pluies demeure nécessaire.

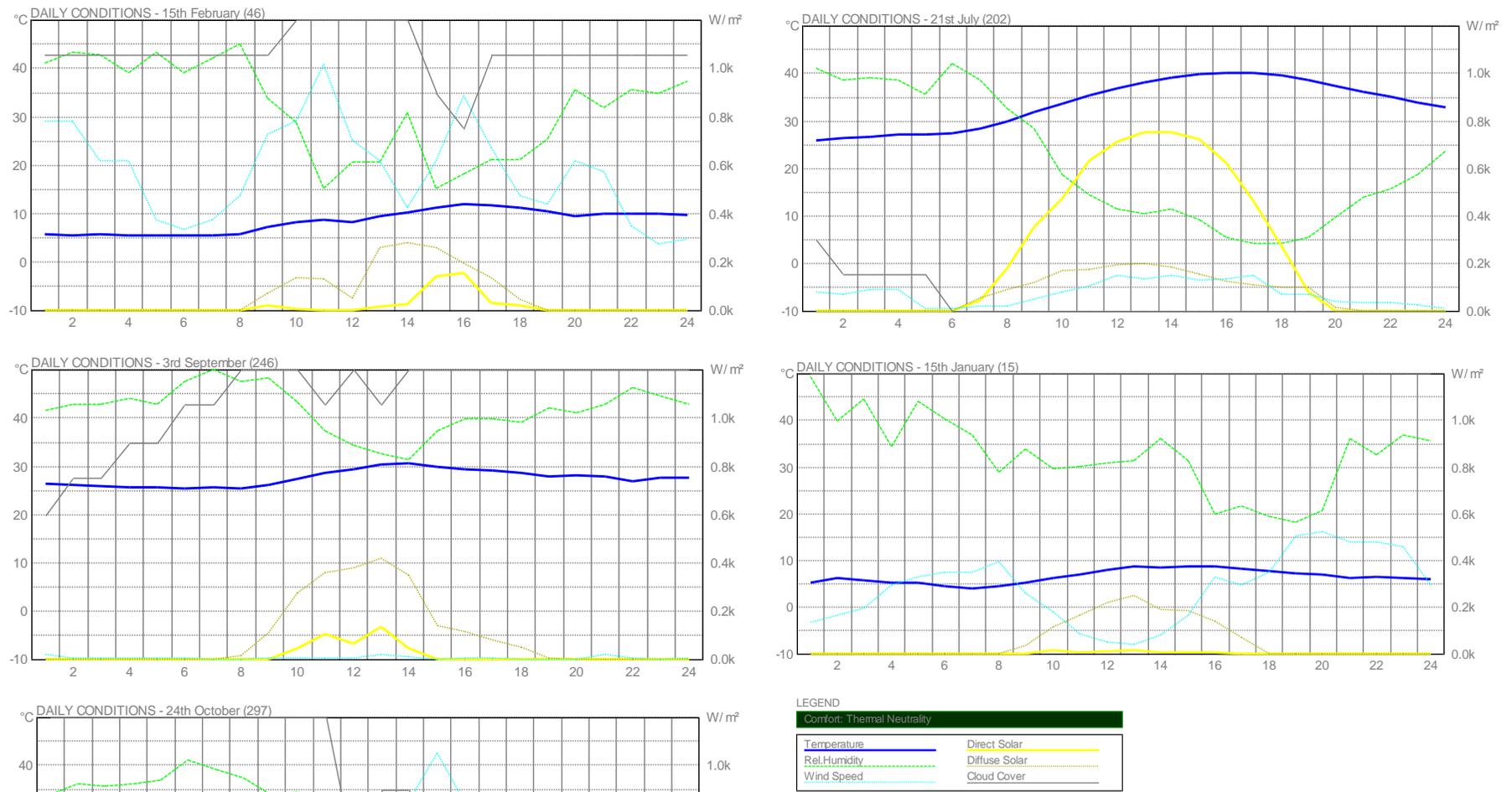


Figure 3. 5: Analyse du régime des vents pour la ville de Jijel
 Source : ecotect

3.2.4. Microclimat de la ville de Jijel

La ville de Jijel a connu plusieurs épisodes dans son développement urbain donnant naissance à des tissus urbains différents où se créent des microclimats aussi différents. Ceci est en fonction de plusieurs critères à savoir l'altitude, la proximité de la mer, la densité urbaine, le cadre bâti et le couvert végétal [Figure 3.6] comme suit :

La zone microclimatique N°1 (Z.M 1): sur la basse altitude se retrouve le centre ville, un tissu en damier appartenant à l'héritage colonial. S'étalant sur un site plat par sa forme triangulaire, ce tissu quasiment bordé de la mer est marqué par la présence de la végétation et les points d'eau dans les nœuds et les points de jonction du triangle. Il bénéficie d'une ventilation naturelle en été, par ses larges percés perpendiculaires à la mer considérés comme des couloirs de vent. L'altitude varie de 4 – 10 m.

La zone microclimatique N°2 (Z.M 2): au-delà des limites du triangle, on voit se développer des quartiers plus ou moins articulés avec le centre en particulier au sud de la ville sur le plateau d'Ayouf, ex-Camp Chevalier où règne un site accidenté. Il est composé des tissus urbains denses et hétérogènes. Son microclimat diffère selon l'altitude. La zone microclimatique 2-A est caractérisée par une altitude qui varie de 10-70m, par contre la zone microclimatique 2-B se localise entre 70-100m. Les espaces verts existent également au niveau de cette partie haute de la ville, notamment au niveau de la zone militaire ainsi que le jardin de Calzada (ces deux derniers constituent les poumons de la ville) et quelques plantations à proximités des quartiers d'habitat collectif et les équipements publics (l'hôpital, etc.). Les résultats des enquêtes effectuées lors de l'évaluation des microclimats urbains de la ville de Jijel, ont montré une différence de perception du microclimat entre les deux zones ; le centre ville est mieux perçu avec son microclimat agréable dû à la densité de sa couverture végétale⁹⁶, contrairement au plateau d'Ayouf qui connaît un microclimat chaud dû à disparition de toute couverture végétale significative et à l'importance de ses surfaces minérales⁹⁷.

Zone microclimatique N°3 (Z.M 3): Sur le seuil du périmètre urbain de la ville de Jijel sont nées les nouvelles extensions urbaines qui vont marquer les entrées de la ville par leur densité et altitude et qui sont considéré parmi les grands projets de la décennie. Il s'agit des nouveaux pôles résidentiels urbains de Mezghitane à l'ouest et Harratene à l'Est de la ville.

⁹⁶ : Bouketta, S. (2011). *Effet de la géométrie urbaine sur l'écoulement du vent et le confort dans les espaces urbains extérieurs, cas de la ville de Jijel*. Mémoire de Magistère. Université Constantine3 (ex.Mentouri).

⁹⁷ : Lehtihet, M. (2007). *Modification des microclimats urbains par la couverture végétale avec référence à la ville de Jijel* Mémoire de Magistère. Université de Jijel.

Là aussi se distingue deux microclimats influencés notamment par la densité du cadre bâti, la dénudé en matière de la couverture végétale (rareté de cet élément), dominance remarquable du béton, situation en altitude (70 et 110 m) sur un site dégagé et accidenté, exposition à la mer et aux vents dominants.

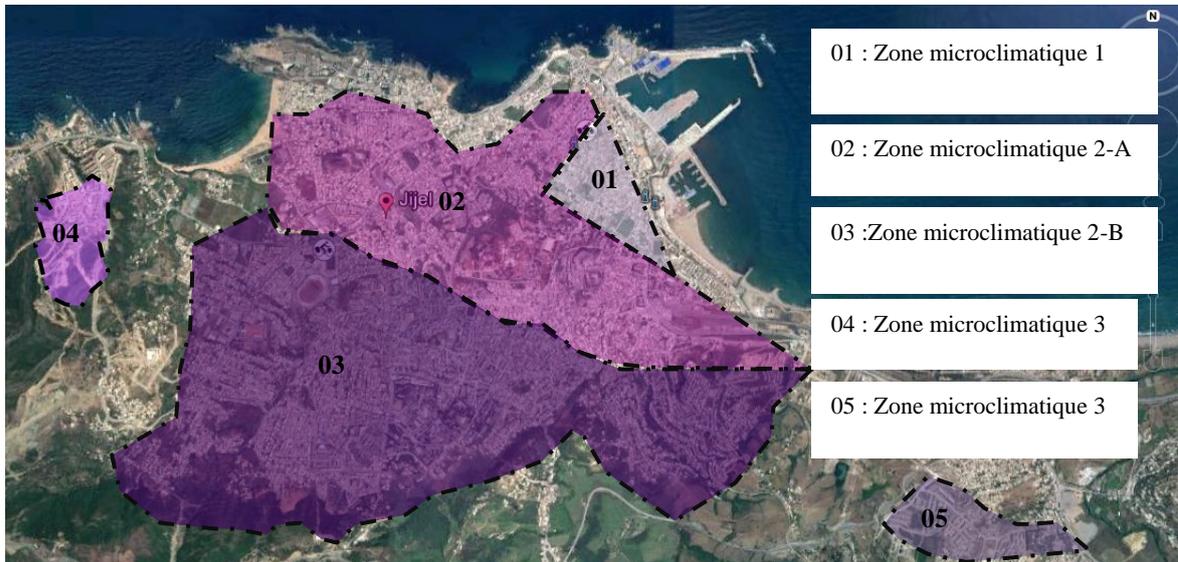


Figure 3. 6: Division de la ville de Jijel selon l'altitude
Source : Google Earth, 2016, traitement auteur

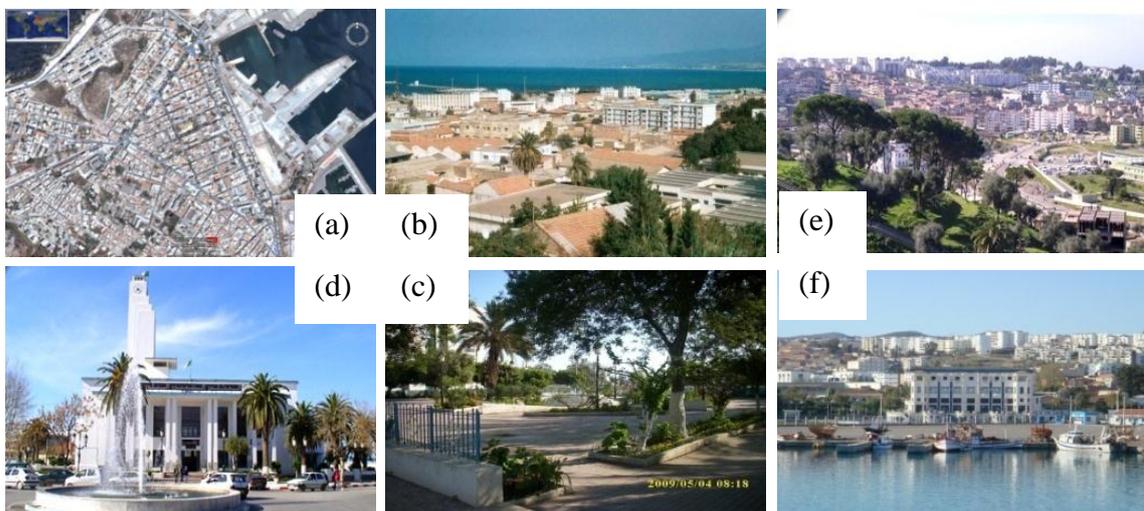


Figure 3. 7: Vues sur la ville de Jijel. (a) Tissu urbain colonial, (b)cadre bati, (c) Les jardins de la ville, (d) Jet d'eau de la mairie. (e,f) hauteur de la ville. source : (a,e,f) google Earth, 2016 -(b,c,d) auteur

3.3. Étude typologique et échantillonnage

L'espace urbain est une composante de la ville et présente désormais des particularités de forme, d'usage et de style qui, toutes, offrent aux usagers de nouvelles façons de vivre au bien être et en convivialité. Il est perçu" sur différentes échelles qui correspondent au réseau viaire, rues, boulevards, places, squares, parvis, parcs, jardins, et à tous les espaces communs au pied des immeubles. Il est déterminé non seulement par les conditions climatiques mais aussi principalement par la géométrie de l'espace bâti qui l'entoure.

Dans ce travail de thèse, l'intérêt porte sur l'espace urbain extérieur qui s'intercale entre les bâtiments, appelé aussi espace interstitiel non construit. Cet espace extérieur est considéré comme le support de la qualité de vie urbaine qui englobe des notions d'identité, de confort, de valeurs d'usage, d'accessibilité, de convivialité qui sont autant de concepts et de notions à prendre en compte lors de toute approche conceptuelle. Cependant, dans la ville de Jijel, l'espace extérieur est mal fréquenté par les usagers. Ceci est du non seulement à la dimension social mais aussi au souci climatique lié aux paramètres vent, humidité et température qui influe sur la perception de l'espace extérieur notamment en hiver.

Pour choisir le cas d'étude, on adopte l'approche typo-morphologique comme outil d'analyse de l'ensemble des groupements de bâtiments de type habitat collectif existants au niveau du périmètre urbain de la ville de Jijel afin d'étudier l'espace qui s'intercale entre ces bâtiments.

L'approche consiste à atteindre une compréhension morphologique des spécimens étudiés par les méthodes de description, de comparaison et d'analyse (diagnostic), et de faire ressortir par la suite les différents types morphologiques, les plus représentatifs et répondus dans la ville de Jijel.

Il s'agit, en outre, de l'une des rares méthodes de travail relevant d'une démarche scientifique, permettant de rendre compte d'un champ de la production humaine qu'est l'architecture, de façon raisonnée et méthodique.

3.3.1. Présentation de la méthode d'approche

L'analyse architecturale, de nature typo-morphologique, étudie son objet, le plus souvent « *un ensemble de bâtiments, dans une perspective d'ensemble, susceptible de*

montrer au sein de ce corpus ce qui fait à la fois son identité et sa diversité »⁹⁸. Selon **Panerai (1999)**⁹⁹, cette analyse s'intéresse à la connaissance de forme urbaine par les types d'édifices la composant et leur distribution dans la trame viaire. Cette étude du rapport entre les types construits et la forme urbaine est le moyen de comprendre la structure de la ville.

Le type, plus précisément, est l'ensemble des caractères organisés en un tout constituant un instrument de connaissance et permettant de distinguer des catégories d'objets. Autrement dit, « un type est un objet qui rassemble les propriétés essentielles d'une catégorie d'objets réels. L'analyse typologique peut s'appliquer à des ensembles d'objets très variés au sein de la même ville »¹⁰⁰. Dans une ville ou un quartier, l'ensemble des types permettent de caractériser le tissu construit. Cette typologie englobe « non seulement les bâtiments, mais les murs, les rues, les jardins, le bâti de la ville, afin de les classer par rapport à la forme urbaine d'une période historique donnée ¹⁰¹ »

L'analyse typologique peut s'appliquer à des ensembles d'objets très variés au sein de la même ville. De son côté, Panerai Ph affirme la nécessité d'une connaissance de l'objet avant de passer à son interprétation, il s'agit de décomposer les données offertes par l'espace physique afin d'en reconstituer ses principes propres ou ceux qu'il exprime ». ¹⁰²

De ce fait, cette démarche met en œuvre des méthodes de description, de comparaison et d'analyse des spécimens étudiés visant à en dépasser la simple approche sensible pour atteindre une compréhension essentiellement morphologique. C'est par, donc, la mise en exergue de certaines propriétés qui les distinguent ou les rassemblent, au sein de l'ensemble de la production, que se retrouve caractérisé chaque spécimen. L'analyse du corpus de spécimens sur cette base et à travers l'interprétation qui peut être faite des résultats, permet d'établir une catégorisation des spécimens en fonction de types.

3.3.2. Méthode de l'analyse typologique

L'analyse typologique peut se situer à plusieurs niveaux. On distingue quatre phases clairement expliquées par **Panerai (1999)** :

⁹⁸ :Duprat, B. *L'analyse des formes architecturales : cadre théorique, méthodes, applications scientifiques*. Cours en ligne, Laboratoire d'Analyse des Formes de l'Ecole d'Architecture de Lyon.

http://www.laf.archi.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=57%3Aanalyse-morphologique-guide&catid=25%3Aanalyse-morphologique&Itemid=44&lang=fr, consulté le 26/02/2016.

⁹⁹ :Panerai, P. (1999). *Analyse urbaine*. éditions Parenthèses. Marseille. p114

¹⁰⁰ : Ibid, p115

¹⁰¹ : Ibid, p.112

¹⁰² : Ibid, p.115.

- La définition du corpus ;
- Le classement préalable ;
- L'élaboration des types ;
- La typologie.

3.3.2.1. La définition du corpus

La définition du corpus est évidemment liée aux questions posées, mais deux aspects interviennent : le choix des niveaux et la détermination de la zone d'étude. Pour le choix des niveaux, la typologie commençant par un classement, il est préférable de classer des objets appartenant au même niveau de lecture du tissu urbain.

En ce qui est de la zone d'étude, sa délimitation dépend des moyens disponibles pour l'investigation et des détails des objets à montrer. On procède à une analyse représentative (à la manière d'un sondage) où il faudra déterminer des échantillons, puis vérifier, après avoir élaboré les types, que l'on rend bien compte de toute la zone. Aussi, une bonne connaissance de la ville en question et des « phénomènes urbains » plus généraux permettra, avec un peu d'intuition, de déterminer les échantillons pertinents.

3.3.2.2. Le classement préalable

C'est une phase d'observation minutieuse des objets, où l'on cherche à les décrire, puis à mettre en évidence les propriétés qui les distinguent, et par la suite établir des critères. A partir des réponses à ces différents critères, on peut procéder à un premier classement, c'est-à-dire regrouper par famille les objets qui offrent la même réponse à une série de critères. De même que les familles ne sont pas encore les types, ce classement n'est pas une typologie, il constitue simplement un premier regroupement qui va permettre d'élaborer les types.

3.3.2.3. L'élaboration des types

Pour chaque famille, les propriétés communes des objets seront rassemblées pour définir le type, l'ensemble des propriétés non communes marque les différentes variations sur le type.

3.3.2.4. Typologie

A travers l'ensemble des types et de leurs relations que nous nommerons typologie. Une typologie assez élaborée mettra en évidence, outre les variations possibles sur chaque type, les équivalences et les hiérarchies qui structurent la forme urbaine. Elle conduit à une compréhension de l'architecture dans un tissu.

3.3.3. Analyse typo-morphologique de l'aire d'étude

L'objectif fondamentale de cette analyse typo-morphologique consiste à la formulation d'un échantillonnage des différents types existants pour ensuite faire ressortir le cas le plus représentatif en fonction d'un ensemble de critères, ceci afin de tester sa performance vis-à-vis du vent et d'optimiser par la suite le contrôle du vent.

Tous les groupements de bâtiments d'habitat collectif appartenant à la ville de Jijel seront recensés et classés par étapes. Il a fallu donc procéder à plusieurs classifications successives pour faire ressortir le type le plus représentatif. Les critères de classification retenus pour les différentes phases découlent de l'état d'art du chapitre 1.

3.3.3.1. Critères et indicateurs

Un intérêt particulier a été accordé aux critères retenus pour le choix des études de cas.

a. Indicateurs d'ordre général

- L'éloignement par rapport à la mer (pour évaluer l'effet des brises),
- L'altitude par rapport au niveau de la mer
- Les caractéristiques du microclimat (présence des végétations, etc). Ainsi surgissent les oppositions telles : ancien/nouveau, aménagé/vide, planté/nu, végétal/minéral, large/étroit, haut/bas, ouvert/fermé, aéré/étouffant, ensoleillé/ombragé, etc.

b. Indicateurs morpho-physiques :

- La densité du bâti
- La rugosité du tissu urbain
- L'ambiance visuelle (taux d'ombrage, mouvement de feuillage, éblouissement, contraste d'éclairage.);

c. Indicateurs géométriques :

- La géométrie du groupement (Forme , dimensions configuration et forme géométrique),
- La forme de l'espace extérieur engendré par un groupe de bâtiment H/W

3.3.3.2. Premier classement

C'est un classement préalable qui consiste à identifier les différents groupements de bâtiments à l'échelle de la ville [Figure 4.8], selon les indicateurs d'ordre général cités précédemment.

Cette première classification nous a permis de localiser les types composant la ville [Tableau 3.2] et distinguer ce qui suit :

- Des groupements ponctuels à faible densité souvent représentent des petits quartiers, ou même appartenant à des logements de fonction, ayant de simples configurations et qui se trouvent sur la basse altitude ;
- Des ensembles d'habitat collectif appartenant aux Z.H.U.N « Zones d'Habitat Urbaines Nouvelles » à grande densité, qui datent des années 1975-1990, composées de plusieurs configurations complexes et riches à la fois. Il existe trois Z.H.U.N qui occupent le périmètre urbain de la ville ;
- Des nouveaux pôles récemment réalisés à grande densité et qui représentent les nouvelles extensions de la ville. L'un se trouve sur l'entrée Est de la ville (Harratene – POS 25, 1953 logts), l'autre sur la sortie Ouest (Mezghitane- POS 29, 2288 logts). Mais celui de la sortie ouest est plus proche à la ville.

A partir de cette synthèse, il s'avère plus judicieux de focaliser l'analyse sur les grands groupements à forte densité résidentielle et qui offrent plus de richesses sur le plan spatial et géométrique et d'éliminer les petits groupements dont la densité ne dépasse pas 100 logements dans la quasi-totalité.

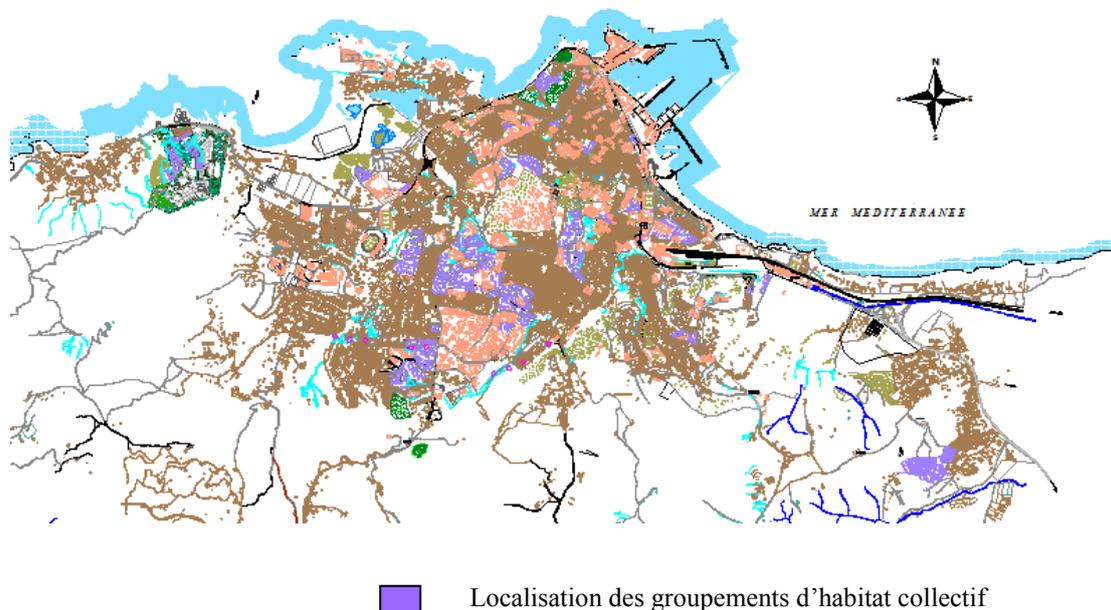


Figure 3. 8: Localisation des différents groupements d'habitat collectif à l'échelle de la ville de Jijel
Source : P.D.A.U. de la commune de Jijel, révision 2009

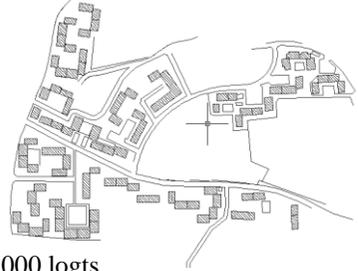
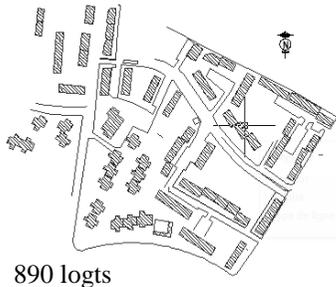
Ces grands groupements sont la Z.H.U.N. 1, la Z.H.U.N.2 , la Z.H.U.N 3 , le nouveau pôle de Mezghitane et le nouveau pôle de Harratene. Cependant, ces deux nouveaux pôles urbains et malgré leur densité, se trouvent sur la bordure du périmètre urbain de la ville de Jijel, récemment réalisées avec des programmes inachevés (en cours de réalisation) et présentent des constructions en un bon état et d'autres dont les effets climatiques (en particuliers l'humidité, le vent et la pluie) ont commencé à marquer les façades.

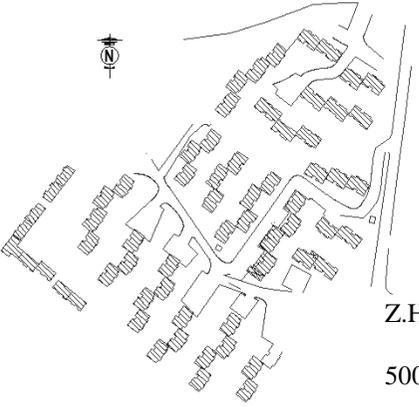
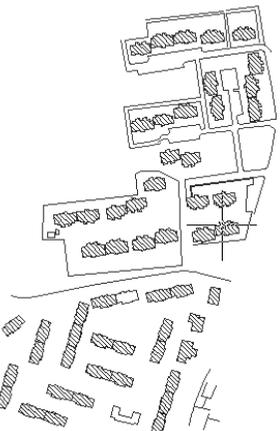
3.3.3.3. Deuxième classement

Cette phase consiste à classer les sites retenus de la première phase selon les critères suivants :

- La variété des configurations spatiales et dispositions des bâtiments (évaluation des effets aérodynamiques)
- La variété des formes géométriques
- La variété des hauteurs
- La variété des profils et du prospect équivalent H/w (qui est en fonction de la hauteur des façades et l'espacement entre bâtiments)

Tableau 3. 2 : Premier classement (diagnostic). Source : Auteur 2016.

Groupement		Description & caractéristiques					
		Situation	Altitude /éloignement de la mer	Ancien/récent	planté/nu	Aménagé/vide	aéré/étouffant
La Z.H.U.N. N°1		Occupe la plus grande superficie. Elle englobe les quartiers d'habitat collectif suivants : <ul style="list-style-type: none"> • 310 logts (Z.M 2-A) • 890 logts (Z.M 2-A) • 230 Camp chevalier (Z.M2-A) • 1000 logts (Z.M 2-B) 	60 – 70m /1.2 km 70 m / 2 km 70 m /1.3 km 80 m / 2.4 km	Ancien Ancien Ancien Ancien	Planté Planté Planté Nu	Aménagé Aménagé Aménagé Aménagé	Aéré Aéré Aéré Etouffant
	Plan de masse	 <p>1000 logts</p>	 <p>230 logts</p>	 <p>890 logts</p>	 <p>310 logts</p>		
La Z.H.U.N. N°2		Appartient à la Z.M 2-B. La cité des 500 logts semble la seule grande cité d'habitat collectif au niveau de cette ZHUN.	100m /3 km	Ancien	Planté	Aménagé	Aéré
La Z.H.U.N. N°3		Occupe une surface restreinte comparativement aux précédentes. On trouve aussi un seul quartier d'une densité de 375 logts collectif situé dans la Z.M 2-B	70 m /1.6 km	Ancien	Nu	Mal aménagé	Etouffant

	Plan de masse	 <p>Z.H.U.N 2 500 logts</p>	 <p>Z.H.U.N 3 375 logts</p>			
Le nouveau pôle Mezghitane	<p>Il occupe un site très accidenté qui se trouve sur la sortie ouest de la ville (Z.M 3). Cette zone résidentielle abritant environ 2288 logts collectifs récemment réalisés, considérée comme la plus grande cité en matière de programme de logement au niveau de la ville de Jijel.</p>	70-110m /830 m	Récents	Nu	Vide	Aéré
Le nouveau pôle Harratene	<p>Situé sur la partie Nord-Est de la ville sur un site en pente (Z.M 3), ce nouveau pôle est destiné à l'usage d'habitations collectives pour accueillir un programme de logement de 1953 logts. Il constitue la 3^e agglomération secondaire dans la ville de Jijel récemment réalisée aussi.</p>	70/110 m/ 1.7km	Récents	Nu	Vide	Aéré

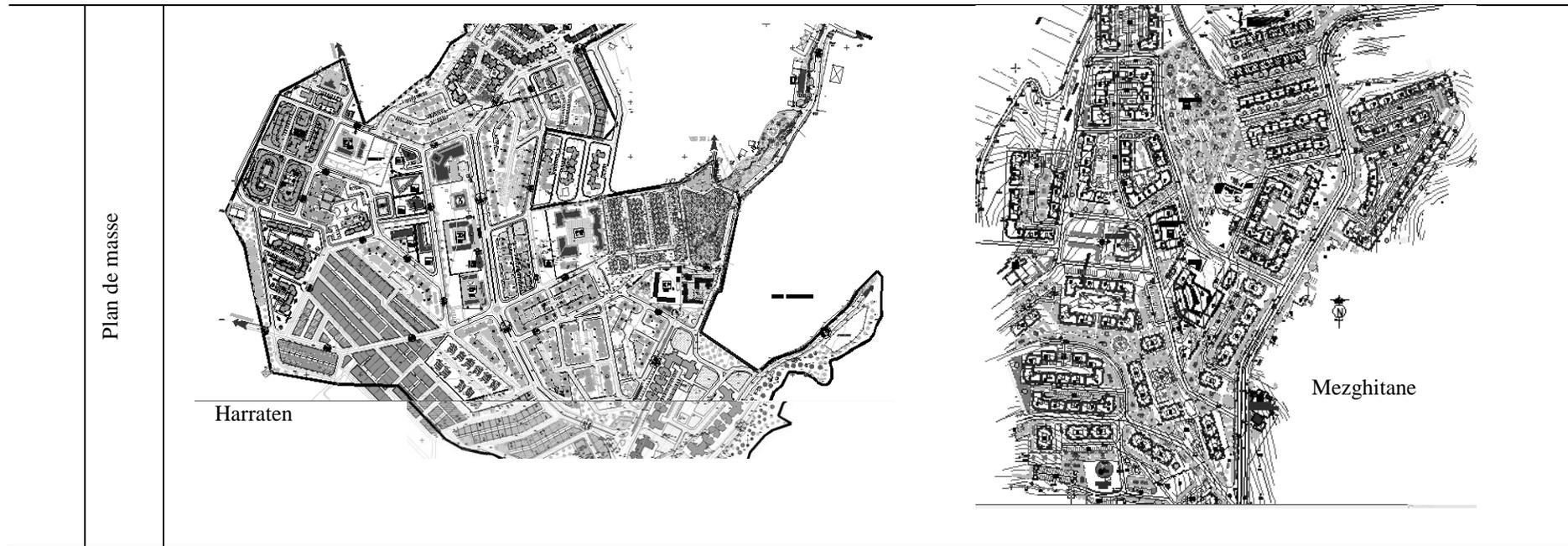


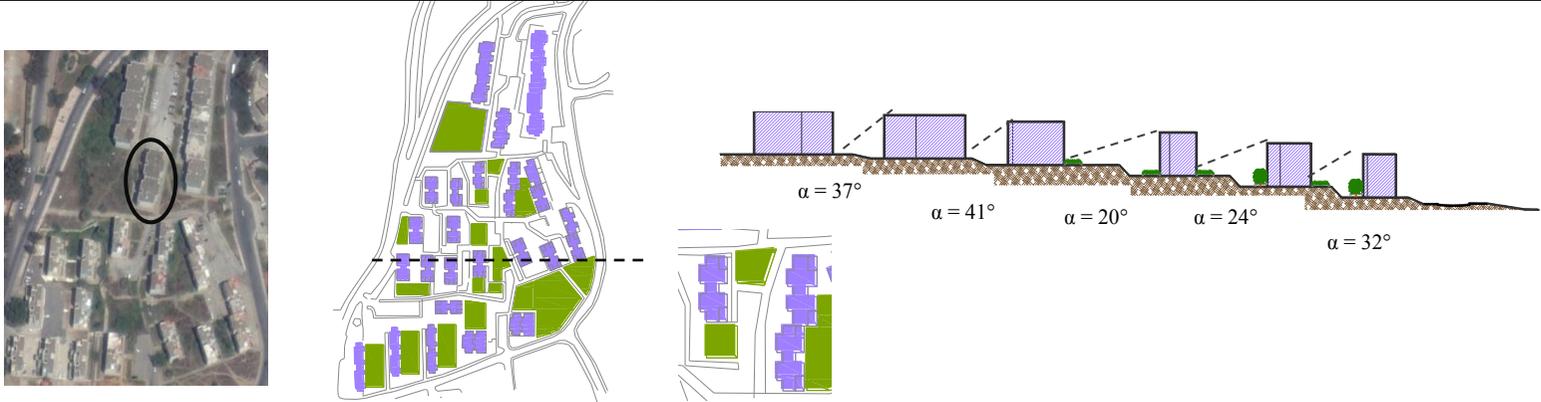
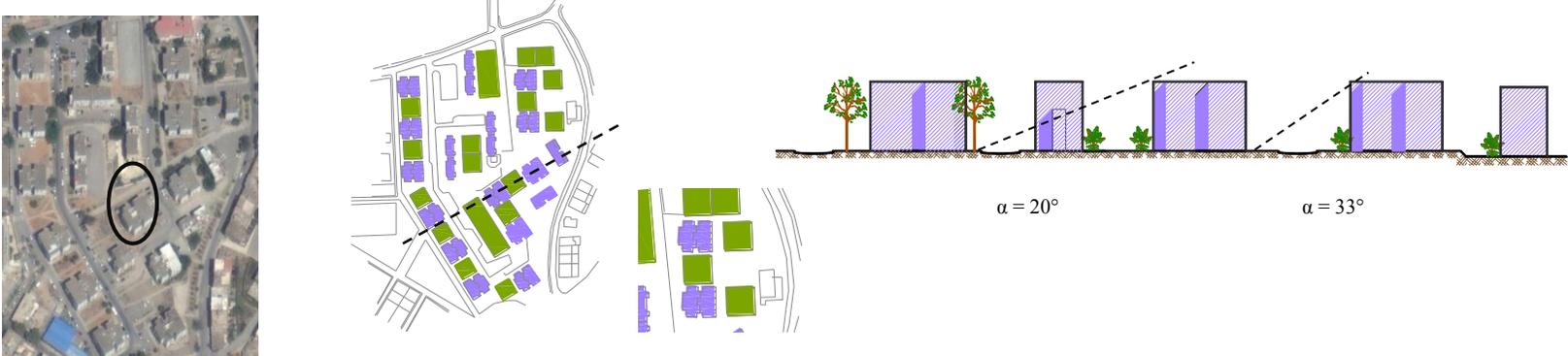
Figure 3. 9 : Quelques exemples de l'habitat collectif existant dans la ville de Jijel. 1 : cité bab essour. 2 : cité des 1000 logts. 3 : cité HLM. 4 : cité des 400 logts. 5 : vue sur le centre ville. 6 : vue sur la ZHUN 2. 7 : cité Mezghitane. 8 : vue sur le camp chevalier. Source : auteur

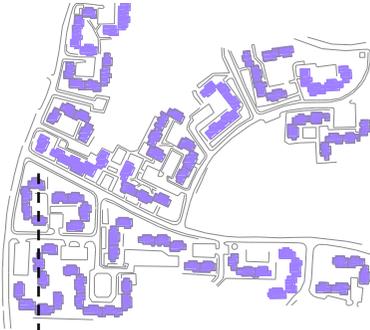
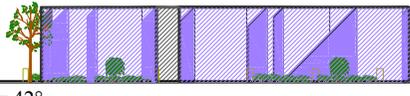
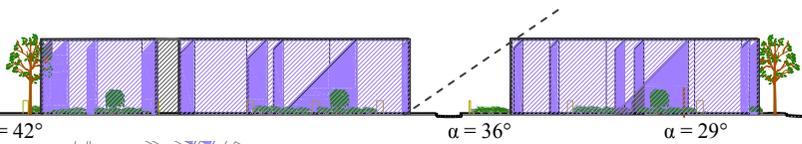
Pour synthétiser [Tableau 3.3], ces sites sont érigés sur des terrains marqués par des topographies différentes (plates ou accidentées); une caractéristique du relief de la ville de Jijel (relief accidenté notamment sur la haute altitude, et plat sur la basse altitude). L'ensemble des bâtiments analysés sont issus des superpositions verticales des unités d'habitation avec des niveaux allant du R+3 au R+4 & R+5, en traçant des profils réguliers par rapport à la hauteur, et un prospect variant d'un site à un autre (la distance entre deux bâtiments juxtaposés est entre 12 – 23 m pour les dispositions linéaire et parallèle, et de 17 - 21 m pour la disposition en U, par contre la distance entre deux bâtiments opposés est de 25 m pour la disposition en U, et entre 12 et 23m pour les disposition linéaire et parallèle). En ce qui est de la porosité urbaine, l'angle d'espacement varie entre 20° - 44°.

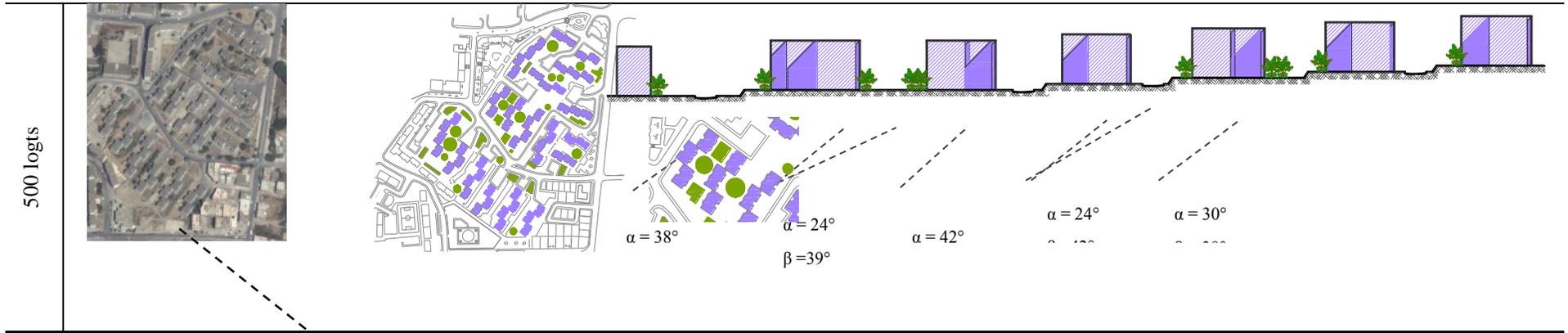
Du point de vue typo-morphologique de l'espace extérieur de l'habitat collectif classé précédemment, il l'en résulte des espaces sont souvent trop vastes, de formes géométriques simplistes définies qu'à partir la disposition et la géométrie des bâtiments alentours et dont la fonction est fortement attribuée à la voiture.

A travers la classification faite dans les Z.H.U.N, une diversité existe déterminée suivant la disposition des bâtiments qui varie entre une disposition ponctuel isolée, linéaire, en barre, en forme de U ou en forme de L. Cette diversité typo-morphologique se trouve également dans les deux nouveaux pôles résidentiels. A Harraten, le type d'habitat collectif social prend est le plus répandue. Cependant, la qualité architecturale à Mezghitane est beaucoup plus améliorée vue l'existence que le type d'habitat promotionnel et LSP (logement socio-participatif) avec une occupation optimisée du foncier. Ceci nous a mené à retenir le quartier de Mezghitane comme cas d'étude. Il possède une variété de configuration spatiale et profils créant ainsi des espaces extérieurs ayant des géométries différentes [Figure 3.12 & 3.13].

Tableau 3. 3: Deuxième classification – les types recueillis de la phase précédente. Source : auteur, 2016

Groupement :		la Z.H.U.N. N°1		
Description & caractéristiques				
Configuration spatiale du plan de masse	Hauteur (H)	Densité (Ds)	Forme de l'espace extérieur	Effets aérodynamiques produits
-Juxtaposition/assemblage de deux blocs en barre (310 logts)	12.24 m (R+3)	1.83	-Espace entre bâtiments : espace vert, parking, rues, espace de transition - Forme rectangulaire, carrée..	Effet de coin, Effet de sillage Effet de canalisation
-Juxtaposition, Disposition linéaire & parallèle (890 logts)	15.30m (R+4)	2.60		
-Assemblage ponctuel de deux bâtiments (230logts)	15.30m (R+4)	2.30		
Assemblage sous forme de la lettre U (1000 logts)	15.30m (R+4)	3.06		
310 logts				
				

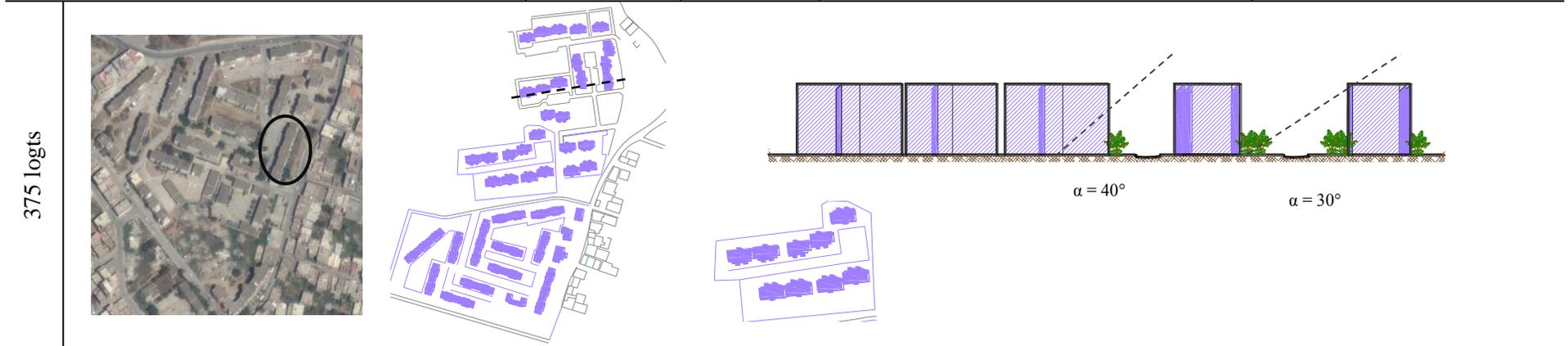
<p>890 logts</p>			 <p>$\alpha = 44^\circ$</p>	 <p>890 logts</p>	
<p>1000 logts</p>			 <p>$\alpha = 42^\circ$</p>	 <p>$\alpha = 36^\circ$ $\alpha = 29^\circ$</p>	
<p>Groupement :</p>		<p>la Z.H.U.N N°2</p>			
<p>Juxtaposition de plusieurs bâtiments, disposition linéaire & parallèle (alternation), en L</p>		<p>15.30m (R+4)</p>	<p>2.60</p>	<p>-Espace entre bâtiments :espace vert, parking, rues, espace de transition</p>	<p>Effet de coin, Effet de liaison, Effet de canalisation</p>



Groupement : Z.H.U.N. N°3

Description & caractéristiques

Configuration spatiale du plan de masse	Hauteur	Densité Ds	Forme de l'espace extérieur	Effets aérodynamiques produits
-Juxtaposition de plusieurs bâtiments, disposition linéaire & parallèle	15.30m (R+4)	2.44	-Espace entre bâtiments : espace vert, parking, rues, aire de jeux (forme rectangulaire), espace de transition	Effet de coin, Effet de canalisation



Groupement : pole Est (Harraten)

<p>Juxtaposition/assemblage de 02/03/04 blocs en barre, juxtaposition, disposition linéaire, assemblage ponctuel, assemblage sous forme de la lettre U & L.</p>	<p>18.36m (R+5)</p>	<p>3.67</p>	<p>-Espace entre bâtiments : espace vert, parking, rues, espace de transition (forme rectangulaire, carré)</p>	<p>Effet de barre Effet de canalisation, Effet de venturi et effet de liaison</p>
<p>1953 logts</p> 	<p>2288 logts</p> 			
<p>Groupement : pole Ouest (Mezghitane)</p>				
<p>Juxtaposition/assemblage de 02/03/04 blocs en barre, juxtaposition, disposition linéaire, assemblage ponctuel, assemblage sous forme de la lettre U & L.</p>	<p>18.36m (R+5) /21.42m (R+6)</p>	<p>5.50</p>	<p>-Espace entre bâtiments : espace vert, parking, rues, aire de jeux, espace de transition, passage sous bâtiments (forme rectangulaire, carré, trapézoïdale)</p>	<p>Effet de barre Effet de canalisation, Effet de venturi Effet de liaison</p>

C'est un quartier récent appartient au grand programme national de logement qui a touché la ville de Jijel à l'instar des autres villes algériennes. Il se trouve sur l'axe routier Jijel-Bejaia (sortie ouest) et s'étale sur une superficie de 46.72 Ha. Cette zone résidentielle se situe sur une altitude comprise entre 70 à 110 m et proche de la mer d'une distance de 800 m. Il est marqué par un riche programme d'habitat collectif (LSP, promotionnel) et forte densité. Environ 2283 logements réalisés sous différentes formes et ayant pour la plus part une hauteur ne dépassant pas les huit (7) niveaux et dont certains abritent des services et commerces de 1^{ère} nécessité au R.D.C.

Quant à l'espace extérieur, ce cas d'étude présente une variété de forme et de fonction, entre aire de jeux, espace vert, passage sous bâtiments, espace de transition. Cette zone présente un relief accidenté avec une orientation Sud-Nord et des pentes moyennes à fortes qui varient entre 20 à plus de 40%. C'est en fonction de la topographie du site que le plan de masse a pris sa forme ; plusieurs configurations géométriques et spatiales ont été créées donnant plus de richesse à l'étude [Figure 3.12]. Il existe donc des dispositions linéaires, parallèles, en barre, en U et L avec la juxtaposition de plusieurs bâtiments. En ce qui concerne l'élément vert, ce quartier est pratiquement dénudé de végétation en sa totalité. Des broussailles, des cactus et des plantes épineuses sur des terrains incultes constituent la végétation de ce site.

Il est nécessaire de mentionner ici que cette extension vers l'entrée ouest de la ville est venue suite au manque du foncier dans le milieu urbain de la ville de Jijel (une ville asphyxie en matière du foncier). Aussi, l'ensemble des futurs projets d'extensions sont programmés au seuil du périmètre urbain et sur des reliefs aussi accidentés tel le cas du programme A.A.D.L 2.



Figure 3. 10: Situation du cas d'étude par rapport au centre ville
Source: Google Earth, 2016



Figure 3. 11: Vue du site depuis la mer
Source: Google



Figure 3. 12: Présentation du cas d'étude. Images satellitaires, plan de masse, profil & vues.
 Source : POS 29 (plan traité par l'auteur). Vues & profil (auteur) –juillet 2016 , Google Earth 2017 (A &B).



Figure 3.13 : Typologie de végétation au niveau du cas d'étude
Source : auteur (photos)

3.4. Interprétation des résultats de l'enquête

L'enquête par la technique du questionnaire est une étape exploratoire permettant de recueillir les différentes sensations de satisfaction et d'insatisfaction émises par les enquêtés vis-à-vis la qualité environnementale du cas d'étude¹⁰³, notamment l'aspect du vent et ses répercussions sur le confort, l'usage et la fréquentation de l'espace extérieur. A travers cette enquête, ce sont à la fois les facteurs susceptibles de générer des nuisances dues aux effets aérodynamiques relatifs au vent et la nature de ces nuisances (thermique, dynamique, sonores, insécurité) qui seront investigués.

3.4.1. Construction du questionnaire

Le questionnaire se compose de deux parties, l'une étant signalétique qui regroupe les informations personnelles concernant l'interviewé. L'autre partie renferme des questions fermées et aux choix multiples. Les thématiques du questionnaire ont été bien structurées selon les indicateurs choisis et qui se déclinent en trois niveaux :

¹⁰³ : Mestoul Dj. (2010).évaluation du degré de gêne dans les espaces publics extérieurs soumis aux effets aérodynamiques des bâtiments- cas d'étude : cité CNEP 800 logements de Bouzereah a Alger. Mémoire de magister, EPAU.

- Niveau d'évaluation de l'environnement physique (satisfaction et insatisfaction) : dans laquelle les interviewés avaient à exprimer leur avis y compris la satisfaction et l'insatisfaction sur des aspects agréables ou désagréables liés à l'environnement vécu notamment en ce qui est du mouvement du vent.
- Niveau d'évaluation de l'environnement aéraulique (perception du confort) : il s'agit d'exprimer le degré d'évaluation du confort aéraulique à l'échelle microclimatique, à travers l'évaluation qualitative des différents facteurs influençant le confort. En effet, il s'agit d'estimer le degré d'influence de ces facteurs dans le déroulement des activités, la fréquentation et l'usage de l'espace extérieur.
- Niveau de contrôle de l'environnement aéraulique (disposition des bâtiments) : les interviewés expriment leur avis en ce qui concerne le contrôle de l'environnement physique vis-à-vis le vent. L'objectif étant d'estimer combien la disposition des bâtiments et son impact sur le comportement du vent sont ressenties par les usagers, et de s'enquêter sur la nature des interventions possibles à apportées à l'environnement physique (modification, changement, etc) en vu de l'amélioration de l'environnement aéraulique vécu.

3.4.2. Collecte des données

L'échantillonnage de l'étude est aléatoire. Environ 100 personnes ont été interrogées afin de recueillir ces informations ; ces personnes ont été présentes sur les lieux ou de passage le jour de déroulement des campagnes de mesure. Quelques variables ont été fixées (à l'exemple de la profession, l'âge, le sexe) dans le but est de connaître le degré de permanence et d'utilisation de l'espace, vu que la vocation du cas d'étude étant résidentielle.

Par ailleurs, la collecte des données s'est déroulée en même période de l'investigation (hiver et été) suivant le parcours tracé et aux alentours des points de mesure. Cependant, cette technique du questionnaire présente la difficulté de s'appuyer sur le langage, celui du chercheur et ceux de diverses catégories des personnes enquêtées. En effet, ce discours verbal pose le problème du sens et de l'interprétation.

3.4.3. Analyse des données de l'enquête

3.4.3.1. Evaluation de l'environnement physique vécu par les usagers

Ce niveau de l'évaluation de l'environnement permet de présenter les aspects agréables et désagréables de l'environnement concerné. Les usagers expriment en fait le degré de satisfaction ou d'insatisfaction qui leur incite ou empêche de fréquenter l'espace extérieur.

En ce qui est des éléments agréables de l'environnement, ceci porte sur les paramètres comme la fraîcheur et la végétation, bon voisinage et sécurité, et la vue et la proximité de la mer. La satisfaction envers le premier facteur, s'est exprimé positivement et présente 32% des réponses [Figure 3.14]. Le facteur de la vue et a proximité de la mer contribue à la satisfaction de l'environnement avec une fréquence de 48%.

Par contre en ce qui concerne les aspects désagréables les interviewés expriment nettement dans leurs réponses leur agacement vis-à-vis de l'« aspect venteux lié à la présence du vent » avec un pourcentage de 28%, ce qui prouve qu'il est exposé au vent non seulement par l'effet de l'altitude mais aussi par la manière avec laquelle les bâtiments ont été agencés [Figure 3.14]. En ce qui est de l'aspect dégradé du cadre physique, l'effet de l'humidité a été ressenti avec un pourcentage de 12%.

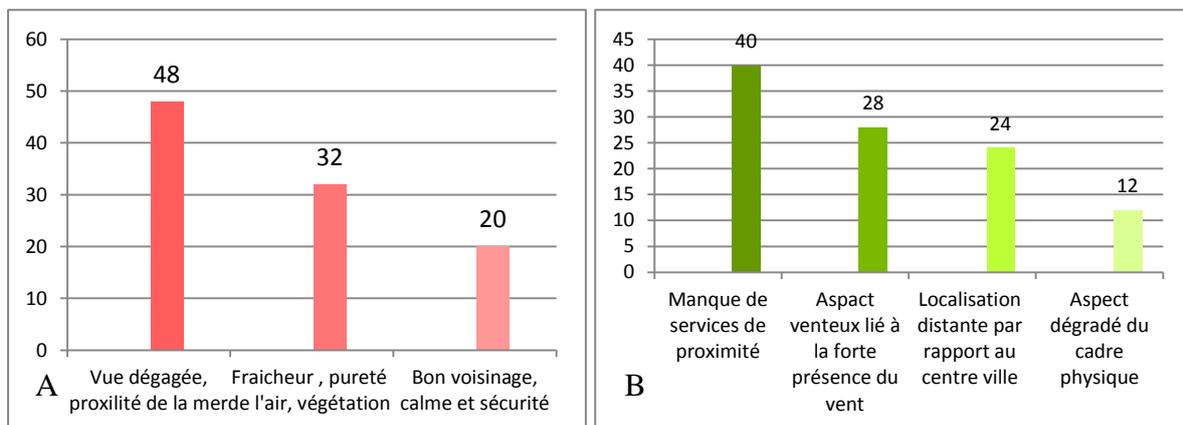


Figure 3. 14: Evaluation de l'environnement physique vécu par les usagers. (A) aspects agréables, (B) aspects désagréables. Source : auteur

3.4.3.2. Evaluation de l'environnement aéralique

a. Evaluation de l'action du vent sur les usagers

Les aspects nuisibles occasionnés par la présence du vent et auxquels les usagers ont accordé un jugement négatif portent sur les actions thermiques (froid), dynamiques (survitesse, gênes mécaniques) et sonores. L'action thermique s'avère la plus gênante avec un pourcentage de 40%, 32% pour l'action mécanique, et seulement 28% pour les nuisances sonores [Figure 3.15]. Cela atteste que le cas d'étude présente un inconfort aéralique en hiver, et engendre des manifestations aérodynamiques.

b. Evaluation du degré d'influence des gênes dues à l'action du vent sur les usagers

En espace extérieur, le déroulement des différentes activités est affecté par les conditions climatiques notamment par temps venteux. 56% des interviewés ont indiqué qu'ils peuvent sortir par temps venteux afin d'accomplir certaines de leur pratiques selon la nécessité de l'activité [Figure 3.15]. Parallèlement, 44% des interrogés se sentent privés de sortir par temps venteux.

c. Evaluation du degré d'adaptation des usagers vis-à-vis ces gênes

Les sensations des usagers en temps venteux et leur adaptations vis-à-vis les nuisances notamment les gênes mécaniques sont subjectifs [Figure 3.16]. Environ 24% des interviewés indiquent qu'ils peuvent s'adapter et se sentent peu dérangé, d'autres sont à l'aise avec un pourcentage de 6%, alors que 30% se sentent dérangé et 20% par contre se sentent très dérangé et 20% en colère.

En effet, l'accomplissement des activités devient difficile et limité. Selon les interviewés, 48% des interviewés ont précisé que le vent les dérange en sortant à l'extérieur, 32% ont estimé que le vent les empêche d'accomplir certaines activités [Figure 3.16]. Par contre 20% ont indiqué qu'ils peuvent les accomplir.

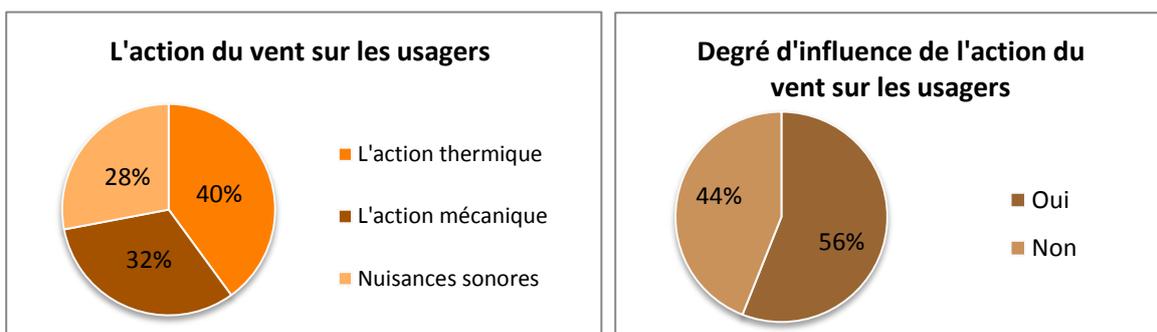


Figure 3. 15: Evaluation du degré d'influence de l'action du vent sur les usagers. Source : auteur

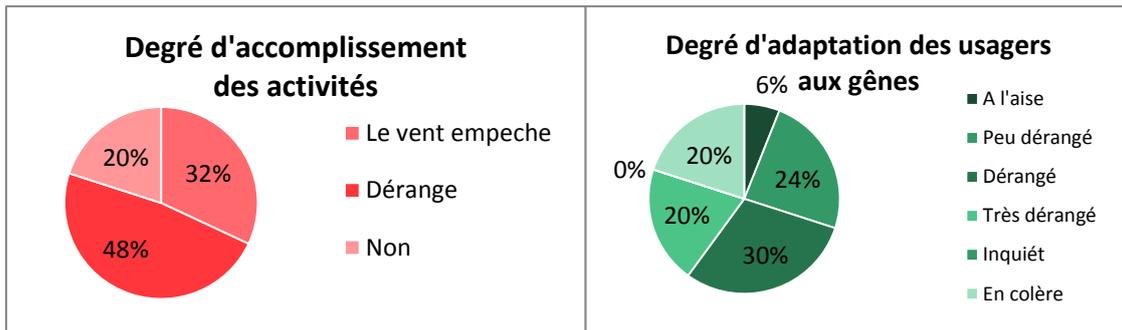


Figure 3. 16: Evaluation du degré d'adaptation des usagers vis-à-vis ces gênes Source : auteur

3.4.3.3. Contrôle de l'environnement aéraulique

a. Evaluation de la disposition des bâtiments

Ce facteur de disposition des bâtiments était méconnu par les usagers. D'après la question posée (que pensez – vous de la disposition des bâtiments ?), les réponses dévoilent qu'environ 24% ont estimé que les bâtiments ont de bonne disposition et qu'elle est étudiée, 38 % des interviewés ont constaté le contraire et qu'elle est quelconque et n'est basée sur aucune réflexion, alors que 38% n'ont aucune réponse [Figure 3.17].

b. Evaluation de l'impact de la disposition des bâtiments sur le vent

L'objectif de cette section est d'estimer l'impact de la disposition des bâtiments sur le comportement du vent par les usagers. Ce facteur s'est exprimé positivement et présente un taux de 40%, alors que 35% ont répondu négativement et le reste est malheureusement sans réponses [Figure 3.17].

