

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme

Thèse de Doctorat
Option : Architecture et Environnement

**Forme urbaine et environnement thermo-
aéraulique en climat chaud et sec :**
Cas du ksar de Ghardaïa dans le Sahara algérien.

Présentée par :
Mme Samia KITOUS

Composition du jury

Pr. R. BENSALEM	Rapporteur
Pr. L. ADOLPHE	Co-rapporteur
Pr. N. CHABI-CHEMROUK	Présidente de jury
Pr. S. MAZOUZ	Membre de jury
Dr. A. BOUSSOUALIM	Membre de jury
Dr. KHELAF	Membre de jury
Dr. S. OUTAS-ABDOU	Membre de jury

Septembre 2012

À la mémoire de mon père,

À ma tendre mère,

Mouloud et nos petites Rékia et Yasmine,

Tata, mes frères et sœurs, neveux et nièces.

Remerciements

Toute ma reconnaissance va vers Pr. R. BENSALEM qui a accepté de diriger mon travail. Son aide, ses orientations et ses encouragements m'ont été des plus précieux.

Je remercie Pr. L. ADOLPHE qui a co-encadré ce travail.

De même, je suis reconnaissante au Pr. P. FERNANDEZ, directeur du LRA-GRECO, de m'avoir accueillie au sein de son laboratoire. Je suis également sensible à l'intérêt particulier qu'ont manifesté A. CHATELET et F.BONNEAUD pour cette recherche.

Je remercie le directeur de l'Office National de Météorologie (ONM) d'Alger ainsi que le directeur du Centre de Recherche en Energies Renouvelables (CDER).

Ma pensée va également vers H. MADIOU, enseignant chercheur à l'université de Tizi-Ouzou. Son aide m'a été des plus précieuses. Pareillement, je remercie Mr. B. Salhi, enseignant chercheur à l'université de Tizi-Ouzou, pour m'avoir initiée à la recherche. Je suis également reconnaissante à Mr. M. Dahli, enseignant chercheur à l'université de Tizi-Ouzou.

Par ailleurs, je n'ai garde d'oublier la contribution inestimable de A. ATTIK, Y. BOUSRI, O. DOUAG, N. CHIBANE et S. BAALI tout le long de mon travail de terrain.

Enfin, des remerciements particuliers à Ghardaïa, ville très spéciale.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au (aux) :

- autorités locales de la wilaya de Ghardaïa,
- directeur du Cadastre de la commune de Ghardaïa,
- chef de la station ONM de Ghardaïa,
- directeur de la station hertzienne de Khetala,
- directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables, URAER,
- association de protection de l'environnement de Beni-Isguen,
- association des quartiers de Ghardaïa,
- populations locales dont le sens de l'hospitalité est sans égale.

Il est important de souligner que cette recherche n'aurait pu se faire sans le soutien des Ministères de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique algérien et français ainsi que du comité intergouvernemental algéro-français. Je les en remercie profondément.

Résumé.

Notre travail a pour objectif la caractérisation des microclimats urbains et vise à explorer l'effet d'une topographie complexe et des formes urbaines compactes et irrégulières sur les mécanismes d'écoulement d'air dans les rues canyons, examiner l'effet de ces phénomènes sur l'environnement thermique et les conditions de confort en extérieur durant le cycle journalier et enfin, aboutir à des recommandations les urbanistes et architectes.

La vieille ville de Ghardaïa, située dans la partie Nord du Sahara Algérien, est retenue comme cas d'étude. Édifiée sur une colline, l'établissement traditionnel se caractérise par une structure urbaine très compacte représentative des villes à climat chaud et sec. Cette morphologie est d'un intérêt particulier pour l'étude des paramètres influant les modèles d'écoulements d'air en milieu urbain.

Cinq campagnes de mesure des principaux paramètres climatiques agissant sur le confort thermique ont été réalisées entre juin 2003 et août 2006 à travers les rues du Ksar. Les principaux résultats ont révélé la présence de mouvements d'air particulièrement importants même dans les rues très compactes. L'analyse des données a montré que les mouvements d'air dans les rues étaient fortement liés aux conditions prévalant au-dessus des toits, lesquels étaient dépendants de l'exposition au vent des versants. En outre, deux modèles d'écoulements fondamentalement différents ont été identifiés en fonction de la longueur de la rue et de son type de profil : un important phénomène de canalisation le long de la rue longue et des écoulements tridimensionnels hypothétiques dans la rue canyon courte et la rue asymétrique. Les résultats ont également révélé l'effet des rues courbes et des passages couverts sur les mouvements d'air.

Enfin, les conclusions de cette recherche confirment les études précédentes sur l'effet de la morphologie urbaine (géométrie de la rue, son orientation ainsi que les protections horizontales) dans la réduction du stress thermique d'été dans les villes du désert. Elles soulignent également l'importance de l'action du vent sur l'environnement thermique et les conditions de confort durant les saisons d'hiver et d'été.

Abstract.

Our research tends to explore the impact of a complex topography and irregular compact urban structure on the airflow mechanisms at street level, examine the effect of these phenomena on outdoor thermal comfort during the daily cycle, on both summer and winter periods, and produce recommendations for urban planners and architects.

This case study is based on the old city of Ghardaïa, in the northern part of the Algerian Sahara, under hot and dry climate. Built on a rocky hill, the traditional establishment is characterised by a strong compact urban structure. This original morphology is particularly interesting for studying the parameters influencing urban airflow patterns.

Five extensive measurement campaigns of the major climatic parameters that affect thermal comfort have been performed between June 2003 and August 2006. The main results highlighted significant air movements even in very deep street canyons under certain conditions. Data analysis showed that the air movements within the streets were closely related to the upwind conditions above the roofs which are dependent on the slope exposure to the wind. Furthermore, two fundamentally different in-flow patterns were identified depending on the street length and the street asymmetry: a significant channeling phenomenon within the long street canyon and hypothetical tri-dimensional in-flows in both short and asymmetric streets. Results also showed the effect of curved streets and covered walkways on air movements.

Finally, conclusions of this research confirm previous studies on the effect of urban morphology (street geometry, orientation and horizontal protection) in reducing summer heat stress in the desert cities. They also show the importance of wind action on comfort conditions during both summer and winter seasons.

ملخص الدراسة

إن هذا البحث يهدف إلى إيجاد أثر طبوغرافية-تضاريس- الموقع المعقدة والنمط العمراني المتضام وغير المنتظم على آليات تدفق الهواء في الفراغات الخارجية الواقعة في المناطق شبه الاستوائية. كما ويهدف إلى إيجاد أدوات للتنبؤ بسرعات الهواء في داخل الشوارع خاصة بالمعماريين ومخططي المدن . لقد تم اختيار البلدة القديمة لمدينة غرداية، والواقعة في الجزء الشمالي من الصحراء الجزائرية ، كحالة دراسية لهذا البحث. تميزت منشآت هذه المدينة المبنية على تلة صخرية بأسلوبها العمراني المتضام بقوة، والذي كان كاستجابة للمناخ الحار والجاف في تلك المنطقة. العمرانية كان التشكيل موضع اهتمام خاص لدراسة المعايير التي تؤثر على نماذج تدفق الهواء في المناطق لقد تم في الفترة ما بين شهر حزيران ٢٠٠٣ وشهر آب ٢٠٠٦، إجراء خمس حملات قياس ميدانية للعوامل المناخية الرئيسية المؤثرة على الارتياح الحراري لكل من أوقات الشتاء والصيف. النتائج الرئيسية تظهر وجود تدفق هوائية مهمة حتى في داخل الشوارع الضيقة والعميقة جدا. لقد لعب كل من تضاريس الموقع المنحدر، وتوجيه شوارعها، وأطوالها، والملاح غير المتناظرة على جانبيها، وانحناء بعضها، وتقاطعها أحيانا، وعدم تجانس المباني في ارتفاعها، إضافة إلى ظهور بعض الممرات المغطاة، دورا بارزا في تفسير تلك النتائج السابقة. إن نتائج هذا البحث جاءت من جهة مؤكدة للدراسات السابقة المتعلقة بأثر التشكيل العمراني (إبعاد الشوارع وتوجيهها إضافة إلى وسائل الحماية الأفقية فيها) على الحد من الإجهاد الحراري صيفا في المدن الصحراوية. ومن جهة أخرى، فإن نتائج البحث تظهر أهمية أثر الرياح على البيئة الحرارية وشروط الراحة خلال الدورة اليومية. إن هذا التأثير يتغير تبعا لأصل الرياح (حارة جافة أم باردة رطبة) التي يمكن إن تحسن أو على العكس تسبب تدهور ظروف الارتياح الحراري في الفراغات الخارجية بحسب فصول السنة. ختاماً، ينبغي إن يتم اخذ تأثير الرياح في عملية اختيار التصميم العمراني

TABLE DES MATIÈRES

Chap. I.	Introduction générale.....	1
	Introduction.....	1
I- 1.	Les chaleurs urbaines et la santé des êtres humains.....	2
I- 2.	L'intégration du climat dans les processus de conception urbaine.....	3
I- 3.	Problématique des zones arides.....	6
I- 4.	Pertinence de notre présente étude.....	7
I- 4.1.	Objectifs de la présente étude.	11
I- 4.2.	Hypothèses de travail.....	11
I- 5.	Méthodologie.	11
I- 6.	Pertinence du choix du cas d'étude.	12
I- 7.	Structure du plan.....	13
Chap II.	Le climat urbain.	15
	Introduction :.....	15
II- 1	Les échelles climatiques.....	16
II- 1.1.	Les échelles climatiques horizontales.	16
II- 1.1.1.	L'échelle "mésos".....	16
II- 1.1.2.	L'échelle locale.	16
II- 1.1.3.	L'échelle microclimatique.....	17
II- 1.2.	Les échelles climatiques verticales en milieu urbain.	18
II- 1.2.1.	La couche limite urbaine.	18
II- 1.2.2.	La couche de la canopée urbaine.	19
II- 1.2.3.	La sous-couche de rugosité.....	20
II- 1.2.4.	La sous-couche inertielle.	21
II- 2	Les processus physiques au-dessus de la ville.....	21
II- 2.1.	Le bilan radiatif au-dessus de la ville.	21
II- 2.1.1.	Le rayonnement visible.	22
II- 2.1.2.	Le rayonnement infrarouge.....	22
II- 2.1.3.	L'albédo urbain.	22
II- 2.2.	Les échanges de chaleur par conduction et convection.	24
II- 2.2.1.	Le transfert conductif.	24
II- 2.2.2.	Le transfert convectif.....	25
II- 2.3.	Le bilan d'énergie au-dessus de la ville.	25
II- 2.3.1.	L'énergie anthropique (Q_F).....	26
II- 2.3.2.	Le flux de chaleur stocké dans le sol et les bâtiments (Q_s).	26
II- 2.3.3.	Le flux de chaleur latente (Q_E).	26
II- 2.3.4.	Le flux de chaleur sensible (Q_H).....	26
II- 2.4.	L'îlot de chaleur urbain.....	27
II- 3	L'environnement thermique à l'intérieur de la canopée urbaine.	30
II- 3.1.	Le bilan énergétique dans la rue canyon.....	31
II- 3.2.	Le bilan thermique dans la rue canyon.....	37
II- 4	L'effet thermique du vent dans les espaces urbains.	41

Conclusion.	43
CHAP. III. Les écoulements d'air en milieu urbain.	45
Introduction.	45
III.1. Caractéristiques des écoulements d'air dans les couches de la limite urbaine et la canopée urbaine.	46
III- 1.1. Le profil du vent moyen dans la couche limite urbaine.	46
III- 1.1.1. La longueur de rugosité d'une surface.	48
III- 1.1.2. La hauteur de déplacement d_0 .	49
III- 1.2. La distribution du vent dans la canopée urbaine.	49
III.2. L'écoulement autour d'un bâtiment isolé.	49
III.3. L'écoulement d'air dans la rue canyon.	52
III- 3.1. Effet de la géométrie du canyon H/W.	53
III- 3.1.1. Cas d'un vent perpendiculaire à l'axe de la rue.	55
III- 3.1.1.1. Les régimes d'écoulements d'air dans la rue canyon.	55
III- 3.1.1.2. Caractéristiques de l'écoulement rasant.	57
i. Nature de la circulation.	57
ii. Intensité des écoulements.	58
iii. Effet de la géométrie urbaine sur le nombre de vortex associés à l'écoulement rasant.	59
III- 3.1.2. Cas d'un vent parallèle à l'axe de la rue.	60
III- 3.1.2.1. La relation entre la direction du vent libre, U, et la direction le long du canyon, v.	61
III- 3.1.2.2. La relation entre la vitesse du vent libre, U, et la vitesse le long du canyon, v.	61
III- 3.1.3. Cas d'un vent oblique à l'axe de la rue.	64
III- 3.2. Effet de la longueur L de la rue canyon.	67
III- 3.3. Effets des irrégularités architecturales et de la surface urbaine.	71
III- 3.3.1. Effet du profil de rue asymétrique.	71
III- 3.3.2. Effet de la forme de la toiture.	73
III- 3.3.3. Effet de la surface urbaine.	74
III- 3.4. Les effets thermiques.	78
III.4. L'écoulement d'air à l'échelle du quartier.	84
III- 4.1. L'approche morphométrique utilisée dans l'étude des écoulements à l'échelle du quartier.	85
III- 4.2. Caractéristiques des écoulements d'air dans une ordonnance d'obstacles régulière.	90
III- 4.2.1. Effet de la densité de l'aire des bâtiments.	90
III- 4.2.2. Effet de la configuration urbaine régulière sur les phénomènes d'abri et d'exposition au vent.	92
III- 4.2.3. Effet de la configuration urbaine régulière sur la stabilité des écoulements.	94
III- 4.2.4. Nature de l'écoulement à l'intérieur de l'ordonnance urbaine régulière.	96
III- 5. Travaux expérimentaux récents sur les écoulements d'air à l'échelle du quartier.	98
III- 5. 1. L'expérience URBAN 2000.	99
III- 5. 2. L'expérience Joint Urban 2003.	103
III- 5. 3. L'expérience Madison Square Garden (MSG05).	104

III- 5. 4.	L'expérience BUBBLE.	106
Conclusion.		110
Chap. IV.	Le confort thermique en espace extérieur.	113
Introduction.....		113
IV.1. Notion du confort thermique.		114
IV- 1.1.	Le bilan thermique et les échanges de chaleur.	114
IV- 1.1.1	Le métabolisme (M).	115
IV- 1.1.2	Les échanges de chaleur sensible.	115
IV- 1.1.3	Les échanges de chaleur latente Ehr : l'évaporation.	116
IV- 1.1.4	Les échanges par respiration Eres.	116
IV- 1.1.5	Les pertes thermiques par sudation E _{sd} + E _{ps} = E _{sw}	116
IV- 1.2.	Les variables environnementales influençant le confort thermique.	116
IV- 1.2.1.	La température de l'air.	117
IV- 1.2.2.	Le rayonnement solaire.	117
IV- 1.2.3.	L'humidité de l'air.	118
IV- 1.2.4.	La vitesse du vent.	118
IV- 1.3.	Les indices de confort thermique.	120
IV- 1.3.1.	L'indice PET.	122
IV- 1.3.2.	L'indice ICT (indice de contrainte thermique).	122
IV- 1.3.3.	L'indice ICTH.	122
IV- 1.3.4.	L'indice TSP4.	123
IV- 1.3.5.	L'indice OUT-SET*.	123
IV- 1.3.6.	Les indices DISC.	123
IV- 1.3.7.	Choix de l'indice de confort thermique dans les zones arides et chaudes.	123
IV- 2.	Les questions de confort d'ensemble dans les espaces urbains.	124
Conclusion.		126
Chap. V.	Formes urbaines et microclimats dans les villes du désert.	127
V- 1.	Caractéristiques climatiques des zones désertiques chaudes.	128
V- 1.1.	Le bilan énergétique des surfaces du désert.	128
V- 1.2.	Le régime des températures.	129
V- 1.3.	L'humidité relative.	130
V- 1.4.	Le régime des vents.	130
V- 2.	Les formes urbaines et l'adaptation climatique en milieu désertique.	131
V- 2.1.	La compacité urbaine et le confort thermique dans le désert du Néguev.	131
V- 2.2.	La géométrie urbaine et l'environnement thermique au Sud du Maroc.	135
V- 2.3.	La forme urbaine vernaculaire et le confort thermique dans le Sahara Algérien.	137
Conclusion.		140
CHAP. VI.	Application du protocole à un cas d'étude.	143
VI.1.	Présentation du cas d'étude.	144
VI- 1.1.	Inscriptions territoriale et géographique.	144
VI- 1.2.	Bref aperçu historique: le parcours humain.	145
VI- 1.3.	Caractéristiques climatiques de la vallée du M'zab.	146
VI- 1.3.1.	Le rayonnement solaire global.	146
VI- 1.3.2.	Les températures de l'air.	146

VI- 1.3.3.	L'humidité relative.....	147
VI- 1.3.4.	La pluviométrie.....	148
VI- 1.3.5.	Le régime des vents.....	148
VI- 1.3.6.	Les vents de sable.....	150
VI- 1.4.	Urbanisme et architecture.....	152
VI- 1.4.1.	Le ksar.....	152
VI- 1.4.2.	La palmeraie.....	154
VI- 1.5.	Caractéristiques topo-morphologiques du ksar de Ghardaïa.....	154
VI- 1.5.1.	Particularités topographiques.....	154
VI- 1.5.2.	Morphologie des formes bâties du ksar de Ghardaïa.....	155
VI- 1.5.2.1.	Compacité et directionnalité de la structure urbaine.....	155
VI- 1.5.2.2.	Configuration étagée des formes bâties et proéminence du lieu de culte.....	157
VI.2.	Méthodologie.....	158
VI- 2.1.	Les méthodes adoptées dans l'étude des écoulements d'air en milieu urbain. ..	158
VI- 2.1.1.	Les mesures sur site.....	158
VI- 2.1.2.	Les mesures en laboratoire.....	159
VI- 2.1.3.	La modélisation numérique.....	159
VI- 2.1.4.	Conclusion : approche adoptée par notre étude.....	160
VI- 2.2.	Les campagnes de mesure : protocole, procédure et instrumentation.....	160
VI- 2.2.1.	Échelles d'intervention.....	160
VI- 2.2.1.	Protocole de mesure.....	161
VI- 2.2.2.1.	Localisation de la mesure du vent de référence (ou vent local).....	161
VI- 2.2.2.2.	Choix des points de mesure dans le ksar.....	162
VI- 2.2.2.3.	Les paramètres climatiques mesurés.....	163
VI- 2.2.2.4.	Les méthodes de mesure employées.....	163
a.	La méthode du parcours urbain.....	163
b.	Les mesures en continu, en des points fixes.....	163
VI- 2.2.2.5.	Déroulement des campagnes de mesure.....	164
a.	Les campagnes de mesure basées sur la méthode des parcours urbains.....	164
i.	Choix du parcours.....	164
ii.	Paramètres climatiques mesurés et instrumentation déployée.....	169
iii.	Calibrage des instruments de mesure.....	172
iv.	Déroulement des campagnes de mesure de juin 2003 et février 2004.....	172
v.	Problèmes rencontrés.....	172
b.	Les mesures en continu, en des points fixes.....	173
i.	Choix des points de mesure.....	175
ii.	Mesures et instrumentation déployée.....	178
iii.	Calibrage des instruments de mesure.....	181
iv.	Protocole de mesure.....	181
v.	Acquisition et exploitation des données.....	184
vi.	Problèmes rencontrés.....	187
Chap. VII.	Les écoulements d'air dans les rues du Ksar : analyse et discussion.....	189
VII- 1.	Conditions des écoulements d'air au-dessus des toits.....	190
VII- 1.1.	Effet de la topographie du site.....	190
VII- 1.1.1.	Conditions de vents forts à moyens de direction Sud.....	190
VII- 1.1.2.	Conditions de vents forts à moyens, de direction Ouest.....	191

VII- 1.1.3.	Conditions de vents forts à moyens de direction Nord.....	192
VII- 1.2.	Effet de l'élément proéminent de la mosquée.	193
VII- 1.2.1.	Conditions de vent incident de direction Sud.	194
VII- 1.2.2.	Conditions de vent incident de direction Ouest.....	195
VII- 2.	Conditions des écoulements d'air à l'échelle microclimatique.....	198
VII- 2.1.	Effet de la topographie du site.	198
VII- 2.1.1.	Conditions de vents ambiants de direction dominante Sud :	200
VII- 2.1.2.	Conditions de vents ambiants de direction dominante Ouest :	200
VII- 2.2.	Effets de la configuration urbaine sur les écoulements d'air.	201
VII- 2.2.1.	Effet de l'orientation des rues.	201
VII- 2.2.2.	Effet de la longueur de la rue canyon (L).	203
VII- 2.2.2.1.	Les écoulements d'air dans la rue canyon longue.	205
i)	Conditions de vents parallèles à l'axe de la rue.	207
ii)	Conditions de vents obliques à l'axe de la rue.	209
VII- 2.2.2.2.	Les écoulements d'air dans la rue canyon courte	216
i)	Conditions de vents perpendiculaires à l'axe de la rue.....	217
ii)	Conditions de vents parallèles à l'axe de la rue.	221
iii)	Conditions de vents obliques à l'axe de la rue.	226
VII- 2.2.3.	Effet de l'asymétrie des rues canyons.	237
VII- 2.2.3.1.	Les écoulements d'air dans le canyon de référence.	238
VII- 2.2.3.2.	Les écoulements d'air dans la rue canyon asymétrique.....	239
i)	Conditions de vents parallèles à l'axe de la rue.	240
ii)	Conditions de vents obliques à l'axe de la rue.	243
a.	Cas de la rue canyon de configuration descendante.	243
b.	Cas de la rue canyon de configuration ascendante.	246
VII- 2.2.4.	Effet de la forme courbe des rues canyons.....	250
VII- 2.2.5.	Effets du passage couvert.	251
VII- 2.2.5.1.	Effet de survitesse et d'accélération à l'intérieur du PC.	253
i)	Conditions du vent au-dessus du toit de la mosquée.	253
ii)	Les écoulements d'air dans la rue concentrique.....	254
iii)	Relation entre les écoulements d'air entrant (dans) et sortant du PC.	255
iv)	Rôle des effets thermiques.	257
VII- 2.2.5.2.	Effet de réduction du vent dans la rue délimitée par des PC. ...	258
Conclusion générale sur les écoulements d'air dans les rues du Ksar de Ghardaïa.....		263
Chap. VIII.	Forme urbaine et microclimats dans le Ksar de Ghardaïa	267
VIII- 1.	Conditions climatiques au-dessus des toits.....	268
VIII- 1.1.	Le rayonnement solaire incident.	268
VIII- 1.2.	La température de l'air.	269
VIII- 1.2.1.	Effet de la topographie du site sur la température de l'air.....	269
VIII- 2.	Caractéristiques microclimatiques.	272
VIII- 2.1.	Le rayonnement solaire.....	273
VIII- 2.1.1.	Effet de pente sur le rayonnement solaire.	273
VIII- 2.1.2.	Effet du prospect H/W sur le rayonnement solaire.....	273
VIII- 2.2.	La température de l'air.	274
VIII- 2.2.1.	Effet de la topographie du site sur la température de l'air.....	274
VIII- 2.2.2.	Les effets thermiques du vent selon sa nature.	277
VIII- 2.2.3.	Effets de la morphologie urbaine sur la température de l'air.....	281

VIII- 2.2.3.1.	Effet de l'orientation des rues sur la température de l'air.	281
VIII- 2.2.3.2.	Effet du prospect H/W sur la température de l'air.	282
VIII- 2.2.3.3.	Effet du passage couvert sur la température de l'air.	284
VIII- 2.3.	Les températures de surface.	285
VIII- 2.3.1.	Effet de la topographie du site sur les températures de surface.	287
VIII- 2.3.2.	Effets de la morphologie urbaine sur les températures de surface.	288
VIII- 2.3.2.1.	Effet de l'orientation des rues.	288
VIII- 2.3.2.2.	Effet du prospect H/W.	290
VIII- 2.3.2.3.	Effet du passage couvert.	292
VIII- 2.4.	La température moyenne radiante.	294
VIII- 2.4.1.	Effet de la topographie du site sur la température moyenne radiante.	295
VIII- 2.4.2.	Effets de la morphologie urbaine sur la température moyenne radiante.	295
VIII- 2.4.2.1.	Effet de l'orientation des rues.	295
VIII- 2.4.2.2.	Effet du prospect H/W.	296
VIII- 2.4.2.3.	Effet du passage couvert.	297
VIII- 2.5.	Le confort thermique dans les rues du Ksar.	298
VIII- 2.4.1.	Effet de la topographie du site sur le confort thermique.	299
VIII- 2.4.2.	Effets de la morphologie urbaine sur le confort thermique.	299
VIII- 2.5.2.1.	Effet de l'orientation des rues.	299
VIII- 2.5.2.2.	Effet du prospect H/W.	300
VIII- 2.5.2.3.	Effet du passage couvert.	300
VIII- 2.5.1.	Effet de la ventilation urbaine sur le confort thermique.	301
	Conclusion sur les microclimats caractéristiques du ksar de Ghardaïa.	303
Chap. IX.	Conclusion générale et perspectives	307
IX- 1.	Bilan de notre recherche.	308
IX- 1.1.	La géométrie de la rue.	310
IX- 1.2.	L'orientation de la rue.	310
IX- 1.3.	Les protections horizontales.	311
IX- 1.4.	Les effets thermiques du vent.	311
IX- 2.	Principes de conception et applications dans un climat chaud et sec.	312
IX- 2.1.	La protection contre les vents indésirables.	312
IX- 2.2.	Favoriser la ventilation urbaine.	314
IX- 2.3.	La protection contre l'irradiation solaire.	315
IX- 2.4.	Synthèse : Favoriser la ventilation des rues tout en se protégeant des vents indésirables et du rayonnement intense du désert.	316
IX- 3.	Limites et perspectives.	318
Bibliographie	321	
Liste des Figures	343	
Liste des Tableaux	352	
Liste des symboles et abréviations	354	
Annexes:		
Annexe A : publication PLEA 2004		
Annexe B : publication PLEA 2005		

Annexe **C** : **publication CISBAT 2005**

Annexe D : publication Séminaire '**Habiter les déserts**', **2006**.

Annexe E: publication Building and Environment 2012.

CHAP. I. INTRODUCTION GÉNÉRALE.

Introduction.

L'urbanisation rapide de la planète se développe à un rythme sans précédent, principalement dans les climats arides et semi-arides chauds (Portnov et Erell 1998, Pearlmutter et al. 1999, Golden 2003/2004, Roth 2007). Cette croissance rapide qui transforme le couvert végétal en surfaces bâties implique des impacts climatiques variés et inédits. De tels impacts se traduisent par l'altération des propriétés radiatives, thermiques, hygrothermiques et aérodynamiques de l'environnement et la constitution d'un "îlot de chaleur" urbain, phénomène qui traduit le réchauffement de la ville.

L'îlot de chaleur urbain est considéré aujourd'hui comme l'un des problèmes urbains environnementaux les plus sérieux au monde (Moshida et Lun 2008) de par son occurrence et pour les préjudices qu'il cause notamment sur la santé. Ce phénomène tend à se généraliser dans les grandes villes. Les facteurs contribuant à sa formation intègrent le faible niveau de végétation dans les aires urbaines, l'absorption de l'énergie solaire par les surfaces pavées, la chaleur anthropique dégagée par les systèmes de climatisation, les véhicules et autres sources de chaleur, les multiples réflexions à partir des structures urbaines massives et la réduction de l'évacuation de la chaleur convective.

Dans les régions subtropicales où la couverture nuageuse est faible, le forçage solaire peut être extrême, le piégeage de la chaleur et la modification du bilan énergétique de surface peuvent avoir par conséquent des effets amplifiés (Golden 2003/2004). Ces effets incluent la détérioration du cadre de vie, la formation d'un îlot de pollution, des perturbations au niveau du confort en espace extérieur, une hausse des consommations énergétiques des bâtiments et des problèmes de santé liés à la pollution et aux vagues de chaleur (Changnon et al. 1996).

I- 1. Les chaleurs urbaines et la santé des êtres humains.

Les manifestations de la chaleur induites par la concentration urbaine s'expriment souvent par un inconfort plus ou moins intense. Toutefois, les effets peuvent être beaucoup plus dramatiques et il est un fait avéré que ces chaleurs sont à l'origine d'une augmentation de la mortalité dans les grandes villes. En effet, les vagues de chaleur se produisent à travers le monde et sont à l'origine d'un fort taux de mortalité, même dans les régions à climat tempéré du fait de la faible acclimatation des individus aux températures élevées (Kalkstein et Davis 1989, Kalkstein et Green 1997). Des villes de climat différent comme Toronto (Canada) et Sao Paulo (Brésil) rapportent une surmortalité attribuée à la chaleur extrême (Patz et al. 2005, Smoyer 1998) et les vagues de chaleur de 2003 ont tué 35 000 européens en deux semaines (Larsen 2003) et plus de 1900 personnes en Inde (IFRC 2003). Néanmoins, si les vagues de chaleur périodiques concernent différents climats, les zones arides sont soumises à un stress thermique plus important et les décès liés à la chaleur sont un problème chronique (CDC 2005). Durant la période 1993-2002, le nombre de décès en rapport avec la chaleur était trois à sept fois supérieur en Arizona (33°26'N, 112°1'W) que dans l'ensemble des États-Unis.

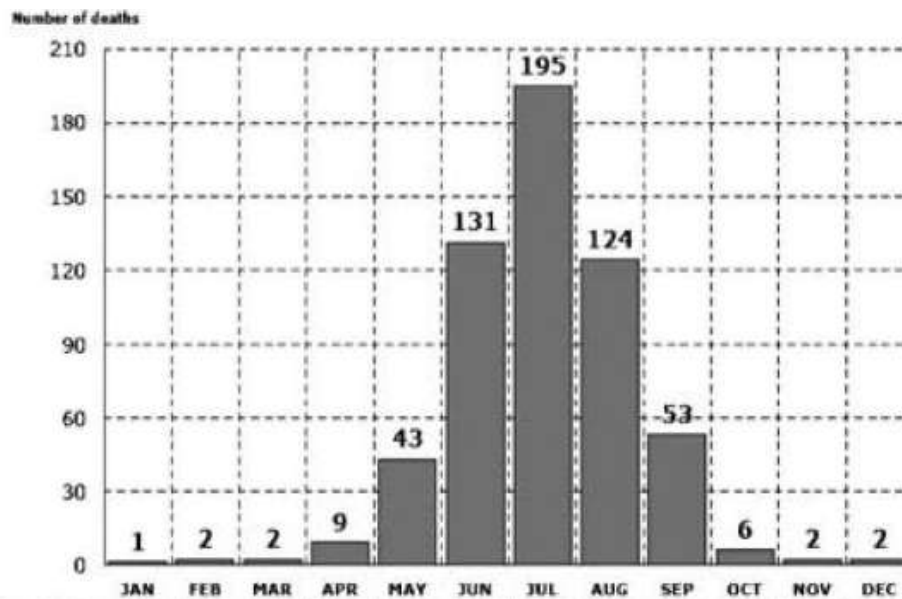


Fig. I- 1. Décès dus à la chaleur excessive en Arizona sur une période de 11 ans : 1992-2002 (Golden 2003/2004).

Il est par ailleurs démontré que la mortalité la plus élevée associée aux chaleurs extrêmes s'abat de manière disproportionnée à travers les quartiers. L'étude de Smoyer (1998) sur la ville de Saint-Louis (le Missouri, USA, 38°45' N, 90°23' W), où les vagues de chaleur sont fréquentes, révèle que le nombre de décès durant la plupart des canicules est généralement plus élevé dans les quartiers les plus chauds de la ville, les plus denses et les plus défavorisés. Ces résultats confirment ceux de Harlan et al. (2006). Ces auteurs utilisent un modèle numérique afin d'évaluer l'index de confort thermique (HTCI) en extérieur et ce, en fonction des variables climatiques locales collectées au cours de l'été 2003 dans huit quartiers différents à Phoenix, en Arizona (USA). Les résultats de l'étude révèlent des différences significatives dans les températures et l'indice de confort thermique au niveau des différents quartiers analysés. Les établissements à forte densité spatiale, caractérisés par une faible végétation et n'ayant pas d'espace ouvert dans

le quartier sont fortement corrélés aux températures et à l'indice de stress thermique les plus élevés. Les populations vivant dans ces quartiers sont plus vulnérables au stress thermique en raison des faibles ressources dont ils disposent pour faire face aux conditions de chaleur extrêmes. En revanche, les quartiers les moins denses, avec des espaces ouverts et une végétation plus abondante, sont des environnements plus confortables en été.

Le niveau d'exposition au stress thermique serait donc fortement corrélé aux variables écologiques (densité de la végétation et des constructions) (Harlan et al. 2006). La densité du bâti et le type de couverture au sol conduisent à des différences extrêmes dans les conditions thermiques à très petite échelle. Ces différences agissent sur la santé et le bien être des humains et soulignent la grande importance de l'échelle microclimatique dans les études du climat urbain et l'intégration des considérations climatiques dans les processus de planification urbaine.

I- 2. L'intégration du climat dans les processus de conception urbaine.

La forme des bâtiments, l'orientation, les matériaux, la couleur, etc., influencent le rayonnement, la température, le vent et d'autres paramètres pour produire un microclimat spécifique à un site. Les concepteurs urbains et urbanistes sont donc en mesure de créer des environnements urbains qui tirent parti des effets positifs du temps existant et du climat (Eliasson et al. 2007).

Les considérations climatiques dans l'organisation et la conception des aires bâties ont toujours eu une part naturelle dans la construction traditionnelle locale (Glaumann 1993, Westerberg 1993 (cités par Eliasson, 2000)). Aujourd'hui cependant, le planificateur doit tenir compte de différents aspects conflictuels et les questions climatiques ont un impact relativement faible sur le processus de planification urbaine (Eliasson 2000). Cette lacune devient de plus en plus apparente aux urbanistes, environnementalistes et spécialistes de la santé qui, dans un contexte de réchauffement climatique global, ressentent la nécessité d'intégrer les considérations climatiques dans les processus de conception urbaine (Golany 1995).

L'intégration des considérations climatiques dans les processus de conception urbaine peut constituer en effet un outil important en vue d'augmenter la qualité environnementale en milieu urbain (Eliasson et al. 2007). Un urbanisme approprié procure des mesures de réduction de stress thermique pour les individus vivant dans les villes et peut réduire l'îlot de chaleur urbain. Les espaces urbains attrayants influencent la vie sociale dans la ville et peuvent influencer indirectement l'économie locale et l'infrastructure de transport. De ce point de vue, un urbanisme climatique peut influencer toutes les dimensions de durabilité, c'est-à-dire : les qualités économiques, sociales et environnementales des espaces urbains extérieurs (Fig. I- 2).

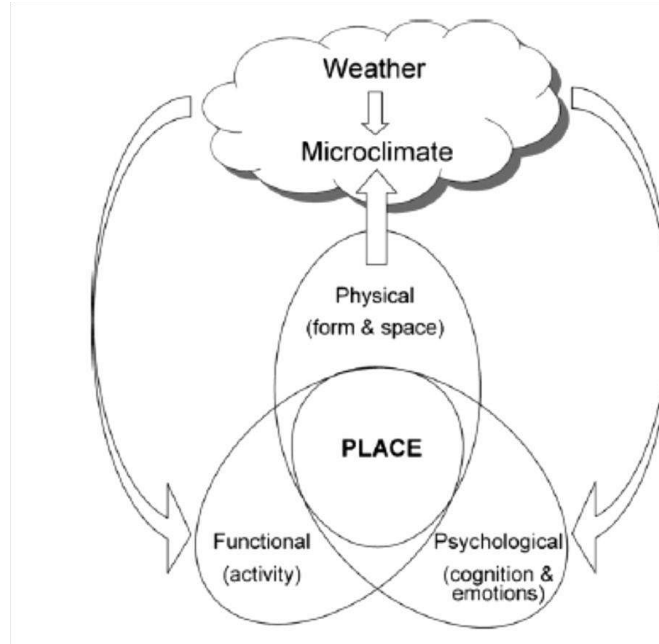


Fig. I- 2. Les interrelations complexes entre le temps, le microclimat et les trois composantes d'un espace public : physique (forme spatiale), fonctionnelle et psychologique (Eliasson et al. 2007; adapté à partir de Canter 1977).

Aujourd'hui, deux disciplines, l'urbanisme et la climatologie urbaine, dominent la littérature publiée sur la manière dont l'environnement urbain affecte le climat (Mills 1999). Chacune de ces disciplines traite cette question selon des méthodes différentes, incluant l'échelle, les variables et l'objet d'études (Mills 1999). Il en résulte une déconnexion entre les deux champs de recherche. Le domaine de la climatologie urbaine appliquée est de ce fait peu développé (Eliasson 2000, Grimmond 2006, Mills 2006).

En effet, au cours des deux derniers siècles, les climatologues ont recueilli une énorme quantité de données sur le climat urbain et aujourd'hui, les connaissances sur cet aspect sont relativement bonnes (Oke 2004, Eliasson 2000, Grimmond 2006). Des recommandations et des outils pour la conception urbaine telles que les cartes climatiques ont été développées (Oke 1984, Bitan 1988, Lindqvist et Mattsson 1989, Givoni 1991, Golany 1996 (cités par Eliasson 2000) et la littérature donne plusieurs exemples de projets spécifiques où les aspects climatiques sont intégrés dans les processus de conception (Evans et Schiller 1996, Yannas 2001, Mills 2006). Cependant, malgré les connaissances disponibles sur le climat et quelques exemples de conception climatique, l'impact du climat demeure, dans la pratique, généralement faible (Oke 1984, Lindqvist et Mattsson 1989 (cité par Eliasson 2000), Eliasson 2000, Mills 2006).

En fait, l'architecte et l'urbaniste ont pour objectif la création d'un cadre de vie "confortable" et la recherche sur ce thème a souvent une préoccupation bioclimatique. L'approche est empirique et déductive et les résultats sont présentés sous forme d'orientations et de recommandations pour des objectifs de conception urbaine (Eliasson et al. 2007). Les climatologues se concentrent en revanche sur des mesures et la modélisation des processus dans le but d'interpréter les changements dans les propriétés atmosphériques qui donnent lieu à des "effets urbains". Jusqu'à récemment, à quelques exceptions près, la recherche dans le domaine de la climatologie urbaine n'est pas effectuée à des fins de conception urbaine. Les résultats obtenus sont souvent

théoriques et difficilement interprétables par les architectes et urbanistes (Mills 1999, Mills 2006, Eliasson 2000).

Parmi les facteurs entravant l'intégration des considérations climatiques en urbanisme, Mills (2006) cite l'existence d'une division artificielle entre les domaines étudiant les aspects du climat urbain et un manque de sensibilisation de la recherche dans des domaines connexes. Par exemple, une nette distinction existe entre la recherche sur les climats intérieurs des bâtiments et celle conduite sur les climats des espaces extérieurs entre les bâtiments. La barrière physique qui sépare ces deux domaines d'étude est l'enveloppe du bâtiment, enveloppe au sein de laquelle s'effectuent tous les échanges thermiques intérieur/extérieur. La séparation entre les deux champs d'étude manque par conséquent de pertinence (Mills 2006).

Par ailleurs, lorsque la dimension climatique est intégrée en urbanisme, les propositions sont souvent présentées sous une forme idéale où les préoccupations climatiques sont primordiales (ex. Golany 1995) et où les réalités de la planification urbaine ne sont pas reconnues. Or, dans la plupart des cas, les aspects liés au climat sont rarement dominants, les établissements existent déjà et les décisions sont entravées par les structures bâties. Les climatologues doivent fournir de ce fait des solutions à des problèmes existants (ex. Bitan 1990/91 (cité par Mills 2006)) et des moyens simples de relier les caractéristiques urbaines à leurs conséquences climatiques (ex. Buckland et Middleton 1999 (cité par Mills 2006)). A titre d'exemple, l'utilisation de la végétation est largement préconisée comme un moyen de modifier un certain nombre de propriétés atmosphériques et de contrôler les températures de surface (par exemple, Brown et Gillespie 1995 (cité par Mills 2006)). Cependant, cette solution n'est pas toujours appropriée vu que dans les zones arides par exemple, la question des ressources hydriques peut empêcher l'utilisation d'une telle stratégie (Golden 2003/04).

En outre, les connaissances sur les microclimats urbains sont basées essentiellement sur des études conduites dans les pays d'Europe et d'Amérique du nord, généralement liés à des environnements froids ou tempérés (Mills 2006, Corbella et Magalhaes 2007). Les stratégies adoptées dans de telles zones climatiques ne peuvent être appliquées dans les climats chauds d'Afrique ou d'Asie où l'exigence première est la protection contre le rayonnement solaire incident. Il y a par ailleurs très peu de travaux sur les structures urbaines vernaculaires. Ces dernières peuvent offrir pourtant des éléments de réponse aux stress environnementaux.

L'acceptation générale de la rue canyon comme un objet d'étude a considérablement augmenté le corps scientifique des connaissances disponibles. La plupart des travaux menés dans ce domaine a porté sur la façon dont les propriétés géométriques influencent les échanges d'énergie et de masse dans la rue et entre la rue et au-dessus de la canopée urbaine. Toutefois, à quelques exceptions près (par exemple Ahmed 2003), il y a eu peu de recherches qui relient des formes urbaines à des niveaux de confort extérieur dans différentes conditions climatiques. Cela exige un modèle complet des réponses humaines aux conditions climatiques non régulières (par exemple Soligo et al. 1998) et un examen plus large des espaces extérieurs, y compris les cours, parcs, places et rues de banlieue qui s'écartent du modèle de rue canyon idéale (par exemple Capeluto et al. 2003).

Compte tenu de toutes ces lacunes, la généralisation de l'intégration des considérations climatiques en urbanisme exige l'amélioration des connaissances sur le climat urbain en donnant une plus grande attention (Mills 2006) :

- aux besoins des concepteurs de l'espace urbain (intervention sur des formes bâties existantes),
- aux liens entre les échanges d'air intérieurs du bâtiment et l'environnement extérieur,

- aux études de cas qui relient des décisions de conception à des effets mesurables,
- aux espaces urbains extérieurs et aux niveaux de confort extérieurs,
- et à une plus grande variété de climats.

La question du confort extérieur et la ventilation urbaine dans les villes du désert constitue de ce point de vue un aspect important à développer.

I- 3. Problématique des zones arides.

Aujourd'hui, un des plus grands défis posés aux urbanistes et gestionnaires de l'espace est de savoir comment soutenir la croissance des villes, existantes ou nouvelles, des zones arides (Golden, 2003/04). Occupant près d'un tiers de la superficie totale des terres du monde (Maddock 1975, cité par Portnov et Erell 1998), les zones arides étaient traditionnellement considérées comme des lieux non favorables pour l'établissement humain. Aujourd'hui, elles connaissent en revanche un rythme d'urbanisation spectaculaire (Portnov et Erell 1998, Pearlmutter et al. 1999, Golden 2003/04, Roth 2007), les exemples incluent la ville de Phoenix et Tucson en Arizona, Be'er Shiva et Eilat en Israël, Pilbara dans l'ouest de l'Australie, Achgabat et Mary en Turkménistan (Portnov et Erell 1998). Les facteurs responsables de cette croissance urbaine sont attribués à :

- la disponibilité des terres nécessaires à l'établissement d'entreprises industrielles et d'installations militaires qui requièrent de larges parcelles de terrains pour des raisons technologiques et de sécurité,
- l'exploration des ressources naturelles variées (pétrole, gaz, mines, etc.),
- l'amélioration substantielle dans les moyens de transport et de communication qui désenclavent les zones désertiques les plus reculées,
- le développement de moyens de pompage de l'eau à des distances considérables de leurs sources naturelles,
- et les processus d'accélération de la désertification (Portnov et Erell 1998) qui affectent actuellement environ 1/6 de la population du monde. Un grand nombre d'établissements urbains originalement établis dans les terres arides sont confrontés à présent aux conditions sévères du désert.

Il est à noter par ailleurs que l'emplacement des régions arides coïncide le plus souvent avec l'établissement de la plupart des populations défavorisées du monde (en termes de terres arables, de ressources naturelles et de potentiels socio-économiques (Alshuwaikhat et Nkwenti 2002)). Ces régions ont un taux d'urbanisation de 49% et l'augmentation de la population la plus rapide au monde (8,3%), toute gravitant autour des centres urbains (Alshuwaikhat et Nkwenti 2002). La croissance spectaculaire de cette population urbaine est associée à de graves dégradations de la qualité environnementale (Roth 2007). Selon Hall (2000, cité par Alshuwaikhat et Nkwenti 2002), ces régions ont un taux de croissance urbaine d'environ 5%. Leur hyper croissance informelle est susceptible de s'accroître, avec une aggravation de la pauvreté. La plupart des villes, en particulier dans le désert de l'équateur, sont confrontées à la pénurie d'eau, la désertification et la déforestation pour le chauffage domestique. L'assainissement urbain est déplorable en raison de l'augmentation des immigrants et la pollution de l'air est de plus en plus élevée (Alshuwaikhat et Nkwenti 2002). Les conséquences sur les conditions de vie et la santé des populations vivant dans ces villes sont dramatiques et des mesures sévères doivent être prises pour y remédier.

L'important rythme de croissance des villes subtropicales et les divers problèmes environnementaux engendrés soulignent l'urgence d'intégrer les préoccupations climatiques dans la conception des villes et fournir une meilleure qualité de vie pour une grande partie des habitants de la planète (Roth 2007). Les études urbaines sur le climat subtropical sont cependant rares (Roth 2007) et des instruments de conception et de planification urbaine pour la réduction du stress environnemental en climat urbain subtropical demeurent largement inexplorés. La non prise en compte de la dimension climatique dans la planification urbaine des villes subtropicales peut constituer pourtant un préjudice sans précédent aux conditions de vie de ces régions quand on sait que le confort et la santé des personnes sont liés aux conditions thermiques et la qualité environnementale des espaces urbains (Smoyer 1998, Golden 2003/04, Harlan et al. 2006). De ce point de vue, l'environnement thermique est l'une des préoccupations principales à considérer dans les villes subtropicales en raison de son influence sur le confort humain en espace extérieur.

I- 4. Pertinence de notre présente étude.

Dans les régions subtropicales, les stress environnementaux extérieurs proviennent essentiellement de l'intense rayonnement solaire et des vents forts et fréquents (Givoni 1989, Oke 1987). La forte convection qui se produit au cours de la journée et la rareté de la végétation induisent en effet une hausse des vitesses de vent (Oke 1987). Par leur intensité et leur fréquence, ces vents forts, froids et humides en hiver, chauds et très secs en été, peuvent constituer un facteur de gêne important dans les espaces extérieurs. Ils sont suffisamment intenses pour que les particules de sable et de poussière soient en suspension dans l'air, ce qui engendre des problèmes d'érosion, de réduction de la visibilité et de dépôt de poussière. Ce dernier phénomène peut enterrer les plantes, contaminer l'eau et la nourriture, salir les maisons d'habitations et créer un inconfort considérable pour les êtres humains (Oke 1987).

Aussi, en raison du caractère dominant du régime des vents, la réduction du stress environnemental et la procuration des conditions de confort pour les populations vivant dans ces régions implique nécessairement le recours à une conception architecturale et urbaine qui permette de modifier le soleil mais aussi le vent rude du désert (Givoni 1998, Golany 1995).

La plupart des recherches entreprises sur les microclimats urbains et le confort thermique extérieur en zone subtropicale ne s'intéresse néanmoins qu'aux aspects liés au rayonnement solaire et aux températures d'air (Pearlmutter et al. 1999, Pearlmutter et al. 2006, Bourbia et Awbi 2004, Grundstrom et al. 2003, Ali-Toudert et al. 2005, Ali-Toudert et al. 2006, Johansson 2006). Aussi, les stratégies développées en vue de l'amélioration du confort thermique dans les espaces extérieurs se basent uniquement sur des objectifs d'ombrage en été et d'ensoleillement en hiver (Bourbia et Awbi 2004, Grundstrom et al. 2003, Ali-Toudert et al. 2005, Ali-Toudert et al. 2006, Johansson 2006).

Ces objectifs seuls ne suffisent pourtant pas à assurer un environnement sain et agréable pour les populations vivant dans les régions chaudes et sèches car la protection contre les vents violents et chargés de poussière doit être assurée, de même que la ventilation des espaces urbains (Givoni 1998, Oke 1987). D'autre part, ces stratégies d'ombrage sont souvent annihilées en présence de vent.

Dans les climats arides et chauds, la ventilation urbaine est un aspect important à considérer en été en raison de son influence sur :

- l'amélioration du confort thermique puisqu'elle agit sur :

- le bilan thermique du piéton aux heures les plus chaudes de la journée (Pearlmutter et al. 1999, Pearlmutter et al. 2006, Ali-Toudert et al. 2005),
- le potentiel de ventilation naturelle des constructions,
- le bilan thermique de la rue : l'évacuation des masses d'air chaud et le refroidissement nocturne aux échelles respectifs de la rue et du quartier (Eliasson 1996),
- la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain à l'échelle de la ville (Oke 1987, Kim et Baik 2002).
- l'amélioration de la qualité de l'air des espaces intérieurs et extérieurs,
- la réduction des consommations électriques des habitations dues aux systèmes de climatisation (Kolokotroni et al. 2002, Santamouris et al. 2006),
- la mise en valeur de modes de vie ouverts sur l'extérieur particulièrement agréables dans les régions chaudes.

La figure (I- 3) indique les différentes échelles liées au climat du vent et de la ventilation.

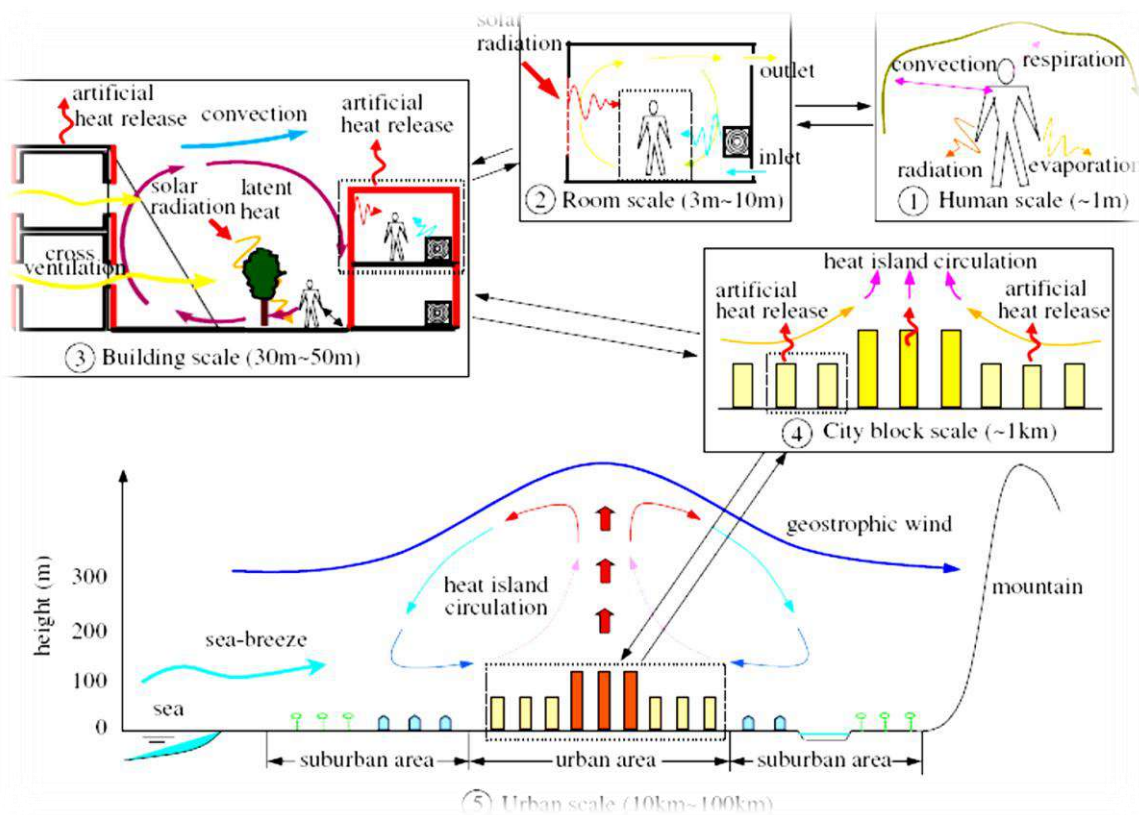


Fig. I- 3. Phénomènes à différentes échelles liés au climat du vent (Murakami et al. 2000).

Les recherches conduites sur les écoulements d'air en milieu urbain sont nombreuses (Hoydysh et al. 1974, Yamartino et Wiegand 1986, Nakamura et Oke 1988, Oke 1988, Hoydysh et Dabberdt 1988, Dabberdt et Hoydysh 1991, Theurer et al. 1992, Johnson et Hunter 1999, Santamouris et al. 1999, Kastner-Klein et Plate 1999, Pearlmutter et al. 1999, Pearlmutter et al. 2007, Louka et al.

2000, Baik et al. 2000, Huang et al. 2002, Chan et al. 2003, Savory et al. 2004, Neophytou et Britter 2005, Brown et al. 2004, Brown et al. 2006, Kastner-Klein et al. 2004, Georgakis et Santamouris 2006, Pol et brown 2008, Assimakopoulos et al. 2000, Assimakopoulos et al. 2003, Assimakopoulos et al. 2006). Rares sont, cependant, celles qui abordent les phénomènes de ventilation urbaine et leurs effets sur la distribution des températures dans les espaces urbains. Dans la plupart des études, les écoulements d'air sont associés à des phénomènes de dispersion et de transport des polluants. En outre, en raison de la difficulté inhérente à réaliser des campagnes expérimentales de terrain, les écoulements d'air sont visualisés en laboratoires ou modélisés par calculs numériques. Bien que ces études aient permis de consolider les connaissances théoriques sur les phénomènes aérodynamiques, elles pèchent cependant de par leur caractère « idéalisé » du contexte à expliquer les phénomènes réels (ex. Hunter et al. 1992, Sini et al. 1996, Baik et Kim 1999).

Ces travaux suggèrent que les caractéristiques-clés des écoulements du vent dans une rue peuvent être déterminées uniquement à partir de la géométrie relative du canyon, en particulier celle de son prospect H/W (où H est la hauteur des bâtiments et W l'espacement entre ces bâtiments formant la rue canyon). La plupart des recherches entreprises en laboratoire ou par calcul numérique considèrent des prospects de rues canyons (H/W) "idéales", caractérisées par des profils symétriques et des toitures plates. De même, dans les études sur site, les rues sélectionnées sont caractérisées par une géométrie très simple (rue rectiligne, hauteur de bâtiments identique et façades planes) afin de s'approcher le plus possible de la géométrie urbaine telle qu'elle est considérée dans les modèles. Les études sur site sont menées généralement dans des canyons urbains avec un prospect H/W compris entre 0.5 et 2, les conditions d'écoulements dans les rues très profondes ($H/W > 2.5$) demeurent inexplorées.

Il est en outre important de noter que les observations de terrain se limitent presque exclusivement à l'échelle de la rue canyon, celle-ci considérée comme l'unité géométrique de base de la structure urbaine. L'échelle du quartier, ou échelle intermédiaire, définie comme celle d'un groupe de bâtiments ou de quelques pâtés de maisons, demeure en revanche relativement inexplorée.

Dans la plupart des modélisations et visualisations des écoulements d'air, le vent incident est perpendiculaire à l'axe de la rue et l'on s'intéresse essentiellement à la structure verticale de l'écoulement induite dans la rue canyon. La composante horizontale de l'écoulement est négligée (Johnson et Hunter 1999, Brown et al. 2006) et la structure des écoulements pour des vents ambiants parallèles et obliques est peu connue.

Pour des vents incidents perpendiculaires, les résultats montrent que la valeur du prospect H/W définit le système de vortex (nombre de tourbillons) dans la rue et en conséquence, la manière dans laquelle cette rue est ventilée. Ces résultats, valables pour des géométries de rues idéalisées, ne tiennent compte ni de l'influence des profils de rue asymétriques, ni des "irrégularités" urbaines et particularités architecturales (forme, orientation, prééminence d'un bâtiment, forme de la toiture, encorbellements et passages couverts) pourtant fort communes en milieu urbain. La complexité des modèles d'écoulement n'est de ce fait que partiellement appréhendée.

La plupart des études sur site menées jusqu'ici sur les écoulements d'air sont par ailleurs réalisées dans des villes nord-américaines ou européennes, dans un autre contexte climatique et géographique que celui des climats chauds et secs des zones arides.

Les sites sélectionnés sont des terrains urbains plats, dénués de toute complexité topographique. L'effet d'une topographie complexe peut pourtant accentuer la force du vent ou au contraire la réduire en augmentant la turbulence. Dans un site urbain, de tels effets viennent souvent interagir

avec ceux de la morphologie urbaine. Néanmoins, les caractéristiques des écoulements d'air générés par une topographie urbaine complexe demeurent peu connues.

En plus de la géométrie de la rue, des caractéristiques topographiques et des conditions météorologiques (intensité du vent ambiant et sa direction), les forces thermiques, comme la surchauffe des parois de la rue (murs et chaussées), jouent un rôle important dans la détermination du modèle d'écoulement de l'air dans les rues canyons (Kim et Baik 1999). Ces effets dépendent des conditions de vent et du prospect de la rue : ils sont visibles pour des vents incidents perpendiculaires et plus importants sous conditions de vents faibles et pour des rues de prospects étroits. Ces phénomènes semblent toutefois surestimés dans les modélisations numériques en comparaison avec ceux observés sur le terrain.

Par ailleurs, parce que le canyon urbain est rarement isolé, certaines études se sont intéressées aux effets de la surface urbaine sur la structure de l'écoulement dans une rue canyon entourée de plusieurs rues et groupes de bâtiments. Ces recherches, plutôt rares et relativement récentes (ex. Davidson et al. 1996, Meroney et al. 1996, Roth et Ueda 1998, Brown et al. 2000, Kastner et al. 2000) mettent en exergue l'importance de la position de la rue par rapport au groupement urbain. Ces résultats suggèrent qu'en milieu urbain, les propriétés de ventilation urbaine ne sont pas uniformes à travers les rues canyons. La ventilation des rues diffère selon que ces rues soient situées en périphérie ou au centre du tissu urbain (centre géométrique) et selon qu'elles soient dans l'axe des vents ou au contraire à l'abri. Les rues situées au centre du groupement se caractérisent par les propriétés de ventilation les plus faibles.

- Comment agir dans ce cas sur la morphologie urbaine afin d'améliorer les mécanismes de ventilation d'un tissu urbain dense?
- Comment promouvoir la ventilation des espaces urbains sachant qu'en zone chaude et aride, la protection du rayonnement solaire direct d'été implique nécessairement le recours à des formes urbaines compactes qui réduisent fortement les échanges d'air verticaux et les mouvements convectifs?
- Comment concilier les deux objectifs conflictuels que sont la ventilation des espaces extérieurs d'été d'une part et la protection contre les effets indésirables des vents violents chargés de poussière d'autre part?

Pour faire face à ces difficultés, notre recherche se propose :

- l'étude des écoulements d'air dans un climat subtropical caractérisé par la présence de vents forts et un rayonnement solaire intense,
- l'analyse des écoulements d'air aux échelles de la rue et du quartier afin de déterminer à chacune de ces échelles les caractéristiques des mouvements d'air et les niveaux d'interaction,
- la prise en compte de la complexité de la morphologie urbaine en analysant une entité traditionnelle caractérisée par des irrégularités urbaines, c.-à-d. : profils de rues asymétriques et hétérogénéité des hauteurs de bâtiments, présence de passages couverts, intersections de rues, etc., ...
- la prise en considération de la complexité de la topographie urbaine,
- l'analyse des effets du vent sur l'environnement thermique et les conditions de confort.

Notre recherche tend ainsi à :

- explorer l'effet d'une topographie complexe et des formes urbaines compactes et irrégulières sur les mécanismes d'écoulements d'air dans les rues canyons,
- examiner l'effet de ces phénomènes sur l'environnement thermique et les conditions de confort durant le cycle journalier,
- aboutir à des recommandations pour les architectes et urbanistes.

L'avantage d'une telle démarche est qu'elle permet de tenir compte d'une manière explicite de la géométrie urbaine et la topographie dans la cartographie des écoulements d'air horizontaux, et ainsi de mieux expliquer leurs évolutions spatiales et leurs effets sur l'environnement thermique urbain.

I- 4.1. Objectifs de la présente étude.

Notre travail a cette double visée:

- celle de la participation à l'effort scientifique interdisciplinaire en matière de climatologie urbaine;
- celle de la transposition des résultats, pour répondre à la demande des praticiens dans la conception et la gestion de l'espace urbain.

De manière plus précise, l'objectif de ce travail est de déterminer des stratégies de ventilation à l'échelle urbaine. Elle vise à développer des outils applicables dans le processus de conception urbaine dans le cadre de réhabilitation ou d'opérations neuves (quartier, ville nouvelle, etc., ...) dans un contexte de forte urbanisation, principalement dans le contexte aride où le vent est une donnée essentielle avec laquelle il faut composer. Ces connaissances toutefois peuvent être transposées à d'autres cas d'études.

I- 4.2. Hypothèses de travail.

1. l'effet d'une topographie urbaine complexe peut être déterminant dans le régime de distribution des écoulements d'air en milieu urbain. Son effet peut "l'emporter" sur les effets de la morphologie urbaine en accentuant la force du vent urbain ou au contraire la réduire en augmentant la turbulence,
2. la surface urbaine dans son ensemble détermine les caractéristiques de l'écoulement dans le canyon urbain et l'interaction des échelles doit être prise en compte dans n'importe quelle description de l'écoulement. La circulation de l'air dans la rue canyon est liée aux écoulements d'air ayant lieu à une échelle plus large qui est celle du quartier ou échelle intermédiaire,
3. les particularités urbaines sont susceptibles de modifier la structure des écoulements d'air et générer des phénomènes aérauliques importants (constructions proéminentes, passage couvert, asymétrie des profils).

I- 5. Méthodologie.

Les modélisations numériques ou les expérimentations en soufflerie possèdent l'avantage de pouvoir comparer de nombreuses configurations de rue et notamment de rapport H/W. Elles demeurent cependant caricaturales vis à vis de la scène traitée (symétrie des bâtiments,

géométrie en deux dimensions, longueur infinie des rues, façades planes, etc.). Le choix délibéré d'un site plat réduit les effets de la topographie qui sont dans ce cas insignifiants. Les informations recueillies peuvent mettre en relation certains paramètres mais ne peuvent qu'approcher la réalité physique de la ville qui n'est pas un enchainement de rues parallèles mais un environnement géométrique complexe dans lequel les écoulements aérauliques et les échanges thermiques sont délicats à évaluer, particulièrement dans le cas d'une topographie urbaine complexe. En revanche, les mesures sur site ont l'avantage de rendre compte de la complexité des phénomènes physiques, notamment dans le cas de topographies urbaines complexes difficilement modélisables telles que les structures urbaines vernaculaires, caractérisées par une morphologie urbaine irrégulière et une topographie complexe. C'est pourquoi notre étude s'appuiera sur une approche quantitative précise, basée sur des mesures de terrain. Elle mettra en œuvre une série de campagnes de mesure des principaux paramètres climatiques, avec différentes résolutions spatiales. Les modèles d'écoulements et les forces mises en jeu seront examinés à travers les échelles microclimatiques de la rue et du quartier et celles au-dessus de la canopée urbaine (dans la sous-couche de rugosité). La méthodologie sera développée de manière exhaustive dans le chapitre (VI).

I- 6. Pertinence du choix du cas d'étude.

Notre recherche retient pour cas d'étude le quartier traditionnel de la ville de Ghardaïa, dans la Pentapole du M'zab, en milieu chaud et sec.

L'intérêt que nous portons à une telle zone géographique est important à plus d'un titre : malgré son cachet de pays méditerranéen, l'Algérie est un territoire majoritairement aride et semi-aride chaud. Le Sahara recouvre la majeure partie de son territoire. La population est de ce fait très inégalement répartie et concentrée principalement sur les plaines littorales. Ce sont là, en termes d'environnement, des pressions qui menacent les équilibres régionaux et les ressources naturels du pays. De ce fait, la valorisation des zones arides prend toute sa signification. Elle ne peut se faire du reste sans un ajustement aux contraintes climatiques.

Ce besoin d'ajustement climatique rend nécessaire la connaissance fine des principes d'adaptation climatique à l'échelle des villes. Ce savoir passe nécessairement par l'identification des propriétés physiques et formelles de milieux reconnus comme «adaptés» dans un environnement hostile et aride. Les villes traditionnelles de la vallée du M'zab, dont le ksar de Ghardaïa, représentent dans ce cas un exemple particulièrement intéressant à analyser.

Le choix du cas d'étude se justifie ainsi par :

1. la présence de conditions climatiques particulièrement contraignantes pour le confort thermique des habitants conditionnant fortement le tracé de la vieille ville,
2. la présence de conditions climatiques particulièrement intéressantes permettant de mettre en évidence les mécanismes aérauliques en présence dans le ksar,
3. la reconnaissance du tissu urbain traditionnel de Ghardaïa comme un exemple d'adaptation climatique sans que cela ne soit jamais prouvé scientifiquement.

La recherche sur la relation entre la forme urbaine et le climat tend à identifier en effet les formes vernaculaires traditionnelles comme une combinaison réussie de l'architecture, l'urbanisme et le climat. Cette théorie qui dresse un parallèle entre le climat et la forme urbaine est supportée par la croyance commune et acceptée selon laquelle les climats rudes tels que les climats chauds et arides confrontent ceux qui y vivent à des défis uniques. Les réponses apportées à ces défis sont

continuellement améliorées à travers des générations par des pratiques et des erreurs et évoluent par conséquent en une solution “propre” à ces conditions climatiques (Mills 1999). Ainsi, en se basant sur cette théorie, la nécessité de l'adaptation humaine aux climats chauds et secs a induit le développement de formes urbaines compactes dont les microclimats sont reconnus pour être plus modérés que ceux de l'environnement naturel (Golany 1980). Dans les villes d'Afrique du nord, du moyen Orient et d'autres régions arides, quelle que soit la variété des formes architecturales et urbaines produites, les mêmes principes bioclimatiques étaient mis en œuvre (Golany 1980, Givoni 1998) : adoption de murs épais et de matériaux locaux à forte inertie thermique, compacité du tissu urbain pour réduire la surface d'exposition au soleil, largeur réduite des rues et des passages pour se protéger des vents, création de protections horizontales sous forme de passages couverts, etc. Cette somme de principes bioclimatiques concourait à une protection maximale contre le soleil et le vent en donnant à la totalité de l'établissement urbain traditionnel les mêmes caractéristiques bioclimatiques que les habitations qui le composaient.

Cependant, en dépit de l'effet climatique d'ensemble créé, les propriétés de ventilation naturelle dans les rues sont généralement faibles et il existe de nombreuses zones de confinement où la circulation d'air est stagnante. Dans la vieille ville de Ghardaïa en revanche, en dépit de la compacité de son tissu urbain, des phénomènes aérauliques particulièrement intenses sont en présence sans qu'ils ne soient jamais expliqués. Ces phénomènes témoignent de l'importance des interactions entre les milieux urbains et environnementaux, ils rendent nécessaire la connaissance fine des processus qui caractérisent leurs interactions.

Aussi, notre étude s'interroge sur la manière dont les formes bâties complexes caractéristiques de la vieille ville de Ghardaïa peuvent générer des conditions climatiques locales par le jeu de la modification des écoulements d'air et des champs radiatifs solaires et thermiques.

I- 7. Structure du plan.

La présentation de ce travail se décompose en neuf parties. Les chapitres II, III, IV et V proposent une analyse bibliographique de l'ensemble des paramètres physiques et climatiques conditionnant les mouvements d'air, l'environnement thermique et les conditions de confort en milieu urbain. Les chapitres VI, VII et VIII traitent en revanche du protocole de mesure, l'analyse et les résultats de notre recherche.

Dans le chapitre II, nous présentons les caractéristiques spécifiques de l'environnement climatique de la ville car la compréhension de ces caractéristiques permet de mettre en exergue l'effet de la morphologie urbaine dans les processus de modification du climat de la ville et le réchauffement des surfaces urbaines. Cet effet de surchauffe, identifié comme îlot de chaleur urbain, est fortement dépendant de la vitesse des vents. L'effet de la ventilation urbaine est de ce fait important sur le bilan thermique des espaces urbains et l'amélioration du confort thermique d'une manière générale.

Dans le chapitre III, un état des connaissances des principales caractéristiques des mouvements d'air en milieu urbain est établi. Cette étude souligne la complexité des écoulements en milieu urbain et permet de confirmer l'importance de la morphologie urbaine dans la compréhension de ces phénomènes.

Enfin, la connaissance de l'écoulement d'air ne suffit pas à expliquer l'environnement thermique à l'échelle urbaine; aussi, nous examinons dans le chapitre IV les différents paramètres climatiques susceptibles d'intervenir et de modifier les conditions de confort dans les espaces extérieurs. Dans le chapitre V en revanche, une attention particulière est apportée aux zones climatiques

subtropicales et l'effet des formes urbaines sur l'environnement thermique et les conditions de confort en extérieur.

En ce qui concerne la partie empirique de notre recherche, le chapitre VI détaille les objectifs, l'approche expérimentale ainsi que le protocole de mesure utilisé lors des différentes campagnes de mesure menées dans le ksar de Ghardaïa. Les principaux résultats de l'analyse des données collectés in-situ sont développés quant à eux dans les chapitres VII et VIII.

En premier lieu, une analyse exhaustive des mouvements d'air est présentée dans le chapitre VII. Une étude préliminaire détermine d'abord les conditions d'écoulement d'air au-dessus de la canopée urbaine car ces conditions préfigurent du comportement aéraulique dans les rues canyons. Cette étude permet de dévoiler l'effet de la topographie du site d'implantation d'une part et celui de la géométrie urbaine d'autre part. Une analyse plus exhaustive présente par la suite les conditions d'écoulement à l'échelle microclimatique. Les données simultanées, mesurées dans les rues canyons et au-dessus des toits, sont utilisées pour la détermination de corrélations empiriques liant les écoulements d'air dans les rues et ceux imposés au-dessus de la canopée urbaine. Différentes corrélations empiriques sont obtenues en fonction de l'angle d'incidence du vent ambiant avec l'axe des rues canyons. A partir de ces fonctions de corrélations générales, des paramètres physiques morphologiques particuliers sont identifiés comme étant des facteurs physiques importants intervenant dans la structure des écoulements d'air dans les rues du Ksar.

Enfin, en second lieu, nous nous proposons d'étudier l'effet de la forme urbaine compacte sur les conditions thermiques dans le ksar de Ghardaïa. Le but est de comprendre la manière dont la structure urbaine représentative de la vieille ville modifie les éléments du climat et les conditions de confort thermique en extérieur. Dans cette partie de la recherche, les effets thermiques du vent sont également analysés et permettent de rendre compte de leurs influences sur la répartition des températures et les conditions de confort d'une manière générale.

CHAP II. LE CLIMAT URBAIN.

Introduction :

La ville se distingue de la campagne par (Escourrou 1991) :

- la présence de bâtiments dont la taille accroît la rugosité (réduit les vitesses de vent) et dont la forme et l'aspect modifie le bilan énergétique,
- un revêtement de sol qui freine considérablement les phénomènes évaporatoires,
- une production de chaleur anthropique,
- une émission en plus grande quantité de polluants, poussières et aérosols.

Tous ces facteurs sont responsables de caractéristiques spécifiques sur l'environnement climatique de la ville, dont la manifestation la plus spectaculaire est l'îlot de chaleur urbain, c.-à-d., l'augmentation des températures urbaines en comparaison avec celles d'un milieu rural environnant.

La compréhension de ces caractéristiques climatiques ne peut se faire toutefois sans le concept d'échelle, car de la plus petite unité de base : rue, arbre ou bâtiment, aux combinaisons complexes de fragments urbains, chaque élément crée ses propres conditions microclimatiques et a une incidence sur son environnement immédiat.

II- 1 Les échelles climatiques.

Le concept d'échelle est fondamental pour la compréhension de la manière dont les éléments de la surface urbaine interagissent avec les couches atmosphériques adjacentes (Arnfield 2003a). Les surfaces horizontales au niveau du sol constituent une mosaïque d'éléments tels que des jardins et des gazons bien irrigués, des espaces verts non irrigués et des espaces pavés avec des propriétés hygrothermiques, aérodynamiques, thermiques et radiatives contrastées (Arnfield 2003a, Oke 1987, Grimmond et Oke 1999). Ces différents éléments de surface possèdent divers bilans énergétiques qui génèrent des contrastes dans les caractéristiques de surface et conduisent à des interactions par échange radiatif et advection à petite échelle (Arnfield 2003).

Ces unités morphologiques fondamentales peuvent être regroupées de manière hiérarchique. Les murs des bâtiments et les éléments liant entre les bâtiments définissent le canyon urbain (CU). Les canyons et les toitures des bâtiments adjacents définissent les blocs de la ville qui forment à leur tour des quartiers, et enfin la ville entière. À chaque échelle, les unités peuvent posséder des bilans énergétiques distincts qui, en général, représentent plus que la moyenne pondérée des bilans des éléments individuels mais intègrent également les interactions entre les unités constitutives. En outre, chaque unité interagit avec les autres dans la même catégorie d'échelle par advection (Ching et al. 1983, cité par Arnfield 2003a).

II- 1.1. Les échelles climatiques horizontales.

Il existe trois échelles de climat horizontales dans les aires urbaines (Oke 2004).

II- 1.1.1. L'échelle "més".

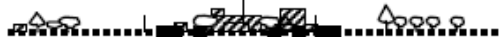
La ville influence le temps et le climat à l'échelle de tout son territoire, c'est à dire, des dizaines de kilomètres d'extension spatiale. À l'échelle temporelle, cette influence s'étale sur une période de un à six mois (tableau II- 2; Markus et Morris 1980).

II- 1.1.2. L'échelle locale.

Cette échelle inclut les effets des caractéristiques du paysage, tel que la topographie mais exclut les effets de l'échelle microclimatique (Oke 2004). Dans les villes, ceci correspond au climat des quartiers avec des types de développement urbain similaires (couverture de surface, taille et espacement des bâtiments, activité). Son extension spatiale est de un à plusieurs kilomètres. Son évolution temporelle est de l'ordre d'une journée (24 heures) (Oke 1987).

Une classification des zones urbaines climatiques est proposée par Ellefsen (1990/91) et Oke (2004). Son intérêt est de pouvoir classer les zones en districts avec des capacités similaires à modifier le climat local et identifier les transitions potentielles de différentes zones climatiques urbaines.

Tableau II- 1. Classification des formes urbaines distinctes, arrangées dans l'ordre décroissant de leur capacité à agir sur le vent local, la température et l'humidité (Oke 2004).

Zone Climatique Urbaine	Image	Classe de rugosité	H/W	% bâti
1. zone urbaine fortement développée, avec un ensemble de bâtiments hauts détachés et rapprochés, ex. Tours de centre-ville.		8	>2	>90
2. zone urbaine fortement développée avec des bâtiments attachés et très rapprochés de 2-5 étages, souvent de briques ou béton, ex. centre de ville historique.		7	1.2-2.5	>85
3. fortement développé, densité urbaine moyenne avec des ensembles de maisons d'habitation très rapprochés, ex. Habitat urbain		7	0.5-1.5	70
4. fortement développée, faible densité urbaine avec de larges rangées de bâtiments et des parkings pavés, ex. centres commerciaux.		5	0.05-0.2	75-95
5. développement moyen, densité suburbaine faible, avec des maisons à 1 ou 2 étages, ex. Habitat suburbain.		6	0.2-0.5 >1, avec grands arbres	35-65
6. usage mixte avec de larges bâtiments en plein champ, ex. institutions comme hôpital, université, aéroport.		5	0.1-0.5 fonction des arbres	<40
7. développement semi rural avec des maisons dispersées dans une zone naturelle ou agricole, ex. fermes.		4	>0.05 fonction des arbres	<10

II- 1.1.3. L'échelle microclimatique.

Chaque surface possède son propre microclimat et l'écoulement d'air peut-être fortement perturbé même par de petits obstacles. Des échelles typiques des microclimats urbains sont groupés par la dimension des éléments individuels : bâtiments, arbres, routes, rues, cours, jardins, etc. Ils s'étendant de moins de un à plusieurs centaines de mètres. La variabilité du microclimat peut s'effectuer dans une période de temps très courte (ex. quelques secondes) mais la couche peut être homogène sur des périodes de temps plus longues (supérieures à 10 min.) (Oke 1987).

L'échelle microclimatique est l'échelle des constructions et des aménagements urbains. L'homme peut y intervenir pour atténuer les conséquences climatiques (haie, brise-vent, urbanisme adapté aux vents dominants, à l'ensoleillement, à la présence d'eau, etc., ...).

Tableau II- 2. Les échelles climatiques et leur extension spatiale. Source : Markus et Morris 1980.

système	Caractères dimensionnels		
	Horizontal (m) (Oke)	Vertical (km)	temporel
méso	10^4 à 2×10^5	1 à 10	1 à 6 mois
local	10^2 à 5×10^4	0.01 à 0.1	1 à 24 h
microclimat	10^{-2} à 10^3	0.01	1 s à 24 h

II- 1.2. Les échelles climatiques verticales en milieu urbain.

Comme l'air s'écoule de l'environnement rural à un environnement urbain, il doit s'ajuster à de nouvelles conditions limites définies par les villes. Il en résulte le développement de deux structures de couche verticale (Oke 1988) : la première, dite sous-couche obstruée ou couche de la canopée urbaine, s'étend de la surface du sol jusqu'à la hauteur des constructions tandis que la deuxième, dite couche de surface libre ou couche limite urbaine, s'étend au-dessus des toits (Fig. II- 1).

II- 1.2.1. La couche limite urbaine.

La couche limite urbaine est la portion de la couche limite atmosphérique au-dessus d'une surface urbaine et dont les caractéristiques climatiques sont modifiées par la présence de la ville.

Les caractéristiques de l'écoulement et de la turbulence dans la couche limite urbaine sont largement déterminées par le caractère rugueux de la surface et les matériaux de surface qui sont caractérisés par une conductivité thermique relativement importante. Ces deux facteurs déterminent les caractéristiques générales de la structure de la couche limite urbaine (Rotach et al. 2002). Les éléments de rugosité en présence sont essentiellement les bâtiments, "*Ces objets relativement hauts, aux arrêtes vives et inflexibles qui rendent les villes les plus rugueuses de toutes les limites aérodynamiques*" (Oke 1987).

Les sites d'implantation des villes (ex: terrain en pente, vallées, zones côtières, villes continentales, etc.) peuvent affecter fortement la formation de la couche limite urbaine (Rotach 2005).

À l'échelle horizontale, l'environnement urbain est caractérisé par un changement dans la rugosité et les propriétés thermiques de surface. Ceci conduit à la formation d'une couche limite interne. Dans une grande agglomération, avec différents quartiers (ex : "centre", "banlieue", "zone industrielle", etc.), chaque surface à l'échelle locale (quartiers) génère une couche limite interne dans laquelle la structure de l'écoulement et les propriétés thermodynamiques sont adaptées au type de surface.

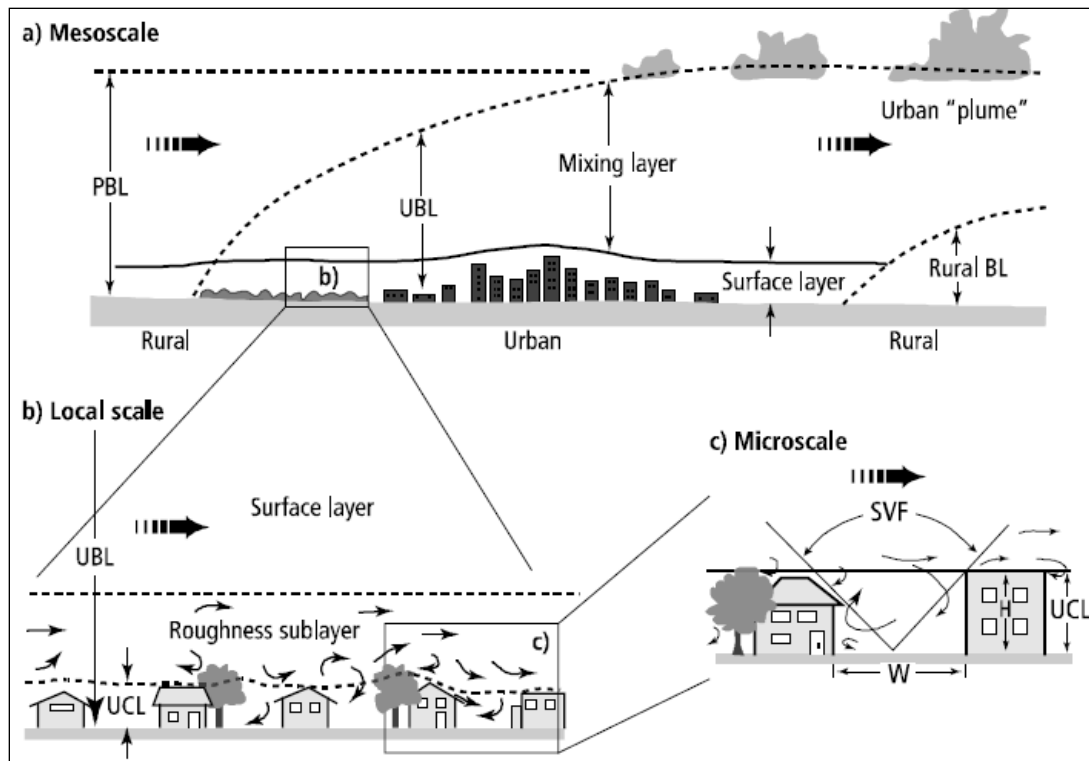


Fig. II- 1. Représentation des trois échelles utilisées dans la climatologie urbaine : elles permettent de distinguer les processus atmosphériques dans l'aire urbaine et les couches atmosphériques qui sont identifiées à chaque échelle. (a) la couche limite atmosphérique (CLA), (b) la couche limite urbaine (CLU). (c) la couche de la canopée urbaine (CCU). Les flèches horizontales en gras dans chaque sous-figure indiquent la direction du vent. Les petites flèches dans (b) et (c) indiquent la nature de l'écoulement moyen et turbulent (source : Oke 1997).

II- 1.2.2. La couche de la canopée urbaine.

Une différence essentielle entre le climat des aires urbaines et celui d'un site rural est que dans les villes, les échanges verticaux de quantité de mouvements, de chaleur et d'humidité ne sont pas produits au voisinage de la surface plane mais dans une couche d'une épaisseur significative appelée couche de la canopée urbaine (Oke 2004). Elle se développe du niveau du sol jusqu'à la hauteur moyenne des éléments de rugosité (bâtiments et arbres), z_H . Elle se caractérise par son propre champ d'écoulement, généré et déterminé par l'interaction du champ d'écoulement au-dessus (dans la couche limite urbaine) et la spécificité des effets locaux, comme la topographie, la géométrie des constructions et leurs dimensions, les rues, le trafic routier ainsi que d'autres caractéristiques, comme la présence des arbres (Oke 2004). La vitesse de vent y est généralement réduite en comparaison avec les vents ruraux à la même hauteur. Sa turbulence est essentiellement fonction de la rugosité.

Dans la canopée urbaine, l'entité la plus étudiée est la rue canyon, rue idéalement étirée et bordée par des bâtiments de hauteur égale de chaque côté (Nunez et Oke 1977). Elle forme l'unité géométrique de base dans l'environnement urbain et la ville est approchée par une simple répétition de cet élément. Aussi, de multiples études se sont focalisées sur la caractérisation des rues canyons et sur le lien entre morphologie et microclimats de ces rues.

La distinction entre la couche de la canopée urbaine (CCU) et la couche limite urbaine (CLU) est fondamentale dans les études du climat urbain. Originellement appliquée à l'îlot de chaleur urbain

par Oke (1976), cette distinction a été par la suite appliquée dans diverses recherches sur le climat urbain (Arnfield 2003a).

Dans la couche de la canopée urbaine (rugueuse à partir du niveau du sol jusqu'au niveau du toit), les processus des écoulements de l'air et des échanges énergétiques sont gouvernés par les caractéristiques spécifiques du site. En revanche, la couche limite urbaine, au-dessus des toits, est cette partie de la couche limite atmosphérique dont les caractéristiques sont affectées par la présence de la surface urbaine au-dessous. Les phénomènes sont gouvernés par des processus qui s'opèrent à des échelles temporelles et spatiales plus larges.

Entre la couche limite urbaine et la couche de la canopée urbaine, se développent deux sous-couches limites. Ce sont la sous-couche inertielle et la sous-couche de rugosité.

II- 1.2.3. La sous-couche de rugosité.

La sous-couche de rugosité englobe toute la hauteur dans laquelle l'écoulement est directement influencé par la rugosité des éléments. C'est une zone de mélange des sillages des éléments de rugosité rencontrés par le vent. Les champs de vitesses y sont fortement hétérogènes, souvent chaotiques et les forces de frottement y sont prépondérantes. Les champs d'écoulement y sont tridimensionnels.

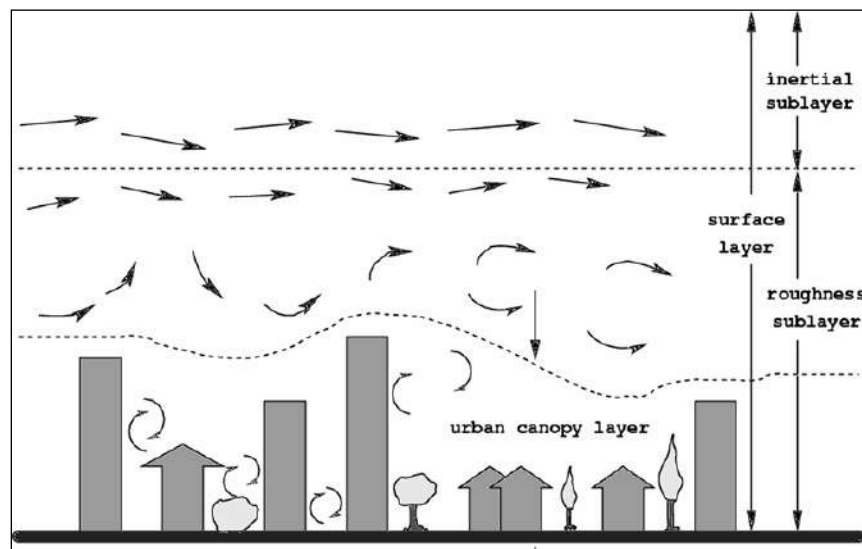


Fig. II- 2. La sous-couche de rugosité (roughness sublayer), (Britter et Hanna 2003).

La sous-couche de rugosité s'étend à partir du sommet des éléments de rugosité et sa hauteur, z_* , est dépendante de la hauteur et la densité des éléments de rugosité. Elle est souvent exprimé comme $z_* = a.z_H$ où la valeur du facteur "a" est comprise entre 2 et 5 (Raupach et al. 1991). Les estimations empiriques et les mesures de terrain indiquent que z_* peut être aussi basse que $1.5.z_H$ dans les sites urbains denses et homogènes (Rotach 2001, Kastner-Klein et Rotach 2004) mais plus grand que $4.z_H$ dans les zones de plus faible densité (Grimmond et Oke 1999, Rotach 1999) puisqu'elle dépend également de la distance entre les éléments de rugosité, avec un effet supplémentaire provenant de la forme des ces éléments (Plate 1995).

C'est au travers de cette couche que se font les échanges de masse, d'énergie et d'humidité entre le sol et la couche limite atmosphérique. Elle est caractérisée par la longueur de rugosité aérodynamique.

II- 1.2.4. La sous-couche inertielle.

Au-dessus de la sous-couche de rugosité, se développe une sous-couche inertielle. Dans cette couche, les flux turbulents sont constants avec la hauteur, l'écoulement est bidimensionnel et une distribution uniforme de la vitesse du vent moyenne peut être observée (Plate 1995). C'est dans cette couche que sont prises les mesures du vent local, c'est-à-dire un vent non perturbé par la rugosité des éléments du sol (le profil logarithmique du vent moyen existe dans cette couche; Oke 2004).

Dans la couche de la canopée urbaine qui constitue notre domaine d'intérêt, les surfaces horizontales présentent des propriétés hygrothermiques, aérodynamiques, thermiques et radiatives contrastées. Ces différents éléments de surface possèdent divers bilans énergétiques qui génèrent des contrastes dans les caractéristiques de surface et conduisent à des interactions par échange radiatif et advection à petite échelle. Le champ d'écoulement est généré et déterminé par l'interaction du champ d'écoulement en présence dans la sous-couche de rugosité, au-dessus des toits, et la spécificité des effets locaux, comme la topographie, la géométrie des constructions et leurs dimensions.

II- 2 Les processus physiques au-dessus de la ville.

II- 2.1. Le bilan radiatif au-dessus de la ville.

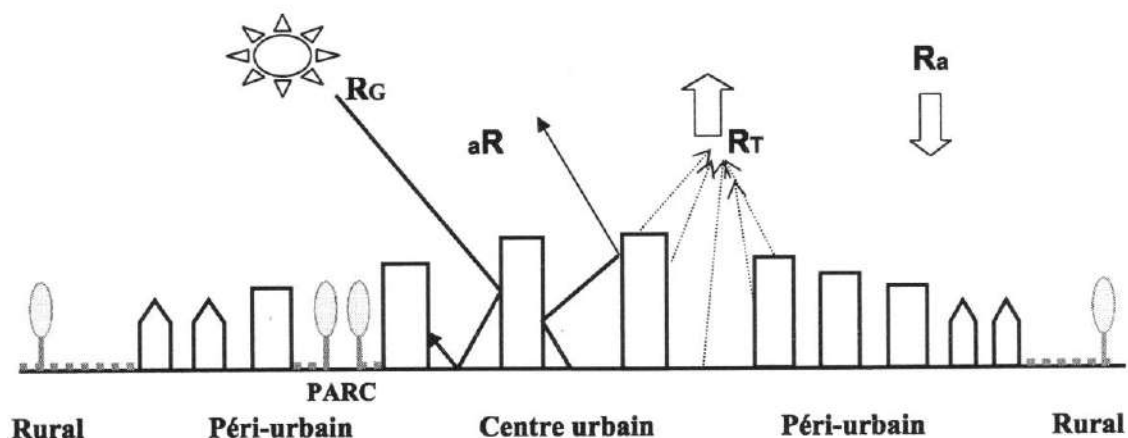


Fig. II- 3. Le bilan radiatif au-dessus d'une ville.

Le « bilan radiatif » au-dessus d'une ville, ou rayonnement net, est constitué par le flux résultant des rayonnements reçus du soleil et ceux émis vers l'espace à travers une surface horizontale. Il s'écrit sous la forme suivante :

$$Q^* = (1 - a) \cdot E_G + E_A + E_T \quad (\text{II- 1})$$

avec :

Q^* : rayonnement net, qui correspond à l'énergie radiative absorbée par la surface,

E_G : rayonnement global correspondant à la somme des rayonnements direct et diffus incident en courte longueur d'onde (rayonnement visible et proche infrarouge),

a : albédo qui caractérise la part du rayonnement solaire réfléchi par une surface,

E_A : rayonnement atmosphérique propre qui s'effectue dans les grandes longueurs d'onde (infrarouge)

E_T : rayonnement terrestre qui correspond à l'émission par la surface, en grande longueur d'onde (domaine infrarouge).

II- 2.1.1. Le rayonnement visible.

Il correspond à la lumière solaire, il arrive directement à la surface de la terre ou est diffusé par les aérosols, les poussières et les nuages. Au-dessus d'une ville, le rayonnement solaire global est en général plus faible de 3 à 10% par rapport aux espaces ruraux environnants en raison de la grande concentration de polluants dans l'atmosphère urbaine. Arrivée au niveau du substratum (couche limite urbaine), une partie de ce rayonnement est renvoyée dans l'espace, une autre pénètre dans le sol ou reste stockée dans les bâtiments. La part du rayonnement global réfléchi par la canopée urbaine est donnée par l'albédo qui dépend de manière complexe des éléments constitutifs et de la géométrie urbaine.

II- 2.1.2. Le rayonnement infrarouge.

Il provient de la transformation du rayonnement visible en "chaleur" dans l'atmosphère et à la surface du sol. Une partie de cette énergie sert à l'évapotranspiration des plantes (chaleur latente). Une autre partie est utilisée pour chauffer l'air à proximité (chaleur sensible). En milieu urbain, le rayonnement infrarouge est peu modifié (Escourrou 1991).

II- 2.1.3. L'albédo urbain.

L'albédo correspond à la réflectivité de la surface au rayonnement solaire. Il est défini par le rapport entre le rayonnement solaire réfléchi par une surface réceptrice et le rayonnement solaire global incident. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, avec 0 correspondant au noir, pour un corps avec aucune réflexion, et 1 au miroir parfait, pour un corps diffusant dans toutes les directions et n'absorbant rien du rayonnement électromagnétique visible qu'il reçoit.

L'albédo total d'un système urbain et, par conséquent, son habilité à réfléchir le rayonnement solaire, dépend de l'albédo de la composante des matériaux (inertie thermique, porosité, composition physique, ...etc.) et leur ordonnance géométrique (Oke 1988).

Les éléments des surfaces urbaines présentent des albédos très variés mais sont d'une manière générale plus faibles que les éléments de surfaces naturelles couvertes de végétation. Sur la base

du tableau (3), on peut voir qu'une route goudronnée a une valeur d'albédo comprise entre 0.05 et 0.20, celle du béton varie entre 0.10 et 0.35 tandis que la valeur d'albédo atteint la valeur de 0.16-0.26 pour les couverts végétaux et 0.45-0.95 pour une neige fraîche. En plus des caractéristiques des matériaux, l'albédo dépend aussi de la couleur. Il est d'autant plus important que les couleurs sont claires.

Tableau II- 3. Valeurs d'albédo de différentes surfaces urbaines et naturelles (adapté à partir de Oke (1987) et Guyot (1997)).

Surfaces artificielles		Surfaces naturelles	
surface	albédo	surface	albédo
Routes		Eau	
en asphalte	0.05-0.20	Faible angle zénithal de visée	0.03-0.10
Murs	0.10-0.35	Fort angle zénithal de visée	0.10-0.50
		neige	
		Ancienne	0.40-0.70
		Fraîche	0.45-0.95
		toitures	
Goudron et gravier	0.08-0.18	sec	0.35-0.45
tuile	0.10-0.35	Humide	0.20-0.30
ardoise	0.10	Sol nu	
Chaume	0.15-0.20	Argileux sec	0.20-0.35
Tôle ondulée	0.10-0.16	Argileux humide	0.10-0.20
peintures		Route goudronnée	0.05-0.10
Blanche	0.50-0.90	Surfaces agricoles	
Rouge, marron, vert,	0.20-0.35	Prairies	0.16-0.26
noir	0.02-0.15	Cultures	0.10-0.26
Aires urbaines		vergers	0.15-0.20
plage	0.10-0.27	forêts	
moyenne	0.15	À feuilles caduques	0.10-0.20
		Conifères.	0.05-0.15

L'effet de la géométrie urbaine (bloc de bâtiments séparés par des rues canyons) consiste à réduire la valeur de l'albédo (augmentation de l'absorption) en comparaison avec celle d'une surface horizontale. La réduction est due au piégeage du rayonnement dans les canyons. Aida (cité par Oke 1988) observe une augmentation de l'absorption de 13-27% pour un prospect H/W compris entre 0.5 et 2.0 lorsque l'albédo d'une surface plane est de 0.40.

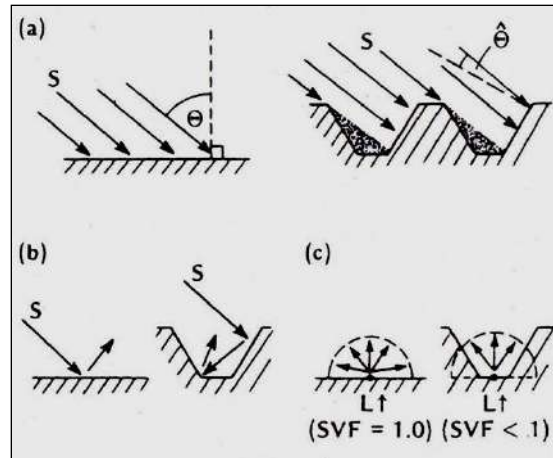


Fig. II- 4. Rôle de la géométrie de la surface dans l'échange radiatif. La comparaison de surfaces horizontale et complexe en termes de (a) : rayonnement incident de courte longueur d'onde (S); (b) : réflexion de S; (c) : émission de grande longueur d'onde (L); (Oke 1987).

Dans l'ensemble, on peut estimer que l'albédo moyen des villes est d'environ 15% (Oke 1987), ce qui est moins important que la plupart des albédos de l'environnement rural, à l'exception des forêts. Il est important de noter cependant que ces valeurs s'appliquent uniquement aux villes des latitudes moyennes d'Europe et d'Amérique du Nord, en absence de neige. L'albédo des villes subtropicales est moins certain. Les matériaux et les couleurs utilisés dans ces zones sont souvent choisis spécialement pour augmenter la réflexion du rayonnement et l'ordonnance géométrique des bâtiments est conçue de telle sorte à minimiser la pénétration du soleil dans les rues. Ces facteurs doivent induire des albédos plus élevés que dans le cas de la latitude moyenne (Oke 1987).

II- 2.2. Les échanges de chaleur par conduction et convection.

Les conditions climatiques au voisinage du sol résultent des échanges de chaleur et de masse entre le sol, la végétation, le bâtiment et l'atmosphère. Il est de ce fait important de comprendre les différents modes de transfert de chaleur en milieu urbain.

Les échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement font intervenir trois modes d'échanges : les transferts radiatifs (développés ci-dessus), conductifs et convectifs. La chaleur est initialement transférée du bâtiment vers la couche d'air immédiatement adjacente par conduction. Cette énergie est ensuite transportée des zones à températures fortes vers les températures plus faibles par les mouvements d'air eux-mêmes, c'est la convection.

II- 2.2.1. Le transfert conductif.

Dans les solides et les fluides au repos, les transferts de chaleur s'effectuent par conduction. La conduction est le transfert de chaleur d'une partie du corps à la température la plus forte à une partie de ce corps à la température la plus faible. Le processus de conduction est moléculaire et implique le transfert d'énergie des molécules les plus énergétiques à celles dont l'énergie est à un niveau plus faible.

La conduction est un phénomène de transmission de la chaleur de proche en proche, sans déplacement de matière et intervient dans le réchauffement du sol et des murs de la rue canyon.

II- 2.2.2. Le transfert convectif.

La convection thermique est la transmission de chaleur entre une paroi et un fluide animé d'un mouvement. Ce mouvement peut avoir plusieurs causes. À chacune d'elles, correspond un régime de convection. On en distingue trois : la convection forcée, la convection naturelle et la convection mixte.

Si le mouvement du fluide a une origine mécanique, indépendante des variations de température du fluide, on est en présence de convection forcée. Il peut advenir aussi que les gradients de masse volumique générés dans le fluide par les gradients de température soient suffisants pour que l'action du champ de pesanteur donne naissance à un mouvement; celui-ci a donc une origine thermique et on parle de convection naturelle. Par exemple, au cours de la journée, la surface du bâtiment s'échauffe car son bilan radiatif est positif. L'air à son contact s'échauffe également, ce qui entraîne une diminution de sa masse spécifique. Une particule d'air chaud reçoit ainsi, de la part de l'air plus froid qui l'environne, une poussée verticale dirigée de bas en haut. Cette particule d'air s'élève donc et est remplacée par de l'air plus froid et ainsi de suite. Ce processus permet donc le transfert de l'énergie captée par la surface, vers les basses couches de l'atmosphère.

Lorsque les causes mécanique et thermique coexistent et sont de même ordre de grandeur, on est en régime de convection mixte, ce qui est souvent le cas dans une rue, le long des parois des bâtiments. Cependant, bien que la convection forcée soit dominante à la surface d'un bâtiment, on peut s'attendre à ce que ce ne soit pas toujours le cas sous certaines conditions. En effet, en condition de fort rayonnement solaire incident, la surface des bâtiments atteint des températures beaucoup plus élevées que celle de l'air adjacent générant ainsi une composante convective naturelle significative (Sini et al. 1996).

II- 2.3. Le bilan d'énergie au-dessus de la ville.

Le bilan d'énergie regroupe les différents flux de chaleur qui se manifestent dans une zone urbaine (Fig. II- 5).

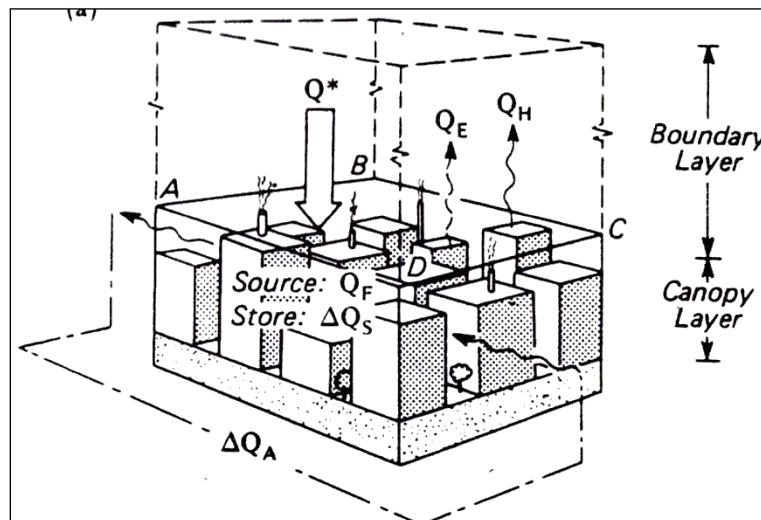


Fig. II- 5. Le bilan d'énergie au-dessus d'une ville (Q_A : transfert advectif) (Oke 1987).

Le flux énergétique est défini comme la quantité d'énergie radiative qui est reçue, émise ou transportée par unité de surface et de temps. Il s'exprime en $W.m^{-2}$ et dépend des caractéristiques

propres à la surface ainsi que des gradients de température et d'humidité entre la surface et l'atmosphère. Il est défini par la relation suivante pour une surface urbaine :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + Q_S \quad (\text{II- 2})$$

Avec :

Q^* : rayonnement net,

Q_F : énergie anthropique,

Q_H : flux de chaleur sensible,

Q_E : flux de chaleur latente,

Q_S : flux de chaleur stocké dans le sol et les bâtiments.

II- 2.3.1. L'énergie anthropique (Q_F).