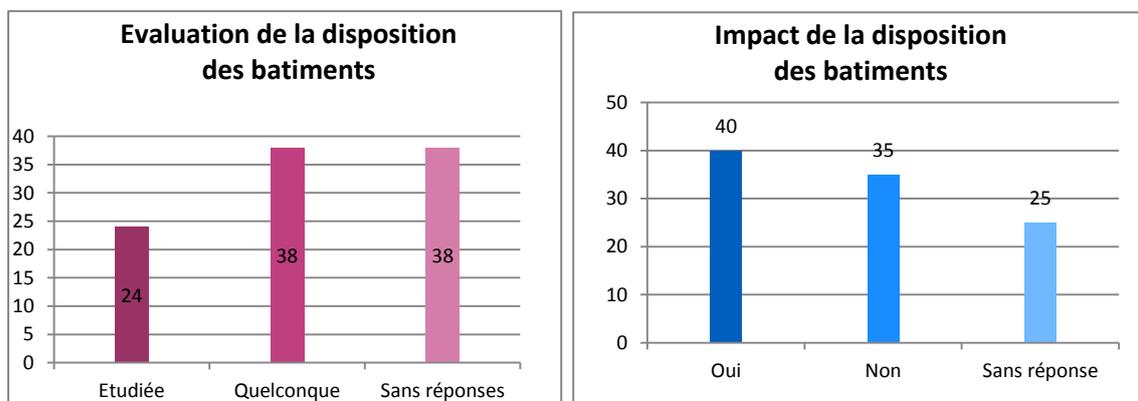


Figure 3. 17: Evaluation de la disposition des bâtiments Source : auteur

c. Amélioration de l'environnement vécu

Il s'agit des attentes des usagers et des futures perspectives et qui peuvent donner vitalité et confort dans les espaces extérieurs. Ceci porte sur les facteurs d'agrément visuel, protection contre le vent et la dynamique [Figure 3.18]. En ce qui est de la protection contre le vent, ce facteur consiste à créer des espaces de détente et de regroupement à l'abri du vent. Selon les interviewés, 36% ont estimé renforcer cet aspect de la protection contre le vent dans l'espace extérieur, environ 40% ont proposé d'agrémenter l'espace extérieur avec des plans de verdure. Quant au dernier paramètre, le cas d'étude souffre d'un manque de dynamisme et de convivialité, ce que les interviewés l'ont porté 24 %.

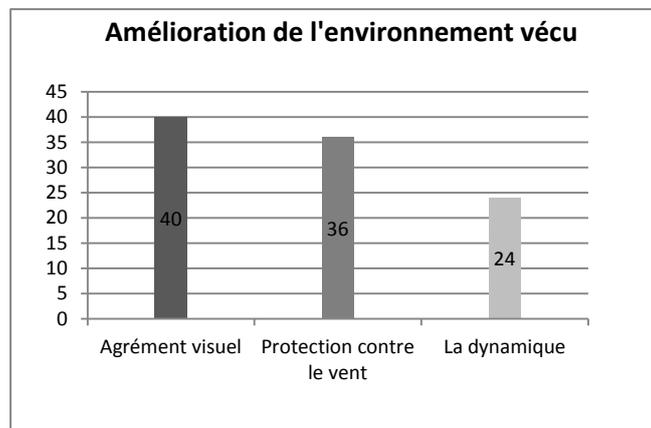


Figure 3. 18: Evaluation de futures attentes en relation avec l'espace extérieur

Source : auteur

3.5. Outil de recherche choisi

Les connaissances actuelles en aérodynamique urbaine s'appuient sur trois sources : la simulation en soufflerie, la mesure in-situ et la simulation numérique. L'intérêt de l'étude en soufflerie réside dans le fait d'avoir des résultats fiables pour un grand nombre de combinaisons de vitesse et de directions du vent. En effet, il est également possible de faire tester l'environnement éolien pour de nouvelles surfaces en stade de planification ou de nouveaux aménagements. Cependant, l'étude en soufflerie nécessite un laboratoire expérimenté et de développer un modèle précis de la surface concernée et de son environnement.

La simulation numérique est une alternative à la soufflerie permettant de développer un modèle numérique de l'espace afin de simuler virtuellement l'écoulement de l'air en utilisant les logiciels de simulation en dynamique des fluides "CFD". Ils comportent l'avantage d'évaluer n'importe quelle combinaison de vitesse et de direction du vent et de

configuration de l'espace. Cependant, les calculs impliquent des ressources informatiques considérables et nécessitent que l'utilisateur maîtrise la problématique complexe de circulation d'air.

Par ailleurs, les mesures sur site présentent l'avantage d'avoir une estimation du cas réel par la présence de tous les obstacles de l'environnement étudié. Cette démarche nécessite un grand nombre de points de mesure. Son inconvénient réside dans l'impossibilité d'évaluation de nouvelles propositions de configurations d'aménagement. Dans notre étude, les outils de recherche vont concernés la mesure in situ et la simulation numérique.

Une vaste gamme d'outils de simulation numérique est proposée aujourd'hui dans le cadre de la modélisation urbaine. Parmi ceux qui permettent le calcul du climat modifié par la présence de la ville, on trouve cependant un nombre très limité de modèles pouvant reproduire, avec un degré suffisant de précision, toute la complexité du système climatique urbain (calcul simultané et interactif du bilan radiatif, thermique, aéraulique à plusieurs échelles, et en tenant compte des transferts entre l'air, la végétation, les bâtiments, et le sol) comme le logiciel ENVI-met V4. Il a été beaucoup retenu dans les études liées au microclimat urbain. **Adolphe et al. (2015)** ont utilisé envi-met pour l'évaluation de dispositifs de rafraichissement urbains dans le cadre du projet îlot de fraîcheur urbain. **Tariq et al. (2014)** ont adopté l'approche de simulation numérique par ENVI-met V4 pour analyser l'impact de la géométrie urbaine sur le microclimat urbain dans les espaces urbains à Dhaka, au Bangladesh. Deux facteurs environnementaux, la température et la vitesse de l'air ont été sélectionnés pour quantifier le microclimat extérieur. **Galli et al (2013), Tebbani et Bouchahm (2016), Johansson et al. (2017) et Tsoka (2017)** étudient la relation entre la morphologie urbaine, le microclimat et le confort extérieur à travers le logiciel de simulation numérique Envi-met.

Par ailleurs, ce logiciel a été validé à travers plusieurs recherches liées aux phénomènes aérauliques et la ventilation urbaine. **Kim et al. (2009)** ont analysé l'écoulement du vent autour du bâti et la qualité de l'air en utilisant le logiciel ENVI-met V4. Aussi, **Jin et al. (2017)** ont choisi Envi-met pour évaluer l'effet de la disposition des bâtiments résidentiels sur le vent en période froide en Chine. Par ailleurs, le logiciel ENVI-met V4 semble être bénéfique dans l'étude effectuée par **Wang et al. (2016)** sur l'effet de la densité urbaine sur les paramètres microclimatiques en particulier le vent. De leur part, **Bouketta et Bouchahm (2017)** ont évalué l'impact de la géométrie urbaine sur

l'écoulement du vent dans les espaces extérieurs par le logiciel ENVI-met. **Mendes et al. (2017)** par contre ont utilisé ENVI-met V4 pour analyser l'effet du vent sur les arbres en milieu urbain.

Ceci nous a poussé à retenir ENVI-met V4 dans le contexte actuel de cette recherche. Par contre un inconvénient s'impose, le temps de calcul est extrêmement long même avec un ordinateur puissant. ENVI-met V4 permet un forçage climatique simple seulement avec la température et l'humidité de l'air. Ce forçage ne prend pas en compte la direction et la vitesse du vent. Le logiciel considère une vitesse moyenne observée par la station météorologique au niveau du sol qui est interpolée temporellement et spatialement pour le profil complet 1D pour la journée concernée. Aussi la direction du vent est maintenue constante à tous les niveaux (**Bouketta 2011, Adolphe et al. 2015**). Malgré ces inconvénients, ENVI-met V4 demeure aujourd'hui le seul logiciel permettant une simulation microclimatique réaliste à l'échelle du quartier.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthodologie de travail adoptée. Le cas d'étude a été choisi en se basant sur une analyse typologique. Elle consiste à répertorier les différents groupements d'habitat collectif au niveau de la ville de Jijel afin de faire ressortir le cas représentatif vis-à-vis la configuration de l'espace extérieur. Un classement a été élaboré fixant leurs caractéristiques morphologiques et géométriques. Le cas d'étude retenu contient une variété des configurations spatiales et dispositions des bâtiments offrant par la suite des prospects variés de l'espace extérieur.

Par ailleurs, l'enquête nous a permis de déceler la perception des usagers vis – à – vis les conditions aérauliques et leur comportement physique en ce qui concerne la fréquentation, l'activité et l'usage des espaces extérieurs dans ce cas d'étude.

Nous avons consacré une partie à une brève présentation des différents outils utilisés dans cette recherche. La mesure in situ et la simulation numérique semblent être les moyens de recherche adoptée pour cette étude. Les résultats obtenus de l'investigation seront discutés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV



Evaluation microclimatique

par investigation

& simulation



CHAPITRE IV : EVALUATION MICROCLIMATIQUE PAR INVESTIGATION & SIMULATION

4.1. Introduction

Ce chapitre consiste à présenter l'évaluation microclimatique des différents espaces urbains sélectionnés dans le cas d'étude. L'investigation par la mesure in situ et la simulation numérique ont été choisis comme outils de recherche. La mesure in-situ a été choisie comme moyen d'investigation pour appréhender et évaluer réellement les phénomènes microclimatiques notamment le comportement du vent. La simulation permet par contre de caractériser l'écoulement du vent sur les mêmes espaces. Un autre outil complémentaire réside dans l'utilisation du questionnaire, semble être la meilleure façon de récolter les réponses des usagers de l'espace extérieur du cas choisi afin de cerner l'aspect subjectif de la perception du confort notamment le confort thermo-aéraulique.

Dans un premier temps, ce chapitre définira le cadre général de la recherche et le déroulement de l'investigation. Il évoquera ensuite la discussion des résultats de l'investigation, pour entamer après l'évaluation numérique de l'écoulement du vent dans les géométries choisies.

4.2. Investigation

4.2.1. Objectifs des campagnes de mesures

La mesure est un outil fiable qui aide à quantifier les paramètres microclimatiques. L'objectif de la campagne de mesure effectuée au niveau du cas d'étude vise à souligner les variations microclimatiques dans l'espace extérieur. Les grandeurs mesurées englobent les trois paramètres climatiques essentiels influençant le confort thermique en milieu urbain. Il s'agit de la température de l'air (°C), l'humidité relative de l'air (%) et la vitesse du vent (m/s). Les finalités des campagnes de mesure seront résumées comme suit :

- ✓ En premier lieu, déterminer le microclimat du cas retenu à travers la mesure selon des moments donnés de la journée, ensuite les faire comparer avec celles de la station météorologique de l'aéroport d'Achouat¹⁰⁴ comme étant la station météorologique de référence.
- ✓ En suite connaître l'interaction entre le comportement de l'écoulement du vent (vitesse, direction & mouvement) et les différentes géométries des espaces extérieurs selon des points de mesures soigneusement sélectionnés afin de faire ressortir les anomalies aérodynamiques.
- ✓ Simultanément, le déroulement d'une enquête par questionnaire auprès des piétons a eu lieu afin de connaître le ressenti et la perception des usagers vis-à-vis le paramètre vent et l'évaluation de l'environnement vécu.

4.2.2. Instrument de mesure

Les mesures ont été effectuées à l'aide de deux appareils multifonction portatifs modèle LM-8000 [Figure 4.1]. Cet instrument a été conçu afin d'acquérir quatre grandeurs : la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et l'éclairement (Anémomètre-thermo-hygromètre-luxmètre portatif). Selon le manuel, il existe un micro-processeur intégré qui garantit la fiabilité des mesures. La partie anémomètre comporte une hélice très sensible avec roulement à faible friction qui permet d'obtenir une bonne précision dans la haute comme dans la basse échelle [Tableau 4.1]. L'hygromètre est de type capacitif haute précision avec temps de réponse rapide.



Figure 4. 1: Instruments de mesure utilisés
Source : auteur (photo)

¹⁰⁴ : Commune de Taher, Jijel

Tableau 4. 1: les caractéristiques de l'instrument
Source : manuel de l'instrument

Instrument LM - 8000				
Paramètre mesuré	Unité	Etendue de mesure	Précision	Résolution
Vitesse de l'air	m/s, km/h, nœuds, mph, ft- min	De 0.4 à 30 m/s (de 1.4 à 108 km/h)	≤ 20 m/s : ± 3 % F.S > 20 m/s : ± 4% F.S	0.1
Température (thermistance)	°C °F	0 à 50 °C		0.1
Température (thermocouple) type K	°C °F	-100 à 1300 °C	± (1 % rdg + 1°C)	0.1
Humidité relative	% HR	10 - 95 % HR	< 70% HR : ±4 %RH ≥ 70% HR : ±(4% rdg +1.2 % HR)	
Eclairement	Lux /Ft- Cd	0 – 20000 lux	± 5% rdg ± 8 dgt	1

4.2.3. Choix et identification des journées de mesure

Le choix de la journée type de l'hiver et de l'été pour le climat de la ville de Jijel a été effectué en se basant sur un traitement statistique des données météorologiques enregistrées sur une période de dix (10) ans successifs (**Tebbani 2018**). Ceci concerne principalement la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. La période hivernale touche les mois de Novembre, Décembre, Janvier et Février à compter du 2006 au 2015 et la période d'été couvre le mois de juin, juillet et aout (du 01 juin au 31 Aout) allant aussi du 2006 au 2015. Cette méthode consiste à :

- Calculer la moyenne décennale pour chaque paramètre dans le but de calculer l'écart type [Tableau 4.2 – Tableau 4.3]
- Calcul de l'écart type afin de calculer le coefficient de variation
- Recensement des données journalières pendant les périodes choisies afin de les faire comparer à ces moyennes.

En période hivernale deux journées ont été retenues, elles sont reproduites 03 fois :

- La journée du 16 février en 2007, 2010 et 2011
- La journée du 28 février pour les années 2006, 2013 et 2014.

D'après l'analyse climatique, le mois de Février est le plus venté en hiver

Tableau 4. 2: Ecart type de la température de l'air, humidité relative et la vitesse du vent – période d'hiver. Source : Station météorologique de Jijel. 2016

Année	Température °C	Humidité relative %	Vitesse du vent m/s	Coef. Variation du vent
2006	8,85	74	2,18	0,14
2007	8,625	78,5	2,08	0,14
2008	8,325	76,5	2,50	0,12
2009	9,1	75,875	2,90	0,10
2010	9,025	74,35	3,00	0,11
2011	9,1	78,975	2,35	0,13
2012	8,05	78,4	2,48	0,12
2013	8,45	75,85	2,85	0,11
2014	10,225	73,475	2,83	0,11
2015	8,8	78,25	2,38	0,13
Moyenne	8,85	76,41	2.50	0,12
Ecart type	0.56	1.93	0.30	-

Cette comparaison effectuée entre les valeurs horaires des différents paramètres physiques enregistrées pendant les 03 années [Figure 4.2- Figure 4.3 & Figure 4.4] a indiqué que la journée du 16 Février a présenté des températures confortables par rapport à la journée du 28 Février avec des vitesses qui n'accèdent pas les 6 m/s pour une période d'hiver. Ceci nous poussé à la considérer comme une journée type pour l'investigation en hiver.

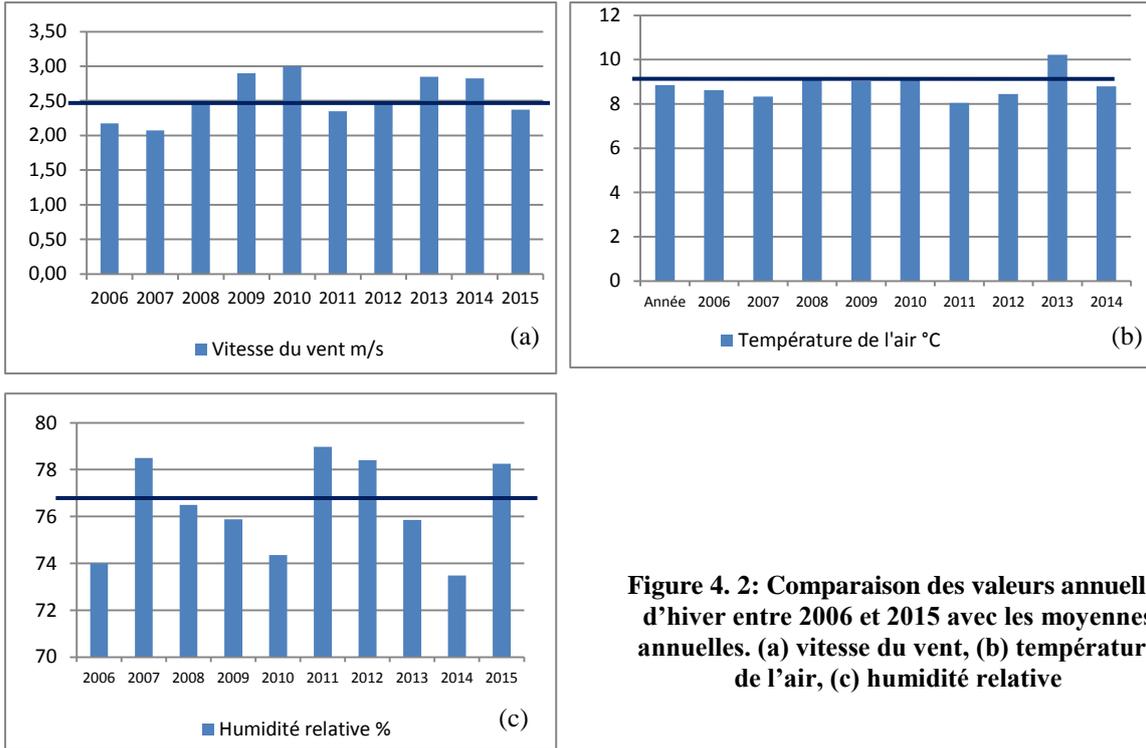


Figure 4. 2: Comparaison des valeurs annuelles d'hiver entre 2006 et 2015 avec les moyennes annuelles. (a) vitesse du vent, (b) température de l'air, (c) humidité relative

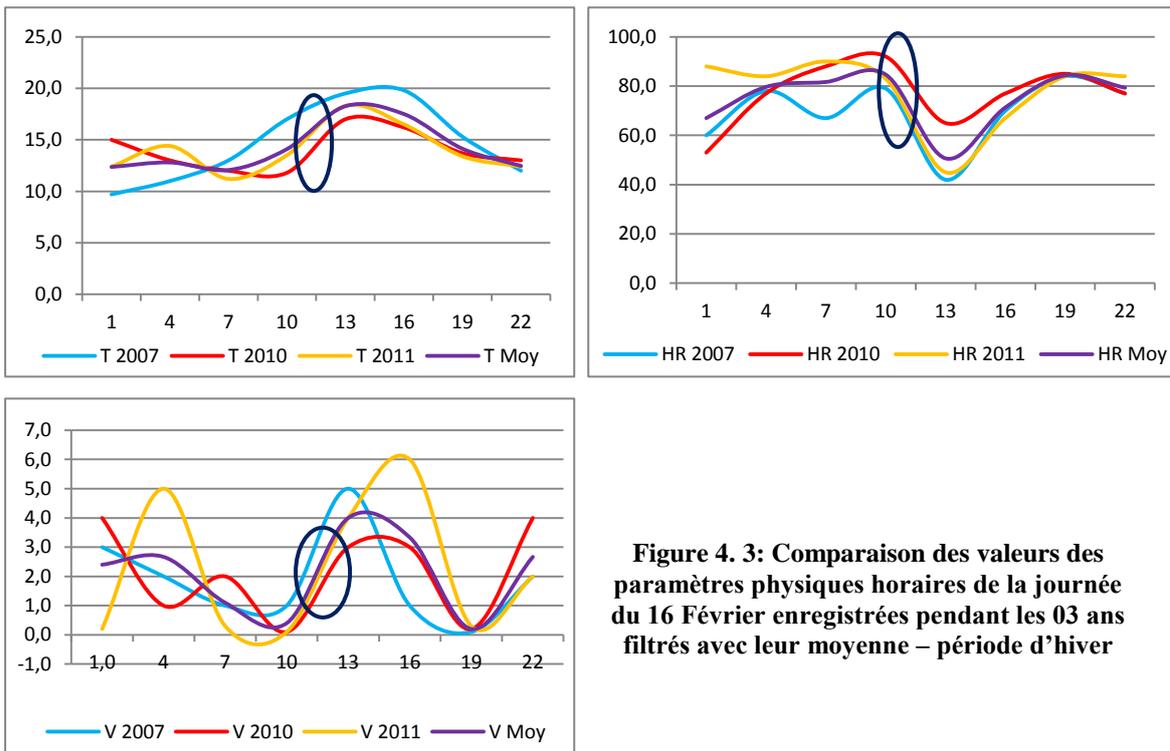


Figure 4. 3: Comparaison des valeurs des paramètres physiques horaires de la journée du 16 Février enregistrées pendant les 03 ans filtrés avec leur moyenne – période d'hiver

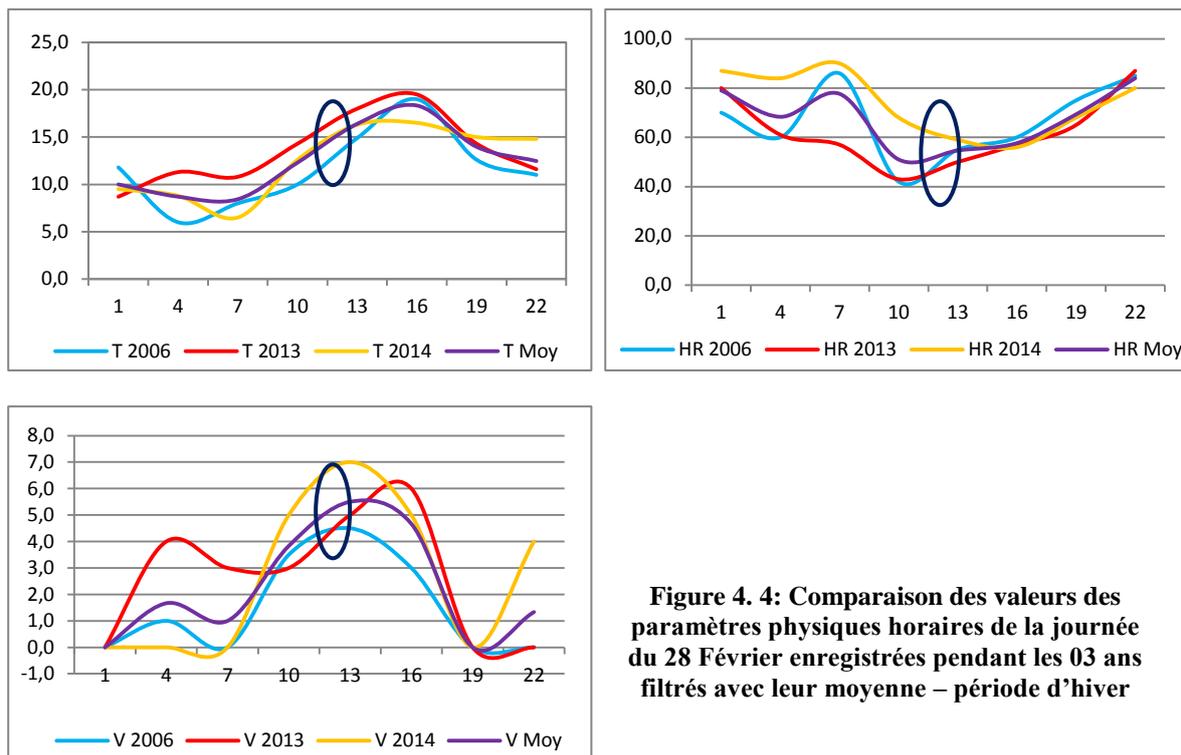


Figure 4. 4: Comparaison des valeurs des paramètres physiques horaires de la journée du 28 Février enregistrées pendant les 03 ans filtrés avec leur moyenne – période d’hiver

Tableau 4. 3: Ecart type de la température de l’air, humidité relative et la vitesse du vent – période chaude. Source : Station météorologique de Jijel, 2016

Année	Température °C	Humidité relative %	Vitesse du vent m/s	Coef. Variation du vent
2006	25,0	69,0	2,3	0,08
2007	24,9	72,7	2,3	0,08
2008	24,7	72,7	2,8	0,07
2009	23,9	72,9	2,7	0,07
2010	24,2	76,6	2,2	0,09
2011	25,0	72,2	2,3	0,08
2012	26,3	70,3	2,3	0,08
2013	23,8	74,3	2,5	0,08
2014	25,0	72,5	2,4	0,08
2015	25,8	71,0	2,2	0,09
Moyenne	24,9	72,4	2,4	0,08
Ecart type	0.74	1.99	0.19	-

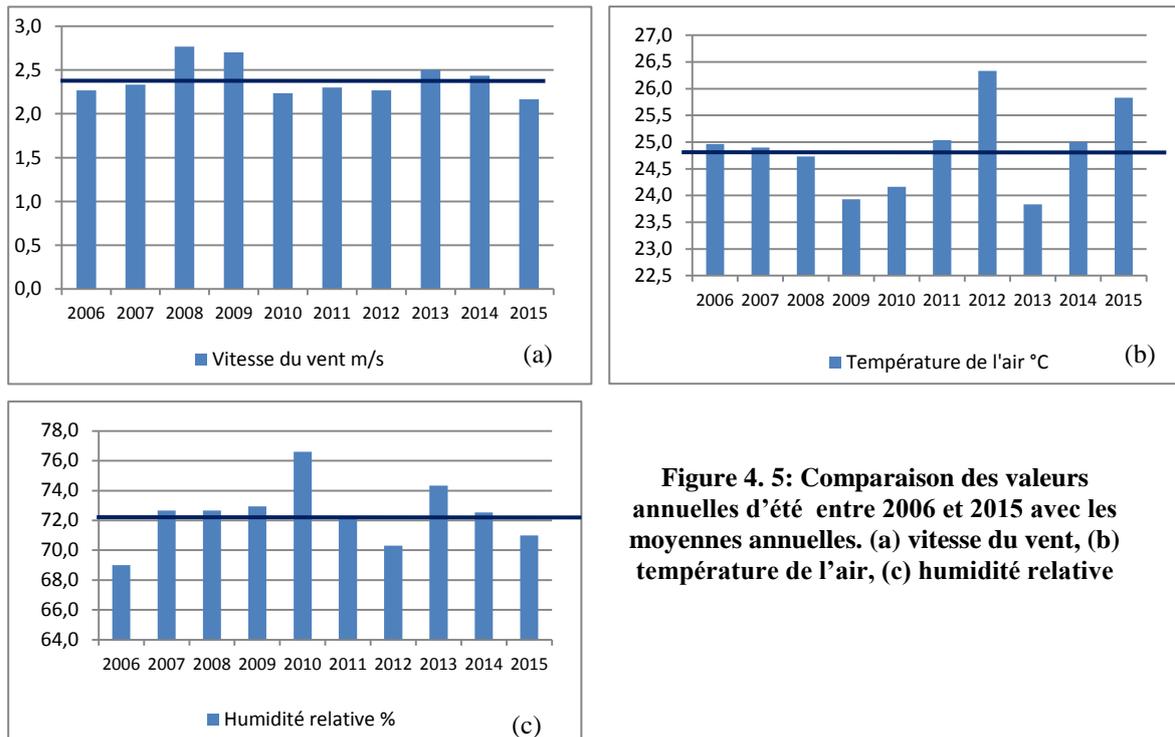


Figure 4. 5: Comparaison des valeurs annuelles d'été entre 2006 et 2015 avec les moyennes annuelles. (a) vitesse du vent, (b) température de l'air, (c) humidité relative

En période d'été deux journées ont été retenues, elles sont reproduites également 03 fois :

- La journée du 03 Juillet en 2009,2011 et 2015
- La journée du 28 Juillet pour les années 2010,2013 et 2014.

D'après l'analyse climatique, le mois de Juillet est le plus chaud en été.

La comparaison entre les valeurs horaires des différents paramètres physiques enregistrées pendant les 03 années [Figure 4.5- Figure 4.6 & Figure 4.7] a montré que la journée du 28 juillet présentée des températures confortables par rapport à la journée du 03 Juillet avec des vitesses rafraichissantes pour une période d'été. Ceci nous a poussé à la considérer comme une journée type pour l'investigation de la période d'été.

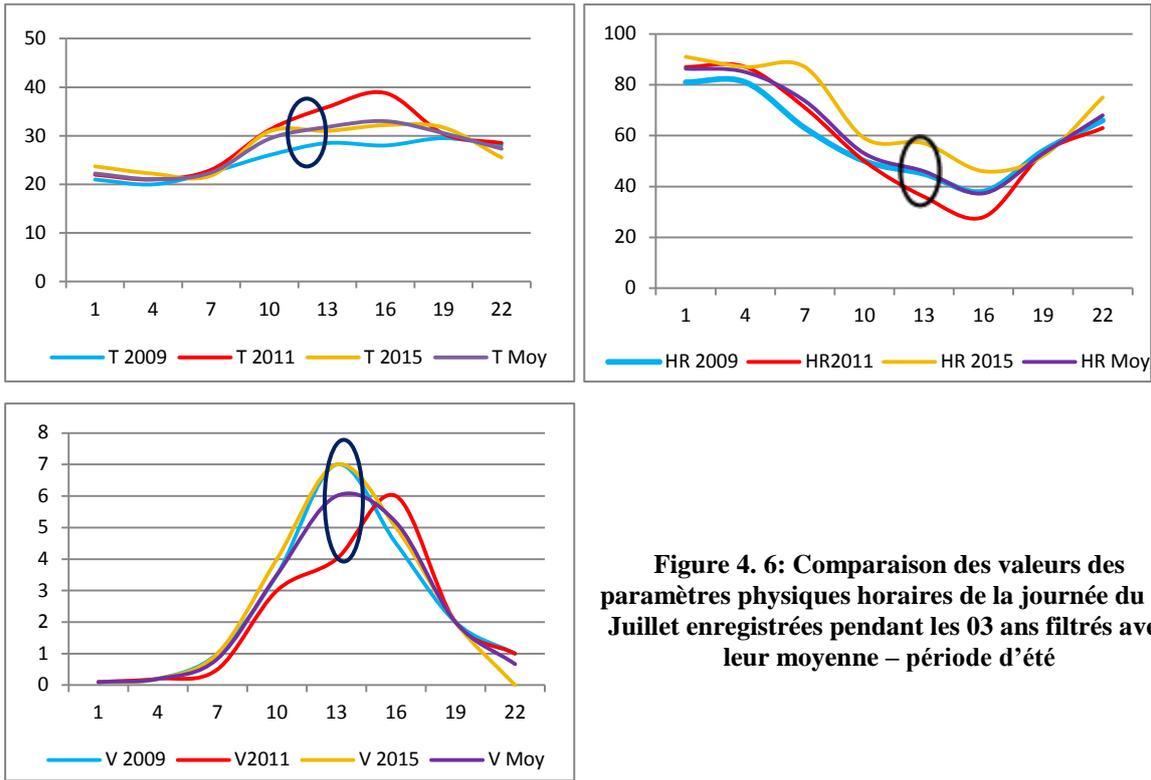


Figure 4. 6: Comparaison des valeurs des paramètres physiques horaires de la journée du 03 Juillet enregistrées pendant les 03 ans filtrés avec leur moyenne – période d’été

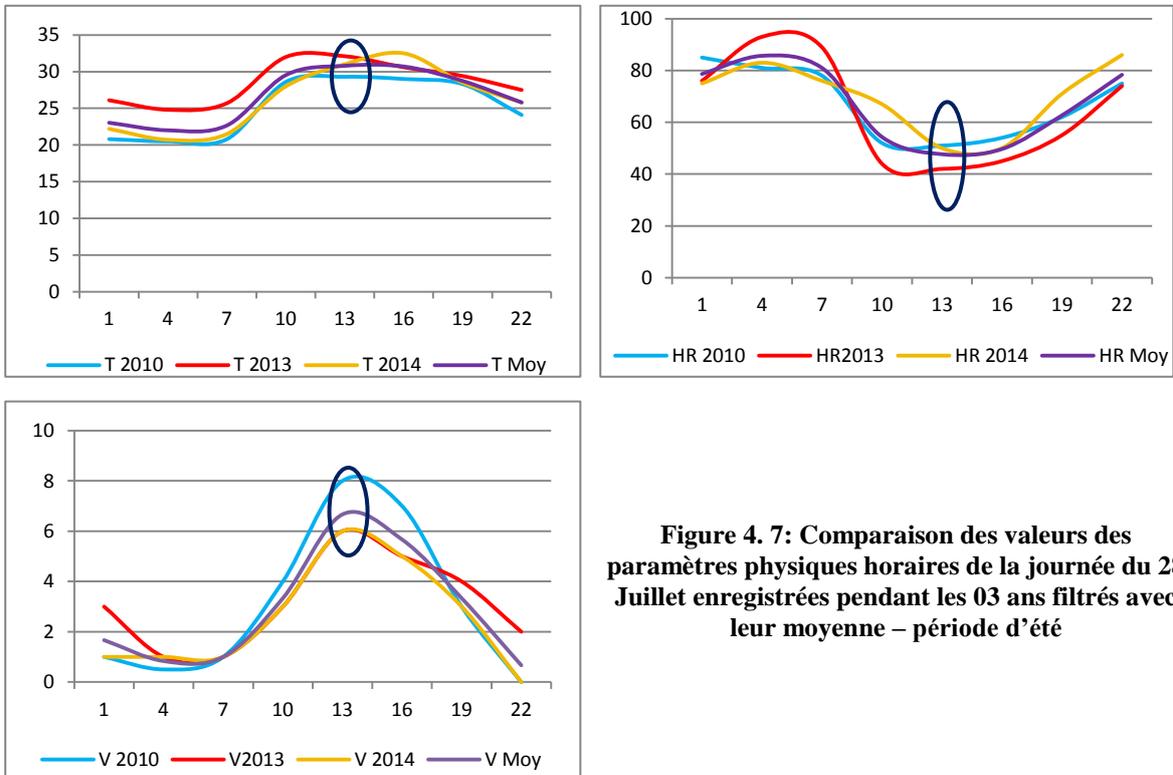


Figure 4. 7: Comparaison des valeurs des paramètres physiques horaires de la journée du 28 Juillet enregistrées pendant les 03 ans filtrés avec leur moyenne – période d’été

4.2.4. Choix des points de mesure

La difficulté de choisir un site représentatif pour les mesures climatiques en milieu urbain est bien connue de la recherche en climatologie urbaine (**Lee et Chandler, 1998**). Ceci sera résolu par la variation dans le choix des points de mesure. Pour notre cas, le choix et la répartition des points de mesure représentatifs seront dictés en fonction de plusieurs critères ; à savoir, caractéristiques géométriques de l'espace extérieur et le cadre bâti, orientation par rapport à la direction des vents dominants, la présence de la végétation ainsi que la présence des couloirs de ventilation et le degré de l'ouverture de l'espace [Figure 4.8]. En effet, le tableau 4.4 synthétise les indicateurs morphologiques et géométriques caractéristiques du mouvement de l'air dans l'espace urbain.

A ces fins, nous avons essayé de varier ces points sur le périmètre d'étude pour l'obtention d'un maximum d'effets microclimatiques. Le tableau 4.5 montre les différents points de mesure choisis.

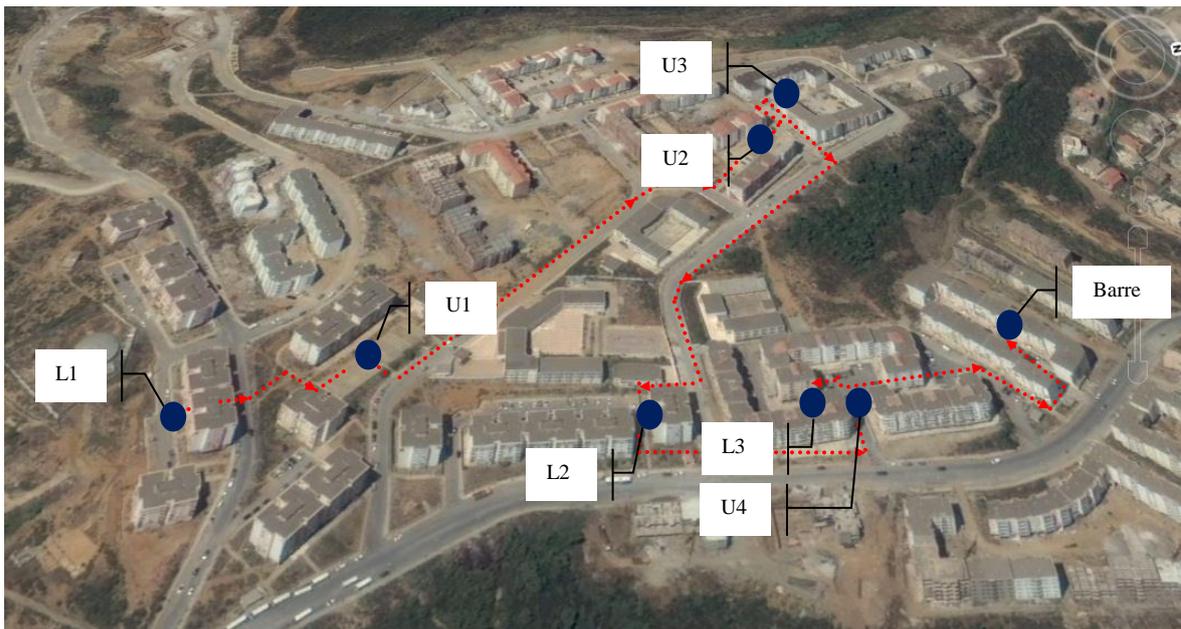


Figure 4. 8: Stations de mesures et parcours
Source: Google earth 2017

Tableau 4. 4: Indicateurs morphologiques et géométriques caractéristiques du mouvement de l'air dans l'espace urbain. Source : Belgacem 2015

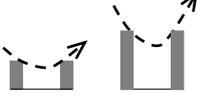
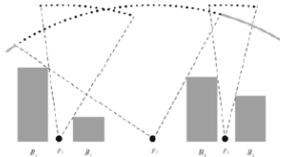
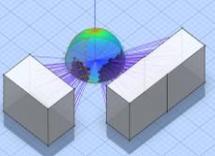
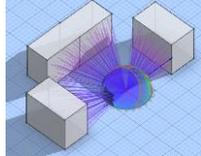
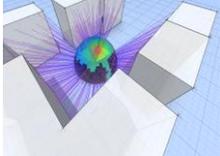
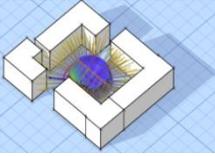
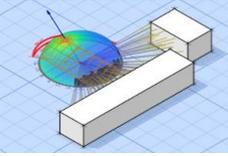
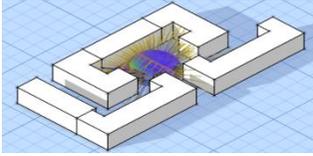
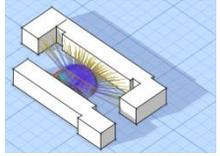
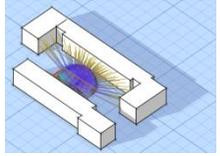
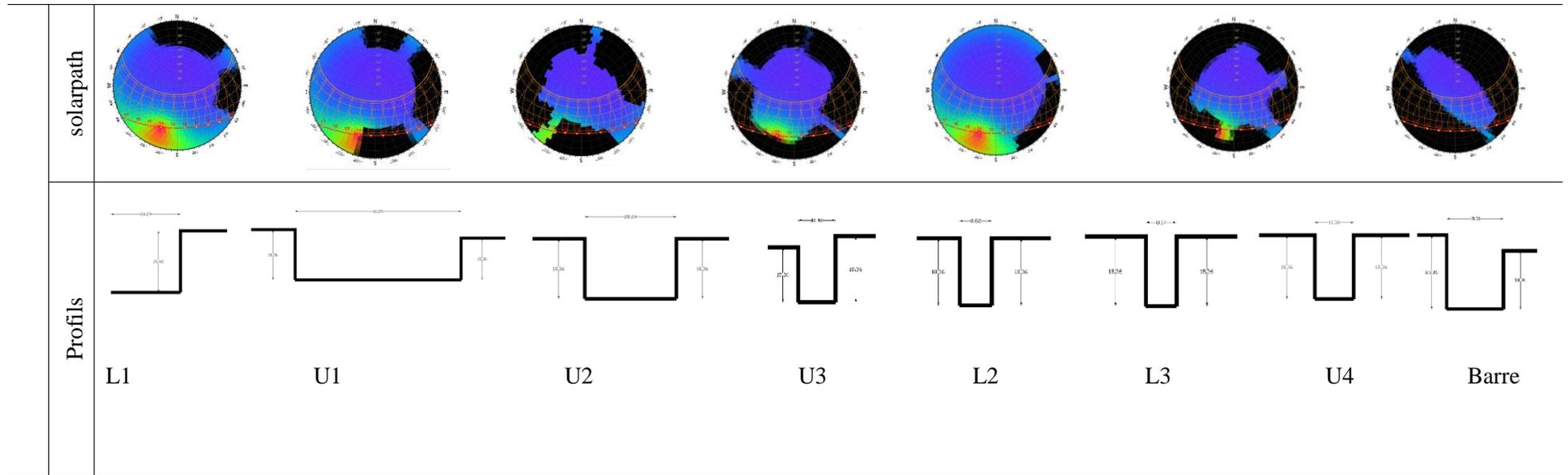
Indicateur	Formule	Influence sur le vent
<p>Le prospect équivalent de l'espace</p> <p>C'est le rapport entre la hauteur moyenne de l'espace et la largeur. Étant donné que l'espacement n'est pas parfaitement rectiligne, Ait Ameer 2002 propose de prendre en compte la largeur la plus petite.</p>	$Pe = \frac{Hm}{Lp}$ <p>Hm : hauteur moyenne de l'espace Lp : plus petite largeur des rues (wp)</p>	 <p>Modification du trajet et de la vitesse et l'apparition des mouvements tourbillonnaires au pied des constructions (Ait Ameer 2002).</p>
<p>Facteur de visibilité du ciel</p>	<p>C'est l'ouverture du ciel vue depuis un point. C'est un indice qui varie entre 0 et 1. Il atteint le 0 dans le cas d'une obstruction complète du ciel, et s'il vaut 1 l'observateur voit l'hémisphère céleste en entier.</p>	 <p>(Johansson 2012)</p>
<p>Densité du bâti</p> <p>C'est l'occupation des parcelles par le bâti</p>	$Ds = \sum_{i=1}^{i=n} Api / As$ <p>Api : surface de l'emprise au sol du bati As : surface du périmètre urbain considéré.</p>	<p>Les creux urbains peuvent être classés en deux catégories: creux urbains publics c'est l'ensemble des espaces ouverts au publics (rue, square, boulevard,...etc.), c'est-à-dire l'ensemble des espaces identifiés comme espaces publics urbains extérieurs; et creux urbains privés sont tout ce qui est cours et jardins privés distribués généralement en début ou en fond de parcelles dans les tissus anciens (Quartier), ainsi qu'autour des maisons de type isolées dans les tissus récents.</p>
<p>Rugosité absolue du tissu urbain</p> <p>C'est la hauteur globale du tissu tridimensionnel</p>	$Hm = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Ai * hi}{\sum_{i=1}^{i=n} Ai + \sum_{j=1}^{j=n} Aj}$ <p>Ai :surface hors œuvres du batiment i (emprise au sol) Aj : surface de l'espace extérieur j. Hi : hauteur du batiment i. (Adolphe 2001).</p>	<p>Les creux urbains peuvent être classés en deux catégories: creux urbains publics c'est l'ensemble des espaces ouverts au publics (rue, square, boulevard,...etc.), c'est-à-dire l'ensemble des espaces identifiés comme espaces publics urbains extérieurs; et creux urbains privés sont tout ce qui est cours et jardins privés distribués généralement en début ou en fond de parcelles dans les tissus anciens (Quartier), ainsi qu'autour des maisons de type isolées dans les tissus récents.</p>
<p>Porosité urbaine</p> <p>Contrôle le niveau de pénétration du vent dans l'entité urbaine. Elle fait référence au volume total d'air des creux urbains et leur rapport avec le volume de la canopée urbaine Ouameur 2007.</p>	$Po = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \pi * rhi^2 * Li}{\sum_{i=1}^{i=n} Vi + \sum_{j=1}^{j=n} Vj}$ <p>Li : longueur de l'espace ouvert i rhi : rayon hydraulique de l'espace ouvert i. Vj : volume moyen de l'espace bati j. Vi : volume moyen de la canopée au-dessus d'un espace ouvert i. (Adolphe 2001)</p> $rh = \frac{l * h}{l + h}$ <p>h :la hauteur de la canopée dans la rue considérée ; c'est la hauteur moyenne des batiments qui les bordent l :la largeur moyenne de la rue.</p>	<p>Contrôle le niveau de pénétration du vent dans l'entité urbaine. Elle fait référence au volume total d'air des creux urbains et leur rapport avec le volume de la canopée urbaine Ouameur 2007.</p>

Tableau 4. 5: Caractéristiques géométriques des points de mesure.
 Source : Photos (auteur), 3D : <http://andrewmarsh.com/software/shading-box-web/>

Cas d'étude									
Aspect géométrique des points de mesures									
	Point 1 : L1	Point 2 :U1	Point 3 :U2	Point 4 :U3	Point 5 : L2	Point 6 : L3	Point 7 : U4	Point 8 : barre	
Indicateurs géométriques	Plan								
	Photo								
	3D								
	H/w (Pe)	0.88	0.3	0.65	1.4	1.2	1.3	1.2	1.1
	SVF	0.8	0.7	0.5	0.5	0.4	0.2	0.4	0.3



4.2.5. Déroulement de l'investigation

Vu les objectifs de l'investigation, les relevés ont été réalisés durant les deux périodes d'hiver et d'été. Le choix des journées de mesures résulte de l'analyse climatique et bioclimatique de la ville de Jijel, des calculs statistiques effectués précédemment. Ce choix était aussi référencié à l'analyse climatique faite par le logiciel ecotect et weather tool (Chapitre III), qui nous a énormément aidé à identifier les jours critiques vis-à-vis du vent. Nous nous sommes rendu compte de l'importance de certains points pour le bon déroulement des campagnes de mesure, à savoir :

- L'investigation en période hivernale s'est déroulée pendant la journée du 16/02/2017 et la journée du 28/07/2016 pour la période d'été. Elle consiste en la prise des températures, de l'humidité relative et de la vitesse du vent au niveau du cas d'étude à une distance de 0.80 m au dessus du sol.
- Les mesures ont été effectuées uniquement pendant le jour, là ou il y en a une circulation des piétons, les heures de nuit sont écartées. Les mesures bi-horaires s'étalant donc entre 8h à 18h pour les deux périodes.
- Lors d'une analyse, les données collectées à la station de référence vont être comparées à celles in situ. Ces données de référence sont évaluées à une hauteur de 10 m par rapport au sol pour les mesures du vent, et à 0.80m pour la température de l'air et l'humidité relative.
- Pendant la période de mesures, les conditions météorologiques varient au cours de la journée notamment vis –à –vis les fluctuations du vent, et parfois ce changement se passe même au cours de la prise des mesures. Ceci était également conditionné par la disponibilité des instruments d'un côté, et par les conditions climatiques vis-à-vis du vent de l'autre côté. Les déplacements e font à travers le véhicule pour éviter les écarts entre les points de mesure.

4.3. Discussion des résultats de l'investigation

4.3.1. Evaluation de l'effet de la géométrie sur la température de l'air et l'humidité relative

4.3.1.1. Période froide

Sur le graphe de la figure 4.9, les températures mesurées en hiver sur ce cas d'étude sont supérieures pendant toute la journée que celles enregistrées à la station météorologique de référence. Il faut signaler que les écarts des températures de l'air entre

les différents points de mesure varient entre 0.1 – 2°C. De même, des écarts très importants ont été ressentis entre les températures de la station de référence et les points de mesures, qui varient entre 4.9 - 7.4 °C de 8h à 10h, entre 1.5 - 3.7 °C de 12h à 14h et un écart de 2.1 – 4.4 °C de 16h à 18h.

La température maximale relevée à la station météorologique est de 18°C à **12h**, alors que la maximale mesurée est de **21.7°C** enregistrée sur le profil barre à la même heure. Ce dernier profil se trouve entre deux rangées de bâtiments ayant des hauteurs différentes ($\Delta H = 7\text{m}$ dû à la topographie du site). En effet, cette variation dans les hauteurs verticales influence la température de l'air. **Yang et al. (2015)** ont vérifié l'impact de l'hétérogénéité de la hauteur des bâtiments et leur densité sur la température surfacique de la rue et l'albédo, et montrent que plus les bâtiments ont des hauteurs différentes et présentant un écart important dans les hauteurs, plus le rayonnement solaire absorbé est important.

Par ailleurs, les profils L1, U1 & U2 ont enregistré des valeurs moins élevées que le point précédent (successivement 21°C, 20.7°C & 20.7°C). Ces profils sont caractérisés par l'ouverture de l'espace [Figure 4.10] dont la plus importante sur le premier profil, et une largeur importante de l'espace, ce qui favorise évidemment l'exposition au soleil. **Kruger et al. (2011)** a indiqué que les espaces urbains dont la valeur du FVC est élevée, auront plus d'accès à la lumière et au soleil pendant l'hiver, et par conséquent plus de températures confortables.

Cependant, le profil U3 a enregistré la température minimale d'une valeur de 19.7 °C suivi par les profils L2, L3 & U4 dont les températures se rapprochent à U3 (successivement 20°C, 19.9°C & 20°C). Ces trois endroits ont un faible SVF ce qui a réduit l'ensoleillement et la pénétration des rayons solaires à l'intérieur et augmente l'inconfort dans ces endroits.

Concernant l'humidité relative, les profils tracés au niveau de ce cas d'étude sont inférieures à celui de la station météorologique de référence [Figure 4.9]. Les plus faibles valeurs d'humidité ont été enregistrées au profil barre à 12h d'une valeur de 45.6 %. Cela s'explique par l'absence de végétation et par l'effet minéral du sol. A partir de 12h, une augmentation ressentie des taux d'humidité avec un écart important entre la station météorologique et celui des différents profils, qui atteint environ 24 % à 16 h. Les valeurs correspondants aux taux élevés ont été enregistrées au niveau des profils U3, L2, L3 & U4 à

16h (51.2%, 50.5%, 51% & 51.3%). Ce site se situe à quelques mètres de la mer, et ces quatre derniers profils sont très exposés à la mer. Egalement, vers la fin de journée, les taux d'humidité ne cessent de s'augmenter notamment à l'emplacement de la barre d'une valeur de 63.8.

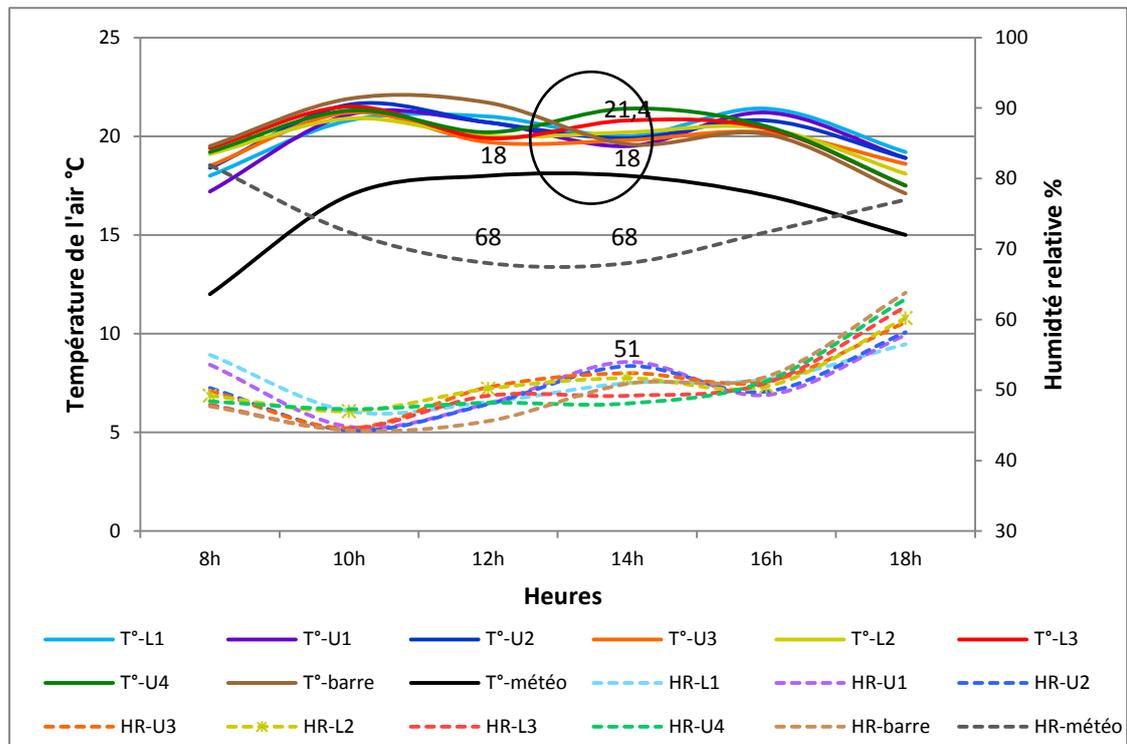


Figure 4. 9: Les mesures de la température de l'air et l'humidité relative – période froide
Source : auteur

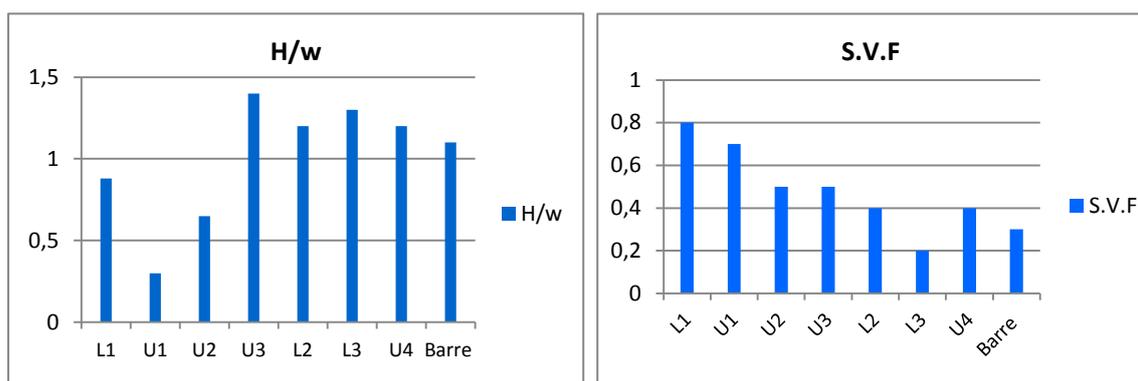


Figure 4. 10: Les indicateurs géométriques des différents points de mesure (H/w et SVF)
Source : auteur

4.3.1.2. Période chaude

En période chaude, le graphe des températures de l'air [Figure 4.11] montre qu'il existe un écart remarquable entre les différents points de mesure au cours de la journée qui atteint 4°C. La température maximale relevée à la station météorologique est de 32 °C à 12h, alors que celle maximale mesurée sur site est de 36°C enregistrée au niveau du profil U3 à la même heure ($\Delta T = 4^\circ\text{C}$), suivie par les profils U4, P8 (barre), L3 & L2 dont les valeurs sont successivement 35.3°C, 35°C, 34.7°C, 34.2°C. Il est important de noter ici qu'à cette heure, le vent se manifeste par de faibles vitesses. L'accès du rayonnement solaire dans ces espaces s'est réduit suivant le rapport H/w (Andreou 2014).

Par ailleurs, les profils L1 & U1 ont enregistré les valeurs les plus faibles (successivement 32 °C et 32.5 °C). Malgré le taux d'ouverture au ciel, ces endroits se trouvent sur une haute altitude face à la provenance du vent, ce qui favorise la ventilation et par conséquent la réduction de la température et l'augmentation du taux d'humidité relative (44% au profil L1). Aussi, il est nécessaire de signaler que ce site adjacent à la mer, le taux d'humidité devient considérable, car le taux le plus élevé est d'une valeur de 46 % remarqué au niveau des profils L3 & la barre.