L'énergie anthropique est propre à la ville. Elle dépend de la densité du bâti et la population de la ville, de l'énergie utilisée ainsi que du potentiel économique et industriel. Cette énergie provient essentiellement du chauffage, mais également de la circulation urbaine et de la production industrielle. Dans certaines villes, l'énergie anthropique est une source d'énergie très importante, dont la part peut même parfois dépasser le rayonnement net (exemple des villes américaines et d'Europe du Nord en hiver).

II- 2.3.2. Le flux de chaleur stocké dans le sol et les bâtiments (Q_S).

Il s'agit de la quantité d'énergie stockée dans le sol et les matériaux : elle dépend de leur capacité à transmettre et à stocker de l'énergie. En milieu urbain, le stockage dans les bâtiments est important. Les immeubles captent la chaleur pendant la journée et la restituent la nuit. C'est la principale source d'énergie la nuit, ce qui explique un effet de chaleur urbain plus important, quelques heures après le coucher du soleil, lorsque l'environnement rural se refroidit à un taux excédant celui de l'environnement urbain (Johnson et al. 1991).

II- 2.3.3. Le flux de chaleur latente (Q_E).

La chaleur latente, à savoir l'énergie utilisée pour l'évaporation de l'eau, est très inférieure en ville. Cela s'explique par le fait qu'en milieu rural l'eau s'infiltre dans le sol, s'évapore, puis retourne dans l'atmosphère par ce processus ou par évapotranspiration du couvert végétal. Or, en ville, la végétation est remplacée par des surfaces imperméables et la pluie ruisselle de ce fait sur ces surfaces, puis est évacuée par les égouts. La chaleur latente est d'autant plus faible que la surface imperméabilisée est importante.

L'énergie non utilisée pour la restitution d'eau à l'atmosphère est répartie entre Q_S et Q_H . En effet, une partie est stockée dans le sol et les matériaux avant d'être restituée la nuit tandis que l'autre réchauffe les basses couches de l'atmosphère par convection sous forme de flux de chaleur sensible.

II- 2.3.4. Le flux de chaleur sensible (Q_H).

Le fait que le flux de chaleur sensible soit alimenté plus longtemps en ville qu'à la campagne une partie de la nuit est une des causes majeures de l'effet de chaleur urbain. En effet, l'énergie stockée dans les matériaux est restituée la nuit, et continue à fournir Q_H en énergie qui peut ainsi rester positif la nuit en ville.

Il faut préciser néanmoins que les flux énergétiques varient considérablement d'un quartier à un autre au sein d'une même ville en raison des caractéristiques propres à chaque quartier (couverture de surface, taille et espacement des bâtiments, activité) et à leur capacité à modifier la répartition des flux de chaleur.

En résumé, l'urbanisation modifie le bilan énergétique normal, c'est à dire que la quantité d'énergie solaire absorbée par le substratum et son utilisation est différente (Escourrou 1991). La réduction des surfaces végétales et le fait que les matériaux urbains stockent l'énergie et soient imperméables à l'eau induisent une augmentation de la chaleur sensible et une réduction de la chaleur latente en comparaison avec celles d'un milieu rural. Ces effets se combinent pour produire l'îlot de chaleur urbain.

II- 2.4. L'îlot de chaleur urbain.

L'air dans la canopée urbaine est généralement plus chaud que dans l'environnement rural. La forme et la taille de ce phénomène varient dans le temps et l'espace en fonction des caractéristiques urbaines, géographiques et météorologiques (Oke 1987). La figure (II- 6) montre la variation caractéristique de la température de l'air en fonction de la distance à partir de la zone rurale jusqu'au centre d'une ville sous des conditions anticycloniques (ciel clair, vents faibles).

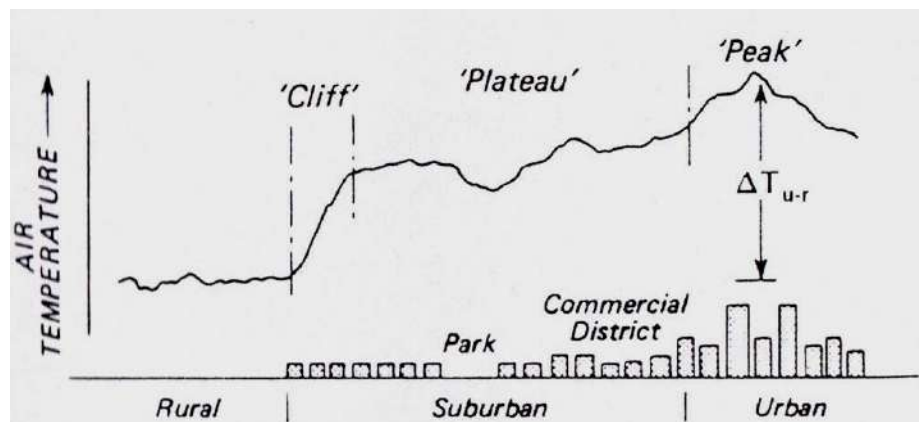


Fig. II- 6. Section transversale généralisée de l'îlot de chaleur urbain type (Oke 1987 après Oke 1976).

Les températures de l'air augmentent graduellement de la périphérie jusqu'au centre de la ville où elles atteignent un pic. La différence entre cette valeur et la température rurale (T_r) définit l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ΔT_{u-r}) (r : rural, u : urbain). Cette dernière peut atteindre des valeurs élevées jusqu'à 15°C dans les grandes villes (Santamouris 1998).

Phénomène essentiellement nocturne, l'îlot de chaleur urbain (ICU) devient plus marqué après le coucher de soleil et atteint son maximum 3 à 5 heures après celui-ci (Oke 1987). La cause en est un refroidissement nocturne bien plus prononcé et rapide de la campagne qui perd très vite, sous forme de rayonnement infrarouge, son énergie stockée. En revanche, après le lever du soleil, la campagne a tendance à se réchauffer plus rapidement, et de ce fait, l'îlot de chaleur est moins prononcé en milieu de journée, et la ville peut être même plus fraîche que la campagne : on parlera dans ce cas d'effet "oasis".

Les conditions idéales à la formation d'un îlot de chaleur urbain bien caractérisé sont des conditions anticycloniques stables, un ciel parfaitement dégagé et des vents très faibles. ΔT_{u-r} est néanmoins plus sensible à la vitesse du vent, indiquant probablement l'importance des effets de

l'advection (Oke 1982, Kim et Baik 2002, Montavez et al. 2000, Morris et Simmonds 2000). Il apparaît que pour une ville donnée, sans nuage, la valeur de ΔT_{u-r} est approximativement liée à $u^{-1/2}$ (ou u représente la vitesse du vent rural, non urbain) (Oke 1987). L'étude conduite par Kim et Baik (2002) démontre qu'avec des vitesses de vent supérieures à 0.8 m/s, une réduction dans l'îlot de chaleur urbain peut être visible tandis qu'à la vitesse de vent critique de 7.0 m/s, l'îlot de chaleur urbain peut disparaître. Klysik et Fortuniak (1999) signalent par ailleurs qu'un ICU supérieur à 1°C peut encore être observé lorsque la vitesse moyenne du vent de la ville est de 4 m/s pendant la nuit et 2 m/s pendant la journée.

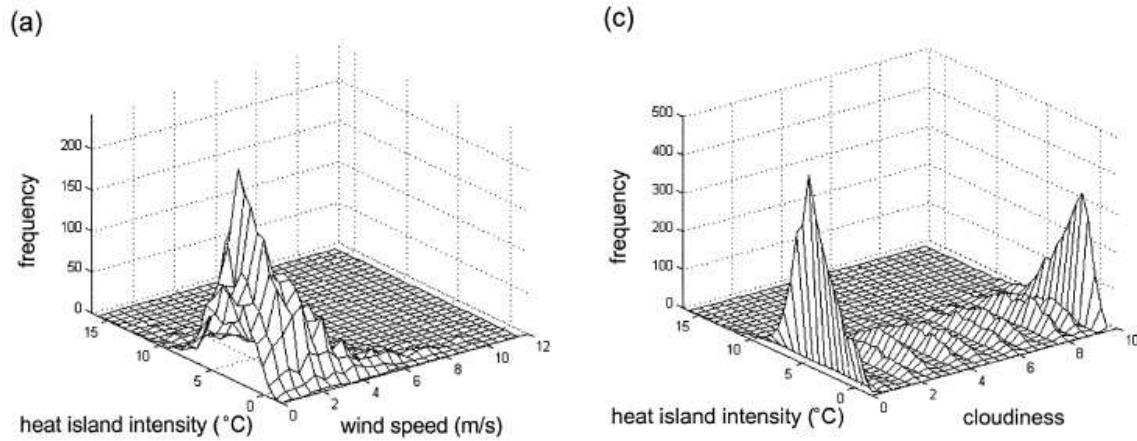


Fig. II- 7. La fréquence de distribution de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain à Séoul en fonction de (a) la vitesse du vent et (c) de la couverture nuageuse (Kim et Baik 2002).

Selon Wanner et Hertig (1984, cité par Fehrenbach et al. 2001), le système des vents locaux et régionaux joue un rôle important dans le climat des villes. Au cours des nuits d'été, lorsque l'îlot de chaleur urbain se développe, une combinaison des températures d'air élevées et des vitesses de vent faibles est le facteur principal de l'augmentation du stress thermique (Fehrenbach et al. 2001). Oke (cité In Urban Climate News, 2008) souligne que l'augmentation de l'intensité de l'îlot de chaleur à Hong-Kong est due au blocage des brises de mer par la densité et la hauteur des bâtiments. Pour ces raisons, des passages de ventilation peuvent réduire de manière significative le gain de chaleur excessif dans les établissements urbains, particulièrement durant les nuits de production de masses d'air froides dans l'environnement rural (Fehrenbach et al. 2001).

Enfin, la géométrie urbaine a pour longtemps été identifiée comme un des facteurs les plus importants dans la formation de l'îlot de chaleur urbain. En comparant ΔT_{u-r} avec la géométrie des centres de ville, Oke (1981) montre une relation forte entre l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain et la géométrie des rues canyons pour certaines villes australiennes, européennes et nord-américaines. En utilisant le prospect H/W et le facteur d'ouverture au ciel du milieu du sol d'un canyon (section II- 3.1, Fig. II- 9) comme mesure, cette relation s'exprime respectivement comme :

$$\Delta T_{u-r} = 7.45 + 3.97 \cdot \ln(H/W), \quad (\text{II- 3}), \text{ et}$$

$$\Delta T_{u-r} = 15.27 - 13.88 \cdot \Psi_{\text{ciel.}} \quad (\text{II.4}).$$

avec $\Psi_{\text{ciel.}}$: facteur d'ouverture au ciel qui correspond à la fraction de l'hémisphère occupée par le ciel (Oke 1981)). $\Psi_{\text{ciel.}}$ donne une mesure de la quantité de rayonnement qui peut pénétrer à l'intérieur de la canopée et celle qui peut être interceptée par cette canopée (Brown et Grimmond 2001)).

Cette relation démontre que la géométrie urbaine est fondamentale dans le contrôle de l'îlot de chaleur urbain. Elle influence le processus de piégeage des rayonnements solaires incidents et des rayonnements de grande longueur d'onde réfléchis, la réduction du transfert turbulent due à la réduction des vitesses de vent et le pourcentage de chaleur anthropique restituée.

Il est toutefois important de souligner que la détermination de l'îlot de chaleur urbain sur la base des différences de température entre la ville et la campagne environnante (échelle locale) est pertinente dans le cadre d'études comparatives interurbaines mais elle est difficilement applicable par les architectes et urbanistes à l'intérieur même d'une ville, à l'échelle de la canopée urbaine. La connaissance de l'influence de la géométrie urbaine sur la température est plus pertinente, du moins dans le processus de conception urbaine, à travers de petites distances, à l'échelle des rues canyons (Eliasson 1996).

L'existence de l'îlot de chaleur urbain est ainsi attribuée à plusieurs facteurs liés au climat, la topographie, la disposition physique et aux conditions atmosphériques à court terme. Ces facteurs sont résumés dans le tableau ci-après.

Tableau II- 4. Causes de l'îlot de chaleur urbain dans la canopée urbaine (Oke 1987).

Les termes du bilan énergétique altérés conduisant à l'élévation des températures.	Caractéristiques de l'urbanisation induisant les changements du bilan énergétique
1. Augmentation de l'absorption du rayonnement de courte longueur d'onde	Géométrie du canyon – augmentation des surfaces urbaines et des réflexions multiples.
2. Augmentation du rayonnement de grande longueur d'onde.	Pollution de l'air – plus grande absorption et rémission.
3. réduction des pertes de rayonnement de grande longueur d'onde.	Géométrie du canyon – réduction du facteur d'ouverture au ciel.
4. Source de chaleur anthropique.	Pertes de chaleur des bâtiments et des véhicules.
5. Augmentation du stockage de chaleur sensible.	Matériaux de construction – augmentation de l'admittance thermique.
6. Réduction de l'évapotranspiration.	Matériaux de construction – augmentation des surfaces imperméables.
7. Réduction du transfert de chaleur turbulent total.	Géométrie du canyon – réduction de la vitesse du vent.

Parmi les causes induisant l'augmentation des températures d'air en milieu urbain, trois phénomènes physiques sont ainsi essentiellement gouvernés par la morphologie urbaine.

Ce sont :

- l'augmentation de l'absorption du rayonnement induit par les multiples réflexions dans la rue canyon,
- la réduction de la perte du rayonnement de grande longueur d'onde dans la rue en raison des obstructions par les parois verticales (murs),
- la réduction du transfert de chaleur sensible à l'extérieur des canyons en raison des faibles vitesses de vent.

Le processus d'urbanisation produit des changements radicaux dans la nature de la surface et des propriétés atmosphériques de la ville. Il implique la transformation des caractéristiques radiatives, thermiques, et hygrométriques et modifie par conséquent les équilibres énergétiques. Il en résulte un réchauffement des températures urbaines en comparaison avec celles des zones rurales environnantes.

Dans ces processus de modification du climat de la ville et de réchauffement des surfaces urbaines, la morphologie urbaine joue un rôle important : elle agit essentiellement sur le pourcentage de rayonnement solaire absorbé, le système urbain accumulant d'avantage de chaleur. Il est de ce fait important de comprendre l'influence de cette morphologie urbaine (c.-à-d. la structure tridimensionnelle des bâtiments, les espacements entre eux et leur orientation) sur la répartition des flux énergétiques et son impact sur l'environnement thermique.

Il s'avère par ailleurs que l'intensité de l'îlot de chaleur urbain est fortement dépendante de la vitesse des vents, ce qui souligne l'importance de la ventilation urbaine dans le refroidissement des masses bâties.

II- 3 L'environnement thermique à l'intérieur de la canopée urbaine.

À l'intérieur de la canopée urbaine, les bilans énergétiques sont gouvernés par des processus dictés par les conditions du site de l'environnement immédiat. Ces conditions constituées des spécificités de la structure tridimensionnelle de la surface, des matériaux du substrat, de l'exposition au vent, de l'ombrage, etc., sont sujettes à de nombreuses variations dans les villes réelles (Arnfield 2003). Afin de comprendre ces processus, de nombreux travaux ont adopté le concept de canyon urbain (CU) qui se réfère à une rue avec des bâtiments alignés de manière continue le long de ses deux côtés (Nunez et Oke 1977).

Le facteur d'ouverture au ciel dans la canopée urbaine.

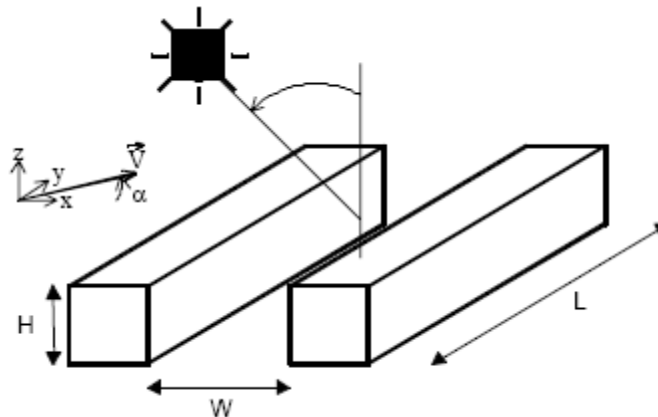


Fig. II- 8. Représentation schématique de la géométrie d'une rue canyon simple.

La géométrie de la rue urbaine, qui varie en fonction de la hauteur (H), longueur (L) et l'espacement des bâtiments (W) qui la définissent, a un rôle important sur ces échanges énergétiques, et donc sur les températures urbaines. Le prospect H/W est considéré par de nombreuses recherches comme le paramètre principal qui contrôle l'écoulement dans le CU,

l'intensité de la turbulence, l'environnement thermique et donc le bilan thermique total. Le pourcentage de flux réémis vers le ciel est fonction directement du facteur de forme sous lequel la surface émettrice voit le ciel. Dans l'environnement urbain, la fraction du ciel vue est le facteur d'ouverture au ciel Ψ_{ciel} (SVF). Il donne une mesure de la quantité de rayonnement qui peut pénétrer à l'intérieur de la canopée et celle qui peut être interceptée par cette canopée (Brown et Grimmond 2001).

Le facteur d'ouverture au ciel est déterminé pour un point précis dans l'espace et varie de zéro (0) à un (1). Lorsque $\Psi_{\text{ciel}} = 0$, cela signifie que le ciel est complètement obstrué par les obstacles et tous les rayonnements réémis peuvent être interceptés par les obstacles (comme dans le cas des passages couverts) tandis que $\Psi_{\text{ciel}} = 1$ signifie qu'il n'y a aucune obstruction et tous les rayonnements réémis peuvent rayonner librement vers le ciel (Oke 1988).

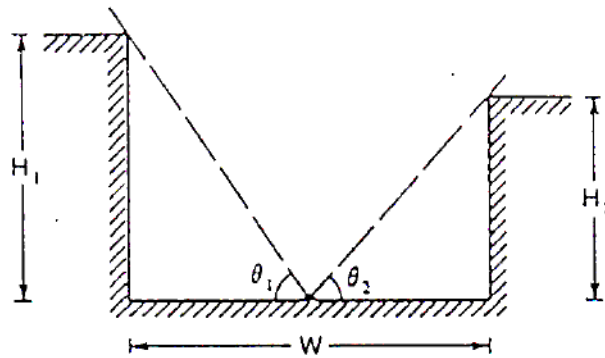


Fig. II- 9. Facteur d'ouverture au ciel d'une rue canyon asymétrique (Oke 1988).

Le facteur d'ouverture au ciel est déterminé soit par méthode analytique ou photographique. La méthode analytique utilise une équation basée sur la géométrie de la rue, spécifiquement la hauteur H (H) et la largeur ($W=2D$). Dans un environnement urbain, pour un canyon d'une longueur infinie et d'une géométrie idéale, les facteurs d'ouverture au ciel de la canopée (des murs) Ψ_{mur} et celle du ciel Ψ_{ciel} sont définis par Oke (1988) comme :

$$\Psi_{\text{canopée}} = (1 - \cos\theta)/2, \text{ où } \theta = \text{tg}^{-1} (H/0.5W), \quad (\text{II.5})$$

et

$$\Psi_{\text{ciel}} = 1 - \Psi_{\text{canopée}} = (1 + \cos\theta)/2 \quad (\text{II.6})$$

Pour des canyons symétriques,

$$\Psi_{\text{ciel}} = \cos\theta.$$

où θ est l'angle défini par la largeur de la rue W et la hauteur du bâtiment H et $\text{tg}(\theta) = 2H/W$.

À l'intérieur de la rue canyon, la réduction du facteur d'ouverture au ciel peut piéger une portion importante du rayonnement et rendre la surface à l'intérieur de la rue canyon plus chaude que l'atmosphère extérieure, même de nuit.

II- 3.1. Le bilan énergétique dans la rue canyon.

La figure (II- 10) illustre les échanges énergétiques ayant lieu à l'intérieur de la rue canyon. Une part du rayonnement solaire direct et diffus incident à une surface dans la rue canyon est

absorbée, l'autre part est réfléchi. Le rayonnement solaire réfléchi peut être intercepté par les obstructions environnantes (parois verticales et horizontales des bâtiments) causant de multiples réflexions. Ces surfaces émettent à leur tour des rayonnements de grande longueur d'onde qui peuvent être piégés dans la rue canyon en raison des obstructions créées par les parois verticales (Ca et al. 1995).

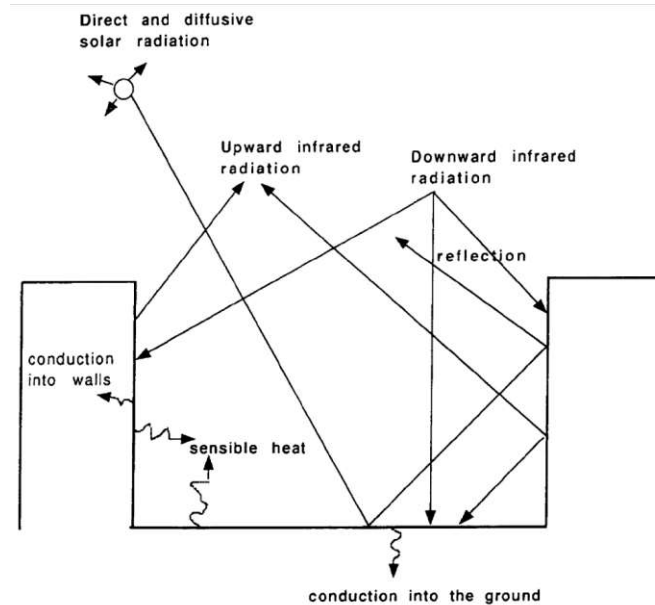


Fig. II- 10. Schéma du bilan énergétique dans la rue canyon (Ca et al. 1995).

Très peu d'études empiriques sur le bilan énergétique ont été conduites à l'échelle de la rue canyon. L'étude pionnière sur l'effet de la géométrie urbaine sur le bilan énergétique en milieu urbain est celle entreprise par Nunez et Oke (1977) qui identifient les échanges énergétiques de base se produisant au cours de l'été (vents faibles et ciel dégagé) dans une rue canyon asymétrique de prospect $H/W = 0.87$, d'orientation N-S, sous une latitude moyenne (Vancouver; B.C., Canada; $49^{\circ}16'N$; $123^{\circ}07'W$). Les murs sont en béton, peints en blanc et le sol est en gravier, avec une végétation éparse. Les données sont des moyennes spatiales pour chaque surface du canyon. Les mesures sont prises sur une période de trois jours sous des conditions de ciel dégagé et des vents faibles. Le bilan d'énergie de chaque mur est $Q^* = Q_H + \Delta Q_s$, et pour le sol : $Q^* = Q_H + Q_F + \Delta Q_s$.

Les résultats de l'étude indiquent la forte influence de la géométrie du canyon et son orientation sur les échanges radiatifs (Fig. II- 11). Cet effet se traduit par une distribution et une magnitude des bilans énergétiques de surface des murs et du sol différents au cours du cycle journalier. Dans le cas d'une rue N-S, l'incidence du rayonnement solaire est maximale sur le sol aux environs de midi et sur les murs Ouest et Est environ 1.5 h avant et après le milieu de la journée respectivement. Le rayonnement solaire net reçu dépend cependant non seulement de l'éclairement solaire mais aussi de l'angle d'incidence, de l'albédo de surface et de l'émissivité. Le faible albédo du sol et le faible angle d'incidence à midi produisent l'absorption du flux radiatif net Q^* la plus élevée.

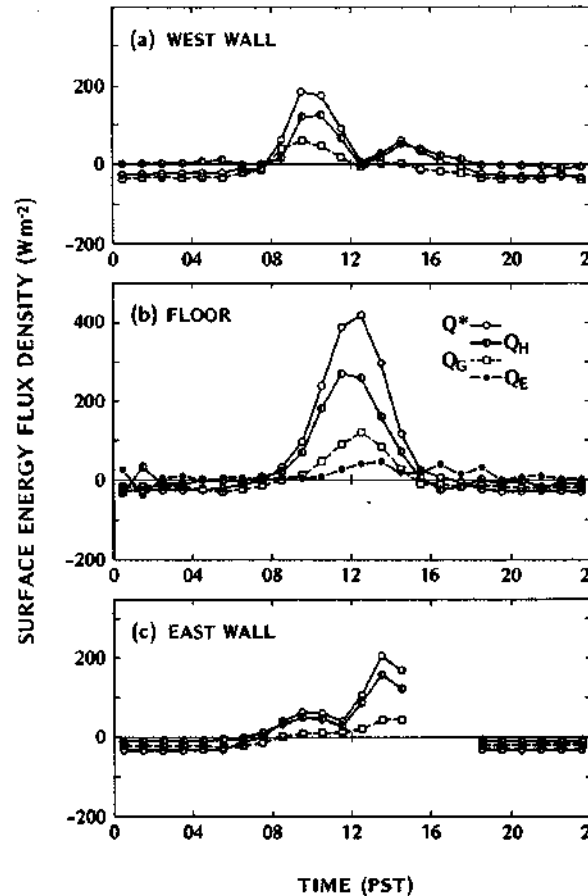


Fig. II- 11. Les bilans énergétiques diurnes de chaque surface basée sur les valeurs horaires moyennes pour une période trois jours : 9-11 septembre 1973 (Nunez et Oke 1977).

Le calcul du bilan énergétique pour tout le canyon montre qu'au cours de la journée, approximativement 60% du surplus radiatif de midi est perdu en chaleur sensible Q_H par transfert turbulent tandis que 25-30% est stocké dans les matériaux du canyon (Fig. II- 11). Au cours de la nuit en revanche, l'activité turbulente devient négligeable (vents faibles) et le déficit radiatif nocturne est presque entièrement équilibré par la restitution de l'énergie stockée dans les matériaux de surface.

Oke (1989) affirme par ailleurs que le changement de l'orientation de la rue aboutirait à des résultats différents. Ainsi, si la rue était dans la direction E-O, c'est uniquement le mur faisant face au sud et le sol qui recevrait un rayonnement incident important. De même, la variation du prospect H/W apporterait également des modifications dans le pourcentage de rayonnement solaire qui pénètre dans la rue, le piégeage du rayonnement diffus réfléchi ainsi que dans le taux de réduction du vent par effet d'abri.

En effet, l'expérience par Yoshida et al. (1990-91) dans une rue d'orientation différente (E-O) avec un prospect de 0.94, montre des différences importante dans la répartition des flux énergétiques. Au cours de la journée, environ 35% seulement du surplus radiatif sont transférés en chaleur sensible au niveau haut du canyon tandis que 75% sont stockés dans le tissu urbain. Aucune mesure des flux horizontaux n'a été effectuée. Les auteurs soulignent que le niveau haut du canyon agit comme une source de chaleur plus faible que les aires de toitures adjacentes.

Mills et Arnfield (1993) suggèrent en revanche que la variation du prospect H/W influence de manière significative la forme de l'échange de chaleur au niveau haut du canyon. En comparant leurs résultats à ceux de Nunez et Oke (1977), les auteurs indiquent que lorsque les canyons deviennent plus étroits, les magnitudes des échanges énergétiques radiatifs sont plus faibles par jour et par nuit et l'échange de chaleur sensible aux surfaces du canyon et à son niveau haut varie de ce fait très peu à travers le cycle journalier. L'effet net semble indiquer que lorsque le prospect H/W augmente, le canyon devient de plus en plus isolé de l'air au-dessus en termes d'échange thermique. Une telle conclusion a une importante implication dans la détermination du degré de couplage thermique entre la canopée urbaine et la couche au-dessus. Elle confirme par ailleurs les modélisations numériques par Coronel et Alvarez (2001) qui analysent les flux de chaleur ayant lieu dans une rue canyon profonde de prospect H/W=10/2=5 au cours d'une journée d'été en Andalousie (Séville, Espagne).

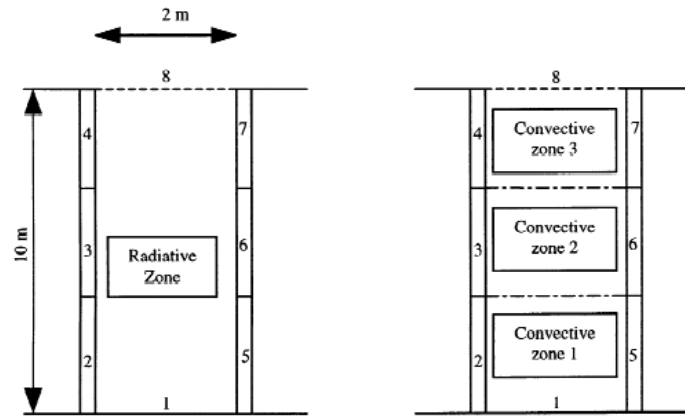


Fig. II- 12. Les surfaces et les zones radiative et convectives définies pour la simulation thermique (Coronel et Alvarez 2001).

L'évolution horaire de l'ensemble des flux de chaleur au cours du cycle journalier montre que les flux de chaleur les plus importants apparaissent sur la surface supérieure de la rue (surface 4, Fig. II- 12). Ceci est surtout dû au fait qu'elles soient les seules surfaces à recevoir un taux important de rayonnement solaire (direct et diffus). Les surfaces au niveau bas du canyon, sont protégées du rayonnement solaire direct et les échanges énergétiques sont de ce fait très faibles.

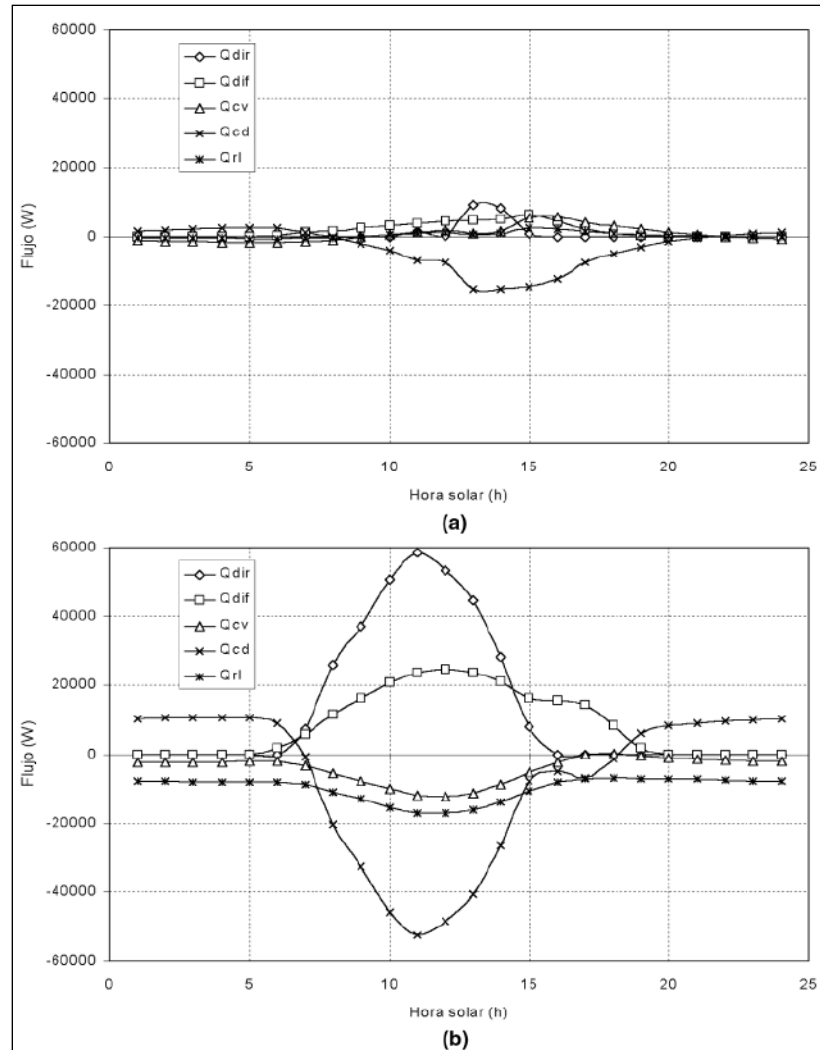
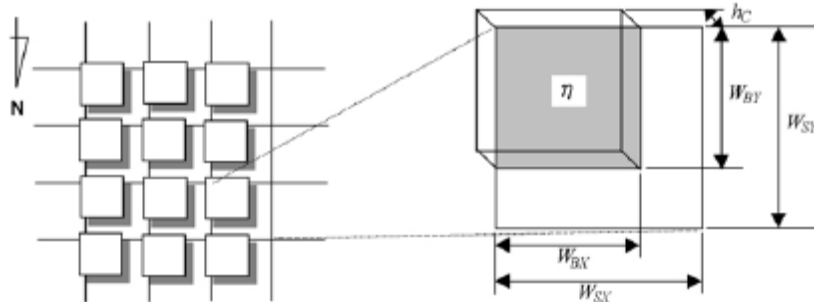


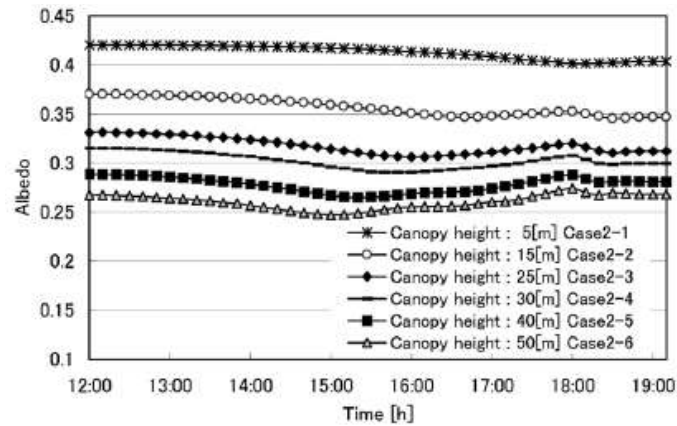
Fig. II- 13. Évolution horaire du flux de chaleur total sur les surfaces 2 (fond du canyon) et 4(haut du canyon) (Q_{dir} : flux de chaleur absorbé par la surface en raison de l'incidence directe du rayonnement solaire; Q_{dif} : flux de chaleur absorbé par la surface en raison du rayonnement solaire diffus et réfléchi par les surfaces; Q_{cv} : flux de chaleur échangé par convection à l'air environnant; Q_{cd} : flux de chaleur gagné ou perdu par la surface par transfert conductif sur le sol ou les murs; Q_{rl} : flux de chaleur échangé par rayonnement de grande longueur d'onde avec le reste des murs et des surfaces externes (Coronel et Alvarez 2001).

Lorsque le flux de rayonnement solaire atteint de grandes valeurs (aux environs de midi), le flux de chaleur conductif (flux de chaleur stocké) est toujours le principal flux qui équilibre la surchauffe causée par le rayonnement solaire. Au cours de la nuit, les valeurs de flux sont toujours faibles comparées à celles du jour. Le flux de chaleur conductif devient positif, restituant une part de la chaleur accumulée au cours de la journée. Par ailleurs, les échanges de rayonnement de grande longueur d'onde sont importants uniquement sur les surfaces supérieures, en contact direct avec le ciel. Ces résultats témoignent de l'effet de la géométrie urbaine sur les échanges de flux thermiques. La configuration étroite de la rue canyon ($H/W=5$) permet la réduction des gains de rayonnement solaire direct de jour et les pertes de rayonnement de grande longueur d'onde de nuit. Ces effets sont visibles essentiellement dans la partie basse de la rue, dans la zone se développant sur environ 1/3 de la hauteur totale du canyon.

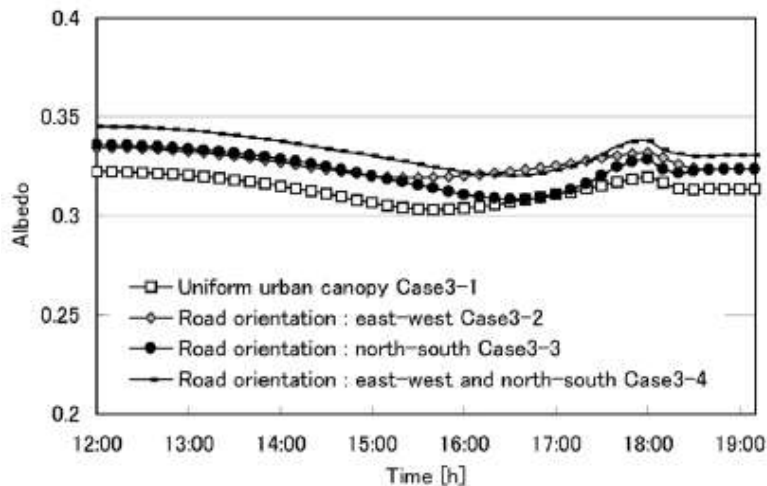
Kondo et al. (2001) examinent par modélisation numérique l'influence de la configuration de la canopée urbaine sur le flux de rayonnement net (exprimé par la valeur de l'albédo) en variant quatre facteurs: la couverture du bâtiment, la hauteur de la canopée, l'orientation des rues et la distribution de la hauteur des bâtiments.



(a). La configuration idéalisée de la canopée urbaine. Schéma d'un bloc.



(b). Variations diurnes de l'albédo en changeant la hauteur des bâtiments.



(c). Variation diurne de l'albédo pour différentes orientations de rues.

Fig. II- 14. Influence de la configuration urbaine sur la valeur de l'albédo (Kondo et al. 2001).

Les résultats indiquent que l'augmentation de l'absorption du rayonnement net augmente avec l'augmentation de la hauteur des bâtiments et la réduction de l'uniformité de leur hauteur. En revanche, cette absorption diminue lorsque les espaces ouverts sont larges. Il s'avère également que la valeur de l'albédo change d'une manière compliquée avec l'orientation des rues en raison des différences dans l'ombrage des bâtiments.

D'autres études ont confirmé et complété ces résultats en démontrant l'effet de la géométrie urbaine, des propriétés thermiques et de l'orientation sur les échanges énergétiques et thermiques dans la rue canyon (Oke 1981, Arnfield 1990, Mills et Arnfield 1993, Swaid 1993, Eliasson 1996, Sakakibara 1996, Arnfield et Grimmond 1998). En général, la chaleur sensible et le stockage sont les moyens dominants par lesquels le rayonnement net est dissipé au cours de la journée. Au cours de la nuit en revanche, la chaleur stockée est dégagée pour équilibrer le bilan radiatif négatif, ce qui induit une surchauffe nocturne locale.

II- 3.2. Le bilan thermique dans la rue canyon.

Le bilan thermique de la rue canyon résulte des échanges radiatifs et énergétiques à l'intérieur de cette rue.

En vue de déterminer l'influence de la géométrie urbaine sur le modèle de distribution des températures de l'air à l'échelle de la canopée urbaine, des mesures ont été effectuées en été par Nakamura et Oke (1988) dans une rue canyon orientée Est-ouest, de prospect H/W = 1.06, à Kyoto (Japon, 35°00'N, 135°45'E). Les résultats montrent la forte influence de l'orientation Est-ouest de la rue sur la structure thermique du canyon : seuls le mur nord et une partie du revêtement du sol du canyon reçoivent des quantités importantes des faisceaux directs du rayonnement solaire, ce qui introduit une asymétrie marquée dans le régime thermique du canyon.

Une variation systématique des différences de température est observée au courant de la journée. L'air au-dessus du toit est légèrement plus froid le jour et plus chaud au courant de la nuit. Les différences de température diurnes sont beaucoup plus importantes du côté qui est directement irradié (côté nord). En dépit de ces observations, la stratification thermique verticale du canyon est généralement petite ($< 1^{\circ}\text{C}$), ce qui est probablement dû au mélange du volume d'air dans la rue. Les différences de température d'air et de surface sont par contre importantes. Les résultats montrent que du côté nord qui reçoit l'irradiation solaire directe au courant de la journée, la surface est toujours plus chaude que l'air. Aux environs de midi, la différence peut atteindre 12 à 14°C. La plupart de ces effets est limitée dans la zone de 1 à 2 m au voisinage du sol. Ces différences sont beaucoup plus petites sur le côté sud (côté ombragé) qui reçoit uniquement le rayonnement solaire diffus. La structure thermique du canyon est ainsi fortement gouvernée par l'orientation Est-ouest de la rue.

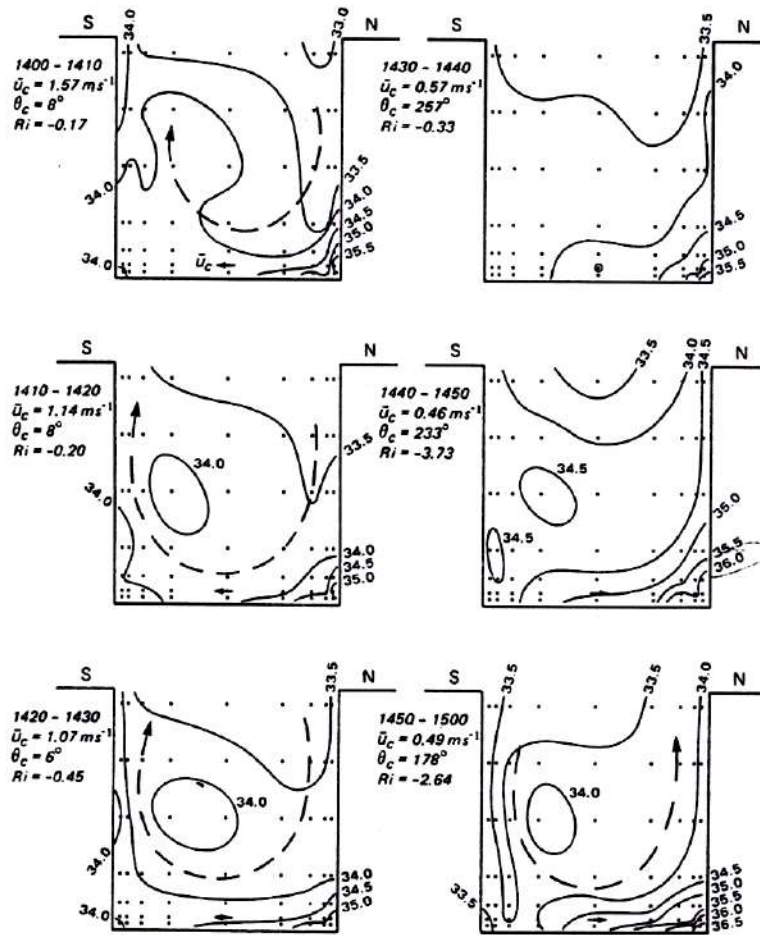


Fig. II- 15. Distributions des isothermes à travers le canyon sur des intervalles de temps de 10 min. pour la période 2 :00-3 :00 PM. La figure inclue également la vitesse du vent $\bar{u}_c$ et sa direction θ_c à 1 m au-dessus du sol. (Nakamura et Oke 1988).

Dans une rue canyon plus profonde ($H/W=2.5$) et d'orientation différente (NO-SE), Santamouris et al. (1999) révèlent une différence de températures de surface plus importante entre les deux façades ensoleillée et à l'ombre au cours de la journée, de l'ordre de 19°C. Au cours de la nuit en revanche, elles sont insignifiantes et n'excèdent pas 2°C. De même, une stratification verticale de la température de surface est observée au cours de la journée, avec les valeurs les plus élevées au niveau le plus haut du canyon. Durant la nuit, la stratification thermique est inversée. Par ailleurs, contrairement aux observations par Nakamura et Oke (1999), la stratification de la température de l'air est importante et les valeurs maximales sont de l'ordre de 3°C durant la période de jour. Ces différences s'expliquent par la géométrie de la rue plus profonde qui réduit les gains de rayonnement solaire dans les parties basses de la rue. Les températures d'air les plus faibles sont observées en effet au niveau bas de la rue et augmentent avec la hauteur, ce qui est en accord avec la distribution verticale des températures de surface des bâtiments. Au-dessus du niveau du toit, la température d'air est de 1 à 6°C plus élevée que celle à l'intérieur de la rue. Au cours de la nuit en revanche, la stratification verticale est faible, avec des différences maximales entre les différents niveaux à l'intérieur de la rue de l'ordre de 0.5°C. Les températures d'air les plus élevées sont enregistrées au fond du canyon. Dans tous les cas, la température de l'air nocturne à l'intérieur du canyon est jusqu'à 1.5°C plus chaude que celle enregistrée au-dessus du toit.

Ces résultats confirment ceux d'Alvarez et al. (2001) qui, au cours de l'été, observent une stratification thermique diurne de 2 à 4°C dans des rues canyons profondes ($H/W=3$) situées dans le quartier historique de Santa-Cruz (Séville, Espagne). Les températures d'air les plus basses sont enregistrées dans le fond du canyon et sont de 4 à 8°C inférieures à celles d'un site dégagé. Ce phénomène, identifié comme "effet oasis", peut être expliqué par la réduction des gains solaires et le faible niveau de renouvellement d'air caractéristiques des configurations étroites. Au cours de la nuit, la stratification thermique est en revanche négligeable et la température nocturne est plus élevée de 2 à 3°C par rapport à la température de référence. Cet effet d'îlot de chaleur est dû aux fortes masses thermiques présentes dans la ville, au faible niveau de ventilation naturelle dans les rues canyons ainsi qu'à la diminution du refroidissement radiatif de grande longueur d'onde en raison du faible facteur d'ouverture au ciel.

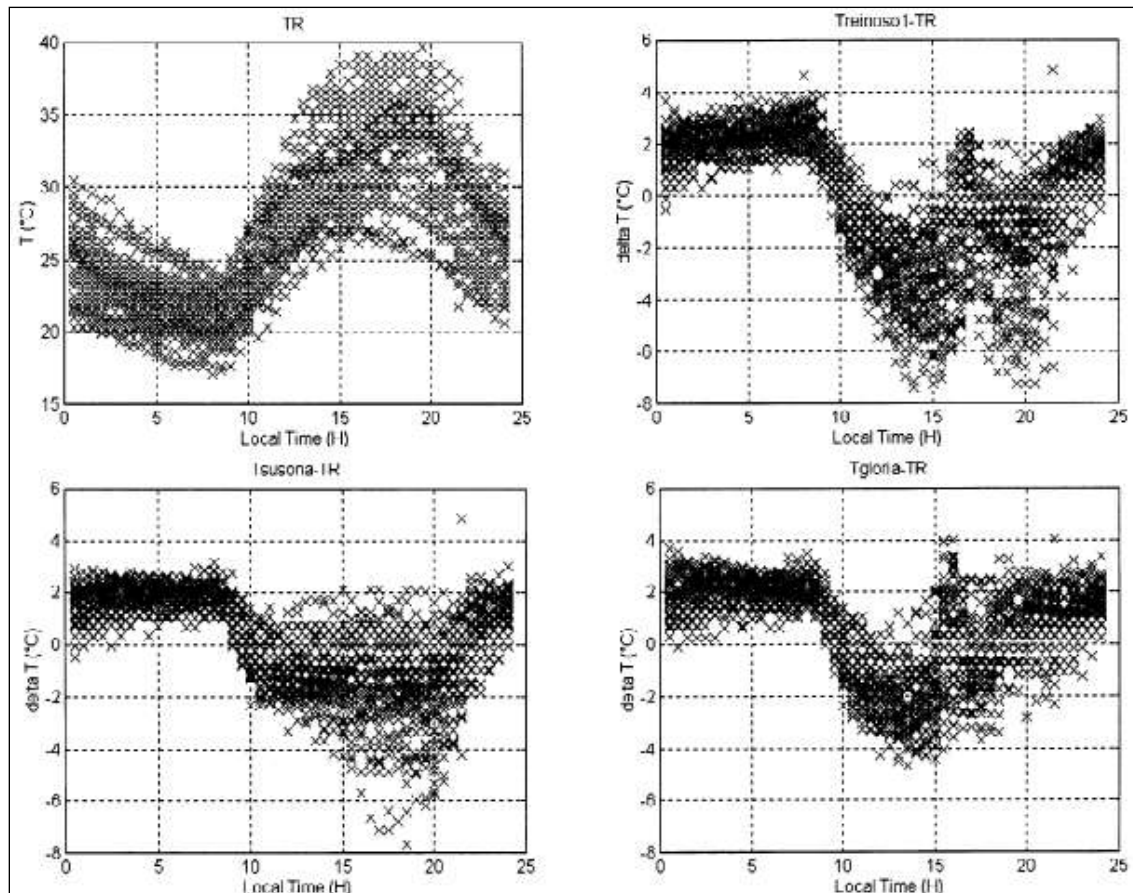


Fig. II- 16. Différences de température (ΔT) entre les rues canyons et la station de référence (Température de référence en haut, à gauche), (Coronel et Alvarez 2001).

L'effet du facteur d'ouverture au ciel est par ailleurs analysé par Eliasson (1996) dans une étude sur la distribution horizontale de la température nocturne en relation avec la géométrie urbaine à travers différents quartiers de la ville de Göteborg (Suède). Les résultats de cette étude montrent des modèles de température d'air et de surface intra-urbaines très différents (Fig.II- 17).

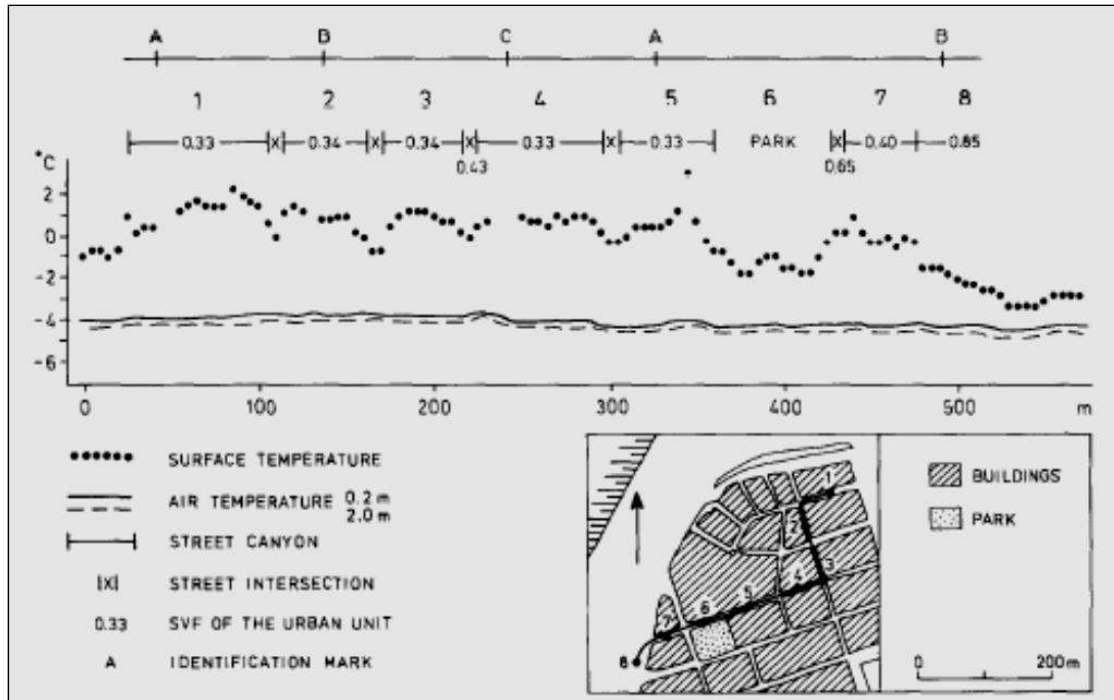


Fig. II- 17. Profils de température d'air et de surface à travers la partie nord du ventre ville de Göteborg (à 0.2 et 2.0 m du niveau du sol), (Eliasson 1996).

La comparaison des températures d'air dans le centre ville indique qu'il n'existe pas de relation claire entre la température de l'air et le facteur d'ouverture au ciel (0.33 à 1.0). L'absence de grandes différences de température d'air entre les canyons et les espaces ouverts ($\Psi_{\text{ciel}} = 1$) révèle la faible influence de la géométrie urbaine sur le modèle des températures d'air, du moins dans la zone centrale de Göteborg, et au cours de la nuit. Les résultats indiquent par ailleurs une variation des températures du centre vers la périphérie, les réductions les plus importantes étant corrélées aux facteurs d'ouverture au ciel les plus élevés. Toutefois, l'étude révèle que des quartiers de même densité spatiale peuvent présenter des températures d'air différentes si les sites sont localisés dans différentes régions urbaines. Le facteur d'ouverture au ciel seul ne suffit donc pas à expliquer la variation de la température du centre vers la périphérie puisque cette variation est gouvernée par des facteurs plus complexes. Les températures les plus faibles dans les zones suburbaines peuvent être expliquées par exemple par un phénomène d'advection à partir des zones rurales (Eliasson et Holmer 1990, cité par Eliasson 1996). De même, l'uniformité des températures dans la zone centrale peut être expliquée par ce même phénomène à l'échelle micro (présence de parcs et d'espaces ouverts dans le centre). La température d'air serait ainsi dépendante de la divergence des flux dans un volume d'air intégrant celui dû au transport horizontal (Roth et al. 1989, cité par Eliasson 1996). En revanche, la température de surface est essentiellement contrôlée par le bilan énergétique local, ce qui explique la relation statiquement importante entre la température de surface et le facteur d'ouverture au ciel observée dans le centre de la ville.

Ainsi, l'effet de la morphologie urbaine (géométrie de la rue et son orientation) sur le comportement thermique des espaces urbains est très important dans la mesure où le pourcentage de rayonnement solaire absorbé dans les aires urbaines est fortement dépendant de la géométrie des rues. Cette dernière agit à la fois sur le rayonnement solaire direct reçu et sur le rayonnement diffus intercepté à l'intérieur de la rue canyon : Le rayonnement solaire direct sur la

surface dépend de son orientation tandis que le pourcentage de rayonnement diffus reçu au niveau de la rue dépend du facteur d'ouverture au ciel (SVF).

La morphologie urbaine gouverne ainsi trois phénomènes importants induisant l'augmentation des températures d'air en milieu urbain qui sont résumés comme suit (Oke 1988) :

- l'augmentation de l'absorption du rayonnement induit par les multiples réflexions dans la rue canyon,
- la réduction de la perte du rayonnement de grande longueur d'onde dans la rue en raison des obstructions par les parois verticales (murs),
- la réduction du transfert de chaleur sensible à l'extérieur des canyons en raison des faibles vitesses de vent.

Il s'avère par ailleurs que l'effet de la géométrie urbaine est plus important sur la température de surface puisque cette dernière est gouvernée par le bilan énergétique local. Le régime de distribution des températures d'air semble dépendant d'autres facteurs, dont l'écoulement d'air horizontal.

II- 4 L'effet thermique du vent dans les espaces urbains.

Le soleil et l'ombre conduisent à des différences extrêmes dans les conditions thermiques des espaces urbains. Le vent accentue ces différences ou au contraire les aplanit. Les recherches sont toutefois très limitées sur l'influence des écoulements d'air sur la réduction des températures à l'échelle de la rue. La plupart des études existantes sur les écoulements sont conduites avec la détermination des caractéristiques de pollution dans les rues canyons, avec des écoulements incidents perpendiculaires à l'axe de la rue.

Le transfert de chaleur à l'intérieur ou à l'extérieur du volume d'air du canyon peut résulter d'un écoulement moyen à partir de l'environnement extérieur (Nunez et Oke 1977). Le transfert peut être accompli selon deux modes :

- tout d'abord, la chaleur peut être déposée ou au contraire extraite d'un canyon à travers un mouvement d'air horizontal (advection) de part et d'autre des extrémités du volume d'air,
- d'autre part, la géométrie du canyon peut induire également ses propres mouvements verticaux induisant un gain ou une perte de chaleur à travers le niveau haut du volume d'air.

Ces deux modes de transfert de chaleur sont examinés par Nunez et Oke (1977) qui indiquent qu'avec un écoulement parallèle à l'axe de la rue ($H/W=0.8$), l'effet advectif dépend de la vitesse de vent aussi bien que de la disponibilité de l'énergie à l'extérieur de la rue canyon. Avec des vitesses de vent de 2 m.s^{-1} , le transfert advectif maximal est estimé à environ 170 W.m^{-2} , tandis qu'à 1 m.s^{-1} , il est inférieur à 50 W.m^{-2} . Cet effet du vent dépend cependant de l'environnement extérieur. La figure (II- 18) révèle que les vents Sud soufflant d'un environnement chaud (fin d'une autoroute) produisent un réchauffement du volume d'air du canyon tandis que ceux du nord, plus frais, induisent un refroidissement de l'air.

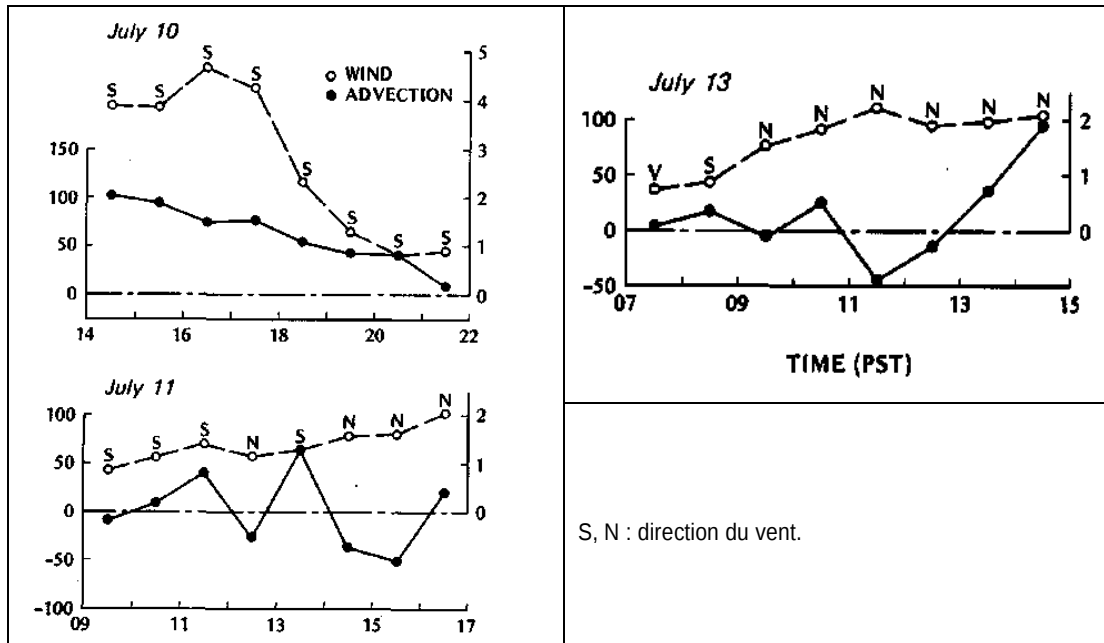


Fig. II- 18. L'advection à l'intérieur ou à l'extérieur du volume d'air du canyon due à un transport par un vent moyen horizontal en combinaison avec le gradient de température horizontal moyen. 10, 11, 13 juillet 1973. (Nunez et Oke 1977).

Les auteurs soulignent en outre que lorsque le vent incident est oblique à l'axe de la rue, le transfert de chaleur par l'écoulement moyen dans la rue canyon (structure en vortex) peut être important et fournir une interaction substantielle avec la couche au-dessus. Ce flux n'a néanmoins pas été évalué.

Dans une étude sur les caractéristiques microclimatiques d'une rue canyon orientée est-ouest, avec un ratio $H/W = 1.06$, Nakamura et Oke (1988) indiquent que les modèles spatiaux de température sont fortement dépendants de la direction du vent au-dessus du toit. Un écoulement en tourbillon (vortex) à travers le canyon produit les plus grands contrastes dans la section transversale. A l'opposé, un écoulement le long du canyon tend à produire un modèle de température plus homogène et peut conduire à des changements brusques de la température moyenne dans le cas où les sources seraient plus chaudes ou plus froides, ce qui confirme les observations de Nunez et Oke (1977).

L'étude par Bonan (2000) sur les microclimats des quartiers résidentiels au Colorado (climat semi-aride) indique par ailleurs que la chaleur générée par les masses bâties est facilement évacuée par un quartier poreux dans lequel le vent peut s'écouler facilement à travers des passages de ventilation. Dans ce quartier, le vent a un plus grand effet sur les températures de l'air, produisant un plus grand refroidissement que dans un quartier de plus forte densité spatiale ($-1.42^{\circ}\text{C}/\text{ms}^{-1}$ contre $-0.56^{\circ}\text{C}/\text{ms}^{-1}$ respectivement.). Ces résultats confirment ceux de Yokohari et al. (2001) qui observent un effet de refroidissement des températures d'été dans un quartier suburbain à Tokyo (Japon) lorsque les rues sont orientées directement vers les champs de culture, dans la même direction que l'écoulement advectif induit par la présence de végétation.

Ces quelques résultats mettent en exergue l'importance des écoulements d'air et la ventilation dans la réduction des températures d'air en milieu urbain. Notons cependant que les conditions thermiques peuvent être améliorées ou au contraire aggravées selon la saison et la nature des

vents (vents chauds ou froids). Cet aspect ne doit pas être négligé dans les processus de conception urbaine.

Conclusion.

Ce chapitre sur le climat urbain nous a permis de mettre en exergue l'effet de la morphologie urbaine sur l'environnement thermique aux échelles de la ville d'une manière générale et de la rue canyon d'une manière plus spécifique.

Dans les processus de modification du climat de la ville et de réchauffement des surfaces urbaines, la morphologie urbaine (géométrie de la rue et son orientation) joue un rôle important : elle agit essentiellement sur le pourcentage de rayonnement solaire absorbé. Elle influence le processus de piégeage des rayonnements solaires incidents et des rayonnements de grande longueur d'onde réfléchis, la réduction du transfert turbulent dû à la réduction des vitesses de vent et le pourcentage de chaleur anthropique restituée.

Ces effets se traduisent par une distribution et une magnitude des bilans énergétiques de surface des murs et du sol des rues différentes au cours du cycle journalier. En général, la chaleur sensible et le stockage sont les moyens dominants par lesquels le rayonnement net est dissipé au cours de la journée. Au cours de la nuit en revanche, la chaleur stockée est dégagée pour équilibrer le bilan radiatif négatif, ce qui induit une surchauffe nocturne locale.

Le changement de l'orientation de la rue ainsi que la variation du prospect H/W apporterait des modifications dans le pourcentage de rayonnement solaire qui pénètre dans la rue et le piégeage du rayonnement diffus réfléchi.

La configuration étroite de la rue canyon induit des magnitudes d'échanges énergétiques radiatifs plus faibles par jour et par nuit. L'effet net semble indiquer que lorsque le prospect H/W augmente, le canyon devient de plus en plus isolé de l'air au-dessus en termes d'échange thermique. Ceci permet la réduction des gains de rayonnement solaire direct de jour et les pertes de rayonnement de grande longueur d'onde de nuit. Les températures d'air peuvent être de ce fait de 4 à 8°C inférieures à celles d'un site dégagé au cours de la journée et de 2 à 3 °C plus élevées durant la nuit.

Cet effet de surchauffe nocturne, identifié comme îlot de chaleur urbain, est par ailleurs fortement dépendant de la vitesse des vents, ce qui souligne l'importance de la ventilation urbaine dans le refroidissement des masses bâties. La ventilation urbaine est de ce fait un aspect important à considérer en été en raison de son influence sur le bilan thermique de la rue, la réduction de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain et l'amélioration du confort thermique d'une manière générale.

CHAP. III. LES ECOULEMENTS D’AIR EN MILIEU URBAIN.

Introduction.

La ventilation est associée à un transport d’air: agir sur la ventilation est donc un problème d’aérodynamique où les écoulements de l’air dépendent des directions des vents, des formes et tailles des bâtiments et des rues.

En milieu urbain, le modèle d’écoulement du vent est complexe. De petites différences dans les morphologies ou la topographie peuvent provoquer des écoulements d’air irréguliers. Il est toutefois possible de connaître les caractéristiques générales de l’écoulement en rapport avec les éléments de la morphologie urbaine.

III.1. Caractéristiques des écoulements d'air dans les couches de la limite urbaine et la canopée urbaine.

Le vent est un déplacement de l'air horizontal dans les basses couches de l'atmosphère (altitude inférieure à 10 kilomètres). Il résulte d'un équilibre entre différentes forces de pression. Ces forces proviennent des inhomogénéités de pression dues à l'échauffement inégal de l'air suivant les latitudes, la nature des sols et la répartition des océans et des continents.

Lorsque l'altitude diminue, il arrive un moment où le frottement de l'air ne peut plus être négligé. Son action se fait ressentir très près du sol dans une zone appelée "couche limite atmosphérique" (CLA). Dans cette couche, près de la surface terrestre, la présence du sol perturbe l'écoulement de l'air et donne naissance à une forte agitation, appelée turbulence. La force de frottement traduit ainsi la friction turbulente de l'air sur le sol. Elle s'oppose au déplacement de l'air dont la vitesse devient inférieure à celle du vent dans l'atmosphère libre (dit vent géostrophique). La vitesse du vent ainsi que sa direction, générés par les systèmes météorologiques à l'échelle synoptique, sont modulés par la topographie régionale et locale. Au voisinage du sol, le vent interagit avec les obstacles qu'il rencontre : la présence d'un obstacle oblige le vent à le contourner, ce qui modifie localement sa vitesse et sa trajectoire. Réciproquement, le vent induit un champ de force sur les parois de l'obstacle qu'il rencontre.

En milieu urbain, la complexité de l'écoulement de l'air est grande et chaque espace doit être étudié comme un cas particulier.

III- 1.1. Le profil du vent moyen dans la couche limite urbaine.

Dans des conditions de stratifications neutres, le site dégagé (cas de relief non montagneux) entourant la ville induit une couche limite uniforme et constante (état d'équilibre) dans laquelle la vitesse du vent peut être exprimée, pour des conditions de vent moyennes à élevées (4 m/s et plus), par la loi en puissance suivante :

$$U_{\text{réf.}}/U_G = (z/z_G)^\alpha, \quad (\text{III- 1})$$

avec α l'exposant de la loi en puissance qui refléchit les conditions de rugosité de la surface en amont de la ville. Sa valeur varie en fonction de la rugosité de la surface de 0.15 à 0.3 (Plate 1995).

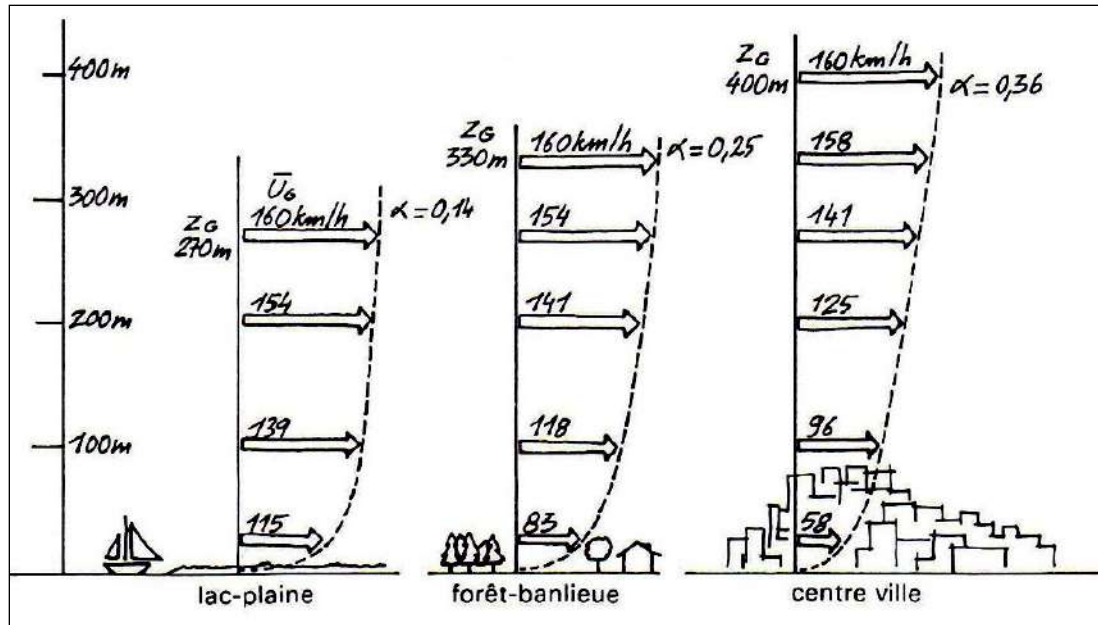


Fig. III- 1. Les profils de vent à travers différentes rugosités de terrain: Pour une même altitude, par exemple 10m, la vitesse moyenne évolue du simple au double entre la ville et le bord de mer. La rugosité α est plus forte dans une ville dense avec des immeubles hauts. (Gandemer et Guyot 1976)

Cette loi empirique est souvent utilisée par les météorologistes pour représenter le profil de vitesse dans les basses couches de l'atmosphère à partir d'une mesure de vitesse de vent à un niveau de référence $z_{\text{réf}}$ (Généralement égal à 10 m).

Dans le cas de relief non montagneux, la vitesse moyenne est faible au niveau du sol à cause du frottement au contact du sol et de ses aspérités (végétation, constructions, etc.) et croît avec la hauteur jusqu'à une cote z_G (dite épaisseur de la couche limite atmosphérique) où elle devient constante et égale à U_G ("vitesse du gradient"), vitesse indépendante du site rencontré par le vent et où les rugosités n'ont plus d'influence.

Lorsque le vent atteint la ville, le profil du vent doit s'ajuster à sa rugosité (Plate 1995). L'équation du profil de vent doit intégrer de ce fait la hauteur de déplacement zéro (d_0), hauteur à laquelle le profil logarithmique des vitesses du vent est translaté vers le haut, à cause de la présence des éléments rugueux à sa surface.

Dans la couche inertielle (à une certaine distance de la couche de la canopée urbaine), le profil du vent moyen peut être décrit par la loi logarithmique suivante :

$$u(z) = u^*/k \cdot \log(z - d_0/z_0). \quad (\text{III- 2})$$

$u(z)$; la vitesse moyenne locale,

u^* : la vitesse moyenne de frottement à la surface;

z_0 : le paramètre de rugosité,

d_0 : la hauteur de déplacement,

k : la constante de Von Karman ($k=0.4$).

Cependant l'application de l'équation (III- 2) exige la connaissance de la hauteur de déplacement d_0 , la longueur de rugosité z_0 et la vitesse de friction u^* . Dans un environnement urbain, l'estimation de ces paramètres n'est pas simple. Les échelles de longueur z_0 et d_0 sont fortement

dépendantes du type de structure de bâtiments dans l'environnement urbain et différentes méthodes ont proposé de relier d_0 et z_0 à la surface morphométrique (en relation avec les caractéristiques de la morphologie urbaine) (Wieringa 1993, Theurer 1993 (cité par Grimmond et Oke 1999), Plate 1995, Grimmond et Oke 1999).

III- 1.1.1. La longueur de rugosité d'une surface.

La rugosité du sol se détermine en fonction de la taille et la densité des obstacles que le vent contourne (bâtiments, rochers, arbres, etc.). Puisqu'il est impossible d'en proposer une modélisation universelle, on la caractérise par une rugosité globale, notée z_0 , homogène à une longueur. Le paramètre de rugosité " z_0 " de la surface traduit ainsi l'effet de la rugosité de la surface sur le profil de vitesse du vent (Guyot 1997). Il est très faible pour une surface lisse et croît lorsque la rugosité augmente. Les sites homogènes de grande extension horizontale sont classés en 5 catégories de rugosité, présentées dans le tableau (III- 1).

Tableau III- 1. Cinq catégories de rugosité en fonction de la couverture du sol.

Sites caractéristiques	Classes de rugosité	z_0 (m)
Grandes étendues d'eau (mer, océan, lac)	I	de 0,001 à 0,01
Rases campagnes, aéroports	II	de 0,01 à 0,10
Zones faiblement urbanisées, bocages	III	de 0,10 à 0,50
Zones urbanisées, industrielles ou forestières	IV	de 0,50 à 1,50
Centres des villes	V	de 1,50 à 2,50

Différents types de rugosité sont définis pour caractériser la nature des écoulements. Le tableau (III- 2) indique leur influence en altitude ainsi que leur effet sur la turbulence.

Tableau III- 2. La hauteur géostrophique et la turbulence pour trois types de surface.

type de rugosité	nature du sol	influence en altitude	Vitesse moyenne au niveau du sol	Turbulence au niveau du sol
faible	mer, rase campagne	250-300m	importante	faible <20%
moyenne	forêt, banlieue	300-350m	moyenne	moyenne env. 25%
forte	ville, centre-ville	350m et +	faible	élevée >25%

Source : Gandemer et Guyot 1976.

- 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 en hauteur,
- la ville est de rugosité forte, son gradient progresse jusqu'à 400m d'altitude et plus,
- les taux de turbulences sont plus élevés en ville (>25%) qu'en zone dégagée (<20%).

III- 1.1.2. La hauteur de déplacement d_0 .

La hauteur de déplacement d_0 d'une surface rugueuse est la hauteur à laquelle le profil logarithmique des vitesses du vent est translaté vers le haut, à cause de la présence des éléments rugueux à sa surface (Sauer et al. 1996). Elle est généralement comprise entre 0.5 et 0.8 de la hauteur moyenne des obstacles (Grimmond et Oke 1999).

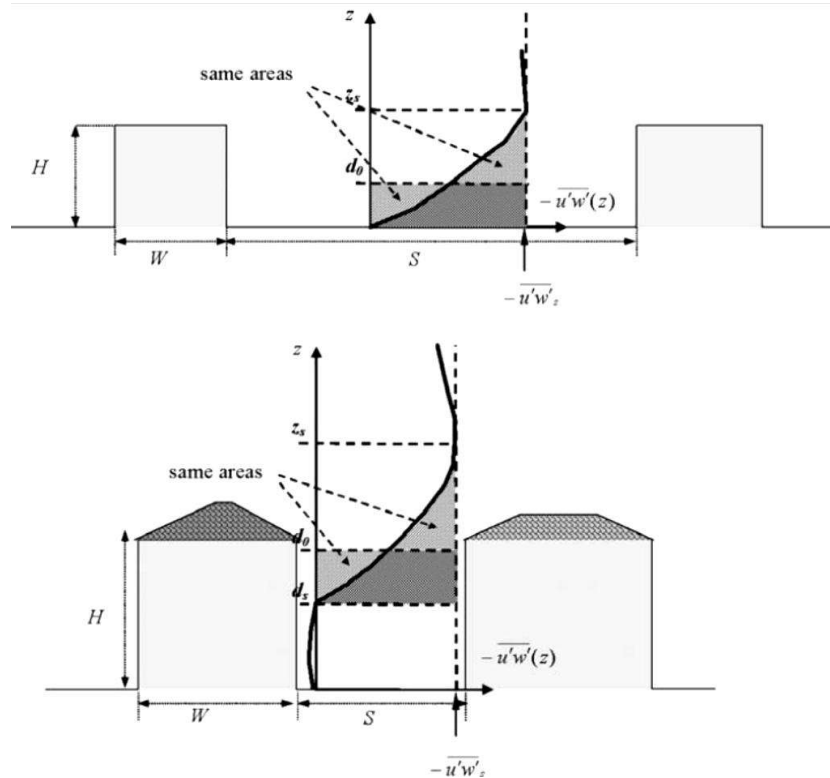


Fig. III- 2. Détermination de la hauteur de déplacement d_0 en fonction de la condition intégrale proposée par Jackson (1981). (a) : Le schéma supérieur montre l'application à une situation avec une faible densité de bâtiments, (b) : une configuration de rue canyon étroite. Kastner et Rotach (2003).

III- 1.2. La distribution du vent dans la canopée urbaine.

À l'intérieur de la canopée urbaine, les vitesses de vent sont généralement réduites en comparaison avec les vents ruraux à la même hauteur. Cependant, lorsque les vents régionaux sont faibles ou calmes et avec le développement de l'îlot de chaleur urbain, le gradient de température horizontal existant entre la zone rurale et la ville peut être suffisant pour induire une brise thermique de la campagne vers la ville. L'écoulement converge vers la ville dans toutes les directions et peut avoir une vitesse légèrement supérieure que dans la campagne environnante (Oke 1987).

III.2. L'écoulement autour d'un bâtiment isolé.

La connaissance des propriétés aérodynamiques des bâtiments isolés est importante pour la conception d'un bâtiment du point de vue de la ventilation intérieure mais aussi de l'environnement extérieur, autour du bâtiment. Il existe de nombreuses études sur l'écoulement autour d'obstacles

de forme simple (ex. Hunt et al. 1978, Meroney 1982, Hosker 1984). Ces études sont conduites en laboratoire, dans des souffleries atmosphériques, pour des modèles de bâtiments idéalisés. Elles montrent comment les caractéristiques d'écoulement de base dépendent de la forme de l'obstacle, de son orientation et des caractéristiques de l'écoulement incident. La figure (III- 3) illustre les champs d'écoulements types autour d'un obstacle de forme cubique.

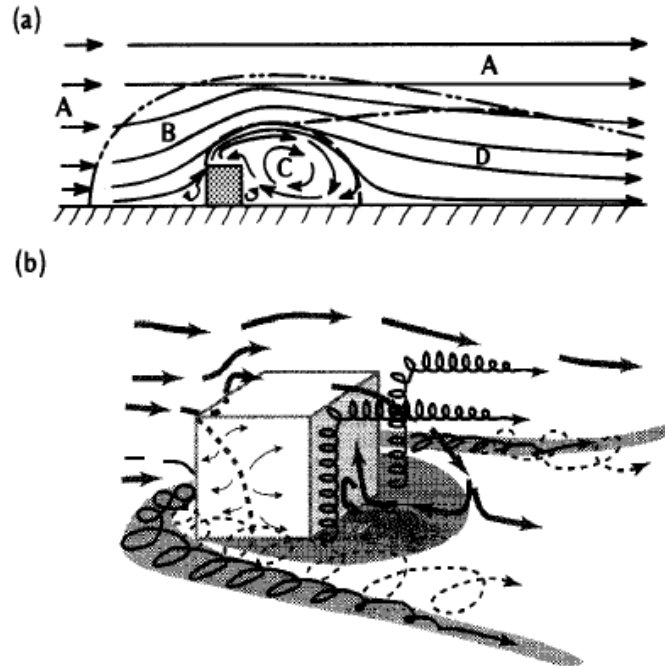
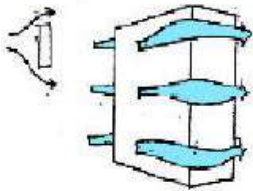
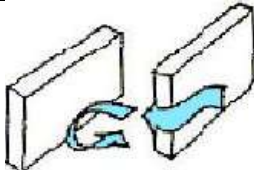
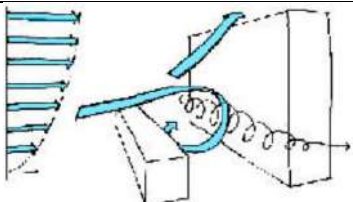
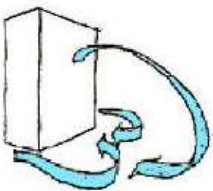
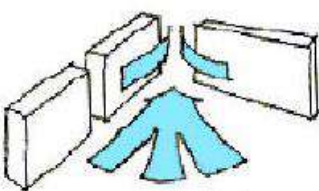
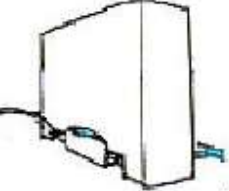
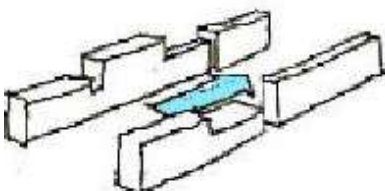
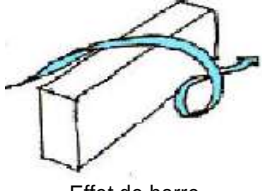
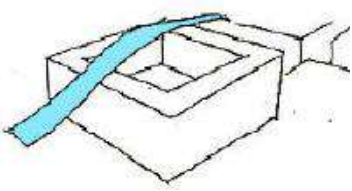


Fig. III- 3. L'écoulement autour d'un obstacle isolé : a) les lignes de courant et les zones d'écoulement. A: vent non perturbé, B: la zone de déplacement, C : la zone de cavité ou zone de re-circulation du vent, D : le zone de sillages (après Halitsky 1963) et b) l'écoulement et les structures des tourbillons (simplifiée après Hunt et al. 1978) (Oke 2004).

Dans le cas où le vent est approximativement perpendiculaire à l'une des façades, l'écoulement est caractérisé par un vortex turbulent dû à l'écoulement descendant sur la façade face au vent, tandis qu'à l'arrière du bâtiment, une zone de turbulence s'étire dans la cavité de basse pression due à la séparation des écoulements au niveau des bords des bâtiments. La taille de la région de re-circulation dépend de la géométrie du bâtiment et de l'orientation ainsi que des conditions de l'écoulement incident. Pour une forme d'obstacle cubique, l'extension sous le vent de la face arrière est comprise entre une et trois hauteurs d'obstacle. Plus loin, le sillage du bâtiment est caractérisé par une forte turbulence mais par des vitesses de vent horizontales plus faibles que celles de l'écoulement non perturbé (Oke 1987). Il décroît sur une distance de 10 à 30 hauteurs de l'obstacle.

Une des études les plus exhaustives est l'étude expérimentale de Gandemer (1975) qui identifie les principes d'écoulement d'air autour de nombreuses configurations de bâtiments comprenant des formes isolées et des formes associées. Les effets d'exposition et d'abri sont analysés et répertoriés dans des ouvrages (ex. Gandemer et Guyot 1976). Parmi ces effets, nous citons à titre d'exemple les effets de tourbillons amont qui se traduisent par des mouvement d'air tourbillonnaires importants dans le cas de bâtiments hauts (supérieurs à six niveaux) et les effets de trou qui se manifestent par des phénomènes d'accélération dans les passages sous immeubles. Ces phénomènes constituent une source de nuisance pour le confort du piéton. Le tableau (III- 3) représente les principaux effets répertoriés par Gandemer (1975).

Tableau III- 3. Principaux effets des bâtiments isolés ou associés sur les écoulements d'air.

Formes isolées	Formes associées
 Effet de coin	 Effet de liaison des zones de pression différente entre immeubles
 Effet de tourbillon amont	 Effet Wise
 Effet de sillage et de rouleau aval	 Effet venturi
 Effet de trou ou de passage sous immeuble	 Effet de canalisation
 Effet de barre	 Effet de maille ou de cour

De nombreuses autres études ont été conduites (Wiren 1975, Lawson et Penwarden 1975, Penwarden et Wise 1975, Kenworthy 1985, Stathopoulos et Storms 1986, Bottema 1992) et menées pour la plupart pour des objectifs liés au confort thermique de l'espace extérieur, au voisinage immédiat du bâtiment. Ces études ont offert une base à partir de laquelle des orientations générales, des règles et des formules empiriques ont pu être développées et des critères de confort établis. Aujourd'hui en revanche, un intérêt de plus en plus croissant est porté sur la compréhension des phénomènes de dispersion des polluants autour d'un bâtiment isolé (Zhang et al. 1996, Calhoun et al. 2004, Smith et al. 2001).

III.3. L'écoulement d'air dans la rue canyon.

La rue canyon se réfère à une rue avec des bâtiments alignés de manière continue le long de ses deux côtés (Nunez et Oke 1977). Comme les observations sur site sont plus difficiles à réaliser, les études sur l'écoulement de l'air dans la rue canyon sont conduites pour la plupart en laboratoire, dans des souffleries atmosphériques ou par modélisation numérique. Le tableau ci-dessous (III- 4) représente la presque totalité des études de terrain conduites au cours de ces trente dernières années.

Tableau III- 4. Exemples d'observations sur site du vent et de la turbulence dans les canyons urbains, classés par ordre de croissance du prospect H/W. (Modifié après Eliasson et al. 2006).

Site	H/W	Période	Auteur
MUST, DPG Utah	faible	Sept. 2001	Zajic et al. (2003)
Sydney	0.4	Sept 1993	Johnson et Hunter (1999)
Salt Lake City	0.5 (en moyenne)	Octobre 2000	Allwine et al. (2002)
Reading, Angleterre.	0.7	Sept-oct 1996	Louka et al. (2000)
Cologne, Allemagne	1	Août-Octobre Mars-avril 1980 Mai 1981.	Yamartino et Wiegand (1986)
San José, Californie.	1	Nov.-Décembre 1970	Johnson et al. (1973)
Cardington, UK	1	Octobre 90.	Davidson et al. (1995)
Basel	1	Nov. 2001–Jul. 2002	Christen et al. (2002), Christen et al. (2003).
Zurich	1.2	18 mois	Rotach (1995)
Chicago, USA	1.4	18 lâchers de ballons en 3 jours	DePaul et Sheih (1986)
Nantes, France	1.4	Juin-Juil. 1999	Vachon et al. (1999) Louka et al. (2002)
Copenhague	1.4	185 jours	Nielsen (2000)
St.Louis, Missouri	1.5-2	Août-Oct. 1971	Dabberdt et al. (1973)
Columbus, Ohio	1.52	11 cas	Arnfield et Mills (1994)
Oklahoma City	2 (en moyenne)	juillet 2003	Brown et al. (2004)
Athènes	2.5	Juillet 1997	Santamouris et al. (1999)
			Nakamura et Oke (1988)
Göteborg, Suède	2.1	Juin 2003, août 2004	Eliasson et al. (2006)

Combinées aux expériences en laboratoire et aux modélisations numériques, ces études (voir tableau) ont pu mettre en évidence différents régimes d'écoulements d'air en fonction de trois facteurs importants que sont :

- les caractéristiques du vent (vitesse et direction) au-dessus du canyon,
- la géométrie du canyon,
- la distribution de la température dans le canyon.

III- 3.1. Effet de la géométrie du canyon H/W.

La rue canyon est caractérisée par trois paramètres importants que sont la hauteur moyenne des bâtiments (H), la largeur des canyons (W) et la longueur du canyon (L). Ces paramètres donnés, les caractéristiques géométriques sont limitées à trois mesures simples que sont le prospect H/W , le rapport L/H et la densité du bâtiment $j = A_r/A_l$, où A_r correspond à la surface de toit du bâtiment et A_l , la surface du lot occupée par chaque bâtiment (Oke 1988).

La figure (III- 4) présente les principales caractéristiques de la rue canyon en rapport avec les écoulements d'air :

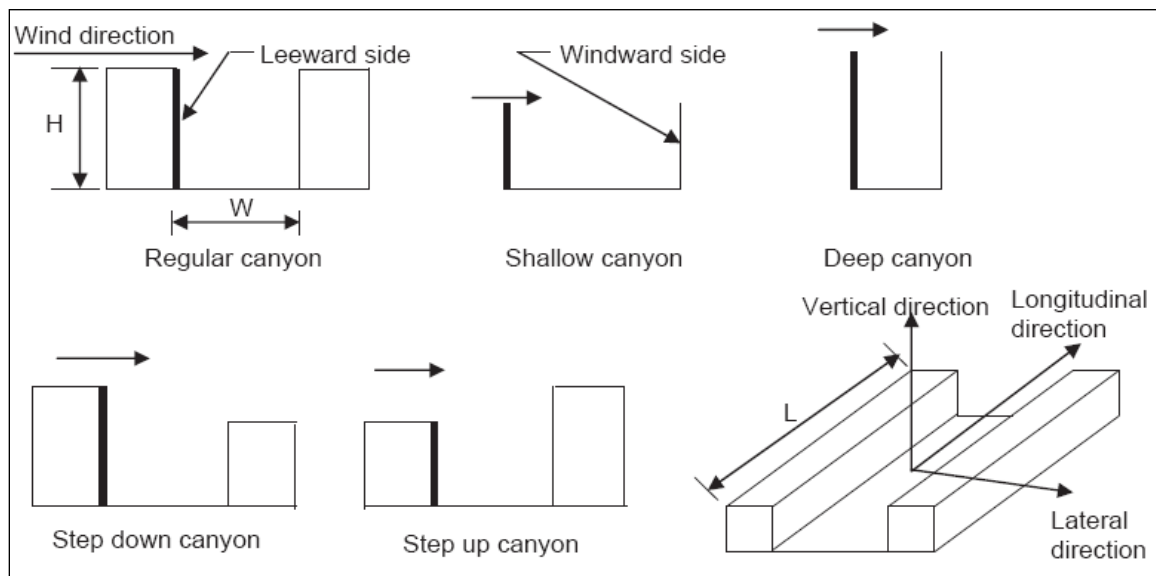


Fig. III- 4. Caractéristiques géométriques des rues canyons (Ahmad et al. 2005).

Le canyon urbain est uniforme s'il a un prospect (H/W) approximativement égal à 1. Un canyon large a un prospect inférieur à 0.5 et un prospect de 2 représente un canyon profond (Vardoulakis et al. 2003).

La longueur (L) exprime la distance de la rue entre deux intersections principales, subdivisant la rue en canyons courts ($L/H=3$), moyens ($L/H=5$) ou longs ($L/H=7$) (Ahmad et al. 2005).

Si les bâtiments bordant le canyon sont de hauteurs égales, alors le canyon est "symétrique". Il est "asymétrique" s'il y a des différences dans la hauteur des bâtiments. En fonction de la direction du vent, les canyons asymétriques peuvent être subdivisés en deux catégories :

- i. les canyons “ascendants” (step up canyons) qui désignent des rues asymétriques avec les bâtiments les plus bas face au vent ;
- ii. les canyons “descendants” (step down canyons) ayant leurs bâtiments les plus hauts face au vent.

Lorsque l'écoulement du vent est perpendiculaire à la rue canyon, la paroi du bâtiment face au vent est appelée “sous le vent” (leeward), et celle du bâtiment à l'abri du vent est dite “face au vent” (windward) (Vardoulakis et al. 2003).

Les effets de la géométrie du canyon, ou effets aérodynamiques, ont été largement étudiés, essentiellement en soufflerie atmosphérique (Hussain et Lee 1980, Oke 1987, Baik et al. 2000, Kim et Baik 2001, Kovar-Panskus et al. 2002) ou par calcul numérique (Hunter et al. 1992, Sini et al. 1996, Baik et Kim 1999, Baik et al. 2000, Kim et Baik 2002, Kovar-Panskus et al. 2002). En fonction du prospect de la rue canyon H/W et de l'angle d'incidence du vent ambiant sur l'axe de la rue, différents modèles d'écoulement ont été développés (Fig. III- 5) :

- i. cas des vents perpendiculaires (angle d'incidence : 90° ou $270^\circ \pm (20 - 30^\circ)$),
- ii. cas des vents parallèles (angle d'incidence : 0° ou $180^\circ \pm (20-30^\circ)$),
- iii. et cas des vents obliques (pour tous les autres cas).

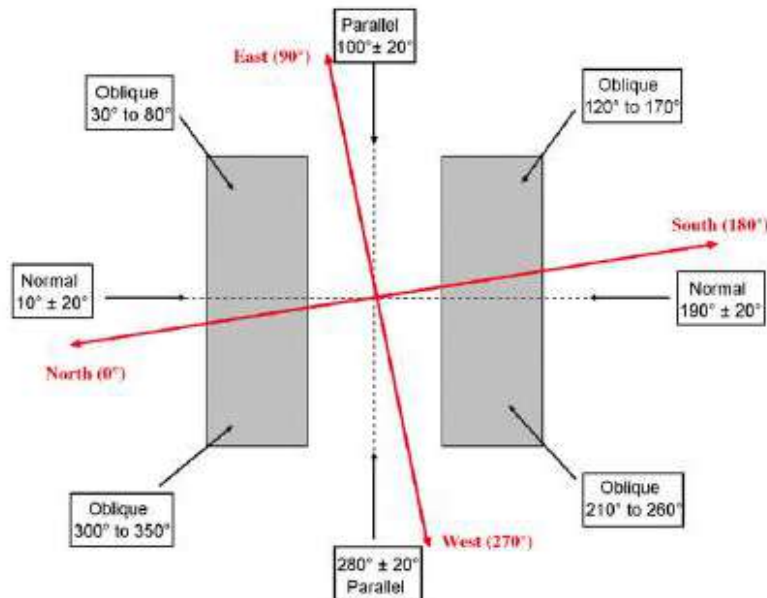


Fig. III- 5. Classification des angles d'incidence du vent ambiant : en parallèle, perpendiculaire et oblique par rapport à l'axe de la rue canyon (Niachou et al. 2005).

L'étude de ces différents modèles d'écoulement est particulièrement pertinente pour la compréhension des processus de ventilation dans la rue canyon car ils gouvernent le degré d'échanges d'air (verticaux et horizontaux) avec le vent libre à l'extérieur de la rue. D'une manière générale, la structure de l'écoulement verticale détermine le degré d'interaction avec l'air libre au-dessus de la canopée urbaine tandis qu'une structure horizontale permet un échange d'air horizontal avec l'environnement extérieur.

III- 3.1.1. Cas d'un vent perpendiculaire à l'axe de la rue.

La majorité des études concernant la ventilation ou le transfert de polluants considèrent le cas d'un vent incident perpendiculaire à l'axe de la rue. En effet, cette direction de vent crée des conditions défavorables à la ventilation dans la rue.

III- 3.1.1.1. Les régimes d'écoulements d'air dans la rue canyon.

En se basant sur les études en soufflerie de Hussain et Lee (1980), Oke (1988) décrit le développement de trois régimes d'écoulement d'air le long d'une rue constituée de bâtiments de même forme et de même taille, lorsque le vent est perpendiculaire à l'axe de la rue.

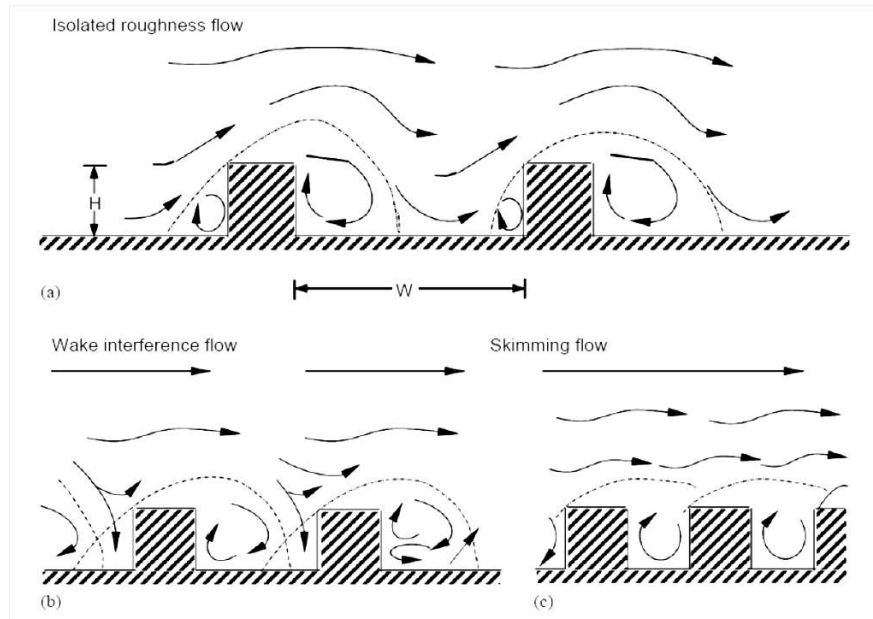


Fig. III- 6. Les trois régimes d'écoulements dans les rues canyons pour différents prospectes et pour un vent incident perpendiculaire : a) écoulement de rugosité isolée, b) écoulement de sillage interférent, c) écoulement rasant (Oke 1988).

Ces régimes sont classés en fonction du prospect de la rue H/W , avec un écoulement rasant pour un prospect de la rue $H/W = 0.65$, un écoulement de sillage interférent pour un prospect moyen compris entre 0.33 et 0.65 ($0.33 < H/W < 0.65$) et un écoulement de rugosité isolée lorsque la rue est plus large, caractérisée par un prospect $H/W < 0.33$ (Fig. III- 6). Ces trois régimes d'écoulement sont déterminés par le degré d'interaction entre les écoulements générés en aval du bâtiment face au vent et en amont du bâtiment sous le vent (Hussain et Lee 1980, Oke 1988, Hunter et al. 1992, Sini et al. 1996) :

- dans un écoulement de rugosité isolé ($H/W < 0.3$), les zones de re-circulation de l'écoulement situé en aval du premier obstacle n'entrent pas en interaction avec l'écoulement en amont de l'obstacle suivant (Fig. III- 6a). La rugosité aérodynamique apparente est faible, elle diminue lorsque l'espacement W augmente,
- à des espacements entre bâtiments plus réduits ($0.3 < H/W < 0.65$), le sillage créé par l'obstacle situé face au vent est perturbé par le tourbillon situé en amont de l'obstacle sous le vent (Fig. III- 6b) et un écoulement de sillage interférent se crée. Une variété d'écoulements complexes et plutôt instables occupe alors les espacements entre les bâtiments. Il se forme des régions

de re-circulation de l'air et souvent des régions où un écoulement externe pénètre au niveau du sol). La rugosité aérodynamique est plus grande dans le cas du régime de sillage interférent qui constitue l'écoulement transitionnel entre les régimes d'écoulement rasant et de rugosité isolée. La ventilation maximale de la rue se produit pour ce régime d'écoulement (Bottema 1999),

- enfin, dans le régime d'écoulement rasant ($H/W > 0.65$), le volume de l'écoulement au-dessus du toit ne pénètre pas dans le canyon et une re-circulation de vortex s'établit à l'intérieur de la rue (Fig. III- 6c). La rugosité aérodynamique de la rangée de bâtiment est relativement faible mais diminue dans ce cas lorsque l'espacement est réduit. Ce régime d'écoulement constitue le modèle d'écoulement le moins favorable à la ventilation urbaine en raison du faible taux d'interaction avec la couche au-dessus.

La transition entre ces trois régimes dépend non seulement du rapport H/W mais également du rapport L/H où L est la longueur des bâtiments considérés. Lorsque le rapport L/H varie de 1 à 8, la valeur de transition du rapport H/W entre l'écoulement de rugosité isolée et de sillages interférents varie de 0.3 à 0.4 environ. La valeur de transition du rapport H/W entre les écoulements de sillage interférent et rasant est, quant à elle, pratiquement constante quelque soit le rapport L/H .

Des études en laboratoires (ex. Hoydysh et Dabberdt 1988) ont largement confirmé l'utilité de cette classification et la transition entre les trois régimes d'écoulement a fait l'objet de nombreuses études en soufflerie et par modélisation numérique (Hunter et al. 1992, Sini et al. 1996, Baik et Kim 1999). Ces études trouvent une concordance avec la classification de Oke (1988).

Des doutes subsistent néanmoins sur la transition entre les trois régimes d'écoulement dans la mesure où la valeur de prospect transitionnelle trouvée ne concorde pas toujours avec celle déterminée par Oke (1988) et Hussain et Lee (1980). En effet, l'expérience en soufflerie atmosphérique de Kovar-Panskus et al. (2002) indique la présence d'un régime d'écoulement rasant pour des prospects de rues plus larges, de l'ordre de 0.5 (Fig. III- 7). De même, Johnson et Hunter (1999) définissent dans une étude de terrain un régime d'écoulement rasant jusqu'au seuil de $H/W = 0.4$, valeur seuil beaucoup plus faible que celle de 0.65-0.70 suggérée par les simulations numériques de Sini et al. (1996), Hunter et al. (1992), Oke (1988) et Hussain et Lee (1980).

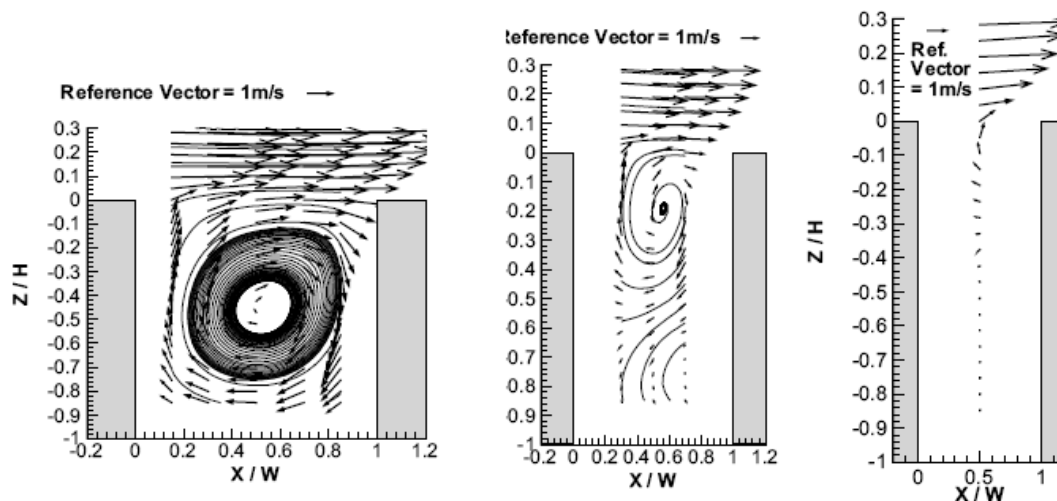


Fig. III- 7. Présence d'un écoulement rasant dans une rue canyon de prospect H/W variant entre 0.5 et 2. (Kovar-Panskus et al. 2002).

Ces résultats, contraires à ce qui est attendu sur la base des études précédentes, suggèrent que le prospect H/W seul ne suffit pas à décrire l'écoulement dans la rue canyon. Des facteurs additionnels interviennent dans la détermination des régimes d'écoulement de l'air dans les rues canyons (Johnson et Hunter 1999).

En plus de l'intérêt accordé à la classification et la transition entre les différents régimes d'écoulement, une attention considérable a porté sur le régime d'écoulement rasant en raison de son caractère commun en milieu urbain. Les principales conclusions sont résumées dans la section ci-après :

III- 3.1.1.2. Caractéristiques de l'écoulement rasant.

La structure de l'écoulement dans la rue (nombre de vortex et leur intensité) et le degré de couplage aéraulique entre la canopée urbaine et la couche au-dessus (en termes de vitesse et de direction) sont importants car ils déterminent le niveau de ventilation de la rue. Plus les échanges d'air entre les deux écoulements sont importants, mieux la rue est ventilée.

i. Nature de la circulation.

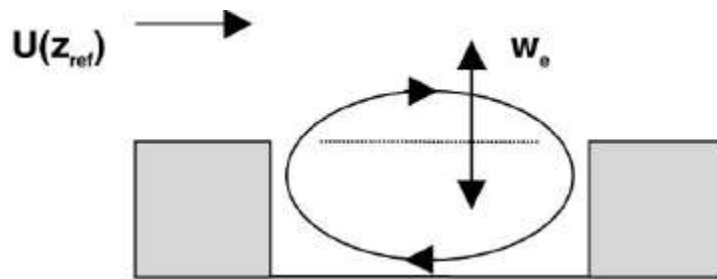


Fig. III- 8. Illustration du concept de ventilation de la rue. $U(z_{ref})$ est la vitesse de vent de référence. w_e représente la vitesse de mixage et mesure l'échange turbulent entre la rue et la couche d'air au-dessus des bâtiments (Bottema 1999).