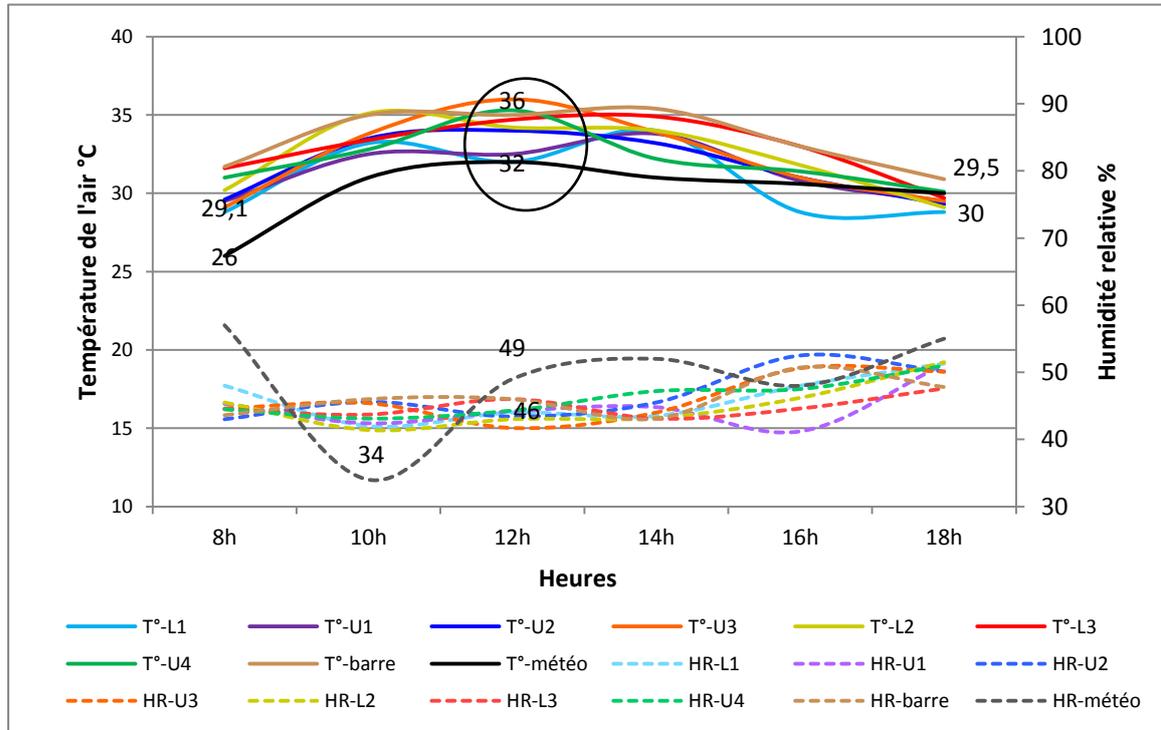


Figure 4. 11: Les mesures de la température de l'air et l'humidité relative – période chaude
Source : auteur

4.3.2. Evaluation de l'effet de la géométrie sur la vitesse du vent

4.3.2.1. Période froide

Ce cas d'étude se situe très proche de la mer sur une altitude comprise entre 60 à 110 m. En effet, l'effet d'altitude sur la vitesse du vent n'a été ressenti que vers la fin de journée. Au fait, les vitesses du vent mesurées varient entre 1 -3 sur l'échelle de Beaufort et n'ont pas dépassé le seuil de gêne dû au vent admis à 5m/s dans l'espace urbain. La valeur la plus élevée est de 3 m/s enregistrée à 14h au niveau du profil L1. L'allure des vitesses du vent tracé sur le graphe [Figure 4.12] indique que les vitesses du vent s'évaluent dans une plage normale jusqu'à 16h et à partir duquel elles s'augmentent à nouveau en atteignant 2m/s.

Elle montre aussi selon le comportement de vent, qu'il y a de même des zones calmes, des zones protégées et d'autres exposées. En effet, cette variation du comportement est peut être dû au facteur de la géométrie que porte l'espace extérieur (les espacements entre les bâtiments) et le cadre bâti. Théoriquement, le type d'écoulement dans les différents profils varie entre écoulement rasant dans les profils U3, L2, L3, U4 et barre ($H/w > 0.7$), et écoulement à interférence de sillage dans les profils L1, U1 et U2 ($0.3 < H/w < 0.7$).

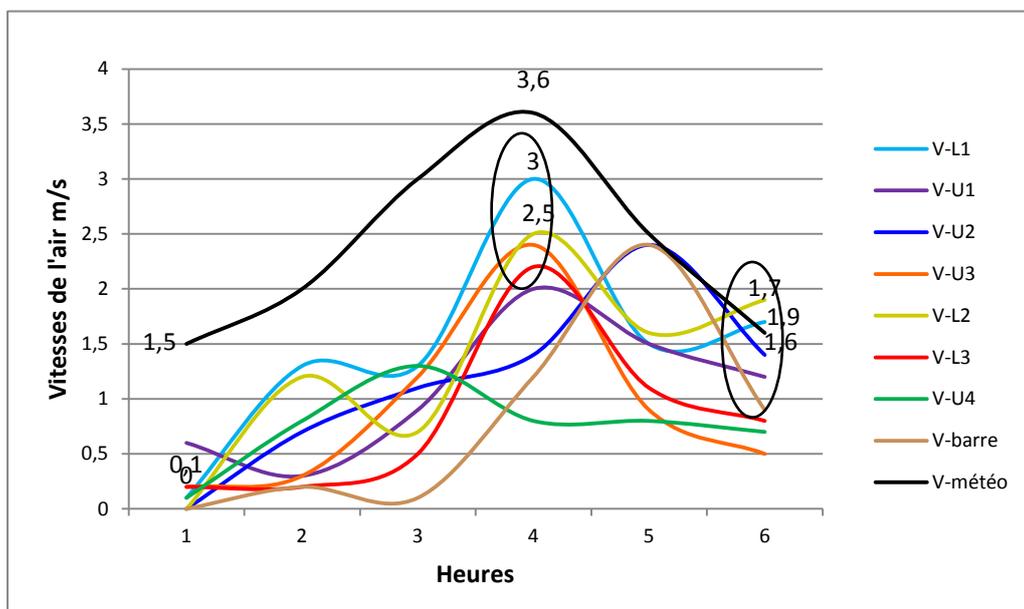


Figure 4. 12: Vitesses du vent mesurées – période froide

Le profil L1 est caractérisé par un large espacement entre bâtiments produisant ainsi un prospect équivalent à 0.35, ce qui a donné des vitesses du vent importantes sur ce profil, notamment celle maximale de 3m/s à 14h [Figure 4.13]. Ce lieu est également affecté d'un effet de trou représenté par un passage couvert sous les bâtiments. Ce trou provoque l'accélération de la vitesse du vent en favorisant une ventilation transversale. Les profils U1, U2 ont enregistré successivement des valeurs de 2.2 m/s, 2 m/s à 14h. Ces profils présentent des espacements aussi importants entre bâtiments [Figure 4.13], la largeur de l'espace extérieur est beaucoup plus supérieure à la hauteur des bâtiments.

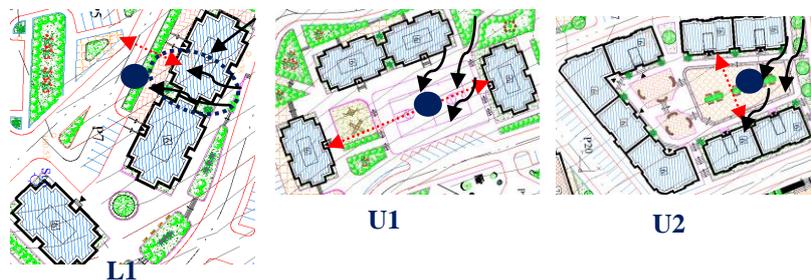


Figure 4. 13: Mouvement de vent sur les profils L1, U1 et U2
Source : auteur

Par ailleurs, des valeurs de 2.5m/s et 2.4 m/s ont été enregistrées successivement au niveau des profils L2 & U3. La géométrie du cadre bâti aux alentours de ces profils (configuration en L et U) est marquée également par un écartement réduit engendrant des vitesses du vent importantes [Figure 4.14]. Ces profils sont affectés d'un effet de canalisation dû à la situation en couloirs entre bâtiments ce qui a favorisé la canalisation de l'écoulement du vent.

La configuration des bâtiments en L et U dans les profils L3, U4 et parallèle dans le profil barre a créé des petits espacements produisant des prospects élevés (successivement H/w est de 1.3, 1.2 & 1.1 dans les profils L3, U4 et barre) dans lesquels des valeurs de 2.2 m/s, 0.8m/s et 1.2 m/s ont été enregistrées successivement à 14h. La disposition des bâtiments a créé un effet de protection dû à la géométrie du groupement, notamment au profil U4, puisque l'espacement entre bâtiments est inférieur à la hauteur ($H=18.36$, $w=14$, $w<H$), ce qui a atténué la vitesse du vent, et a rendu cet endroit protégé [Figure 4.14]. Cependant, au profil barre, la disposition parallèle des bâtiments en rangées a créé un effet de protection renforcé par la réduction de l'espacement et la topographie du terrain.

Aussi, le type d'écoulement dans les différents profils varie entre écoulement rasant dans les profils U3, L2, L3, U4 et barre ($H/w > 0.7$), et écoulement à interférence de sillage dans les profils L1, U1 et U2 ($0.3 < H/w < 0.7$).

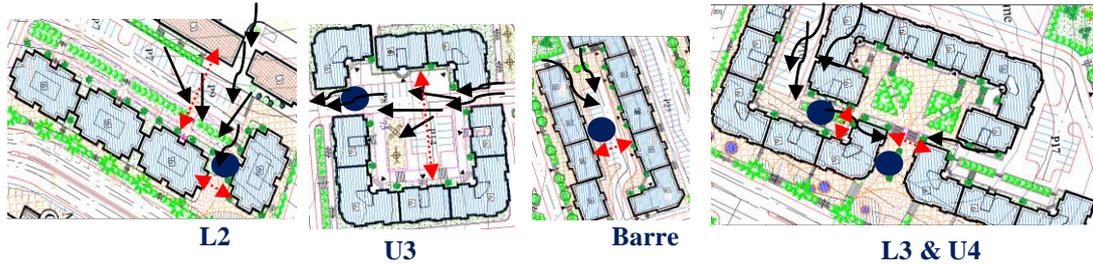


Figure 4. 14: Mouvement de vent sur les profils L2, U3, barre, L3 et U4
Source : auteur

Il convient de remarquer ici que tout les profils de mesures dans ce cas d'étude présentent une zone d'ombre du vent "wind shadowing" (Chapitre II). Dans les profils L1, U1, U2, U3, L2, L3, U4, c'est la longueur des rangées des bâtiments qui a déterminé la profondeur de la zone d'ombre du vent puisque la largeur est identique [Figure 4.15]. La longueur de l'ombre est de $3A$ dans ces profils et de $2A$ dans le profil barre. De ce fait, la réduction de la vitesse de vent par ces bâtiments se prolonge à une distance considérable en arrière vent, chose qui a été remarquée dans les profils indiqués.

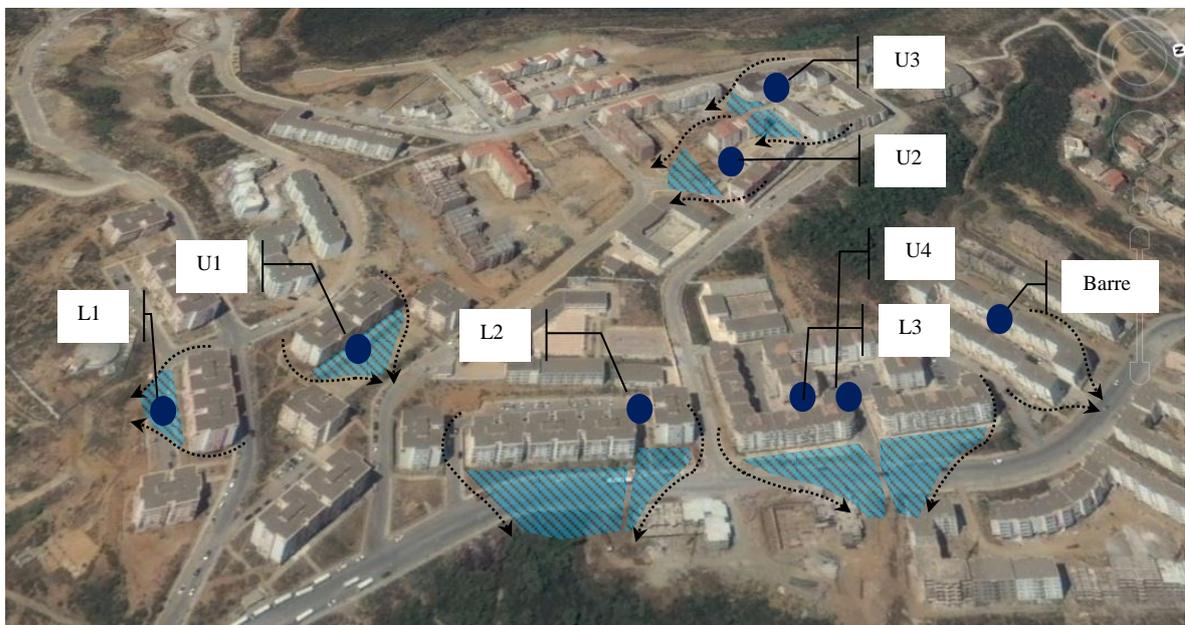


Figure 4. 15: Wind shadowing en hiver /orientation N-O.
Source: auteur

4.3.2.2. Période chaude

Dans la figure 4.16, le graphe indique deux phases distinctes, une première phase de 8h à 12h où il y avait une baisse des vitesses du vent, et une seconde de 12h à 18h dans laquelle les vitesses du vent s'évaluent vers 5m/s [Figure 4.17]. On rappelle que le vent avait une direction provenant du Nord Est durant toute la journée. Là l'effet de l'altitude et la mer a été ressentie notamment l'après midi avec une augmentation des vitesses du vent remarquable dans pratiquement tous les points de mesure.

En plus de la direction, les fluctuations du vent peuvent être justifiées par la géométrie qui a donné naissance théoriquement aux deux types d'écoulement rasant dans les points U3, L3 et barre, et à interférence de sillage dans les points L1 et U1. Toutefois, cette règle ne s'applique pas sur les profils U2, L2 et U4 du moment que le profil U2 était mal ventilé vu sa situation en zone d'ombre du vent, et les deux autres par contre bien ventilés et sont situés face à la provenance du vent.

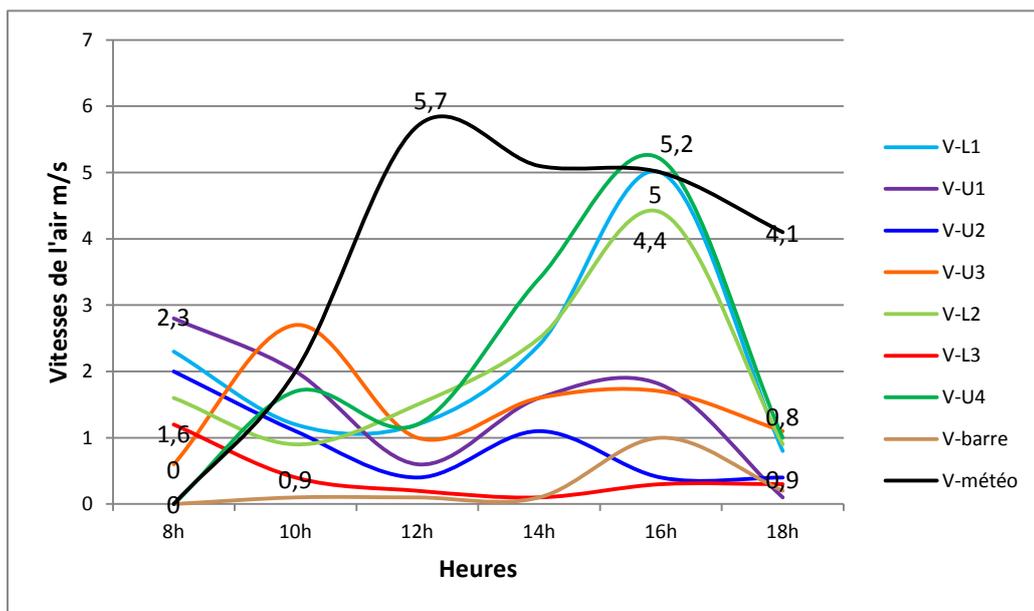


Figure 4. 16: Vitesses du vent mesurées – période chaude
Source : auteur

En effet, les profils L1, L2 et U4 sont affectés d'une bonne ventilation avec des valeurs successivement de 2.4 m/s, 3.4 m/s et 2.5 m/s à 14H. Selon **Al-Sallal Khaled et al. (2012)**, les vitesses du vent sont importantes dans les rues larges et vont augmenter dans les espaces ouverts tels que le cas du profil L1. Cependant, cet écartement doit être évalué en combinaison avec l'incidence [Figure 4.17]. En effet, l'orientation du bâti par rapport à

la direction du vent est au même titre déterminant, puisqu'elle conduit à l'amplification ou la diminution du taux d'infiltration. Ceci s'applique sur les profils U4 et L2 qui se trouvent face à la provenance du vent et sont affecté d'un effet de coin.

De l'autre côté, les profils U1 et U3 ont enregistré des valeurs moyennes de 1.6 m/s à 14H. Le profil U3 se trouve dans la zone d'ombre du vent. Par ailleurs, les profils U2, L3 et barre ont enregistré des vitesses faibles soit 0.4m/s, 0.3 m/s et 1 m/s, créant ainsi des zones mal ventilées. Ils appartiennent à la zone d'ombre du vent créée par les bâtiments ; La disposition spatiale des bâtiments et la géométrie en combinaison avec l'incidence du vent dominant en été ont créé des espaces protégés mal ventilés.



Figure 4. 17: Mouvement du vent sur les différents points de mesure
Source : auteur

4.3.3. Relation entre les paramètres climatiques mesurés et les indicateurs géométriques à travers la méthode statistique

Afin de vérifier le croisement entre les données mesurées (température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent) et les indicateurs géométriques des différents points de mesure (profil H/w, et le SVF), nous avons effectué une analyse statistique de ces données. Elle consiste à faire une analyse graphique sous forme de diagrammes de nuage de points et d'établir la relation entre ces données. Les variables dans ce cas sont les indicateurs géométriques comme variable des X et les écarts entre les données de la station météo et les données mesurées des paramètres climatiques comme variable des Y.

Il s'agit donc d'évaluer l'influence de la variable X sur la variable Y. En d'autres termes, pour chaque paramètre climatique mesuré, nous avons d'abord élaboré une analyse graphique de sa relation par rapport aux deux indicateurs géométriques. Ensuite, des tests

de corrélation de Pearson ont été développés pour examiner la force et l'intensité des liaisons et caractériser leur signification. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel Excel.

La lecture des graphes de nuage des points [Figure 4.18 & 4.19] indique que la liaison de la vitesse du vent avec H/w est non linéaire monotone et négative pour les deux périodes. La liaison entre la vitesse du vent et le SVF est aussi non linéaire monotone et positive. En ce qui est des graphes de nuage des points relatifs à la température de l'air [Figure 4.20 & 4.21], la disposition des points ne donne aucune indication sur la liaison entre la température de l'air et les deux indicateurs en hiver. Par contre, la liaison entre la température de l'air et le H/w est linéaire et positive, et présente une liaison linéaire négative avec le SVF.

Par ailleurs, l'observation des diagrammes de nuage des points [Figure 4.22 & 4.23] relatifs à l'humidité relative révèle que la distribution des points montre l'absence de toute liaison entre les deux variables, les valeurs de H/w et le SVF ne donnent aucune indication sur la valeur de HR pour les deux saisons.

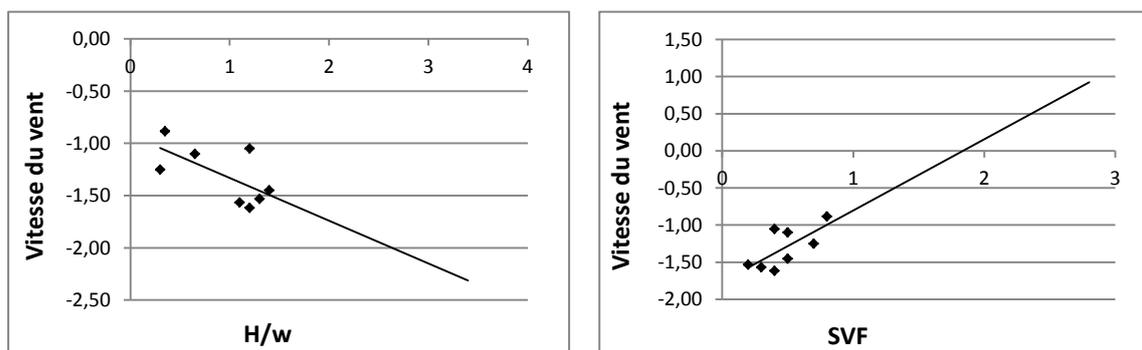


Figure 4. 18: Analyse graphique de la relation entre la vitesse de vent et les indicateurs – hiver

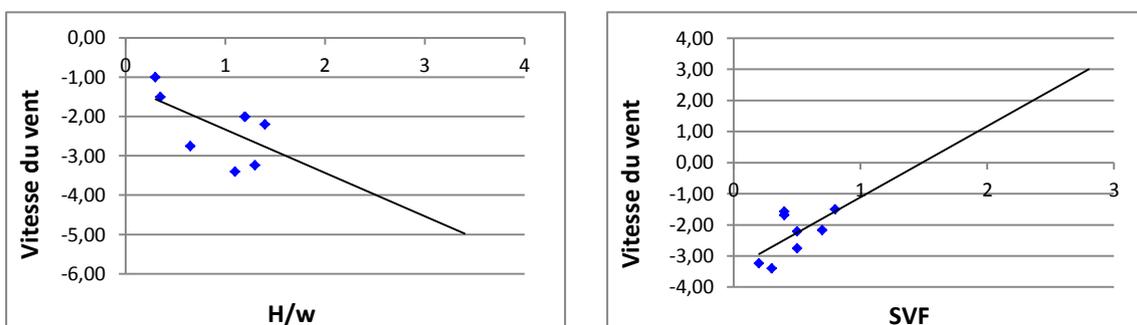


Figure 4. 19: Analyse graphique de la relation entre la vitesse de vent et les indicateurs – été

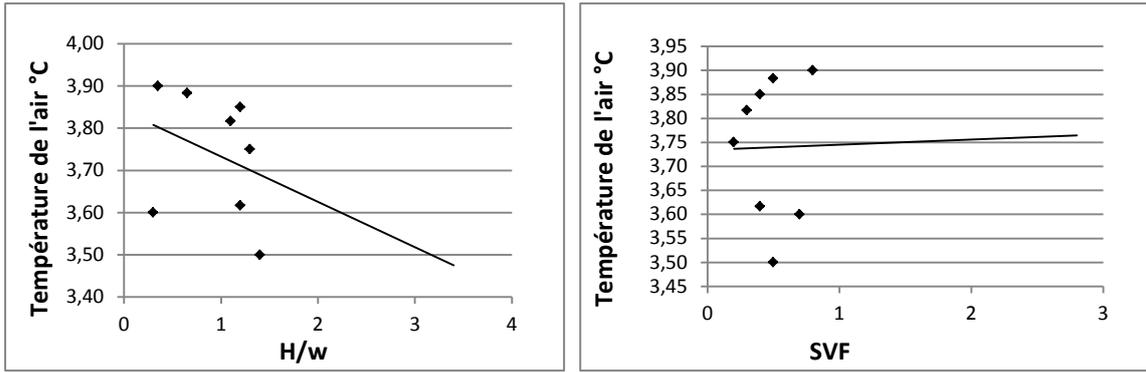


Figure 4. 20: Analyse graphique de la relation entre la température de l'air et les indicateurs – hiver

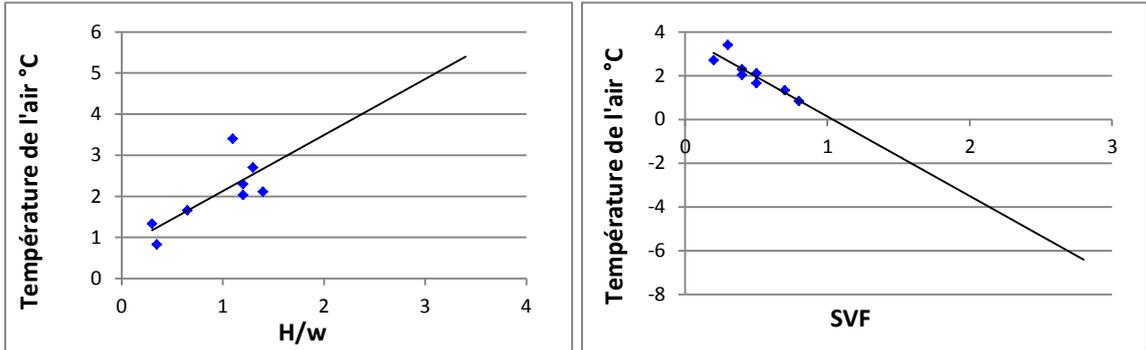


Figure 4. 21: Analyse graphique de la relation entre la température de l'air et les indicateurs – été

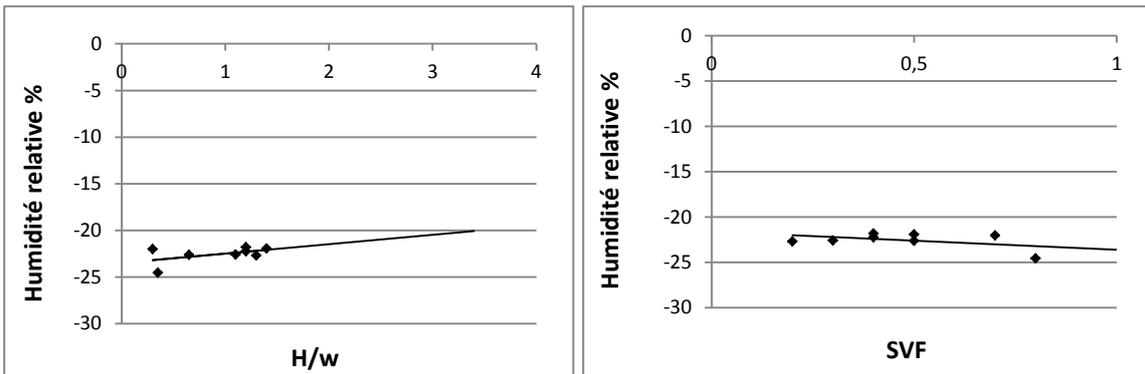


Figure 4. 22: Analyse graphique de la relation entre l'humidité relative et les indicateurs – hiver

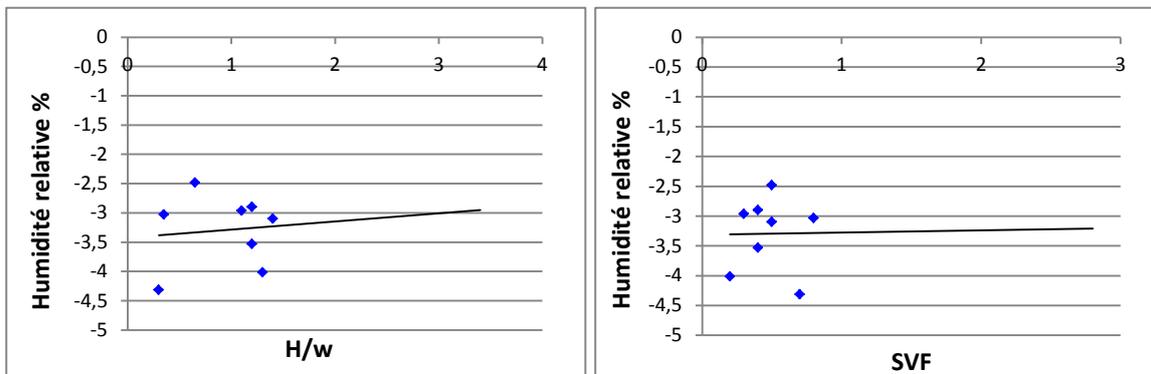


Figure 4. 23: Analyse graphique de la relation entre l'humidité relative et les indicateurs – été

Ensuite, des tests de corrélation ont été calculés en utilisant le coefficient de corrélation, afin de caractériser les relations entre les différentes variables. En effet, et d'une manière générale, le coefficient de corrélation " r " donne une mesure de l'intensité et du sens de la relation linéaire entre deux variables. Il est compris entre -1 et 1. Plus le coefficient est proche de 1, plus la relation linéaire positive entre les variables est forte. Dans le cas où il est proche de -1, la relation linéaire négative entre les variables est forte. Ou alors si le coefficient est proche de 0, la relation entre les variables devient faible.

Le plus connu c'est le coefficient de corrélation de Pearson, utilisé pour analyser les relations ayant une distribution dissymétrique des variables. D'après le tableau 4.6, le coefficient de corrélation de Pearson montre une liaison linéaire.

Tableau 4. 6: Test de corrélation de Pearson calculé par Excel

Variables	Période froide		Période chaude	
	H/w	SVF	H/w	SVF
Temp. de l'air	-0.315	0.014	0.747	-0.901
Vitesse de l'air	-0.753	0.793	-0.584	0.610
Humidité relative	0.508	-0.456	0.099	0.011

Selon le tableau 4.6, il existe une relation positive forte entre la température de l'air et H/w avec $r = 0.747$, et une relation négative très forte entre la température et SVF en période chaude. Par ailleurs, on remarque qu'il y a une relation négative forte entre la vitesse du vent et H/w ($r = -0.653$) et une relation positive forte avec SVF mais en période froide.

Cela signifie que la relation entre la température et H/w produit une corrélation positive forte dans laquelle la température élevée est associée à une valeur H/w élevée. Par ailleurs, la relation entre la température et SVF crée une corrélation négative très forte dans laquelle la température élevée est associée à une valeur de SVF basse et inversement. En ce qui est des vitesses du vent, la relation entre la vitesse du vent et H/w crée une corrélation négative forte. Ce qui signifie que les vitesses s'augmentent quand H/w se réduit et inversement. Par contre la corrélation entre les vitesses et SVF est positive et forte et que l'augmentation de la vitesse s'associe avec l'augmentation du SVF et vice versa.

4.3.4. Synthèse

L'analyse des résultats obtenus de l'investigation nous a permis d'identifier les variations microclimatiques pour les deux périodes d'hiver et d'été, en termes de température de l'air, de l'humidité relative et de vitesse du vent. En ces périodes, nous tenons également à évaluer le comportement du vent dans les espaces extérieurs et ses fluctuations, et d'estimer le degré de gêne des usagers liés aux effets aérodynamiques dans ces espaces.

Une lecture globale des résultats a permis de développer ce qui suit :

- En hiver les températures sont situées dans l'intervalle de 17.1°C et 21.7°C, et les humidités varient entre 44.3% et 63.8%. La valeur minimale de la vitesse enregistrée est de 0.1 m/s et la maximale n'accède pas 3 m/s. En été par contre, la température maximale de 36°C et une minimale de 28.8°C. Les humidités relatives varient entre 41.46% et 52.5%. Les vitesses du vent ont une limite maximale de 5.2 m/s et l'autre minimale de 0.1 m/s. Ces constats ont permis de ressortir que les températures et des vitesses du vent sont confortables en hiver et frais et ventilé en été vu son rapprochement à la mer.
- En termes de géométrie de l'espace extérieur, il présente une variété des profils en fonction de la disposition des bâtiments. Ces géométries ont conditionné le niveau de perméabilité, de porosité, de pénétration ou de déviation de vent. Ce sont donc les espacements existants entre bâtiments qui sont responsable du degré de ventilation, d'abri ou d'exposition. Ceci était remarquable pratiquement dans les profils ayant la géométrie en U, L pour les deux périodes et qui nécessitent des corrections notamment en été.
- Le paramètre géométrique principal qui a un impact sur la ventilation urbaine est le prospect H/w. En effet, l'écartement entre bâtiments doit être évalué en combinaison avec l'incidence du vent. De même, l'effet de la topographie est aussi non négligeable puisqu'elle conduit à l'amplification ou à la réduction d'écoulement d'air dans l'espace urbain extérieur.
- Par ailleurs, une vérification du croisement des différents paramètres climatiques avec ceux géométriques a été effectuée par le biais d'une analyse statistique. La corrélation indique la relation linéaire entre la température de l'air et H/w et SVF, et entre la vitesse du vent et SVF. La relation non linéaire est obtenue entre la

vitesse du vent et H/w. En ce qui est de l'humidité relative la corrélation n'a montré aucune relation. Cela vient donc confirmer l'interaction entre les paramètres géométriques et climatiques.

A partir de ces conclusions, on peut dire que la géométrie de l'espace extérieur a un impact sur le comportement du vent. Pour vérifier ces résultats et d'autres modifications, une simulation numérique s'avère nécessaire.

Tableau 4. 7: Degré de ventilation sur les différentes géométries
Source : auteur

		Hiver	Été	Géométrie
Profil et degré de ventilation	L1	Exposé	Très ventilé	
	U1	Exposé mais au confort	Ventilé	
	U2	Exposé mais au confort	ventilé	
	U3	Exposé mais au confort	Ventilé	
	L2	Exposé	Très ventilé	
	L3	Exposé	Mal ventilé	
	U4	Exposé	Très ventilé	
	Barre	En abri	Mal ventilé	

4.4. Simulation numérique

4.4.1. Présentation du logiciel de simulation

Le logiciel ENVI-met V4.3.0 est un outil informatique qui sert à la modélisation numérique en micro-échelle des interactions atmosphériques influant sur le microclimat urbain. C'est un modèle microclimatique en trois dimensions qui permet la simulation des interactions entre surface, plan et atmosphère. Il est composé de quatre principaux systèmes : sol, végétation, atmosphère et bâtiment. Ce logiciel sert à calculer :

- La température surfacique et la température de mur pour chaque élément de façade et de toit soutenant jusqu'à 3 couches de matériaux et de 7 points de calcul dans le mur/toit.
- La transpiration, l'évaporation et la chaleur sensible provenant de la végétation avec évaluation complète de tous les paramètres physiques propres aux plantes, à travers la des modèles en 3D de la végétation des différentes espèces.
- L'écoulement du vent autour des structures urbaines.
- Le rayonnement des courtes et longues ondes, l'ombre et la réflexion et la radiation dissipée depuis les bâtiments et la végétation.
- Les effets des dispositifs écologiques (façades vertes, murs vivants, éléments de l'eau)
- L'accès du soleil (ombrage au sol et façades)
- La dispersion des polluants atmosphériques, des gaz et des particules.
- L'eau et échange de chaleur à l'intérieur du sol.
- Les indices de confort thermique tels que la température radiante moyenne, PMV/PPD.

4.4.2. Structure du logiciel

Le logiciel ENVI-met V4.3.0 est composé d'interfaces différentes, chacune étant nécessaire à la composition d'une partie de la simulation ou à la sortie de données. La structure du logiciel voit en fait trois composantes principales qui vont converger dans l'interface qui effectue la simulation réelle en appliquant les modèles de calcul [Figure 4.24]. Ce sont donc les entrées (inputs), il s'agit des données nécessaires introduites avec un niveau de définition minimum et qui servent à déterminer le model [Figure 4.25]. Ceci concerne tout d'abord la création du projet et détermine son emplacement (Workspace),

ensuite la création du fichier du dessin (ENVI-met Spaces .INX) et le fichier de configuration (ConfigWizard .SIM).

Les principaux paramètres d'entrée pour une simulation ENVI-met V4.3.0 comprennent : les données météorologiques, les profils d'humidité et de température initiale du sol, les structures et les propriétés des surfaces de sol, de la végétation et des bâtiments. Le modèle incorpore également la fonction « forçage simple » permettant de simuler différentes conditions météorologiques en forçant le modèle avec un profil de météo défini par l'utilisateur à un intervalle horaire. Les variables météorologiques personnalisables incluent le rayonnement solaire direct et diffus incident, le rayonnement de grande longueur d'onde vers le bas, la concentration de fond de particules/gaz, ainsi que des profils verticaux (en 1D) des paramètres atmosphériques (tels que la température de l'air, humidité spécifique, la vitesse du vent et sa direction).

En ce qui est des sorties (output), ENVI-met V4.3.0 génère beaucoup de résultats qui sont enregistrés dans des répertoires selon les paramètres bien définis. Certains sont des fichiers texte lisibles et importés dans les programmes de tableur nécessaires à l'analyse, tandis que d'autres sous forme de cartes, ne sont lisibles que par le logiciel de visualisation associé à l'ENVI-met V4.3.0 qui est Leonardo 2014.

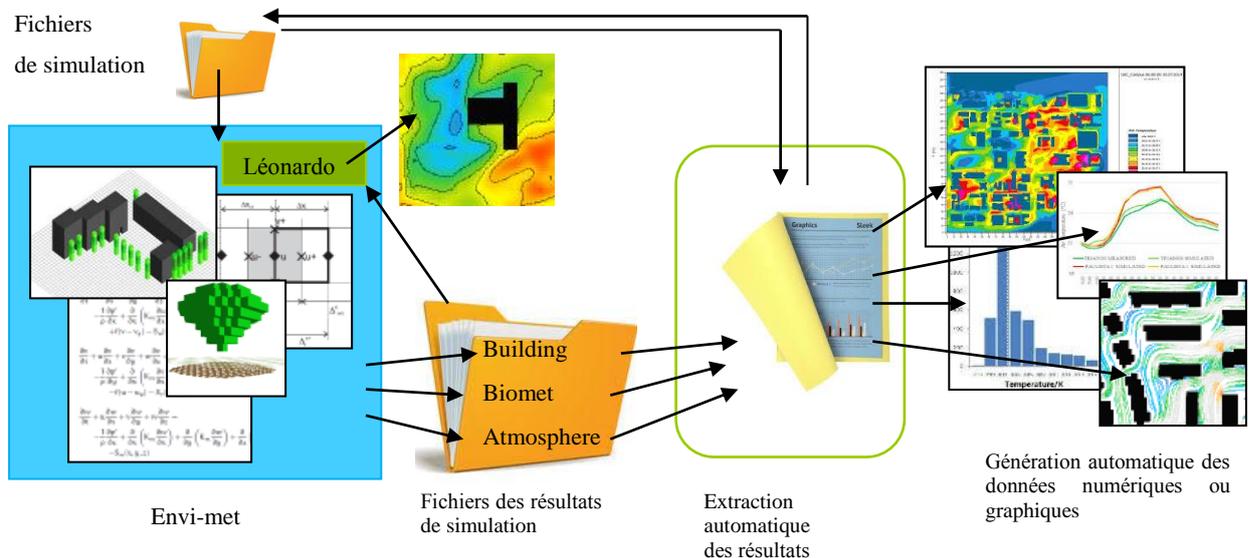


Figure 4. 24: Structure du logiciel.

Source : envi-met.info. Réadapté par auteur

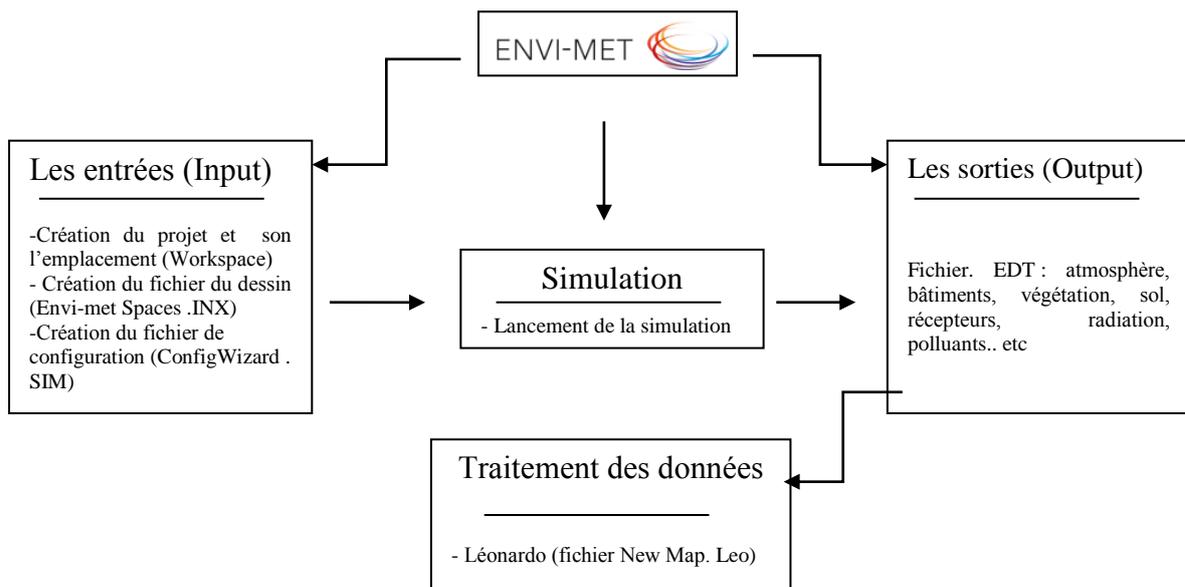


Figure 4. 25: Traitement des données.

Source : auteur

4.4.3. Choix du logiciel

Une vaste gamme d'outils de simulation numérique est proposée aujourd'hui dans le cadre de la modélisation urbaine. Parmi ceux qui permettent le calcul du climat modifié par la présence de la ville, on trouve cependant un nombre très limité de modèles pouvant reproduire, avec un degré suffisant de précision, toute la complexité du système climatique urbain : calcul simultané et interactif du bilan radiatif, thermique, aérodynamique à plusieurs échelles, et en tenant compte des transferts entre l'air, la végétation, les bâtiments, et le sol. Ceci nous a poussé à retenir envi-met dans le contexte actuel de cette recherche. Par contre un inconvénient s'impose, le temps de calcul est extrêmement long même avec un ordinateur puissant.

Comme décrit précédemment, ENVI-met V4.3.0 permet un forçage climatique simple seulement avec la température et l'humidité de l'air. Ce forçage ne prend pas en compte la direction et la vitesse du vent. Le logiciel considère une vitesse moyenne observée par la station météorologique au niveau du sol qui est interpolée temporellement et spatialement pour le profil complet 1D pour la journée concernée. Aussi la direction du vent est maintenue constante à tous les niveaux.

4.4.4. Démarche et déroulement de la simulation

Avant d'engager l'analyse paramétrique il est nécessaire de fixer certaines étapes préalables qui permettent d'asseoir la mise en œuvre des différentes simulations futures. En premier lieu, il est indispensable d'effectuer la simulation sur les profils initiaux afin de qualifier le comportement du vent dans l'espace extérieur résultant de ces géométries. La simulation couvre les mêmes périodes choisies pour l'investigation.

Les géométries choisies ont été soigneusement dessinées suivant une échelle convenable des trois espacements de la grille (x,y,z) et de l'ordre de 2m pour des raisons de précisions géométriques [Figure 4.26]. Les dimensions et les hauteurs des constructions ainsi que la végétation ont été reportées afin de pouvoir reproduire la réalité du terrain. Le paramètre obtenu est la vitesse du vent [Tableau 4.8]. Ce paramètre sera déduit par ENVI-met V4.3.0 et lus par Leonardo.

Tableau 4. 8: Détails des paramètres introduits au fichier de configuration pour les cas simulés

Source : Auteur

Paramètres introduits		
Situation		Jijel, Algérie Longitude : 5° E Latitude : 36°48' Climat : méditerranéen, humide en été
Période de simulation		Hiver Eté
Journée de simulation		16/02/2017 28/07/2016
Durée de simulation		A 06:00:00, 15 h. A 06:00:00, 15 h.
Paramètres	Vitesse du vent à 10m [m/s] à 06h	2
	Direction du vent	270° Ouest 90° Est
	Humidité spécifique – calculée [g/kg]	5.8 7
	Humidité relative à 2m de hauteur [%] à 06h	87.4 65
	Température initiale de l'atmosphère [K] à 06h	283.15 294.25
Bâtiments	Transmission de chaleur des murs [W/m.²K]	1.37
	Transmission de chaleur du toit [W/m.²K]	1.3
	Albédo des murs	0.3
	Albédo du toit	0.18
Hauteur de la coupe [k]		3 [1.40 m]

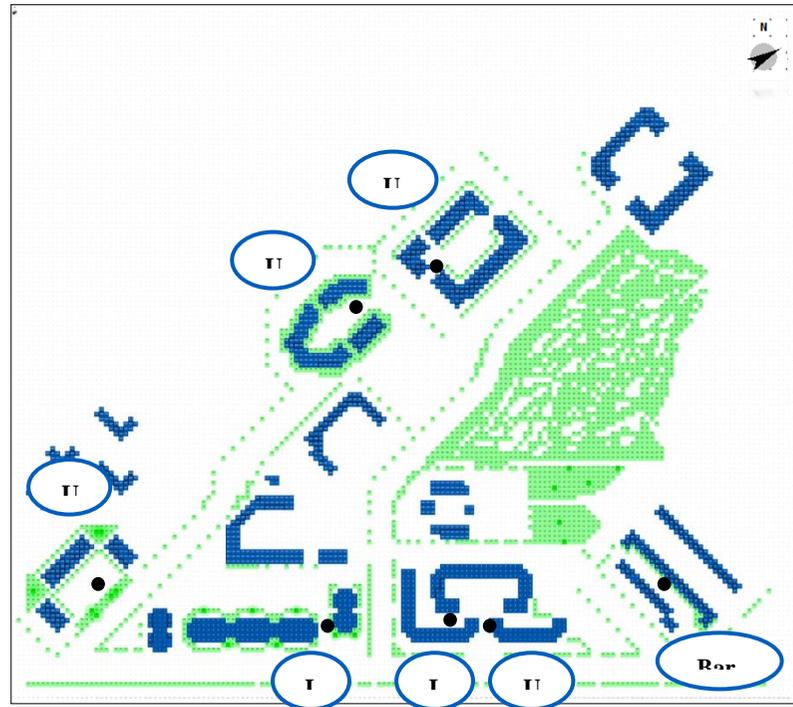
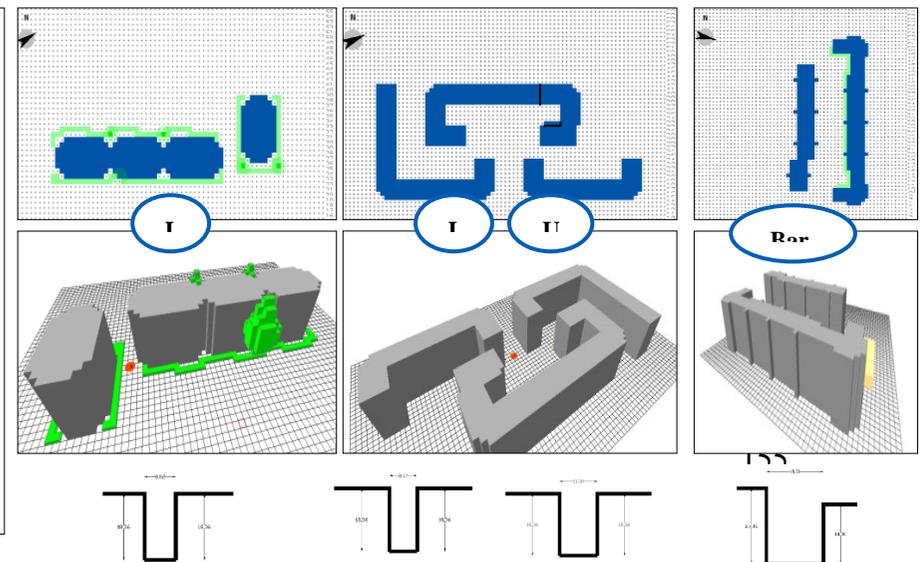
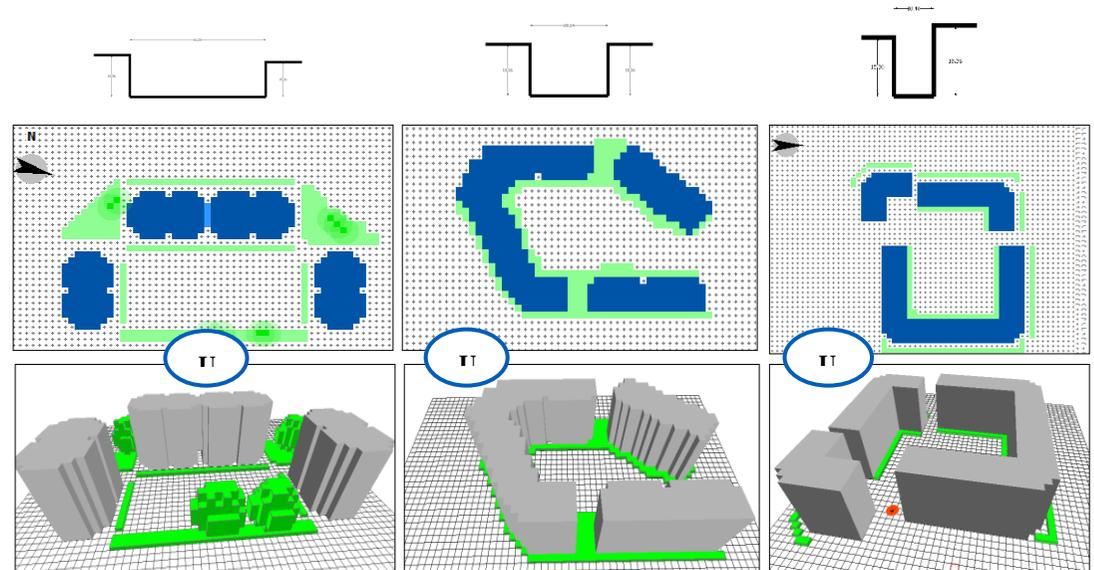


Figure 4. 26: Dessin reproduit sur le logiciel ENVI-met V4.3.0 en 2D & 3D

Source : auteur



4.4.5. Discussion des résultats de la simulation des cas initiaux

A partir des résultats obtenus de la simulation, il nous a été possible de générer des rendus graphiques, par heure et par variable climatique (température de l'air, humidité relative, température moyenne radiante, vitesse du vent). Cela nous a permis de comprendre l'évolution spatiale et temporelle des phénomènes climatiques. Ensuite, à partir des points choisis, nous avons pu comparer les valeurs obtenues avec les résultats de mesures et les données météo. La lecture des résultats de la simulation a été faite par des graphes et des cartes microclimatiques grâce à l'application créée à cet effet 'Leonardo'.

4.4.5.1. Evaluation de la vitesse du vent selon l'orientation N-O (période froide)

Dans les résultats de simulation des vitesses du vent, des écarts entre les vitesses du vent sont obtenus, le plus important est d'une valeur de 4.25 m/s entre le profil L2 et le profil U3 à 14h. [Figure 4.27]. En effet, les vitesses les plus importantes sont enregistrées au niveau du profil L2 pendant toute la journée (4.49m/s à 14h). Par ailleurs, les vitesses du vent les plus faibles sont enregistrées sur le profil L3 et U3 notamment.

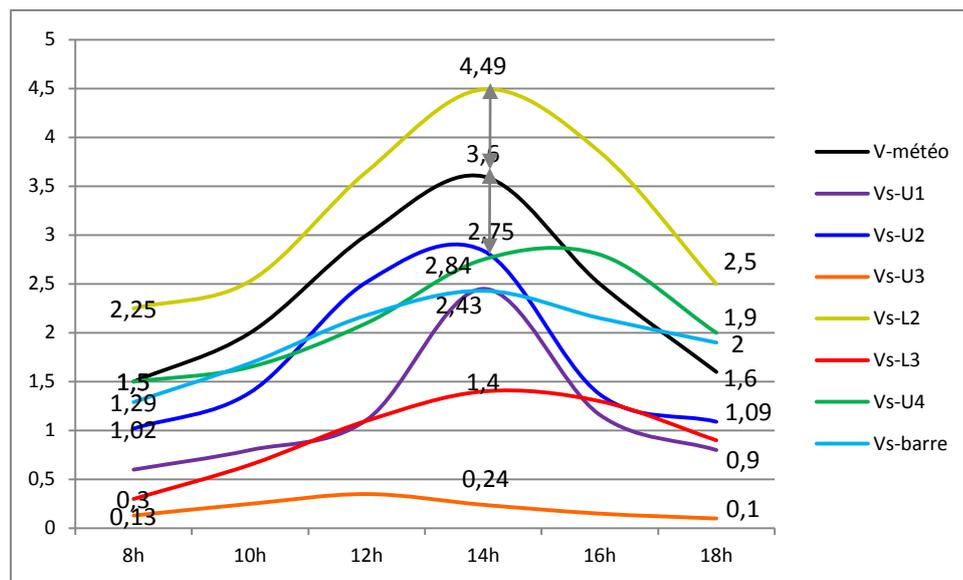


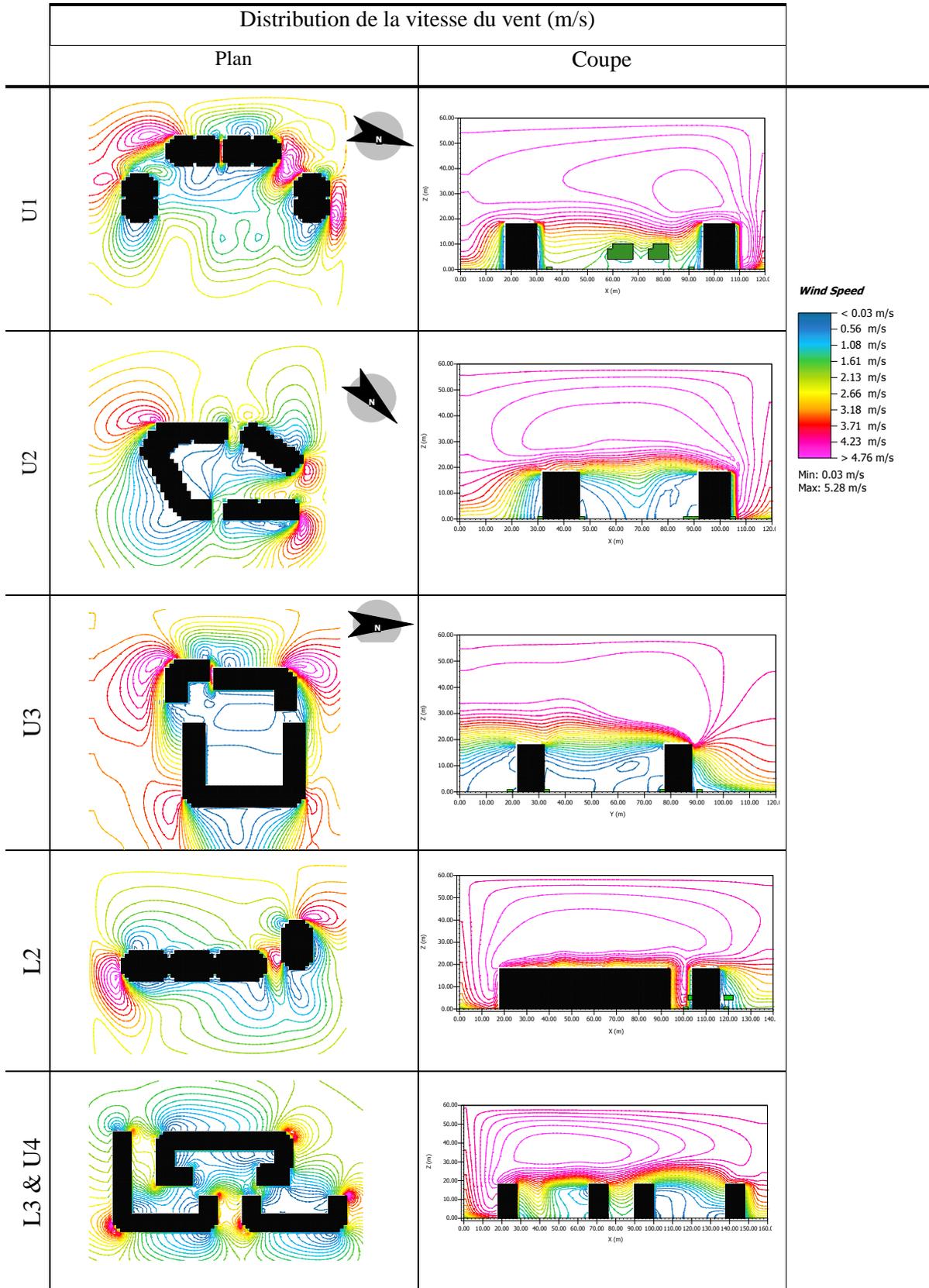
Figure 4. 27 : Résultats de la simulation de la vitesse du vent. Orientation N-O

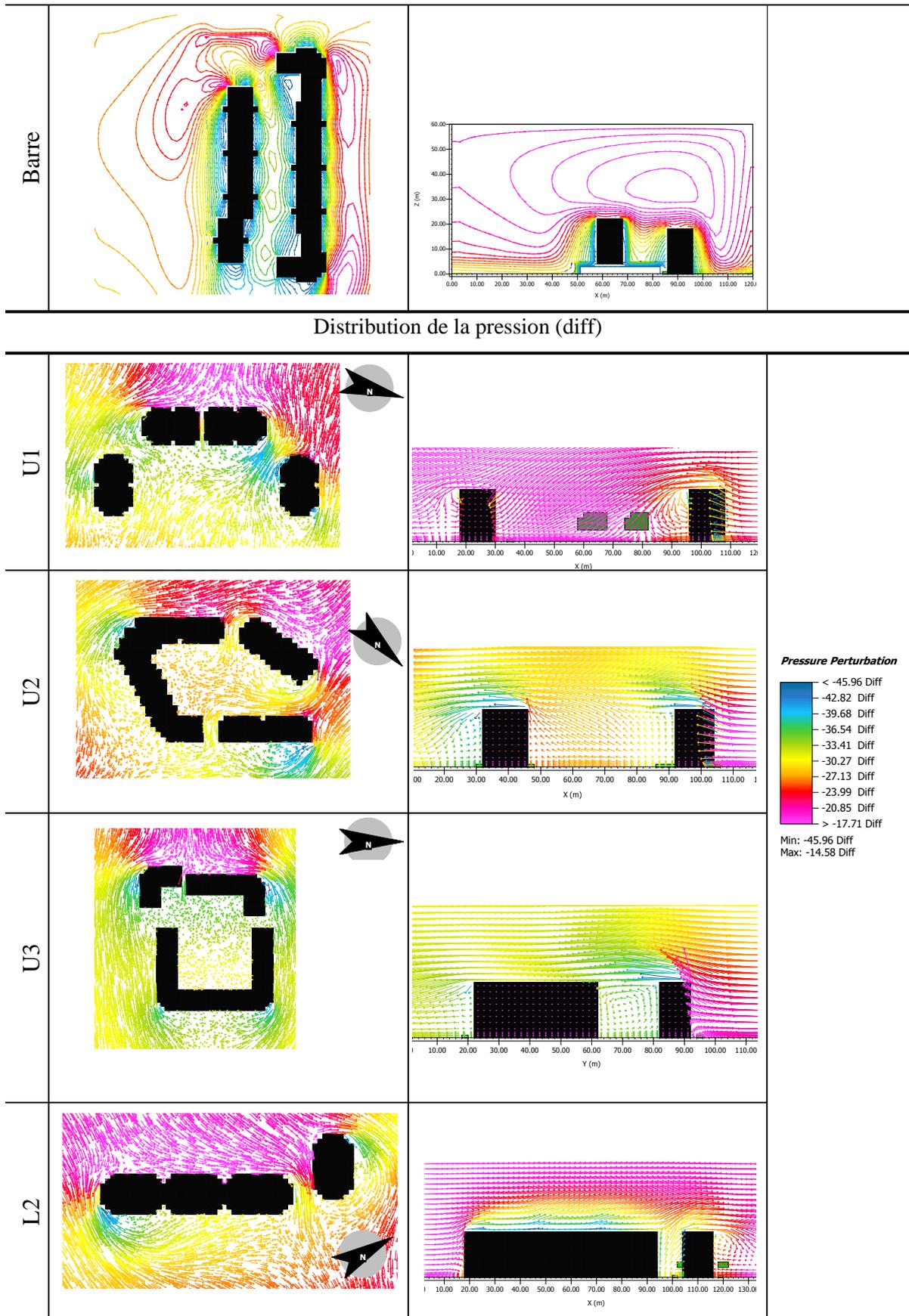
L'analyse des profils H/w des différentes géométries a permis de définir la nature du flux dans les espacements entre bâtiment. A ce titre, on reconnaît deux situations principales des profils à flux interfèrent comme dans le cas des profils U1 et U2 ($0.3 < H/w < 0.7$), et des profils à flux rasant tel que le cas des profils U3, L2, L3, U4 et barre ($H/w > 0.7$). Cette évaluation reste théorique du moment qu'elle n'est pas combinée avec

l'incidence du vent. Autrement, selon l'incidence du vent ces profils peuvent être transversaux ou frontaux, le profil transversal est le ratio H/w dans la direction du vent de telle sorte que le bâtiment fait face au vent. Le profil frontal est le ratio H/w qui correspond aux vides face au vent où les bâtiments ne constituent pas d'obstacles. Ces profils étant définis par rapport à l'incidence du vent, il convient de remarquer ce qui suit :

- Au niveau des points U1 et U2, leur profil frontal est marqué par un flux interférant présentant une protection partielle du vent qui rend l'espace central entre bâtiments à l'abri tout en maintenant un bon niveau de renouvellement d'air, ce qui justifie les vitesses de l'air enregistrées [Figure 4.27], environ 2.45 m/s et 2.85 m/s successivement à U1 et U2 à 14H. Ces profils étant définis par rapport à l'incidence perpendiculaire aux bâtiments, l'écoulement du vent passe au-dessus des toitures [Tableau 4.9] dû à l'effet d'abri créé par cette disposition des bâtiments. La distribution des vitesses du vent montre une force de vent plus importante aux coins des bâtiments et moyenne au niveau de l'espace central, ce qui a produit un effet de sillage qui a contourné les bâtiments en amont et un effet de coin sur les bordures des bâtiments latéraux. Le sillage du côté sous le vent est donc moins turbulent et dirigé d'une manière très souple. La distribution de la pression [Tableau 4.9] montre que la différence de pression sur les façades pourra offrir un bon potentiel de ventilation intérieure.
- Les profils U3 et L3 sont des profils transversaux à flux rasant qui offre de fortes conditions d'abri mais réduise le potentiel de mixage de l'air. Chose ressentie quant aux faibles vitesses du vent enregistrées notamment à U3 [Figure 4.27]. Quant à l'incidence du vent, elle varie selon l'orientation du bâti composant chaque endroit et sa configuration spatiale. A ce titre, le point U3 est doté d'un vent perpendiculaire dévié au-dessus des toitures en contournant l'ensemble par effet de sillage [Tableau 4.9]. Dans la cour semi-fermée on aperçoit une circulation tourbillonnaire, et les façades intérieures ont subi des pressions négatives et variables en raison de la formation des tourbillons menant vers une faible ventilation intérieure [Tableau 4.9]. Le point L3 quant à lui est muni d'un vent oblique mais qui devient perpendiculaire une fois canalisé entre les bâtiments. Son écoulement donc s'affaiblie en raison de la formation des turbulences et par conséquent la vitesse se réduit, induisant ainsi une mauvaise ventilation intérieure car toutes les façades sont plongées dans des zones de faibles pressions.

Tableau 4. 9 : Distribution de la vitesse du vent et la pression dans les profils simulés
 Source : auteur





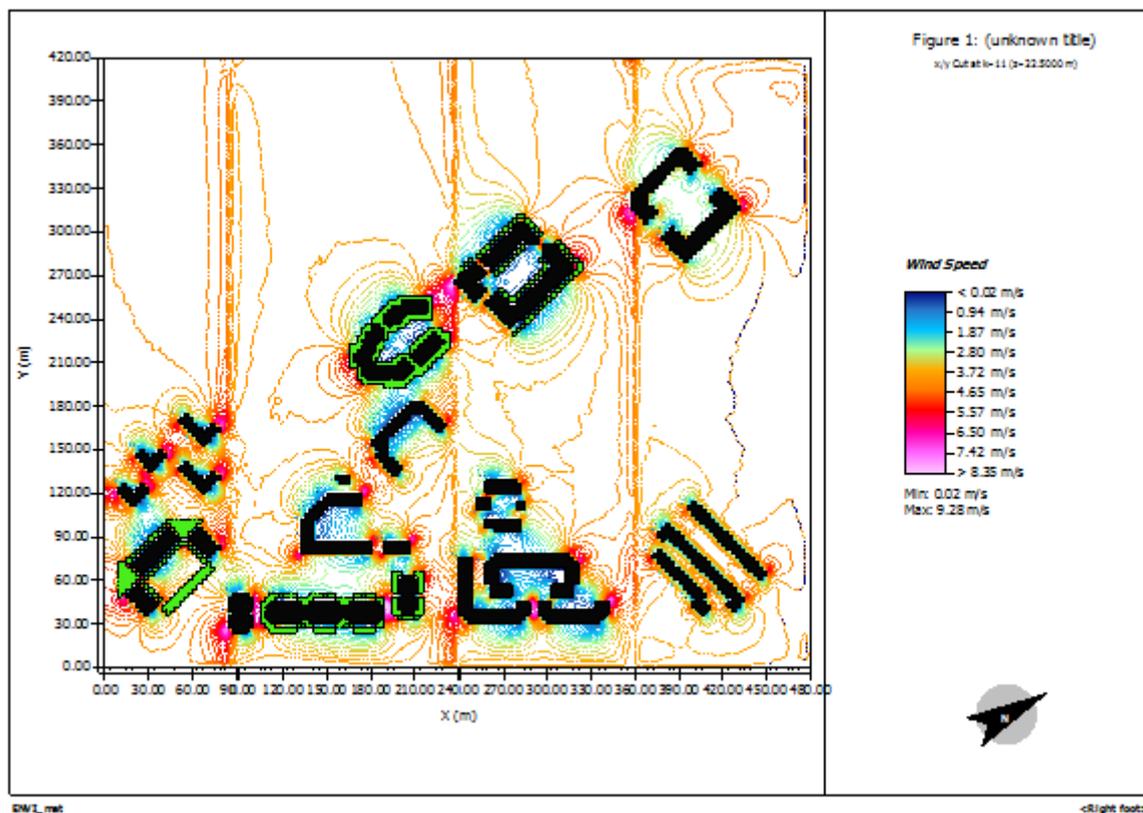
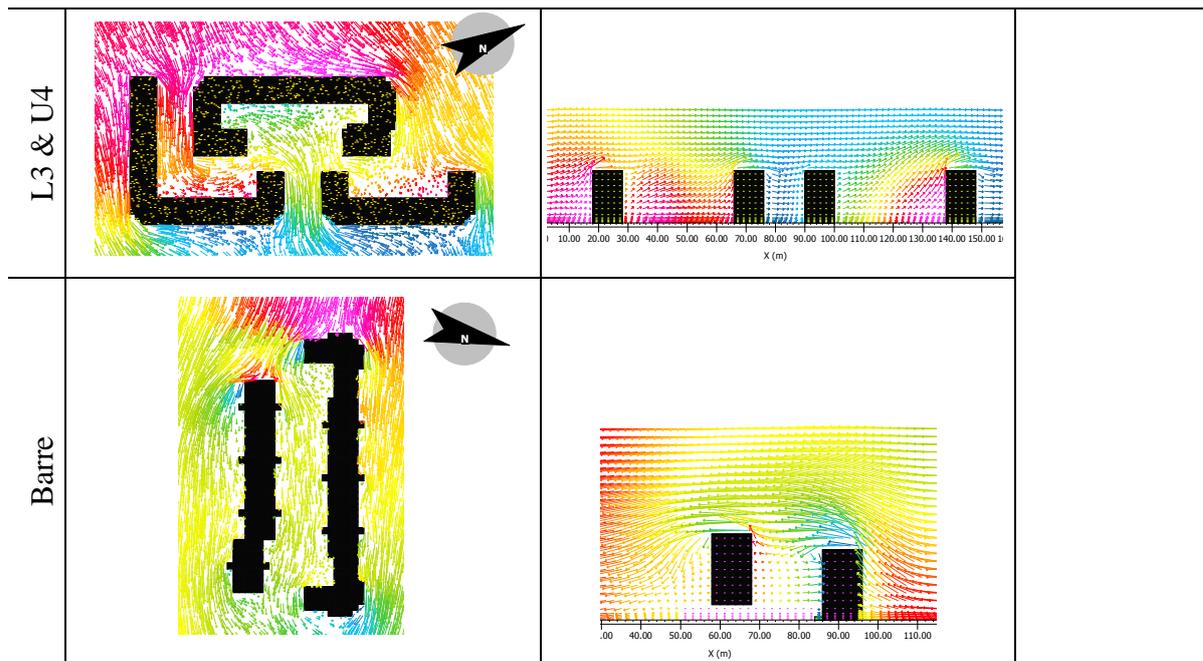
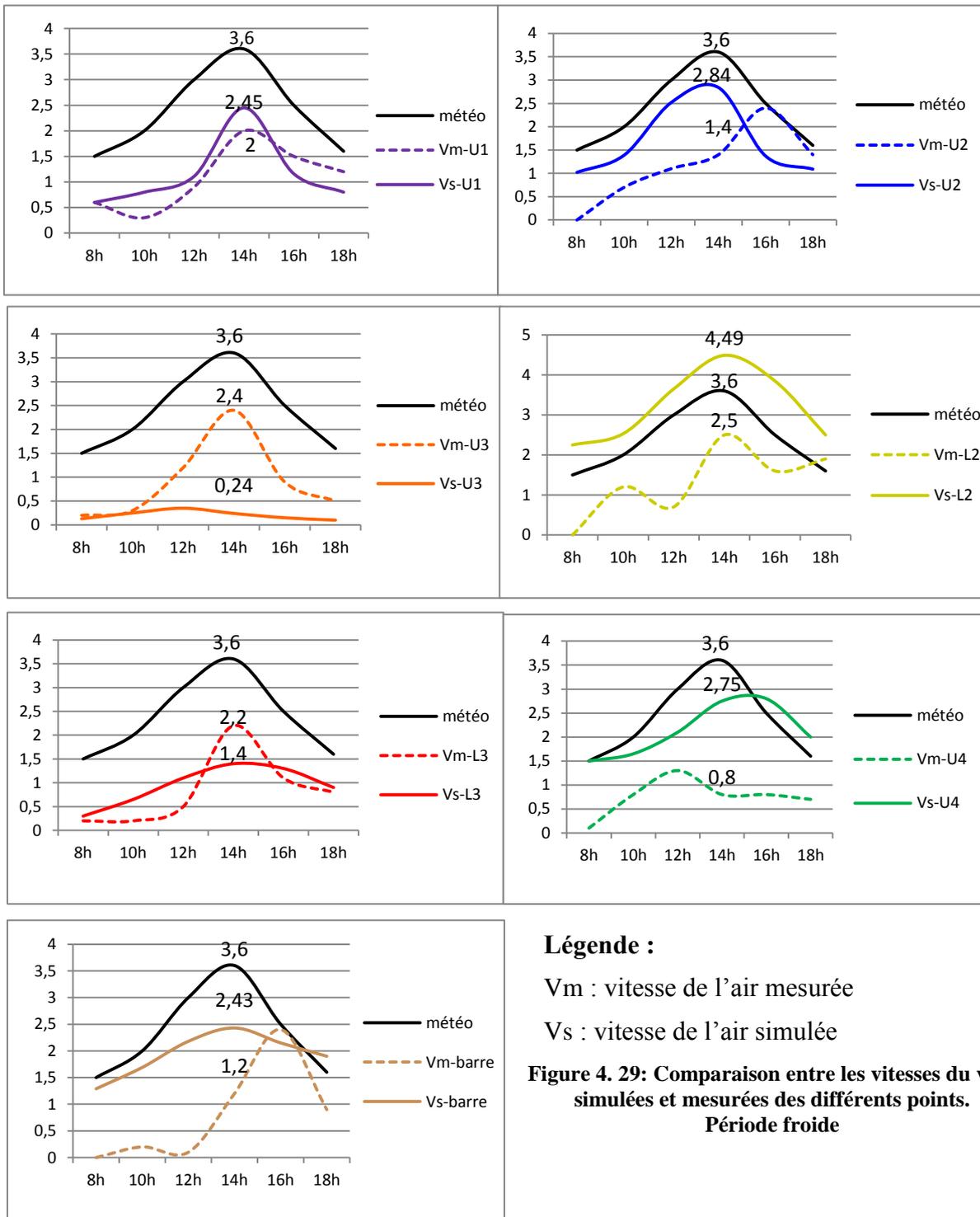


Figure 4. 28: L'écoulement du vent autour des différentes géométries (site entier)

- Les profils L2 et U4 sont des profils frontaux avec une incidence oblique. Lorsque le vent est oblique, l'infiltration de l'air est latérale et se fait à la fois par les rues et par les toitures. Cette incidence offre une ventilation plus régulière (**Givoni 1998**). Elle permet d'éviter les canalisations directes, les zones de stagnation d'air et les tourbillons généralement gênants. Ce qui justifie l'augmentation et l'accélération des vitesses favorisant ainsi une forte ventilation notamment au profil L2 [Tableau 4.9]. En effet, le profil L2 a subi également l'effet Venturi dans lequel l'ouverture du passage se trouve face au vent. La zone la plus critiques pour l'écoulement se localise donc dans les passages entre les bâtiments pour les deux profils en présentant des vitesses du vent élevées. Cela affectait d'une manière significative la distribution de la pression du vent sur les différentes façades en favorisant vers les espaces adjacents et engendre donc une bonne ventilation intérieure.
- En ce qui est du profil barre (point 8) qui est frontal, le vent a pris une incidence parallèle au bâti, il a tendance à s'engouffrer dans les rues et à être parfaitement canalisé. Ici se produit le phénomène de canalisation dans ce passage et l'effet des coins au début de la rue. La ventilation intérieure est ainsi favorisée en raison de la différences de pressions sur les façades opposées.

Enfin, il convient de mentionner que la vitesse du vent est sensiblement réduite en milieu urbain, même si la densité est faible et les espacements importants. De même, le vent est très variable en direction, cependant le logiciel de simulation ne prend en compte qu'une seule direction.



La comparaison entre les résultats de la simulation et ceux de l'investigation montre que la vitesse du vent mesurée aux profils U3, L3 et barre est beaucoup plus turbulente que celle simulée [Figure 4.29], comme on peut s'y attendre puisque les données d'entrée sont basées sur des moyennes horaires.

4.4.5.2. Evaluation de la vitesse du vent selon l'orientation N-E (période chaude)

Les résultats de simulation montrent que les vitesses de l'air les plus importantes sont enregistrées au niveau des profils L2 et U4 pendant toute la journée en dépassant d'une façon remarquable le seuil de nuisance admis à 5m/s dans l'espace extérieur (7.1 m/s et 6.7 m/s à 12h). De l'autre côté, les vitesses les plus faibles sont toujours enregistrées sur les profils L3 et U3 notamment [Figure 4.30]. Selon le type des profils et l'incidence du vent (E/N-E), l'écoulement du vent peut être décrit et perçu dans les différents profils comme suit :

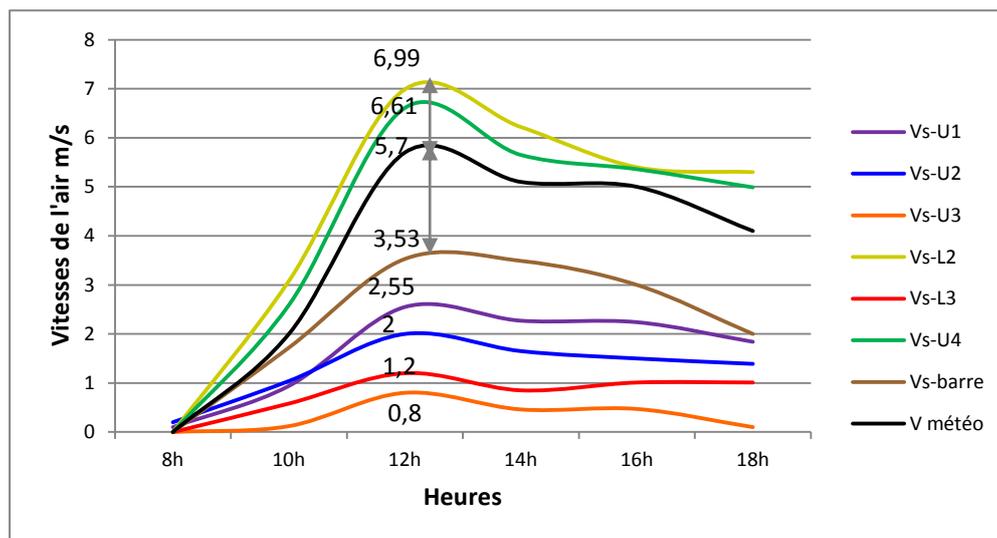
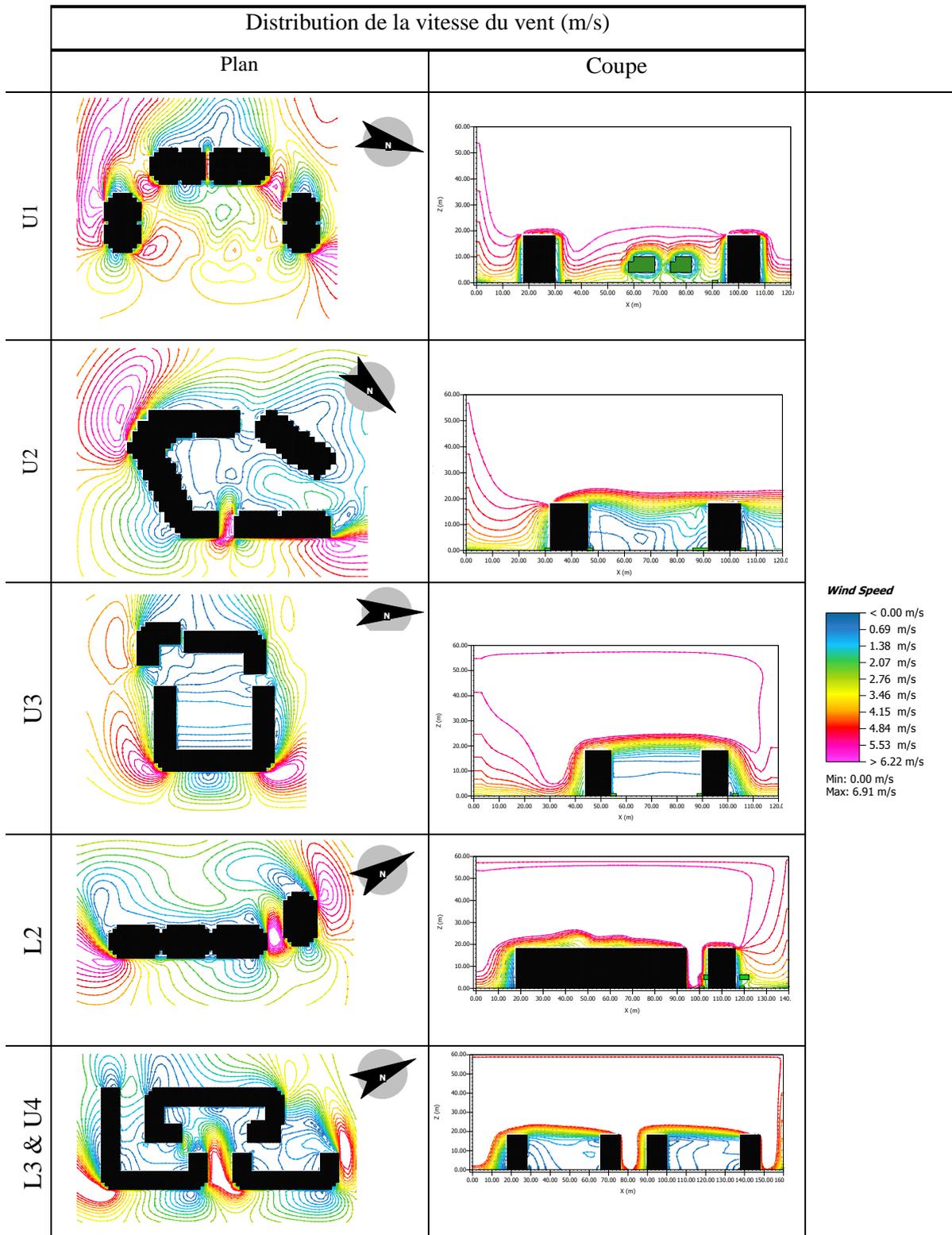
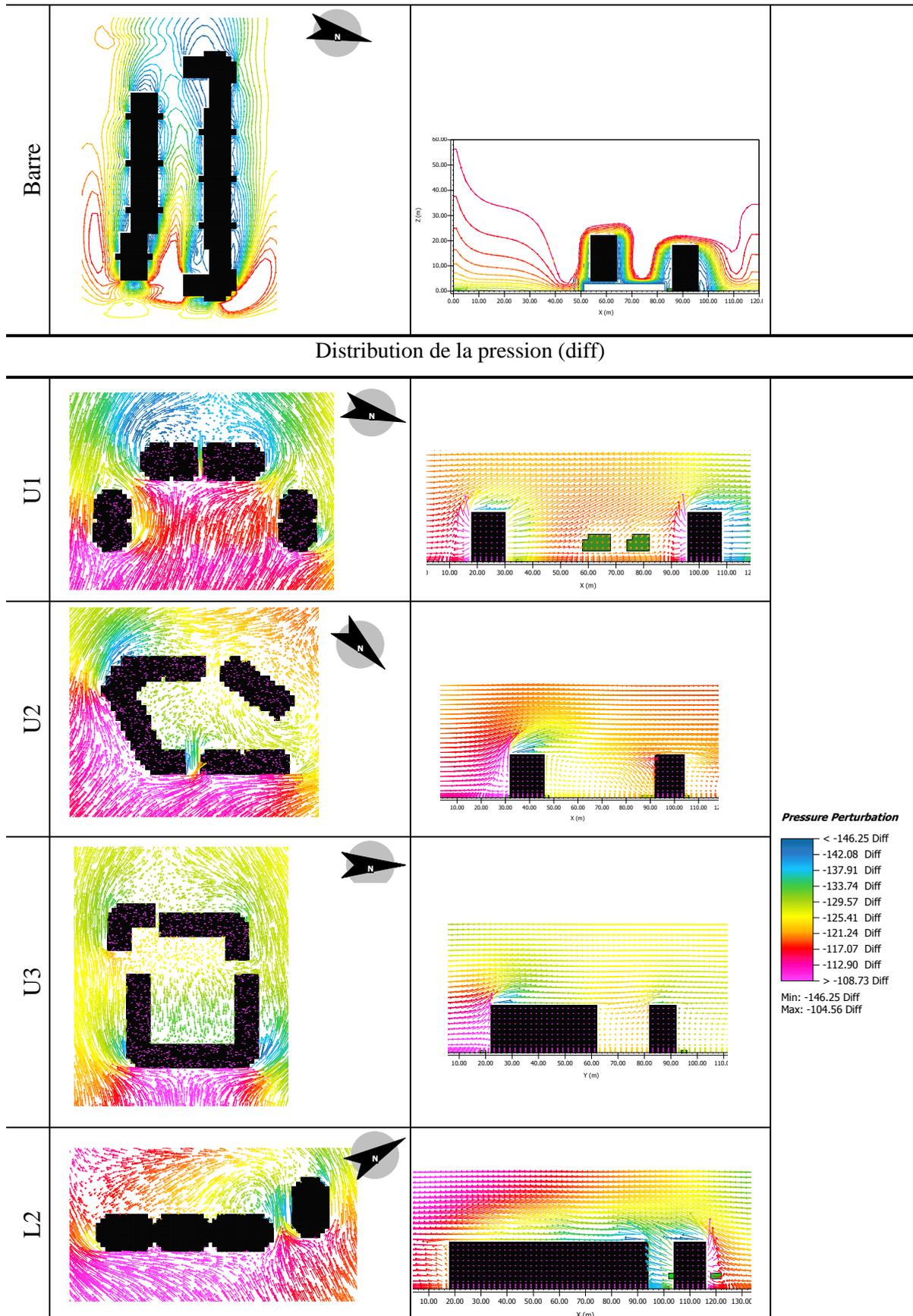


Figure 4. 30: Résultats de la simulation de la vitesse du vent. Orientation N-E

- Les profils U1 et U2, dont l'écartement est frontal, sont caractérisés par un flux interférant dans lequel l'espace extérieur entre bâtiments est partiellement protégé mais qui présente toujours un bon niveau de renouvellement d'air. Les vitesses de l'air enregistrées [Figure 4.30], environ 2.55 m/s et 2 m/s successivement à U1 et U2 à 12H. Ces profils sont dotés d'une incidence perpendiculaire où l'écoulement du vent passe au-dessus des toitures [Tableau 4.10] dû à l'effet d'abri mais qui s'infiltré entre les bâtiments pour le profil U1 où on observe un effet de coin qui se produit latéralement en combinaison avec un effet de sillage qui a contourné les bâtiments faces au vent. Ces deux phénomènes sont également observés au niveau du profil U2. Le sillage du côté sous le vent est donc moins turbulent et dirigé d'une manière très souple. La distribution de la pression [Tableau 4.10] montre que la différence de pression sur les façades pourra offrir un bon potentiel de ventilation intérieure.

Tableau 4. 10 : Distribution de la vitesse du vent et la pression dans les profils simulés





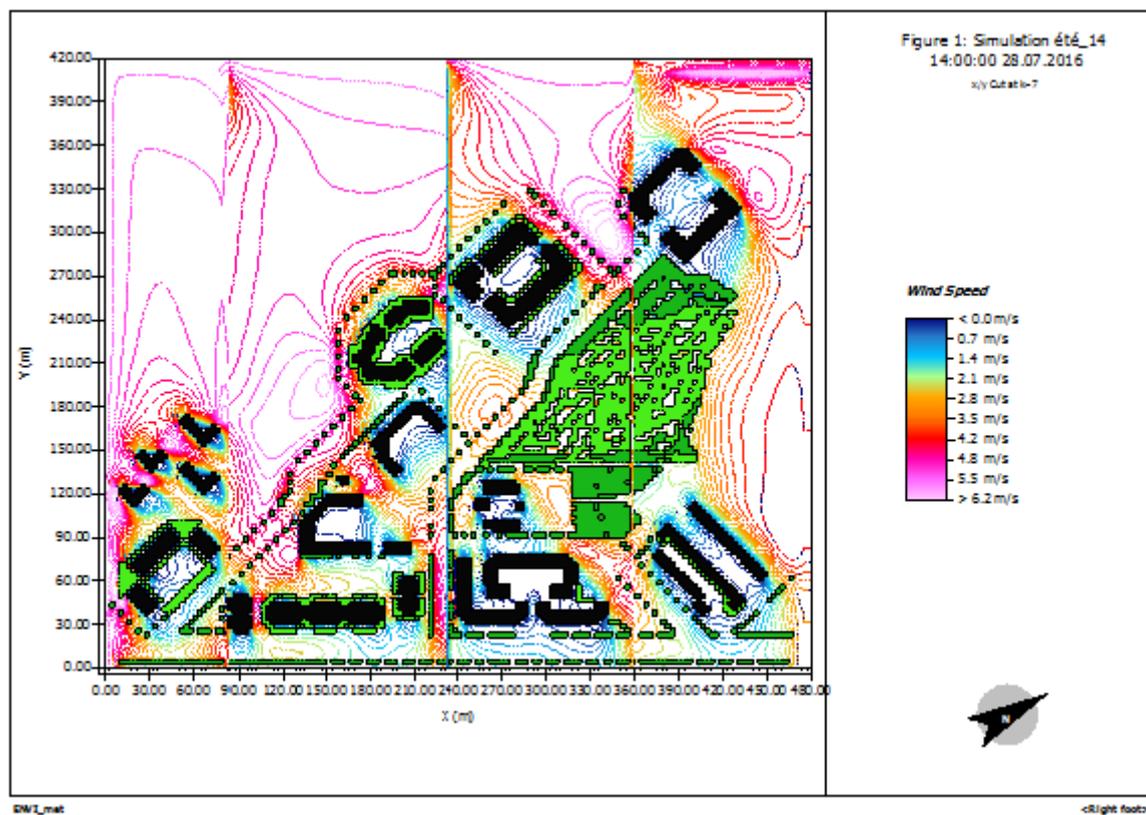
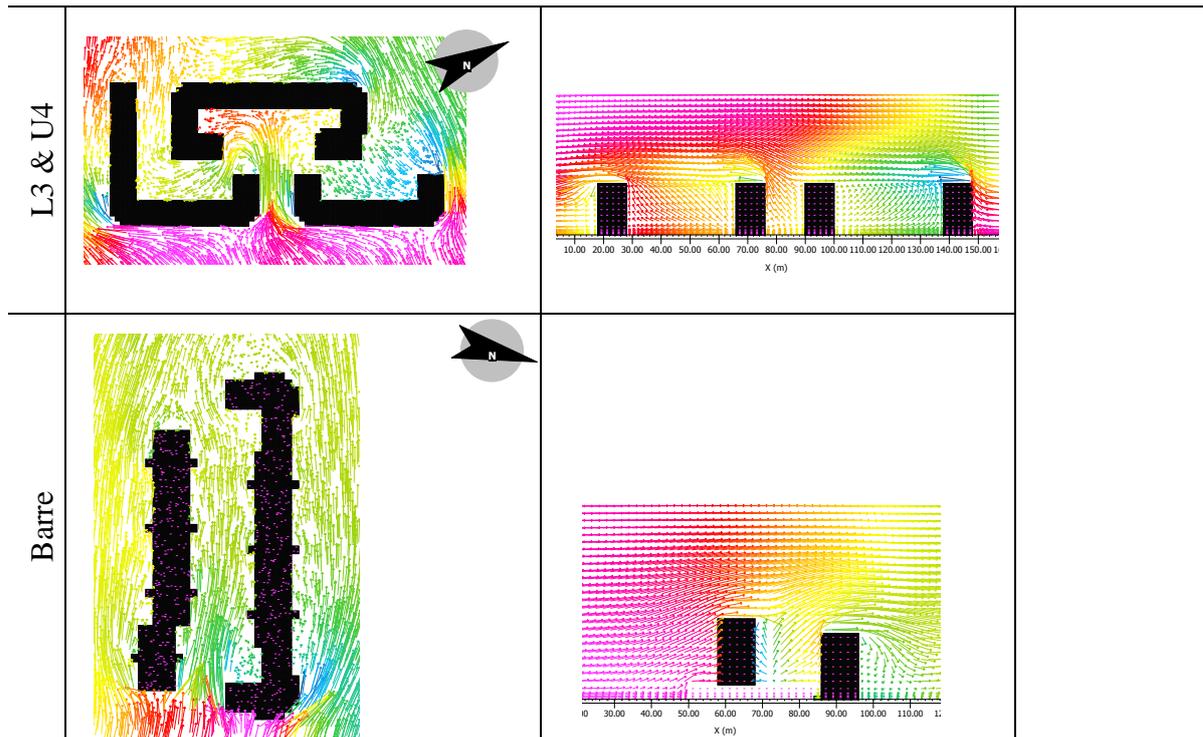
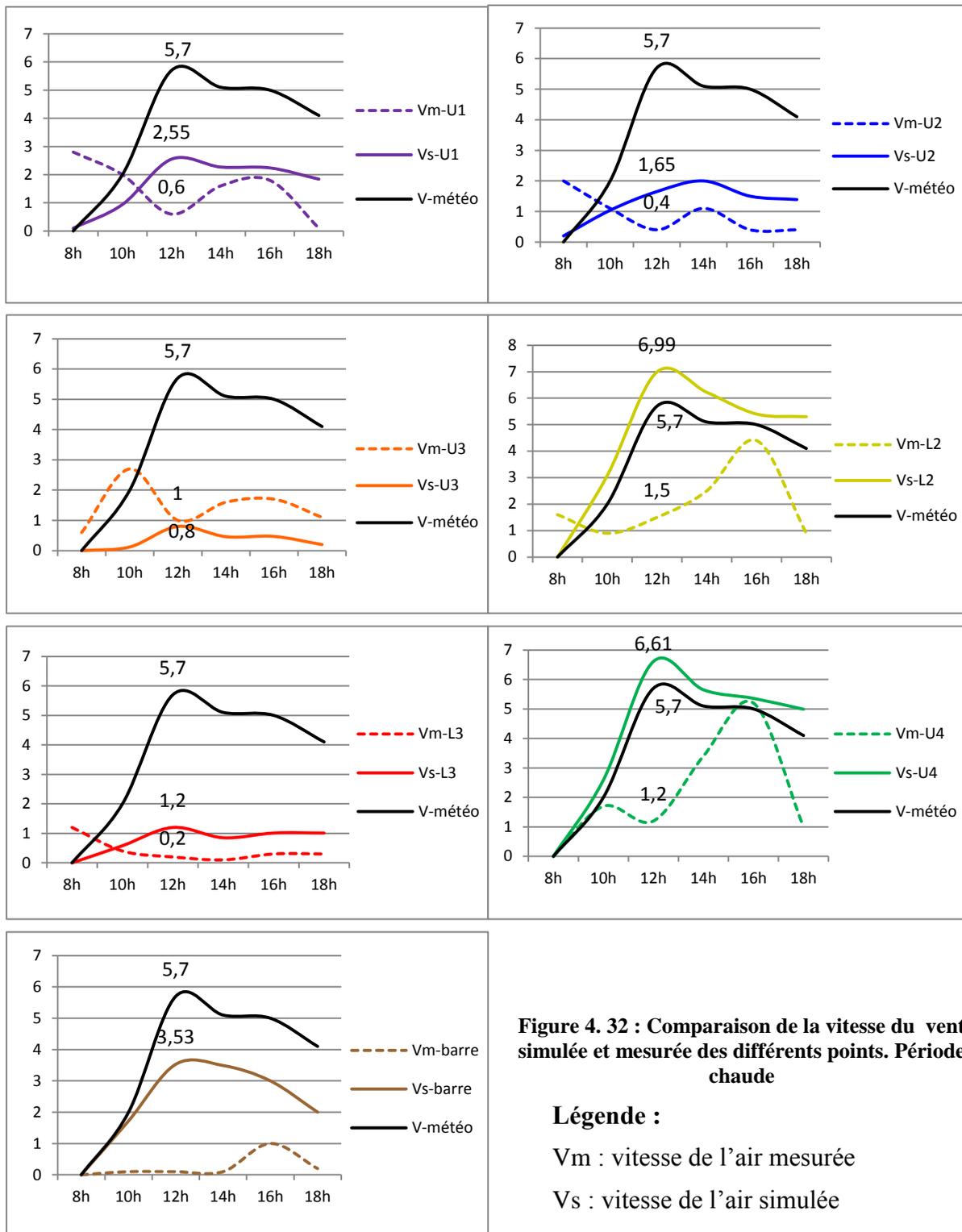


Figure 4. 31 : Mouvement du vent autour des ifférentes géométries (site entier)

- Les profils U3 et L3 sont caractérisés par de faibles vitesses d'air, leurs écartements transversaux à flux rasant ont offert de fortes conditions d'abri en réduisant le potentiel de mixage de l'air. Malgré les incidences différentes dans les deux profils à savoir perpendiculaire au profil U3 et oblique au profil L3, l'écoulement est dévié au-dessus des toitures en raison de la formation d'un sillage qui contourne les deux configurations et accentue les vitesses aux coins [Tableau 4.10]. Selon la distribution de la pression dans les deux espaces extérieurs, l'écoulement est légèrement agité présentant des turbulences. Les façades reçoivent de faibles pressions induisant une faible ventilation intérieure car toutes les façades sont plongées dans des zones de faibles pressions.
- L'amplification des vitesses du vent c'était au niveau des profils L2 et U4 dans lesquels l'écartement est frontal associé à l'incidence oblique. Cette incidence permet un écoulement d'air latéral qui pénètre par les rues et sur les toitures. L'écoulement est donc aspiré et accéléré dans le passage entre les bâtiments pour les deux profils. La nature du flux dans le passage est déterminée principalement par la combinaison des courants de coin et l'angle d'ouverture du passage. Cette incidence a permis une meilleure distribution des pressions positives et négatives en favorisant non seulement la ventilation extérieure mais aussi une meilleure ventilation intérieure.
- L'écoulement au niveau du profil barre (point 8) est parfaitement canalisé du fait qu'il est muni d'un écartement frontal et une incidence parallèle créant le phénomène de canalisation. Cette incidence a permis de canaliser le vent entre les deux barres impliquant la différence de pression entre les deux façades tout en prenant en considération la différence de niveau entre les deux rangées de bâtiments.



La comparaison entre les résultats de la simulation et ceux de l'investigation [Figure 4.32] montre que la vitesse de l'air mesurée aux points U1, U2, U3, L2 et U4 présente beaucoup de turbulence que celle simulée. Ce qui est remarquable c'est le fait d'avoir une sur ventilation produite au niveau des points L2 et U4 pratiquement toute la journée. Ceci

engendré un refroidissement ressentie puisque les vitesses dépassent amplement le seuil de gêne malgré c'est la période chaude.

4.4.6. Synthèse

Les simulations effectuées ont permis de caractériser et qualifier le flux de vent dans les différents profils autour des bâtiments et l'effet des configurations construites sur son comportement dans les différents cas d'étude.

Les résultats fournis, obtenus à partir des simulations numériques pour les deux périodes d'été et d'hiver, indiquent que la géométrie de l'espace extérieur, façonnée principalement par la disposition des bâtiments environnants, a un impact significatif sur la nature du flux de vent et participe à sa maîtrise. Cela était perceptible avec les formes géométriques en U et en L qui, en fonction des dimensions de l'espace libre disponible, ont créé des espaces protégés en hiver et mal ventilés en été comme dans le cas des profils U3 et L3 ou comme le cas des profils L2 & U4 qui sont très exposés en hiver et sur-ventilés en été. Par ailleurs, les espaces confortables ont caractérisés les profils U1, U2 & barre.

Cet indicateur géométrique H/w semble avoir une grande influence sur le flux d'air. La forme géométrique que prend l'espace extérieur que ce soit en U en L est liée à ce dernier paramètre qui détermine le niveau d'abri ou même d'exposition au vent à l'extérieur. Il affecte aussi en combinaison avec l'incidence la ventilation intérieure puisque celle-ci dépend des différences de pression qui existent entre les façades des bâtiments. C'est alors le paramètre géométrique qui a le plus d'impact sur la ventilation urbaine.

4.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à présenter en premier lieu le déroulement des campagnes de mesure et la discussion des résultats de l'investigation. L'objectif consistait en une évaluation quantitative par la mesure des variations microclimatiques notamment le vent et leur interaction avec la géométrie de l'espace extérieur dans les deux périodes hiver et été. Le cas d'étude contient des géométries diversifiées qui varie entre la forme en U, en L, barre, en enclos, ce qui a permis de mieux saisir le mouvement du vent et d'étudier l'effet des paramètres géométriques déterminants sur le vent. Les résultats ont indiqué que ces géométries ont conditionné le niveau de perméabilité, de pénétration ou de déviation de vent. Ce sont donc les espacements existants entre bâtiments qui sont responsable du degré

de ventilation, d'abri ou d'exposition. Chose qui était remarquable pratiquement dans les points ayant la géométrie en U, L pour les deux périodes et qui nécessitent des corrections notamment en été.

Ce paramètre géométrique principal H/w (où H est la hauteur des bâtiments, w est l'espacement entre ces bâtiments) a donc un impact sur la ventilation extérieure. En effet, l'écartement entre bâtiments doit être évalué en combinaison avec l'incidence du vent. De même, l'effet de la topographie est aussi non négligeable puisqu'elle conduit à l'amplification ou à la réduction d'écoulement d'air dans l'espace urbain extérieur. Une analyse plus poussée en utilisant la corrélation linéaire simple a été appliquée pour tester la relation entre les paramètres climatiques et les paramètres géométriques et de déterminer l'intensité de cette relation.

Le chapitre suivant sera consacré à la simulation numérique par le logiciel ENVI-met V4.3.0 de plusieurs profils. Ces profils seront associés à des angles d'incidence du vent différentes selon les orientations N-O et N-E.

CHAPITRE V



Etude d'optimisation des indicateurs géométriques et leur impact sur le vent



" Pour l'architecte, la simulation doit permettre de valider rapidement des options fondamentales, d'explorer et de commencer à optimiser certains choix.....pour un meilleur confort et des charges de fonctionnement moindre ". Chatelet et al. (1998).

CHAPITRE V : ETUDE D'OPTIMISATION DES INDICATEURS GEOMETRIQUES ET LEUR IMPACT SUR LE VENT

5.1. Introduction

L'objectif de la présente recherche consiste à développer des techniques méthodologiques d'aide à la conception des espaces urbains extérieurs, principalement dans le contexte humide où le vent est une donnée essentielle avec laquelle il faut composer. Autrement dit, il s'agit de la constitution de règles utilisables dans la conception des espaces extérieurs vis-à-vis le contrôle climatique notamment le vent. Sachant que les connaissances expertes sont inexistantes dans le cas de la conception des espaces extérieurs vis-à-vis le vent, notre démarche vise à dégager des conclusions pouvant servir aux architectes et urbanistes lors d'établissement des opérations d'urbanisme sur les tissus urbains.

C'est donc pour cette raison que nous envisageons de conduire une analyse paramétrique sur les géométries choisies selon les conclusions de l'investigation, tout en utilisant la simulation numérique et en faisant varier les paramètres les plus influents sur le comportement du vent. Cette démarche s'organisera en deux temps. Il s'agira en premier lieu de définir les paramètres à faire pour ensuite établir les scénarios et de régler les différents problèmes de modélisation pour pouvoir mener les simulations numériques. Enfin nous tenterons d'en tirer les conclusions pertinentes pouvant servir de règles.

5.2. Etude d'optimisation des indicateurs géométriques par les scénarios proposés

Cette phase consiste à simuler deux géométries fictives en L et U formant un espace extérieur entouré de bâtiments. Nous allons simuler divers scénarios avec différents profils urbains H/w associés à des angles d'incidence du vent variées selon les orientations N-O,

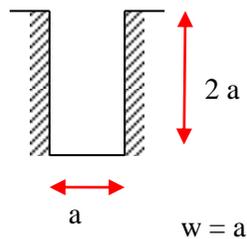
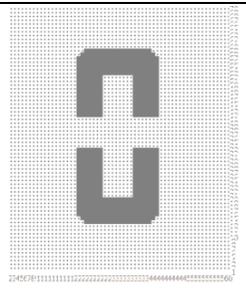
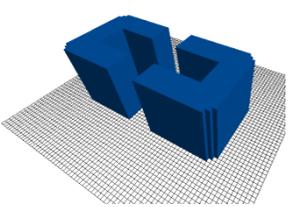
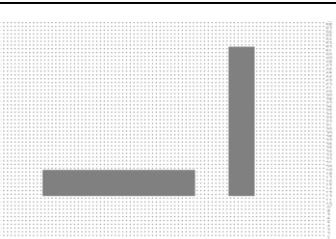
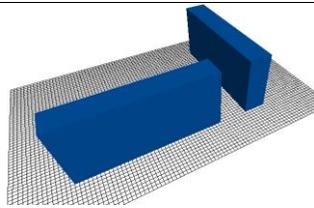
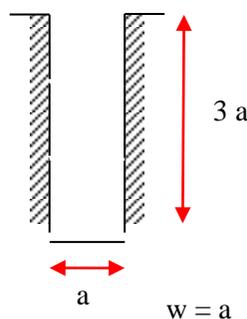
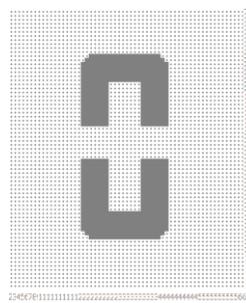
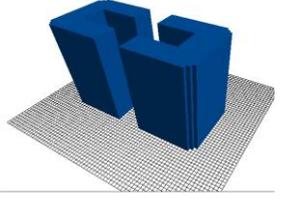
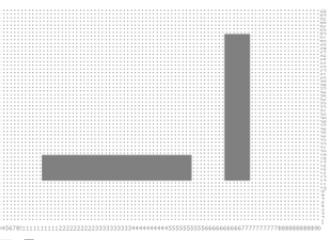
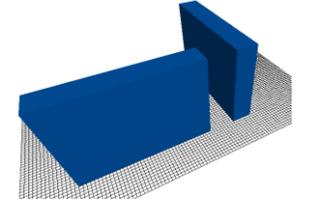
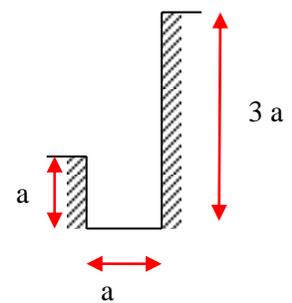
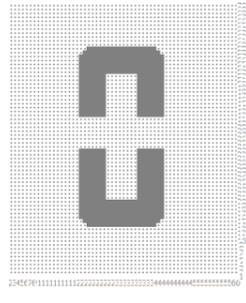
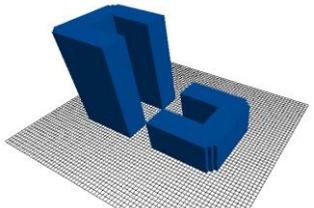
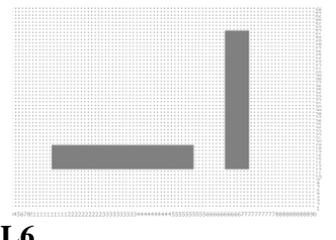
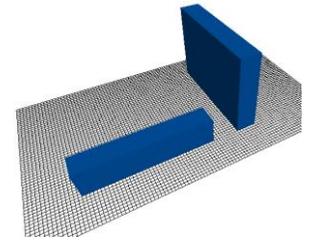
N-E. Le choix des formes en L et U permet de varier la forme de l'espace extérieur. En effet, la forme géométrique en L permet de créer un passage alors que la forme en U permet de créer un espace extérieur enfermé. Les paramètres géométriques considérés sont la largeur et la hauteur comme expliquer ci-dessous [Tableau 5.1].

- **Scénario N°1** : profil H/w dont la variable est la largeur (profil symétrique). H étant la hauteur où $H = a$
 - ✓ $H/w = 0.25$. La largeur $w = 4 a$
 - ✓ $H/w = 0.5$. La largeur $w = 2 a$
 - ✓ $H/w = 1$. La largeur $w = a$
- **Scénario N°2** : profil H/w dont **la variable sera la hauteur** (profil symétrique). w étant l'espacement entre les bâtiments où $w = a$
 - ✓ $H/w = 2$. La hauteur $H = 2 a$
 - ✓ $H/w = 3$. La hauteur $H = 3 a$
- **Scénario N°3** : différence du gabarit (profil asymétrique). w étant l'espacement entre les bâtiments où $w = a$
 - ✓ La hauteur a varié entre H_1 et H_2 ou $H_1 = 3a$ et $H_2 = a$.
- Ces scénarios seront soumis à des incidences du vent variées par rapport au bâti :
 - ✓ Les angles d'incidence considérés pour l'orientation O/N-O : -30° , -45° , -60° , -90°
 - ✓ Les angles d'incidence considérés pour l'orientation E/N-E : 30° , 45° , 60° , 90° [Figure 5.1].

La simulation se déroule dans les mêmes conditions climatiques de l'investigation. La question qui se pose consiste à savoir dans quelle mesure ces paramètres influent-ils sur le comportement vent?. C'est en tentant de répondre à cette question que nous allons entreprendre une analyse portant sur la comparaison des résultats des différents scénarii. Ces paramètres seront appliqués sur ces géométries qu'il faudra ensuite les redimensionner pour donner naissance aux configurations définitives qui serviront de support aux traitements numériques. Nous cherchons par la suite à établir les rapports qui existent entre les différents paramètres et le comportement aéroulque dans les configurations retenues.

Tableau 5. 1 : Scénarios proposés

H/w	Profil	Forme en U		Forme en L	
Scénario 1	<p>0.25</p> <p>$w = 4a$</p>	<p>4a</p>	<p>U1</p>	<p>4a</p>	
	<p>0.5</p> <p>$w = 2a$</p>	<p>2a</p>	<p>U2</p>	<p>2a</p>	
	<p>1</p> <p>$w = a$</p>	<p>a</p>	<p>U3</p>	<p>a</p>	

Scénario 2	2	 <p style="text-align: center;">$2a$ a $w = a$</p>		 <p style="text-align: center;">U4</p>	 <p style="text-align: center;">L4</p>	
	3	 <p style="text-align: center;">$3a$ a $w = a$</p>		 <p style="text-align: center;">U5</p>	 <p style="text-align: center;">L5</p>	
Scénario 3	Asymétrique	 <p style="text-align: center;">$3a$ a a</p>		 <p style="text-align: center;">U6</p>	 <p style="text-align: center;">L6</p>	

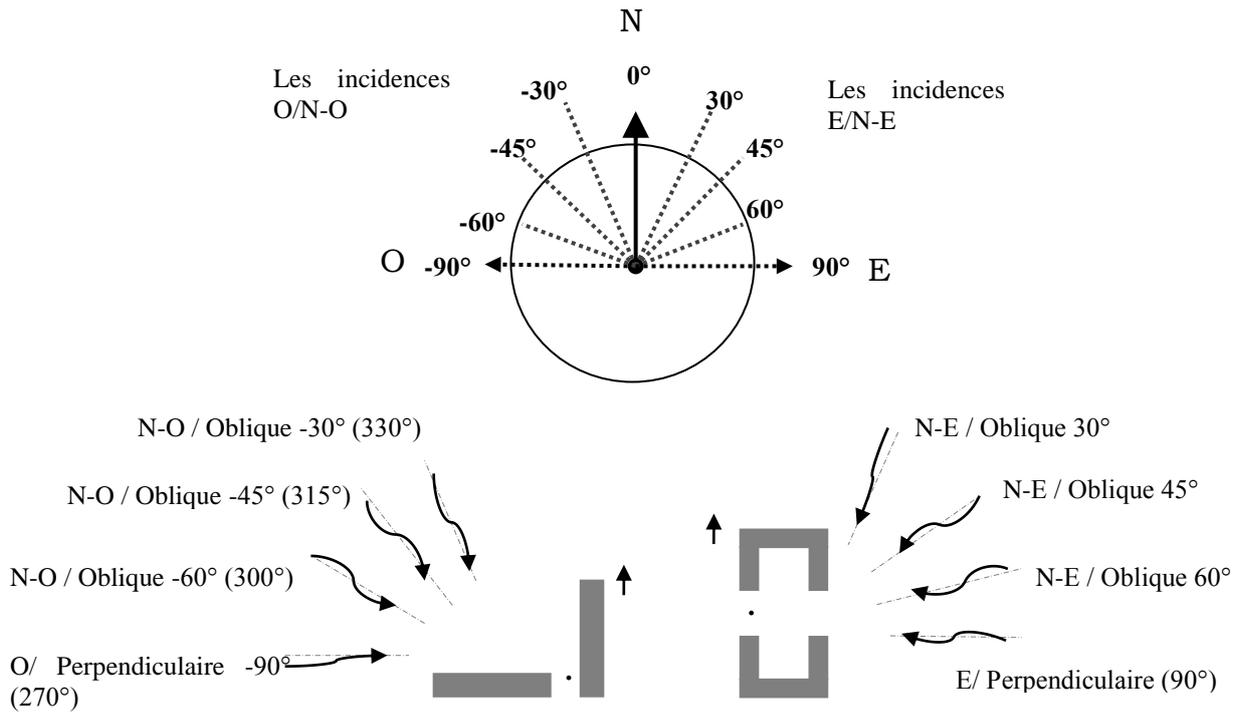


Figure 5.1 : Les incidences du vent

Source : auteur

5.3. Discussion des résultats des scénarios

5.3.1. Selon les différents angles d'incidence O / N-O

5.3.1.1. Scénario N°1 : effet de la largeur de l'espace sur le comportement du vent

Pour analyser l'effet de la largeur de l'espace extérieur sur le vent, l'espace choisi dans la forme U se trouve dans l'axe central entre bâtiments. Les résultats de la simulation sur les cartes graphiques au niveau du tableau 5.2 montrent la trajectoire que trace le vent sur les trois profils selon les différents angles d'incidence :

- Le profil U1 où $H/w = 0.25$ est marqué par un flux isolé présentant une forte exposition au vent au niveau de l'espace central mais qui pourra provoquer de gêne au niveau piéton. L'espacement large entre les bâtiments favorise un mixage de l'air important, ce qui justifie les vitesses de l'air enregistrées à 14H aux environs de 3 m/s pour toutes les incidences sauf l'incidence oblique de 330° [Figure 5.2]. La distribution des vitesses du vent [Tableau 5.2, 5.4] montre que dans le cas d'une incidence perpendiculaire le vent est canalisé directement dans l'espace central et forme des tourbillons aux coins intérieurs de la cour. Vers l'extérieur des bâtiments un effet de

sillage et de coin sont produits sur les parties latérales des bâtiments. Pour les incidences obliques, le vent s'écoule d'une manière très souple vers l'espace central présentant un sillage qui a contourné l'ensemble avec quelques coins critiques. A l'intérieur de la cour, la ventilation est plus régulière, elle permet d'éviter les canalisations directes avec la formation également des tourbillons aux coins intérieurs. La différence de pression sur les façades pourra offrir donc un bon potentiel de ventilation intérieure [Tableau 5.3, 5.5] tout en favorisant une dispersion des polluants qui sera importante dans ce cas.

- Le profil U2 ($H/w = 0.5$) présente un flux interférant offrant une bonne ventilation extérieure tout en créant une meilleure protection au niveau piéton dans l'espace central. Ce dernier devient très exposé pour l'incidence perpendiculaire de 270° dans laquelle le vent est directement canalisé [Tableau 5.2, 5.4] créant une zone centrale critique au détriment des autres zones dans la cour où une circulation tourbillonnaire se manifeste dans les coins. Par ailleurs, la ventilation extérieure devient meilleure et uniforme pour les incidences obliques créant de différence de pression sur les façades intérieures de la cour [Tableau 5.3, 5.5], en favorisant ainsi un bon renouvellement d'air et un bon potentiel de ventilation intérieur.
- Le profil U3 à flux rasant est caractérisé par un faible potentiel de ventilation extérieure pour les trois incidences obliques où les vitesses n'ont pas dépassé 3 m/s. Le vent est dévié au-dessus des toits avec circulation tourbillonnaire stable dans l'espace central [Tableau 5.2, 5.4] car l'espacement étroit offre de fortes conditions d'abri, ce qui va réduire le potentiel de renouvellement de l'air dans le reste de la cour et implique un faible taux de ventilation intérieure car toutes les façades sont plongées dans des zones de faibles pressions [Tableau 5.3, 5.5]. Mais pour l'incidence perpendiculaire, la ventilation extérieure est sensiblement améliorée dans l'espace central (environ 4.5 m/s à 14h) que dans le reste de la cour. Le vent est directement canalisé et aspiré vers l'autre côté, ce qui permet d'améliorer le potentiel de renouvellement d'air et la ventilation intérieure.

La comparaison des résultats de la simulation en graphe [Figure 5.2] montrent que pour un angle d'incidence perpendiculaire (270°) aux bâtiments, le cas du profil U3 a marqué les vitesses du vent les plus importantes dépassant 4 m/s, par contre le profil U1 malgré la grande largeur de l'espace, les vitesses du vent étaient inférieures dont le pic atteint 3 m/s.