Dans le cas d'un vent incident perpendiculaire à l'axe de la rue, un vortex se développe dans la rue. Cet écoulement de l'air dans le canyon peut être considéré comme une circulation secondaire générée par l'écoulement imposé au dessus du toit (Nakamura et Oke 1988). Si la vitesse du vent à l'extérieur du canyon est au dessous d'une valeur seuil, le couplage entre les écoulements supérieur et secondaire est perdu (Nakamura et Oke 1988). En termes de ventilation de la rue, cela signifie qu'il n'y a plus d'échanges d'air entre le canyon et la couche au-dessus. Dans ces conditions, la circulation du vortex ne peut être maintenue et la ventilation de la rue cesse.

Dans une étude de terrain à Chicago, DePaul et Sheih (1986) montrent que dans une rue canyon symétrique de prospect égal à 1.4, une vitesse de vent ambiant de 2 m/s est nécessaire pour maintenir la circulation du vortex dans la rue. Des valeurs similaires sont rapportées par Nakamura et Oke (1988) dans une même configuration de rue, de prospect proche de l'unité ($H/W = 1.06$). De même, McCormick (1971) rapporte une vitesse de vent seuil proche de 2 m/s. Dans toutes ces études, cette valeur seuil de vitesse du vent ambiant est observée dans des rues canyons de géométrie H/W proche de l'unité. Toutefois, dans le cas de rues plus profondes ($H/W = 3.3$), la vitesse de vent de 2 m/s ne suffit pas à établir la circulation d'un vortex à l'intérieur de la rue canyon (Assimakopoulos et al. 2005, Georgakis et Santamouris 2006). Des vitesses de vent supérieures à 4 m/s sont nécessaires pour établir un couplage entre les deux écoulements et assurer la ventilation dans les rues profondes (Georgakis et Santamouris 2006). Kim et Baik

(1999) montrent que la valeur seuil de la vitesse du vent ambiant requise pour la formation de vortex à l'intérieur d'une rue canyon de prospect $H/W = 2$ doit être de 3.7 m/s. Plus le prospect de la rue est profond, plus importante doit être la valeur seuil de la vitesse du vent au-dessus du toit.

Dans toutes ces études, les vitesses de vent les plus élevées trouvées produisent la circulation d'un vortex stable dans le canyon, avec la direction de l'écoulement au voisinage du sol directement opposée à la direction du vent à l'extérieur du canyon.

Cette image conventionnelle d'une circulation moyenne stable dans la rue est toutefois remise en cause au profit d'une autre image de l'écoulement, plus turbulent et intermittent. Les observations de terrain par Louka et al. (2000) dans une rue isolée de prospect $H/W = 0.7$ suggèrent en effet que l'écoulement moyen dans la rue est simplement un résidu d'une re-circulation turbulente instable. Selon les auteurs, une couche de cisaillement instable se répand en amont de la toiture et ses fluctuations instables forcent la re-circulation dans la rue.

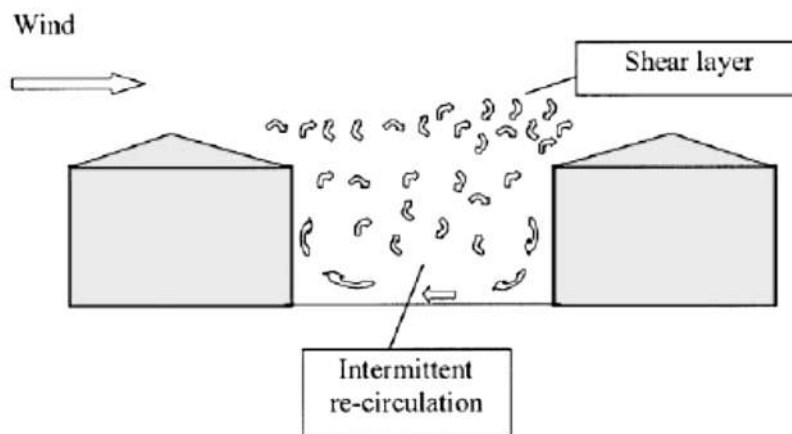


Fig. III- 9. Représentation schématique de l'écoulement dans la rue et au niveau du toit (Louka et al. 2000).

Ces résultats sont en accord avec ceux de Dobre et al. (2005) qui observent dans une rue de Londres une structure de vortex intermittente. De même, l'étude de terrain d'Eliasson et al. (2006) dans le centre de Göteborg (Suède) aboutit aux mêmes conclusions dans le sens où l'écoulement observé dans la rue ($H/W = 2.1$) est intermittent et fortement instable. La structure du vortex instable permet un meilleur échange avec la couche au-dessus tandis qu'un vortex à rotation stable supprime la ventilation (Meroney et al. 1996).

La ventilation de la rue dépend de la nature de l'écoulement dans la rue canyon (circulation en vortex) mais aussi de l'intensité de cet écoulement. Aussi, de nombreuses études se sont intéressées à prédire la vitesse d'air dans la rue canyon en fonction de celle du vent imposé au-dessus du toit.

ii. Intensité des écoulements.

Des relations empiriques ont été établies entre la vitesse de vent dans la rue et celle au-dessus du toit pour des vents incidents perpendiculaires. Pearlmutter et al. (1999) indiquent que la vitesse du vent est le plus sévèrement réduite à un angle d'attaque perpendiculaire à l'axe de la rue, avec une réduction de 2/3 dans le cas d'une rue de prospect $H/W=1$, avec des mesures d'écoulement prises à 0.5 H et 2 H à partir du niveau du sol. Nakamura et Oke (1988) notent en revanche que dans un canyon symétrique de prospect $H/W = 1$, la réduction de l'écoulement à

l'intérieur de la rue est indépendante de la direction du vent incident. Pour des directions de vent confondues et des vitesses de vent supérieures à 5 m/s, la relation générale entre les deux vitesses de vent est linéaire, $v = p.U$, (v : vitesse d'air dans la rue, U : vitesse d'air au-dessus du toit) avec le facteur de réduction p variant entre 0.66 et 0.75 sous conditions que les vents dans et à l'extérieur du canyon soient mesurés respectivement à $0.06 H$ et $1.2 H$ (où H représente la hauteur du canyon).

iii. Effet de la géométrie urbaine sur le nombre de vortex associés à l'écoulement rasant.

La structure verticale de l'écoulement rasant, c'est à dire l'intensité et le nombre de vortex en présence dans la rue canyon, est importante du point de vue de la ventilation urbaine car elle agit sur les échanges aérauliques entre la rue et la couche au-dessus. En fait, une structure à vortex multiples réduit les échanges entre l'écoulement dans la rue et le vent libre au-dessus du toit. En revanche, une structure à vortex unique permet une meilleure interaction avec la couche au-dessus, ce qui favorise la ventilation de la rue canyon.

C'est pourquoi, l'analyse du nombre de vortex en rapport avec la géométrie urbaine dans le cas d'un régime d'écoulement rasant a fait l'objet d'une grande attention et de nombreuses études ont pu montrer l'existence de vortex secondaires dans les rues canyons profondes, de prospect H/W supérieur ou égal à 2. Sini et al. (1996) révèlent en effet la présence d'un ou deux vortex additionnels au vortex principal dans la partie inférieure de la rue de prospect respectif de 2 et 3. Ces résultats concordent avec ceux de Baik et Kim (1999) et Baik et al. (2000) qui indiquent la présence de deux vortex contrarotatifs dans des canyons étroits, de prospect H/W respectifs de 2, 2.4, et 3 (Fig. III- 10). Dans tous les cas, le centre du tourbillon (ou le vortex supérieur) est situé légèrement en aval du centre du canyon. Baik et Kim (1999) révèlent en outre que lorsque le prospect de la rue atteint la valeur de 3.5, trois vortex contrarotatifs se forment. Le nombre de vortex augmente ainsi avec le prospect de la rue, ce qui induit une rupture totale entre les écoulements secondaires dans le fond de la rue et le vent au-dessus du toit.

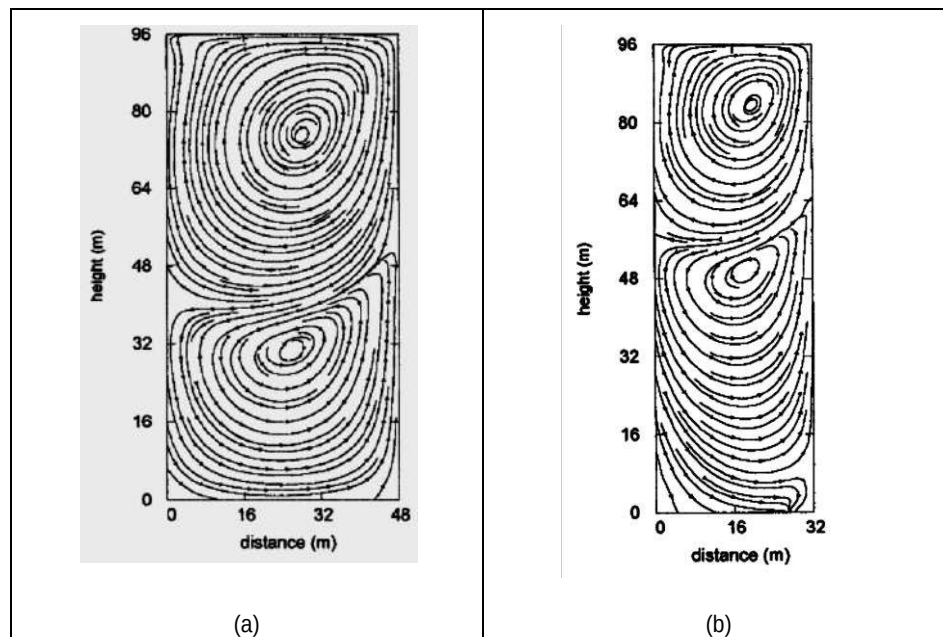


Fig. III- 10. Structure de l'écoulement dans deux rues de prospects respectifs de 2 et 3 : (a) dans la rue de prospect $H/W = 2$, le vecteur de vitesse maximal correspond à 4.30 cm.s^{-1} . (b) La même figure mais avec un prospect H/W de 3 : début de formation du troisième vortex. Vecteur vitesse maximal correspond à 4.06 cm.s^{-1} (Baik et kim 2000).

Des vortex contrarotatifs apparaissent également dans des études en soufflerie atmosphérique (Savory et al. 2000, cité par Vachon 2001) qui notent que pour des rues de prospect H/W de 2 et 3.33, deux vortex se forment dans l'aire totale du canyon, un vortex primaire, plus prononcé dans la moitié supérieure de la cavité et un vortex plus faible dans la partie inférieure. La formation d'un écoulement secondaire dans la région inférieure du canyon est également observée dans des études de terrain par DePaul et Sheih (1986), Arnfield et Mills (1994) et Satamouris et al. (1999). Dans tous les cas, le vortex primaire dans la partie supérieure isole la partie inférieure de la rue. Plus le prospect de la rue augmente, plus son confinement devient important.

Ainsi, pour des vents incidents perpendiculaires, un ou plusieurs vortex sont observés et/ou modélisés dans la rue canyon selon la valeur du prospect H/W. Lorsque le prospect de la rue est inférieur à 2, un vortex unique est généré dans le canyon tandis qu'une structure à vortex multiple se développe pour des profils de rues plus larges, supérieurs à 2. L'effet net semble indiquer que lorsque le prospect H/W augmente, le canyon devient de plus en plus isolé de l'air au-dessus en termes d'échange aéraulique et de ventilation.

Pour conclure de l'effet du prospect H/W sur la variation des écoulements d'air dans la rue canyon, on peut suggérer que dans le cas de vents perpendiculaires à l'axe de la rue, la valeur du prospect H/W définit le système de vortex dans la rue et en conséquence, la manière avec laquelle cette rue est ventilée. Tandis que les canyons avec un large prospect ($H/W = 1$ à 1.5) se caractérisent par un vortex unique, en contact direct avec l'air libre au-dessus du toit, dans les canyons plus étroits ($H/W > 2$), une structure d'écoulement à vortex multiples s'installe. Les vortex secondaires en présence dans les parties les plus profondes du canyon ne sont pas liés à l'écoulement libre au-dessus de la canopée urbaine et la rue, confinée, présente de ce fait des propriétés de ventilation très faibles. Dans ce cas, il peut être suggéré que des effets thermiques peuvent être pris en compte puisqu'ils sont dominants à des vitesses de vent faibles (voir section III- 4.4.)

Des doutes subsistent par ailleurs sur la transition entre les trois régimes d'écoulement décrits par Oke (1988), ce qui laisse supposer que la géométrie seule de la rue canyon H/W ne suffit pas à décrire l'écoulement dans la rue.

III- 3.1.2. Cas d'un vent parallèle à l'axe de la rue.

Les caractéristiques de l'écoulement de l'air dans un canyon urbain avec un écoulement parallèle à l'axe de la rue ont été peu étudiées. Comme dans le cas des vents perpendiculaires, l'écoulement de l'air dans la rue canyon est considéré comme une circulation secondaire générée par l'écoulement imposé au dessus du toit, (Nakamura et Oke 1988). Si la vitesse du vent à l'extérieur est au dessous d'une certaine valeur seuil, le couplage entre les écoulements supérieur et secondaire est perdu (Nakamura et Oke 1988) et la relation entre vitesses de vent au dessus des toits et dans le canyon se caractérise par une dispersion considérable. Pour les vitesses de vent les plus élevées, les principales conclusions résultant des études existantes sont les suivantes :

III- 3.1.2.1. La relation entre la direction du vent libre, U , et la direction le long du canyon, v .

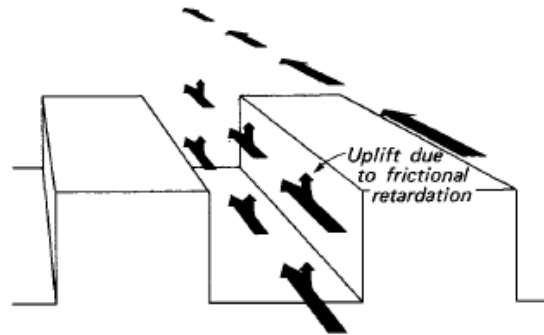


Fig. III- 11. Représentation schématique de l'écoulement dans le canyon avec un vent incident de direction parallèle à l'axe de la rue (Nunez et Oke 1977).

L'écoulement ambiant parallèle génère un vent moyen le long de l'axe du canyon (Nunez et Oke 1977, Nakamura et Oke 1988) (voir Fig. III- 11). Des mesures effectuées dans un canyon profond ($H/W = 2.5$) à Athènes (Santamouris et al. 1999) montrent également l'existence d'un écoulement le long du canyon dans la même direction que le vent incident au-dessus du toit. Cet écoulement est caractérisé par une direction presque toujours parallèle à l'axe du canyon avec un angle d'incidence descendant relatif au niveau du sol compris entre 0 et 30°. Des observations similaires sont rapportées par Dobre et al. (2005) dans une étude de terrain à Londres.

III- 3.1.2.2. La relation entre la vitesse du vent libre, U , et la vitesse le long du canyon, v .

Pearlmuter et al. (2007) soulignent que la réduction de vent la plus faible dans la rue canyon est observée pour des vents incidents parallèles. Assimakopoulos et al. (2006) indiquent que dans le cas d'un vent incident parallèle, l'écoulement dans la rue canyon est étiré, accéléré entre les bâtiments et ne présente aucune structure en vortex. Les échanges verticaux sont de ce fait presque nuls et la ventilation de la rue est assurée principalement par phénomène d'advection, c'est à dire dans le plan horizontal. Les observations de terrain par Dobre et al. (2005) indiquent en outre que l'effet de canalisation dépend linéairement de la composante du vent incident parallèle à la rue. Lorsque la composante du vecteur vent incident parallèle à la rue disparaît (c'est à dire dans le cas de vent perpendiculaire à la rue), la canalisation le long de la rue cesse.

Les études sur la relation entre la vitesse du vent ambiant (U) et celle de l'écoulement horizontal le long de canyon (v) en rapport avec la géométrie urbaine sont très rares. Yamartino et Wiegand (1986) rapportent que la composante longitudinale du vent dans le canyon, v , est directement proportionnelle à la composante le long du canyon au dessus du toit et ce, conformément à la relation suivante : $v = U \cdot \cos\theta$, où θ est l'angle d'incidence et U la vitesse horizontale du vent à l'extérieur du canyon.

L'étude expérimentale de Pearlmuter et al. (1999), menée dans un canyon symétrique de prospect $H/W = 1$, aboutit à une valeur de facteur de réduction p très voisine de celle de Nakamura et Oke (1988), de l'ordre de 0.66, avec des mesures d'écoulement prises à 0.5 H et 2 H à partir du niveau du sol. Les auteurs montrent que lorsque le vent est dirigé le long de la longueur de la rue, le facteur de réduction p diminue avec la hauteur, ce qui, en d'autres termes, signifie que les vitesses de vent sont plus élevées au niveau bas de la rue. Sur la base de ces résultats,

Pearlmuter et al. (1999) concluent que l'écoulement de l'air serait plus fort dans un canyon profond que dans une rue plus large. Les données collectées dans une série de rues à échelle réduite par les mêmes auteurs (Pearlmuter et al. 2007) (Fig. III- 12) contredisent néanmoins cette hypothèse. La variation du niveau de réduction en fonction de la géométrie H/W de la rue canyon révèle en effet que lorsque l'écoulement est proche de la parallèle, le facteur de réduction diminue progressivement passant de 0.5 pour la section de rue la plus large ($H/W=0.33$) à 0.35 pour la section la plus étroite ($H/W=2.0$). L'écoulement parallèle à l'axe de la rue serait donc plus important dans une rue large que dans un canyon plus profond.

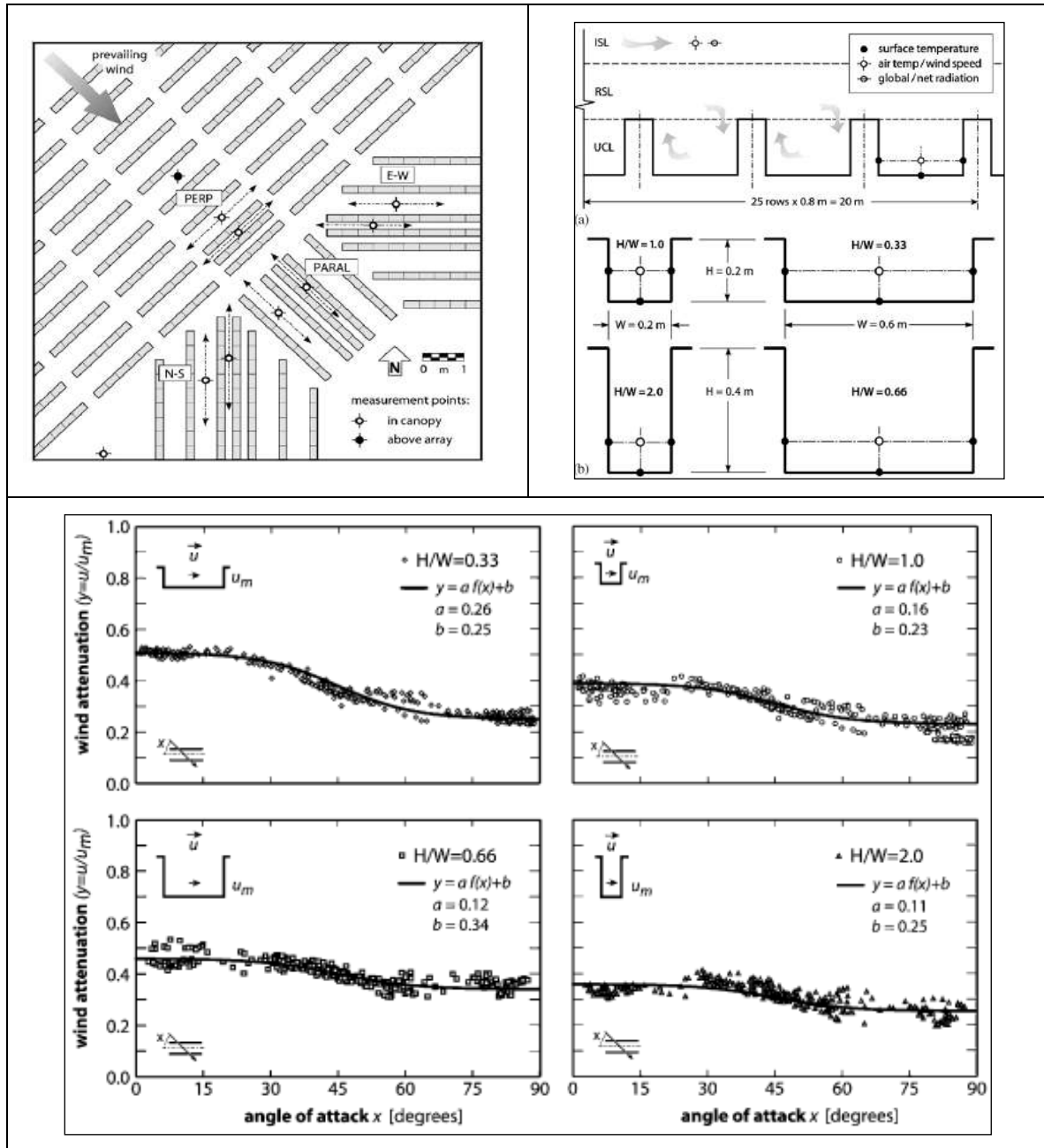


Fig. III- 12. Variation du niveau de réduction de l'écoulement d'air en fonction de la géométrie H/W de la rue canyon : la figure montre que pour chaque prospect de rue canyon ($H/W = 0.33 - 2.0$), une relation claire existe entre la réduction de la vitesse du vent et l'angle d'incidence (Pearlmuter et al. 2007).

Les modélisations et observations de la variation de la vitesse en fonction de la hauteur dans des rues profondes de prospect de 2.5, 3 et 3.5 par Santamouris et al. (1999), Assimakopoulos et al. (2006) et Georgakis et Santamouris (2006) sont également contraires aux résultats de Pearlmutter et al. (1999). Les auteurs indiquent une augmentation de la vitesse moyenne en fonction de la hauteur, l'écoulement variant entre 1.2 et 2 m/s pour des vitesses de vent libre de 4 à 5 m/s (Fig. III- 13).

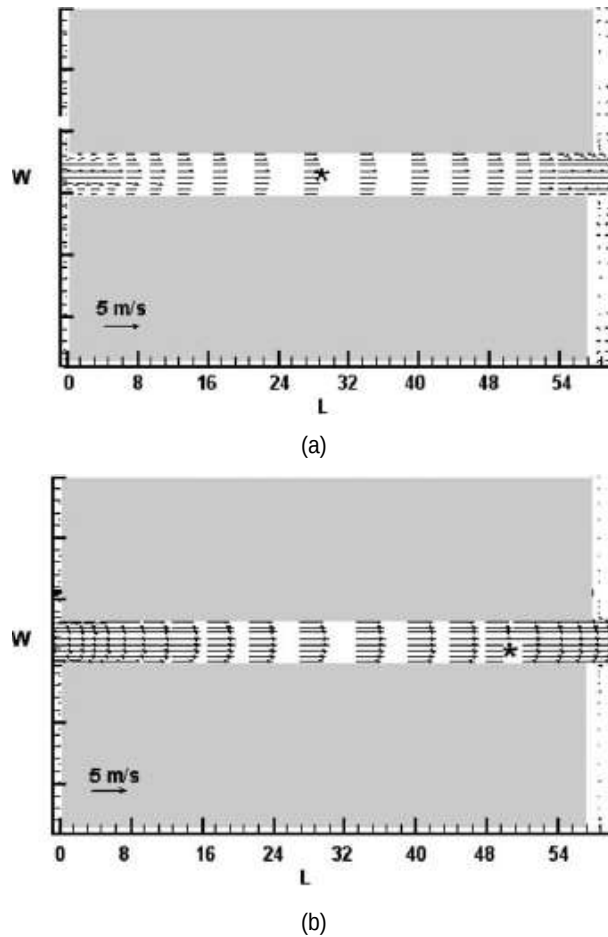


Fig. III- 13. Variation de la vitesse d'air en fonction de la hauteur dans une rue profonde : Vue en plan du champ d'écoulement modélisé établi à des hauteurs respectives de (a) 3.5 m et (b) 20 m, pour un vent de référence de 5 m/s. Prospect $H/W = 23/8 = 2.87$. Les vecteurs vents au niveau le plus haut de la rue (20 m) sont plus élevés que ceux du niveau bas ($H=3.5$ m). (Assimakopoulos et al. 2006)

Ainsi, lorsque le vent ambiant est parallèle à l'axe de la rue, la vitesse verticale dans le canyon est très faible, et la ventilation est essentiellement gouvernée par la composante horizontale le long du canyon. Cette dernière dépend linéairement de la composante du vent incident parallèle à la rue. L'effet de la géométrie urbaine H/W semble agir sur l'intensité de l'écoulement. L'écoulement parallèle à l'axe de la rue serait plus important dans une rue large que dans un canyon plus profond. Cet aspect nécessite néanmoins d'être validé par des études de terrain et de modélisations numériques.

III- 3.1.3. Cas d'un vent oblique à l'axe de la rue.

Les recherches sur l'écoulement de l'air dans une rue canyon lorsque le vent au-dessus du toit est oblique demeurent relativement réduites comparées à l'information scientifique existante sur les écoulements perpendiculaires. Même pour une géométrie de canyon simplifiée, les connaissances sur ce sujet demeurent insuffisantes (Dobre et al. 2005) et les principaux résultats tirés des recherches existantes concluent que lorsque l'écoulement au-dessus du toit est à un certain angle d'incidence par rapport à l'axe du canyon, un tourbillon hélicoïdal est induit le long du canyon (effet tire-bouchon).

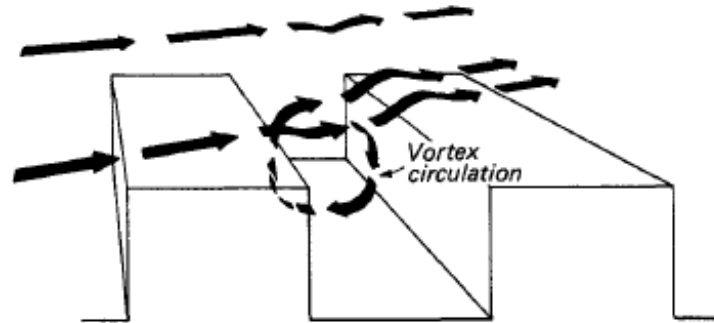


Fig. III- 14. Représentation schématique de l'écoulement dans le canyon avec un vent incident de direction oblique à l'axe de la rue (Nunez et Oke 1977).

À partir de mesures effectuées dans une rue canyon à Kyoto ($H/W=1$), Nakamura et Oke (1988) suggèrent que pour des vents incidents obliques, les écoulements dans la rue résultent d'un vortex en spirale le long de la rue canyon (Fig. III-14). Ces mêmes auteurs proposent en première approximation que l'angle d'incidence sur le mur face au vent (c'est-à-dire la valeur au-dessus du toit) est le même que l'angle de réflexion du mur qui forme l'écoulement réfléchi sous forme hélicoïdale, au voisinage du sol (Fig. III-15). Toutefois, ces auteurs trouvent l'angle d'incidence (au-dessus du toit) plus grand que celui réfléchi (au voisinage du sol).

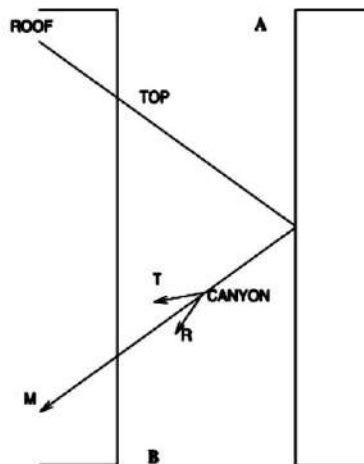


Fig. III- 15. Conceptualisation de l'écoulement réfléchi à partir du mur face au vent (Johnson et Hunter 1999).

Dans une étude de terrain à échelle réduite, Johnson et Hunter (1999) constatent que dans le cas d'écoulements incidents non perpendiculaires, les vents mesurés ne constituent pas l'image d'une réflexion parfaite (symétrique et inversée) telle que suggérée par Nakamura et Oke (1988) mais apparaissent plutôt comme la combinaison d'une re-circulation de vortex au niveau du toit et d'une canalisation le long de la rue. Les auteurs suggèrent que la composante le long du canyon est initiée par des différences de pression au niveau des angles de la rue et il est supposé que des conditions relativement stables soient nécessaires pour que cet effet soit bien établi. Ils suggèrent en outre que la composante le long du canyon doit être prise en considération dans la description de n'importe quel écoulement puisqu'elle modifie l'image simplifiée en 2D de la circulation de vortex dans la rue canyon.

L'étude de terrain menée par Santamouris et al. (1999) dans une rue canyon de prospect de 2.5 montre également le développement d'un modèle d'écoulement en spirale dans le canyon lorsque les vents incidents sont à un angle oblique par rapport à l'axe de la rue. Les auteurs révèlent qu'une augmentation de la vitesse du vent ambiant correspond presque toujours à une augmentation de la vitesse du vent le long du canyon. Les expériences conduites en soufflerie atmosphérique par Dabberdt et al. (1973) et Wedding et al. (1977) (cités par Santamouris et al. 1999) et par simulation numérique de Lee et al. (1994) (cité par Santamouris et al. 1999) montrent également l'existence d'un écoulement hélicoïdal dans le canyon.

Selon l'étude de terrain de Yamartino et Wiegand (1986), pour des angles d'incidence obliques à l'angle du canyon, l'écoulement dans la rue est le produit des composantes transversale et parallèle du vent ambiant. La première composante entraîne le vortex du canyon et la deuxième détermine l'étirement du vortex. Des résultats similaires sont rapportés par Soulhac (2000) (cité par Vachon 2001) à partir des mesures effectuées en soufflerie atmosphérique et par simulations numériques.

Dobre et al. (2005) étudient les caractéristiques des écoulements dans une rue de géométrie non uniforme, au voisinage d'une intersection, au centre de Londres (projet DAPPLE). L'analyse de la direction du vent horizontal suggère que l'écoulement dans la rue canyon peut être décrit comme la superposition d'une canalisation le long de la rue et d'une re-circulation à travers la section de la rue (Fig. III-16). Les auteurs indiquent que dans le cas d'une direction oblique du vent au-dessus du toit, les écoulements dans la rue peuvent être expliqués par une superposition linéaire des composantes parallèle et perpendiculaire du vent au-dessus du toit.

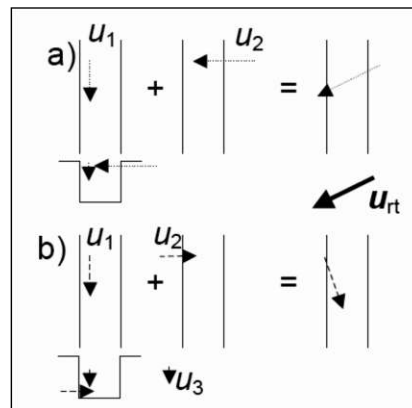


Fig. III- 16. Représentation schématique d'un modèle simplifié de l'écoulement dans les rues urbaines au voisinage des angles des bâtiments. a) au voisinage du niveau du toit; b) au voisinage du sol du canyon. U_{rt} représente la vitesse de référence au-dessus du toit. (Dobre et al. 2005).

La canalisation le long de la rue dépend linéairement de la composante du vent au-dessus du toit parallèle à la rue tandis que le vortex de re-circulation à travers la rue dépend de la composante du vent au-dessus du toit perpendiculaire à la rue. La direction de l'écoulement au voisinage du sol est imposée par la composante perpendiculaire et est directement opposée à la direction du vent à l'extérieur du canyon. Il est montré par ailleurs que la combinaison de ces deux effets peut donner une interprétation physique plausible des caractéristiques principales à grande échelle dans les rues canyons. Elle explique la relation entre les directions du vent dans et au-dessus des rues, comme il a déjà été noté par Nakamura et Oke (1988).

L'analyse par Eliasson et al. (2006) des champs de vent moyen dans une rue canyon ($H/W = 2.1$) révèle également l'existence d'une hélice elliptique en rotation lorsque le vent ambiant est à plus de 30° de la parallèle. Conformément à Nakamura et Oke (1988) et Hunter et Johnson (1999), une réflexion du vecteur vent est observée au niveau les plus bas de la rue pour certaines directions du vent ambiant.

L'aspect le plus important qui ressort de toutes ces études est le caractère tridimensionnel de l'écoulement dans la rue canyon pour des vents incidents obliques. Cette structure tridimensionnelle de l'écoulement, grâce à ses composantes transversale et horizontale, assure une meilleure ventilation dans les rues en comparaison avec les incidences perpendiculaires et parallèles. La composante transversale entraîne le vortex du canyon et une circulation verticale de l'air, induisant des interactions avec la couche au-dessus tandis que la composante parallèle détermine l'étirement du vortex le long du canyon et permet un effet advectif dans la rue. La ventilation de la rue est de ce fait assurée à la fois par échange d'air vertical et advection le long du canyon.

En résumé, l'incidence oblique, de part sa structure tridimensionnelle et des effets de canalisation induits, améliore le potentiel de ventilation urbaine en comparaison avec les incidences perpendiculaire et parallèle. La ventilation est assurée dans ce cas à la fois par phénomène d'advection le long de la rue et par échange vertical avec l'écoulement libre au-dessus du toit. Les études existantes ne permettent cependant pas de déterminer l'effet de la géométrie urbaine H/W sur l'intensité de ces écoulements.

Pour conclure de l'effet du prospect H/W sur la variation des écoulements d'air dans la rue canyon, et par conséquent, sur la ventilation urbaine, on peut suggérer que :

- dans le cas de vents perpendiculaires à l'axe de la rue, la valeur du prospect H/W définit le système de vortex dans la rue et en conséquence, la manière avec laquelle cette rue est ventilée. Le nombre de vortex augmente avec le prospect, ce qui réduit fortement les échanges d'air entre l'intérieur de la rue et l'extérieur, au-dessus de la canopée urbaine. Les rues de prospect H/W supérieur ou égal à 2 présentent des propriétés de ventilation très faibles,
- dans le cas de vents parallèles à l'axe de la rue, la valeur du prospect H/W semble définir l'intensité de l'écoulement le long de la rue. Les effets de canalisation sont plus importants dans les rues les moins profondes. La ventilation de la rue est assurée par déplacement de l'air horizontal, les échanges d'air verticaux étant presque nuls,
- dans le cas de vents obliques à l'axe de la rue, l'effet du prospect H/W n'est pas clairement défini. En revanche, le caractère tridimensionnel de l'écoulement favorise la ventilation de la rue. Cette ventilation est assurée par échanges d'air verticaux et déplacements d'air horizontaux, ce qui permet un meilleur brassage de l'air en comparaison avec des transferts aérauliques exclusivement verticaux ou horizontaux.

III- 3.2. Effet de la longueur L de la rue canyon.

Dans la description de l'écoulement à l'échelle de la rue canyon, la prise en compte seule du prospect H/W ne permet pas de rendre compte des mécanismes intervenant dans les différents régimes d'écoulements d'air. Le rapport L/H constitue un facteur géométrique important qui doit être intégré dans n'importe quelle description de l'écoulement dans la rue canyon. Ce facteur agit sur la composante horizontale de l'écoulement et peut améliorer de ce fait la ventilation de la rue.

La plupart des études entreprises sur l'écoulement de l'air dans une rue canyon se sont intéressées essentiellement à la structure verticale de l'écoulement dans la rue, la structure de l'écoulement horizontale étant négligée (Johnson et Hunter 1999, Brown et al. 2006). Ces études suggèrent que les caractéristiques-clés des écoulements du vent dans une rue peuvent être déterminées uniquement à partir de la géométrie relative du canyon, en particulier celle de son prospect H/W et dans une moindre mesure, celle du rapport L/H. Elles supposent en outre qu'au milieu de la rue, l'écoulement serait essentiellement bidimensionnel et très peu influencé par l'écoulement horizontal induit par les effets de coin. Pourtant, des études récentes, sur site (Dobre et al. 2005, Georgakis et Santamouris 2006, Pol et Brown 2008), de modélisation numérique et d'expériences en soufflerie atmosphérique (Kastner-Klein et al. 2004, Assimakopoulos et al. 2006, Soulhac et al. 2009, Carpentieri et al. 2009, Balogun et al. 2010) suggèrent que les intersections de rue jouent un rôle important dans les modèles d'écoulement d'air dans la rue canyon et qu'ils devraient être inclus dans n'importe quelle étude de circulation de l'air en milieu urbain. Ces recherches indiquent que la séparation de l'écoulement dans les angles amont des rues latérales peut conduire à la formation de zones de recirculation horizontale ou des tourbillons d'angles à l'entrée de la rue. Ces tourbillons horizontaux pénètrent dans les rues latérales, interagissent avec le tourbillon vertical à l'intérieur du canyon et modifient le modèle d'écoulement qui se transforme en un écoulement tridimensionnel complexe (Soulhac et al. 2009, Carpentieri et al. 2009, Balogun et al. 2010).

Les mouvements d'angles sont observés pour la première fois par Hoydysh et al. (1974, rapporté par Pol et Brown 2008) dans une expérimentation en soufflerie atmosphérique. Les auteurs révèlent l'existence de sillages horizontaux à la fin de la rue, à proximité des intersections (Fig. III-17). Ces tourbillons "d'angles" s'étendent en spirale tout le long de la rue en interagissant avec le tourbillon vertical à l'intérieur de la rue canyon, améliorant de ce fait la ventilation de la rue. L'effet de cette ventilation s'estompe avec l'augmentation de la longueur des rues.

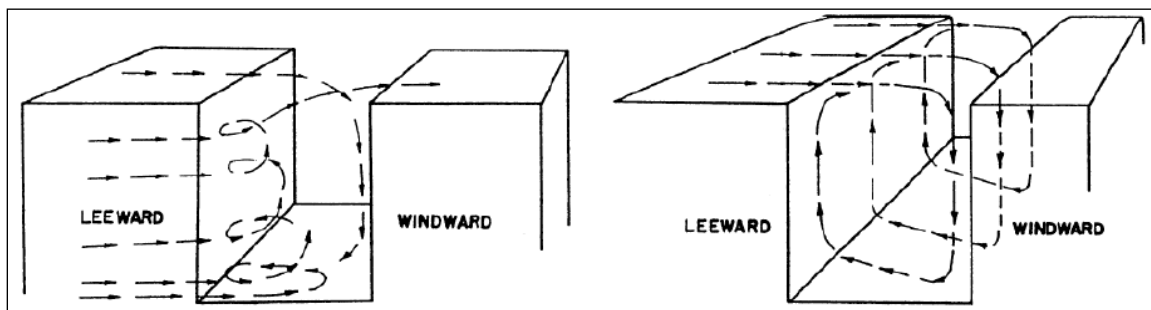


Fig. III- 17. Les modèles de re-circulation dans les rues canyons pour une direction de vent incident perpendiculaire : a) Interaction en 3D des vortex d'angles et de cavité au voisinage des arrêtes d'une rue canyon courte. b) re-circulation dans une rue canyon en 2D (Theurer, 1999, à partir de Hoydysh et al. 1974).

Yamartino et Wiegand (1986) indiquent par ailleurs que lorsque $L/W = 20$, les effets de coin commencent à dominer le vortex. Hoydysh et Dabberdt (1988) observent quant à eux des mécanismes d'advection se développant à partir des angles des bâtiments jusqu'au milieu du

bloc, créant une zone de convergence au milieu du canyon. Des phénomènes similaires sont rapportés par Santamouris et al. (1999) dans une rue canyon de prospect H/W de 2.5.

En se basant sur une étude de terrain dans une rue canyon de prospect H/W égal à 0.7 et de rapport L/H=6.5, une expérience de visualisation de l'écoulement est réalisée par Louka et al. (2000) lorsque le vent est perpendiculaire à la rue. Cette étude montre que des vortex, avec des axes alignés verticalement, sont générés aux angles de la rue. Ces vortex pénètrent le long de la rue à une distance comparable à la largeur du canyon. Des écoulements tridimensionnels se forment ainsi aux entrées de la rue canyon et leur amplitude définit la transition à partir de laquelle l'écoulement de sillage interférent se transforme en un écoulement rasant (Hunter et al. 1992). Kastner-Klein et al. (2004) mesurent directement ces mouvements tourbillonnaires d'angles dans une expérimentation en soufflerie dans une rue canyon de prospect H/W = 1 et de rapport L/H égal à 5. Les auteurs révèlent que lorsque la longueur du canyon augmente (L/H = 10), le tourbillon d'angle disparaît (Fig. III- 18).

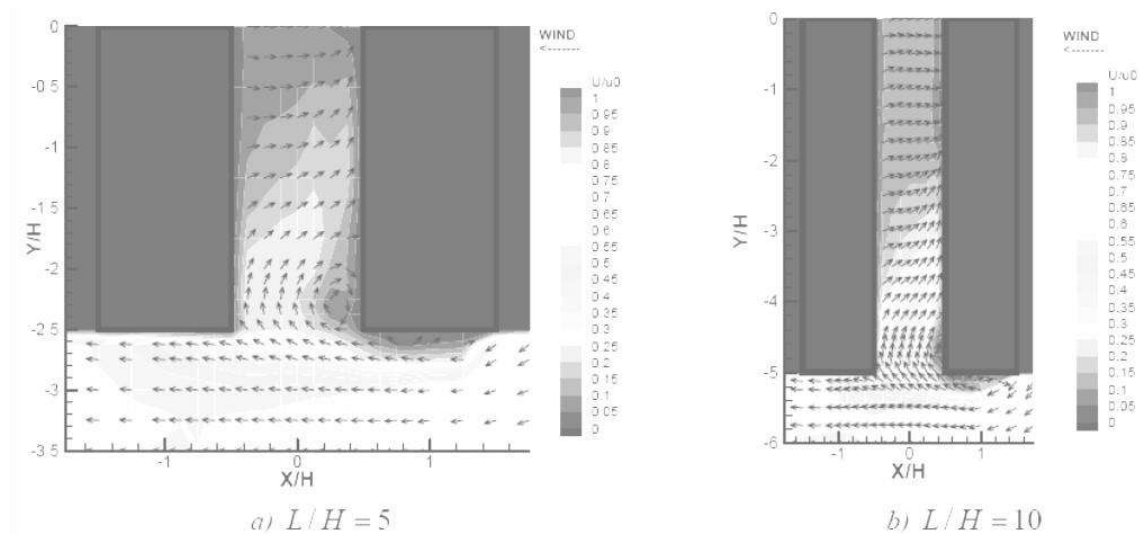


Fig. III- 18. Influence du rapport L/H sur le champ d'écoulement dans une configuration de rue canyon en 3D. Les modèles d'écoulement démontrent que des changements dus à la longueur finie des bâtiments peuvent être observés aux arrêtes latérales de la rue canyon et au niveau du toit du bâtiment. (Kastner-Klein et al. 2004, TRAPOS).

De même, les études de visualisation de Robins et al. (2004) montrent clairement l'existence d'un écoulement tridimensionnel complexe aux intersections de rues "courtes" dans le centre de Londres. Assimakopoulos et al. (2006) modélisent ces phénomènes aux intersections d'une rue de prospect H/W = 3.3 et de rapport L/H n'excédant pas 11. Les vortex d'angles formés s'étendent à travers la rue en couvrant l'aire totale de la section. En se déplaçant le long de la longueur du canyon, les vortex s'affaiblissent et un modèle d'écoulement de faible intensité et de direction uniforme s'installe.

Dans une rue canyon de prospect H/W=3 et de rapport L/H = 1.74, Georgakis et Santamouris (2006) constatent qu'en l'absence de couplage entre le vent non perturbé à l'extérieur du canyon et l'écoulement à l'intérieur de la rue (vitesse du vent ambiant inférieure à 5m/s), la ventilation de la rue est essentiellement gouvernée par les vortex intermittents créés aux angles des rues. Ces résultats indiquent combien il est important de considérer les effets d'angle dans les études de ventilation urbaine.

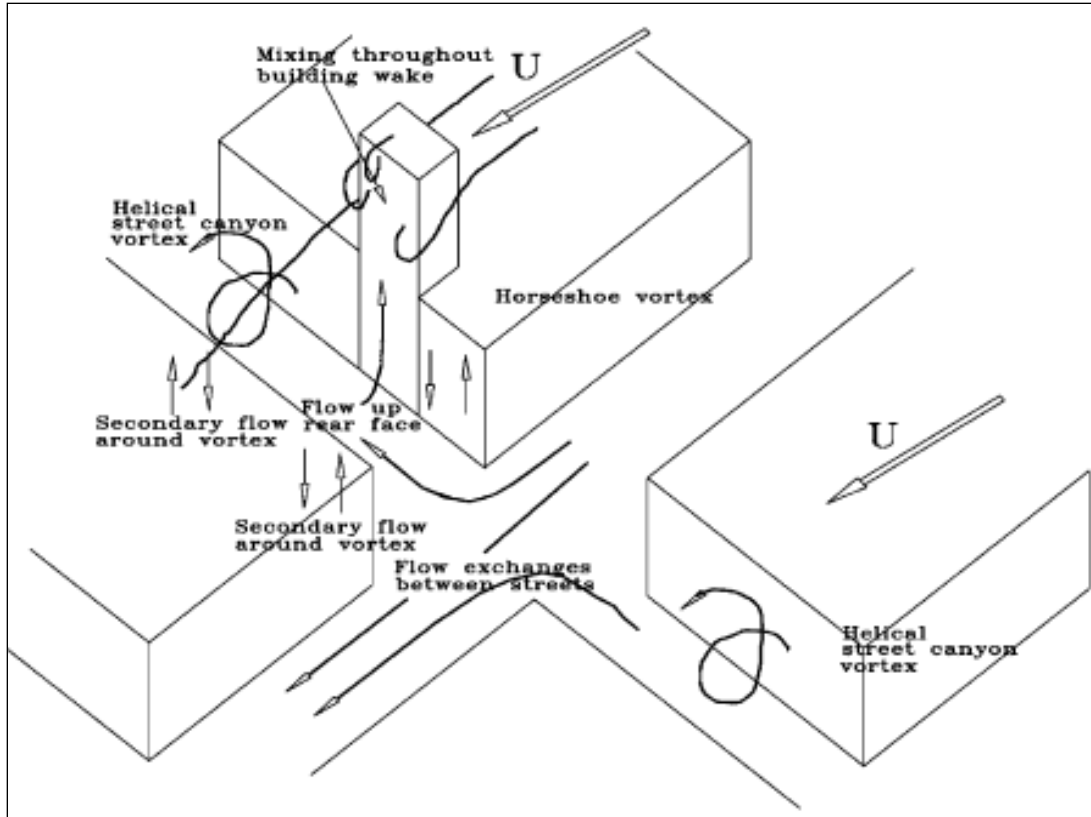
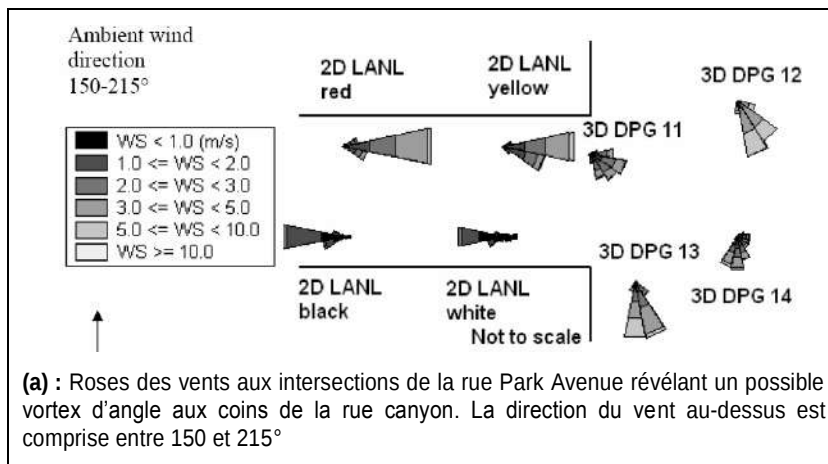


Fig. III- 19. Le champ d'écoulement à l'intersection d'une rue (Ahmad et al. 2005).

Les tourbillons de coins "horizontaux" sont également identifiés dans l'étude de terrain de Brown et al. (2004) et Pol et Brown (2008) dans une rue canyon à Oklahoma City (Fig. III-20). Pol et Brown (2008) révèlent en outre qu'en fonction de la direction des vents au-dessus du toit, l'écoulement horizontal observé peut être soit tourbillonnaire, soit unidirectionnel. L'extension verticale du phénomène peut occuper la profondeur totale du canyon tandis que l'extension horizontale du tourbillon diffère à chaque angle de la rue en raison des caractéristiques morphologiques différentes des angles de la rue.



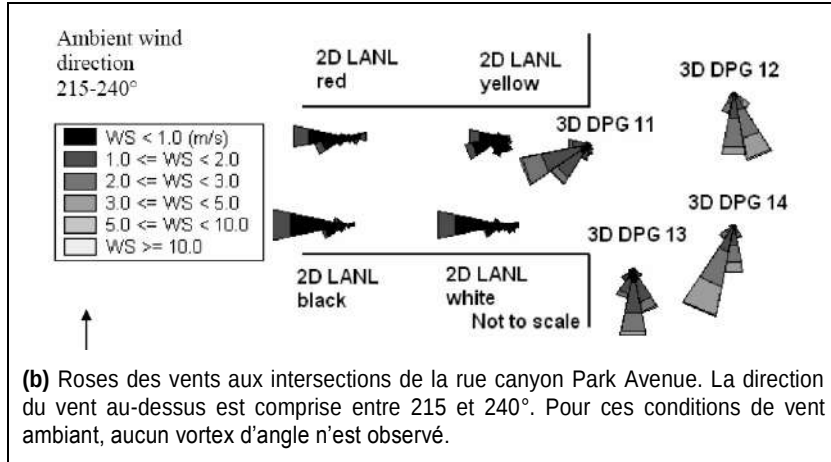


Fig. III- 20. Vortex d'angles au niveau des intersections de rue. Sur la Fig. (a), il peut être observé que la direction de l'écoulement sur la façade nord de la rue est opposée à celle du côté Sud et son intensité également plus importante. Ces observations indiquent la présence possible d'un vortex horizontal à rotation dans le sens contraire des aiguilles d'une montre à l'extrémité Est de la rue. Sur la Fig. (b) en revanche, un écoulement unidirectionnel en provenance de l'Ouest est observé à l'extrémité Est de la rue, dans le même sens que le vent incident. Ces résultats ne révèlent aucun vortex d'angle. Pol et Brown (2008).

Enfin, Soulhac et al. (2009) et Carpentieri et al. (2009) rapportent à partir de leurs expériences en soufflerie que différents effets peuvent influencer le champ de vitesse dans les intersections de rue. Ils suggèrent que la séparation de l'écoulement aux angles amont des rues adjacentes peut conduire à la formation de zones de recirculation horizontale ou des vortex d'angles qui pénètrent dans les rues adjacentes à une distance de l'ordre de la largeur de la rue canyon. Ces résultats concordent avec les observations de terrain de Balogun et al. (2010) qui relèvent la présence d'un écoulement tridimensionnel complexe au niveau d'une intersection de rues courtes dans le centre de Londres. Les résultats suggèrent que l'écoulement serait la combinaison d'une interaction entre une canalisation, une bifurcation, une recirculation hélicoïdale ainsi que des vortex d'angles.

En résumé, les effets de coins et l'intersection des rues affectent les modèles de distribution de l'écoulement dans les rues canyons, et interviennent par conséquent dans la ventilation de ces rues. Ils sont fonction de la géométrie de la rue L/H et induisent un processus d'écoulement horizontal qui modifie le modèle d'écoulement en termes de nature (re-circulation de vortex ou effet de canalisation), direction et intensité. La réduction du rapport L/H rend le modèle d'écoulement essentiellement tridimensionnel. La longueur de la canopée (L) gouverne le degré d'interaction des vortex d'angles et de cavité au voisinage des arrêtes de la rue canyon. Jusqu'à une certaine valeur seuil de rapport L/H, des vortex horizontaux sont générés aux intersections de la rue et interagissent avec le vortex principal dans la rue canyon. Ces processus tourbillonnaires permettent un meilleur mixage de l'air et peuvent améliorer de ce fait la ventilation de la rue.

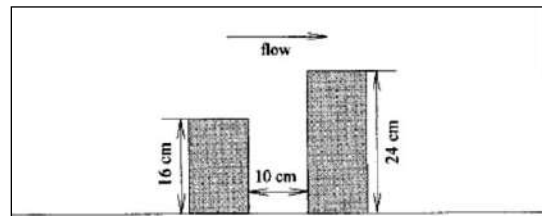
En plus des facteurs géométriques principaux tels le prospect H/W et le rapport L/H, d'autres paramètres liés à la morphologie urbaine et l'architecture de la rue semblent intervenir également dans les mécanismes de ventilation dans la rue canyon, ce sont : le profil de la rue (symétrique ou asymétrique), la forme de la toiture et la surface urbaine en amont de la rue canyon considérée.

III- 3.3. Effets des irrégularités architecturales et de la surface urbaine.

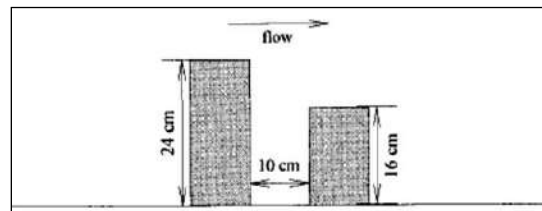
III- 3.3.1. Effet du profil de rue asymétrique.

La plupart des études entreprises sur l'écoulement de l'air dans la rue canyon considèrent une géométrie de rue symétrique, caractérisée par des hauteurs de bâtiments identiques. Dans ces conditions, et pour des vents incidents perpendiculaires, un ou plusieurs vortex sont observés et/ou modélisés dans la rue selon la valeur du prospect H/W . Lorsque le prospect de la rue est inférieur à 2, un vortex unique est généré dans le canyon tandis qu'une structure à vortex multiple se développe pour des profils de rues plus larges, supérieurs à 2. Ces résultats, valables pour des géométries de rues idéalisées, ne tiennent pas compte de l'influence des profils de rue asymétriques, pourtant fort communs en milieu urbain.

En fait, l'effet d'une configuration de rue asymétrique est non négligeable. Il est tout aussi important que celui du prospect H/W puisqu'il modifie le système de vortex dans la rue (Savory et al. 2004). Theurer et al. (1992) démontrent que les différences dans la hauteur des bâtiments peuvent changer de manière significative le champ d'écoulement dans la rue canyon. Assimakopoulos et al. (2003) examinent ces effets dans une étude de simulation numérique et indiquent que dans le cas d'une rue asymétrique "ascendante" (avec le bâtiment en amont plus bas que le bâtiment en aval), un vortex unique s'établit dans la rue canyon avec des propriétés de ventilation plus importantes que celles d'une rue symétrique. En revanche, dans le cas d'une configuration de rue "descendante" (avec le bâtiment face au vent plus haut que le bâtiment sous le vent), un système de double vortex apparaît avec un premier vortex couvrant la partie supérieure de la rue et un vortex secondaire généré à l'intérieur de la rue.



(a). Configuration de rue asymétrique "ascendante"



(b). Configuration de rue asymétrique "descendante".

Fig. III- 21. Deux modèles de rue de configuration asymétrique utilisés dans l'étude de modélisation numérique par Baik et al. (Baik et al. 2000).

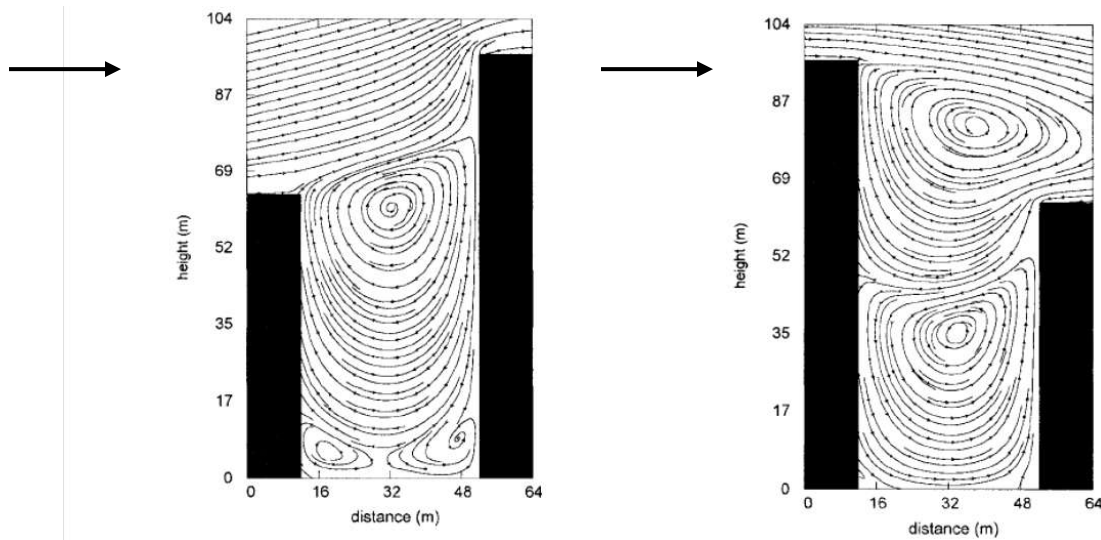


Fig. III- 22. Le champ de vecteurs de vitesse de vent modélisé dans le cas d'un bâtiment asymétrique. a) bâtiment en aval supérieur au bâtiment en amont. b) bâtiment en aval inférieur au bâtiment en amont (Baik et al. 2000).

Ces observations concordent avec les simulations en 2D de Baik et al. (2000) qui notent la présence de deux vortex contrarotatifs dans une rue canyon lorsque le bâtiment en amont est plus haut que celui situé en aval de la rue (Fig. III- 22). Le vortex supérieur ressemble dans une certaine mesure à un écoulement de rugosité isolé tandis que le vortex inférieur, de faible intensité, se caractérise par une sorte de stagnation. La formation d'un double vortex contrarotatif est également modélisée par Huang et al. (2002) dans le cas d'un canyon asymétrique descendant. Cette structure complexe à double vortex a pour effet de réduire les échanges d'air locaux avec l'écoulement libre au-dessus du toit et la ventilation de la rue est de ce fait inhibée.

Les simulations en 2D effectuées par Bady et al. (2006) révèlent par ailleurs que la variation de la hauteur du bâtiment face au vent affecte les caractéristiques de la circulation du vortex dans la rue canyon. L'augmentation de la hauteur h du bâtiment face au vent réduit la circulation de l'écoulement dans la rue canyon et la vitesse du vent moyenne est plus intense dans une rue de profil asymétrique ascendant que dans une rue de même hauteur de bâtiments. Ces conclusions confirment celles de Dabberdt et Hoydysh (1991) qui démontrent dans une étude conduite en soufflerie atmosphérique que dans une rue canyon de profil asymétrique ascendant, l'intensité du vortex est plus importante que celle d'un canyon symétrique. Ces quelques études, entreprises en laboratoire et par modélisation numérique en 2D, témoignent de l'importance du profil de la rue urbaine dans la ventilation de la rue canyon. Selon que le bâtiment face au vent soit plus bas ou plus haut que le bâtiment sous le vent, la structure de l'écoulement est modifiée et la ventilation urbaine renforcée ou au contraire inhibée. Il faut néanmoins noter que dans ces recherches, la hauteur des bâtiments d'une même paroi de rue est supposée être uniforme alors que dans la réalité, les bâtiments d'une même façade de rue présentent généralement des hauteurs différentes. Les modèles d'écoulement d'air doivent être par conséquent différents de ceux observés dans des rues canyons uniformes. Une étude récente menée en 3D dans des canyons non uniformes avec différentes combinaisons de configurations ascendante et descendante (Gu et al. 2011) montre en effet des structures d'écoulement beaucoup plus complexes que celles observées dans les modèles de rues uniformes (hauteur uniforme par paroi). Les échanges d'air entre l'intérieur de la rue et au-dessus de la canopée urbaine sont également beaucoup plus importants. Ces résultats révèlent l'importance de l'effet des hauteurs de bâtiments non uniformes

sur la structure des écoulements d'air et la ventilation en milieu urbain. D'autres recherches sont cependant nécessaires pour une meilleure compréhension de ces effets.

III- 3.3.2. Effet de la forme de la toiture.

Les études citées ci-dessus soulignent toutes l'influence de la géométrie du canyon dans la ventilation de la rue. La géométrie de la toiture semble également avoir une forte influence sur la dynamique des vortex, et donc sur les mécanismes de ventilation. Cette conclusion est soutenue par les travaux de Rafailidis (1997), Kastner-Klein et Plate (1999) et Kastner-Klein et al. (2004). Rafailidis (1997) utilise des bâtiments avec des toitures inclinées et observe une influence substantielle sur les caractéristiques de turbulence dans et au-dessus de la rue canyon.

Dans l'étude en soufflerie atmosphérique par Kastner-Klein et Plate (1999), différentes combinaisons de forme de toiture des bâtiments face au vent et sous le vent d'une rue canyon sont examinées (Fig. III- 23) et les résultats indiquent la forte influence de la forme inclinée de la toiture sur la ventilation de la rue.

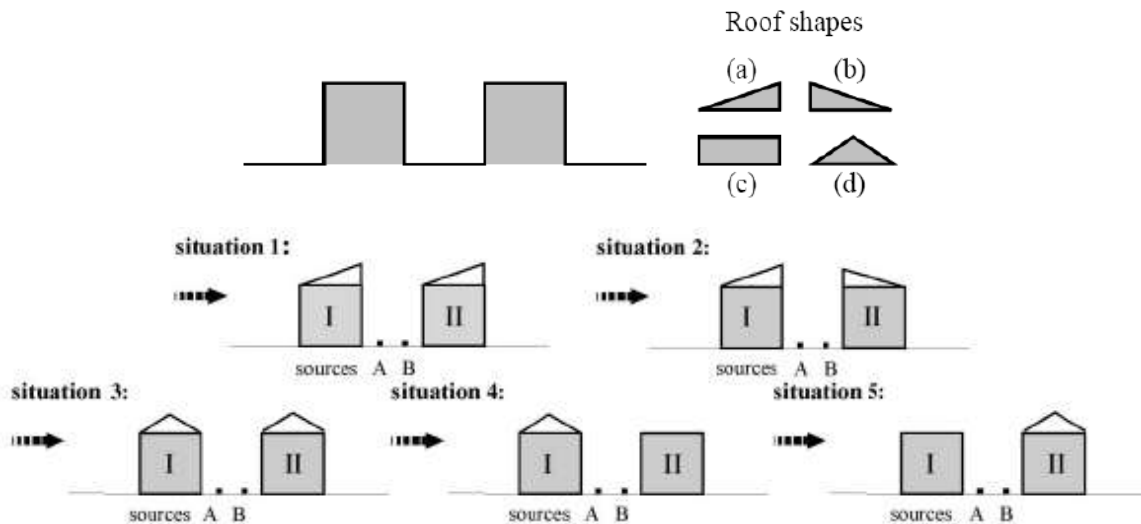


Fig. III- 23. Configuration de différentes combinaisons de forme de toiture (Kastner-Klein et Plate 1999).

L'étude révèle que seule la toiture inclinée du bâtiment face au vent (configuration descendante) altère l'écoulement de manière significative. Elle provoque une séparation de l'écoulement au niveau haut de la rue qui induit une forte réduction de l'échange vertical entre l'intérieur de la rue canyon et l'écoulement au-dessus de la canopée urbaine. En conséquence, l'écoulement devient presque stagnant à l'intérieur de la rue canyon. Ce modèle d'écoulement réduit fortement la ventilation de la rue en comparaison avec celle d'une rue canyon de toiture plate.

Kastner et al. (2004) indiquent cependant que même une configuration de toiture ascendante (toiture en pente sur le bâtiment sous le vent) modifie le modèle d'écoulement à l'intérieur de la rue canyon. Ainsi, dans tous les canyons formés par des toitures en pente, la circulation de vortex ne se développe pas et le mixage vertical entre le canyon et l'écoulement au-dessus est beaucoup plus faible.

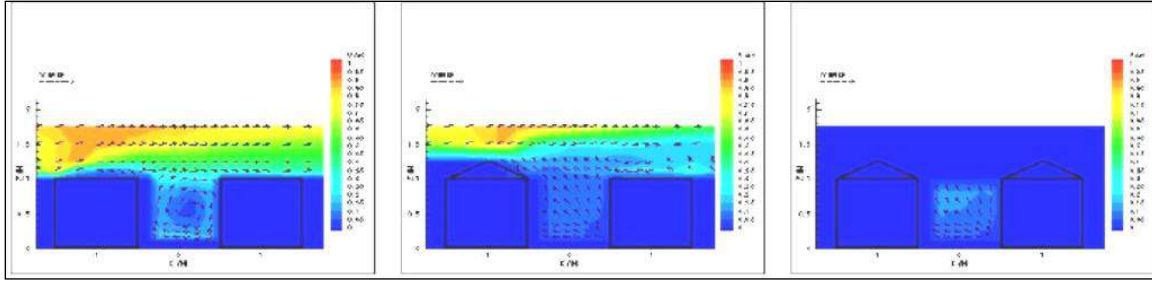


Fig. III- 24. Influence de la forme de la toiture sur le modèle d'écoulement dans une configuration de rue canyon isolée en 2D. TRAPOS, 2004.

La figure (III- 24) montre les modes d'écoulement pour trois différentes configurations. Les vecteurs tracés indiquent uniquement la direction de l'écoulement tandis que les couleurs indiquent la magnitude de la vitesse. Dans tous les cas de toitures inclinées, la re-circulation de vortex, présente dans le cas de la toiture plate, disparaît.

Les modifications de l'écoulement à l'intérieur des rues canyons attribués aux variations dans la géométrie de la toiture ne sont donc pas négligeables. Ils agissent sur la formation du vortex dans le canyon autant que ne le fait le prospect H/W. Agir sur la forme de la toiture peut avoir par conséquent un plus grand impact sur la ventilation que l'augmentation de l'espacement entre les bâtiments.

Le modèle de toiture plate favorise davantage la ventilation de la rue puisqu'il permet la re-circulation du vortex à l'intérieur de la rue. En revanche, dans les canyons formés par des toitures en pente, la circulation de vortex ne se développe pas et le mixage vertical entre le canyon et l'écoulement au-dessus est beaucoup plus faible, la ventilation de la rue est fortement réduite. Ces aspects sont très intéressants pour la circulation naturelle du vent à l'intérieur de la canopée urbaine, ils sont actuellement peu compris et ignorés dans les études des écoulements d'air en dépit du rôle important qu'ils peuvent jouer dans la ventilation de la rue.

III- 3.3.3. Effet de la surface urbaine.

Parce que le canyon urbain est rarement isolé, certaines études se sont intéressées aux effets de la surface urbaine sur la structure de l'écoulement dans une rue canyon entourée de plusieurs rues et groupes de bâtiments. Ces recherches, plutôt rares et relativement récentes (ex. Davidson et al. 1996, Meroney et al. 1996, Brown et al. 2000, Kastner et al. 2000) sont conduites en laboratoire, dans des souffleries atmosphériques ou par modélisation numérique. Elles mettent en exergue l'importance de la position de la rue par rapport au groupement urbain.

Ainsi, en se basant sur des études de visualisation en soufflerie atmosphérique, Meroney et al. (1996) révèlent que dans la rue canyon, les caractéristiques de l'écoulement de l'air diffèrent selon que la rue soit isolée ou intégrée dans un environnement urbain, c'est à dire avec des canyons additionnels, de géométrie similaire, en amont et en aval. Les observations révèlent qu'une re-circulation de vortex se forme de manière intermittente et turbulente uniquement dans le cas du canyon isolé tandis qu'un écoulement plus stable et stationnaire se développe dans le canyon urbain entouré de blocs de bâtiments (Fig. III- 25). Ces résultats suggèrent que la ventilation intermittente d'un canyon dans la ville est plus inhibée que celle d'un canyon isolé, dénué de tout obstacle.

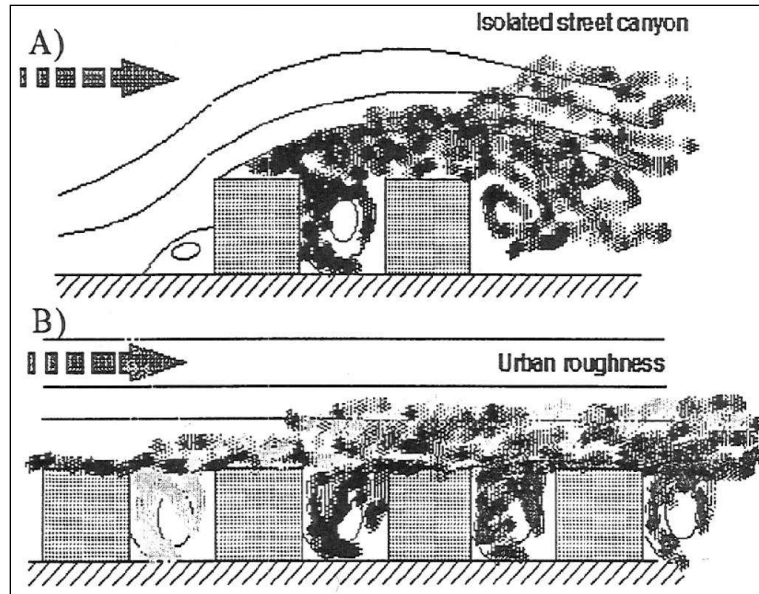


Fig. III- 25. Effet de la surface urbaine sur la structure de l'écoulement d'air : A) Les modèles d'écoulement et de dispersion dans une rue canyon isolée, placée en plein champ, B) rues canyons multiples (Meroney et al. 1996).

De même, Brown et al. (2000) effectuent des mesures d'écoulement dans une soufflerie atmosphérique autour d'une ordonnance en 2-D de sept bâtiments rectangulaires. L'espacement entre les blocs de bâtiments est identique, équivalent à une hauteur de bâtiment et le prospect des rues, de l'ordre de 1, suggère la formation d'un régime d'écoulement rasant. Les résultats obtenus montrent qu'une zone de séparation et un écoulement inversé se forment uniquement sur le toit du premier bâtiment.

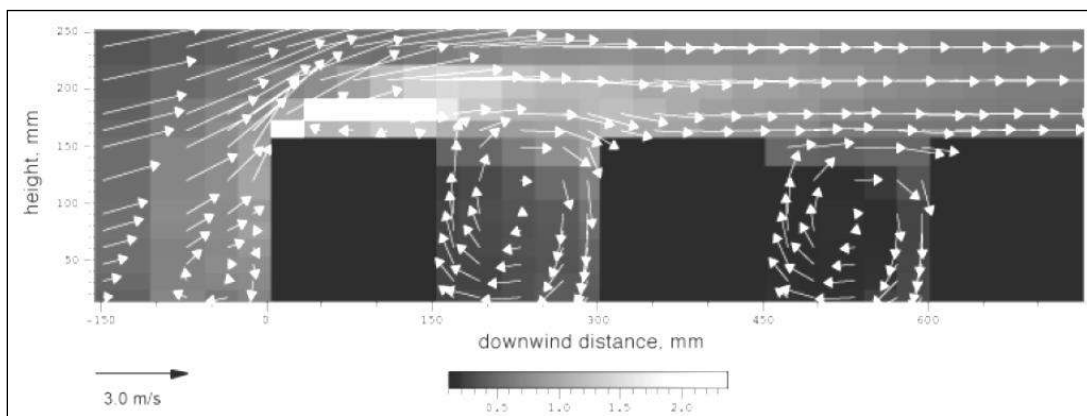


Fig. III- 26. Les champs de vecteurs de vent et de turbulence autour d'une ordonnance de bâtiments en 2-D dans une soufflerie atmosphérique. Les trois premiers des sept bâtiments sont représentés. (Brown et al. 2000).

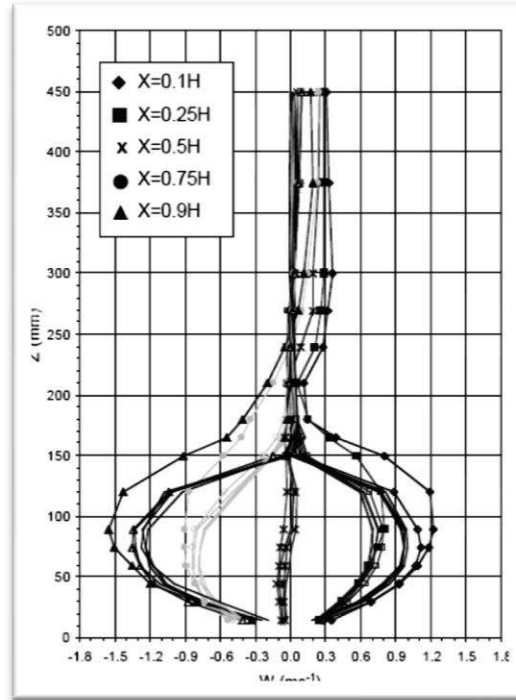


Fig. III- 27. Vitesse verticale moyenne mesurée en cinq points dans une ordonnance de bâtiments en 2-D. Symbole poché : canyon 1, symbole non poché : canyon 2, trait continu : canyons 3 à 6. (Brown et al. 2000)

Dans tous les cas, un vortex en rotation inversée est observé dans les rues. Néanmoins, dans le premier canyon, les vitesses de vents verticales sont plus élevées et la ventilation de la rue plus efficace. Les observations suggèrent en outre que la vitesse verticale semble atteindre l'équilibre dans la 3^{ème} ou 4^{ème} rangée de rue, ce qui altère fortement les échanges d'air verticaux entre le canyon et l'extérieur, au-dessus du toit. En amont, le mouvement de l'air, plus fluctuant, est dans une large mesure déterminé par la zone de séparation de l'écoulement au niveau du premier bâtiment de l'ordonnance. Ces résultats confirment les expériences de McDonald et al. (1997) et Hussain et Lee (1980) (rapporté par Brown et al. 2000) qui affirment que l'équilibre est atteint après 4 ou 5 rangées de bâtiments. Dans l'étude expérimentale conduite par Kastner-Klein et al. (2000), de grandes différences de vitesses d'air et de turbulence sont également observées entre la première et dernière rue d'un groupe de six canyons idéalisés, de même hauteur et de toiture plate (Fig. III- 28).

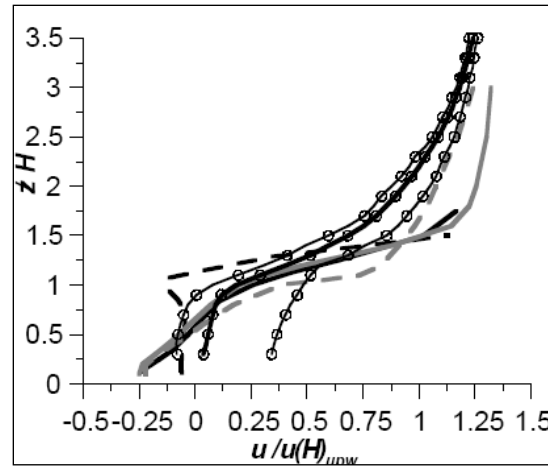


Fig. III- 28. Les profils moyens de la composante de vitesse horizontale dans un groupe de six rues canyons. Trait gris continu : premier canyon, trait gris discontinu : sixième canyon (Kastner et al. 2000).

Les champs de vitesse et de turbulence dans la dernière rue correspondent à un écoulement rasant stable tandis que dans le premier canyon, l'écoulement est fortement turbulent. Les auteurs soulignent la similitude existante entre cet écoulement et celui observé dans une rue canyon isolée. Dans les deux cas, l'écoulement dans la rue canyon découle de la séparation de l'écoulement au-dessus du toit.

Parmi les facteurs influençant l'écoulement de l'air, Cheng et Hu (2005) soulignent également l'importance de l'emplacement de la rue par rapport à l'ensemble du groupement. En se basant sur une expérience de modélisation numérique, ces mêmes auteurs étudient les écoulements d'air dans une série de rues canyons parallèles et observent différents types d'écoulement dans la rue selon que celle-ci soit située en amont ou en aval du groupement urbain. Dans les derniers blocs de rue, les modèles d'écoulement évoluent de la même manière que ceux observés par Oke (1988) et la transition d'un écoulement rasant à un écoulement de rugosité isolé se produit dans le dernier canyon lorsque H/W diminue de 1 à 0.2. En revanche, au-dessus des trois ou quatre premiers canyons, un grand vortex se forme et génère différents types d'écoulements dans les premières rues en amont du groupement.

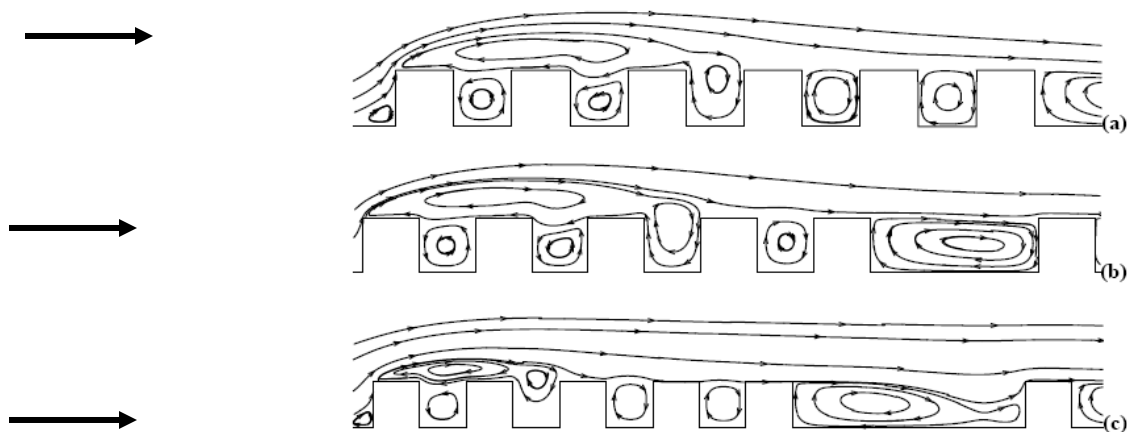


Fig. III- 29. Les modèles d'écoulement dans différentes ordonnances urbaines : a) $W/H = 1$, b) $W/h = 3$, c) $W/h = 5$ (Cheng et Hu 2005).

Ainsi, au vu des résultats obtenus par diverses expériences et études conduites en laboratoire, il s'avère que dans une ordonnance urbaine régulière, ou une série de rues canyons parallèles de même géométrie urbaine, les mouvements de l'air ne sont ni identiques, ni répétitifs. Ils commencent à devenir similaires et stables à partir d'une certaine rangée de rue, située approximativement entre la 4^{ème} et 6^{ème} rue de la trame urbaine. Les écoulements dans la première rue en amont sont caractérisés par les vitesses d'air et les valeurs de turbulence les plus élevées tandis que les dernières rues en aval se caractérisent par une circulation de vortex stable. Ces résultats suggèrent qu'en milieu urbain, les mouvements de l'air ne peuvent être appréhendés dans la rue, prise isolément. La surface urbaine, ou le quartier, détermine dans une certaine mesure les caractéristiques de l'écoulement dans le canyon urbain et l'interaction des échelles doit être prise en compte dans n'importe quelle description de l'écoulement.

Ainsi, la forme de la toiture, le type de profil de la rue, la proéminence d'un bâtiment, les irrégularités urbaines (forme, taille et orientation) et la présence d'obstacles urbains en amont ou en aval de la rue canyon peuvent modifier les modèles d'écoulement et améliorer ou au contraire inhiber la ventilation dans la rue canyon. La surface urbaine, ou le quartier, détermine dans une certaine mesure les caractéristiques de l'écoulement dans le canyon urbain qui ne doit pas être pris isolément, mais intégré dans l'ensemble urbain. Ces résultats, obtenus essentiellement à partir d'études expérimentales en laboratoire ou par modélisation numérique, nécessitent néanmoins d'être validés par des mesures sur site.

Pour clore cette partie qui traite des écoulements d'air à l'échelle de la rue canyon, il convient d'aborder à présent les effets thermiques sur les modèles d'écoulement de l'air. De tels effets demeurent cependant peu examinés et la plupart des études liant le régime de distribution des températures à l'écoulement de l'air dans la rue canyon sont conduites par modélisation numérique.

III- 3.4. Les effets thermiques.

En plus de la géométrie de la rue et des conditions météorologiques (intensité du vent ambiant et sa direction), les forces thermiques, comme la surchauffe des parois de la rue (murs et chaussées), sont connues pour jouer un rôle important dans la détermination du modèle d'écoulement de l'air dans les rues canyons (Kim et Baik 1999), et donc dans la ventilation de ces rues. Les questions principales sur ces effets s'articulent autour de la manière dont les forces thermiques peuvent changer les caractéristiques des écoulements existants (nombre de vortex et intensité), et à partir de quel seuil, ces forces ne doivent plus être négligées.

Les effets thermiques d'une rue canyon résultent essentiellement de la variation de la surchauffe solaire des murs et du sol durant la journée (Sini et al. 1996, Kim et Baik 1999). La position relative du soleil et le facteur d'ouverture au ciel de la rue canyon sont de ce fait importants dans la détermination des modèles d'écoulement dans la rue canyon, particulièrement à des vitesses de vent faibles. En effet, la radiation solaire est la source principale de chaleur alors que la présence de l'ombre, fonction du facteur d'ouverture au ciel, peut conduire à de larges différences dans les températures de murs et de sol.

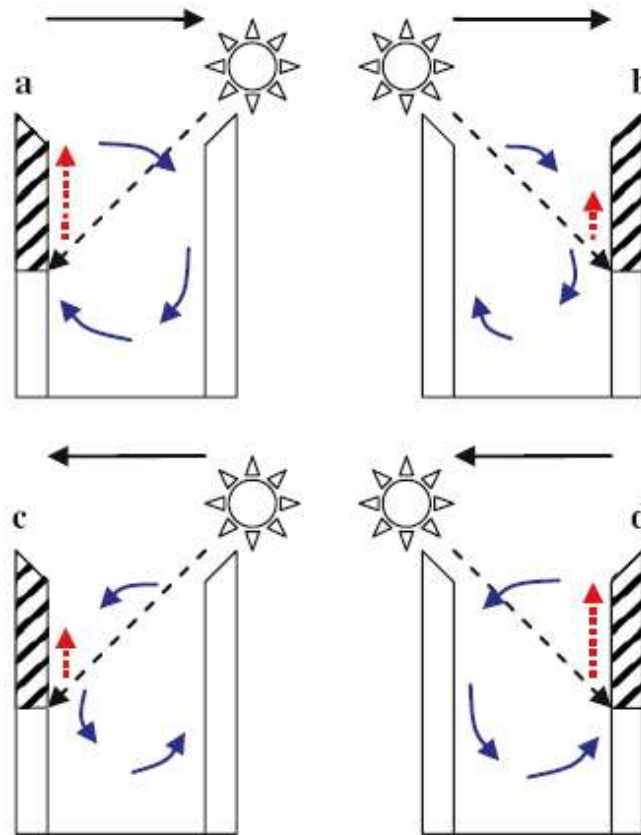


Fig. III- 30. Schéma de l'écoulement dans la rue en fonction de la surchauffe des parois : (a) vent ouest, matinée, (b) vent ouest, après-midi, (c) vent Est, matinée, (d) vent Est, après-midi. Les vecteurs (trait continu) montrent la circulation de vortex type modifiée par les effets thermiques (trait discontinu). La partie hachurée représente la zone ensoleillée de la surface des façades. Les effets thermiques produits affectent le système de vortex dans la rue et en conséquence, sa ventilation. (Offerle et al. 2007).

La stratification de la température diurne fait l'objet d'une expérience à grande échelle dans une rue à Kyoto caractérisée par un profil égal à 1.06 (Nakamura et Oke 1988). Les résultats montrent de grandes différences de température entre la surface et l'air près des surfaces directement exposées au rayonnement solaire. Ces différences atteignent 14°C en milieu de la journée. Les auteurs supposent alors que le flux de convection thermique le long de la paroi chauffée pourrait modifier la structure de l'écoulement dans la rue canyon. Cette interprétation est néanmoins déduite à partir d'un seul point de mesure du vent dans la rue canyon et nécessite d'être validée par d'autres mesures. Ca et al. (1995) analysent par calcul numérique le comportement aérodynamique d'une rue canyon dans laquelle les processus de surchauffe sont intégrés. Les résultats montrent qu'avec de faibles prospects et des vents extérieurs puissants, la convection thermique due à la surchauffe des surfaces du sol et des murs est nettement moindre que la turbulence générée mécaniquement. Cependant, avec un vent extérieur faible ou des prospects importants, les modèles de convection thermique peuvent être vus clairement. Aucune valeur de température d'air ni de vitesse de vent n'est cependant indiquée dans cette étude.

Sini et al. (1996) étudient par ailleurs ces effets numériquement dans une rue de prospect $H/W=1.12$. Ils indiquent que la structure de l'écoulement verticale (intensité, nombre de tourbillons) est largement dépendante de la différence de température entre l'air ambiant et les surfaces des parois de la rue due au chauffage radiatif et thermique (Fig. III- 31).

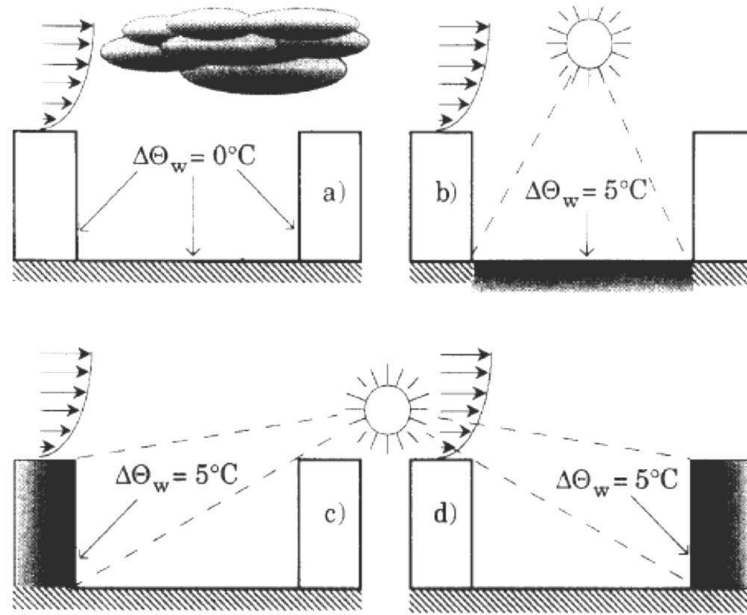


Fig. III- 31. Les configurations des murs ensoleillés (Sini et al. 1996).

Les écoulements simulés montrent que lorsque le mur chauffé ($\Delta T_{\text{mur-air}} = +5^\circ\text{C}$) est face au vent, un flux thermique ascensionnel s'oppose au mouvement descendant induit par force mécanique et divise la structure de l'écoulement en deux vortex contrarotatifs. Ce modèle d'écoulement réduit fortement les échanges d'air verticaux et inhibe de ce fait la ventilation de la rue. En revanche, si le mur sous le vent est chauffé, l'effet est inversé avec des forces thermiques améliorant la circulation du vortex, ce qui améliore bien évidemment la ventilation du canyon.

Les résultats obtenus concordent avec les simulations numériques de Kim et Baik (1999) qui, en faisant varier différents prospects et différentes intensités de surchauffe, montrent que le mouvement ascendant induit par force thermique peut renforcer ou affaiblir le vortex et modifier la structure de l'écoulement (Fig. III- 32). Ces effets dépendent de la manière dont le mouvement induit par effet thermique est combiné avec celui induit par force mécanique. La circulation de vortex la plus intense est obtenue dans le cas de surchauffe du sol et du mur sous le vent de la rue. Dans le cas où le mur face au vent est surchauffé, le mouvement descendant induit mécaniquement est freiné par le mouvement ascendant induit par force thermique, ce qui a pour effet de réduire la ventilation de la rue.

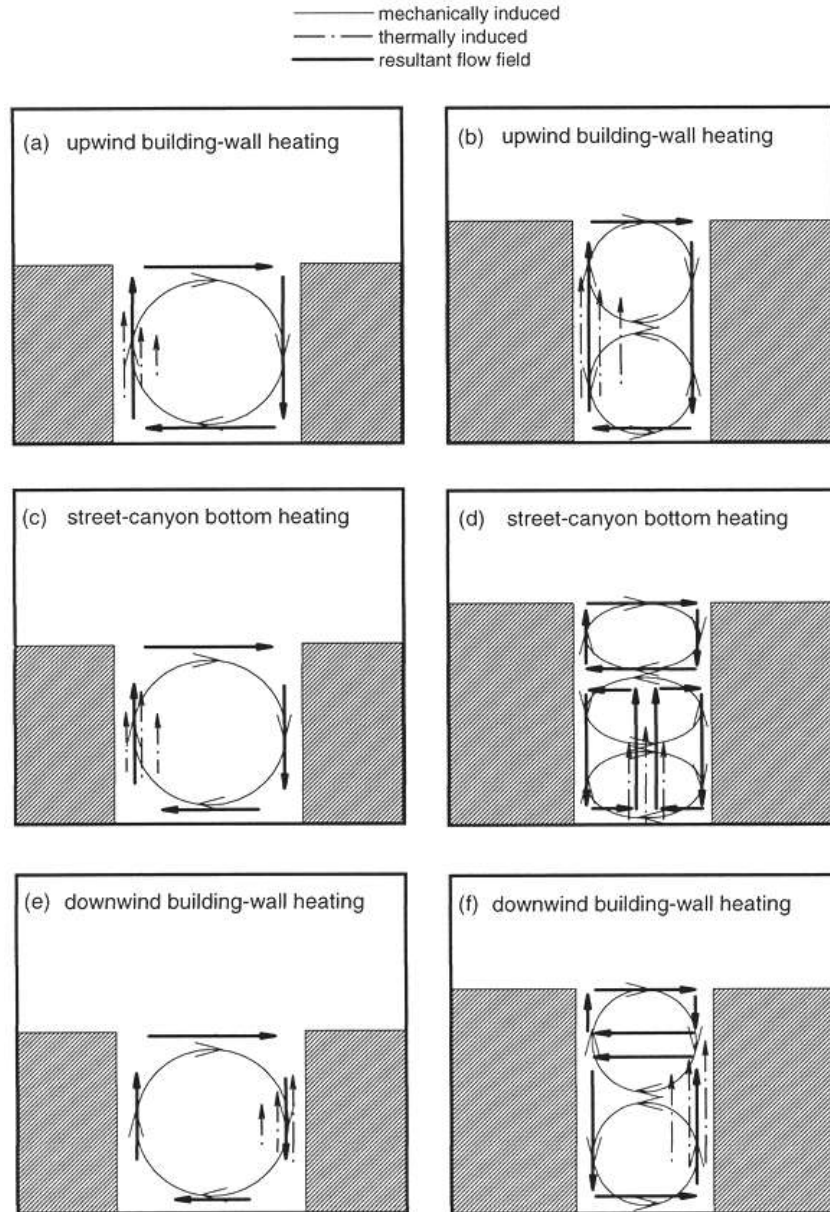


Fig. III- 32. Différents modèles d'écoulement dans la rue canyon en fonction du prospect de la rue et de la surchauffe des parois. (Baik et Kim 1999).

- Dans le cas de la surchauffe du mur sous le vent de la rue canyon, un seul vortex apparaît indépendamment du prospect (a). Pour des prospects supérieurs ou égal à 1.5, le mouvement ascendant forcé par la surchauffe du mur sous le vent surmonte le mouvement mécanique descendant qui apparaît dans le cas de non surchauffe de la paroi face au vent.
- Dans le cas de la surchauffe du sol (c), pour des prospects inférieurs à 3, les modèles d'écoulement sont similaires à ceux dans les cas de surchauffe du mur sous le vent. Cependant, pour des prospects de 3 et 3.5 (d), deux vortex contrarotatifs apparaissent dans la couche inférieure en raison du mouvement ascendant forcé thermiquement tandis que le vortex dans la couche supérieure est peu influencé par la surchauffe du sol.
- Dans le cas de surchauffe du mur face au vent, deux vortex contrarotatifs apparaissent (f), excepté pour le cas du prospect de 0.5 (e). Le vortex dans la couche supérieure est dans une large mesure induit mécaniquement par le vent ambiant tandis que le vortex dans la couche inférieure est induit thermiquement par la surchauffe du mur face au vent.

Ce sont les résultats auxquelles aboutissent Santamouris et al. (1999) qui observent dans une étude de terrain l'apparition de deux vortex contrarotatifs dans une rue canyon profonde d'Athènes de prospect $H/W = 2.5$. Le flux ascendant dû à une stratification thermique le long du mur face au vent empêche le vortex induit mécaniquement de s'étendre jusque dans le bas du canyon. De même, les expériences par visualisation de Huizhi et Liang (2003) montrent qu'avec un vent ambiant calme, les écoulements dans la rue canyon sont entièrement générés par des forces thermiques. L'étude indique que la surchauffe du fond du canyon peut renforcer l'intensité du vortex dans la rue même avec un vent ambiant faible. La campagne expérimentale de Nantes (1999-2000) dans une rue canyon de prospect H/W de 1.4 suggère par contre que l'effet d'ensemble des murs chauffés sur les dynamiques d'écoulement est très faible. Les effets thermiques sont importants dans la région étroite proche du mur chauffé face au vent mais s'avèrent être faibles par rapport à l'écoulement d'ensemble dans la rue canyon (Vachon 2001). Ces résultats confirment ceux de Offerle et al. (2007) qui démontrent dans une étude de terrain que les effets thermiques induits par la surchauffe des murs sont inexistants sinon nettement plus faibles que ceux obtenus par modélisation numérique.

Pour conclure, les forces thermiques, comme la surchauffe des parois de la rue (murs et chaussées), semblent jouer un rôle non négligeable dans la détermination du modèle d'écoulement de l'air dans les rues canyons. Leurs effets dépendent des conditions de vent et du prospect de la rue : ils sont visibles pour des vents incidents perpendiculaires et plus importants sous conditions de vents faibles et pour des rues de prospects étroits. Ces mouvements peuvent renforcer ou au contraire affaiblir le taux de ventilation dans la rue selon la manière dont l'écoulement ascendant induit par effet thermique est combiné avec celui induit par force mécanique. La circulation de vortex la plus intense est obtenue dans le cas de surchauffe du sol et du mur sous le vent de la rue. Dans ces conditions, la ventilation de la rue est améliorée. En revanche, dans le cas où le mur face au vent est surchauffé, le mouvement descendant induit mécaniquement est freiné par le mouvement ascendant induit par force thermique, ce qui a pour effet de réduire la ventilation de la rue. Ces phénomènes semblent toutefois surestimés dans les modélisations numériques en comparaison avec ceux observés sur le terrain.

Conclusion.

À l'échelle de la canopée urbaine, l'état de l'art révèle une connaissance abondante sur les caractéristiques d'écoulement d'air dans une rue canyon isolée, entité formée par deux bâtiments parallèles. Une grande partie de ces connaissances est obtenue à travers des expériences de visualisation et de modélisation numérique, les études sur site étant plus rares. La plupart des études numériques étudient l'écoulement dans la rue canyon comme un écoulement de cavité isolée et les études de terrain se basent sur des rues de géométrie simplifiée, la plus proche possible du modèle idéalisé. Ces études sur site portent essentiellement sur des rues canyons de prospect proche ou supérieur à 1 et où le vent ambiant est perpendiculaire à l'axe de la rue. Les conditions de vents incidents parallèles et obliques sont peu étudiés et l'environnement immédiat telles les intersections de rues ou la présence d'autres bâtiments et rues canyons sont souvent ignorées. La complexité des modèles d'écoulements n'est de ce fait que partiellement appréhendée. Les principaux résultats qui découlent de toutes ces études sont comme suit :

- dans la rue canyon, aucun mouvement d'air ne peut être étudié sans relation avec l'écoulement libre au-dessus de la canopée urbaine. De la direction et l'intensité du vent incident, dépendent les caractéristiques des écoulements d'air dans la rue. Au-dessous d'une certaine valeur seuil de vitesse de vent, le couplage entre l'écoulement à l'intérieur de la rue et

le vent au-dessus est rompu et la ventilation cesse. La valeur seuil augmente avec la géométrie de la rue H/W ,

- dans la rue canyon, les modèles d'écoulement d'air ne dépendent pas uniquement de la géométrie de la rue exprimée par le prospect H/W mais sont également fonction de la géométrie du bâtiment représentée par le rapport L/H . Ce dernier rapport agit sur la composante longitudinale et induit des effets de canalisation le long de la rue. La longueur de la canopée (L) gouverne le degré d'interaction des vortex d'angles et de cavité au voisinage des arrêtes de la rue canyon. Ces tourbillons "d'angles" s'étendent en spirale tout le long de la rue en interagissant avec le tourbillon vertical à l'intérieur de la rue canyon, améliorant de ce fait la ventilation de la rue. L'effet de cette ventilation s'estompe avec l'augmentation de la longueur des rues,
- la configuration de rue asymétrique modifie le système de vortex dans la rue canyon et peut agir sur l'intensité des échanges verticaux avec l'écoulement libre au-dessus de la canopée urbaine. Selon que le bâtiment face au vent soit plus haut ou plus bas que le bâtiment sous le vent, la ventilation de la rue peut être accentuée ou au contraire réduite,
- le modèle d'écoulement semble être fortement affecté par les structures de toiture en pente. La toiture plate favorise la ventilation de la rue tandis que les toitures en pente induisent la stagnation du vortex à l'intérieur du canyon. Très rares sont néanmoins les études qui se sont intéressées à de tels effets et les résultats obtenus par Rafailidis (1997) et Kastner-Klein et al. (1999) nécessitent d'être validés par d'autres expériences de terrain et en laboratoire,
- dans le cas de vents faibles, les écoulements d'air semblent être gouvernés par les effets thermiques dus à l'irradiation solaire. Ces effets sont visibles sous conditions de vents faibles et pour des vents incidents perpendiculaires à l'axe de la rue. Ils dépendent du facteur d'ouverture au ciel et de la géométrie solaire. Les études entreprises sur ces aspects sont basées sur des expériences en laboratoire, les mesures sur site sont de ce fait nécessaires pour la validation des résultats obtenus,
- en milieu urbain, les mouvements d'air ne sont pas uniformes, et ce, même dans une structure urbaine régulière. Dans ces conditions, la rue canyon ne peut être appréhendée isolément et l'étude de la ventilation doit intégrer l'influence des groupes de bâtiments environnants. La surface urbaine, ou le quartier, détermine dans une certaine mesure les caractéristiques de l'écoulement dans le canyon urbain et l'interaction des échelles doit être prise en compte dans n'importe quelle description de l'écoulement. La circulation de l'air dans la rue canyon et sa ventilation semblent être liées aux écoulements d'air ayant lieu à une échelle plus large qui est celle du quartier ou échelle intermédiaire.

III.4. L'écoulement d'air à l'échelle du quartier.

Les études sur les écoulements d'air en milieu urbain ont porté essentiellement sur deux échelles spatiales que sont les échelles du bâtiment isolé et la rue canyon urbaine. L'échelle du quartier, ou échelle intermédiaire, définie comme celle d'un groupe de bâtiments ou de quelques pâtés de maisons, demeure en revanche relativement inexplorée.

Selon Davidson et al. (1996), le champ d'écoulement moyen dans la proximité d'une ordonnance d'obstacles peut être divisé en cinq régions telles qu'elles sont représentées dans la figure ci-dessous (III- 33) :

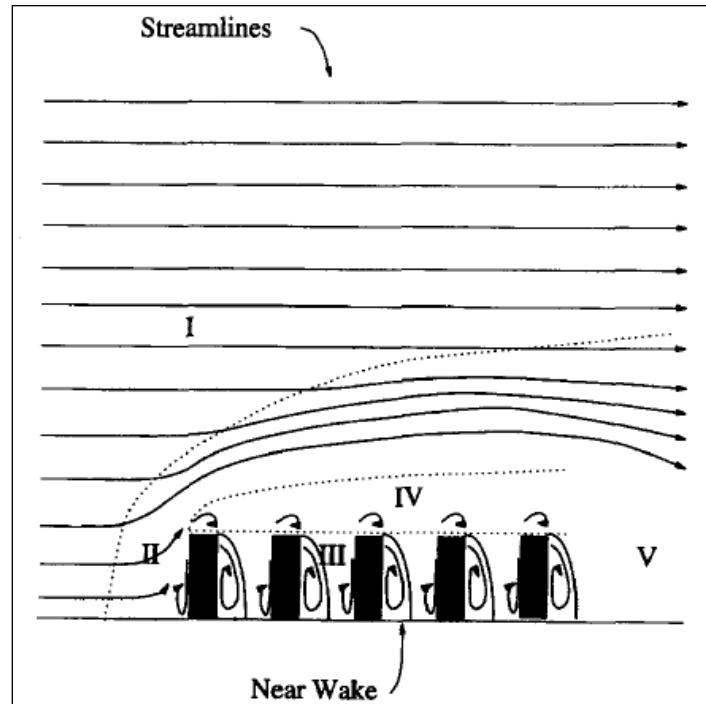


Fig. III- 33. Représentation du champ d'écoulement autour d'un large groupe d'obstacles (Davidson et al. 1996).

1. la région I représente la zone où la vitesse moyenne et la turbulence ne sont pas affectées par la présence de l'ordonnance de bâtiments,
2. dans la région II, les lignes de courant sont divergentes puisqu'une partie de l'écoulement passe au-dessus de l'ordonnance et une autre partie traverse l'intérieur de l'ordonnance. Il existe une ligne de courant de séparation au-dessus de laquelle l'écoulement passe au-dessus de l'ordonnance et au-dessous de laquelle, il la traverse,
3. dans la région III, l'écoulement se déplace à travers l'ordonnance à une vitesse réduite, son échelle de turbulence est fonction des dimensions des obstacles rencontrés et des espacements entre les rangées d'obstacles,
4. la région IV, juste au-dessus des obstacles, représente une zone de fort cisaillement où une seconde couche limite turbulente se développe,
5. dans la région V, les lignes de courant convergent graduellement et l'écoulement accélère en aval de l'ordonnance d'obstacles.

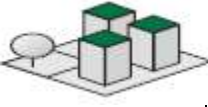
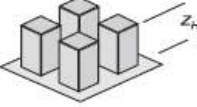
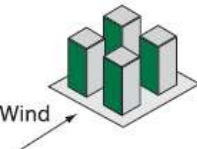
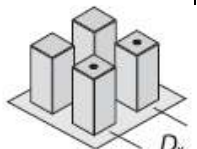
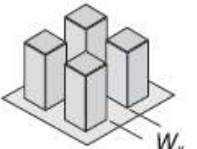
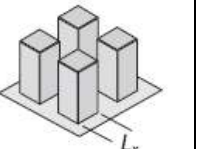
De cette classification de l'écoulement autour d'un large groupe d'obstacles, deux mécanismes importants semblent influencer le comportement de l'écoulement à l'intérieur de la structure urbaine : la divergence et la convergence des écoulements d'une part et les changements de la nature de la turbulence d'autre part. Ces mécanismes dépendent considérablement de la configuration du groupe des bâtiments et des rues.