Tableau 5. 2 : Distribution des vitesses du vent sur les profils en U à 14h. Scénario 1, incidences N-O

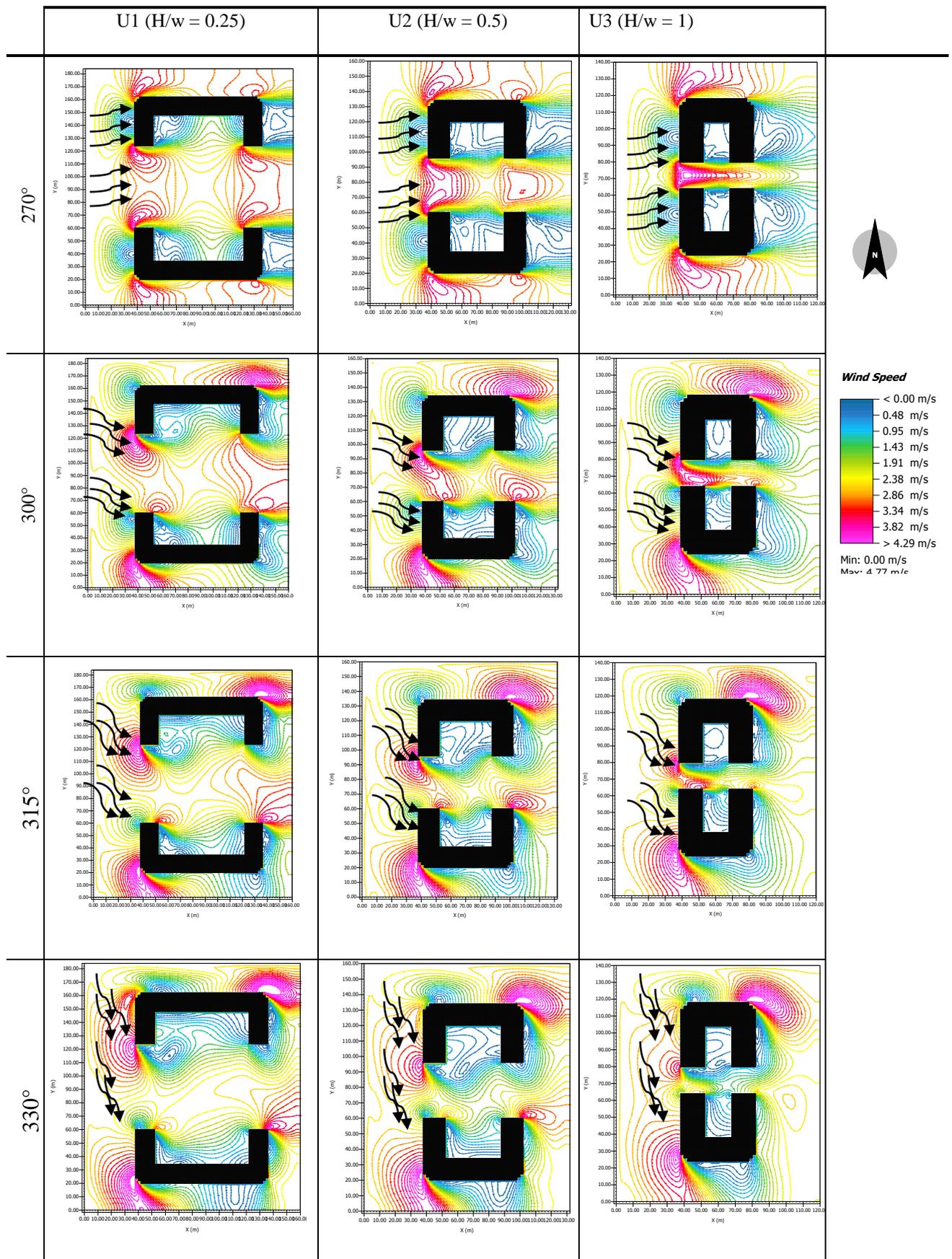
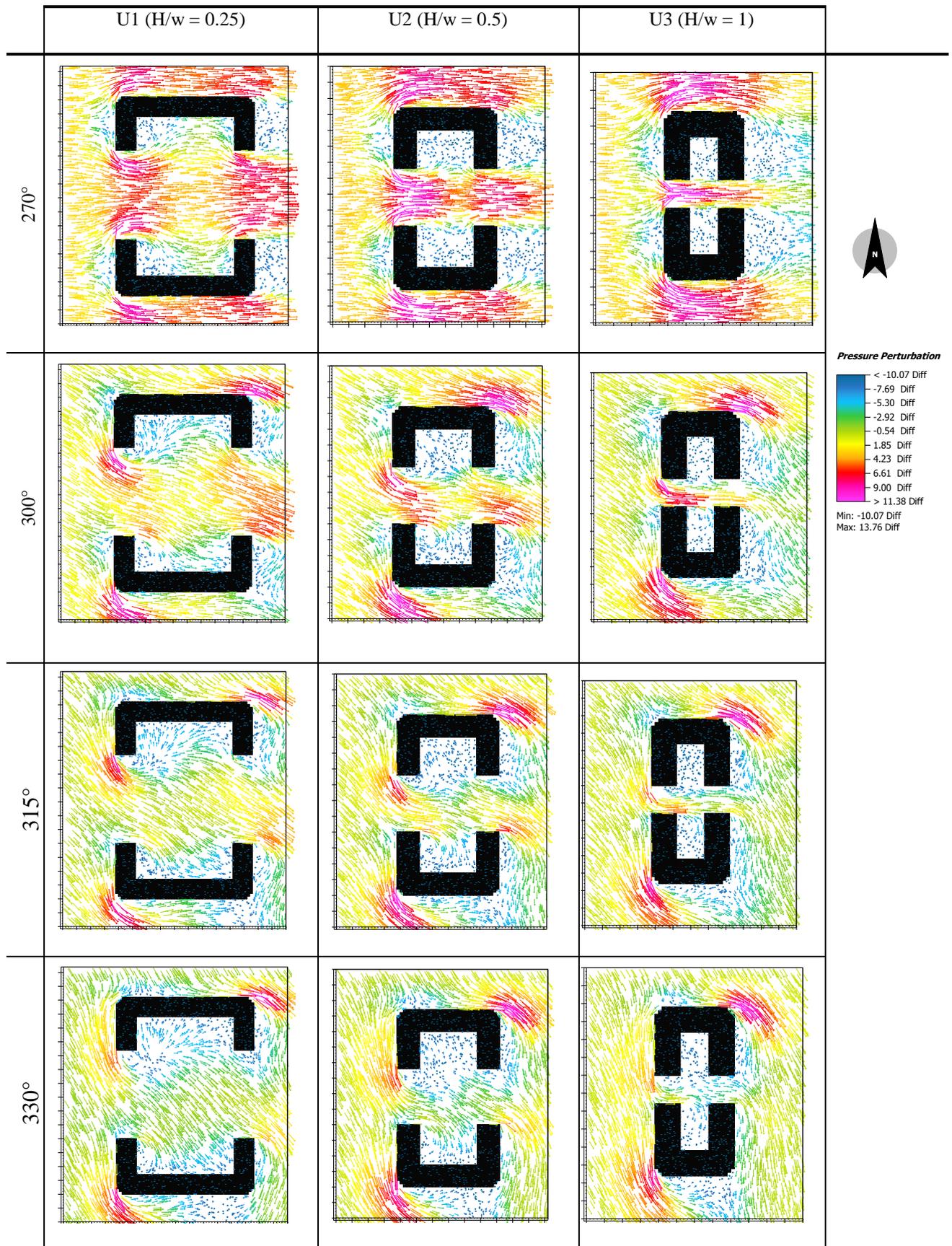


Tableau 5.3 : Distribution de la pression du vent sur les profils en U à 14h. Scénario 1, incidences N-O



Ces profils, étant définis par rapport à l'incidence du vent, présentent des situations de ventilation contrastées entre exposition et protection selon les espacements. Pour l'incidence perpendiculaire, le profil U3 est exposé au vent et très ventilé, et les deux autres profils U1 et U2 sont bien ventilés et protégé partiellement. Pour cette incidence, la rue la plus large réduit le régime d'écoulement donnant plus d'interaction entre le flux au-dessus des bâtiments et le flux dans cette rue (**Ramponi et al.2015**). En revanche, pour les incidences obliques, le scénario inverse a eu lieu. Le profil U1 et U2 sont bien ventilés alors que le profil U3 est mal ventilé.

Dans ces incidences obliques, on peut dire que le potentiel de la ventilation est réduit avec la diminution de l'écartement entre bâtiments au niveau de cet ensemble géométrique en U. Selon **Shishegar (2013)**, une rue plus large permet un meilleur mélange d'air et par conséquent une meilleure ventilation urbaine. **Yin et al. (2014)** ont montré que l'augmentation de l'espacement entre constructions favorise la ventilation urbaine.

En ce qui est de la deuxième variante en forme L, l'espace extérieur résultant est le passage localisé entre les deux bâtiments disposés perpendiculairement dont l'espacement changera selon les trois profils. Les résultats de la simulation des vitesses du vent [Figure 5.3] montrent qu'avec une incidence perpendiculaire les vitesses du vent ne dépassent pas 2.5 m/s pour les trois cas de profils, le profil L1 le plus ventilé avec une vitesse de 2.24 m/s. Mais pour les incidences obliques, la ventilation a sensiblement amélioré par rapport à l'incidence précédente et devient meilleure pour les profils L2 et L3 en particulier pour l'angle 330°. Les espacements étroits de ces deux profils deviennent exposés directement au vent [Tableau 5.6, 5.8], ce qui a favorisé l'aspiration du vent vers ce passage notamment au niveau du profil L3.

Chose qu'on peut remarquer sur les cartes graphiques qui montrent la trajectoire du vent et son comportement face aux bâtiments.

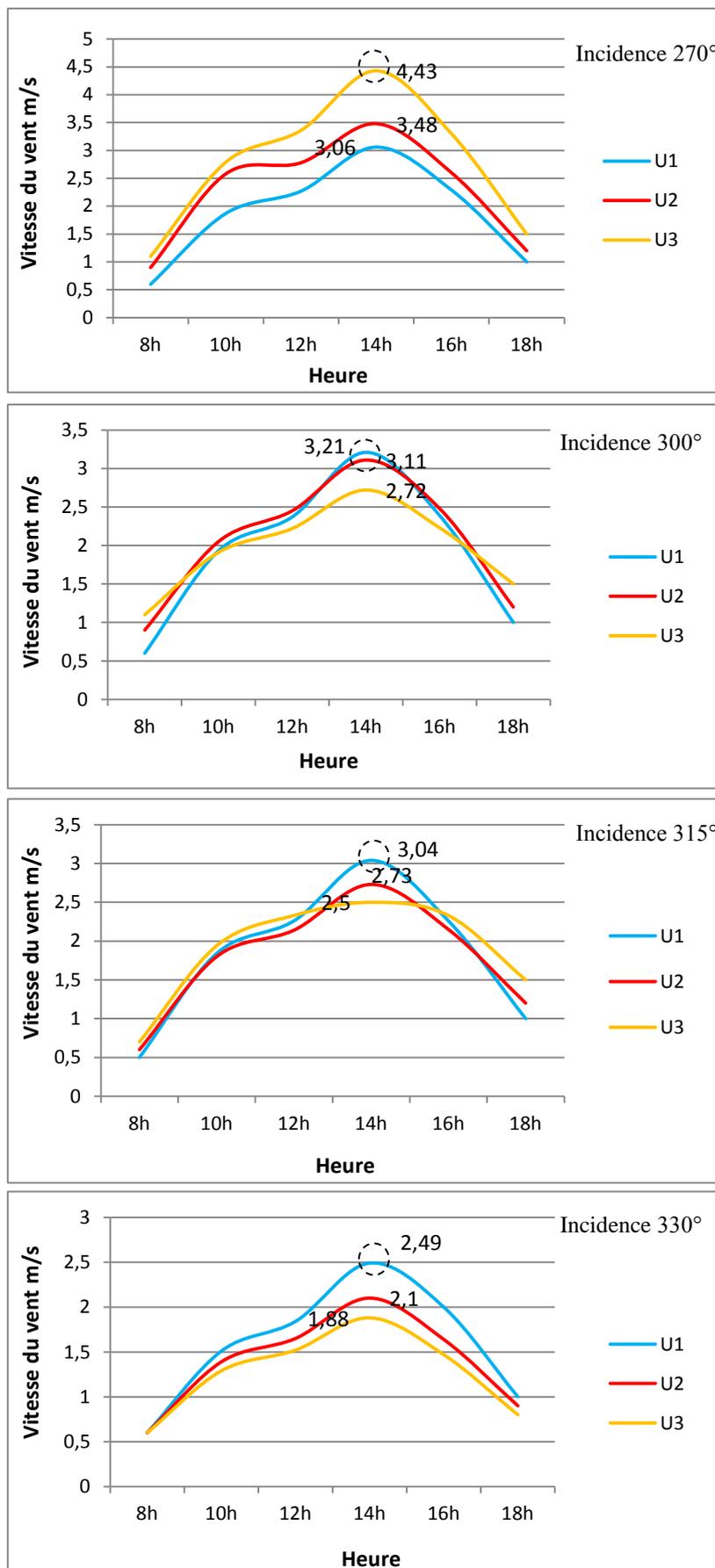


Figure 5. 2 : Résultats des vitesses du vent simulées sur les profils en U. Scénario 1, incidences N-O

Tableau 5.4 : Distribution des vitesses du vent en coupe dans l'espace des profils en U à 14h. Scénario 1, Incidences N-O

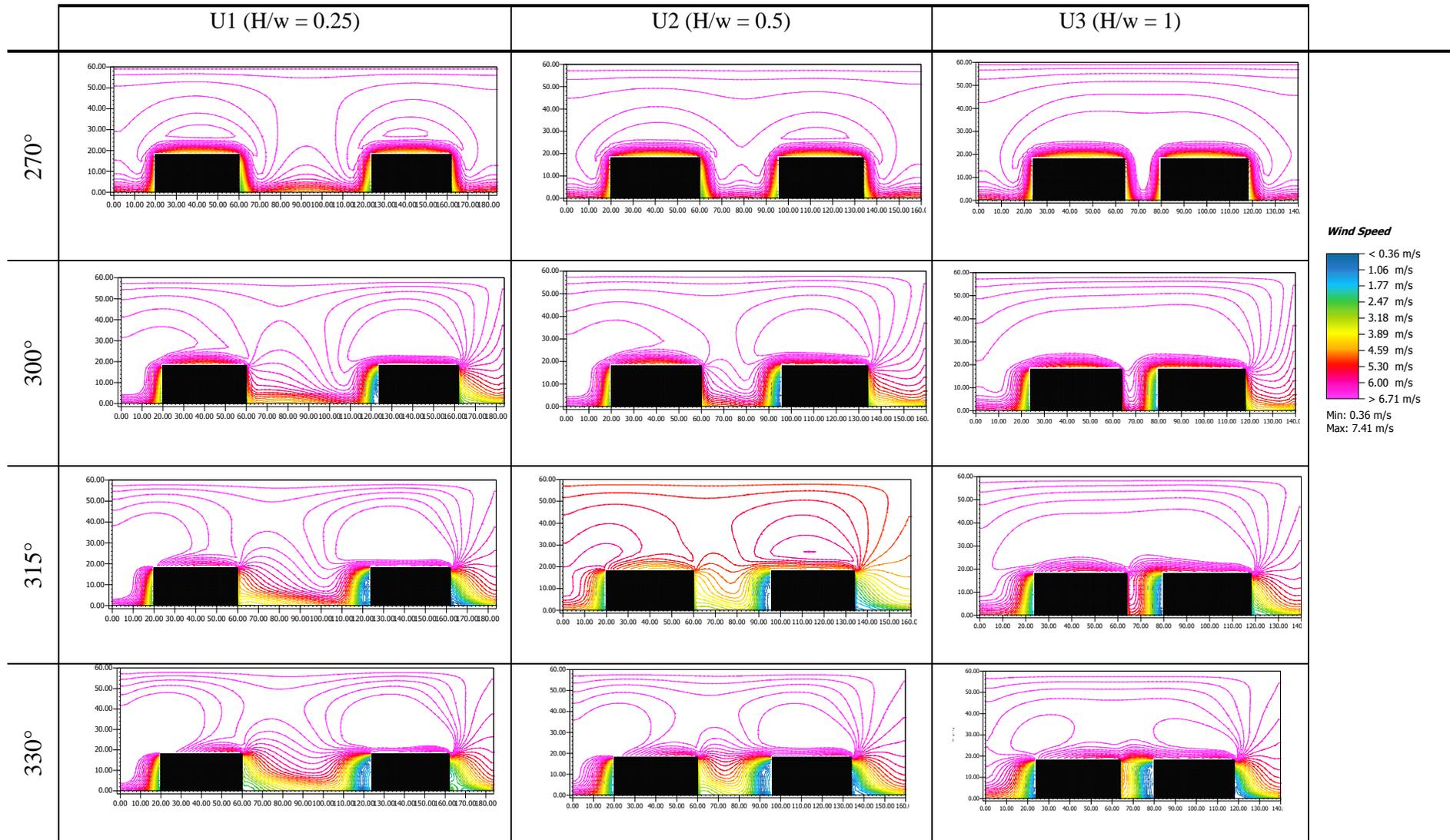
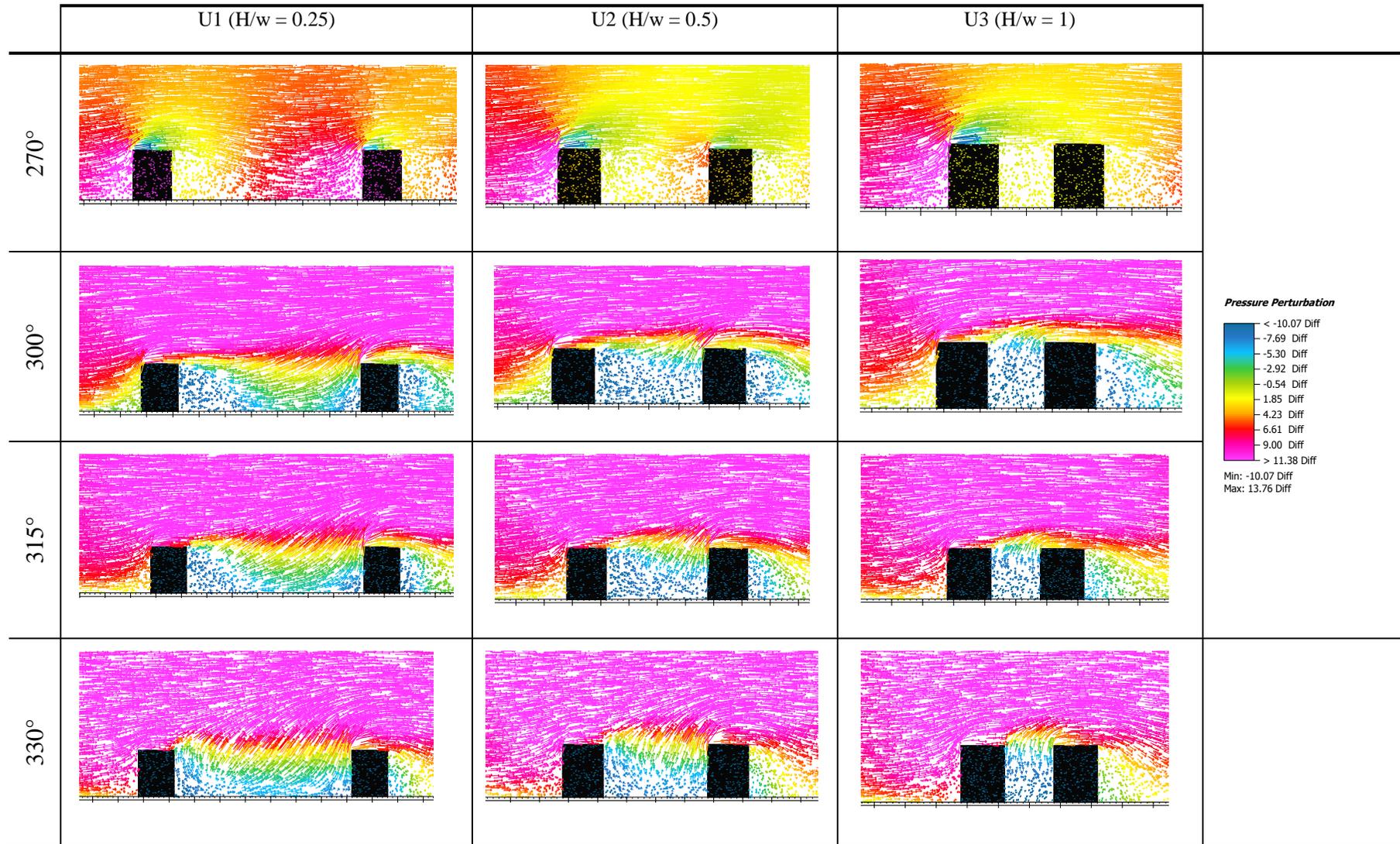


Tableau 5.5 : Distribution de la pression du vent en coupe dans la cour des profils en U à 14h. Scénario 1, Incidences N-O



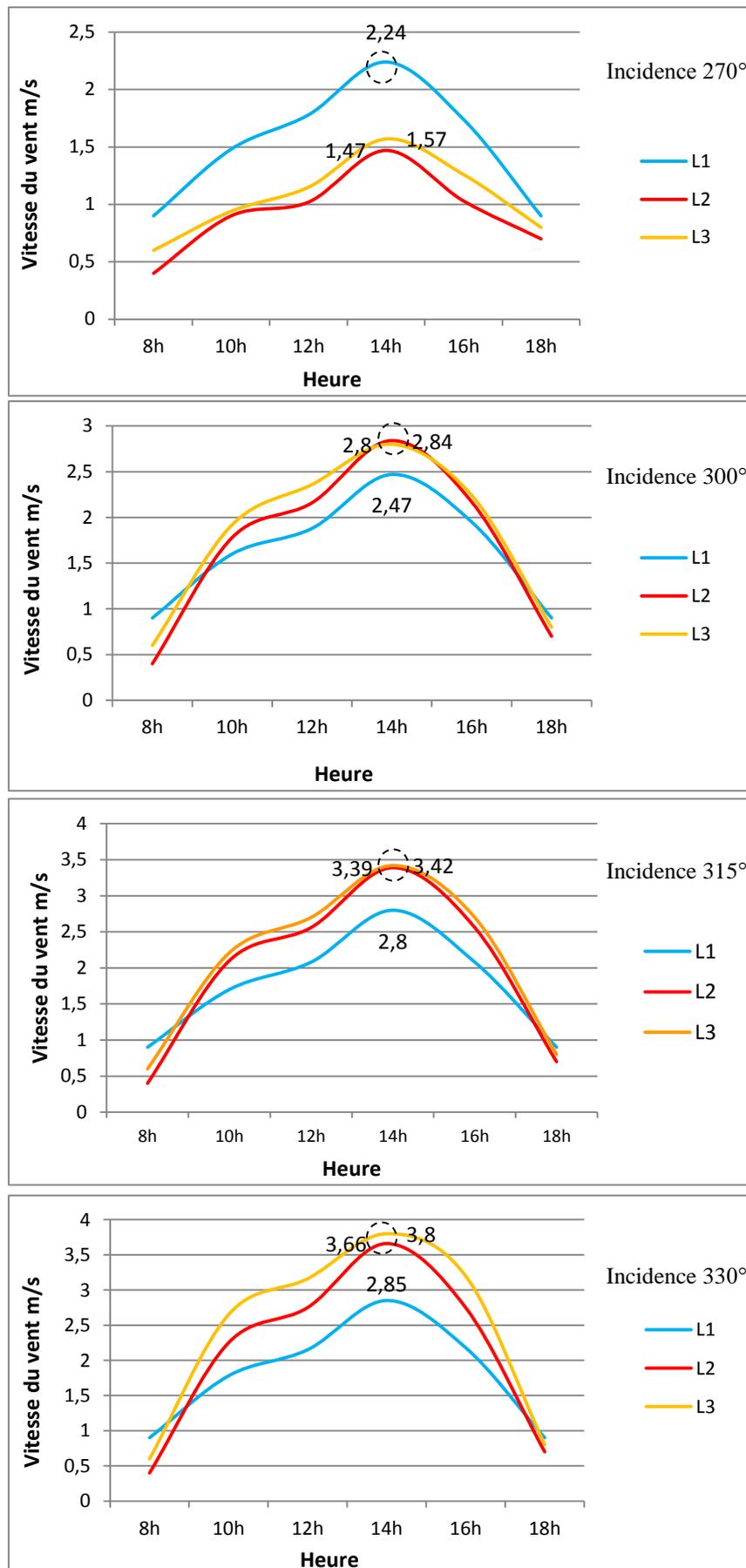


Figure 5. 3 : Résultats des vitesses du vent simulées sur les profils en L. Scénario 1, incidences N-O

En effet, pour l'incidence perpendiculaire les trois profils sont caractérisés par un faible potentiel de ventilation extérieure. Ici le vent passe par les toitures en créant derrière le bâtiment allongé la zone du vent protégée qui, par coïncidence en cette incidence perpendiculaire, se projette dans le passage qui devient donc protégé. Ce qui justifie la réduction du potentiel de ventilation notamment pour le profil L2 et L3 dans lesquelles l'espacement entre bâtiments est étroit [Tableau 5.6, 5.8]. La distribution des pressions montrent le développement d'un effet de sillage et de coin autour du bâtiment face au vent [Tableau 5.7, 5.9] ce qui engendre un faible potentiel de ventilation intérieure dans l'ensemble géométrique.

Toutefois, les incidences obliques ont permis de délocaliser la zone protégée du vent ce qui rend le passage entre bâtiments exposé directement au vent. La distribution des vitesses du vent montre que les profils L2 et L3 ont présenté une bonne ventilation extérieure et un bon renouvellement de l'air qui se répercute sur la ventilation intérieure vu la différence de pression sur les façades opposées est importantes. Ces deux profils ont subi l'effet de Venturi de telle sorte que le passage entre les bâtiments devient exposé directement au vent [Tableau 5.6, 5.8], ce qui a favorisé l'aspiration du vent vers ce passage notamment au niveau du profil L3. Le profil L1, quant à lui, devient aussi exposé au vent au niveau de cette incidence. La largeur de l'espace permet le mixage de l'air tout en favorisant une bonne ventilation extérieure. La différence de pression sur les façades pourra offrir donc un bon potentiel de ventilation intérieure [Tableau 5.7, 5.9].

Ces résultats confirment que l'écoulement du vent autour de ce genre d'ensembles géométriques irréguliers dépend de l'ouverture du passage et de son orientation par rapport au vent (**Brown et Dekay 2000**) dans lesquelles la distribution de la pression peut considérablement changer (**Gomes et al.2006**), ce qui rend le passage entre les bâtiments devient la zone la plus critique pour l'écoulement du vent (**Reiter 2008**). Les dimensions de ce passage affectaient d'une manière significative la distribution de la pression du vent sur les différentes façades en fonction de la direction du vent (**Amin et al. 2011**).

Tableau 5. 6 : Distribution des vitesses du vent dans les profils en L à 14h. Scénario 1, Incidences N-O

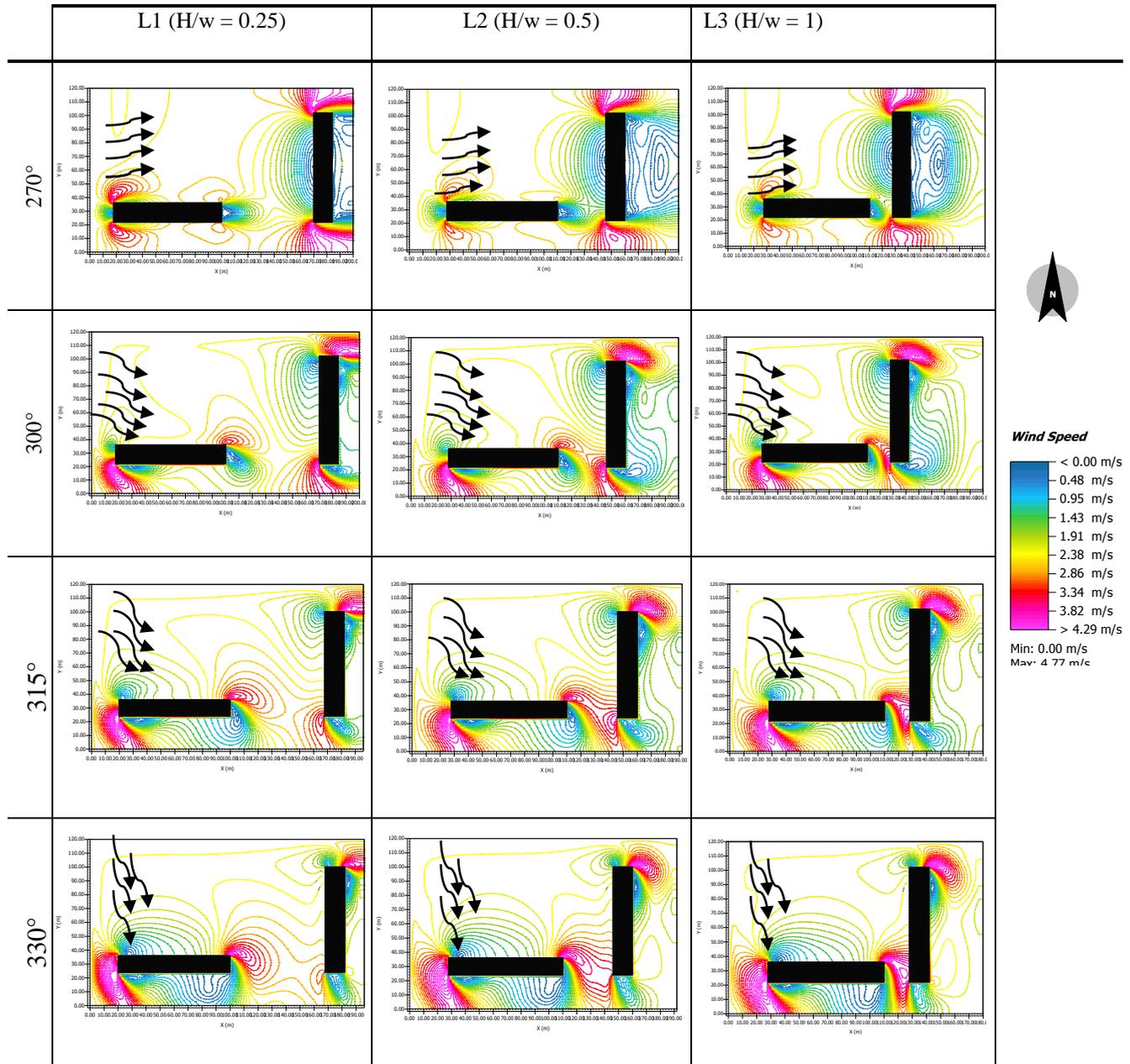


Tableau 5. 7 : Distribution de la pression du vent sur les profils en L (14h). Scénario 1, Incidences N-O

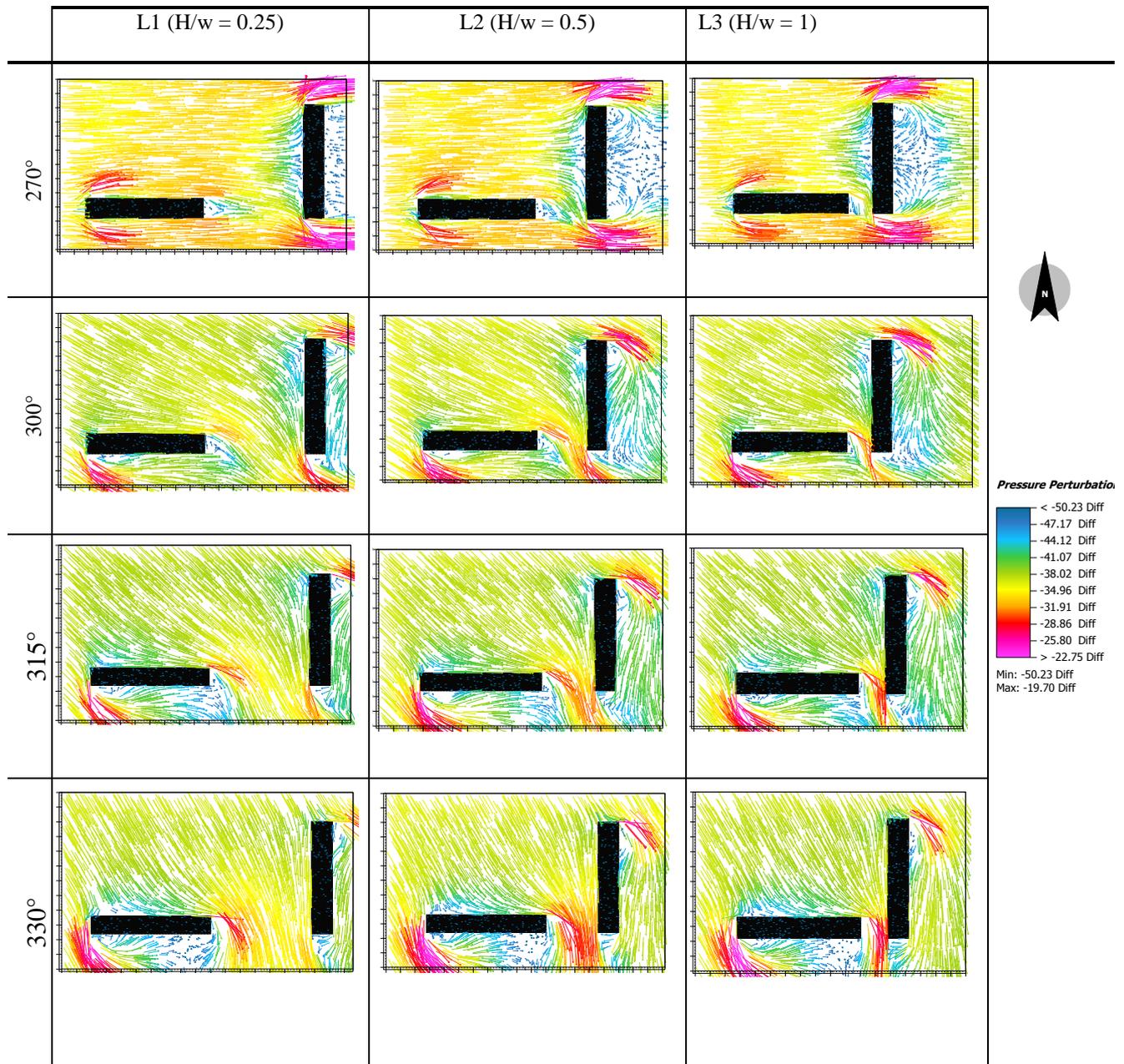


Tableau 5.8 : Distribution des vitesses du vent en coupe dans l'espace des profils en L à 14h. Scénario 1, Incidences N-O

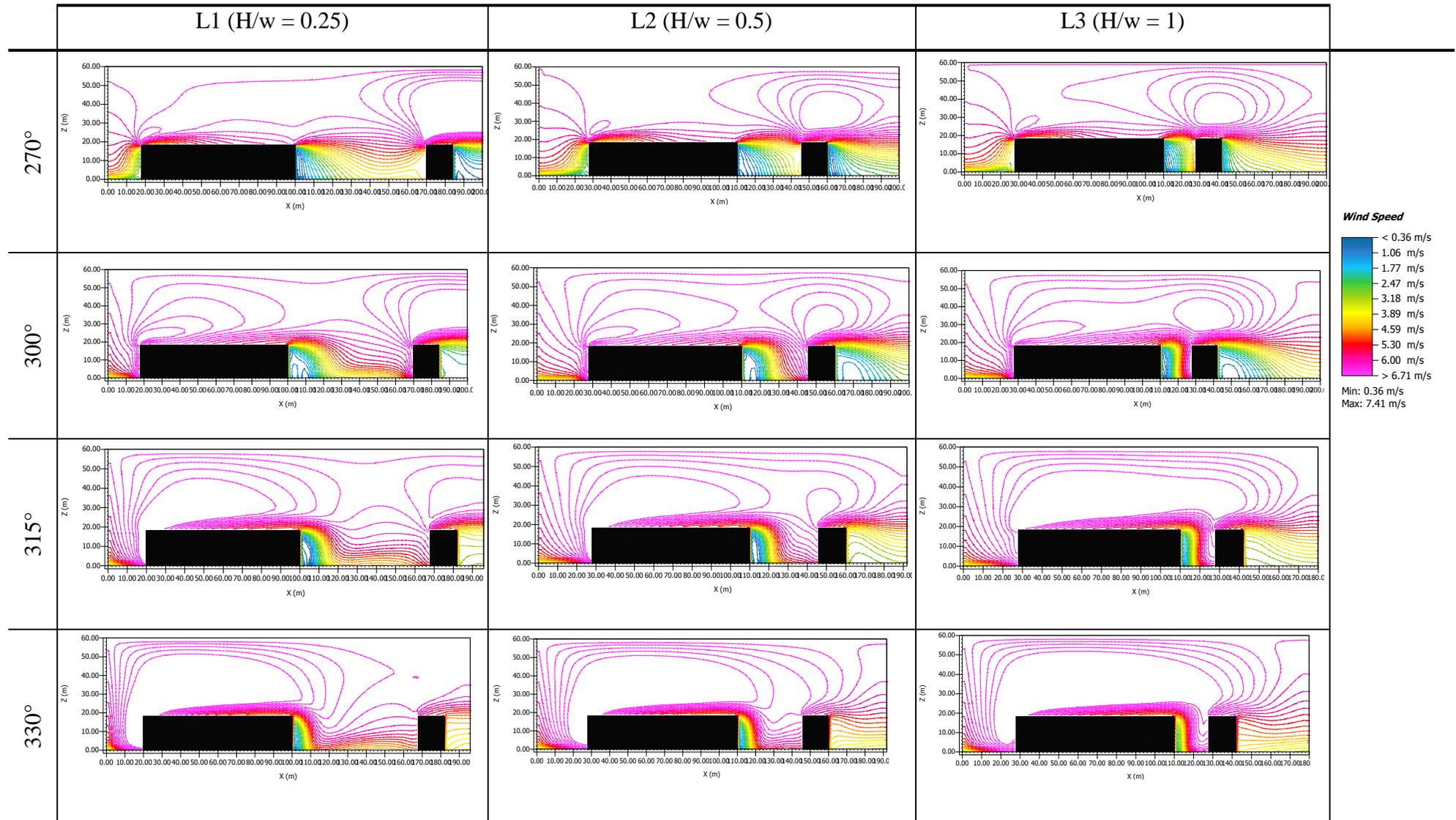
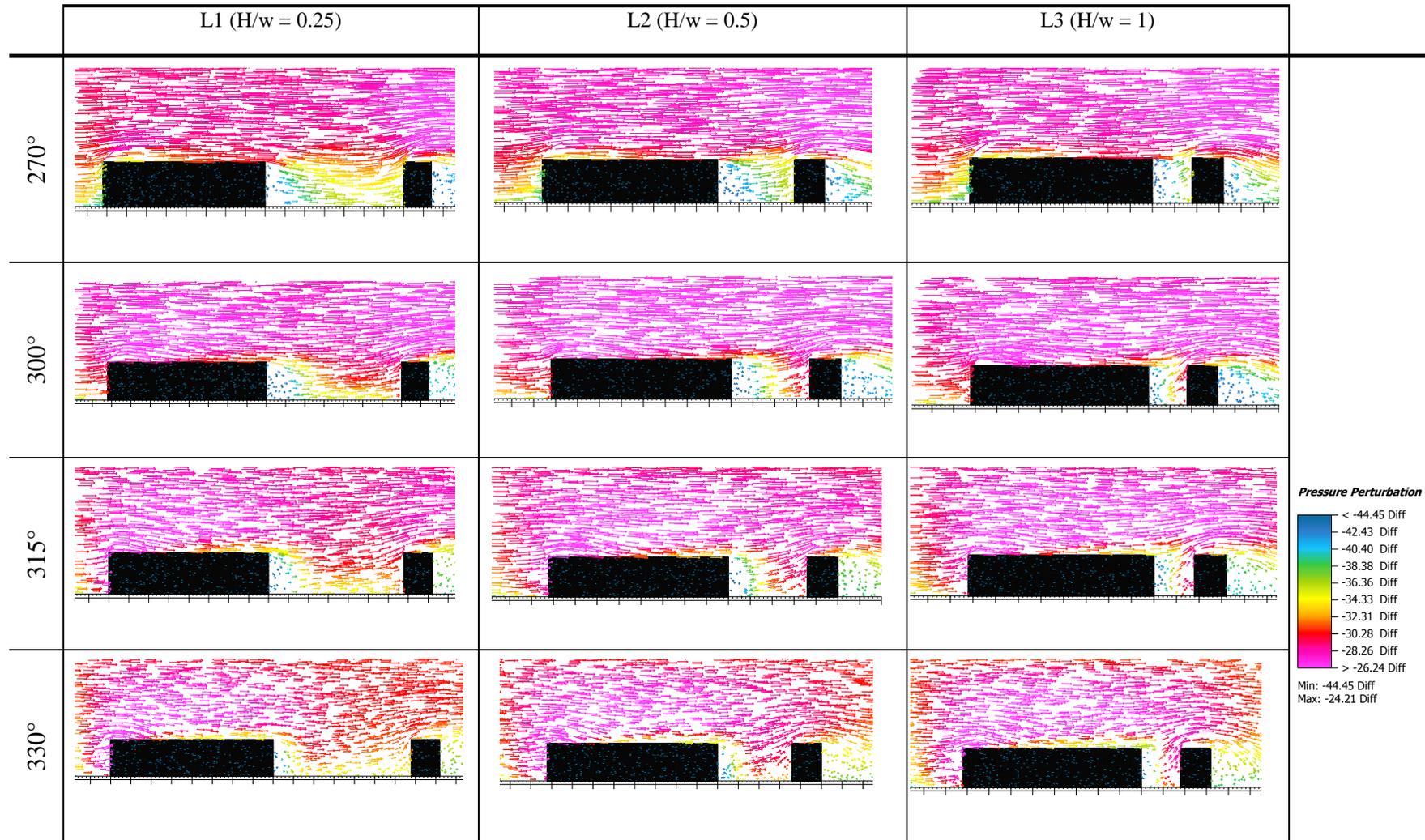


Tableau 5. 9 : Distribution de la pression du vent en coupe dans l'espace des profils en L à 14h. Scénario 1, Incidences N-O



5.3.1.2. Scénario N°2 : effet de la hauteur de l'espace sur le comportement du vent

Plusieurs recherches confirment l'effet de la hauteur sur le vent. Lorsque les obstacles sont hauts, les filets d'air sont perturbés dès le niveau des piétons. En effet, la comparaison de la distribution des vitesses du vent entre les deux cas indique que pour une incidence perpendiculaire le cas du U5, qui a la hauteur la plus élevée, a présenté les vitesses les plus élevées où le pic atteint approximativement 7 m/s [Figure 5.4]. Par contre le cas du U4 dont $H/w = 2$ a enregistré des vitesses plus faibles que les précédentes. Face au vent, une zone de surpression va se créer notamment dans l'espacement entre bâtiments. Ces surpressions sont plus importantes dans le profil U5 [Tableau 5.10]. Donc plus la hauteur est élevée plus les surpressions sont importantes (Chatelet et al.1998).

Mais le changement de l'angle d'incidence peut amplifier les vitesses et accroître les surpressions comme l'exemple de l'incidence oblique 300° et 315° dans lesquelles le profil U5 a enregistré les vitesses les plus importantes (environ 7.5m/s à 14h), d'où l'augmentation du potentiel de la ventilation extérieure.

La distribution de la pression montre la formation d'un sillage contournant l'ensemble avec un effet de coin considérable sur les deux profils. Les zones sous le vent sont marquées par un mouvement d'air tourbillonnaire dû à la formation des effets d'interférence (Sujit et al. 2015) [Tableau 5.10, 5.11]. L'étendue de la zone du sillage est plus grande dans le profil L5 en raison de la hauteur élevée. Ces tourbillons sont plus turbulents et agités dans le profil L5 que le profil L4. Ces phénomènes vont affecter le potentiel de la ventilation intérieure. A l'intérieur du canyon, on remarque l'apparition de tourbillons stables.

Dans les cours semi fermées des profils L4 et L5, le potentiel de ventilation extérieure est très faible vu que le mouvement d'air devient tourbillonnaire [Tableau 5.10, 5.12]. Les trois façades sont plongées dans des zones de faibles pressions produisant une faible ventilation intérieure au niveau des deux cours.

Par ailleurs, les résultats de la simulation de la forme en L dévoilent que le profil L5 est marqué par des vitesses du vent très importantes avec des valeurs qui varient entre 10 et 12 m/s environs pour tous les angles d'incidence oblique et le profil L4 est caractérisé par des vitesses moins importantes que les précédentes (5 - 6.5 m/s) qui s'augmentent au niveau des incidences 300° et 330° [Figure 5.5]. Le passage entre les deux bâtiments devient la zone la plus critique dans laquelle le vent est fortement aspiré et canalisé [Tableau 5.13] en raison de la hauteur élevée.

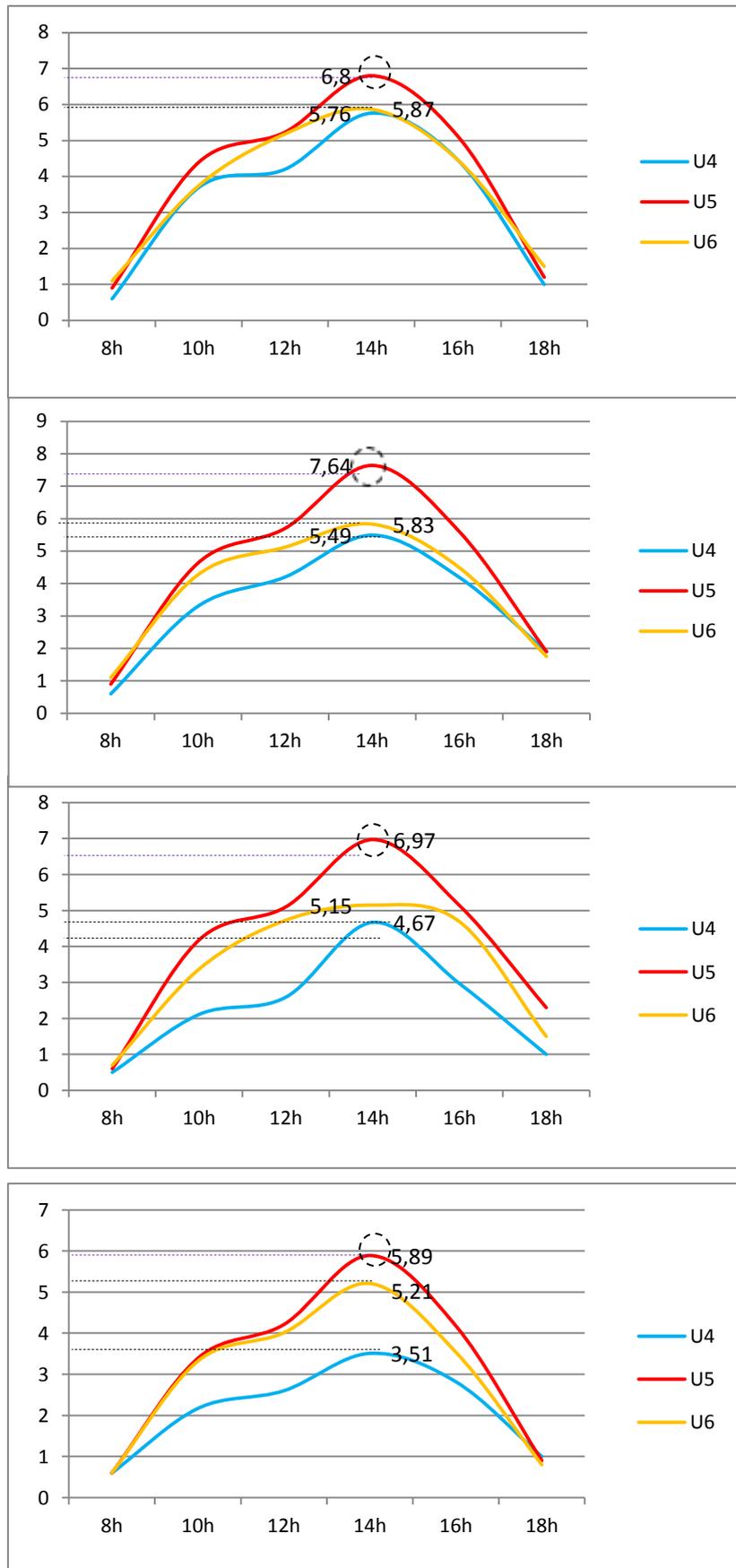


Figure 5.4 : Vitesses du vent simulées des profils en U. Scénario 2 et 3 , Incidences N-O

Tableau 5. 10 : Distribution de la pression du vent dans l'espace des profils en U à 14h. Scénario 2 et 3, Incidences N-O

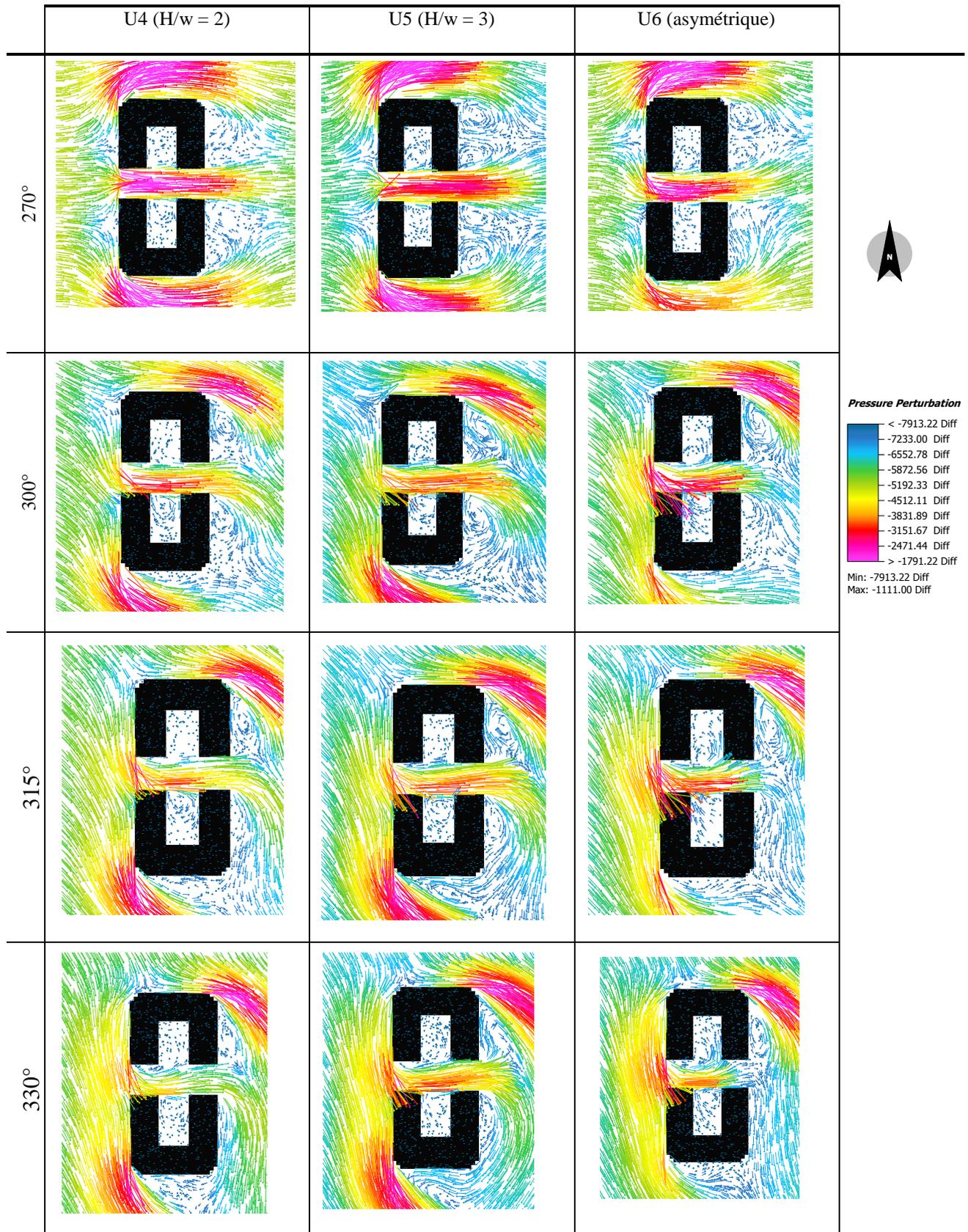


Tableau 5. 11 : Distribution des vitesses du vent en coupe dans l'espace des profils en U à 14h. Scénario 2 et 3, Incidences N-O

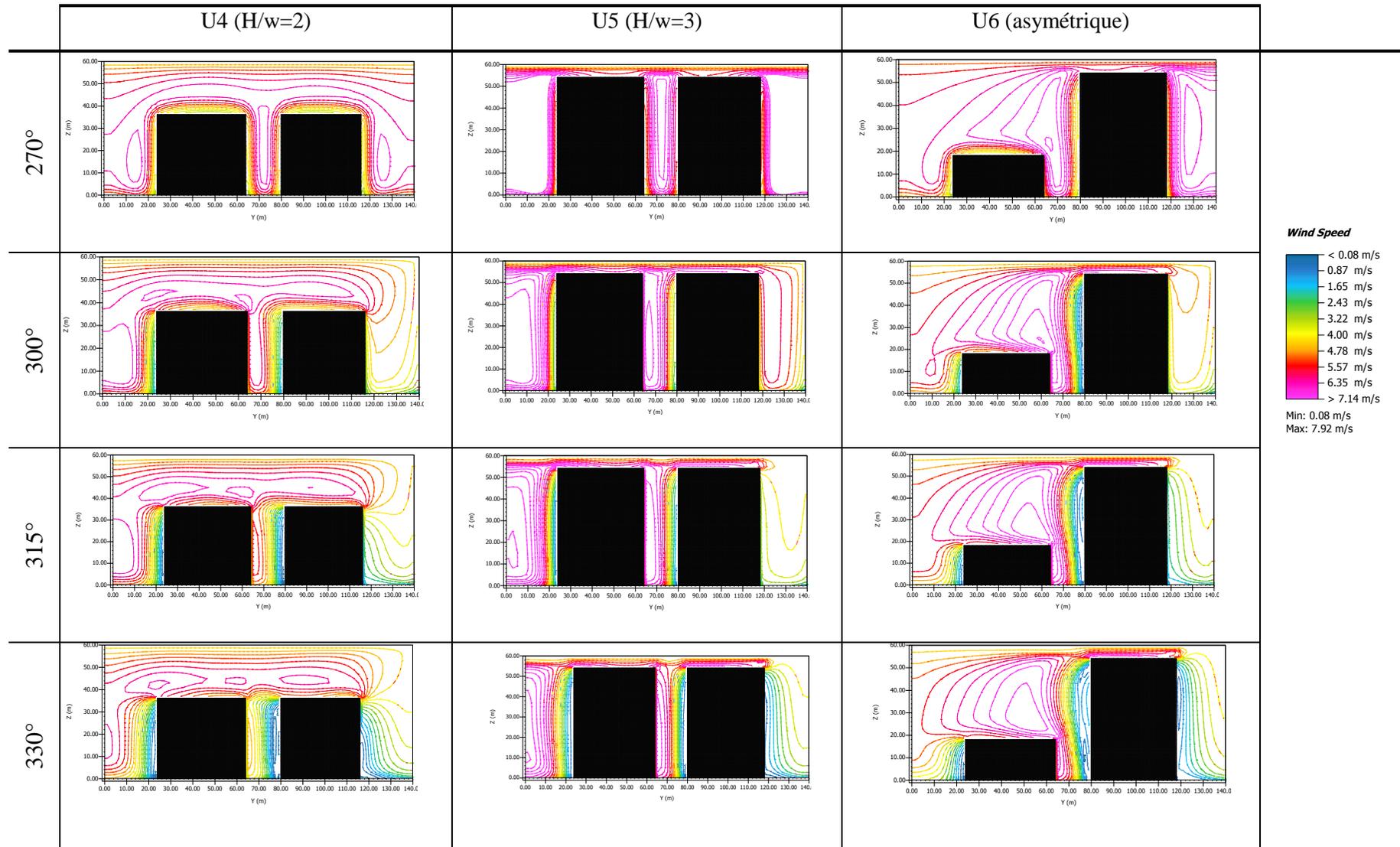
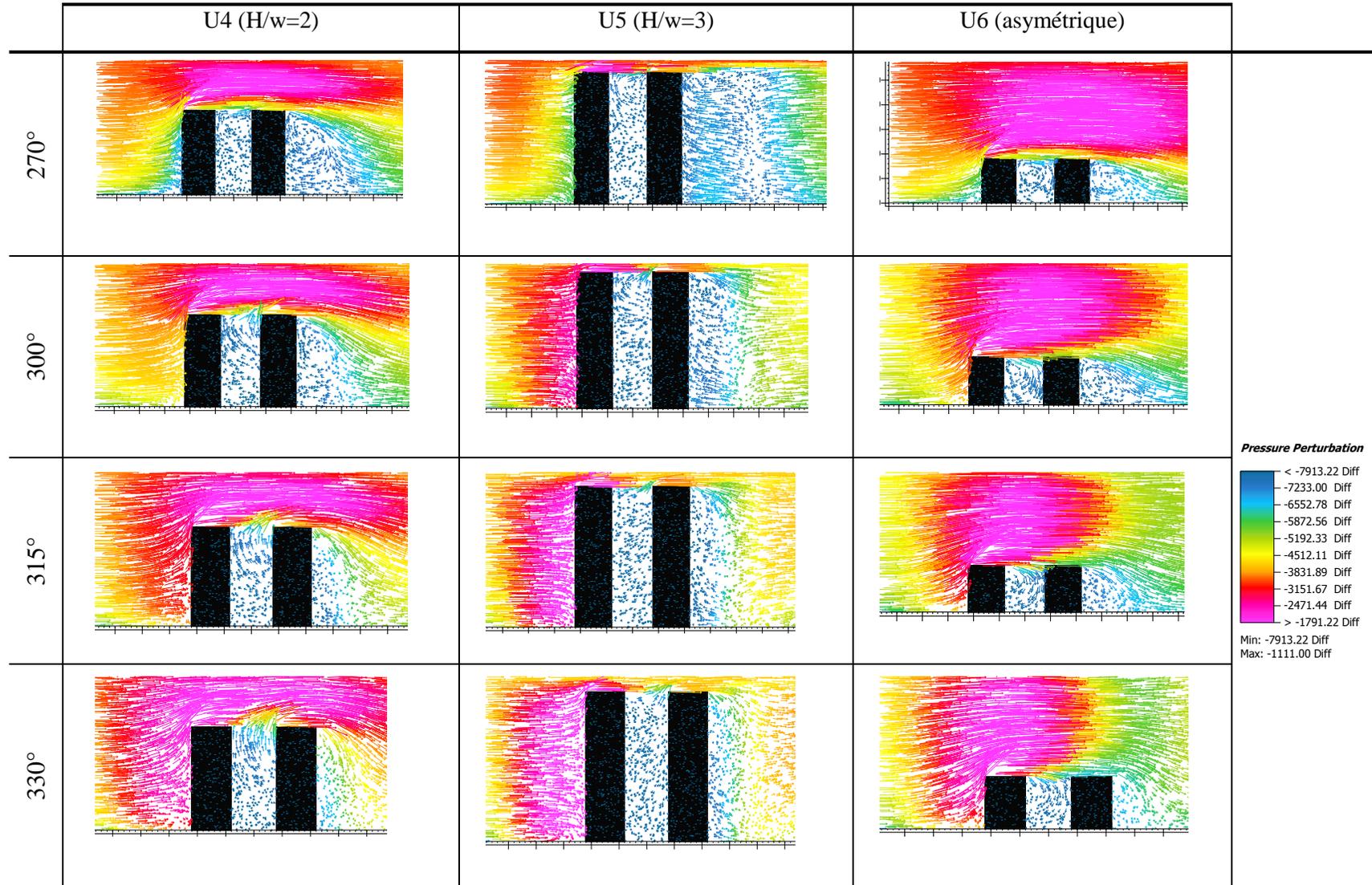


Tableau 5. 12 : Distribution de la pression du vent en coupe dans la cour des profils en U à 14h. Scénario 2 et 3, Incidences N-O



La distribution des vitesses révèle que le flux dans ce passage est principalement déterminé par la combinaison des courants de coin, l'angle d'ouverture et le sillage qui a contourné les bâtiments [Tableau 5.13, 5.14, 5.15]. La ventilation extérieure est d'autant plus importante que la hauteur est grande. Le coté sous le vent est marqué par une circulation tourbillonnaire dont l'étendue de la zone d'ombre est plus longue dans le profil L5 que dans le profil L4.

La ventilation extérieure s'est réduite dans l'incidence perpendiculaire où les vitesses du vent ne dépassent pas 6 m/s pour le profil L5 et 3 m/s pour le profil L4 [Figure 5.5]. Ceci s'explique par le fait que le passage entre les deux bâtiments se localise dans la zone d'ombre protégée du bâtiment allongé et la zone de décollement du sillage, ce qui a conduit à la diminution de la vitesse par rapport aux incidences précédentes, et implique une bonne ventilation intérieure [Tableau 5.13, 5.14, 5.15].

Ces résultats de simulation montrent qu'effectivement la hauteur du bâtiment influe l'écoulement du vent et accélère sa vitesse dès le niveau piéton (Wang et al. 2016, Ying et al.2016).

5.3.1.3. Scénario N°3 : effet de changement du gabarit (profil asymétrique)

Ici c'est le cas de deux bâtiments dont le profil varie rapidement. Autrement dit c'est l'association de bâtiments ayant de hauteurs différentes. Quand il s'agit de bâtiments parallèles avec une incidence perpendiculaire, un effet Wise va se produire dans l'espace entre bâtiments comme le cas de la forme U. Lorsque le vent frappe le bâtiment élevé, l'écoulement se modifie ; aux environ de $\frac{3}{4}$ de la hauteur du bâtiment (région de stagnation), le vent se divise [Tableau 5.10, 5.11]. Au-dessus de cette hauteur il se dirige vers le haut et passe par-dessus du toit du bâtiment haut pour ensuite au-dessous il descend en formant un tourbillon dans l'espacement entre les deux bâtiments. Ce phénomène contribue à accroître la vitesse du vent qui atteint 6 m/s pour les angles 270° et 300° , et 5.20 m/s pour les angles 315° et 330° [Figure 5.4]. Cette réduction de la vitesse s'explique par le déplacement de la zone tourbillonnaire vers la zone amont de l'espace en changeant l'angle d'incidence.

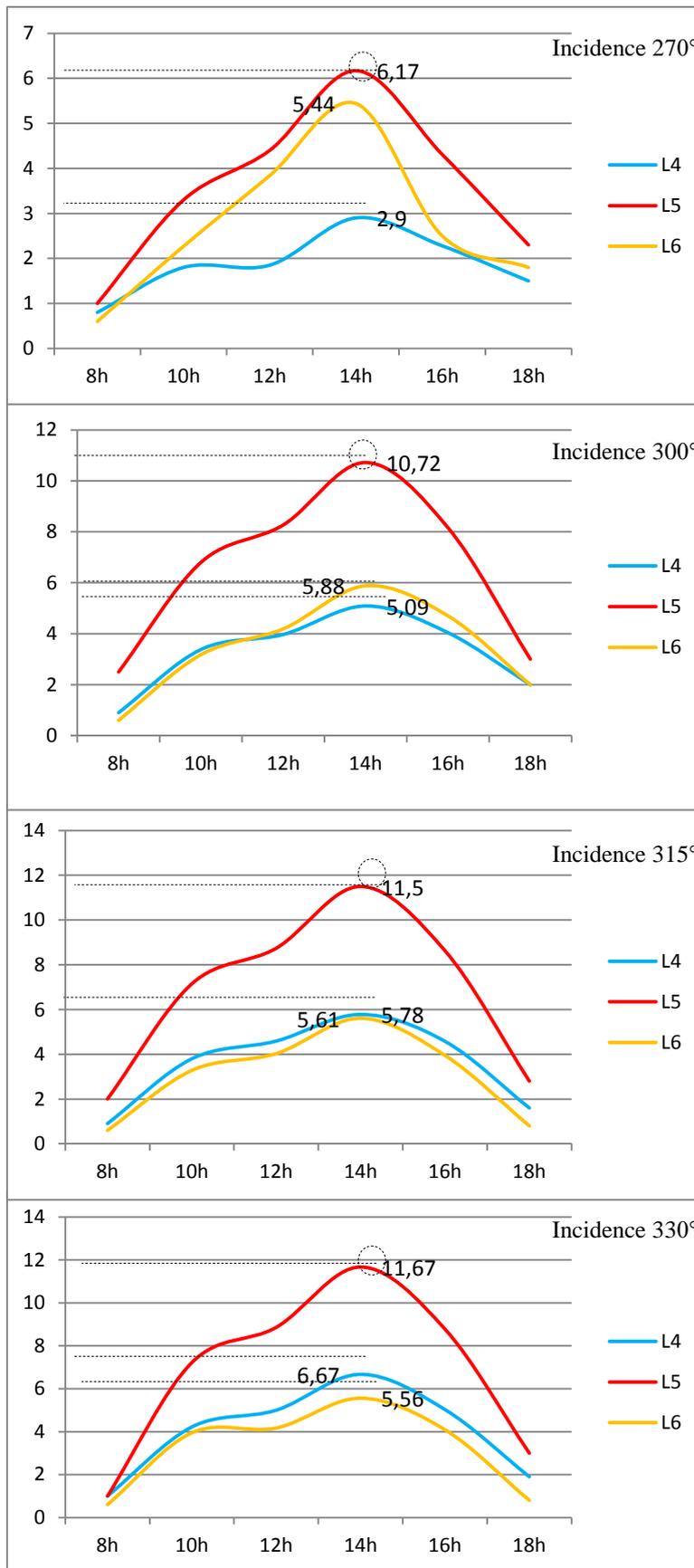


Figure 5.5 : Vitesses du vent simulées des profils en L. Scénario 2 et 3, incidences N-O

Tableau 5. 13 : Distribution de la pression du vent dans l'espace des profils en L à 14h. Scénario 2 et 3, Incidences N-O

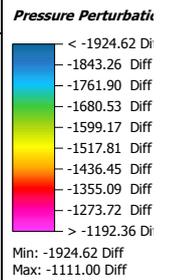
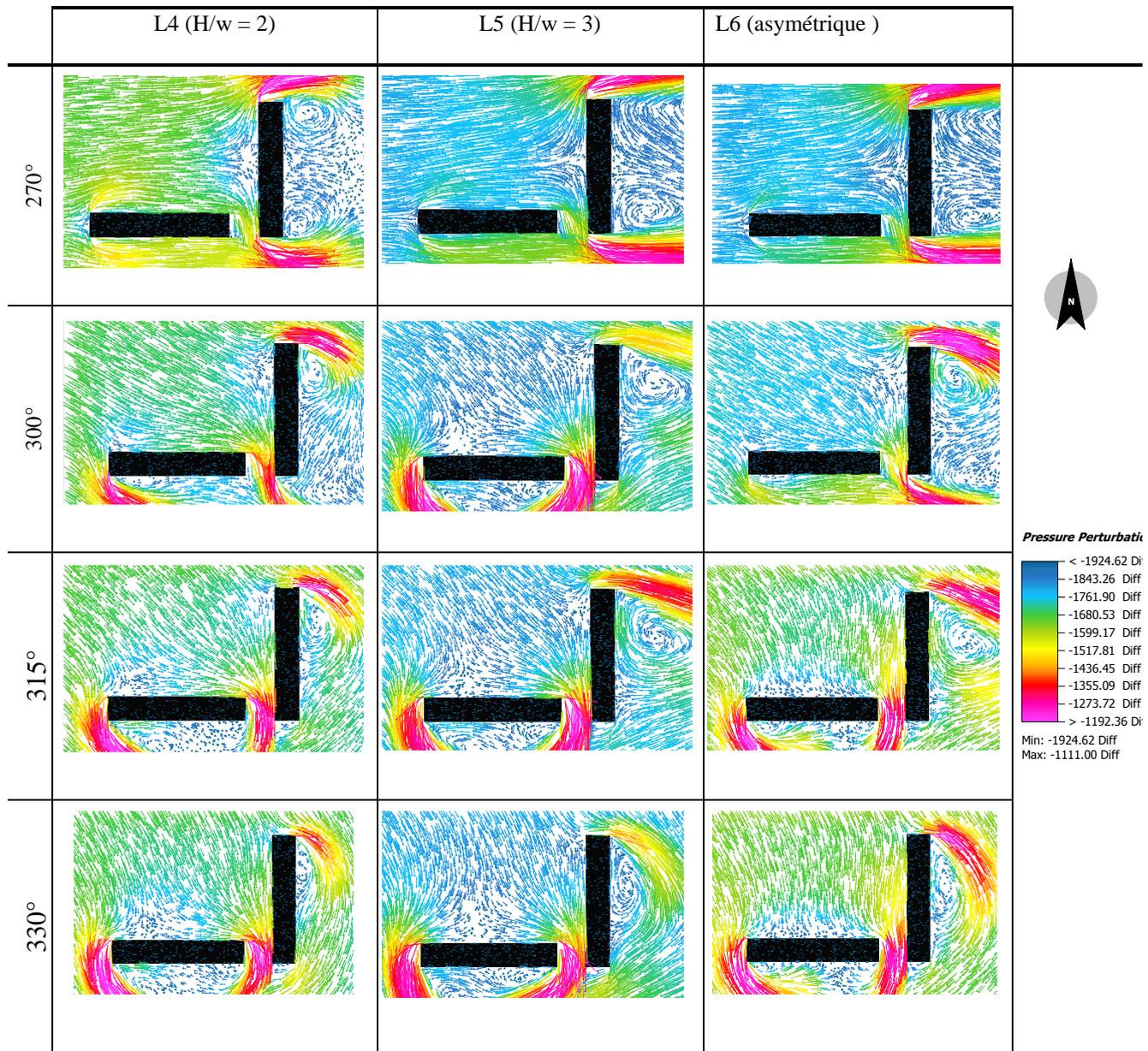


Tableau 5. 14 : Distribution de la vitesse du vent en coupe dans l'espace des profils en L à 14h. Scénario 2 et 3, Incidences N-O

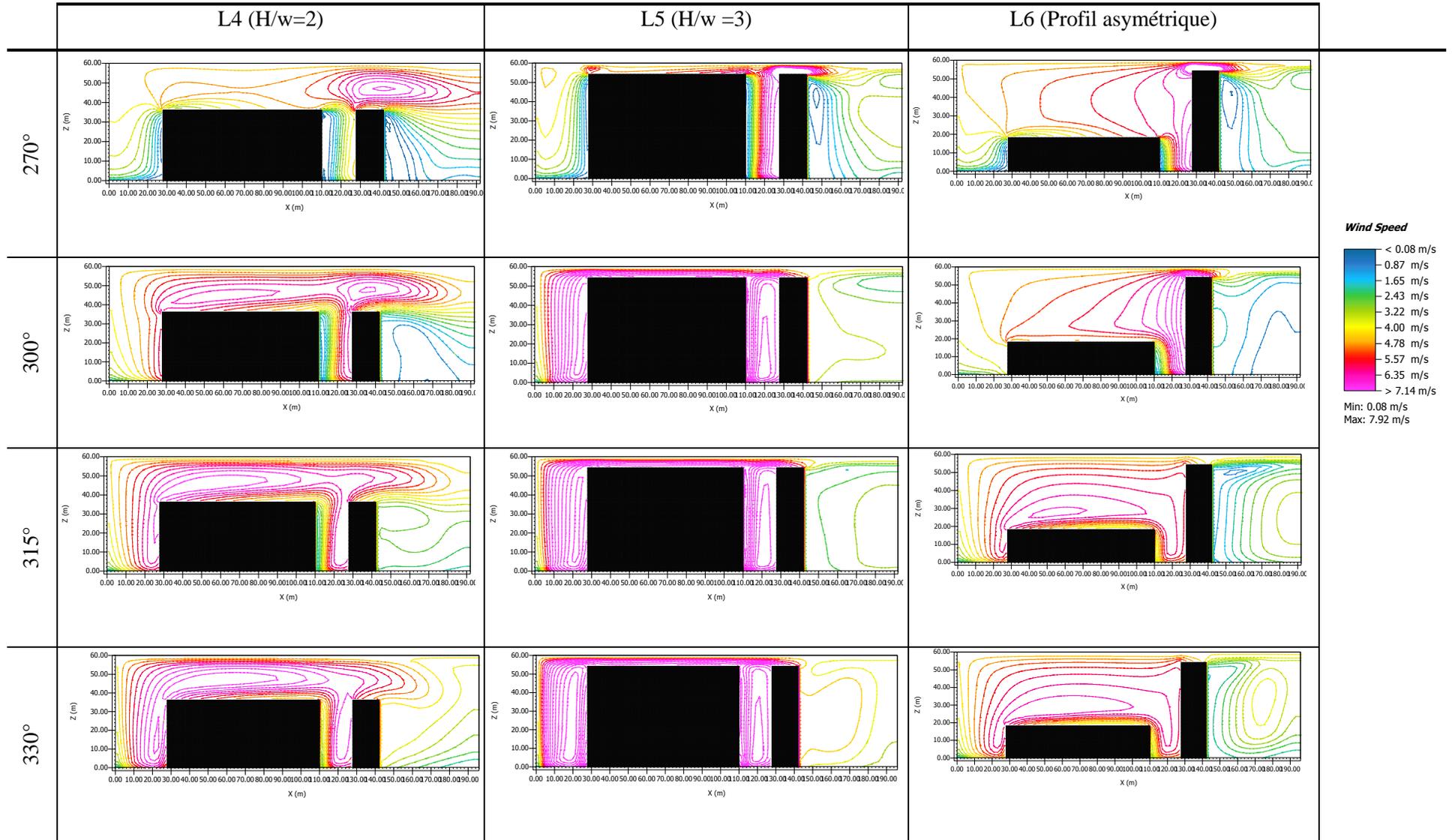
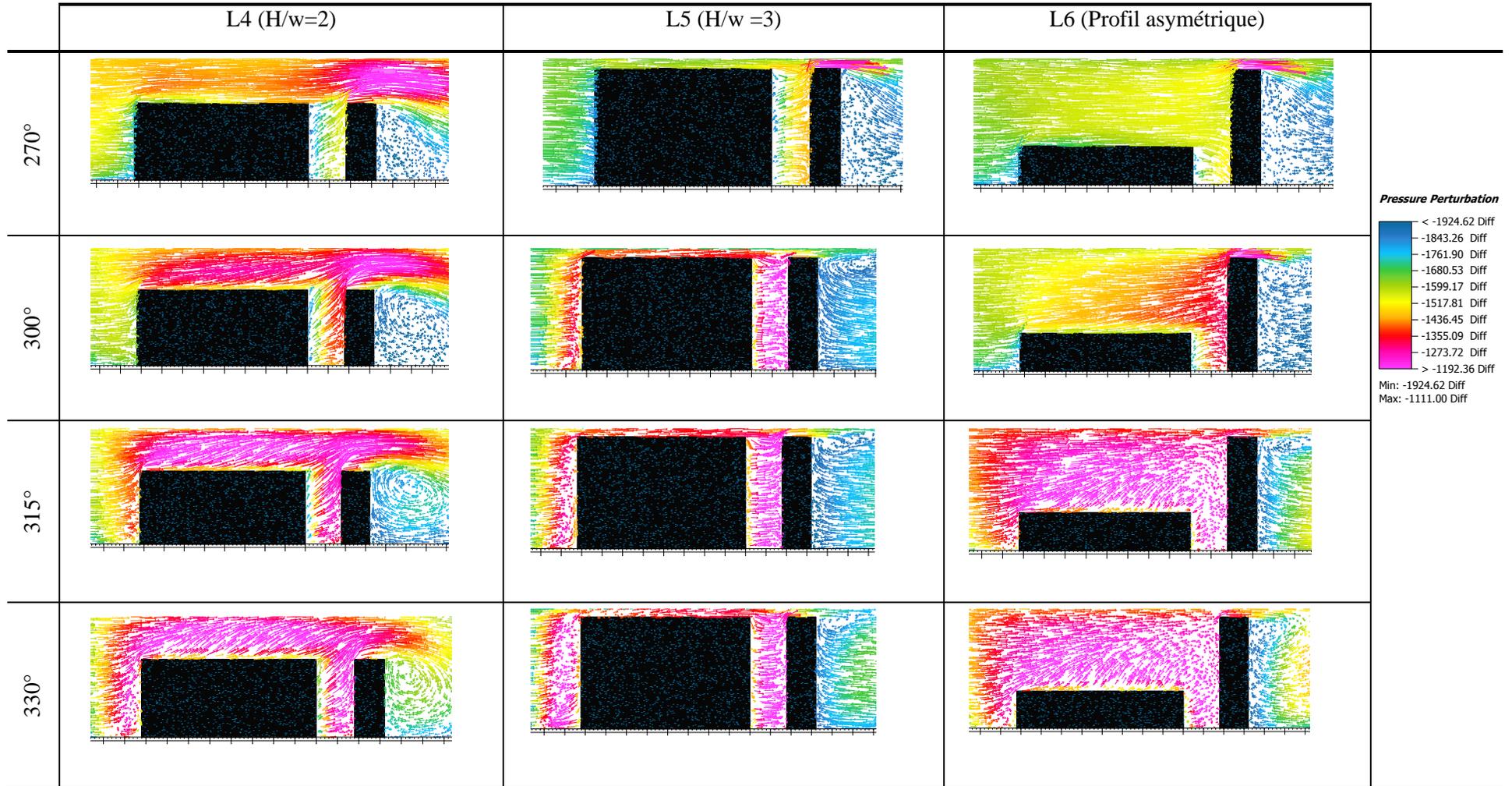


Tableau 5. 15 : Distribution de la pression du vent en coupe dans l'espace des profils en L à 14h. Scénario 2 et 3, Incidences N-O



Ce phénomène de formation de tourbillon au pied de bâtiment haut c'est reproduit au niveau de la forme L mais sans qu'il y est l'effet Wise car les bâtiments sont perpendiculaires. C'est au niveau des incidences obliques que les vitesses s'amplifient, l'espace devient face au vent. Après avoir formé le tourbillon dans l'espacement, le vent contourne les coins exposés qui influent l'espace entre les bâtiments. Autrement dit, des changements dans les régimes de ventilation naturelle peuvent se produire en raison de pressions de vent positives sur les toits des bâtiments de faible hauteur (**Sergey et al.2016**).

En conclusion, ces résultats s'accordent avec ceux des recherches antérieures qui ont indiqué qu'une hauteur faible pourrait créer un environnement moins venteux dans les zones urbaines et que les bâtiments élevés créeraient des vents forts au niveau des piétons (**Wang et al. 2016**). L'assemblage de bâtiments de faible et grande hauteur influe le régime de la ventilation. Si un bâtiment de faible hauteur est situé à côté d'un bâtiment de grande hauteur, des zones de haute et basse pression sont générées en amont et en aval (**Sergey et al. 2016**)

5.3.2. Synthèse

Selon les résultats de cette première partie de simulation, on peut citer partiellement les conclusions suivantes :

- La géométrie de l'espace extérieur est la plus décisive dans la définition des écoulements de l'air. Cette géométrie intègre tous les espacements entre bâtiments et les profils H/w qui est influencé par les caractéristiques géométriques de la largeur et la hauteur de l'espace.
- L'espacement entre bâtiments doit être évalué en combinaison avec l'incidence du vent. En effet, l'orientation du bâti par rapport à la direction est au même titre déterminant, puisqu'elle conduit à l'amplification ou la diminution du taux de ventilation d'un tissu urbain.
- La largeur de l'espace influe sur le comportement du vent :
 - ✓ Pour la forme U, la ventilation est potentiellement meilleure lorsque la largeur entre bâtiments est importante (**Shishegar 2013, Yin et al. 2014**). Le cas le plus pertinent est l'espacement large défini par rapport à l'angle d'incidence oblique de 330° (équivalent à -30° / N-O) dans lequel les vitesses enregistrées ne dépassent pas 3 m/s. Pareillement pour les angles d'incidence de 300° et 315° , les vitesses enregistrées pour le même cas ne dépassent pas 3.5 m/s.

Cependant le cas le plus défavorable est l'espace étroit où le profil U3 est défini par rapport à l'angle d'incidence de 270° (équivalent à $-90^\circ/O$).

- ✓ Pour la forme L, la ventilation est meilleure lorsque la largeur entre bâtiments est réduite. Mais cela peut conduire à l'augmentation des vitesses et à un inconfort aérodynamique dans l'espace extérieur tel que le cas du profil U3 qui est le plus défavorable et défini par rapport à l'angle de 330° ($-30^\circ / N-O$). Alors que le cas pertinent est celui du profil U1 associé à l'angle 270° où les vitesses du vent ne dépassent pas 2.5 m/s.
- La hauteur influe également sur le comportement du vent ; une hauteur de bâtiment élevée conduit à une vitesse de vent plus élevée au niveau du piéton
 - ✓ Pour la forme U, l'effet de la hauteur sur le vent était remarquable notamment par rapport au cas du profil U5 pour toutes les incidences où les vitesses du vent ont dépassé 5m/s le seuil admis des nuisances et des gênes mécaniques dues au vent. Par contre lorsque $H/w=2$ ceci n'a pas eu d'influence sauf pour les angles d'incidence de 270° et 300° où les vitesses du vent ont dépassé 5 m/s. De ce fait, le cas le plus favorable est le profil U4 associé à l'angle d'incidence oblique de 330° (équivalente à $-30^\circ/N-O$). Par ailleurs, le cas le plus défavorable est celui du profil U5 associé à toutes les incidences
 - ✓ Pour la forme L, l'effet de la hauteur est important plus particulièrement au niveau du cas du profil L5 car les vitesses du vent ont dépassé largement 5 m/s allant vers 12 m/s. Le cas le plus favorable est lié à l'angle d'incidence 270° où les vitesses du vent pour le cas du profil L4 n'accèdent pas 3.5 m/s et 6.5 m/s pour le profil L5. Par contre les incidences obliques restent à déconseiller pour telle configuration.
 - ✓ La différence de gabarit ou le cas du profil asymétrique a aussi une influence non négligeable. Pour les deux formes U et L, les vitesses du vent ne dépassent pas 5.5 m/s pour l'incidence 330° et 315° et 6 m/s pour l'incidence 270° et 300° . Mais l'incidence perpendiculaire est déconseillée lorsque les bâtiments sont parallèles.

5.3.3. Selon les différents angles d'incidence E/N-E

5.3.3.1. Scénario N°1 : effet de la largeur de l'espace sur le comportement du vent

Pour la forme U, les résultats de la simulation en graphe [Figure 5.6] montrent que les vitesses les plus importantes ont été enregistrées lorsque l'incidence est perpendiculaire (90°) notamment au niveau du profil U3 où les vitesses du vent atteignent 6 m/s. Le cas des autres profils ($H/w = 0.25$, $H/W = 0.5$), les vitesses du vent ne dépassent pas 5 m/s.

Ici, le potentiel de la ventilation extérieur est important au niveau du profil U3 où l'espacement entre les bâtiments est exposé directement et le vent a tendance à être canalisé [Tableau 5.16, 5.18]. La distribution de la vitesse indique la formation d'un sillage contournant l'ensemble géométrique avec un vent fort aux coins et deux tourbillons installés dans la zone sous le vent [Tableau 5.17]. Son intensité sera réduite au niveau des deux autres.

Mais dans les deux cours, la circulation du vent devient agitée et les vitesses sont très faibles au niveau des profils U2 et U3 ce qui implique une mauvaise ventilation extérieure et un potentiel de ventilation intérieure réduit à cause des faibles pressions sur les façades [Tableau 5.19]. Par contre au niveau du profil U1 la ventilation dans les cours est meilleure.

Pour les angles d'incidence obliques 45° et 60° , les vitesses du vent ne dépassent pas 5.5 m/s pour les trois profils. Les vitesses les plus importantes étaient enregistrées au niveau du profil U3 et modéré au niveau du profil U2 et U1. Le vent se dévie au-dessus de l'espace entre bâtiments et passe par les toitures, produisant un bon mixage d'air et un bon potentiel de ventilation extérieure dans l'espacement [Tableau 5.16, 5.18]. La ventilation dans les deux cours est meilleure au niveau du profil U1 et faible au niveau des deux profils U2 et U3 avec une circulation tourbillonnaire [Tableau 5.19].

Par ailleurs, tous les espacements sont protégés dans l'incidence 30° (proche du parallèle) d'où le potentiel de ventilation était réduit avec la réduction de l'écartement entre bâtiment.

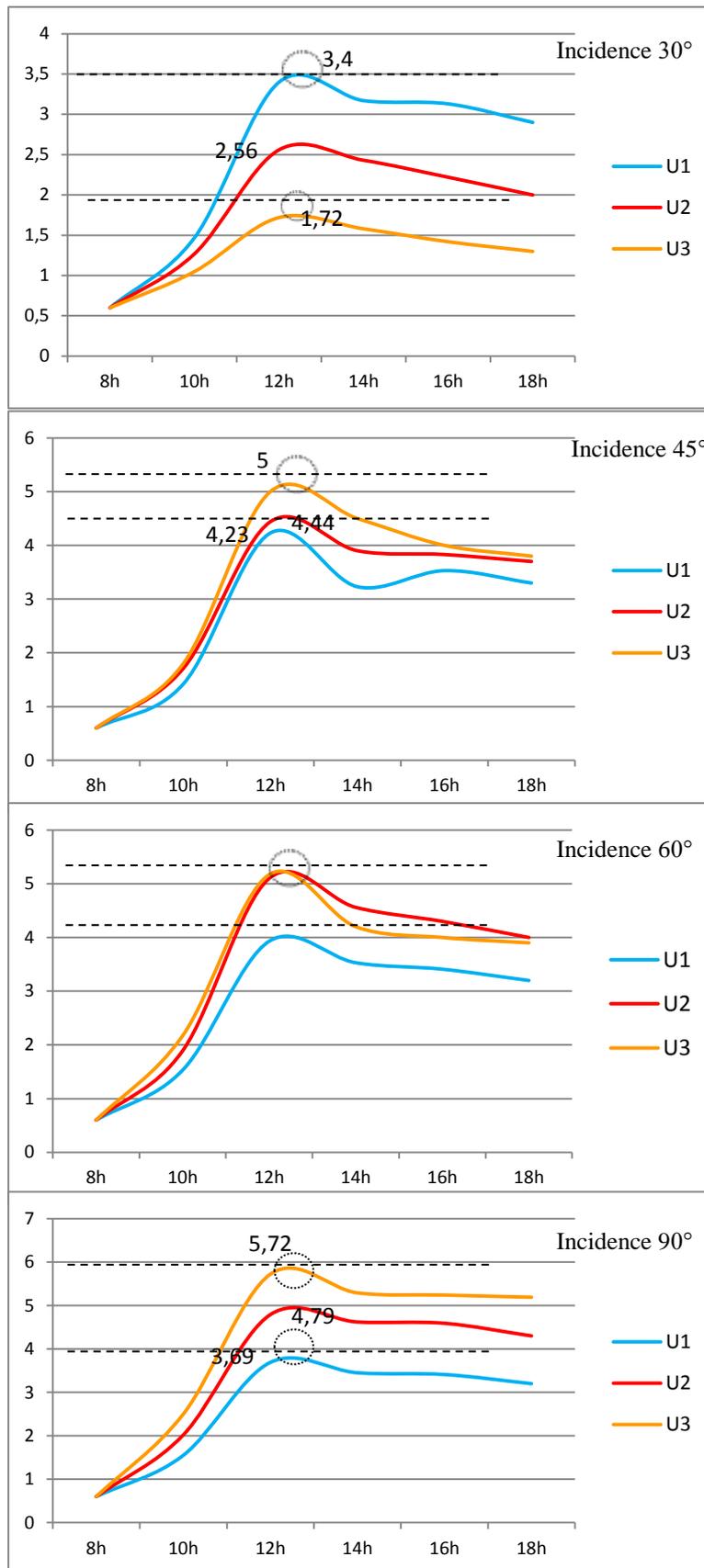


Figure 5. 6 : Vitesses du vent simulées des profils en U. Scénario 1, incidences N-E

Tableau 5. 16 : Distribution de la vitesse du vent des profils en U à 12h. Scénario 1, Incidences N-E

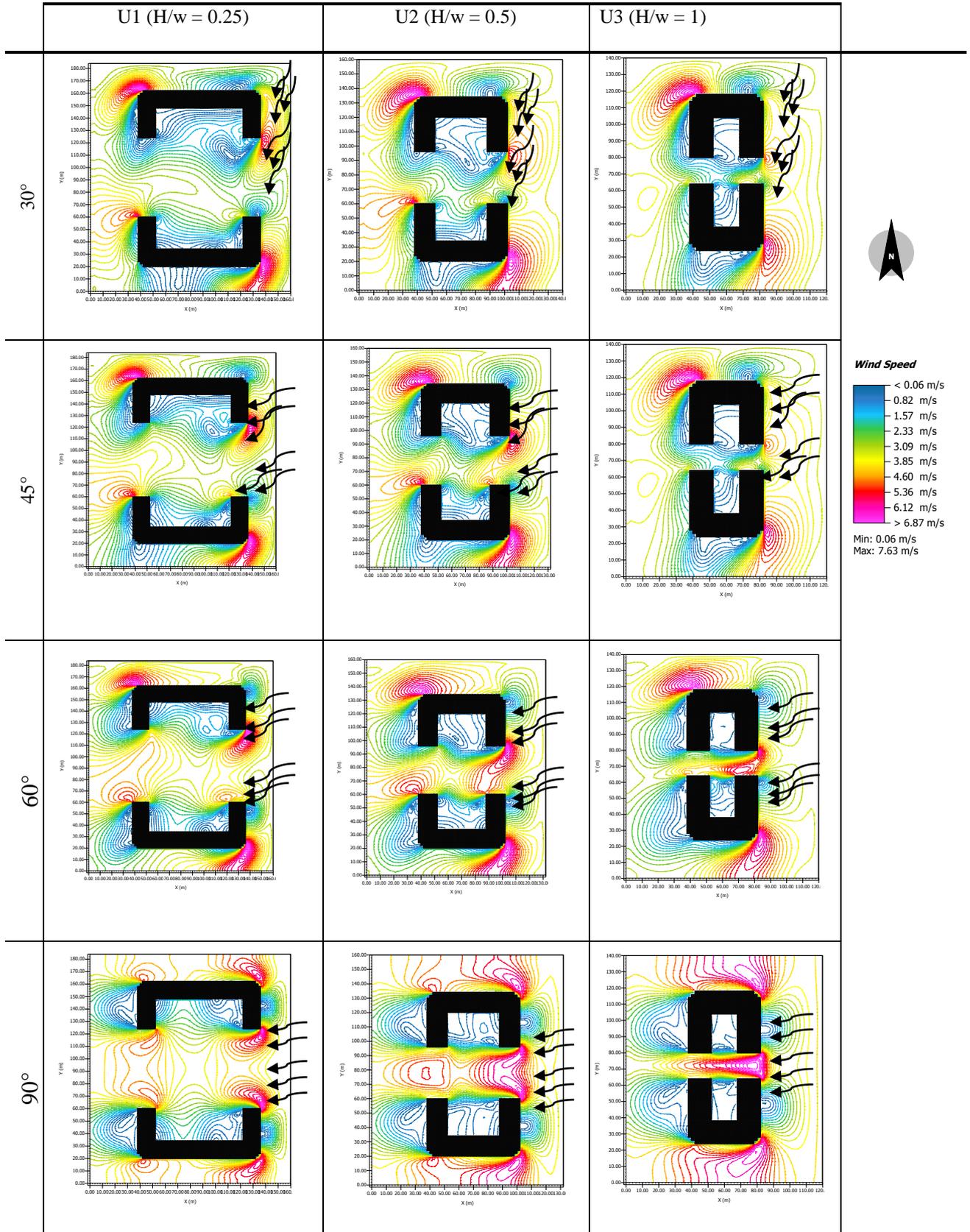


Tableau 5. 17 : Distribution de la pression du vent des profils en U à 12h. Scénario 1, Incidences N-E

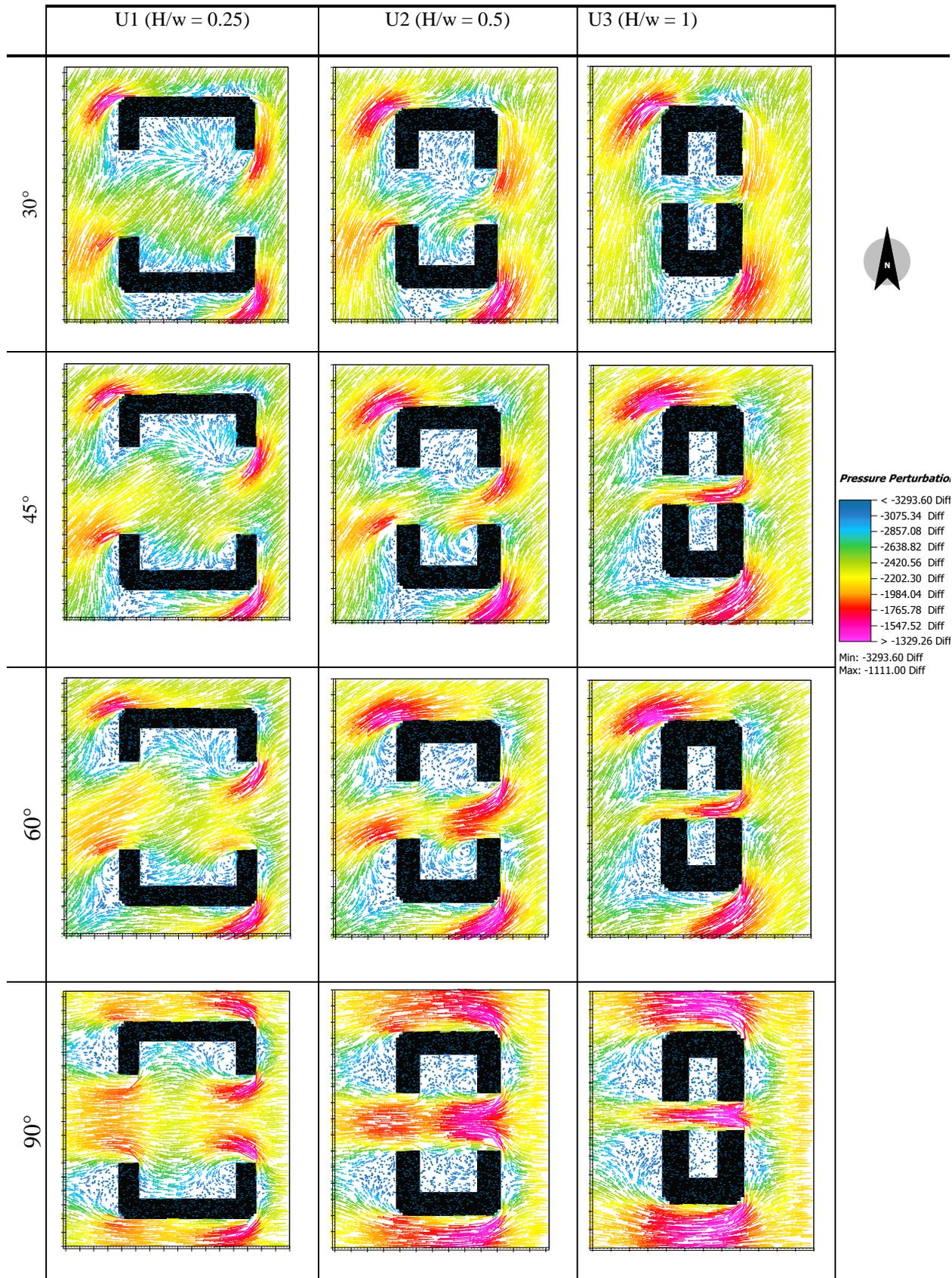


Tableau 5. 18 : Distribution de la vitesse du vent en coupe dans l'espace des profils en U à 12h. Scénario 1, Incidences N-E

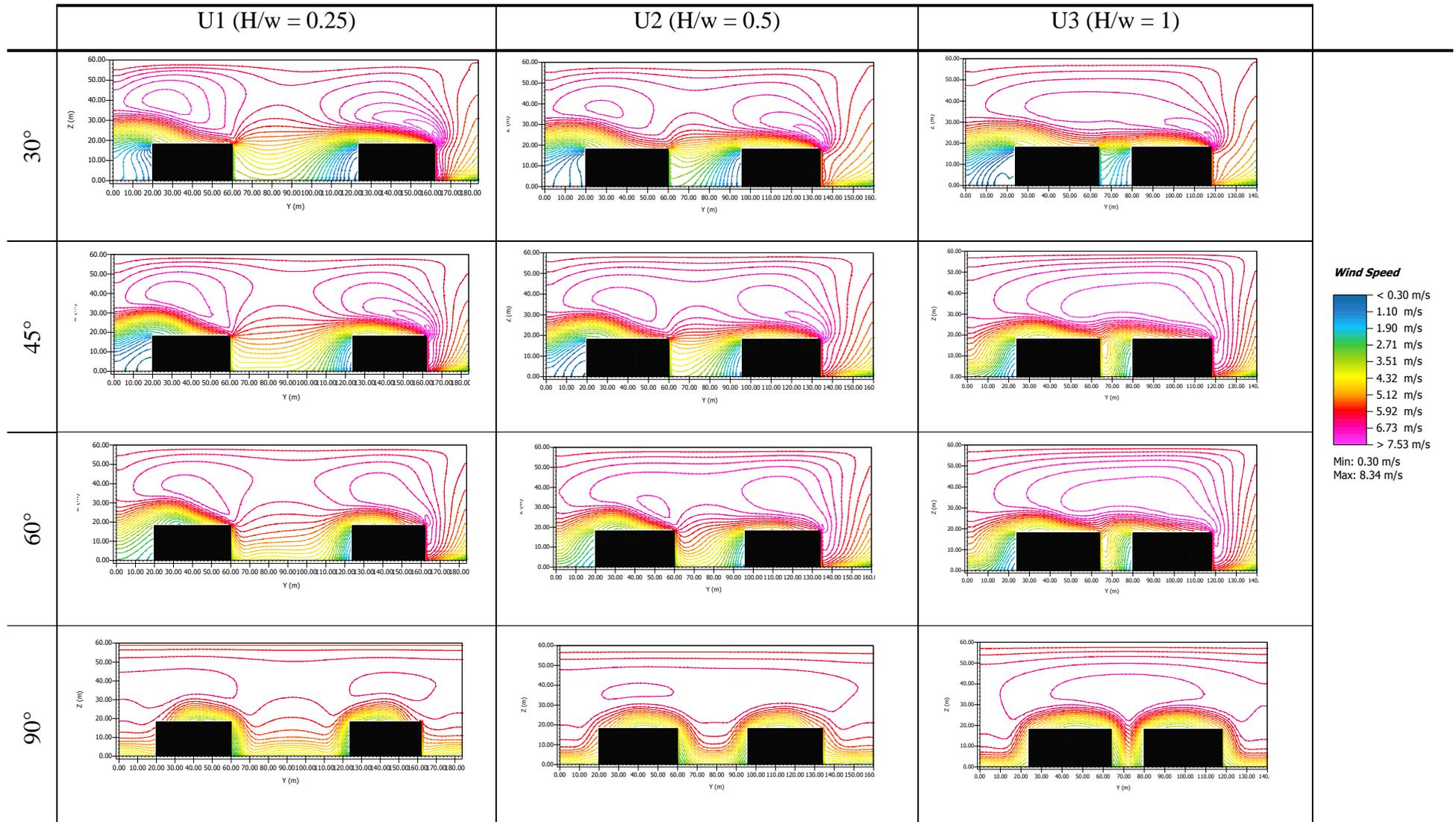
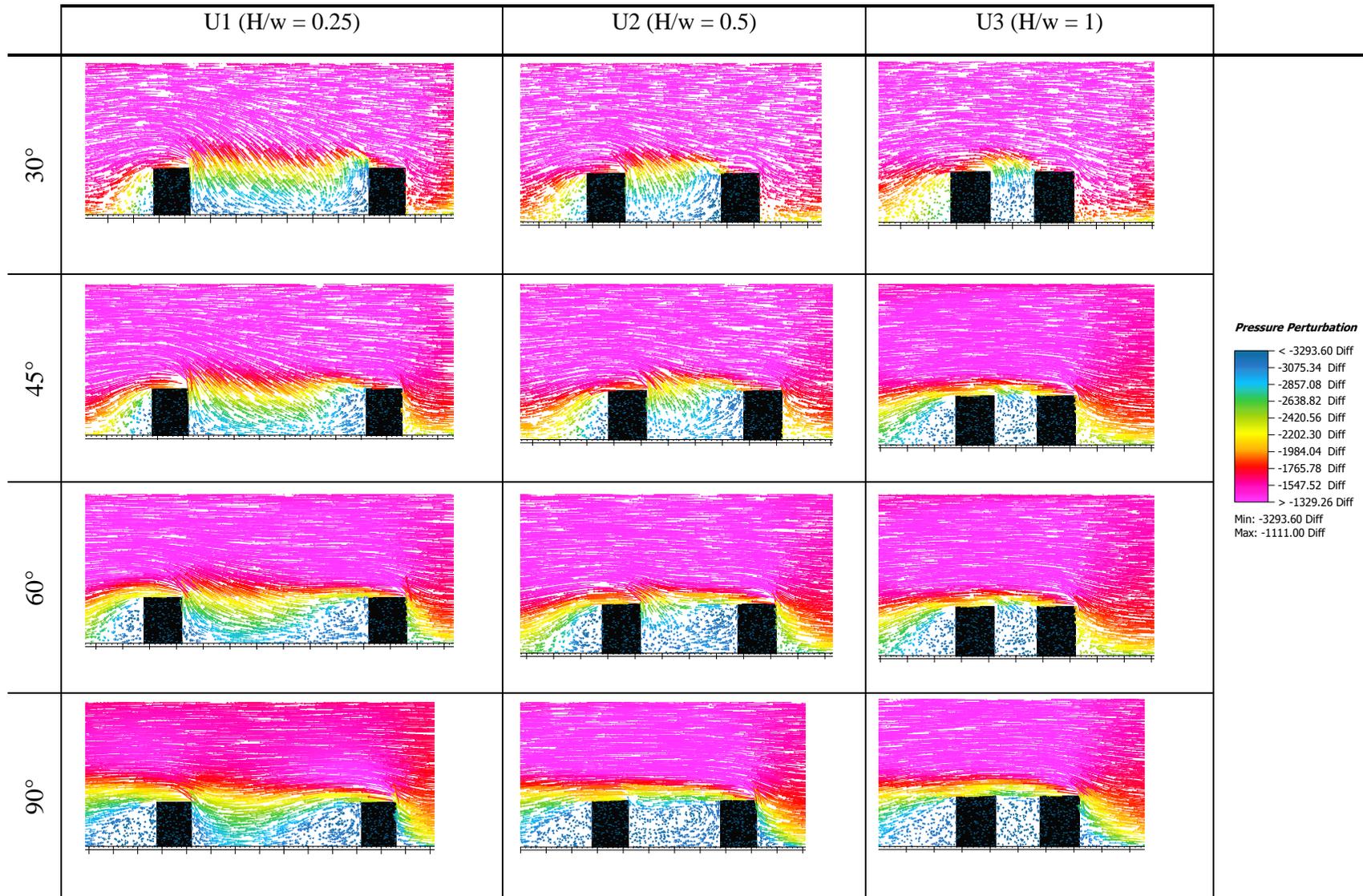


Tableau 5. 19 : Distribution de la pression du vent en coupe dans la cour des profils en U à 12h. Scénario 1, Incidences N-E



En revanche, pour la deuxième variante en forme L on observe le contraire. Les résultats de la simulation montrent la hausse des vitesses du vent [Figure 5.7] pour les incidences 30° et 45° qui ne dépassent pas 5.5 m/s à 12h dont la vitesse la plus importante était enregistrée au niveau du profil U3 ($H/w=1$). Ces incidences obliques ont fourni une meilleure pénétration de l'air dans l'espace entre les deux bâtiments [Tableau 5.20].

La distribution du vent indique une déviation du vent vers les espacements provoquant un mixage d'air important, sous forme d'interaction des flux tourbillonnaire et des flux turbulents notamment au niveau du profil L3 en raison de la forte influence des bâtiments avec un décollement sur les angles et le toit [Tableau 5.21, 5.22, 5.23]. La différence de pressions sur les façades opposées favorisera la ventilation intérieure.

Par ailleurs, le potentiel de la ventilation extérieure devient faible pour l'incidence 60° (environ 2.5m/s à 12h). Là, l'espace entre bâtiments se localise dans la zone sous le vent. Le flux est donc généré par un flux tourbillonnaire proche du bâtiment face au vent avec un flux décollé sur le toit et les coins d'une façon remarquable. La distribution de la pression du vent est caractérisée par de faibles pressions sur les façades qui vont générer de faible ventilation intérieure [Tableau 5.21, 5.23].

En ce qui est de l'incidence perpendiculaire, le potentiel de la ventilation extérieure est le plus faible sur les trois profils. Le passage entre les bâtiments se trouve dans la zone d'ombre vu que le bâtiment est face à la direction du vent [Tableau 5.20, 5.22]. L'étendue de la zone protégée du vent derrière le bâtiment (ou le sillage) s'étale vers ce passage qui devient donc protégé impliquant un faible potentiel de ventilation. Cela se manifeste à travers un faible mixage d'air en raison de la formation d'un flux tourbillonnaire et de faible pression sur les façades.

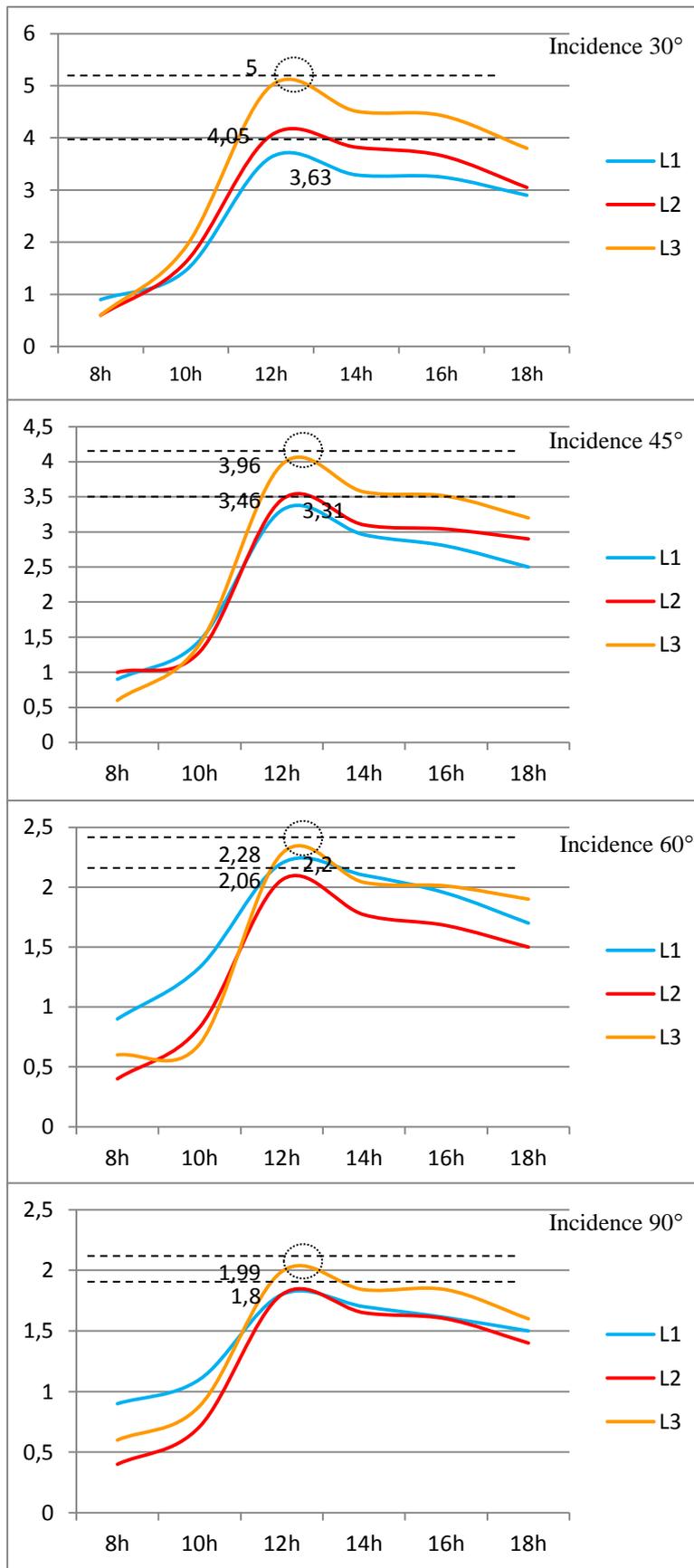


Figure 5. 7 : Vitesses du vent simulées des profils en L. Scénario 1, incidences N-E

Tableau 5. 20 : Distribution de la vitesse du vent des profils en L à 12h. Scénario 1, Incidences N-E

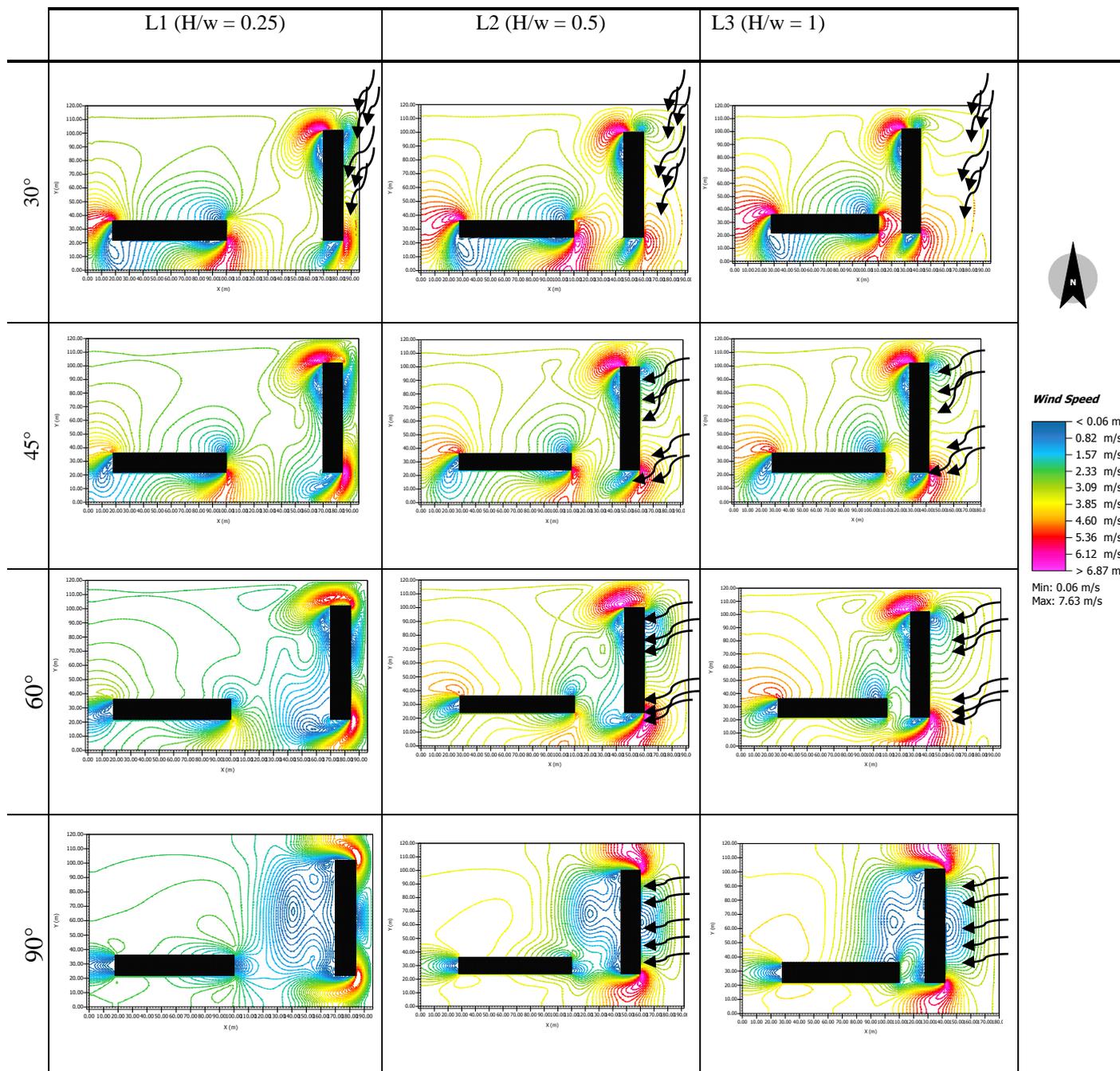


Tableau 5. 21 : Distribution de la pression du vent des profils en L à 12h. Scénario 1, Incidences N-E

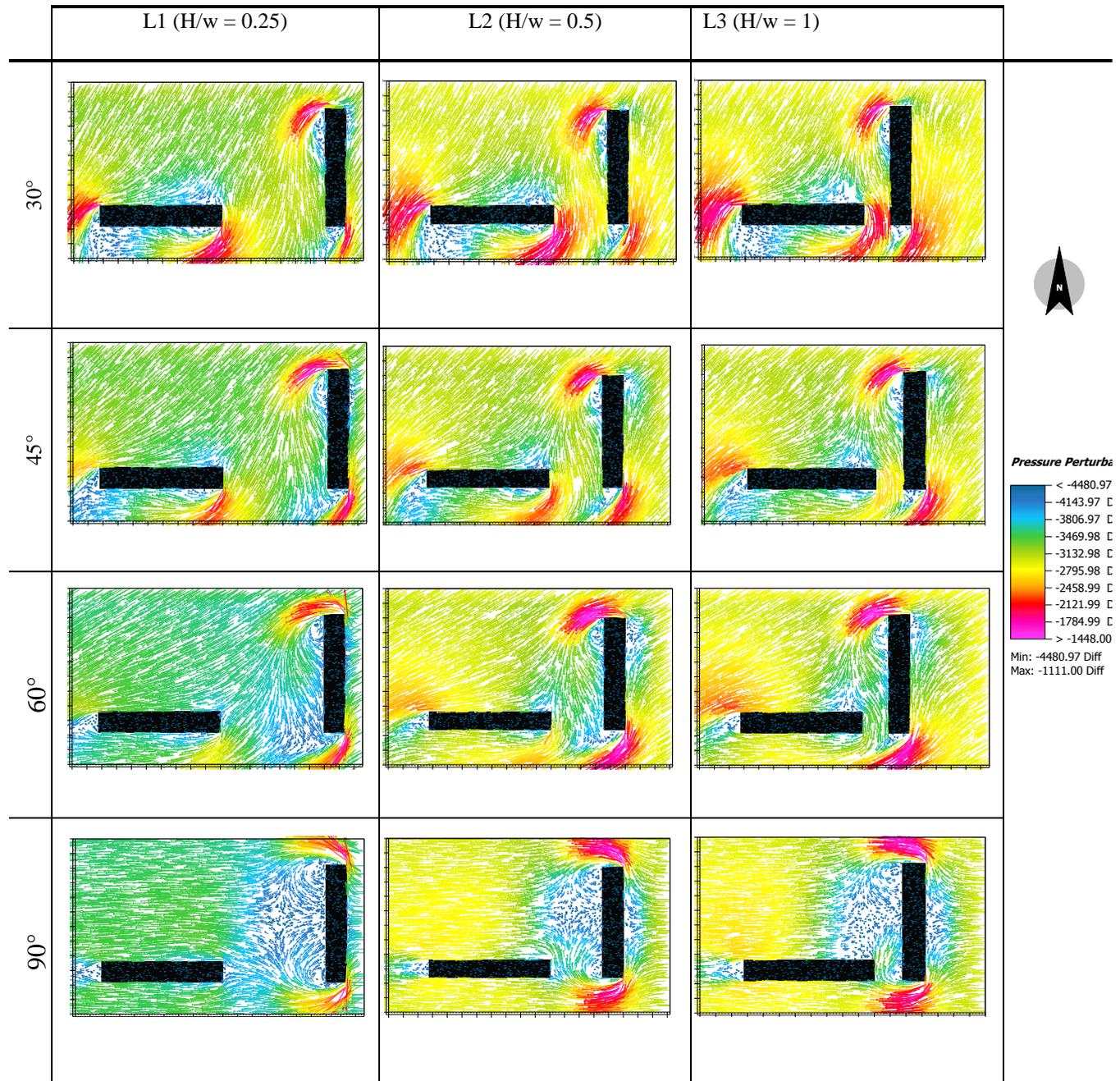


Tableau 5. 22 : Distribution de la vitesse du vent en coupe dans l'espace des profils en L à 12h. Scénario 1, Incidences N-E

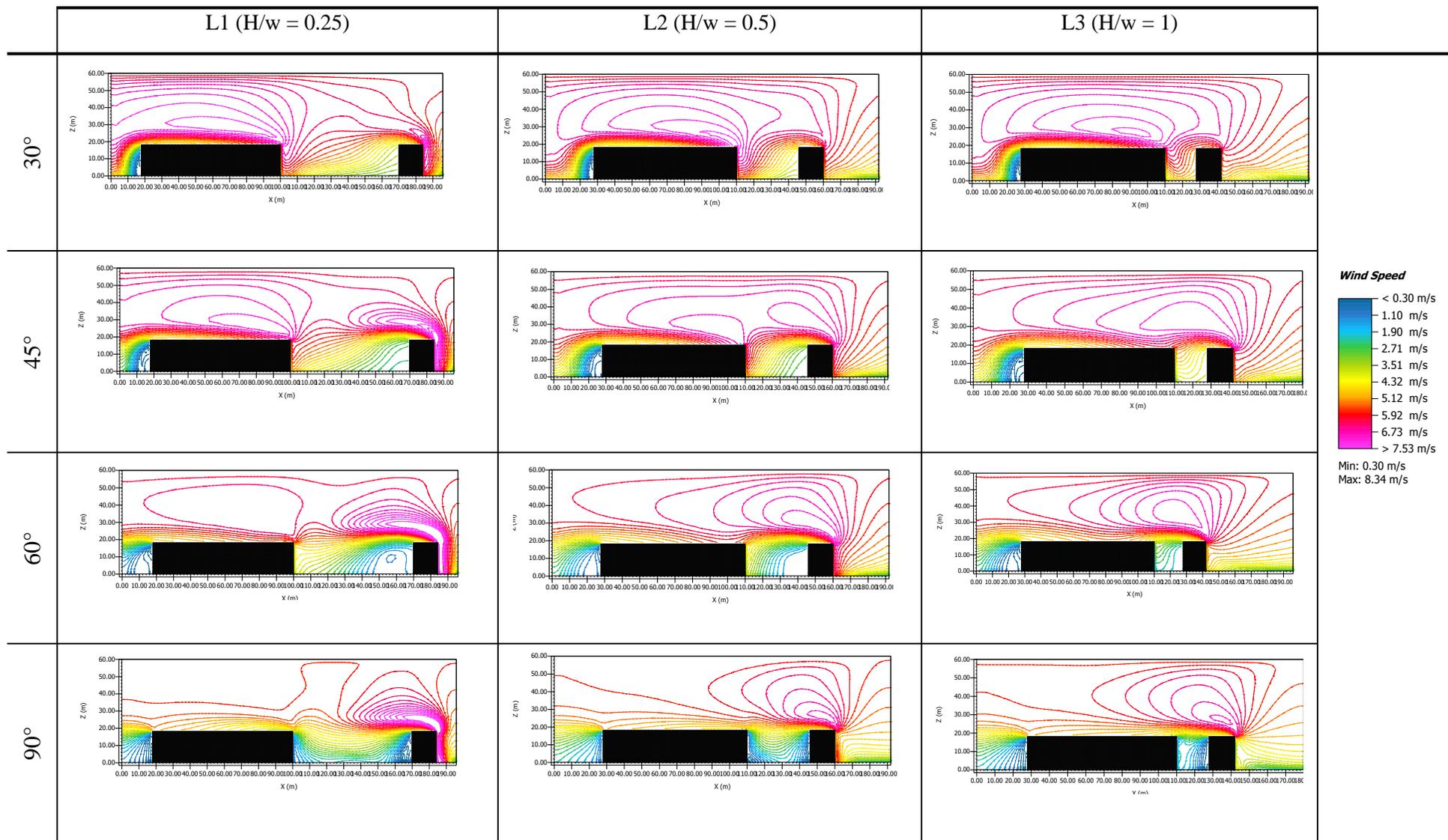
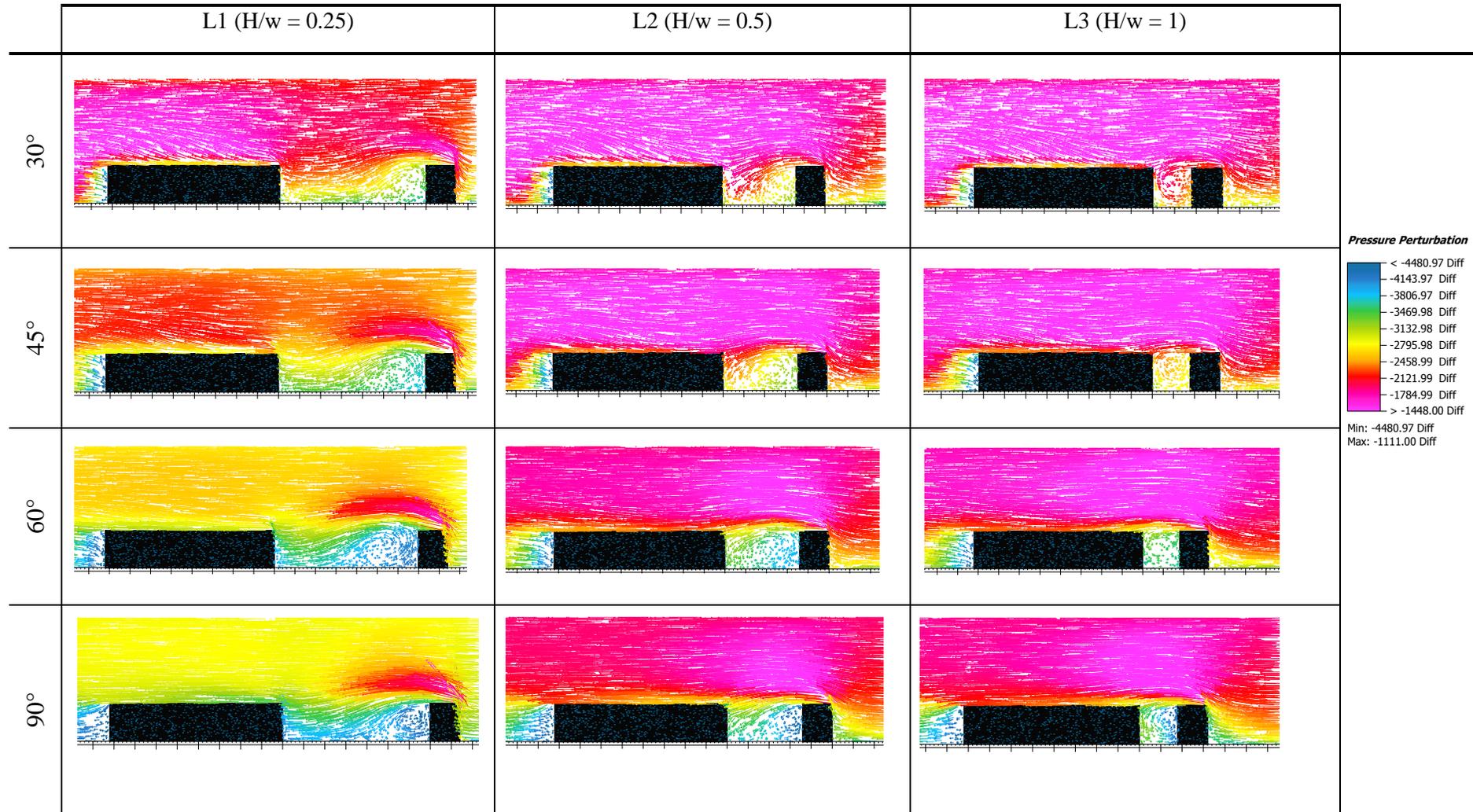


Tableau 5. 23 : Distribution de la vitesse du vent en coupe des profils en L à 12h. Scénario 1, Incidences N-E



5.3.3.2. Scénario N°2 : effet de la hauteur sur le comportement du vent

La figure 5.8 illustre les résultats de la simulation de l'effet de la hauteur sur le vent liés à la forme en U. Les graphiques indiquent d'une manière générale que le profil U5, caractérisé par la hauteur la plus élevée, a enregistré les vitesses les plus importantes alors que le profil U4 a présenté des vitesses moins. C'est au niveau des incidences 60° et 90° que le profil U5 a enregistré les vitesses les plus élevées (environ 12m/s à 12h). Cette hausse des vitesses s'explique par la présence des zones de surpressions localisées dans le passage en raison de la grande hauteur. Autrement dit, plus la hauteur est élevée plus les surpressions sont importantes (Chatelet et al. 1998) impliquant une ventilation extérieure importante.