III- 4.1. L'approche morphométrique utilisée dans l'étude des écoulements à l'échelle du quartier.

La morphologie des paysages urbains est extrêmement variable et est influencée par de nombreux facteurs dont les caractéristiques géographiques et le contexte historique du développement des villes. Les quartiers modernes sont par exemple caractérisés par des groupes de bâtiments très hauts (gratte-ciels et tours) et des rues larges tandis que les centres historiques présentent des rues très étroites et un bâti très serré, avec des bâtiments de hauteur moyenne. Il est ainsi très difficile de paramétrer l'écoulement de l'air à l'échelle du quartier en raison de la complexité et la variété des morphologies urbaines existantes. Les modèles physiques et numériques qui tentent de simuler l'écoulement de l'air dans les zones urbaines réelles nécessitent des informations détaillées sur la hauteur et la largeur des bâtiments, leur ordonnance, les espacements, la largeur des rues, leur orientation, etc. Aussi, différents critères morphologiques ont été proposés pour définir des catégories d'ordonnances de bâtiments urbains et identifier les régimes d'écoulements d'air correspondants.

Le tableau (III- 5) énumère les principaux paramètres morphologiques, dits morphométriques, utilisés dans la détermination des différentes configurations urbaines en fonction de leurs propriétés aérodynamiques.

Tableau III- 5. Principaux paramètres morphométriques utilisés dans la détermination des différentes configurations urbaines en fonction de leurs propriétés aérodynamiques.

λ_P		Ratio de l'aire du plan des bâtiments	Décrit l'aire du plan couverte par les bâtiments par l'aire du plan totale	Urbain : 35-65% Suburbain : 15-40%
z_H		Hauteur moyenne des bâtiments	La hauteur moyenne de tous les bâtiments.	suburbain: 4– 8 m Urbain: 8 – 20 m Quartier moderne > 20 m
λ_F		Ratio de l'aspect frontal ou index de la zone frontale.	Ratio de l'aire frontale totale projetée des bâtiments à l'aire totale du plan incluant la végétation λ_F .	suburbain: 0.1–0.3 Urbain: 0.1 – 0.6 Quartier moderne > 0.4
λ_C		Aspect ratio total	Ratio de l'aire de surface 3-D totale par l'aire du plan totale (Voogt et Oke, 1997).	Suburbain: 1.3 – 1.8 Urbain: 1.5 – 2.0 Quartier moderne > 2
D_x		Espacement inter-élément (a)	La distance entre le centre des bâtiments dans des ordonnances idéales (souffleries). Pour des surfaces urbaines réelles, les espacements caractéristiques entre les bâtiments $D_x = L_x + W_x$	
W_x		Largeur du canyon (a)	La distance entre les bâtiments dans des ordonnances idéales (souffleries). Pour des surfaces urbaines réelles, la largeur moyenne de l'espace libre entre bâtiments et donc intégrant les jardins et les zones ouvertes.	
L_x		Longueur du bâtiment	La longueur des bâtiments dans des ordonnances idéales (souffleries). Pour des surfaces urbaines réelles, la longueur moyenne des bâtiments.	
λ_S	Prospect du canyon (hauteur /largeur)		Le prospect largement utilisé entre la hauteur moyenne z_H et la largeur du canyon W_x .	Suburbain: 0.1 – 0.5 Urbain: 0.5 – 2 Quartier moderne > 2
λ_B		Rapport Hauteur du bâtiment/ longueur bâtiment.	z_H / L_x . Le ratio entre la hauteur moyenne z_H et la longueur du bâtiment L_x . Souvent utilisé dans les souffleries atmosphériques et les études numériques.	Suburbain: < 1 Urbain: 1 - 3 Quartier moderne > 2

Source : adapté à partir Mestayer et al. (In Rapport FUMAPEX, 2004).

Le paramètre morphométrique le plus représentatif des ordonnances urbaines est la densité des obstacles qui indique les obstructions au vent créées par les zones construites. Elle peut être définie par la densité de l'aire plane λ_p ou la densité de l'aire frontale λ_f (Plate 1995, Theurer 1993).

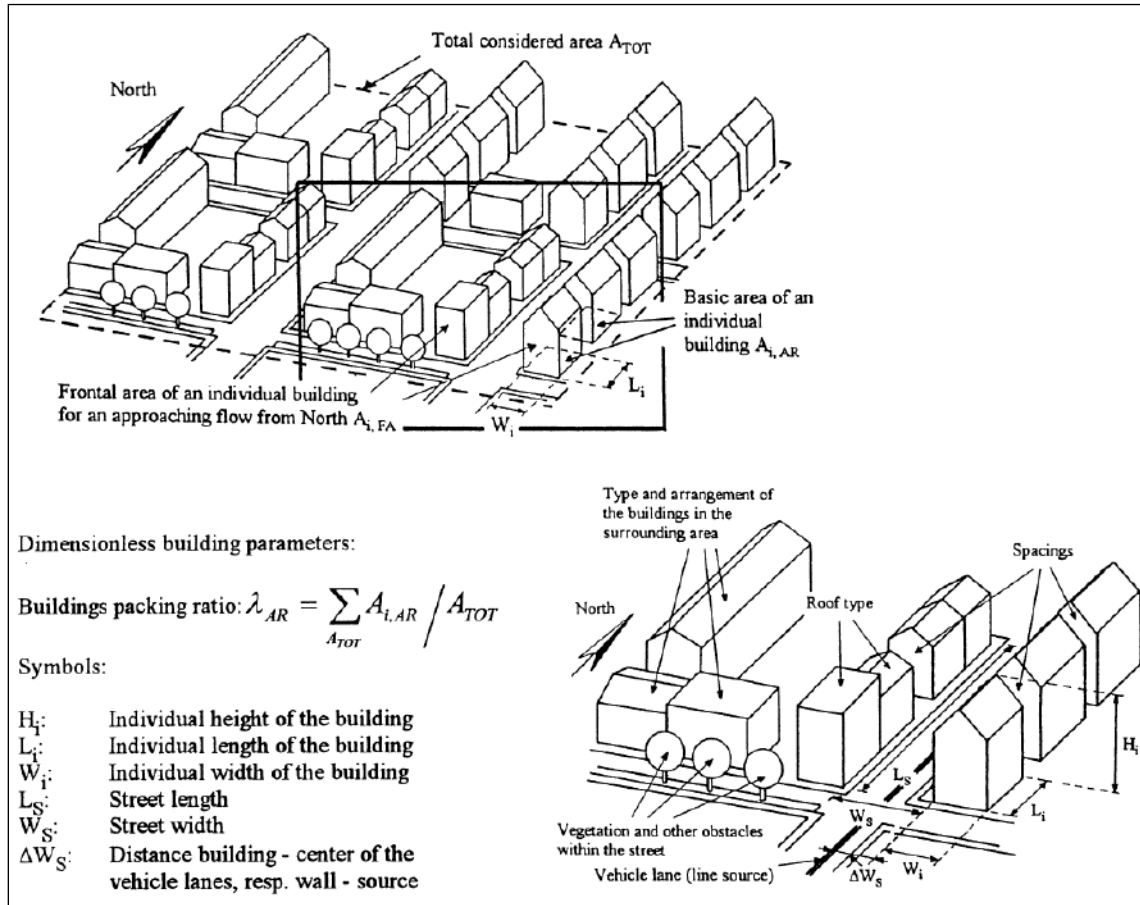


Fig. III- 34. Paramètres morphométriques utilisés par Theurer pour décrire des ordonnances de bâtiments urbains. À gauche, paramètres pour des zones urbaines larges, au-dessous à droite, paramètres pour des ordonnances organisées autour des voies urbaines. (Theurer 1999).

La densité plane λ_p est définie comme le rapport entre la surface de l'obstacle (bâtiment) au sol (A_p) et la surface totale du plan (A_T) (Fig. III- 35) :

$$\lambda_p = A_p / A_T \quad (\text{III- 3a})$$

La densité de l'aire frontale est définie comme le rapport entre l'aire de surface face au vent (A_f) et la surface totale du plan (A_T). Elle est donc fonction de la direction du vent.

$$\lambda_f = A_f / A_T \quad (\text{III- 3b})$$

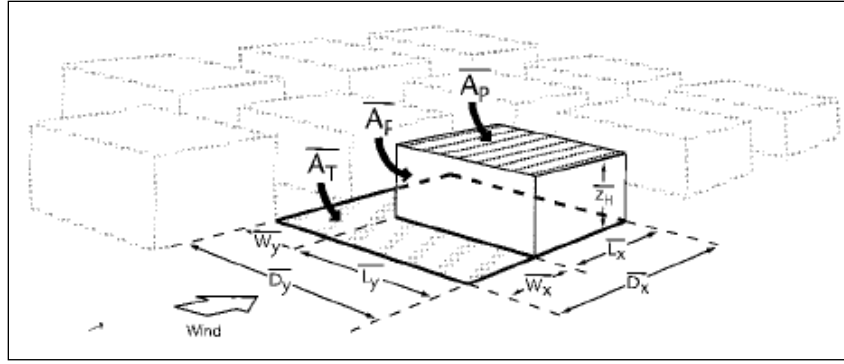


Fig. III- 35. Définition des dimensions de surface utilisées dans l'analyse morphométrique. L'élément dessiné est générique, représentant tous les obstacles en rapport avec l'écoulement d'air. (Grimmond et Oke 1999).

Dans le cas où l'ordonnance urbaine est de configuration cubique, alors $\lambda_p = \lambda_f$. Dans des ordonnances régulières d'éléments cubiques, la densité du plan λ_p peut être liée à l'espacement W existant entre les éléments et leur hauteur H et λ_p peut être définie comme suit :

$$\lambda_p = 1/(1 + W/H)^2 \quad (\text{III- } 3c).$$

En fonction des densités plane et frontale, de nombreuses recherches ont essayé de définir des structures de bâtiments urbains. Theurer (1993, cité par Grimmond et Oke 1999) établit une classification des différents districts représentatifs des villes d'Allemagne et étudie l'écoulement principal et les caractéristiques de dispersion pour ces différentes catégories de bâtiments. De même, Grimmond et Oke (1999) définissent quatre types de morphométrie urbaine auxquelles seront associés quatre régimes d'écoulement d'air :

1. à une densité du plan faible ($0.05 < \lambda_p < 0.4$), correspond un écoulement de rugosité isolé,
2. à une densité du plan moyenne ($0.3 < \lambda_p < 0.5$), correspond un écoulement de sillage interférent,
3. à une densité du plan forte ($0.5 < \lambda_p < 0.8$), correspond un écoulement rasant,
4. et à une densité du plan très élevée (> 0.4), correspond un écoulement chaotique ou mixte.

Le tableau (III- 6) identifie les principales zones urbaines dégagées selon la classification de Grimmond et Oke (1999).

Tableau III- 6. Régimes d'écoulement d'air en rapport avec différentes densités urbaines.

Densité de la surface urbaine	Régime d'écoulement	λ_p	$\lambda_s = z_h/w$
1. Faible densité : Bâtiment et arbres de petites dimensions et largement espacés. Ex : maisons individuelles modernes avec de larges rues, zone industrielle faible ou centre commercial avec de grands espaces ouverts.	Écoulement isolé	0.05-0.40	0.08-0.30
2. Densité moyenne : Bâtiments de deux à quatre étages, avec arbres adultes, éléments urbains de hauteur variée occupant plus de 30% de la surface et qui créent des espaces semi-fermés (rues canyons, cour). Ex : espaces clos, maisons semi-détachées, blocs d'appartement Dans des environnements dégagés, maisons mixtes avec boutiques, faibles industries, églises, écoles.	Écoulement de sillage interférent	0.3-0.5	0.3-1.0
3. Forte densité : Bâtiments et arbres étroitement regroupés et de hauteur similaire, rues canyons étroites. Ex : centre de ville ancien, groupements denses, maisons semi-détachées, site industriel dense.	Écoulement rasant	0.5-0.8	0.65-2.00
4. Centre-ville moderne : Grandes tours de différentes hauteurs, dispersées ou groupées, implantées dans des tissus urbains denses. Ex; le centre des villes modernes, institutions principales.	Écoulement chaotique ou mixte	> 0.4	> 1

Source : modifié après Grimmond et Oke (1999).

Sur la base des travaux existants (ex. Ca et al. 1999, Grimmond et al. 1999, Hanna et al. 2001, Ratti et al. 2002) identifient un nombre de paramètres relatifs à la dispersion des polluants et aux écoulements d'air dans trois villes européennes (Londres, Toulouse et Berlin) et deux villes nord-américaines (Salt Lake City et Los Angeles). Les paramètres considérés sont les densités de l'aire plane et frontale, la distribution des hauteurs, leur déviation standard, la longueur de rugosité aérodynamique et le facteur d'ouverture au ciel. Ils sont obtenus par l'analyse des modèles numériques d'altitude (MNA), modèles tridimensionnels représentant sous forme numérique le relief d'une portion de territoire, incluant les bâtiments et la végétation.

En plus de l'application de simples ratios d'occupation du sol et de densité des constructions, il existe d'autres méthodes qui permettent de définir des paramètres géométriques simplifiés qui peuvent ensuite être liés aux vents urbains à l'échelle du quartier. Steemers et al. (1996) utilisent par exemple le concept de porosité urbaine et un certain nombre de grandeurs géométriques pour évaluer les réponses du vent à la texture urbaine. À l'inverse de la densité urbaine, la porosité d'un obstacle, définie comme le rapport de l'aire ouverte à l'aire totale, représente le taux de surface libre à l'intérieur du tissu urbain. Elle donne une indication sur la rugosité d'un morceau particulier du tissu urbain et est employée pour étudier plus en détail les cheminements du vent à travers l'environnement urbain. De façon similaire (bien qu'originellement utilisé dans le contexte du rayonnement solaire), Compagnon et Raydan (2000, cité par Ratti et al. 200) définissent une mesure de directionnalité urbaine par rapport aux vents. Adolphe (2001) utilise en revanche un ensemble d'indicateurs telles que la "rugosité", la "porosité" et la "sinuosité" pour modéliser les écoulements d'air à l'échelle du quartier.

Toutes ces approches permettent d'appréhender l'écoulement de l'air à l'intérieur de la canopée urbaine par le biais d'algorithmes et de paramètres géométriques qui mettent en rapport morphologie urbaine et écoulements d'air. Elles ont l'avantage de déterminer des valeurs sans avoir recours aux mesures sur site et de pouvoir calculer les écoulements pour n'importe quelle direction du vent. Elles présentent toutefois l'inconvénient d'être basées pour la plupart sur des relations empiriques, dérivées de travaux expérimentaux en soufflerie atmosphérique. Dans ces simulations, les écoulements d'air sont idéalisés au-dessus et à l'intérieur de géométries relativement simples qui peuvent être clairement définies et faciles à mettre en œuvre dans les modèles numériques et pour des directions de vent constantes, souvent perpendiculaires à l'axe des rues de l'ordonnance. Ces conditions diffèrent de celles des villes réelles où la direction du vent est souvent changeante et même si le modèle des rues est relativement régulier, la taille et les formes des éléments de rugosité individuels ne sont pas régulières (Grimmond et Oke 1999).

III- 4.2. Caractéristiques des écoulements d'air dans une ordonnance d'obstacles régulière.

Les études conduites sur l'écoulement au-dessus et à l'intérieur des ordonnances d'obstacles sont menées pour la plupart dans des souffleries atmosphériques et/ou par modélisation numérique et se basent sur des configurations urbaines idéalisées, composées de formes géométriques simples, dans des ordonnances de bâtiments régulières (rangées parallèles de bâtiments et de rues). Dans ces études, les écoulements d'air sont associés à des phénomènes de dispersion et de transport des polluants (Davidson et al. 1995, Davidson et al. 1996, Macdonald et al. 1997, Macdonald et al. 1998, Mavroidis 2000, Brown et al. 2000). Ils sont analysés en vue d'obtenir des informations sur l'effet d'ensemble de l'ordonnance, en amont, en aval et à l'intérieur du groupement.

III- 4.2.1. Effet de la densité de l'aire des bâtiments.

Les effets de la densité de l'aire des bâtiments sont modélisés par Hanna et al. (2002) qui analysent les champs d'écoulement dans quatre séries d'ordonnance cubique, de configuration alignée et en quiconque, avec des densités frontales de 0.16 et 0.44 ($W/H=1.5$ et 0.5 respectivement).

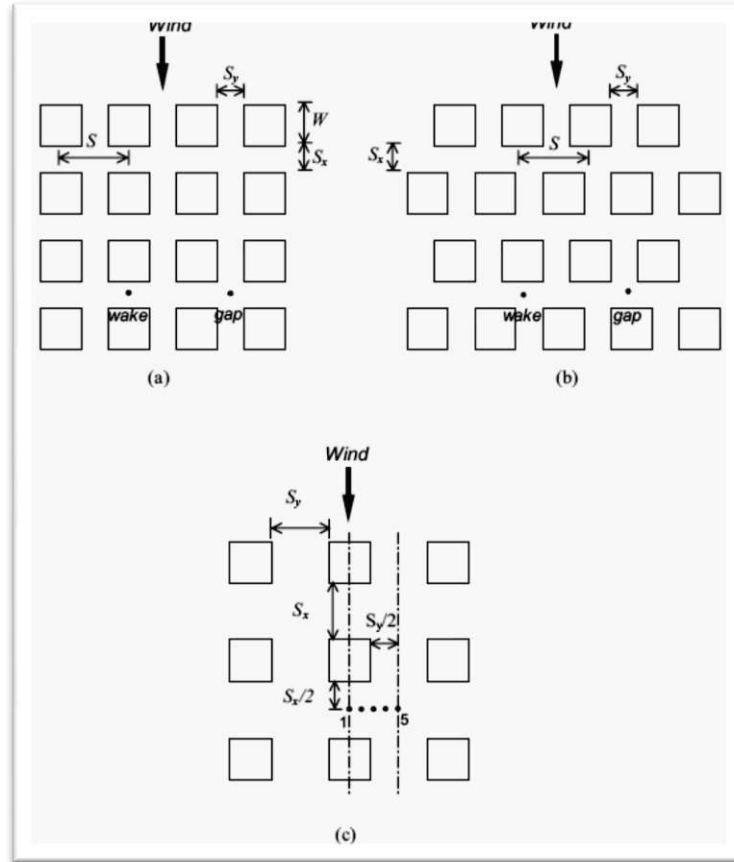


Fig. III- 36. Représentation schématique des ordonnances d'obstacles cubiques utilisés dans la modélisation numérique : (a) ordonnance alignée carrée, (b) ordonnance en quiconque, (c) emplacement des profils verticaux : 1 est dans le sillage et 5 est dans le "vide". (Hanna et al. 2002).

Les profils de vitesse relative moyenne latéraux simulés sont comparés pour les deux types de configurations et les résultats indiquent que lorsque la densité augmente de 0.16 à 0.44 (l'espacement entre les cubes décroît de $1.5H$ à $0.5H$), la vitesse latérale de vent moyenne relative dans la canopée (à une hauteur $h = 0.6H$) décroît par environ un facteur de trois dans la configuration alignée et par 50% dans celle en quiconque. Chan et al. (2003) observent les mêmes phénomènes dans leur étude de modélisation numérique et indiquent que lorsque les bâtiments deviennent de plus en plus rapprochés, l'écoulement séparé semble passer à travers un grand obstacle dans lequel la distorsion du profil de vent au-dessus des bâtiments devient importante. L'écoulement rasant qui en résulte prouve bien que les ordonnances de bâtiments denses ne favorisent pas la ventilation à l'intérieur de la canopée urbaine. Bottema (1999) souligne que la rugosité maximale d'un groupe de bâtiment et la ventilation maximale attendue se produisent pour une densité plane de l'ordre de 20-25% (Fig. III- 37).

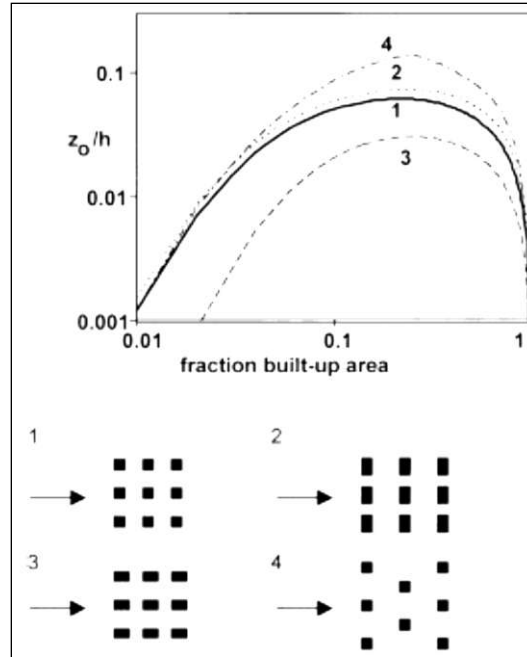


Fig. III- 37. La rugosité z_0/h de certaines configurations de groupes de bâtiments en fonction de la densité plane (h hauteur de bâtiment). Bottema (1999).

III- 4.2.2. Effet de la configuration urbaine régulière sur les phénomènes d'abri et d'exposition au vent.

Afin de mieux appréhender les modèles de distribution des écoulements à l'intérieur d'une ordonnance d'obstacles urbains, deux types de configuration, alignée et en quiconque, font l'objet d'une série d'études expérimentales en soufflerie atmosphérique ou par modélisation numérique (Davidson et al. 1996, Macdonald et al. 1997, Mavroidis 2000). Des profils de vitesse de vent et de l'intensité de la turbulence sont comparés. Ces profils de vent sont pris en deux emplacements, directement derrière les obstacles et dans l'intervalle entre les obstacles (la canalisation de la rue). Ils indiquent que pour les deux types d'ordonnance, l'intensité des écoulements est plus importante entre les intervalles (dans la canalisation de la rue) que derrière les obstacles. Ce sont les résultats auxquels aboutissent Hanna et al. (2002) qui modélisent les champs d'écoulement autour des deux types d'ordonnance cubique.

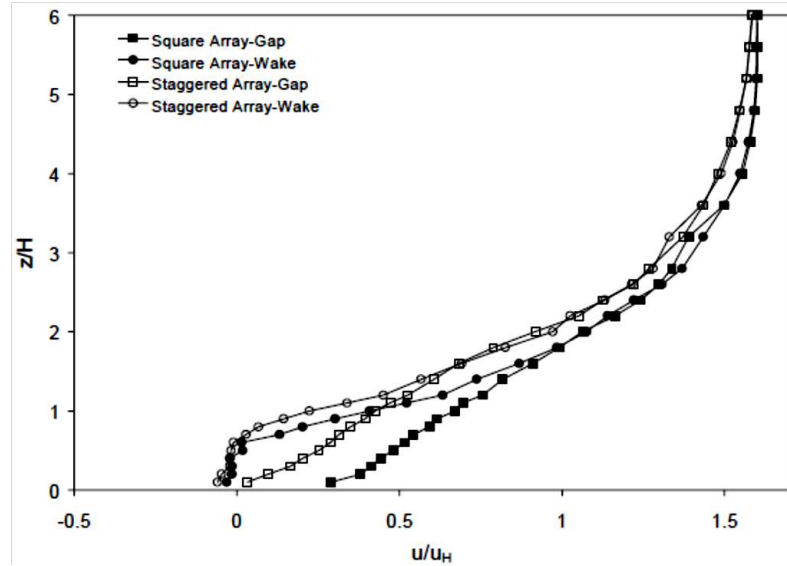
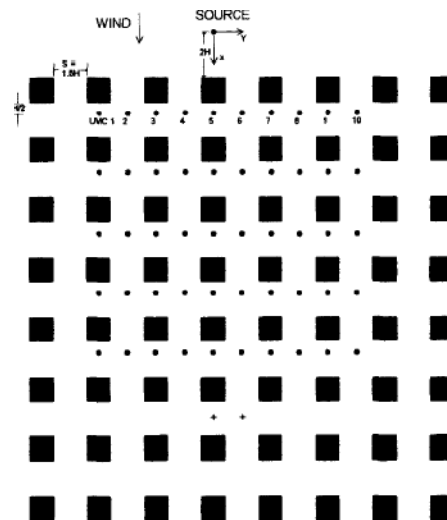
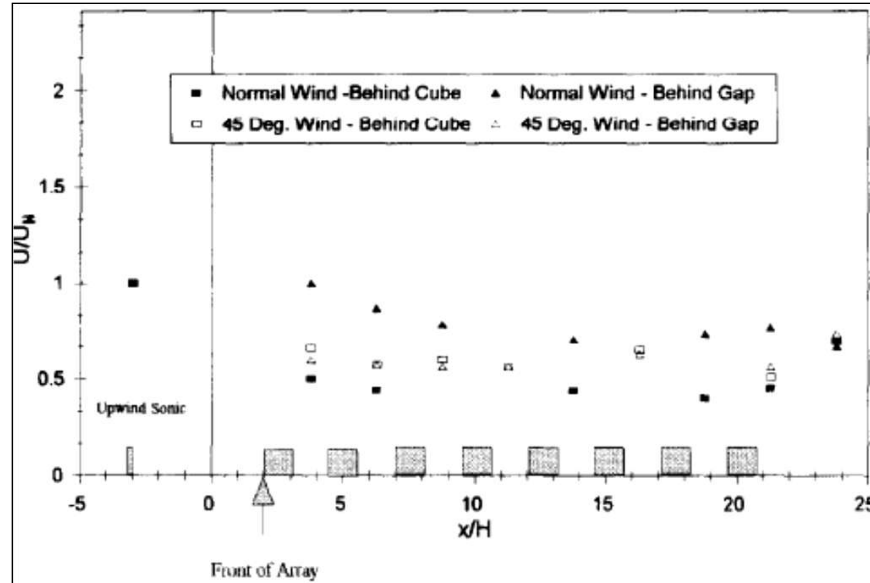


Fig. III- 38. Comparaison des profils de vent moyen modélisés derrière les cubes et dans l'intervalle entre les bâtiments au niveau du 7ème rang dans les deux types de configuration alignée et en quiconque. L'espacement est $W=1.5 H$; Hanna et al. 2002.

Dans une expérience de terrain à petite échelle, Macdonald et al. (1997) observent également une vitesse du vent entre les intervalles considérablement plus élevée que celle en aval des obstacles en raison des effets de sillages des éléments de rugosité. Dans le cas d'une configuration alignée, la vitesse normalisée par rapport au vent libre en amont de l'ordonnance est de 0.71 dans les intervalles et 0.44 derrière les bâtiments. Les données du vent pour la même ordonnance d'obstacles mais pour une configuration en quiconque indiquent une vitesse du vent de 0.65 dans les intervalles entre les cubes et 0.40 derrière les cubes, valeurs de vitesse de vent plus faibles que celles observés dans le cas d'une ordonnance alignée.



a : ordonnance cubique alignée utilisée dans une expérience de terrain à petite échelle par Macdonald et al.



b. Les vitesses de vent les plus élevées sont observées dans les intervalles entre les bâtiments.

Fig. III- 39. Variation de la vitesse du vent dans l'ordonnance cubique alignée. Macdonald et al. (1997).

Ces résultats suggèrent que les effets d'abri sont plus importants dans une configuration en quiconque. En effet, dans le cas d'une configuration en quiconque, l'écoulement est dévié par les obstacles voisins alors que dans une ordonnance d'obstacles alignée, des canalisations, ou des rues "canyons", sont créées à travers lesquelles l'écoulement peut circuler librement. Les vitesses de vent moyennes sont de ce fait plus élevées, l'effet d'abri moindre et les différences entre les écoulements latéraux, en aval des obstacles et dans les rues, plus importantes (Hanna et al. 2002). La distribution des écoulements à travers les ordonnances urbaines est de ce fait plus homogène dans une configuration en quiconque. Bottema (1999) affirme qu'une configuration en quiconque semble plus favorable à la ventilation en raison de l'augmentation de la turbulence (interaction des sillages et absence de zones de stagnation) alors qu'une configuration avec des bâtiments alignés conduit non seulement à une plus forte exposition au vent mais aussi à une faible ventilation car l'écoulement canalisé réduit l'échange vertical avec la couche au-dessus de la canopée urbaine.

Pour une direction de vent oblique, Macdonald et al. (1997) relèvent que la direction oblique fournit de meilleures conditions de ventilation à l'intérieur du groupe de bâtiments vu que les zones de stagnation sont moindres et les échanges verticaux plus importants que dans le cas d'un écoulement canalisé le long des canyons urbains. Cet aspect est important lorsqu'il faut décider de la directionnalité à donner à la trame urbaine.

III- 4.2.3. Effet de la configuration urbaine régulière sur la stabilité des écoulements.

Dans le but d'obtenir une indication sur l'obstruction d'ensemble de l'ordonnance et le nombre de rangs nécessaire pour qu'une vitesse moyenne stable se développe, des mesures ou/et des modélisations sont effectuées par différentes études. Dans toutes ces recherches, une forte réduction de vent est observée dans les ordonnances cubiques, avec les vitesses de vent minimales enregistrées à partir de la 4^{ème} -5^{ème} rangée de l'ordonnance. En effet, Davidson et al.

(1996) et MacDonald et al. (1997) affirment que ce n'est qu'après la quatrième rangée de l'ordonnance que les vitesses d'écoulements minimales sont observées. Des études précédentes en soufflerie atmosphérique ont également montré qu'une distance approximative de cinq rangées était nécessaire pour que la stabilité de l'écoulement soit obtenue (Hussain et al. 1980). Les mesures sur site de Mavroidis (2000) dans une ordonnance cubique avec des espacements $W/H = 1.5$ montrent également que dans des configurations alignées et en quiconque, l'écoulement tend à devenir similaire au-delà de la cinquième rangée de l'ordonnance. La vitesse de vent moyenne diminue graduellement avec la distance à partir du périmètre de l'ordonnance jusqu'à ce que la condition d'écoulement moyen stable soit atteinte. La figure (III- 40.) présente les résultats à partir des mesures de vitesse de vent à l'intérieur d'une ordonnance cubique alignée.

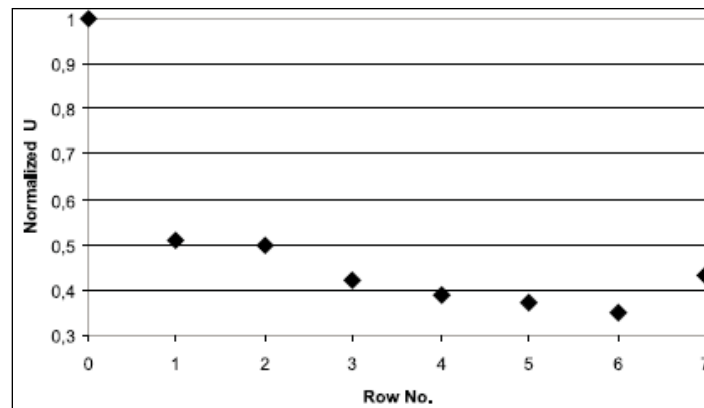


Fig. III- 40. Les mesures de vitesses d'air dans une ordonnance d'obstacles de configuration alignée, $W/H = 1.5$, Mavroidis (2000).

De même, les expériences en soufflerie atmosphérique par Brown et al. (2000) indiquent que l'écoulement est verticalement plus homogène après une distance de 3^{ème} ou 4^{ème} rangée de rue canyon. Les modélisations numériques par Hanna et al. (2002) confirment ces résultats et notent que dans les deux types de configuration, la condition d'équilibre n'est atteinte qu'après la troisième ou quatrième rangée de l'ordonnance. Lien et Yee (2004) et Santiago et al. (2006) démontrent également que ce n'est qu'à partir du quatrième canyon urbain que des modèles d'écoulement d'air similaires sont créés et qu'un vortex stationnaire s'établit dans les rues d'une ordonnance cubique régulière, avec un espacement $W/H=1$.

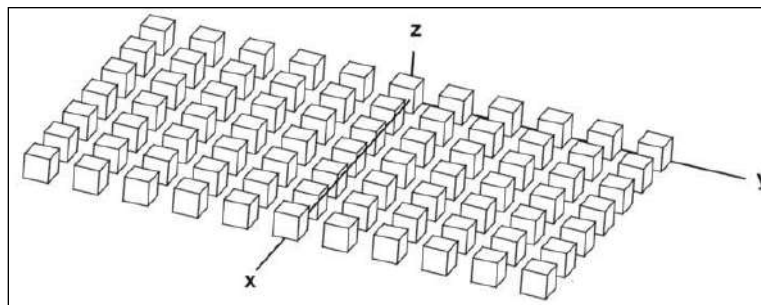


Fig. III- 41. Vue en 3-D montrant la matrice de bâtiments cubiques (7x11) étudiés par simulation numérique et en soufflerie atmosphérique par Lien et Yee (2004).

Ces résultats suggèrent que les propriétés de ventilation urbaine ne sont pas uniformes à travers les rues canyons. La ventilation des rues diffère selon que ces rues soient situées en périphérie ou au centre du tissu urbain (centre géométrique) et selon qu'elles soient dans l'axe des vents ou au contraire à l'abri. Dans les structures denses et compactes caractérisées par un régime d'écoulement rasant, les écoulements d'air deviennent stables, non turbulents, à partir de la quatrième ou cinquième rangée de rue. Les échanges d'air verticaux avec l'écoulement libre au-dessus des toits sont par conséquent fortement réduits, et les rues canyons faiblement ventilées.

Dans le cas d'un vent incident oblique (45°), Macdonald et al. (1997) notent que la vitesse du vent se stabilise beaucoup plus vite dans l'ordonnance et est approximativement réduite à 60% de sa valeur libre.

III- 4.2.4. Nature de l'écoulement à l'intérieur de l'ordonnance urbaine régulière.

Des écoulements tridimensionnels complexes sont observés à l'intérieur des ordonnances urbaines régulières. L'analyse de l'écoulement horizontal dans les rues par Santiago et al. (2006) révèle en effet des modèles d'écoulements qui pénètrent dans le canyon "latéralement" à partir de la partie supérieure (à $Z/H = 0.75$ et 0.5) et ressortent latéralement par la partie inférieure (au voisinage du sol, $Z/H = 0.25$). Il en résulte une structure de vortex particulière dont le centre est à $\frac{3}{4}$ de la hauteur du canyon et des mouvements descendants plus forts que les mouvements ascendants. Ces modèles d'écoulements diffèrent des structures d'écoulements bidimensionnels habituellement décrites dans la littérature et confirment les observations numériques de Pan et al. (2007) qui relèvent l'existence d'un nouveau modèle d'écoulement latéral dans deux ordonnances régulières de bâtiments cubiques (3×3 et 5×5) (Fig. III- 42).

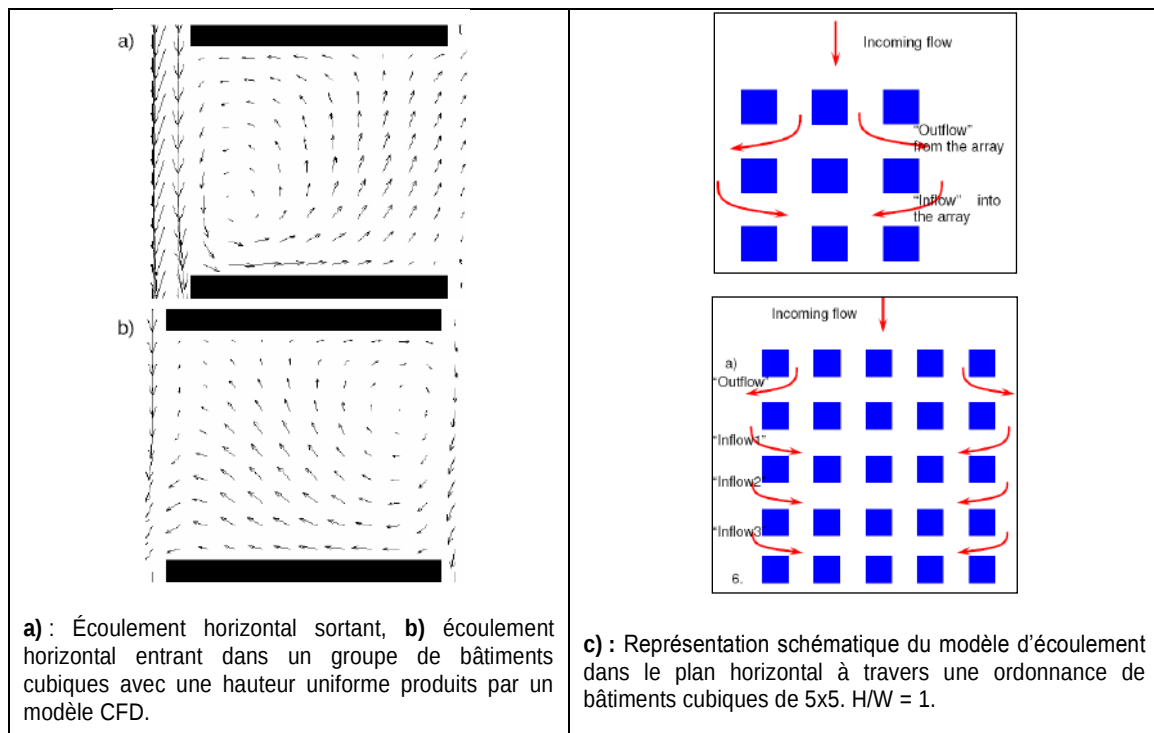


Fig. III- 42. Écoulements tridimensionnels complexes observés à l'intérieur des ordonnances urbaines régulières (Pan et al. 2007).

Sur le plan horizontal, ce nouveau modèle d'écoulement "latéral" montre un écoulement sortant de la trame des rues vers l'extérieur et un autre écoulement affluant vers l'intérieur de la trame. Ce modèle d'écoulement latéral, "entrant/sortant" des deux côtés de l'ordonnance, est identique, indépendamment de la hauteur et est accentué par la présence d'un grand bâtiment au centre de l'ordonnance.

Ces modèles d'écoulements latéraux favorisent les échanges d'air avec l'environnement extérieur et peuvent être de ce fait bénéfiques pour la ventilation urbaine. Néanmoins, ces phénomènes sont très peu connus et nécessitent d'être étudiés de manière plus exhaustive.

En résumé, une trame régulière, constituée d'un groupe de bâtiments de même taille, de même orientation et d'espacement entre bâtiments identique, induit des modèles d'écoulements caractérisés par un système de vortex, de cavité, de sillages et de canalisations qui se développent en aval des bâtiments et entre les intervalles de l'ordonnance. Ces modèles sont fonction de la direction du vent par rapport à la trame urbaine et dépendent de la manière dont sont disposés et organisés les éléments de rugosité. Il s'avère que dans deux types de configuration alignée et en quiconque, les régimes de distribution des écoulements sont fondamentalement différents puisque dans la configuration en quiconque, l'écoulement est dévié par les obstacles voisins alors que dans une configuration alignée, des canalisations sont créées à travers lesquelles l'écoulement peut circuler, avec des vitesses de vent élevées. L'effet d'abri est de ce fait plus important dans une configuration en quiconque, avec une répartition des écoulements plus homogènes à travers les intervalles et dans les sillages des obstacles. Cet effet d'homogénéité est d'autant plus important que les vents incidents sont obliques et que les conditions d'équilibre et de stabilité sont vite atteintes.

En termes de ventilation urbaine, la configuration en quiconque semble plus favorable à la ventilation urbaine que celle alignée qui induit des effets de canalisation le long des rues canyons. Il s'avère par ailleurs que dans les structures urbaines denses et régulières (caractérisées par des rues de même géométrie urbaine), les propriétés de ventilation urbaine ne sont pas uniformes à travers les rues canyons. La ventilation des rues diffère selon que ces rues soient situées en périphérie ou au centre du tissu urbain (centre géométrique) et selon qu'elles soient dans l'axe des vents ou au contraire à l'abri. La vitesse du vent diminue graduellement avec la distance à partir du périmètre de l'ordonnance jusqu'à ce que la condition d'écoulement moyen stable soit atteinte. Dans les structures denses et compactes caractérisées par un régime d'écoulement rasant, ces résultats suggèrent qu'à partir de la quatrième ou cinquième rangée de rue, les écoulements d'air deviennent stables, non turbulents, les échanges d'air verticaux avec l'écoulement libre au-dessus des toits fortement réduits et les rues canyons confinées. Ces résultats suggèrent qu'en plus de la géométrie urbaine exprimée par la densité du plan ou le prospect H/W et le rapport H/L, l'emplacement centre/périphérie doit être pris en considération dans les études sur les écoulements d'air et la ventilation dans les villes. Dans un tissu urbain dense, les propriétés de ventilation urbaine devraient être particulièrement améliorées au niveau de ses espaces centraux.

Afin de mieux appréhender la complexité des phénomènes d'écoulements d'air en milieu urbain, de grandes "campagnes" de terrain ont été entreprises au cours de cette dernière décennie, ayant pour principale caractéristique l'intégration de différentes échelles spatiales dans leurs études.

III- 5. Travaux expérimentaux récents sur les écoulements d'air à l'échelle du quartier.

L'approche expérimentale sur site constitue actuellement le moyen le plus réaliste de développer la compréhension des mécanismes physiques influençant le comportement de l'air dans un environnement urbain complexe. La base des connaissances actuelles se compose de grandes études entreprises en Amérique du Nord et en Europe au cours de ces dix dernières années.

En Europe, ces études incluent l'expérience urbaine de Zurich (Rotach 1995), l'expérience de couche limite urbaine de Basel (BUBBLE) (Rotach et al. 2005), l'expérience sur site de Marseille (Grimmond et al. 2004, Mestayer et al. 2005) et l'expérience de dispersion des polluants d'air à Londres (DAPPLE, Neophytou et Britter 2005). En revanche, les études de terrain entreprises dans les cinq dernières années en Amérique du Nord intègrent l'expérience URBAN 2000/VTMX à Salt Lake City, le projet Joint Urban 2003 à Oklahoma City (Allwine et al. 2004) et les études MSG05 et MI05 à Manhattan en 2005 (Allwine et Flaherty, 2006/2007). Ces expériences sont conduites en vue d'analyser les phénomènes de dispersion et de transport des polluants en milieu urbain et pouvoir développer et évaluer des modèles numériques sur la base des données collectées. Dans la plupart des cas, les écoulements d'air y sont analysés aux trois échelles climatiques en interaction que sont les échelles méso (ville), locales (quartiers) et micros (rue, bâtiment).

Le tableau ci-dessous (III- 7) présente uniquement les études où les deux échelles de la rue et du quartier sont intégrées.

Tableau III- 7. Principales campagnes de mesure effectuées en Europe et en Amérique du Nord durant ces 10 dernières années.

Site	Étude	Caractéristiques	Référence de l'étude	date
Basel, Suisse	Basel urban boundary layer experiment (BUBBLE), SARAH	PA, P1, P2, P3, P4.	Rotach et al. (2005)	2001–02
Oklahoma City, USA	Joint Urban 2003	PA, E1, E2, E4.	Allwine (2004)	2003
Phoenix, USA	CAP-LTER NP,	E1, E2, E3, E4, E5	Brazel et al. (2000)	1998
Londres, Angleterre.	DAPPLE	E1, E2.	Britter (2005); Robins (2004)	2002-06
New-York, USA.	MSG05/MID05	E1, E2, E3.	Hanna et al. (2007)	2005
Salt Lake City, USA	VTMX/Urban 2000	PA, E1, E2, E4, E5.	Allwine et al. (2002); Doran et al. (2002)	2000

Légende: PA : objet d'étude Pollution de l'air. E1 : échelle du bâtiment ou de la rue canyon; E2 : échelle du quartier ou échelle locale; E3 : échelle de plusieurs quartiers; E4 : échelle de la ville ou échelle méso; E5 : échelle de la région. Source (modifié après Grimmond 2006).

III- 5. 1. L'expérience URBAN 2000.

Une grande campagne de mesures appelée URBAN2000 est réalisée à Salt Lake City, en Utah (USA). L'objectif de l'étude est de collecter les données climatiques nécessaires pour la validation de modèles numériques en mesure de prédire le transport et la dispersion d'agents toxiques en milieu urbain ainsi que de déterminer les principaux paramètres influents. En termes de logistiques et d'équipements, cette campagne constitue une des premières et plus grandes expériences urbaines entreprises durant ces trente dernières années aux États-Unis. Elle couvre les trois échelles en interaction que sont les échelles du bâtiment, du quartier et de la ville (Shin et al. 2000). L'expérience VTMX (Vertical Transport and Mixing) (Doran et al. 2000), conduite simultanément à travers une plus grande échelle (échelle régionale du bassin de Salt Lake City), a pour but d'analyser l'évolution de la basse couche de l'atmosphère au cours de la nuit et comprendre les mécanismes fondamentaux du transport vertical et de mixage dans les couches d'inversions thermiques. Le bassin de Salt Lake Valley (SLV) est choisi en raison de ses particularités topographiques (présence de montagnes et d'un lac) qui génèrent au cours de la nuit des mouvements d'air froids contrariant le cycle des vents synoptiques (forces mécaniques).

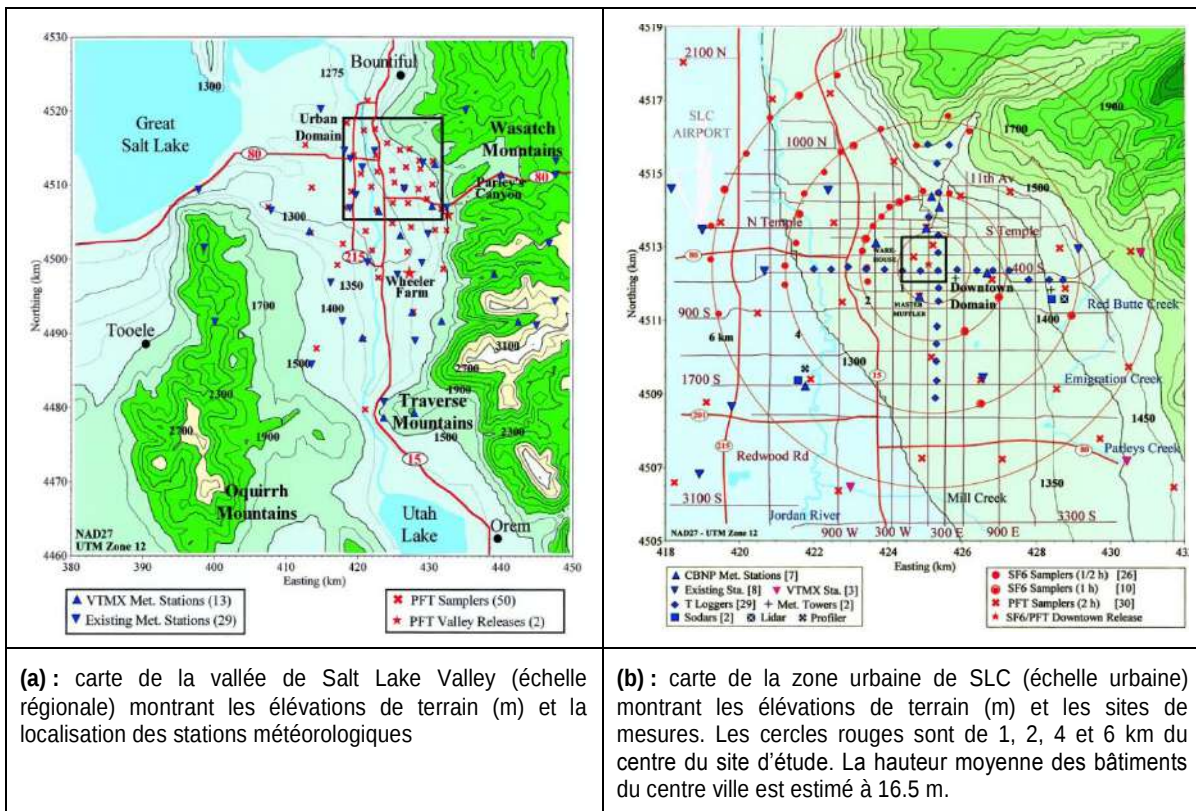


Fig. III- 43. Protocole de mesure de la campagne URBAN2003.

La campagne de mesures URBAN2000 est conduite durant le mois d'octobre 2000 et est accentuée par sept périodes d'opérations intensives de nuit durant lesquelles des mesures étendues sont effectuées et des traceurs à gaz lâchés à travers la ville de Salt Lake City. Les mesures climatiques effectuées incluent des échantillons de surface, des profils verticaux de température et de vent, des mesures de température de l'air et des mesures de turbulence et de vitesse de vent autour des bâtiments sélectionnés. La campagne VTMX qui coïncide avec la

seconde campagne de mesures URBAN 2000, déploie de son côté de nombreux instruments de mesures autour du bassin de SLV (domaine régional).

À l'échelle régionale, les résultats de l'étude de terrain montrent des modèles d'écoulement de vents locaux fort complexes, influencés par les effets du lac, la surchauffe et le refroidissement de la vallée et des montagnes environnantes ainsi que par des interactions avec les systèmes de vent synoptiques. Des nappes d'air froides (inversion thermique supérieure à 5°K) et des modèles de divergence et de convergence complexes sont également observés, particulièrement sous conditions de vents synoptiques faibles (vitesses de vent inférieurs à 2-3 m/s). La comparaison des températures d'air à l'intérieur de la ville indique par ailleurs un refroidissement nocturne dans la ville associé aux masses d'air froides provenant des canyons (Fig. III- 44).

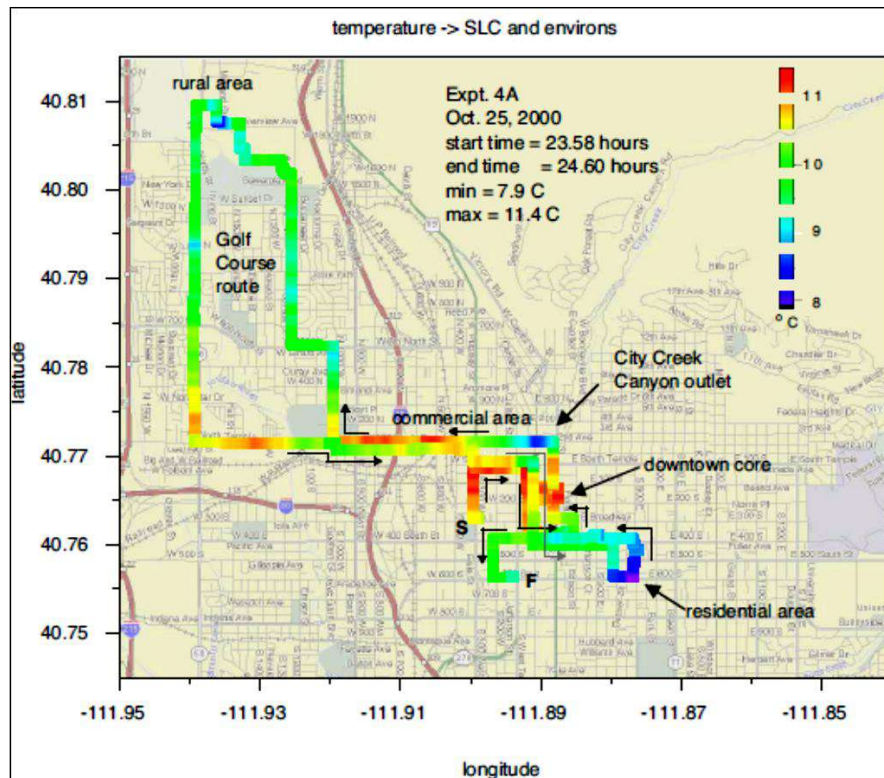


Fig. III- 44. Les mesures de température effectuées entre 11:35 pm et 12:36 am à travers des transverses dans la ville. Les températures les plus élevées sont mesurées dans le centre ville mais des températures plus froides, associées à un drainage provenant d'un canyon sont observées dans la zone résidentielle de City Creek canyon. (Brown et Pardyjak 2001).