En effet, dans le profil U5 il y a eu une interaction des flux et un mixage de l'air important dès le niveau piéton. Le champ de flux autour de l'ensemble géométrique est généré par un flux turbulent important qui se produisait dans la zone sous le vent sous forme flux tourbillonnaires symétriques (04 flux au niveau de l'angle 90° et deux flux tourbillonnaires au niveau de l'angle 60°) avec un décollement très important sur le toit et les coins [Tableau 5.24, 5.26]. Les cours sont marquées par un faible écoulement d'air en raison des faibles pressions, le potentiel de la ventilation intérieure devient faible [Tableau 5.25, 5.27]. Par ailleurs, le potentiel de la ventilation extérieure s'est réduit au niveau des incidences 30° et 45°. Le changement d'incidence a réduit l'étendue du flux turbulent dans la zone sous le vent de telle sorte que les décollements sur les coins sont réduits aussi [Tableau 5.24]. Dans les cours, le même phénomène se produit et la ventilation extérieure et même intérieure sont faibles.

En ce qui est des résultats de la simulation de la forme en L, on remarque toujours que le profil L5 est caractérisé par des vitesses du vent élevées [Figure 5.9] avec des valeurs qui varient entre 6 m/s, 9 m/s et 11 m/s successivement pour les angles d'incidence obliques 60°, 45° et 30° dans lesquelles l'espace est très exposé au vent. Pour les mêmes incidences, le profil L4 est marqué par des vitesses moins élevées (successivement 4m/s, 6m/s et 7.5m/s). Au niveau de l'incidence perpendiculaire, les vitesses sont réduites.

En effet, pour l'incidence oblique de 30° l'espace entre les bâtiments est très exposé au vent et se localise dans la zone de décollement sur les coins dans laquelle un décollement très important se produit au niveau du profil L5 [Tableau 5.28, 5.30]. Une forte ventilation s'installe dans ce passage qui devient une zone critique et inconfortable dès le niveau piéton.

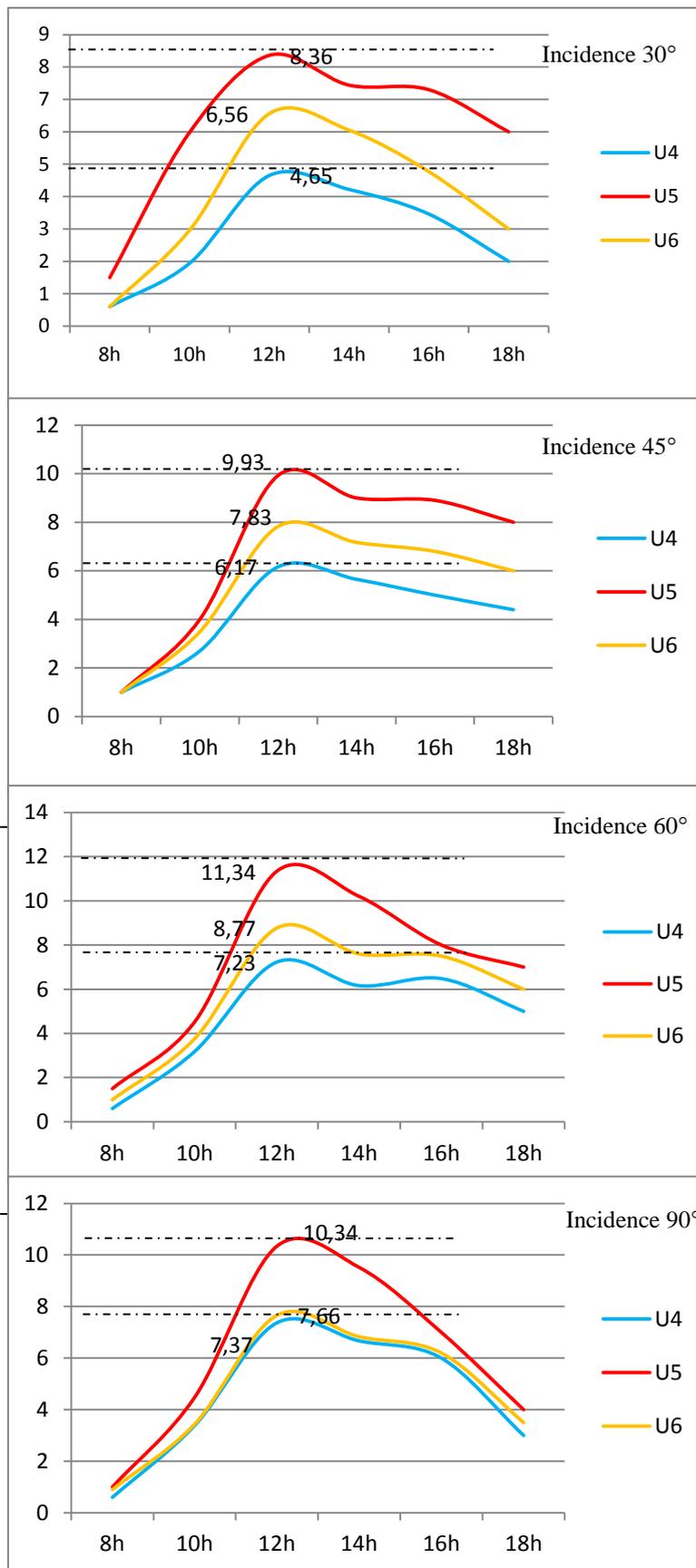


Figure 5. 8 : Vitesses du vent simulées des profils en U. Scénario 2 et 3, incidences N-E

Tableau 5. 24 : Distribution de la vitesse du vent des profils en U à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E

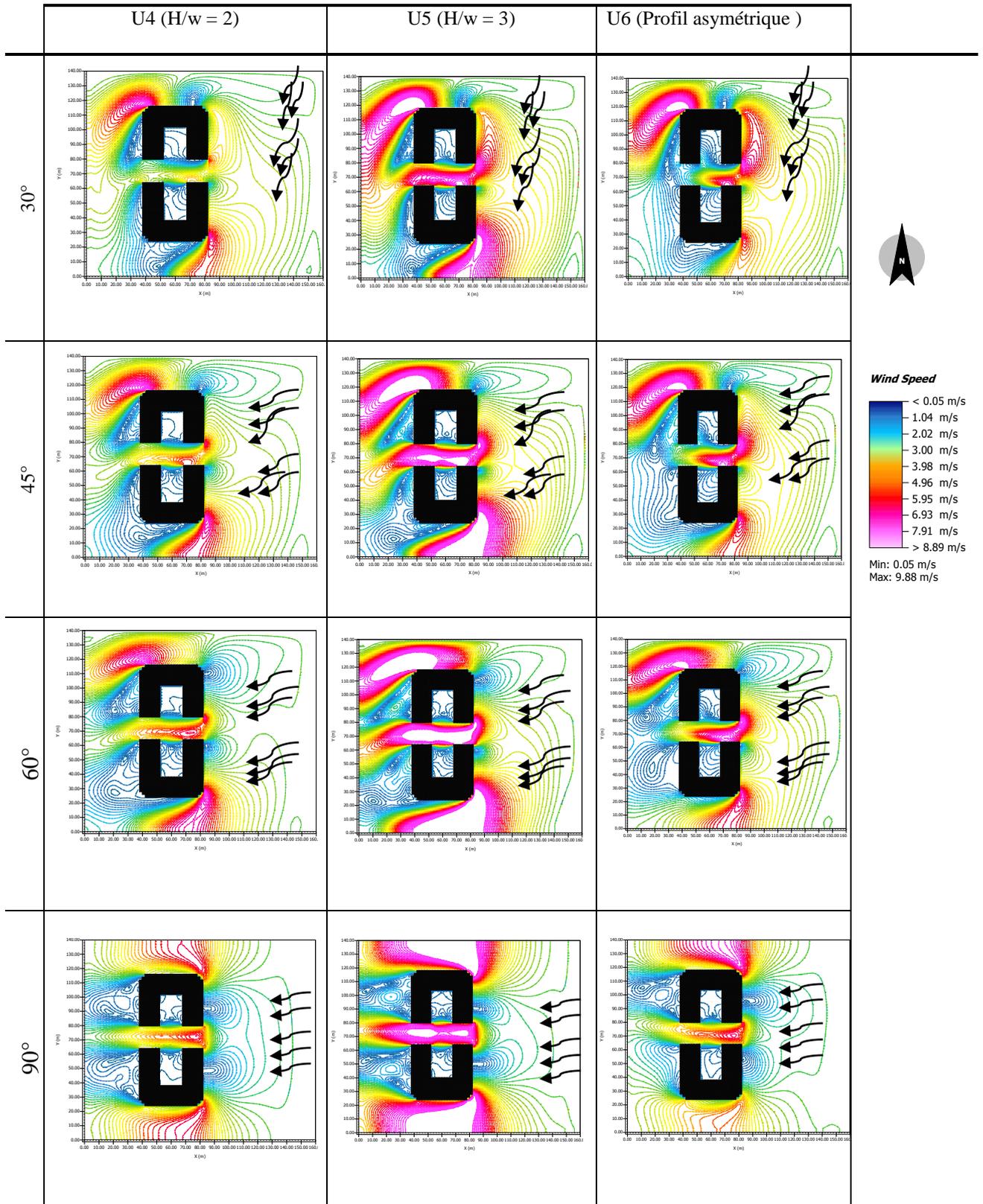


Tableau 5. 25 : Distribution de la pression du vent des profils en U à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E

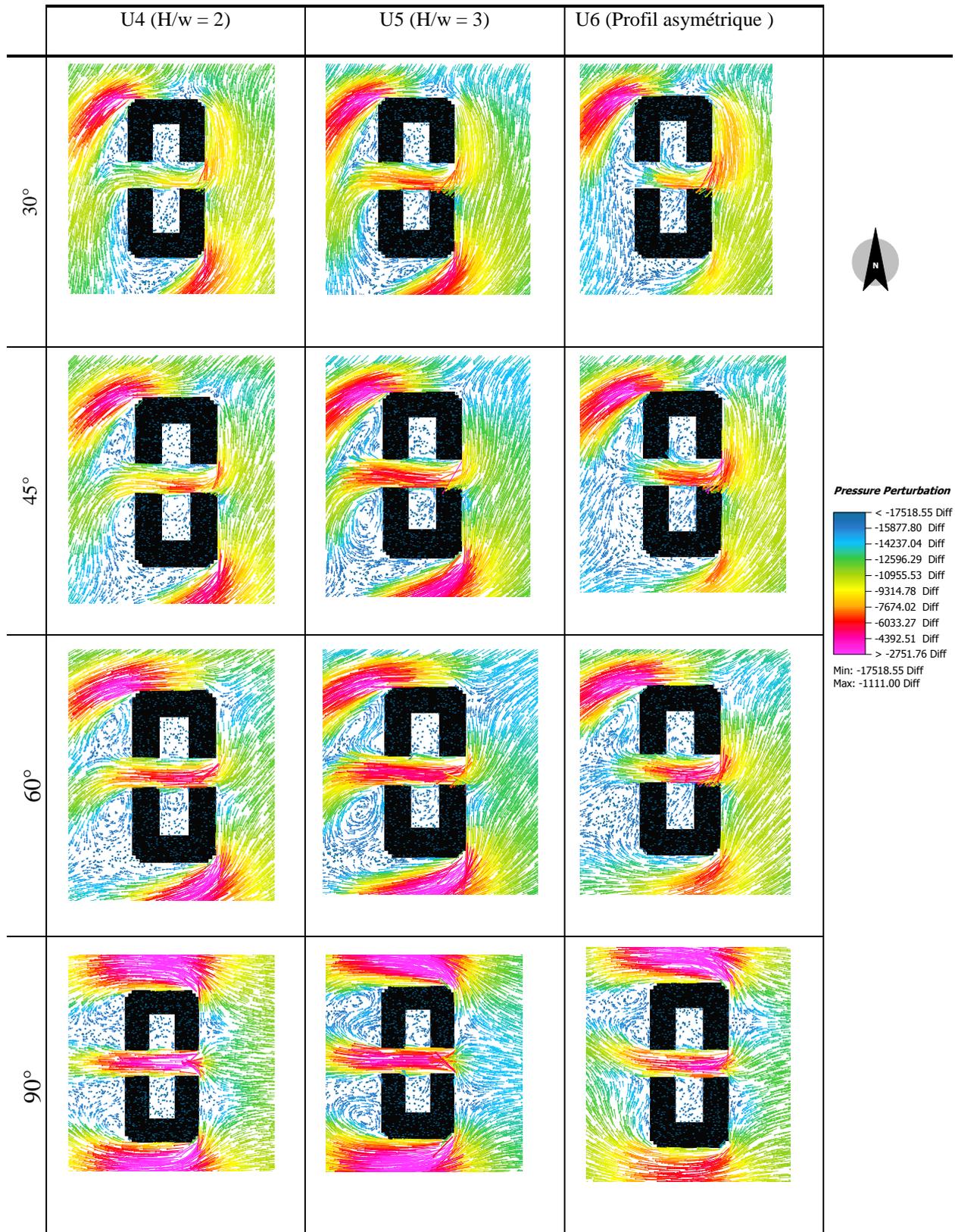


Tableau 5. 26 : Distribution de la vitesse du vent en coupe dans l'espace des profils en U à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E

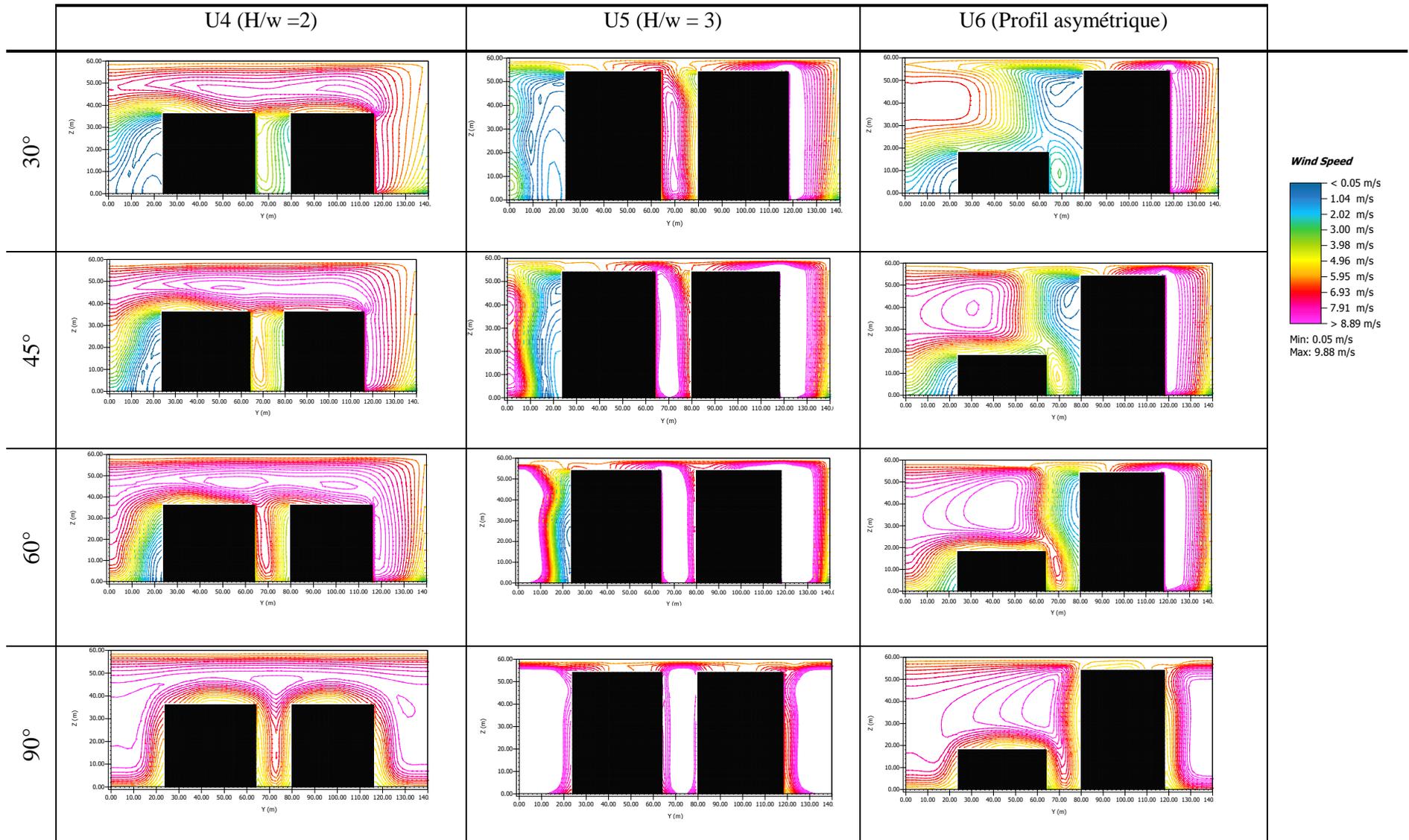
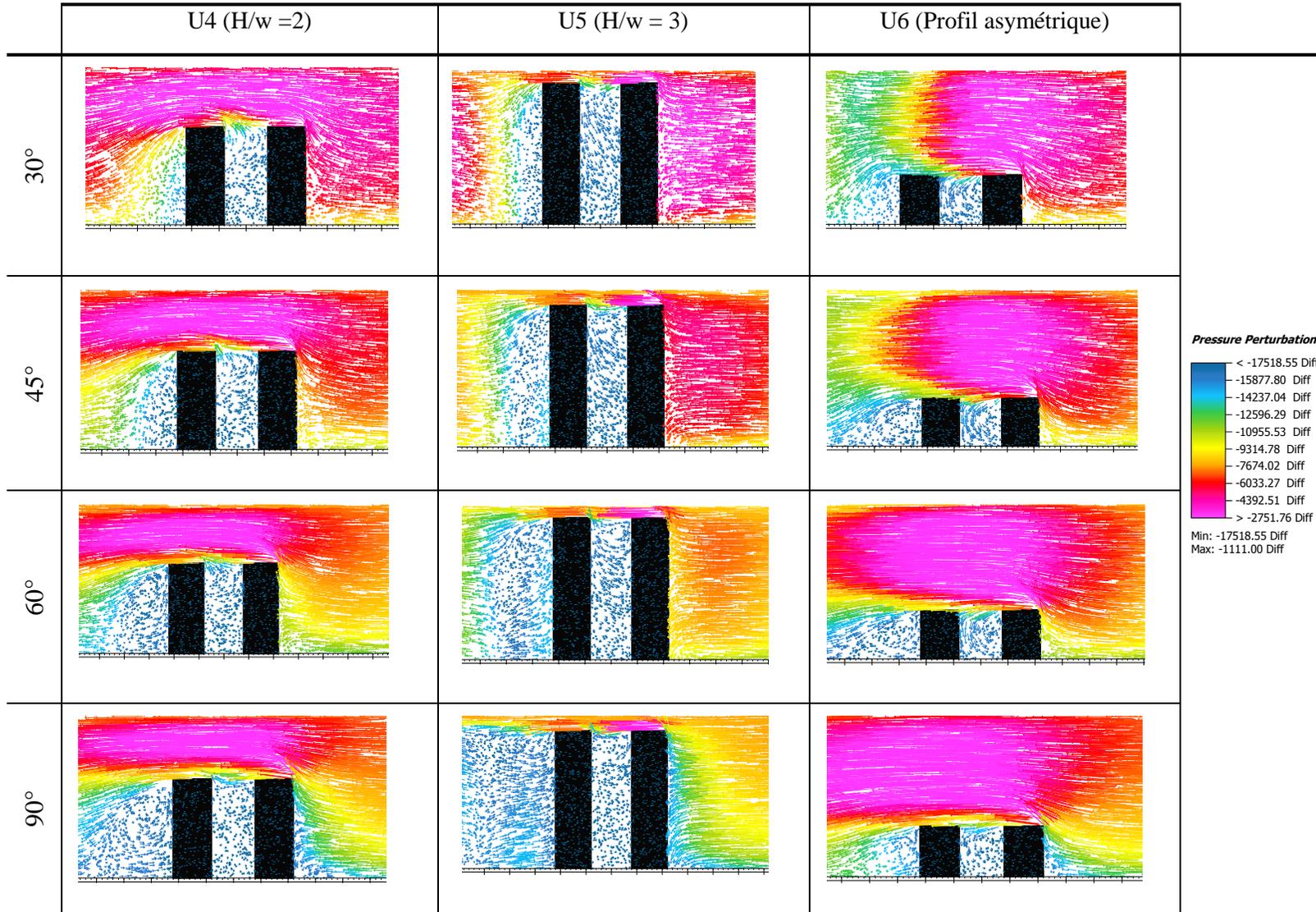


Tableau 5. 27 : Distribution de la pression du vent en coupe dans la cour des profils en U à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E



La zone sous le vent derrière le bâtiment est très perturbée manifestée par la formation d'un flux très important et une circulation tourbillonnaire, ensuite le vent est canalisé vers le passage. La distribution de la pression dans ce passage [Tableau 5.29] montre un mixage d'air très important qui se manifeste par la formation des tourbillons à partir de 01m au profil L5. Pour les incidences 45° et 60°, les mêmes phénomènes sont développés. Le changement d'incidence influe sur l'étendue des zones de décollement aux coins. Ces tourbillons sont moins agités au profil L4 et la profondeur de la zone sous le vent derrière le bâtiment est moins importante que le profil L5, due à la réduction de la hauteur [Tableau 5.28, 5.30].

Par ailleurs, le potentiel de la ventilation extérieure devient réduit lorsque l'incidence est perpendiculaire, les valeurs ne dépassent pas 5m/s pour le profil L5 et 2.5 m/s pour le profil L4 [Figure 5.9]. Le passage protégé appartient à la zone sous le vent dans laquelle les vitesses du vent sont affaiblies. La profondeur de cette zone est importante dans le profil L5 par rapport au profil L4 puisque cette profondeur est fonction de la hauteur (Merlier 2015). Aussi l'angle d'incidence 90° produit l'ombre du vent maximale (Olgay 1998).

5.3.3.3. Scénario N°3 : effet de la différence du gabarit

Dans le cas d'un profil asymétrique de la forme en U, les vitesses enregistrées sont aussi élevées comparativement aux profils hauts et qui varient entre 6.5 m/s, 8.5m/s, 9 m/s et 8m/s successivement pour les incidences 30°, 45°, 60° et 90° [Figure 5.8]. La différence du gabarit a engendré un phénomène aérodynamique qualifié de Wise dans l'espacement. L'écoulement du vent se dirige vers le haut et passe par-dessus du toit du bâtiment haut pour ensuite au-dessous il descend en formant un tourbillon dans l'espacement entre les deux bâtiments [Tableau 5.25, 5.26]. En changeant l'angle d'incidence de 30° vers 90°, on remarque que la zone tourbillonnaire se canalise profondément dans l'espace et s'intensifie ainsi.

Au niveau de la forme L, les vitesses du vent sont réduites et varient de 4m/s, 3m/s et 1.5 m/s successivement pour les incidences 30°, 45°, 60° et 90° [Figure 5.9]. Pour les incidences obliques, la ventilation est confortable dans le passage vu que le vent est canalisé d'une façon souple, en raison de l'éloignement de la zone de décollement. Pour l'incidence perpendiculaire, le passage se trouve dans la zone sous le vent qui est protégé en raison de la grande hauteur, et donc le potentiel de la ventilation est faible [Figure 5.28, 5.30]. Cela confirme que l'assemblage de bâtiments de faible et grande hauteur influe le régime de la ventilation. Si un bâtiment de faible hauteur est situé à côté d'un bâtiment de grande hauteur, des zones de haute et basse pression sont générées en amont et en aval (Sergey et al. 2016).

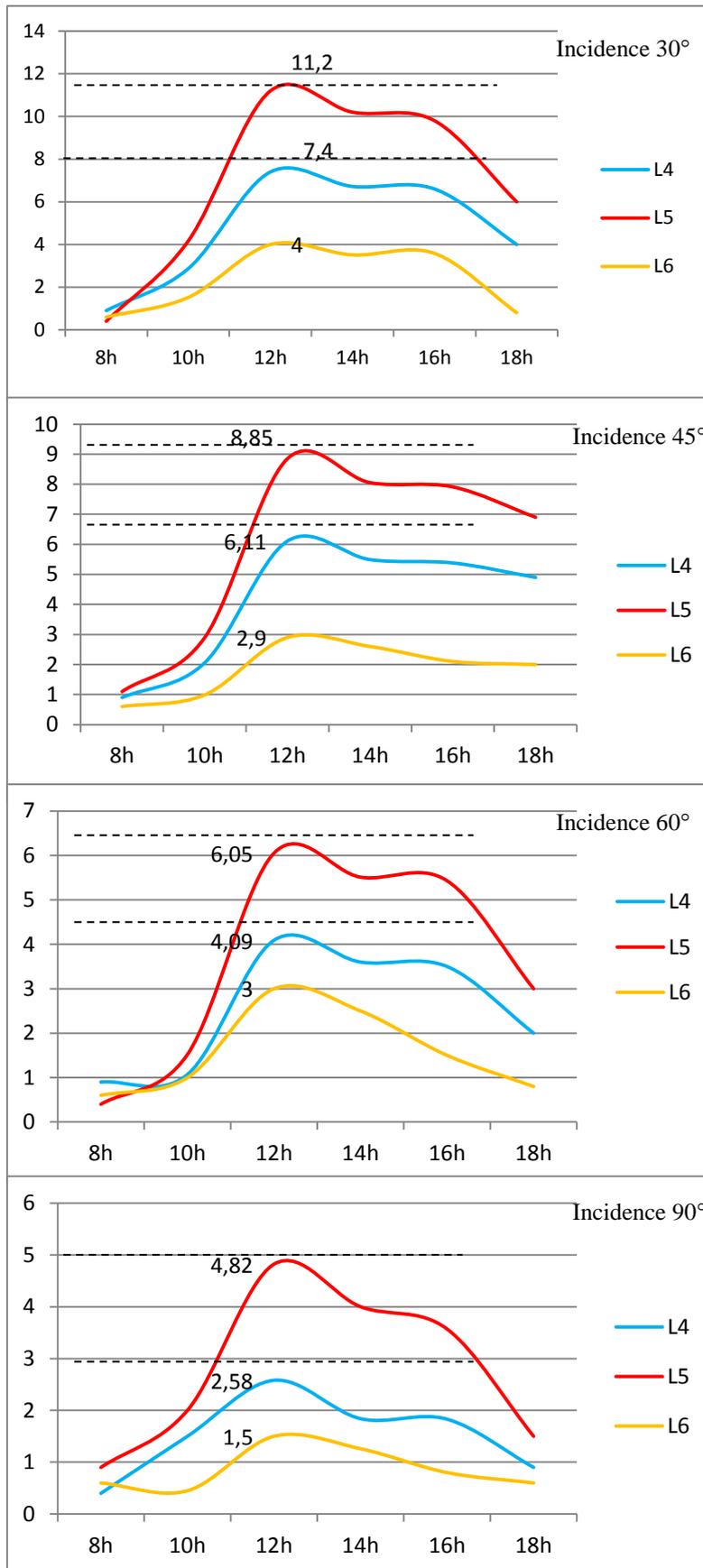


Figure 5.9 : Vitesses du vent simulées des profils en L. Scénario 2 et 3. Incidences N-E

Tableau 5. 28 : Distribution de la vitesse du vent des profils en L à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E

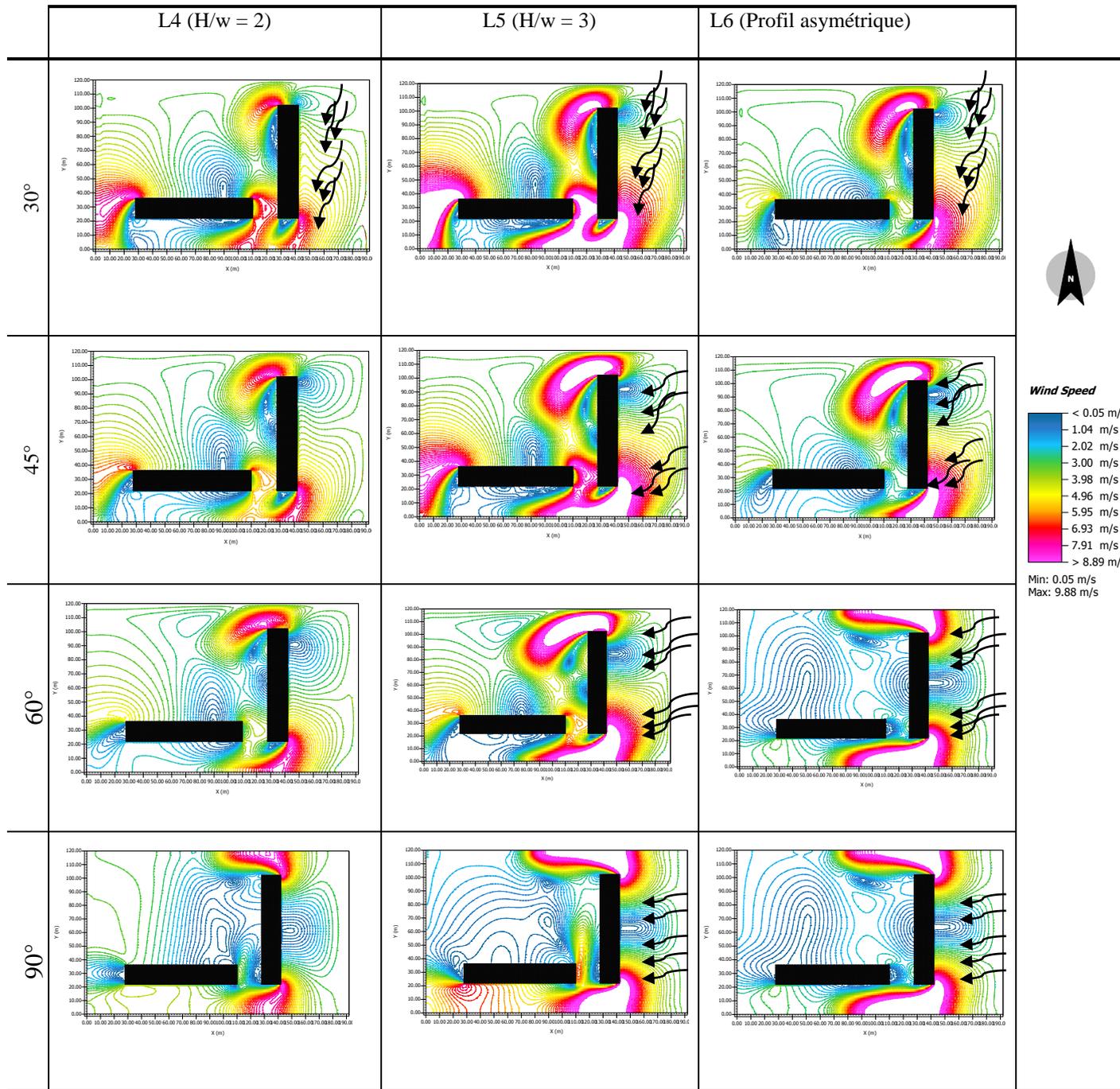


Tableau 5. 29 : Distribution de la pression du vent des profils en L à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E

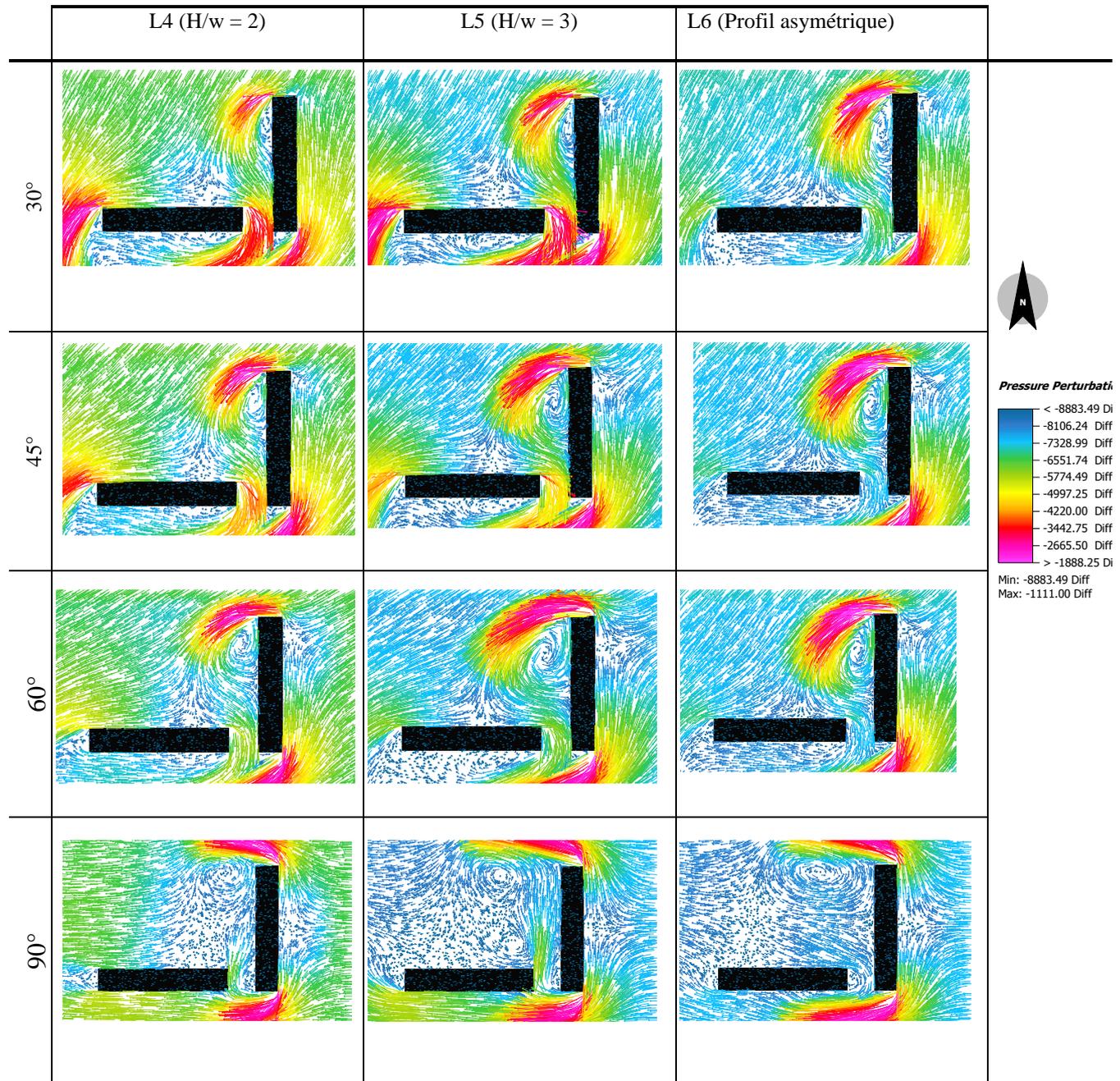


Tableau 5. 30 : Distribution de la vitesse du vent en coupe dans l'espace des profils en L à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E

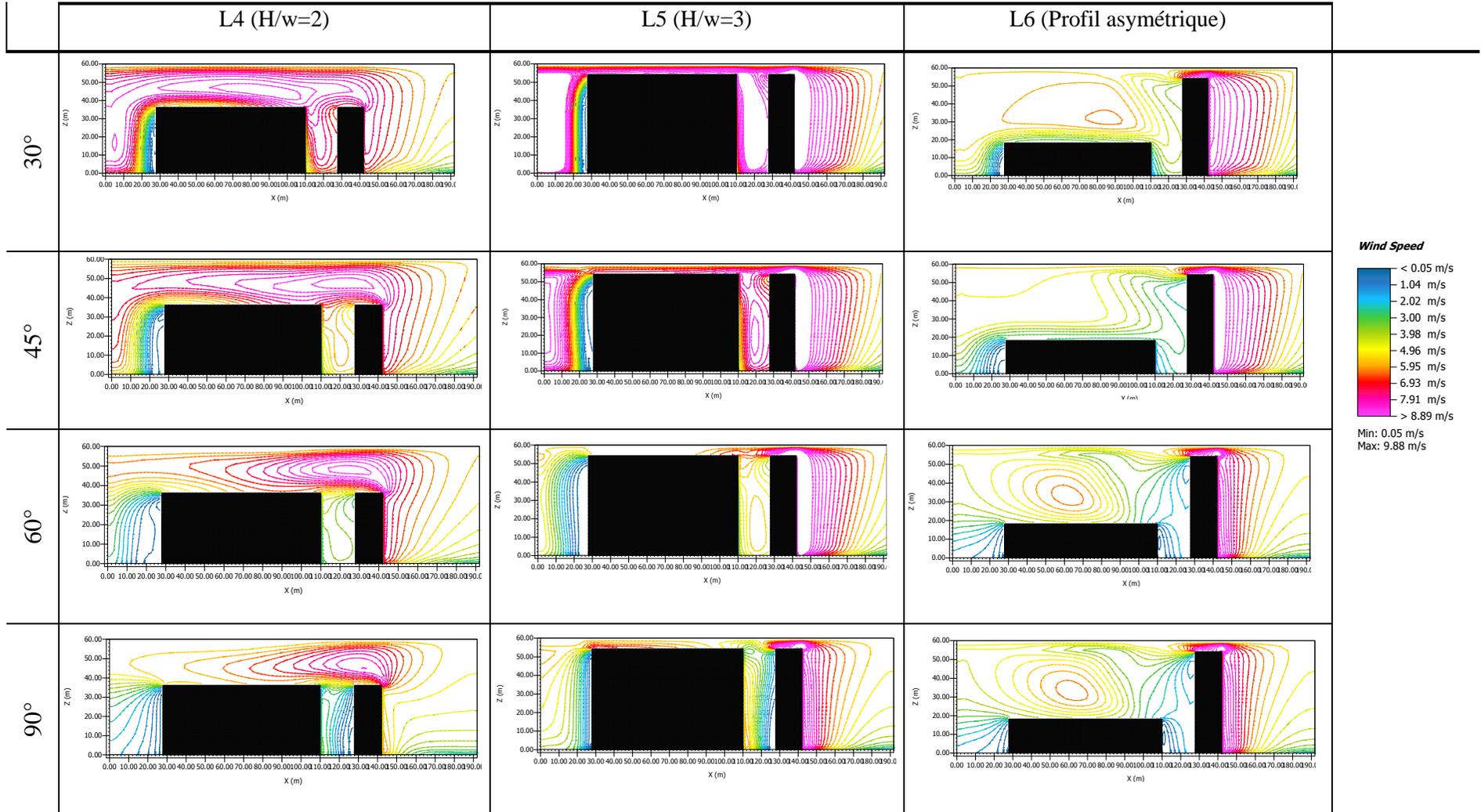
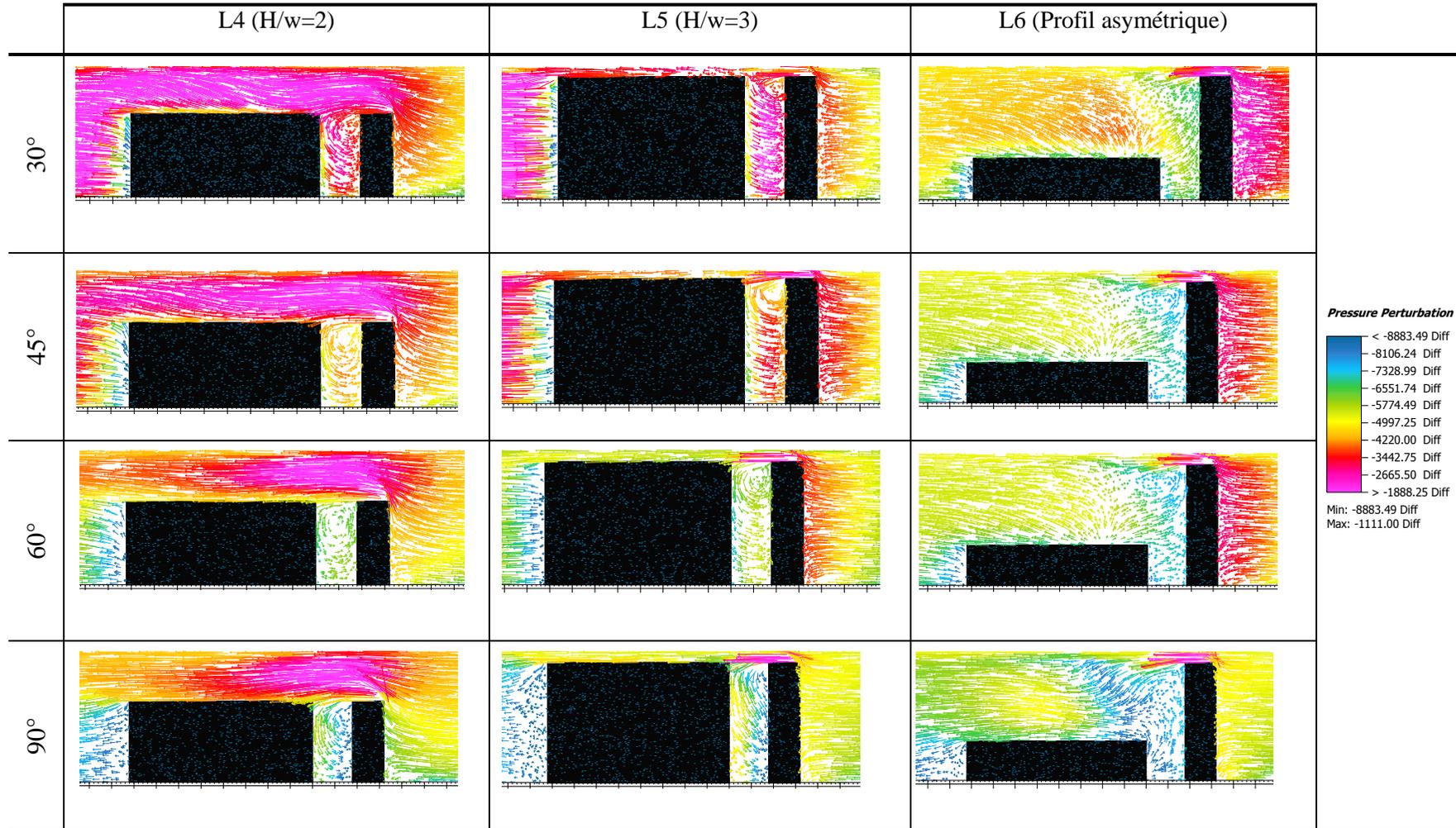


Tableau 5. 31 : Distribution de la pression du vent en coupe des profils en L à 12h. Scénario 2 et 3, Incidences N-E



5.3.4. Synthèse

Selon les résultats de simulation des différents scénarios des incidences N-E, on peut citer les synthèses suivantes :

- La largeur de l'espace influe sur le comportement du vent comme suit :
 - ✓ Pour la forme U, le cas le plus pertinent est le profil U3 et U2 défini par rapport à l'angle d'incidence perpendiculaire de 90° dans lequel les vitesses enregistrées sont comprises entre 5 et 6 m/s. Cependant le cas le plus défavorable est le profil U1 dans lequel l'espacement est large défini par rapport à l'angle d'incidence de 30°.
 - ✓ Pour la forme L, le potentiel de la ventilation est meilleur lorsque la largeur entre bâtiments est réduite comme dans le cas profil L3 et L2 pour l'incidence 30° et 45°. Le cas le plus défavorable marqué par un espacement large (profil L1) où $H/w = 0.25$ défini par rapport à l'angle de 60° et 90° dans lequel les vitesses ne dépassent pas 2m/s.
- La hauteur influe également sur le comportement du vent de telle sorte qu'une hauteur de bâtiment élevée conduit à une vitesse de vent plus élevée au niveau du piéton :
 - ✓ Pour la forme U, l'effet de la hauteur était ressenti sur le profil U5 notamment pour les incidences 45°, 60° et 90° où les vitesses du vent varient entre 10-12 m/s. Malgré ce potentiel de ventilation, les vitesses ont dépassé largement le seuil des nuisances et des gênes mécaniques dû au vent. Par contre lorsque $H/w=2$ les vitesses du vent n'ont pas dépassé 5m/s, 6m/s, 7m/s et 8m/s successivement pour les incidences 30°, 45°, 60° et 90°. De ce fait, le cas le plus favorable est le cas du profil U4 associé aux angles d'incidence obliques. Par ailleurs, le cas le plus défavorable est celui du profil U5 associé à toutes les incidences.
 - ✓ Pour la forme L, les vitesses du vent varient de 9 à 12m/s pour le cas du profil L5 lié à l'angle d'incidence 30° et 45°, et varient de 6 à 7 m/s pour le cas du profil L4 pour les mêmes incidences. Quant aux incidences obliques, les vitesses sont réduites notamment pour le cas du profil L4.
 - ✓ La différence de gabarit (profil asymétrique). Pour la forme U, les vitesses étaient élevées pour l'incidence 45°, 60° et 90° et réduites pour l'angle 30°. En ce qui est de la forme L, les vitesses sont élevées pour les incidences obliques et réduites pour l'incidence perpendiculaire.

5.4. Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats de simulation de l'écoulement du vent autour de modèles géométriques simplifiés en U et en L ont été présentés et discutés. Le choix des formes en L et U permet de varier la forme de l'espace extérieur. Tout d'abord pour identifier l'impact des paramètres urbains déterminants sur le vent et compte tenu de l'analyse des différents indicateurs morphologiques dans la synthèse bibliographique, l'indicateur choisi est le H/w . Il représente l'espacement entre les bâtiments dont H est la hauteur du bâtiment et w représente la largeur de l'espace extérieur.

Ensuite, trois scénarios liés à des profils différents ont été particulièrement proposés suivant lesquels la simulation numérique par ENVI-met V4.3.0 s'est déroulée. Le premier concerne l'effet de la largeur sur le vent dans lequel la largeur est la variable selon trois cas de profils symétriques distincts : $H/w = 0.25$, $H/w = 0.5$ et $H/w = 1$. Le deuxième scénario par contre étudie l'effet de la hauteur sur le vent, qui se décline de même en deux cas de profils symétriques à savoir, $H/w = 3$ et $H/w = 2$. Quant au troisième scénario il s'intéresse à la variation du gabarit selon un profil asymétrique. Ces scénarios sont soumis à des incidences du vent selon l'orientation N-O (-30° , -45° , -60° , -90°), et selon l'orientation N-E (30° , 45° , 60° et 90°).

Cette étude nous a permis de retenir les principaux paramètres ayant un impact dans le contrôle de la ventilation urbaine qui seront récapitulés ci-après. Ils serviront d'outils de base pour l'intégration du facteur vent dans la conception urbaine.

1. Espacement des bâtiments et profils urbains H/w :

Etant donné le caractère fluide du vent, le facteur géométrique le plus déterminant dans le contrôle de l'écoulement de l'air, est la géométrie de l'espace libre. Cette géométrie intègre tous les espacements entre bâtiments aussi bien les espacements horizontaux entre les bâtiments que leur relation avec la hauteur. Il s'agit donc du profil H/w qui détermine fortement le niveau d'abri, d'exposition au vent dans l'entité urbaine en agissant sur la répartition des pressions. Par ailleurs, ces espacements conditionnent le niveau d'obstruction au vent. Tout dépend de l'incidence du vent, ces obstructions sont plus grandes à mesure que la largeur est réduite et donc le potentiel de ventilation se réduit davantage avec la diminution de la largeur. Ces espacements ont un effet sur la nature de flux d'air et le taux de renouvellement d'air et de ventilation entre bâtiments. Dans ce cas plus la largeur est grande, plus grand est le potentiel de la ventilation. Concernant la hauteur, elle influe également sur le

comportement du vent ; une hauteur de bâtiment élevée conduit à une vitesse de vent plus élevée au niveau de la rue.

2. Incidence du vent par rapport au bâti :

La direction du vent est le deuxième paramètre décisif en matière d'écoulement de l'air en milieu urbain. Ce facteur agit simultanément avec les espacements et les profils urbains et conditionne le niveau de ventilation. Trois incidences principales par rapport à leur performance de ventilation ont été identifiées : l'incidence perpendiculaire, parallèle et oblique. Dans cette étude, l'incidence parallèle n'a pas été prise en compte.

3. La géométrie du bâtiment :

La forme et les dimensions du bâtiment sont importantes pour la ventilation urbaine. L'assemblage des bâtiments dépend de leurs formes qui induisent une certaine géométrie de l'espace extérieur et renvoient donc au rôle des espacements.

4. Différence de gabarits

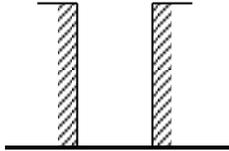
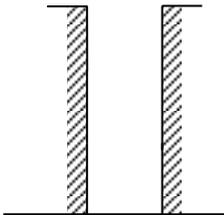
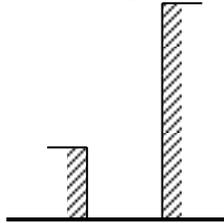
Elle a pour résultat de dévier les flux d'air vers mes niveaux de la rue et constitue un moyen pour modifier les vitesses de l'air en milieu urbain.

En effet, dans cette étude, plusieurs scénarios ont été proposés à travers lesquels une variété de profils urbains ont été suggérés et simulés. Les principaux résultats de la simulation sont présentés dans le tableau 5.17 afin de synthétiser des paramètres morphologiques des bâtiments analysés et l'évaluation du potentiel de la ventilation.

Tableau 5. 32 : Récapitulation du niveau d'impact des paramètres géométriques de l'espace extérieur sur le vent

Niveau d'impact de la largeur de l'espace extérieur sur le vent			
Profil	Forme géométrique en U	Forme géométrique en L	
Incidence N-O	<p>H/w = 1</p> 	<p>Incidence 90° N-O:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation extérieure important • Circulation tourbillonnaire agitée dans le profil <p>Incidence s 30°, 45°, 60° N-O:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible potentiel de ventilation extérieure • Vent dévié au dessus des toitures 	<p>Incidences 30°, 60° N-O:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation extérieure important • Circulation tourbillonnaire agitée dans le profil <p>Incidences 45°, 90° N-O:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible potentiel de ventilation extérieure • Vent dévié au dessus des toitures
	<p>H/w = 0.5</p> 	<p>Incidences 30°,45°,60° N-O:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bonne ventilation extérieure • Meilleure protection que le profil H/w=0.25 notamment au niveau de la rue <p>Incidence 90° N-O :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible potentiel de ventilation 	<p>Incidences 30°,45°,60° N-O :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bonne ventilation extérieure • Meilleure protection notamment au niveau de la rue • Possibilité de gêne au niveau piéton <p>Incidence 90° N-O:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible potentiel de ventilation
	<p>H/w = 0.25</p> 	<p>Incidences 30°,45°,60° N-O :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation est important • Une forte exposition, mixage d'air important • Possibilité de gêne au niveau piéton <p>Incidence 90° :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible potentiel de ventilation 	<p>Incidences 45°, 90° N-O :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation est important avec une forte exposition <p>Incidences 30°, 60° :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible potentiel de ventilation

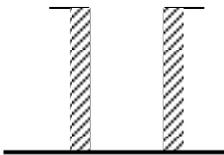
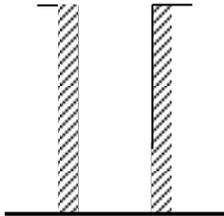
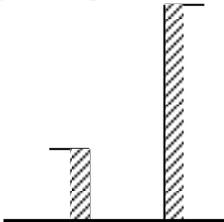
Niveau d'impact de la hauteur de l'espace extérieur sur le vent

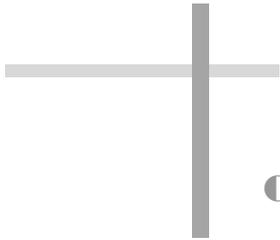
Profil	Forme géométrique en U	Forme géométrique en L
<p>$H/w = 2$</p> 	<p>Toutes les incidences en particulier 60° et 90° N-O :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation important • La hauteur influe l'écoulement de l'air mais d'une façon inférieure que le profil $H/w=3$ 	<p>Incidences 30°, 45° et 60° N-O :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation important • La hauteur influe l'écoulement de l'air mais d'une façon inférieure que le profil $H/w=3$ • Potentiel de ventilation faible au niveau de l'incidence 90°
<p>$H/w = 3$</p> 	<p>Toutes les incidences en particulier 60° et 90° N-O :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation très important • La hauteur du bâtiment influe l'écoulement du vent et accélère sa vitesse dès le niveau piéton • Les surpressions sont plus importantes dans l'espace entre les bâtiments 	<p>Incidences 30°, 45° et 60° N-O:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation très important • Les hauteurs élevées créeraient des vents forts au niveau des piétons • Potentiel de ventilation faible au niveau de l'incidence 90°
<p>Asymétrique</p> 	<p>Incidences 45°, 60° et 90° N-O :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La différence de hauteur pourrait créer un environnement moins venteux dans les espaces extérieurs. • Potentiel de ventilation réduit au niveau de l'incidence 30° 	<p>Toutes les incidences :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation moins important que les deux profils précédents • La différence de hauteur pourrait créer un environnement moins venteux dans les espaces extérieurs.

Niveau d'impact de la largeur de l'espace extérieur sur le vent

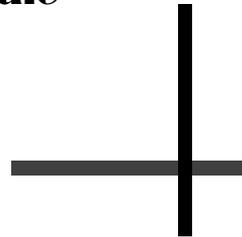
Profil	Forme géométrique en U	Forme géométrique en L
<p>H/w = 1</p> 	<p>Incidences 45°, 60° et 90° N-E:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation extérieure important • Circulation tourbillonnaire agitée dans le profil <p>Incidence 30° N-E:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible potentiel de ventilation extérieure • Vent dévié au dessus des toitures 	<p>Incidences 30°, 45° N-E:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation extérieure important • Circulation tourbillonnaire agitée dans le profil <p>Incidences 60°, 90° N-E:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible potentiel de ventilation extérieure • Vent dévié au dessus des toitures
<p>Incidence N-E</p> <p>H/w = 0.5</p> 	<p>Incidences 45°, 60° et 90° N-E:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bonne ventilation extérieure • Meilleure protection que le profil H/w=1 notamment au niveau de la rue <p>Incidence 30° N-E :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible potentiel de ventilation 	<p>Incidences 30°, 45° N-E :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bonne ventilation extérieure • Meilleure protection notamment au niveau de la rue • Possibilité de gêne au niveau piéton <p>Incidences 60°, 90° N-E:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible potentiel de ventilation
<p>H/w = 0.25</p> 	<p>Incidences 30°, 45°, 60° et 90° N-E :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation réduit plus particulier pour l'incidence 30° 	<p>Incidences 30°, 45° N-E :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bon potentiel de ventilation • Meilleure protection notamment au niveau de la rue <p>Incidences 60°, 90° N-E:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible potentiel de ventilation

Niveau d'impact de la hauteur de l'espace extérieur sur le vent

Profil	Forme géométrique en U	Forme géométrique en L
<p>H/w = 2</p> 	<p>Incidences 45°, 60° et 90° :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation important • La hauteur influe l'écoulement de l'air mais d'une façon inférieure que le profil H/w=3 <p>Incidence 30° :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation réduit 	<p>Incidences 30°, 45° et 60° :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation important • La hauteur influe l'écoulement de l'air mais d'une façon inférieure que le profil H/w=3 • Potentiel de ventilation faible au niveau de l'incidence 90°
<p>H/w = 3</p> 	<p>Incidences 45°, 60° et 90° :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation très important • La hauteur du bâtiment influe l'écoulement du vent et accélère sa vitesse dès le niveau piéton <p>Incidence 30° :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation réduit 	<p>Incidences 30°, 45° et 60° :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation très important • Les hauteurs élevées créeraient des vents forts au niveau des piétons • Potentiel de ventilation faible au niveau de l'incidence 90°
<p>Asymétrique</p> 	<p>Incidences 45°, 60° et 90° :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La différence de hauteur pourrait créer un environnement moins venteux dans les espaces extérieurs. <p>Incidence 30° :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation réduit 	<p>Incidences 30°, 45° et 60° :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La différence de hauteur pourrait créer un environnement moins venteux dans les espaces extérieurs. <p>Incidence 90° :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de ventilation réduit



**Conclusion générale
& perspectives**



1. CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce travail de thèse nous avons abordé la problématique qui souligne les interactions entre les paramètres géométriques de l'espace urbain (profil urbain), la ventilation urbaine et son contrôle. L'objectif principal de cette étude consiste à proposer un guide méthodologique qui permet le contrôle du vent dans les espaces extérieurs, à savoir qu'il ne s'agit pas tant de fournir un guide précis autant qu'il est d'offrir les éléments clés pour évaluation et orientation. Cette méthodologie est formulée sous forme d'indicateurs géométriques déduits de l'étude de la relation géométrie urbaine-vent.

Plusieurs préoccupations apparaissant liées à cette problématique à savoir : quels profils urbains choisir, quelle orientation préférer, quelle forme de bâtiment adopter ?. Pour cela, il s'agit d'identifier les paramètres urbains géométriques les plus déterminants sur le comportement des flux d'air en milieu urbain et qui permettraient par conséquent de contrôler la ventilation urbaine. Par la suite, optimiser ces paramètres en s'appuyant sur la simulation numérique.

Les objectifs de contrôle de la ventilation urbaine doivent correspondre à la destination des espaces extérieurs, aux activités qui s'y déroulent, et aux besoins de ventilation induits par le climat. Ils peuvent varier entre une recherche d'exposition ou au contraire une protection de ces espaces, le plus souvent les deux simultanément selon la saison, la nature du vent, son orientation, associée aux propriétés géométriques du tissu urbain.

Contrairement au contrôle de la radiation où l'impact de chacune de ces propriétés géométriques est à la fois précis et relativement autonome, le cas du vent est plus complexe. Ils sont considérés simultanément car leurs effets se combinent, à cela s'ajoute le caractère instable et peu prévisible du vent. La considération du profil de la rue permet le contrôle de la ventilation en définissant la nature du flux dans les espacements entre bâtiments.

Ce profil étant défini par rapport à l'incidence du vent, il convient de dire que lorsque le vent est parallèle au bâti, il a tendance à s'engouffrer dans les rues et à être canalisé. Quand il est perpendiculaire au bâti, il vient du dessus des toitures. Quant au vent oblique, l'infiltration de l'air est latérale et se fait à la fois par les rues et par les toitures. L'urbaniste choisira en fonction de ses objectifs d'exposition ou de protection du vent le profil optimal en connaissant les propriétés de chaque type de flux.

Dans ce travail de thèse nous avons essayé de proposer des profils urbains H/w variés associés à des angles d'incidence du vent variés selon les orientations N-O, N-E, et d'élargir le choix à travers des scénarios différents. Sachant que la forme de l'espace extérieur est dictée par la forme des bâtiments adjacents à cet espace, deux géométries en forme de L et U ont été choisies dans le but est d'avoir deux espaces extérieurs distincts. En effet, la forme géométrique en L permet de créer un passage ouvert alors que la forme en U permet de créer un espace extérieur relativement enfermé. Les paramètres géométriques considérés sont la largeur et la hauteur. cette analyse repose donc sur les 03 scénarios suivants :

- **Scénario N°1** : profil H/w dont la variable est la largeur (profil symétrique).
H étant la hauteur où $H = a$
 - ✓ $H/w = 0.25$. La largeur $w = 4a$
 - ✓ $H/w = 0.5$. La largeur $w = 2a$
 - ✓ $H/w = 1$. La largeur $w = a$
- **Scénario N°2** : profil H/w dont **la variable sera la hauteur** (profil symétrique).
w étant l'espacement entre les bâtiments où $w = a$
 - ✓ $H/w = 2$. La hauteur $H = 2a$
 - ✓ $H/w = 3$. La hauteur $H = 3a$
- **Scénario N°3** : différence du gabarit (profil asymétrique). w étant l'espacement entre les bâtiments où $w = a$
 - ✓ La hauteur a varie entre H_1 et H_2 ou $H_1 = 3a$ et $H_2 = a$.

Ces scénarios seront soumis à des incidences du vent variées par rapport au bâti selon l'orientation N-O (-30° , -45° , -60° , -90°) et l'orientation N-E (30° , 45° , 60° , 90°).

Ce double objectif n'est atteint qu'à travers la simulation numérique par le logiciel ENVI-met V4.3.0 ; cet outil très important, permet d'améliorer les caractéristiques géométriques de l'espace extérieur. La comparaison entre les scénarios permet de faire

ressortir la performance de chaque profil ou géométrie par rapport à cet objectif du contrôle de l'écoulement de vent.

Les résultats obtenus ont montré clairement que la géométrie de l'espace extérieur est la plus décisive dans la définition des écoulements de l'air. Cette géométrie intègre tous les espacements entre bâtiments et les profils H/w qui est influencé par les caractéristiques géométriques de la largeur et la hauteur de l'espace. Ces paramètres sont les plus pertinents dans le contrôle du vent. L'espacement entre bâtiments doit être évalué en combinaison avec l'incidence du vent.

En effet, l'orientation du bâti par rapport à la direction du vent est au même titre déterminant, puisqu'elle conduit à l'amplification ou la diminution du taux de ventilation d'un tissu urbain. L'incidence parallèle peut être comprise entre 0° et 30° , l'incidence perpendiculaire entre 60° et 90° et l'incidence oblique entre 30° et 60° . Dans tous les cas, l'incidence oblique a fourni la meilleure pénétration de l'air dans les espaces extérieurs comparativement à une orientation parallèle ou perpendiculaire du vent. Il convient ici de mentionner que le choix d'un angle oblique doit se faire en tenant compte de la disposition des bâtiments, de leurs espacements et de leur géométrie qui conditionnent le niveau d'obstruction au vent des bâtiments en amont du vent.

A travers les nombreux scénarios abordés dans cette recherche, un certain nombre de conclusions peuvent être tirées. Pour favoriser la ventilation dans les espaces extérieurs, le renouvellement de l'air et la dilution des polluants, les profils urbains très larges sont à préférer ($H/w < 0.3$). Ces profils sont caractéristiques d'une situation de forte exposition (Flux isolé) pouvant créer une forte gêne au niveau du piéton. Ensuite, des profils à flux interférent ($0.3 < H/w < 0.7$) présentent une protection partielle du vent. Celle-ci serait la plus intéressante pour les espaces urbains vécus puisqu'elle maintient un niveau de confort élevé pour le piéton et un potentiel de ventilation suffisant. Enfin des profils étroits ($H/w > 0.7$) à flux rasant offrent de fortes conditions d'abri mais réduisent le potentiel de ventilation.

Ce potentiel de ventilation extérieure est lié aussi à la géométrie des bâtiments. La géométrie de l'espace extérieur qui contrôle la circulation du vent est le résultat de la géométrie des bâtiments et de leur mode d'assemblage et qui peut conduire selon les cas à des compositions irrégulières. A ce titre, il convient de dire que les formes allongées (forme en L par exemple) favorisent la canalisation de l'air lorsque celles-ci sont orientées dans le sens du vent (incidences obliques). Cependant, un tissu aux intersections nombreuses ou composées provoque à ses croisements de rues (forme en U) des zones de turbulences pour

toutes les directions du vent. Aussi, les géométries à patio sont moins favorables à la ventilation même si la dimension de la cour est importante.

Concernant l'impact de la largeur de l'espace extérieur sur le potentiel de la ventilation extérieure, les résultats confirment que l'écoulement du vent autour de ce genre d'ensembles géométriques dépend de l'ouverture de l'espace extérieur et de son orientation par rapport au vent (**Brown et Dekay 2000**) dans lequel la distribution de la pression peut considérablement changée (**Gomes et al.2006**). Les dimensions de l'espace entre bâtiments affectaient d'une manière significative la distribution de la pression du vent sur les différentes façades en fonction de la direction du vent (**Amin et al. 2011**).

La hauteur influe également sur le comportement du vent ; une hauteur de bâtiment élevée conduit à une vitesse de vent plus élevée au niveau du piéton (**Wang et al. 2016, Ying et al.2016**). Pour les mêmes formes irrégulières, l'effet de la hauteur sur le vent était remarquable lorsque le profil urbain est étroit pour toutes les incidences.

A ces recommandations peuvent s'ajouter celles en rapport avec la variation du gabarit. Le profil urbain asymétrique a aussi une influence non négligeable. Les résultats s'accordent avec les recherches antérieures qui ont indiqué qu'une hauteur faible pourrait créer un environnement moins venteux dans les zones urbaines et que les bâtiments élevés créeraient des vents forts au niveau des piétons (**Wang et al. 2016**). L'assemblage de bâtiments de faible et grande hauteur influe le régime de la ventilation. Si un bâtiment de faible hauteur est situé à côté d'un bâtiment de grande hauteur, des zones de haute et basse pression sont générées en amont et en aval (**Sergey et al. 2016**)

La ventilation intérieure est tributaire en premier lieu du niveau de la ventilation extérieure. Toutes ces dispositions urbaines adoptées pour le contrôle de la ventilation extérieure doivent être vérifiées par rapport au potentiel qu'elles offrent de renouveler l'air à l'intérieur des bâtiments. Généralement, plus l'espace extérieur est ventilé plus grand est le potentiel de ventilation intérieure, à savoir plus l'écartement entre bâtiments est important et le profil urbain est large, plus importante est la ventilation intérieure.

Cependant, quelques compléments sont nécessaires. Il s'agit d'une part du rôle de l'incidence du vent et d'autre part de la géométrie du bâtiment. L'orientation du bâti par rapport au vent affecte différemment l'espace intérieur. La direction oblique favorise la création de zones de pressions différentes sur les façades des bâtiments. Cette direction est

donc la plus favorable pour une ventilation intérieure parce que cette différence de pressions est la condition d'une ventilation transversale.

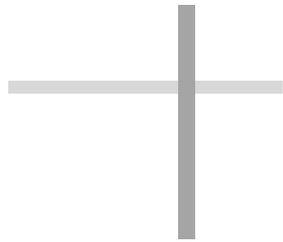
Aussi, la ventilation extérieure permet la dilution des polluants car le milieu urbain est connu pour être générateur de polluants. Cette dispersion des polluants est sensible à la direction du vent qui conditionne leur déplacement.

2. AXES FUTURS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

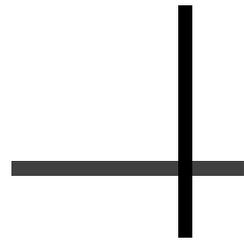
Le traitement de ce sujet d'étude nous a ouvert largement les portes de la recherche scientifique et nous a orienté effectivement vers des directions inépuisables, car plus on apprend plus on découvre le tas des terrains vierges qui restent à défricher. A cet effet, plusieurs volets intéressants peuvent faire l'objet de recherches ultérieures et notamment :

- Etudier l'influence du profil H/w sur le potentiel de la ventilation intérieure ;
- Vérifier l'effet du profil H/w sur la dispersion des polluants
- Etudier le rapport entre la consommation énergétique des bâtiments et la ventilation extérieure.
- Evaluer l'interaction entre le profil H/w et les effets aérodynamiques dans l'espace extérieur.
- Evaluer l'effet de l'incidence du vent par rapport aux masses bâties sur la ventilation intérieure ;
- Estimer l'impact de la hauteur des bâtiments sur la sécurité de l'utilisateur ;

L'ensemble de ces idées constituent de nouvelles orientations pour les recherches futures. Nécessitant plus d'attention, elles vont même participer à enrichir ce domaine de l'architecture environnementale et la conception bioclimatique. Le développement de ces connaissances peut contribuer au développement durable de nos villes de demain.



BIBLIOGRAPHIE



BIBLIOGRAPHIE

1. **Achour-Younsi, S., Kharrat, F.** (2016). Outdoor thermal comfort: Impact of the geometry of an urban street canyon in a Mediterranean subtropical climate – Case study Tunis, Tunisia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. N°216, pp. 689 – 700.
2. **Adolphe, L.** (2001). Modelling the link between built environment and urban climate: towards simplified indicators of the city environment. In : *Seventh International IBPSA Conference*. Rio de Janeiro-Brazil, pp 679-684.
3. **Adolphe, L.** (2001). A Simplified Model of Urban Morphology: Application to an Analysis of the Environmental Performance of Cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*. Vol 28, N° 2, pp 183-200
4. **Adolphe, L., Barlet, A., Boussoualim, A., Ait-Ameur, K., Casal, A.** (2002). Le confort dans les espaces urbains. In : *SAGACités : vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines*. Rapport final partie A. Laboratoires GRECO-EAT, EAPB.
5. **Adolphe, L. et al.** (2015). Evaluation de dispositifs de rafraîchissement urbains. projet Ilots de Fraicheur Urbains IFU. Rapport final. Toulouse, France
6. **Ait-Ameur, K.** (2002). Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les espaces publics urbains : validation d'un système d'indicateurs "morpho-climatiques" et d'un indicateur de confort. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes
7. **Ali-Toudert, F.** (2000). Intégration de la dimension climatique en urbanisme. Mémoire de magister. EPAU, Alger.

8. **Ali-Toudert, F.** (2005). Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate. Thèse de Doctorat, Université de Freiburg.
9. **Ali-Toudert, F. et Mayer, H.** (2006). Numerical effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in a hot and dry climate. *Building and Environment*. N°41, pp. 94-108.
10. **Ali-Toudert, F., Mayer, H.** (2007). Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy*. N°81, pp 742-754
11. **Algeciras, J.A.R., Consuegra, L.G., Matzarakis, A.** (2016). Spatial-temporal study on the effects of urban street configurations on human thermal comfort in the world heritage city of Camagüey-Cuba. *Building and Environment*. [Vol 101](#), pp. 85-101. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.026>
12. **Al-Sallal Khaled, A., Al-Rais, L.** (2012). Outdoor airflow analysis and potential for passive cooling in the modern urban, context of Dubai. *Renewable Energy*. N°38, pp.40-49.
13. **Allain, R.** (2005). *Morphologie urbaine: géographie, aménagement et architecture de la ville*. Armand Colin édition. Paris.
14. **Allegrini, J., Dorer, V., Carmeliet, J.** (2015). Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. [Vol 144](#), pp. 108-117, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.024>
15. **Amin, J.A., Ahuja, A.K.** (2011). Experimental study of wind-induced pressures on buildings of various geometries. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. Vol. 3, N°5, pp. 1-19.
16. **Amirtham, L.R., Horrison, E.** (2016). Role of Built Environment on Factors Affecting Outdoor Thermal Comfort - A Case of T. Nagar, Chennai, India. *Indian Journal of Science and Technology*. Vol 9, N° 5, [DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i5/87253](#).
17. **Andreou, A.** (2014). The effect of urban layout, street geometry and orientation on shading conditions in urban canyons in the Mediterranean. *Renewable Energy*. N°63, pp.587-596
18. **Arantes, L., Marry, S., Baverel, O. et Quenard, D.** (2016). Efficacité énergétique et formes urbaines : élaboration d'un outil d'optimisation morpho-énergétique.

- Cybergeog : European Journal of Geography* [En ligne], consulté le 25 octobre 2019.
<http://journals.openedition.org/cybergeog/27584> ; DOI : [10.4000/cybergeog.27584](https://doi.org/10.4000/cybergeog.27584)
19. **Athamena, k.** (2012). Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs : cas des éco-quartiers. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes.
 20. **Attila, B.** (1998). Formes urbaine aujourd'hui et demain, In : *le carré bleu : tendances et analyses*. N° 1, pp.08-21.
 21. **Baetke, F., Werner, H., Wengle, H.** (1990). Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol.35, pp. 129-147.
[https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90213-V](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90213-V)
 22. **Badariotti, D., BinhTran, D., Piombini, A., Conesa, A.** (2014). Relation entre Morphologie urbaine et Mobilité à travers l'exploration du concept de 'morphomobilité' : Analyse des apports des indicateurs morphologiques et des indicateurs de mobilité appliqué au cas de la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS). *Journées de l'APERAU, Colloque « Villes à vivre »*, Montréal, Canada.
 23. **Barré, C.** (2000). *Les efforts du vent sur les ouvrages*. CSTB Magazine. N° 129. Edition CSTB.
 24. **Belgacem, H.** (2015). Géométrie et microclimat : sinuosité et vent. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes
 25. **Belmaaziz, M.** (2015). Etude du microclimat dans le quartier du Panier : synthèse partielle des résultats de la campagne de mesures d'été. Rapport interne, unité de recherche de project[s], pp.18.
 26. **Benamor, K.** (2017). *L'impact de la morphologie urbaine sur la demande énergétique dans les zones arides -Cas d'un tissu urbain épars*. Thèse de magister, Université Mohamed Khider – Biskra.
 27. **Benzerzour, M.** (2004). *Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morphoclimatique"*. Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.
 28. **Berezowska –Azzag, E.** (2011). *Projet urbain guide méthodologique : connaitre le contexte du developpement durable*. Edition Synergie. Alger.

29. **Blocken, B., Carmeliet, J.** (2004). Pedestrian wind environment around buildings: literature review and practical examples. *Journal of thermal envelope and building science*. Vol 28, N° 2, pp.107- 159.
30. **Blocken, B., Janssen, W.D., Hooff, T. van.** (2012). CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environmental Modelling & Software*. N° 30, pp.15-34
31. **Blocken, B., Tominaga, Y., Stathopoulos, T.** (2013). CFD simulation of micro-scale pollutant dispersion in the built environment, *Building and Environment*. N°64, pp. 225–230
32. **Bonhomme, M. et al.** (2015). Evaluation du potentiel d'économie d'énergie grâce aux dispositifs de rafraîchissement urbains, Ilots de Fraîcheur Urbains. Rapport final de recherche. Toulouse, France.
33. **Bouketta, S.** (2011). Effet de la géométrie urbaine sur l'écoulement du vent et le confort dans les espaces urbains extérieurs, cas de la ville de Jijel. Mémoire de Magistère. Université Constantine
34. **Bouketta, S., Bouchahm, Y.** (2017). Numerical Simulation of Effect of Urban Geometry Layouts on the Wind in Outdoor Spaces under Mediterranean Climate. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. Vol 6, N° 61, pp.172-175
35. **Bourbia, F., Awbi, H. B.** (2004). Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate: Part 1: Air and surface temperature measurements. *Renewable Energy*. Vol 29, N°2, pp. 249-262.
36. **Boussoualim, A.** (2002). Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur- Etude de cas à Blagnac. Thèse de doctorat, école d'architecture de Nantes.
37. **Bouyer, J.** (2009). Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
38. **Bouzir, T.A.K.** (2018). *Morphologie urbaine et pollution sonore : étude de cause à effet. Cas de la ville de Biskra*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra.
39. **Bottema, M.** (1992). *Wind climate and urban geometry*. University of technology, Eindhoven, pp.44.

40. **Bottema, M.** (1993). Wind climate and urban geometry. Technische Universiteit Eindhoven. <https://doi.org/10.6100/IR388789>
41. **Bottema, M.** (1997). Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion. *Atmospheric Environmen*. Vol 31, N°18, pp. 3059-3075
42. **Bozonnet, E.** (2005). Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle
43. **Briche, E.** (2016). Le projet MC3 – Mediterranean Cities and Climate Change. Mesures, instrumentations et modélisation du climat urbain en région PACA.
44. **Brown, G., DeKay, M.** (2000). *Sun wind and light: architectural design strategies*, 2nd Edition John Wiley & Sons Inc.
45. **Brunner, C.** (2005). *Densité et formes urbaines dans la métropole marseillaise*. Editions Imbernon. Marseille.
46. **Bürklin, T. et Peterek, M.** (2008). *Basics Morphologie urbaine*. Edition Birkhäuser. Berlin.
47. [Carpentieri, M., Robins, A.G. \(2015\). Influence of urban morphology on air flow over building arrays. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol 145, pp. 61-74. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.06.001](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.06.001)
48. **Chatelet, A., Lavigne, P Fernandez, P.** (1998). *Architecture Climatique ; une contribution au développement durable. Tome 2 : Concepts et Dispositifs*. Edition Edisud.
49. [Chen, L., Yi, L. \(2015\). Effects of China's urban form on urban air quality. *Urban studies*. Vol. 53, N° 12, pp. 2607-2623. https://doi.org/10.1177/0042098015594080](https://doi.org/10.1177/0042098015594080)
50. **Chémery L.** (2006). *Petit atlas des climats*. Editions Larousse. France.
51. **Choay, F. & Merlin, P.** (1988). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*. Ed. PUF. Paris.
52. **Claramunt, C.** (2005). Syntaxe spatiale : vers de nouvelles formes de représentation d'une certaine logique de la cité. In : *Septièmes Rencontres de Théo Quant*, Besançon. France.
53. **Colombert, M.** (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
54. **Dani H., Mudjanarko, S.W., Setiawan, I.** (2015). CFD simulation for predicting the wind effect on the high rise building: NET Tower Surabaya. *Proceedings of*

- Narotama International Conference on Civil Engineering*. ISBN : 978-602-72437-2-9, pp. 173-182
55. **Dechaicha, A.** (2013). L'étalement urbain et les contraintes physiques et naturelles. Cas d'étude la ville de Bou Saâda. Thèse de doctorat, Université de Biskra
56. **De Herde, A., Liébard, A.** (2006). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Edition Le Moniteur.
57. **Deluz, J-J.** (2010). *Le tout et le fragment*, Éd. Barzakh.
58. **Donkyou, Y., Hoyano, A., Akinari, I.** (1997). Évaluation des formes urbaines à partir des aspects thermiques de l'environnement. *PLEA*. Khushiro, Vol 02, pp. 223-228
59. **Dorier –Apprill, E.** (2006). *Ville et environnement*. Editions Sedes. Paris.
60. **Duprat, B.** L'analyse des formes architecturales : cadre théorique, méthodes, applications scientifiques. Cours en ligne, Laboratoire d'Analyse des Formes de l'Ecole d'Architecture de Lyon. http://www.laf.archi.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=57%3Aanalyse-morphologique-guide&catid=25%3Aanalyse-morphologique&Itemid=44&lang=fr, consulté le 26/02/2016.
61. **Du, G.** (2009). Numerical simulation of wind environment in some typical layout residential districts. Dissertation de Master, Université Hunan, Changsha, China.
62. **Dupont, S.** (2001). Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine: réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
63. **Dupont, F., Cariolet, J-M., Cingolani, Correira, F., Kern, A., De La Bachelerie, A., Huang, Y., Musy, M., Hégron, G., Chen, H., Li, B.** (2012). Méthodologies de conception climatique de quartiers urbains pour l'efficacité énergétique des bâtiments, *ville et énergie*. pp 276- 281.
64. **Escourrou, G.** (1980). L'influence de l'urbanisation sur les précipitations de la région parisienne. *Cahiers de géographie Physique*. N°4, Université de Lille.
65. **Escourrou, G.** (1981). *Climat et environnement, les facteurs locaux du climat*. Masson.
66. **Escourrou, G.** (1991). *Le climat et la ville*. Nathan Université.

67. **Essbai, S.** (2010). Espace public et qualité de vie : Éléments de conception et de composition spatiale. Mémoire de magister. Ecole Nationale d'architecture-Rabat.
68. **Fanger, P.** (1972). *Thermal comfort*. Danish Technical Press. *Copenhagen*. Denmark
69. **Fathy, H.** (1970). *Construire avec le peuple*. Edition Sindbad, Paris.
70. **Feng, Y., Feng, Q., Stephen, S.Y.** (2013). Urban form and density as indicators for summertime outdoor ventilation potential: A case study on high-rise housing in Shanghai. *Building and Environment*. N° 70, pp.122-137.
71. **Flamand, O.** (2003). Actions du vent sur les ouvrages – effets dynamiques. CSTB Magazine, Université de Nantes, pp. 1-46
72. **Fouchier, V.** (1998). *Les densités urbaines et le développement durable : le cas de l'Île de France et des villes nouvelles*. Edition documentation française.
73. **Franck, R., et Hovork, F.** (2014). Urbanisme et consommation d'énergie des bâtiments. *Revue sortir du nucléaire*. <https://www.sortirdunucleaire.org/Urbanisme-et-consommation-d-energie-des-batiments>
74. **Frankhauser, P.** (2017). La modélisation fractale des tissus urbains : de l'analyse morphologique au concept d'aménagement, villes, réseaux et transport, le défi fractal. *Economica*. pp.73-111.
75. **Galli, G. et.al.** (2013). Passive Cooling Design Options to Improve Thermal Comfort in an Urban District of Rome, Under Hot Summer Conditions. *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*. Vol 5, N°5, pp. 4495-4500.
76. **Gandemer, J.** (1979). Les effets aérodynamiques du vent dans les ensembles bâtis. *Techniques et Architecture*. N°325
77. **Gandemer, J., et Guyot, A.** (1981). *La protection contre le vent*. C.S.T.B. Nantes.
78. **Gandemer, J.** (1991). *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti : guide méthodologique et conseils pratiques*. Ministère de l'Équipement, France.
79. **Ghasemia, Z., Mahnaz-Asemi, E. et Bisadi, M.** (2015). Promotion of Urban Environment by Consideration of Human Thermal & Wind Comfort: A literature review, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. N° 201, pp. 397 – 408.
80. **Givoni, B.** (1978). *L'homme l'architecture et e climat*. Editions du Moniteur. Paris.
81. **Givoni, B.** (1998). *Climate considerations in building an Urban Design*. John Wiley& Sons.

82. **Golany, G.** (1996). Urban Design Morphology and Thermal Performance. *Atmospheric Environment*. Vol 30, N° 3.
83. **Gomes M. G., Rodrigues A. M., Mendes P.** (2006). Wind effects on and around L- and U-shaped buildings », University of Lisbon, Portugal.
84. **Groleau, D., Marenne, Ch.** (1995). Environnemental specificities of the urban built forms, Rebuild-Rebuilding the European city. Integration of Renewable Energies in Established Urban Structures, Corfoue.
85. **Guyot, G.** (1977). Les effets aérodynamiques des brise-vent. Proclim E. Tome 8E, N° 3: pp. 137-188.
86. **Guyot, A.** Intervention de cours : le vent - l'architecture et l'aménagement urbain en PDF. Ecole d'architecture de Marseille Luminy. [http// : www.marseille.archi.fr](http://www.marseille.archi.fr).
87. **Hefny Salim, .M., Heinke Schlünzen, K., Grawe, D.** (2015). Including trees in the numerical simulations of the wind flow in urban areas : Should we care? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. N° 144, pp. 84–95.
88. **Herzog, T.** (1996). *Solar Energy in Architecture and Urban Planning*. (Ed.), New York.
89. **Heisler, G. M., Dewalle, D. R.** (1988). Effects of windbreak structure on wind flow. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol 22–23, pp. 41-69
90. **Ho, J., Ren, C., Ng, E.** (2015). A review of studies on the relationship between urban morphology and urban climate towards better urban planning and design in (sub) tropical regions. *ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*. Toulouse
91. **Hong, B., Borong, L.** (2015). Numerical studies of the outdoor wind environment and thermal comfort at pedestrian level in housing blocks with different building layout patterns and trees arrangement. *Renewable Energy*. N° 73, pp 18-27
92. **Horrison, E., Amirtham, L.R., Rajkumar, S.** (2015). Impact of urban morphology on Microclimatic conditions and outdoor thermal comfort. A study in mixed residential neighbourhood of Chennai, India. *ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*.
93. **Hoxey, R.P., Robertson, A.P., Basara, B., Younis, B.A.** (1993). Geometric parameters that affect wind loads on low-rise buildings: full-scale and CFD experiments. [*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol.50](#), pp. 243-252.

94. **Hsieh, C-M., Janb, F-C., Zhang L.** (2016). A simplified assessment of how tree allocation, wind environment, and shading affect human comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*. Vol 18, pp. 126–137, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2016.05.006>
95. **Hu, K., Cheng, S., Qian, Y.** (2018). CFD Simulation Analysis of Building Density on Residential Wind Environment. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. Vol 11, N°1, pp. 35- 43
96. **Izard. J.L, Guyot. A.** (1979). *Archi Bio*, Editions Parenthèses, Paris.
97. **Jedrzejewski, M., Pocwierz, M., Zielonko-jung, K.** (2017). The problem of airflow around building clusters in different configurations. archive of mechanical engineering. Vol 3. [DOI: 10.1515/meceng-2017-0024](https://doi.org/10.1515/meceng-2017-0024)
98. **Jideofor, A.** (2019). Effects of Street Geometry on Airflow Regimes for Natural Ventilation in Three Different Street Configurations in Enugu City, Different Strategies of Housing Design. *Ayşem Berrin Çakmaklı, IntechOpen*, [DOI: 10.5772/intechopen.84786](https://doi.org/10.5772/intechopen.84786).
99. **Jin, H., Liu, Z., Jin, Y., Kang, J., Liu, J.** (2017). The Effects of Residential Area Building Layout on Outdoor Wind Environment at the Pedestrian Level in Severe Cold Regions of China. *Sustainability*. Vol 9, N°12, pp.2310. [DO - 10.3390/su9122310](https://doi.org/10.3390/su9122310).
100. **Johansson, E., Yahia, M.W., Thorsson, S., Lindberg, F., Rasmussen, M. I.** (2017). Effect of urban design on microclimate and thermal comfort outdoors in warm-humid Dar es Salaam, Tanzania. *Int J Biometeorol*. N°62, pp. 373–385. [DOI 10.1007/s00484-017-1380-7](https://doi.org/10.1007/s00484-017-1380-7)
101. **Kaihua, H., Shidan, C., Yi, Q.** (2018). CFD Simulation Analysis of Building Density on Residential Wind Environment. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. Vol 11, N°1, pp.35-43
102. **Katarzym, K., Marek, J.** (2004). Wind speed at pedestrian level in a residential building complex. *The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA 2004*, Eindhoven, The Netherlands.
103. **Kent, C.W., Grimmond, S., Gatey, D.** (2017). Aerodynamic roughness parameters in cities: Inclusion of vegetation. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. N° 169, pp. 168–176.

104. **Kim M.K., Lee, H.W., Jung, W.S.** (2009). An analysis of wind field around the air quality monitoring station in the urban area by using the Envi-met model. *Journal of the Environment Sciences*. Vol 18, N°9, pp. 941-952.
105. **Kitous, S., Bensalem, R., Adolphe, L.** (2012). Airflow patterns within a complex urban topography under hot and dry climate in the Algerian Sahara. *Building and Environment*. N° 56, pp. 162-175
106. **Klemm, K., Jablonski, M.** (2004). Wind speed at pedestrian level in a residential building complex. *The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA 2004*. Eindhoven, The Netherlands, pp.19 – 22
107. **Kormaníková, L., Achten, H., Kopřiva, M., Kmet, S.** (2018). Parametric wind design. *Frontiers of Architectural Research*. Vol 7, N° 3, pp. 383-394
108. **Krishna, P.** (1995). Wind loads on low rise buildings — A review. [Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics](#). [Vol 54–55](#), pp. 383-396
109. **Kruger, E.L., Minella, F.O. et Rasia, F.** (2011). Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brésil. *Building and Environment*. N°46, pp.621-634.
110. **Kubota,T., Masao, M., Yoshihide, T., Akashi, M.** (2008). Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods. *Building and Environment*. N° 43, pp.1699-1708.
111. **Lavigne P., Fernandez, P., Brejon P.** (1994). *Architecture Climatique ; une contribution au développement durable. Tome 1 : Bases physiques : une contribution au développement durable*. Edition Edisud
112. **Le Feon, S.** (2014). Evaluation environnementale des besoins de mobilité des grandes aires urbaines en France - Approche par Analyse de Cycle de Vie. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne
113. **Lehtihet, M.** (2007). Modification des microclimats urbains par la couverture végétale avec référence à la ville de Jijel, mémoire de Magistère, université de Jijel.
114. **Leroyer, S.** (2006). Simulations numériques de l'atmosphère urbaine avec le modèle submeso: application a la campagne clu-escompte sur l'agglomération de Marseille. Thèse de Doctorat, L'Ecole Centrale de Nantes.
115. **Lévy, A.** (2005). Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et sociétés*. Vol 4, N° 122, pp. 25-48.

116. **Li, B., Luo, Z., Sandberg, M. and Liu, J.** (2015). Revisiting the ‘Venturi effect’ in passage ventilation between two nonparallel buildings. *Building and Environment*. Vol. 92, N° 2, pp. 714-722. [doi: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.10.023](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.10.023)
117. **Lotteau, M.** (2017). Développement d’une approche d’intégration des questions de morphologie urbaine dans l’évaluation environnementale des projets d’aménagement à l’échelle du quartier basée sur l’analyse de cycle de vie. Thèse de doctorat, École doctorale des Sciences chimiques de Talence -Gironde.
118. **Maignant, G.** (2005). Compacité et forme urbaine, une analyse environnementale dans la perspective d’un développement urbain durable. *Colloque sur le développement urbain durable, gestion des ressources et gouvernance*. Université de Lausanne. 21-23 Septembre.
119. **Matzarakis, A., Hwang, R. L., Lin, T. P.** (2011). Seasonal effects of urban street shading on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*. N°46, pp.863-870.
120. **Mendes, F., Petean, F., Lopes, A., Correia, E.** (2017). An Assessment of Falling Trees Due Strong Winds 3 in LISBON: Affected Species and Microclimatic Simulation. *Preprints 2017*, [doi: 10.20944/preprints201710.0177.v1](https://doi.org/10.20944/preprints201710.0177.v1).
121. **Menut, L.** (1997). Étude expérimentale et théorique de la couche limite atmosphérique en agglomération parisienne. Océan, Atmosphère. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
122. **Merlier, L.** (2015). On the interactions between urban structures and air flows: A numerical study of the effects of urban morphology on the building wind environment and the related building energyloads. Thèse de doctorat, INSA – Lyon.
123. **Meroney, R.N., Lateb, M., Yataghene, M., Fellouah, Saleh, H., Boufadel, F.M.C.** (2016). On the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments – A review, *Environmental Pollution*, N° 208, Part A, pp. 271-283, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.039>
124. **Mestoul Dj.** (2010).évaluation du degré de gêne dans les espaces publics extérieurs soumis aux effets aérodynamiques des bâtiments- cas d’étude : cité CNEP 800 logements de Bouzereah a Alger. Mémoire de magister, EPAU.
125. **Mochida, A., Lun, Y.F.** (2008). Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. [Journal of Wind Engineering and Industrial](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.05.001)

- [Aerodynamics](#). Vol 10-11, N°96, pp. 1498-1527.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.033>
126. **Moonena, P. et al.** (2012). Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. *Frontiers of Architectural Research*, N° 1, pp.197–228, <https://doi.org/10.1016/j.foar.2012.05.002>
127. **Morakinyo, T. E., Lam, Y. F.** (2016). Simulation study on the impact of tree configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort. *Building and Environment*. N° 103, pp. 262-275.
128. **Mouffok, M.** (2018). *Impact de la morphologie sur le microclimat urbain- cas de l'ilot traditionnel complexe de Ghardaïa*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra.
129. **Muret, J-P. et al.** (1987). *Les espaces urbains, concevoir, réaliser, Gérer*. Edition Le Moniteur, Paris.
130. **Nikolopoulou, M., Spyros, L. et Kikira, M.** (2004). Modèles de confort thermique pour les espaces extérieurs en milieu urbain, In : «Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain: une approche bioclimatique». Projet R.U.R.O.S : Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces. Édition C.R.E.S. Grèce.
131. **Ng, E., Katzschner, L., Wang, Y., Ren, C., & Chen, L.** (2008). Working Paper No. 1A: Draft Urban Climatic Analysis Map - Urban Climatic Map and Standards for Wind Environment - Feasibility Study, Hong Kong. From Technical Report for Planning Department HKSAR, The Chinese University of Hong Kong, http://www.pland.gov.hk/p_study/prog_s/ucmapweb/ucmap_project/content/content.html
132. **Ng, E.** (2005). Feasibility Study for Establishment of Air Ventilation Assessment System. Rapport final, Université Chinoise de Hong Kong.
133. **Ng, E., Chao, Y., Liang, C., Chao, R., Jimmy, C.H.F.** (2011). Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong, *Landscape and Urban Planning*. N° 101, pp. 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.01.004>
134. **Nourry, L-M.** (2008). *Vents Invention et Evolution des Formes*. Editions ENSAB-GRIEF-PUR, Paris.
135. **Nugrahanti, F. I.** (2018). The Impact of Building Mass Configuration Towards Wind-Driven Natural Ventilation in Apartment in Jakarta

136. **Oke, T.R.** (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands, *Atmosphere*. Vol 14, N°4, pp. 268-277, [DOI: 10.1080/00046973.1976.9648422](https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422)
137. **Oke, T.R.** (1987). *Boundary layer climates*. 2e édition. London.
138. **Oke, T.R.** (1987). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.
139. **Oke, T.R.** (1988). Street design and Urban Canopy layer climate. *Energy and Buildings*. N°11, pp. 103-113.
140. **Oke, T.R.** (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. IOM Report N°81.
141. **Olgyay, V.** (1998). *Arquitectura y Clima*. Editorial Gustavo Gili.
142. **Ouameur, A. F.** (2007). Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics : étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec. Université Laval, Québec.
143. **Ould-Henia, A.** (2003). Choix climatiques et construction: zones arides et semi arides : maison à cour de Bou-Saada. Thèse de Doctorat. [DOI: 10.5075/epfl-thesis-2795](https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-2795)
144. **Pagney, P.** (2000). *La climatologie*. 7e éd. Presse Universitaire de France. Paris.
145. **Panerai, P.** (1999). *Analyse urbaine*. éditions Parenthèses. Marseille
146. **Péneau, J.P.** (1993). Ajustement climatique et traces urbains au siècle des lumières. Université de Nantes. Centre d'Histoire des sciences et des Techniques.
147. **Penwarden, A.D. et al.** (1975). Wind environment around buildings. Building Research Establishment Report. Department of the environment. Her Majesty's Stationery Office. London
148. **Phuc, P. V., Nozu T., Kikuchi, H., Hibi, K., Tamura, Y.** (2018). Wind Pressure Distributions on Buildings Using the Coherent Structure Smagorinsky Model for LES. *Computation*. Vol 6, N° 32. [doi:10.3390/computation6020032](https://doi.org/10.3390/computation6020032)
149. **Prem, K.** (1995). Wind loads on low rise buildings — A review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. . [Vol.54-55](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)00055-I), pp. 383-396. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)00055-I](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)00055-I)
150. **Pumain, D., Paquot, T., Kleinschmager, R.** (2006). *Dictionnaire La ville et l'urbain*. Éditions Economica-Anthropos. Paris.

151. **Rafailidis, S.** (1997). Influence of Building Areal Density and Roof Shape on the Wind Characteristics Above a Town. *Boundary-Layer Meteorology*. Vol.85, pp. 255-271. <https://doi.org/10.1023/A:1000426316328>
152. **Rajagopalan, P., Kee, C. L., Elmira, J.** (2014). Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city, *solar energy*. N°107, pp.159-170.
153. **Ramponi, R. and Blocken, B.** (2012). A Computational Study on the Influence of Urban Morphology on Wind-Induced Outdoor Ventilation. *International Congress on Environmental Modelling and Software*, pp.381. <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2012/Stream-B/381>
154. **Ramponi, R. et al.** (2015). CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. *Building and Environment*. N° 92, pp.152 -166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.018>
155. **Ratti, C., Raydan, D., Streemers, K.** (2003). Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*. N° 35, pp. 49–59
156. **Ravéreau, A.** (1989). *La Casbah d'Alger, et le site créa la ville*. Edition Sindbad.
157. **Raynaud, D.** (1999). Forme urbaine: une notion exemplaire du point de vue de l'épistémologie des sciences sociales. *Actes du Colloque "Langages singuliers et partagés de l'urbain"*. L'Harmattan. Paris, pp. 93-120.
158. **Redon, E.** (2017). *Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique*. Thèse de doctorat, Université Toulouse II.
159. **Reiter, S.** (2008). Validation process for CFD simulations of wind around Buildings. *European built environment CAE conference*.
160. **Rheault, G.** (2016). La diffusion de formes urbaines occidentales dans la Chine contemporaine : une approche morphologique. Mémoire en Maîtrise en études urbaines, Université du Québec à Montréal.
161. **Rossi, A.** (1966). *L'Architecture de la ville*. Edition Infolio. Italie
162. **Saidouni, M.** (2001). *Éléments d'introduction à l'urbanisme : histoire, méthodologie, réglementation*. Casbah éditions, Alger.
163. **Salat, S.** (2011). *Les villes et les formes sur l'urbanisme durable*. Édition C.S.T.B et Hermann, Italie.

164. **Samba, D.** (2018). Modélisation des liens entre la morphologie urbaine, la génération de polluants et leur concentration dans l'air par l'approche PLS pathmodelling. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Alpes.
165. **Sanyal, P., Dalui S.K.** (2018). Effects of courtyard and opening on a rectangular plan shaped tall building under wind load. *International Journal of Advanced Structural Engineering*. Vol10, pp.169–188. <https://doi.org/10.1007/s40091-018-0190-4>
166. **Sao, T.M., Khaing, S.Y.** (2019). Evaluation of Turbulence Models and Wind Flow Behaviors around the Building. *IJERAT*. Vol 5, pp.95-107. [DO - 10.31695/IJERAT.2019.3407](https://doi.org/10.31695/IJERAT.2019.3407)
167. **Schoetter, R., Masson, V., Amossé, A., Bernard, J., Bocher, E., Bonhomme, M., Bourgeois, A., Faraut, S., Gardes, T., Goret, M., Hidalgo, J., Lévy, J-P., Long, N., Pellegrino, M., Petit, G., Plumejeaud, C., Poitevin, C. et Tornay, N.** (2019). Caractérisation du tissu urbain français pour la modélisation du climat urbain et de son interaction avec la consommation énergétique dans les bâtiments. *La Météorologie*. N°105, <https://doi.org/10.4267/2042/70169>
168. **Sergey K., Alla B, Stanislav P.** (2016). Influence of placement and height of high-rise buildings on wind pressure distribution and natural ventilation of low- and medium-rise buildings, *International Journal of Ventilation*, Vol 15, pp. 253-266, [DOI: 10.1080/14733315.2016.1214396](https://doi.org/10.1080/14733315.2016.1214396)
169. **Shakeel, A., Krishen K.** (2002). Effect of geometry on wind pressures on low-rise hip roof buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol 90, N° 7, pp. 755-779. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00152-6](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00152-6)
170. **Sharmin, T., Steemers, K., Matzarakis, A.** (2017). Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment *Sustainable Cities and Society*. Vol 34, pp. 293-308, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.006>
171. **Shishegar, N.** (2013). Street Design and Urban Microclimate: Analyzing the Effects of Street Geometry and Orientation on Airflow and Solar Access in Urban Canyons. *Journal of Clean Energy Technologies*. Vol 1, N°1.
172. **Schnabel, M.A., He, Y.** (2017). Outdoor Wind Environment Study of High-rise Residential Buildings in Urban Areas: A Literature Review. *1st International Conference of the Architectural Science*. pp. 773–782.

173. **Sénécal, G., Hamel, P-J. et Vachon, N.** (2006). Forme urbaine, qualité de vie, environnements naturels et construits. Éléments de réflexion et test de mesure pour la région métropolitaine de Montréal. [DOI : https://doi.org/10.7202/012107ar](https://doi.org/10.7202/012107ar)
174. **Soukehal, I.** (2011). L'Espace Enfant dans la ville, entre le conçu et le vécu, cas de la ville nouvelle Ali Mendjeli Constantine. Mémoire de magister, Université de Batna.
175. **Stathopoulos, T., Blocken, B.** (2016) Pedestrian Wind Environment Around Tall Buildings. *Advanced Environmental Wind Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55912-2_6
176. **Stemmers Koen, A. et al.** (2004). Morphologie urbaine. Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces – coordonné par le CRES, Département des bâtiments (<http://alpha.cres.gr/ruros/>), Grèce
177. **Sujit K. D., Pallab K.** (2015). Estimation of Wind Load on a Tall Building under Interference Effects: A Case Study. *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 9, No. 1, 2015 pp 84-101
178. **Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik M., Van Den, D. A.** (2015). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*. N° 83. p 65-78.
179. **Tariq, T., & Arch, M.** (2014). An ENVI-met Simulation Study on Urban Open Spaces of Dhaka – Bangladesh. *30th International PLEA Conference (Passive and Low Energy Architecture)*.
180. **Tarrade, M. L., Brizzi, L. E., David, L., Calluau, D.** (2004). Etude aérodynamique en aval des modèles de bâtiments placés dans un vent en incidence. *9^{ème} congrès francophone de vélocimétrie Laser*.
181. **Tebbani, H., Bouchahm, Y.** (2016). Caractérisation du confort thermique dans les espaces extérieurs : Cas de la ville d'Annaba. *Nature & Technologie C- Sciences de l'Environnement*. N° 15, pp.14-25.
182. **Tebbani, H.** (2018). Evaluation du confort thermique extérieur : effet de la morphologie et de la végétation sur les échanges radiatifs. Thèse de doctorat, Université Constantine 3.
183. **Toja-Silva, F., Kono, T., Peralta, C., Lopez-Garcia, O., Chen, J.** (2018). A review of computational fluid dynamics (CFD) simulations of the wind flow around buildings for urban wind energy exploitation. [*Journal of Wind Engineering and*](#)

- Industrial Aerodynamics*. Vol 180, pp. 66-87.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.07.010>
184. **Tran, D-B. et al. (2014)**. Morphologie urbaine et mobilité dans la Communauté Urbaine de Strasbourg. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], consulté le 25 octobre 2019. <http://journals.openedition.org/cybergeo/26665>, DOI : [10.4000/cybergeo.26665](https://doi.org/10.4000/cybergeo.26665)
185. **Tsang, C.W., Kwok, K.C.S., Hitchcock, P.A. (2012)**. Wind tunnel study of pedestrian level wind environment around tall buildings: Effects of building dimensions, separation and podium. *Building and Environment*. Vol 49, pp. 167-181.
186. **Tsoka, S. (2011)**. Relations entre morphologie urbaine, microclimat et confort des piétons : Application au cas des éco-quartiers. Thèse de Master STEU, Cerma. ENSA Nantes
187. **Tsoka, S. (2017)**. Investigating the Relationship Between Urban Spaces Morphology and Local Microclimate: a study for Thessaloniki. *Procedia Environmental Sciences*. N° 38, pp. 674 – 681
188. **Turbelin, G. (2000)**. Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets du vent. Thèse de doctorat, Université d'Évry-Val-d'Essonne.
189. **Varapaev, V.N., Doroshenko, A.V. (2014)**. Methodology for the Prediction and the Assessment of Pedestrian Wind Environment around Buildings, *Procedia Engineering*, N° 91, pp.200 – 203.
190. **Vinet, J. (2000)**. Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat. Ecole d'architecture de Nantes.
191. **Vitruve P. M.** De l'architecture- livre sixième « De la disposition des maisons appropriées aux localités », In : <http://remacle.org/bloodwolf/erudits/Vitruve/livre6.htm#I>, consulté le 02/08/2012.
192. **Wang, B. (2015)**. Les impacts de la morphologie urbaine sur le vent : performance d'énergie éolienne à l'échelle de quartier. Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse.
193. **Wang, B., Shuai, S., Minglei, D. (2018)**. Wind potential evaluation with urban morphology- A case study in Beijing. *Energy Procedia*. N°153, pp.62-67.
194. **Wang, Y. (2018)**. Study on the influence of sunlight and ventilation on outdoor activity space of residential district. *Materials Science and Engineering*. Pp. 1-7

195. **Wang, Y., Akbari, H., Chen, B.** (2016). Urban Geometry and Environmental Urban Policy Development. *Procedia Engineering*. N°169, pp.308 – 315
196. **Wang, Y., Zhou, D.** (2016). Simulation Study of Urban Residential Development and Urban Climate Change in Xi'an, China. *International High- Performance Built Environment Conference – A Sustainable Built (iHBE 2016)*
197. **Wei, R., Song, D., Wong, N., Martin, M.** (2016). Impact of Urban Morphology Parameters on Microclimate. *4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island (UHI) 2016. Procedia Engineering*. Vol.169, pp. 142 – 149
198. **Weihong, G., Xiao, L., Xu, Y.** (2015). Study on Natural Ventilation Design Optimization Based on CFD Simulation for Green Buildings, *Procedia Engineering*. N° 121, pp. 573 – 581.
199. **Wester, L., Audard, F.** (2017). Mobilité quotidienne à Brazzaville : l'adaptation du transport artisanal à une morphologie urbaine spécifique. *Les Cahiers Scientifiques du Transport*. N° 72, pp. 121-142.
200. **Xie, Z.T., Coceal, O., Castro, I.P.** (2008). Large-eddy simulation of flows over random urban-like obstacles. *Bound-Layer Meteorol.* Vol 129, N°1
201. **Xing, S., Yiyu, Z., Jin, D., Runqing, S., Jianguo, W.** (2015). Assessment of pedestrian wind environment in urban planning design, *Landscape and Urban Planning*. N° 140, pp. 17–28, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.03.013>
202. **Yang, L., Bao-Jie, H., Miao, Y.** (2014). Strategies for creating good wind environment around Chinese residences, *Sustainable Cities and Society*. N°10, pp.174–183, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.08.003>
203. **Yang, X., Li, Y.** (2015). The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and street surface temperature. *Building and Environment*. N°90, pp.146-156
204. **Yao, J.** (2016). The influence of tall buildings on the pedestrian level micro-climate in Lujiazui New District, Shanghai. Thèse de doctorat, Université de Nottingham.
205. **Yin, J., Zhan, Q., Xiao, Y., Ta Wang, T., Che, E., Meng, F., Qian, Y.** (2014). Correlation between Urban Morphology and Wind Environment in Digital City using GIS and CFD Simulations. *iJOE*. Vol 10, N° 3, <http://dx.doi.org/10.3991/ijoe.v10i3.3631>
206. **Ying, X-Y., Ding, G., Hu, X-J., Zhang, Y-Q.** (2016). Developing planning indicators for outdoor wind environments of high-rise residential buildings. *Journal*

of Zhejiang University-Science A (*Applied Physics & Engineering*). Vol 17, N°5, pp. 378-388.

207. **Yongfeng, Q., Milliez, M., Musson-Genon, L., Carissimo, B.** (2012). Numerical study of the thermal effects of buildings on low-speed airflow taking into account 3D atmospheric radiation in urban canopy, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. N° 104-106, pp. 474-483.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2012.03.008>
208. **Yuan, C., Norford, L., Britter, R., Ng, E.** (2016). A modelling-mapping approach for fine-scale assessment of pedestrian-level wind in high-density cities, *Building and Environment*. N° 97, pp.152-165, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.006>
209. **Zheng, Y., Shi, Y., Ren, C., Ng, E.** (2016). Urban Ventilation Strategies for Micro Climate Improvement in Subtropical High-density Cities: A Case Study of Tai Po Market in Hong Kong. *Urban Planning International*. Vol 31, pp.68-75.
[DO - 10.22217/upi.2015.230](https://doi.org/10.22217/upi.2015.230).

Webographie

1. www.wilayadejijel.net
2. http://mesonet.agron.iastate.edu/sites/dyn_windrose.phtml?station=DAAV&network=DZ_ASOS&units=mps&nsector=36&fmt=png&year1=2001&month1=2&day1=1&hour1=12&minute1=0&year2=2015&month2=2&day2=31&hour2=12&minute2=0
3. Sans auteur. Le millénaire urbain, Rapport O.N.U dans le cadre de la Session extraordinaire de l'Assemblée générale des Nations Unies, New York, 6-8 juin 2001, In :<http://www.un.org/french/ga/istanbul5/kit2.pdf>.

Divers :

1. Ministère de l'habitat, 1993.P.10-11.
2. Google Earth, 2016, 2017
3. P.D.A.U. de la commune de Jijel, révision 2009



Nom et prénom : BOUKETTA Samira

Titre : optimisation du contrôle du vent dans les espaces urbains
sous climat humide. Cas de la ville de Jijel

Thèse en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences
Spécialité architecture. Option architecture bioclimatique

Résumé

A l'échelle d'une entité urbaine, les préoccupations liées au phénomène vent sont relatives au contrôle des effets aérodynamiques dans les espaces extérieurs qui affectent le confort du piéton, le potentiel de la ventilation de renouvellement de l'air et de refroidissement des bâtiments et la dispersion des polluants.

Dans ce travail de thèse avons abordé la problématique qui souligne les interactions entre les paramètres géométriques de l'espace urbain (profil urbain), la ventilation urbaine et son contrôle. L'objectif principal de cette étude consiste à proposer un guide méthodologique qui permet le contrôle du vent dans les espaces extérieurs principalement dans le contexte humide où le vent est une donnée essentielle avec laquelle il faut composer. A savoir qu'il ne s'agit pas tant de fournir un guide précis autant qu'il est d'offrir les éléments clés pour évaluation et qui peuvent contribuer à l'amélioration de la qualité aéraulique dans les zones urbaines.

Cette méthodologie est formulée sous forme d'indicateurs géométriques déduits de l'étude de la relation géométrie urbaine – vent. Il s'agit d'identifier les paramètres urbains géométriques les plus déterminants sur le comportement des flux d'air en milieu urbain. Par la suite, optimiser ces paramètres en s'appuyant sur la simulation numérique. Plusieurs préoccupations apparaissant liées à cette problématique à savoir : quels profils urbains choisir, quelle orientation préférer, quelle forme de bâtiment adopter ?.

L'étude a été menée sur un cas d'étude à la ville de Jijel contenant une variété de configurations spatiales des bâtiments offrant des prospects variés de l'espace extérieur. L'évaluation microclimatique a été faite par investigation (mesure in-situ) pour les deux périodes froide et chaude et par simulation numérique (logiciel ENVI-met). Cet outil très important a permis d'améliorer les caractéristiques géométriques des espaces en proposant des profils urbains H/w variés associés à des angles d'incidence du vent variés selon les orientations N-O, N-E, et d'élargir le choix à travers des scénarios différents.

La comparaison entre les scénarios permet de faire ressortir la performance de chaque profil. Les résultats indiquent que le profil urbain influence le potentiel de la ventilation extérieure. Les dimensions de l'espace entre bâtiments affectaient d'une manière significative la distribution de la pression du vent sur les différentes façades en fonction de la direction du vent. L'effet de la hauteur sur le vent était remarquable non seulement pour le profil régulier mais aussi pour le profil urbain asymétrique. Aussi, l'orientation du bâti par rapport à la direction du vent est au même titre déterminant, puisqu'elle conduit à l'amplification ou la diminution du potentiel de la ventilation.

Mots clés : vent, profil urbain, ventilation extérieure, espace urbain, simulation, ENVI-met

Directeur de thèse : **Pr. BOUCHAHM Yasmina** – Université Constantine 3

Année Universitaire : 2020 - 2021