Les simulations numériques illustrent quant à elles l'effet du relief sur les écoulements d'air nocturnes dans la ville : l'écoulement à travers l'aire du centre ville (pour des conditions typiques d'hiver) serait une combinaison complexe de courants de drainage nocturnes. L'effet des obstacles urbains sur les écoulements de drainage nocturnes est également analysé. Les résultats indiquent que si la zone urbaine du centre ville n'entrave pas l'écoulement des masses d'air froides, elle perturbe néanmoins la stagnation de l'air. Qualitativement, la circulation de l'air est similaire dans la simulation avec ou sans les effets des obstacles urbains, néanmoins, l'écoulement de drainage provenant des montagnes est d'autant plus faible que les obstacles urbains sont importants.

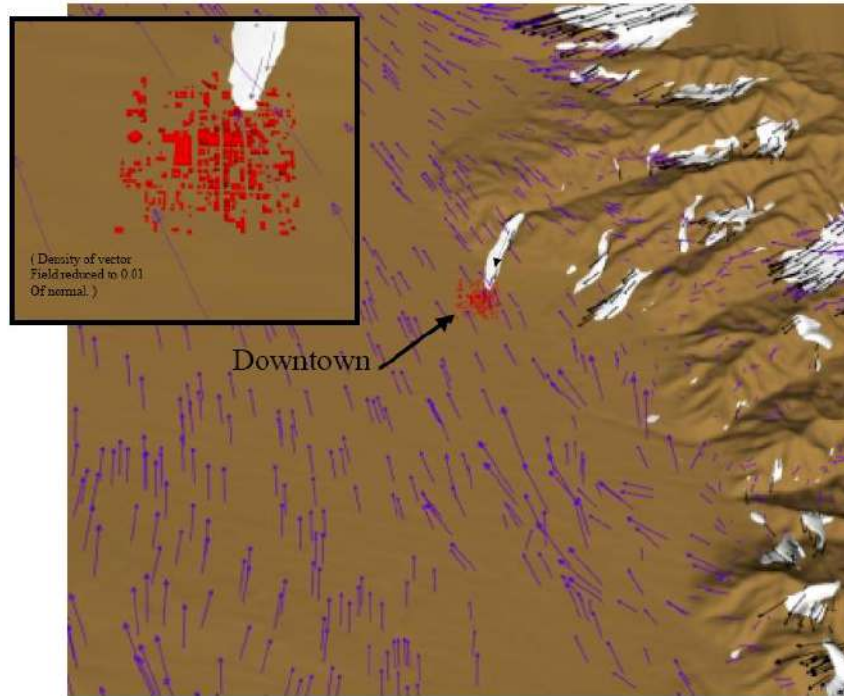
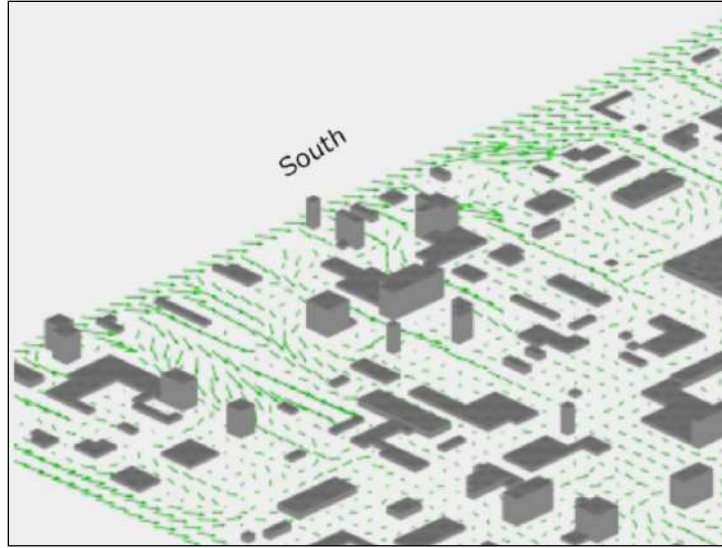


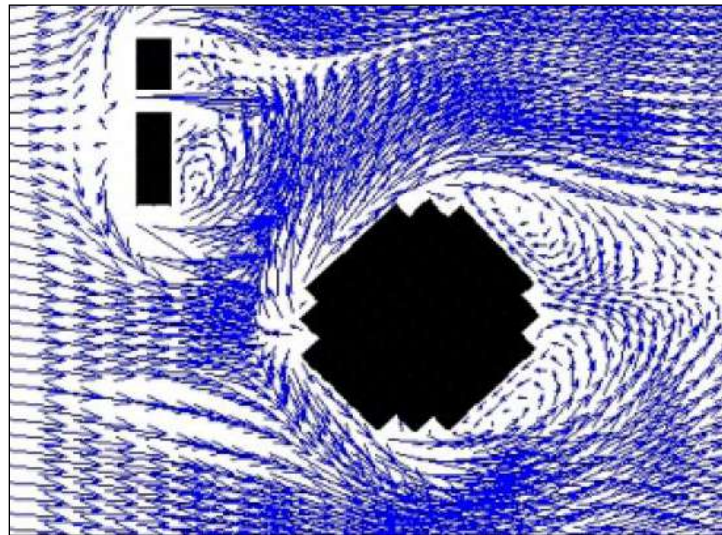
Fig. III- 45. La simulation du bassin de Salt Lake Valley, dans la nuit. La figure montre la complexité des champs aérodynamiques dus à l'air froid qui vient des montagnes et du canyon qui entoure la ville. Le zoom est sur la ville et montre les écoulements de drainage qui pénètrent dans la ville.

Aux échelles plus fines du quartier et du bâtiment, les observations de terrain et les simulations numériques révèlent l'existence de champs aérodynamiques complexes qui se développent dans et autour des groupes de bâtiments. Des effets de canalisation sont observés entre les bâtiments. Les effets d'une petite échelle tels que la pente de la toiture, le chauffage différentiel des surfaces des murs et de sol et la porosité des structures des bâtiments peuvent être importants et changer le caractère de l'écoulement (structure de l'écoulement) et de la dispersion autour d'un bâtiment (Smith et al. 2000).

Des phénomènes familiers aux climatologues tels que les forces de Coriolis, la stratification thermique et le bilan énergétique d'une surface sont encore importants à l'échelle urbaine.



(a). Simulation à l'échelle urbaine montrant les vecteurs vents autour des bâtiments dans le centre ville de Salt Lake City. Clairement, des modèles de vent complexes se développent entre les groupes de bâtiments ordonnés selon une disposition irrégulière.



(b). Simulation à l'échelle du bâtiment montrant un double vortex sur le côté sous le vent qui est légèrement biaisé en raison de la présence de deux petits bâtiments.

Fig. III- 46. Simulations des écoulements d'air aux échelles urbaine et architecturale dans le centre de Salt Lake City.

En conclusion, l'expérience URBAN2000 illustre les effets de l'inclusion des aires urbaines sur les champs d'écoulement à l'échelle méso et met en exergue :

- la forte imbrication des échelles (méso, urbaine et architecturale) dans le comportement aéraulique en milieu urbain,
- l'effet de la topographie sur les écoulements d'air en milieu urbain, notamment au cours de la nuit. Les masses d'air induites au cours de la nuit peuvent réduire les températures d'air nocturnes.

Aux échelles plus fines des bâtiments individuels et des groupes de bâtiments, l'étude relève des modèles d'écoulements complexes en fonction de la géométrie et la disposition des bâtiments telle la pente de toiture ou l'espacement entre ces bâtiments.

III- 5. 2. L'expérience Joint Urban 2003.

L'expérience Joint Urban 2003 (JUT) prend place en juillet 2003 à Oklahoma City et est complémentaire à l'expérience Urban 2000 (Allwine et al. 2002) conduite à Salt Lake City en octobre 2000. Tout comme pour la campagne de terrain Urban2000, l'objectif principal de l'étude est la collecte de données météorologiques en vue de comprendre les processus physiques gouvernant la dispersion aux échelles méso, locale et celle du bâtiment individuel (échelle architecturale). Pour ce faire, l'étude s'est basée sur la caractérisation :

- des écoulements dans, autour et au-dessus du centre ville (CBD) en vue du développement et la validation des modèles numériques;
- des écoulements dans une rue canyon intégrant les effets du trafic sur la turbulence,
- du bilan énergétique de surface dans la zone urbaine,
- la dispersion de traceurs dans et à l'extérieur de bâtiments individuels,
- et enfin, la dispersion de traceurs à travers le CBD (Central Business District) et à l'extérieur, à 4 km de la source en vue du développement de coefficients de diffusion urbaine et de modèles à valider.

Un vaste réseau d'instruments météorologiques est déployé à travers le périmètre d'étude, assurant une large couverture spatiale, verticale et horizontale. Les vents sont mesurés sur 200 sites répartis dans le centre de la ville (hauteur moyenne de 15 m) et dans sa zone suburbaine. À l'échelle urbaine, les résultats de l'étude montrent un écoulement d'air extrêmement complexe, avec des caractéristiques tels que des séparations de l'écoulement au niveau des arrêtes, des régions de stagnation locale en amont des bâtiments, des tourbillons de différente taille et des sillages de bâtiment variés. Les effets de canalisation observés sont plus importants dans les rues canyons tandis que dans des espaces plus ouverts, ces effets sont moindres.

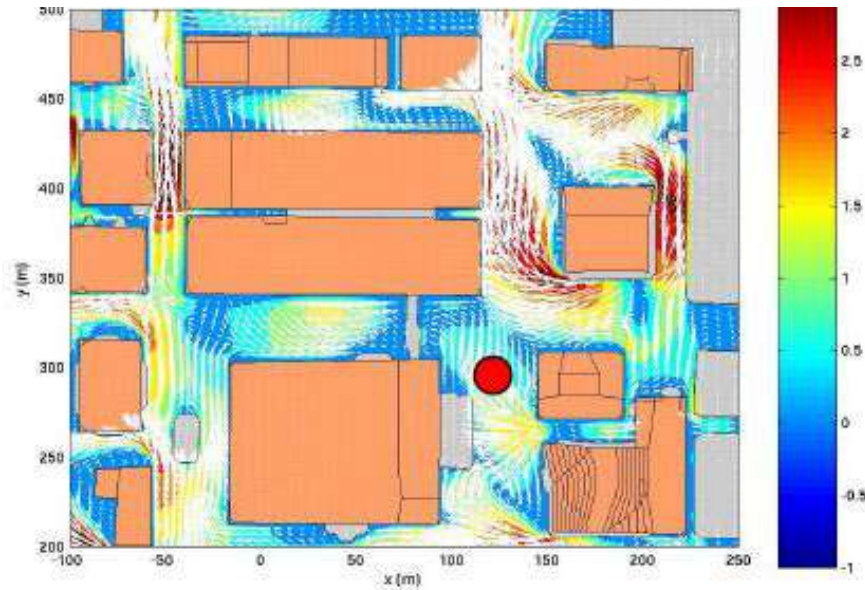


Fig. III- 47. Les vecteurs vents prédits et les vitesses de vent sur un plan $z = 2\text{ m}$ durant une journée d'observation intense, illustrant la complexité de l'écoulement dans le centre de OKC (Chan et Lundquist 2006).

Dans tous les cas, le régime du vent semble extrêmement complexe aux intersections des rues et peut résulter de sillages ou de tourbillons au voisinage des bâtiments. Apparemment, le modèle d'écoulement aux angles des rues peut changer d'une direction canalisée (vents dans la même direction sur les deux côtés de la rue) à un écoulement bidirectionnel (Fig. III- 47). Cette direction bilatérale des vents sur les côtés opposés des rues montre le développement d'un tourbillon horizontal aux angles de la rue (Brown et al. 2004). Ces observations confirment les résultats des recherches entreprises à l'échelle des rues et des ordonnances régulières et mettent en exergue l'importance des effets de canalisation et des vortex d'angles dans la ventilation des rues.

Des relations entre vitesses de vent sont établies dans les rues canyons et au-dessus des toits des hauts bâtiments du centre ville. Ces résultats sont également observés par Hanna et al. (2003) à Salt Lake City (Urban 2000) et seront confirmées dans une autre étude conduite à Madison Square Garden à Manhattan en 2005 (Hanna et al. 2007).

III- 5. 3. L'expérience Madison Square Garden (MSG05).

L'objectif principal de l'expérience de Madison Square Garden-2005 (MSG05) est l'étude de la dispersion des agents biochimiques dans les rues canyons profondes de la ville de New-York (hauteur moyenne des bâtiments : $H=60\text{ m}$) ainsi que l'obtention d'un ensemble de données de terrain qui peuvent être appliquées à d'autres cas.

Le site d'étude correspond à un périmètre urbain de $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ autour de MSG dans le centre de Manhattan (New-York). Les mesures, entreprises en mars 2005, sont collectées sur une période de deux jours à partir de 5 sites au niveau des rues canyons et 2 sites au sommet des toits. La zone urbaine délimitée se caractérise par des bâtiments de hauteur moyenne de 60 m et la présence de tours ou gratte-ciels dont la hauteur avoisine les 250 m . Cette expérience est complétée en août par une seconde opération dans le centre de Manhattan (MID05) avec le déploiement d'une instrumentation plus importante (10 sites au niveau des rues et cinq sites sur les toits) dans un périmètre urbain plus large ($1\text{ km} \times 1\text{ km}$) et sur une période de mesure plus longue (six jours).

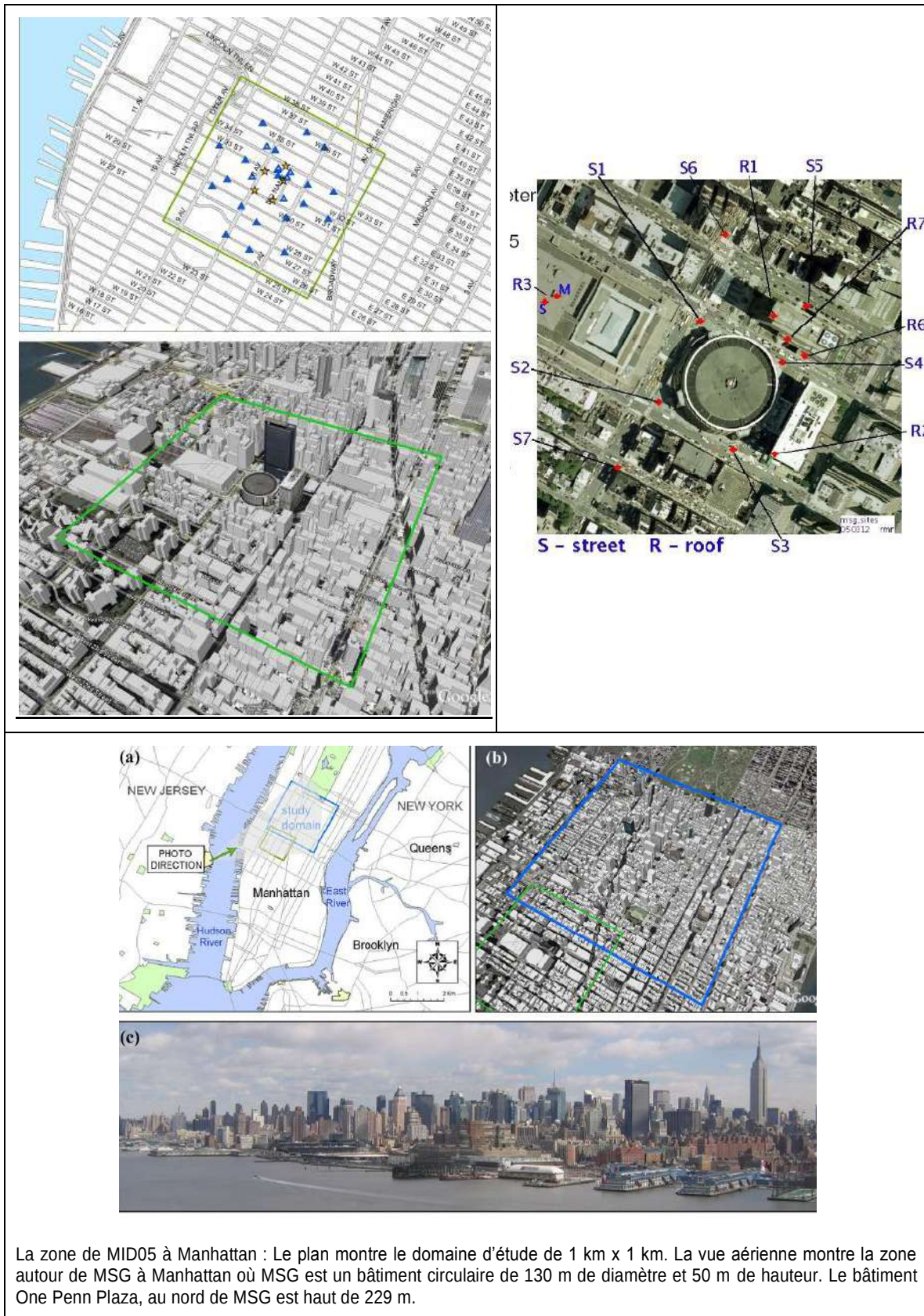


Fig. III- 48. La zone d'étude de MSG05 à Manhattan (NY, USA).

Les modèles numériques calculés sur toute la zone d'étude (Hanna et al. 2006, Camelli et al. 2006) confirment les observations de terrain et soulignent la forte influence des tours et gratte-ciels sur l'écoulement du vent au voisinage de la surface. Les grands bâtiments abattent l'écoulement en altitude sur les côtés face au vent (mouvement descendant) et créent un "effet cheminée"¹ sur les façades sous-le-vent (mouvement ascensionnel dû à une différence de température). Les magnitudes de ces vitesses verticales sont de quelques dixièmes de m/s, quoique des valeurs plus larges (1 m.s^{-1}) soient parfois simulées au voisinage des grands bâtiments. Ces mouvements verticaux sont associés à des modèles d'écoulements divergents et convergents au niveau de la rue qui peuvent s'étendre sur un bloc ou deux à partir de la base de l'édifice. Ces mouvements peuvent favoriser les échanges d'air verticaux et améliorer de ce fait la ventilation urbaine au niveau de la rue. Au voisinage du sol, ces mouvements peuvent créer cependant des effets mécaniques indésirables, effets non abordés dans le cadre de l'étude.

Les résultats obtenus sont confrontés aux observations faites durant l'expérience Joint Urban 2003 (JU2003) à Oklahoma City et des relations de similarité urbaine sont établies avec d'autres villes nord-américaines (Hanna et al. 2007). Il ressort que :

- la vitesse du vent moyenne et sa direction sur les toits des grands bâtiments (gratte-ciels) en centre ville est approximativement égale à celle des vents observés à l'aéroport, à 10 m au-dessus du sol,
- la vitesse moyenne du vent au niveau de la rue représente approximativement 1/3 de la vitesse du vent moyenne sur les toits des grands bâtiments en centre ville,
- la direction du vent au niveau de la rue dans le centre d'une ville peut être dans n'importe quelle direction (non nécessairement identique à la direction du vent au-dessus des toits des bâtiments) en raison des phénomènes de convergences et de divergences créés près de la surface du sol. Ces phénomènes sont créés dans les zones de re-circulation de l'air, au voisinage des grands bâtiments.

Ces multiples observations demeurent toutefois valables uniquement à l'échelle des grands centres urbains comprenant de hauts bâtiments (60 m) et des gratte-ciels (200- 250 m). Elles ne peuvent être appliquées dans les villes européennes et encore moins dans les villes traditionnelles de type vernaculaire, caractérisées par une forte compacité urbaine, un tracé géométrique irrégulier et des hauteurs de bâtiments moyennes n'excédant pas les 10 mètres.

III- 5. 4. L'expérience BUBBLE.

Le projet DAPPLE 2002-2006 (**D**ispersion of **A**ir **P**ollution and its **P**enetration into the **L**ocal **E**nvironment) est une étude de cas sur l'écoulement d'air et la dispersion des polluants dans et autour d'une intersection de rues dans le centre de Londres (intersection de "Marylebone Road" et "Gloucester Place"). La zone entourant l'intersection de la place Gloucester et la rue Marylebone se caractérise par des segments de rues courts, de différents prospects, de grands bâtiments isolés et des espaces ouverts. Elle intègre de ce fait les principaux éléments représentatifs de l'urbain. Le projet intègre dans ses objectifs la compréhension des processus d'émission de polluants des véhicules et l'exposition des individus. Il se base à la fois sur des mesures sur site, des expériences en soufflerie atmosphérique et des calculs numériques et s'appuie de ce fait sur :

¹ Mouvement ascensionnel de l'air dans un passage vertical, provoqué par sa densité plus faible en raison d'une différence de température, impulsion imprimée à un gaz chauffé qui le fait monter dans un passage vertical, par exemple une cheminée, un espace restreint ou un puits d'escalier

- une collecte d'une série de données de terrain sur une période de 4 à 8 semaines de l'écoulement et la turbulence autour de l'intersection des rues, avec des mesures de pression sur les surfaces des bâtiments,
- la mesure des paramètres de l'écoulement et la turbulence avec une plus grande résolution spatiale dans une soufflerie atmosphérique pour un ensemble de conditions représentatives d'une gamme de conditions rencontrées sur le terrain, pour des modèles détaillés et réduits de la forme et la configuration des bâtiments et pour des ordonnances de bâtiments génériques,
- la déduction de la manière dont l'infrastructure urbaine détermine la dispersion des polluants.

Des mesures sur site sont effectuées du 28 avril au 23 mai 2003 et du 19 avril au 13 juin 2004. Des études de traceurs additionnelles sont conduites en novembre 2004.

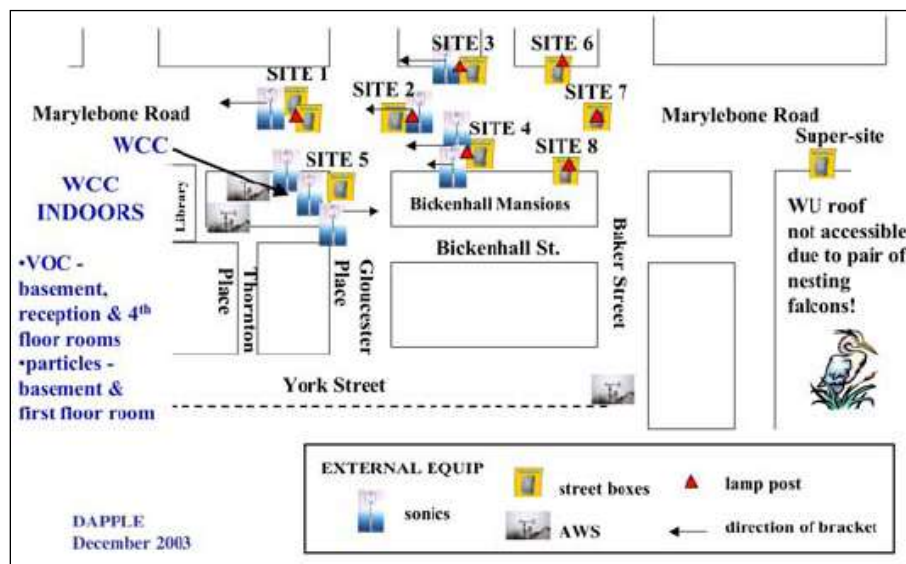


Fig. III- 49. Le plan du site d'étude montrant le déploiement de l'instrumentation.

La combinaison des mesures sur sites et de la visualisation (Carpentieri et Robins 2009) révèle la nature complexe de l'écoulement dans les rues urbaines, en particulier, aux intersections où un écoulement tridimensionnel est observé et d'importants échanges sont opérés entre les rues. Ces processus sont instables et la ventilation de la rue est fortement variable et dépend de la direction du vent. Ainsi, des changements dans la direction du vent, aussi minimes soient-ils, peuvent produire un impact important sur les modèles d'écoulement et l'air est canalisé dans différentes directions à travers le réseau des rues.

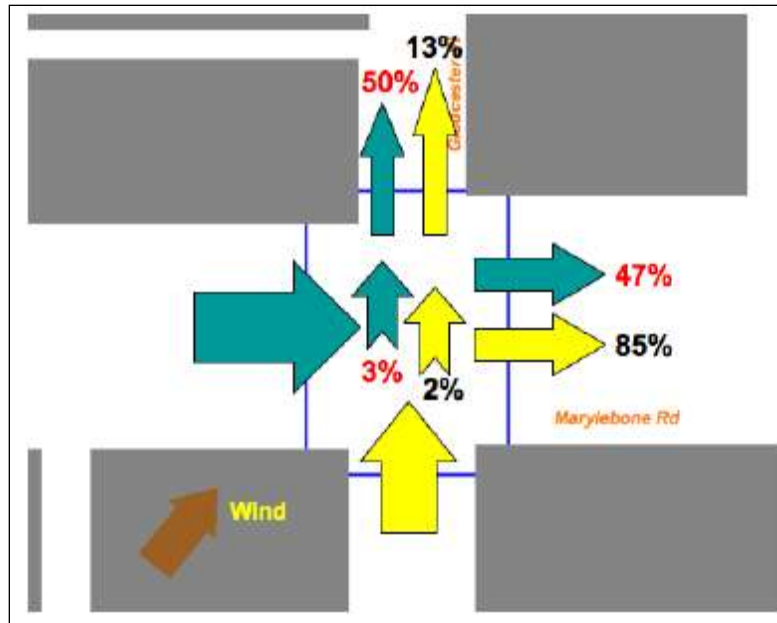
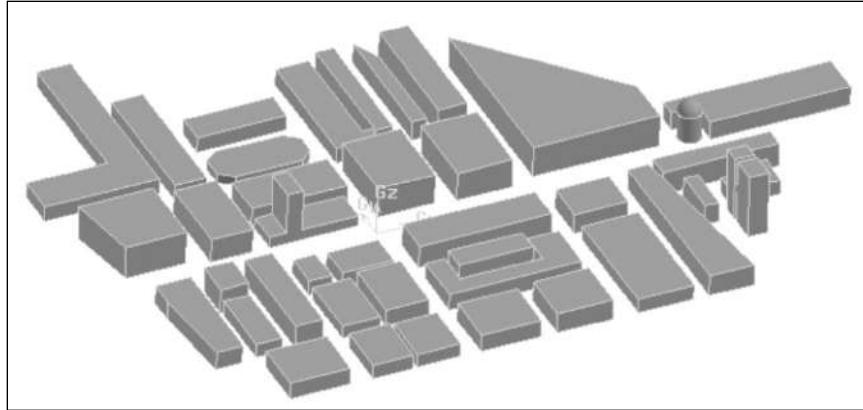
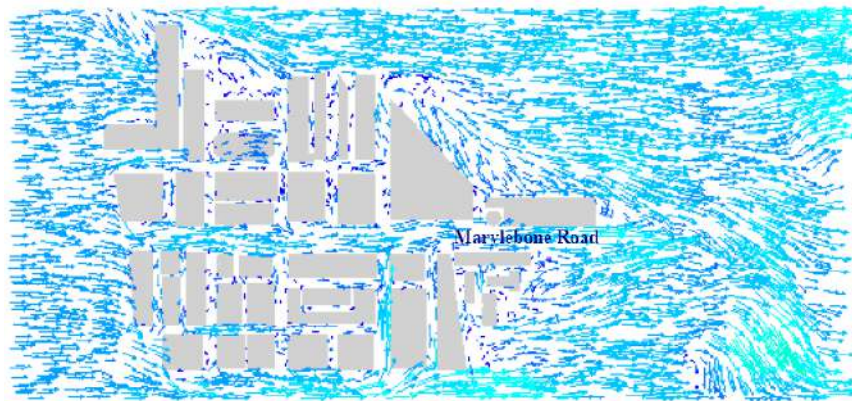


Fig. III- 50. Bilan d'échange de masse exprimé en termes des flux sortants. (Carpentieri et Robins 2009).

L'analyse qualitative des modèles numériques de l'écoulement tridimensionnel autour du quartier central de Marylebone (Neophytou et Britter 2005) montre par ailleurs que l'écoulement est dominé par des structures tourbillonnaires importantes dont la forme varie en fonction des particularités des obstacles urbains. Ces structures tourbillonnaires forment des échanges d'écoulements d'air systématiques entre l'intérieur de la canopée urbaine et au-dessus mais aussi à l'intérieur même de la canopée, sur de petites distances, ce qui a pour effet de favoriser la ventilation des rues courtes caractéristiques du quartier. Les modèles tourbillonnaires semblent provenir des courts canyons en aval des bâtiments et diffèrent des écoulements bidimensionnels types en présence dans les canyons isolés. La caractéristique-clé de ces écoulements est la présence de sillages d'obstacles formés lorsque l'air s'écoule au-dessus et autour des bâtiments et la visualisation de l'air montre comment les mouvements d'air dans la rue canyon peuvent être induits en fonction des bâtiments situés en amont mais aussi en aval, les effets aérodynamiques des bâtiments proéminents étant les plus influents. Ces mouvements tourbillonnaires sont importants dans la ventilation et l'évacuation des masses d'air chaudes et définissent une propriété dynamique de la surface urbaine qui est sa "respirabilité" (Neophytou et Britter 2005). Ces résultats confirment les études numériques et les observations de terrain sur l'effet de la longueur du canyon L sur la ventilation des espaces urbains.



(a). Le modèle de la zone centrale de Marylebone qui a été représentée dans la simulation CFD.



(b). Les vecteurs de vitesse de vent sur une surface horizontale, à une hauteur $z=H/2$.

Fig. III- 51. Écoulement tridimensionnel autour du quartier central de Marylebone (Neophytou et Britter 2005)

Ainsi, pour conclure, l'étude des écoulements et de dispersion dans la zone centrale de Londres a permis de révéler de nombreux mécanismes importants responsables de la ventilation urbaine. Ces mécanismes intègrent la circulation de l'air intermittente dans les rues, les champs d'écoulement complexes et instables aux intersections de rues et les échanges verticaux et horizontaux responsables de la "respirabilité" de la ville. De tels échanges sont essentiellement gouvernés par la géométrie du bâtiment ou sa longueur L . Ces résultats confirment les études précédentes sur l'importance de la longueur L dans les mécanismes de ventilation de la rue canyon.

Applicables à de nombreux cas de villes européennes caractérisées par une configuration urbaine similaire, ces conclusions sont-elles également valables dans les structures urbaines traditionnelles? Cet aspect mérite d'être exploré vu son importance dans l'amélioration de la ventilation des espaces urbains denses.

Plusieurs "grandes" campagnes de mesure sont effectuées sur les écoulements d'air en rapport avec la dispersion des polluants et la qualité de l'air en Amérique du Nord et en Europe. Ces études, toutes basées sur une importante résolution spatiale, mettent en exergue la complexité des écoulements en milieu urbain et soulignent l'importance de l'emboîtement des échelles dans la compréhension de ces phénomènes. Une variété de conditions d'écoulement existe selon la localisation dans le groupement urbain et la direction du vent. Des zones où l'écoulement est

canalisé, dévié, déplacé, accéléré, stagné, ou en re-circulation peuvent être observées. Des échanges importants prennent place dans les intersections de rues et les grands bâtiments créent des écoulements additionnels qui accentuent les échanges entre l'intérieur de la rue et l'écoulement au-dessus des toits. Tous ces effets se combinent pour créer un écoulement d'air local, fonction de la forme des bâtiments et leur disposition dans la trame urbaine.

Toutefois, dans toutes ces études, et à l'exception du projet URBAN 2000/VTMX, les effets de la topographie urbaine ne sont pas intégrés et les cas d'études choisis correspondent tous à des sites plats. L'effet d'une topographie urbaine complexe n'est pourtant pas négligeable et peut modifier fortement les régimes d'écoulement et les mécanismes de ventilation urbaine.

Ces études à l'échelle du quartier permettent de confirmer de nombreuses conclusions obtenues à l'échelle de la rue canyon, à savoir :

- importance de la géométrie du bâtiment ou de la longueur du canyon (L) dans la ventilation de la rue,
- importance de l'emplacement de la rue canyon dans la structure urbaine : effet de la surface urbaine en amont mais aussi en aval de la rue,
- importance de l'emboîtement des échelles,
- importance de l'hétérogénéité des hauteurs : les bâtiments hauts dévient et créent des re-circulations au niveau de la rue canyon,

Conclusion.

En raison de la difficulté inhérente à réaliser des campagnes expérimentales de terrain, la plupart des connaissances sur les écoulements d'air en milieu urbain proviennent d'études expérimentales en soufflerie et des modélisations numériques. Ces études suggèrent que les caractéristiques-clés des écoulements d'air peuvent être déterminées à partir de la géométrie relative de la rue canyon, et en particulier à partir du prospect H/W . Le rapport H/L joue pourtant un rôle important dans la ventilation de la rue.

Dans la modélisation numérique, la plupart des travaux de recherche considèrent des rues canyons "idéales", caractérisées par des profils de rue symétriques et des toitures plates. De même, la plupart des observations de terrain sont menées dans des canyons urbains avec un prospect H/W égal ou supérieur à 1, et où l'écoulement ambiant est perpendiculaire à l'axe de la rue. Les rues sélectionnées sont caractérisées par une géométrie très simple (rue rectiligne, avec deux bâtiments identiques et parois planes) afin de s'approcher le plus possible de la géométrie urbaine telle qu'elle est considérée dans les modèles. Les "irrégularités" urbaines (forme, orientation) et les particularités architecturales (proéminence d'un bâtiment, forme de la toiture, encorbellements et passages couverts) sont peu étudiées. D'autre part, le caractère fluctuant du vent est rarement pris en considération. L'écoulement ambiant est en effet rarement perpendiculaire à l'axe de la rue, il change de direction constamment, ce qui rend la réalité plus complexe.

Les recherches se sont principalement intéressées à la structure verticale de l'écoulement (nombre de tourbillons et intensité) et aux conditions nécessaires pour son développement. Dans ces études, l'écoulement de l'air est supposé bidimensionnel et la structure de l'écoulement horizontale est souvent négligée. Les effets de canalisation de l'air sont pourtant importants et

peuvent être soit favorables pour la ventilation de la rue canyon ou au contraire constituer une gêne thermique et mécanique, notamment en hiver, sous conditions de vents forts.

Par ailleurs, les observations de terrain se limitent presque exclusivement à l'échelle de la rue canyon, prise isolément. Rares sont les expériences entreprises aux échelles plus larges et emboîtées du quartier et de la ville.

En outre, la plupart des études portent sur des problèmes de pollution et de dispersion des polluants. Les aspects liés au confort thermique et la ventilation demeurent peu étudiés, notamment dans les tissus urbains compacts, caractérisés par des propriétés de ventilation relativement faibles.

Enfin, il faut souligner que la plupart des études sur site menées jusqu'ici sont réalisées dans des villes nord-américaines ou européennes, dans un autre contexte climatique et géographique que celui des climats chauds et secs des zones arides. Ces zones nécessitent pourtant une meilleure compréhension des phénomènes aérauliques en raison de l'importance des vents forts et des conditions de températures extrêmes caractéristiques de ces climats. La ventilation urbaine est importante pour le refroidissement des masses d'air chaud tout comme la protection contre les vents forts et violents chargés de poussière et source de nuisance.

Il est donc important de confronter cette connaissance à des contextes réels, sur des cas d'étude complexes et appréhender les limites des résultats en laboratoire. Des points méritent une attention particulière. Ce sont :

- la prise en compte de l'interaction des échelles : ce qui revient à l'analyse des écoulements d'air aux échelles du quartier et de la rue canyon prise dans son contexte urbain,
- l'étude des écoulements d'air, à l'interface, entre les écoulements dans la sous-couche de rugosité, juste au-dessus des toits, et les re-circulations induites à l'intérieur de la canopée urbaine,
- la prise en compte de la complexité de la morphologie urbaine en analysant une entité traditionnelle, caractérisée par des irrégularités urbaines,
- la prise en compte de la complexité de la topographie urbaine,
- l'analyse de l'effet des écoulements d'air sur l'environnement thermique et les conditions de confort, notamment dans les climats chauds,
- enfin, la détermination de stratégies de ventilation à l'échelle urbaine et le développement d'outils de prédiction des vitesses d'air dans les rues canyons, applicables dans le processus de conception urbaine.

CHAP. IV. LE CONFORT THERMIQUE EN ESPACE EXTÉRIEUR.

Introduction.

Le confort thermique est un critère primordial pour la santé et le bien être des individus et pour le fonctionnement des espaces urbains extérieurs. En combinant l'architecture et l'urbanisme, il est possible d'adapter le vent, le soleil et les conditions thermiques des espaces urbains extérieurs, entre les bâtiments, afin d'améliorer ou de limiter les mouvements d'air et de fournir l'ensoleillement et/ou l'ombre nécessaire. Les avantages de modifier les conditions physiques de l'espace public seraient néanmoins mieux compris si l'on connaissait l'importance relative de ces conditions physiques sur le confort des usagers.

Traditionnellement, le confort dans les espaces extérieurs a été mesuré par l'évaluation du confort mécanique en fonction de la vitesse du vent. Différents critères ont été utilisés uniquement sur la base de la vitesse moyenne du vent ou sur une sorte de vitesse de vent de rafale, toutes les deux estimées avec une probabilité de niveau de dépassement. Cependant, au cours des dernières années, la qualité de l'environnement thermique extérieur est devenue aussi importante que celle de l'environnement thermique intérieur et plusieurs recherches (Metje et al. 2008, Eliasson et al. 2007, Walton et al. 2007, Nikolopoulou et Lykoundis 2006, Stathopoulos et al. 2004, Chun et al. 2004, Nikolopoulou et Steemers 2003, Givoni et al. 2003, Nagara et al. 1996) ont mis en évidence l'importance d'autres paramètres météorologiques tels que la température de l'air, l'humidité relative et le rayonnement solaire dans le niveau du confort thermique de l'homme (Soligo et al. 1998).

IV.1. Notion du confort thermique.

Le confort thermique de l'être humain correspond à une motivation simple mais permanente qui le pousse à rechercher, voir créer certaines situations climatiques, à en maintenir certaines d'entre elles et à les juger en termes d'agrément ou de désagrément. Le confort thermique se définit ainsi comme l'absence de "gêne thermique" (McIntyre 1980).

La définition la plus large est celle d'ASHRAE (2001) qui considère le confort thermique comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Cette définition n'est toutefois pas aisée à convertir en paramètres physiques puisqu'elle implique une notion subjective. La perception thermique d'un environnement peut être influencée en effet par des facteurs physiologiques, psychologiques et psychosensoriels qui varient d'un individu à un autre et qui le conduisent à exprimer le bien être de son état.

Le confort thermique n'est donc pas défini dans l'absolu. Il dépend du contexte et des caractéristiques individuelles. Il peut être conçu comme un processus adaptatif dynamique qui intègre les différents mécanismes physiques, physiologiques et psychologiques (Moujalled 2007).

L'approche physique du confort thermique représente l'homme comme une machine thermique et considère les interactions avec l'environnement en termes d'échanges de chaleur. L'approche physiologique s'intéresse par contre aux mécanismes d'autorégulation mis en jeu dans un environnement thermique. Quant à l'approche psychologique, elle se penche sur les phénomènes psychologiques et peut se servir des études empiriques afin de déterminer les relations entre les grandeurs physiques et physiologiques (par exemple température d'air, température cutanée) et leurs résultats sensoriels chez l'individu. La réponse de l'individu résulte de l'interaction entre ces différents mécanismes.

Cependant, avant tout, l'évaluation du confort thermique exige l'examen du bilan thermique du corps humain en extérieur afin de déterminer les principales variables climatiques agissant sur les mécanismes d'autorégulation mis en jeu par l'homme en vue d'atteindre le confort.

IV- 1.1. Le bilan thermique et les échanges de chaleur.

Sur un plan physique, le confort thermique correspond à un état d'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement. L'état d'équilibre est maintenu lorsque la chaleur générée par le métabolisme se dissipe, conservant une température de corps constante de 37°C (Fanger 1972). Tout gain ou perte de chaleur au-delà de cet équilibre génère la sensation d'inconfort.

Le principe de la conservation d'énergie aboutit à l'équation de bilan thermique suivante:

$$M = E_{ry} + E_{cd} + E_{cv} + E_{ps} + E_{hr} + E_{cr} + E_{sd} \quad (IV- 1)$$

avec,

M = métabolisme (M),

E_{cd} = flux de chaleur par conduction,

E_d = flux de chaleur par diffusion de vapeur à travers la peau,

$E_{sd} + E_{ps} = E_{sw}$ = flux de chaleur due à la transpiration,

E_{hr} = flux de chaleur latente due à la respiration,

E_{res} = flux de chaleur sèche due à la respiration,

E_{ry} = flux de chaleur par rayonnement,

E_{cv} = flux de chaleur par convection.

L'écriture du bilan des échanges énergétiques à l'interface individu-atmosphère montre que les apports d'énergie thermique sont principalement dus au rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi et que les pertes se font surtout par convection (effet du vent) et évaporation.

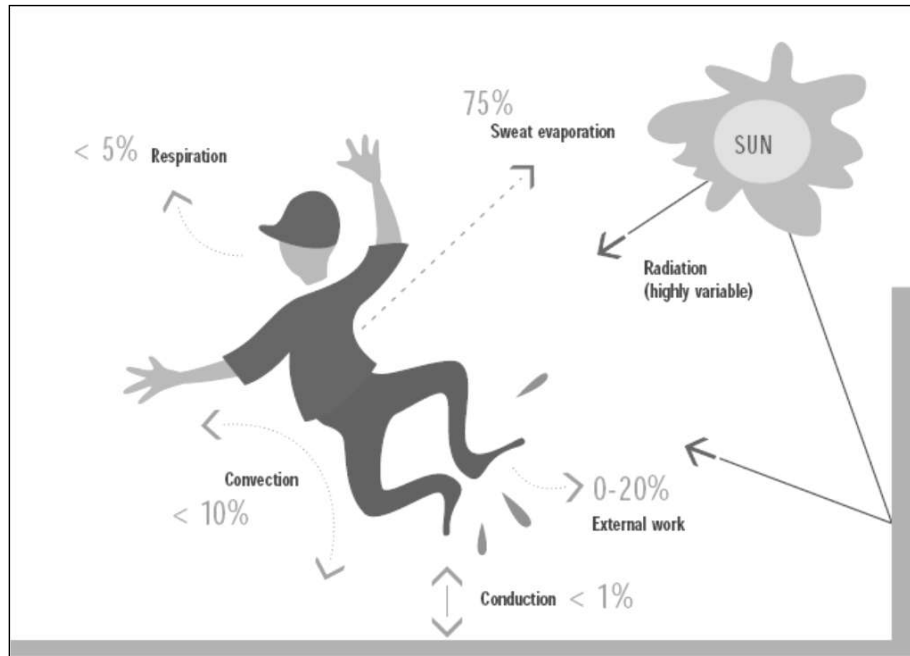


Fig. IV- 1. Gains et pertes de chaleur dans un environnement chaud (Koppe et al. WHO 2004, adapté à partir de Havenith 2003).

La figure (IV- 1) montre une schématisation des échanges thermiques entre le corps et l'environnement extérieur. La chaleur produite par le corps est dissipée dans l'environnement à travers la surface cutanée et par voie respiratoire sous forme de chaleur sensible et latente. La convection, le rayonnement et la conduction sont les trois modes d'échange de chaleur sensible à la surface cutanée. La chaleur latente est reprise par évaporation de la sueur à la surface de la peau. La ventilation respiratoire dissipe la chaleur du corps par convection (chaleur sensible) et par évaporation (chaleur latente).

IV- 1.1.1 Le métabolisme (M).

Il s'agit de la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 37°C (température interne de l'homme). Lorsqu'une personne est en mouvement, un métabolisme de travail correspondant à son activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos. Une unité appelée "met" a été créée pour caractériser le métabolisme.

IV- 1.1.2 Les échanges de chaleur sensible.

Les trois modes d'échange de chaleur sensible sont la conduction, la convection et le rayonnement. Les échanges par conduction sont souvent négligés puisque les transferts de chaleur entre l'individu et le sol sont minimes, du fait des faibles surfaces de contact.

- La convection E_{cv} : est un phénomène de convection naturelle qui se produit lorsque, sous l'effet d'une différence de densité de l'air due à une différence de température, un courant d'air se met en place. C'est ce qui se passe au voisinage de la peau, lorsque celle-ci est à

une température supérieure à celle de l'air ambiant. Plus la vitesse de l'air est élevée, plus les échanges thermiques sont importants. Elle dépend de la différence entre la température de l'air et celle de la surface exposée, peau ou vêtement. Si l'air est plus froid, le corps se refroidit par le mouvement de l'air qui se réchauffe au contact du corps et s'élève pour former un contour de panache au-dessus de la tête avant d'être dissipé dans l'environnement (Nicol 1993). Quand l'air est plus chaud que la surface de contact, la convection induit un réchauffement du corps.

- Le rayonnement : l'échange radiatifs E_{ry} : est une transmission de la chaleur par rayonnements de grandes et courtes longueurs d'onde. Le corps humain émet en permanence une chaleur radiative liée à sa température cutanée et son émissivité, de même que les parois qui l'entourent. Le flux radiatif échangé par le corps correspond à la différence entre le rayonnement émis par celui-ci et le rayonnement reçu de son environnement. Si le rayonnement reçu par le corps est supérieur à sa propre émission, le corps se réchauffe et se refroidit dans le cas inverse.

IV- 1.1.3 Les échanges de chaleur latente Ehr : l'évaporation.

La perte de chaleur par évaporation est un mécanisme de régulation très efficace et constitue le meilleur indice physiologique de stress thermique. La perte de chaleur par évaporation dépend des mouvements de l'air, du gradient de pression de vapeur d'eau entre la surface de la peau à travers les vêtements et l'air ambiant. Les pertes par diffusion, également appelées pertes par perspiration, sont permanentes.

IV- 1.1.4 Les échanges par respiration Eres.

Pendant la respiration, le corps échange de la chaleur sensible et latente, par convection et évaporation, avec l'air inhalé. À la sortie des poumons, l'air expiré est à une température proche de la température interne du corps et il est presque saturé. La respiration s'accompagne ainsi d'un transfert de chaleur et de masse. Ces échanges dépendent des différences de température et d'humidité entre l'air expiré et l'air ambiant.

IV- 1.1.5 Les pertes thermiques par sudation $E_{sd} + E_{ps} = E_{sw}$.

L'évaporation totale d'eau à partir de la peau est un phénomène de transfert de masse de la vapeur d'eau depuis la surface vers l'air ambiant. La moiteur de la peau est le rapport entre le taux de sécrétion requis pour assurer un bilan nul et l'évaporation maximale possible dans l'air ambiant. L'inconfort augmente avec la valeur de cet indice qui avertit le corps d'un recours à un processus de sueur.

IV- 1.2. Les variables environnementales influençant le confort thermique.

Les facteurs qui influencent le confort thermique peuvent être divisés en variables personnelles (tels que l'activité et l'habillement) et variables environnementales que sont la température de l'air, la température radiante, la vitesse d'air au-dessus du corps et l'humidité relative (Fanger 1972). Ces variables constituent ensemble les six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement.

Le tableau (IV- 1) résume les principaux paramètres environnementaux et leurs effets sur le confort thermique.

Tableau IV- 1. Facteurs environnementaux agissant sur le bilan thermique de l'homme.

Facteur environnemental	Effet sur le bilan thermique humain	Explications
Température de l'air	$T(\text{peau}) > T(\text{air})$ $T(\text{peau}) < T(\text{air})$	Perte de chaleur convective de la peau vers l'environnement. Perte de chaleur convective de l'environnement vers la peau.
Température radiante	Échange de chaleur rayonnante entre la peau et l'environnement.	Au soleil, la température rayonnante peut facilement excéder la température de l'air, qui résulte d'un transfert de chaleur rayonnante à partir de l'environnement à la peau.
Température de surface	Échange de chaleur conductive (rôle mineur)	
Humidité de l'air	Perte ou apport de chaleur évaporative	Le taux d'humidité (non l'humidité relative) dans l'air détermine si la sudation sous forme de vapeur s'écoule de la peau à l'environnement ou vice-versa. L'évaporation de sueur est la voie la plus importante pour le corps de dissiper son surplus de chaleur.
Vitesse du vent	Convection et évaporation	Échanges thermiques augmentent avec l'augmentation de la vitesse du vent.

Source : Koppe et al. WHO (2004).

IV- 1.2.1. La température de l'air.

La température de l'air, définie comme la température de bulbe sec à l'ombre, est un des facteurs climatiques les plus importants influençant le confort thermique. La perte de chaleur convective E_{cv} et la perte de chaleur par respiration E_{res} décroissent avec l'augmentation de la température de l'air. Si la température de l'air excède la température de surface du corps vêtu ou de la peau exposée qui est autour de 34°C, il y a un apport de chaleur convective.

IV- 1.2.2. Le rayonnement solaire.

L'absorption du rayonnement solaire et l'échange du rayonnement de grande longueur d'ondes affectent fortement l'état du confort thermique du corps humain. Pour des conditions intérieures, le concept de température radiante moyenne " T_{mrt} " a été développé. Cette dernière est définie comme "la température uniforme d'une enceinte imaginaire dans laquelle le transfert de chaleur radiante d'un corps humain égale le transfert de chaleur radiante dans une enceinte uniforme réelle" (ASHRAE 2001).

Dans les espaces intérieurs où le rayonnement de courte longueur d'ondes est normalement absent, le corps échange les rayonnements de grande longueur d'ondes avec les six surfaces de la pièce et la " T_{mrt} " peut être calculée par la mesure de l'influence de la température de chaque surface (voir par exemple, McIntyre 1980, ASHRAE 2001). Dans les espaces extérieurs, il est beaucoup plus compliqué de déterminer " T_{mrt} " à cause de la large variation dans le rayonnement à partir de différentes sources. Le corps humain peut recevoir le rayonnement solaire, direct et diffus, aussi bien que le rayonnement réfléchi à partir des parois des bâtiments et du sol. En outre, le corps humain échange un rayonnement de grande longueur d'onde avec le ciel et les surfaces

urbaines. La magnitude du rayonnement des différentes sources varie grandement dans l'espace et dans le temps. La méthode la plus précise de déterminer la TMRT en extérieur s'effectue par la mesure des rayonnements de grandes et courtes longueurs d'ondes à partir de différentes directions et par le calcul par la suite de la T_{mrt} (Spagnolo et de Dear 2003, Ali-Toudert et al. 2005). Cependant, la " T_{mrt} " peut être également estimée à travers des calculs (Matzarakis et Mayer 2000, Spagnolo et de Dear 2003, Ali-Toudert et Mayer 2006) ou obtenue en utilisant un thermomètre globe (Nikolopoulou et al. 2001) et en convertissant la valeur de la température globe mesurée (Walton et al. 2007). Les mesures de la température globe (T_g), la température de l'air (T_a) et la vitesse d'air (v) peuvent être combinées en effet afin d'estimer la température radiante moyenne. La précision de la valeur de T_{mrt} déterminée de cette façon varie considérablement en fonction de l'environnement et la précision des mesures individuelles (ASHRAE 2001). La conversion est donnée par l'équation suivante (ASHRAE 2001, Chap. 14).

$$T_{mrt} = [(1.10 \cdot 10^8 v_a^{0.6}) / \varepsilon D^{0.4} * (T_g - T_a) + (T_g + 273)^4]^{1/4} - 273 \quad (IV- 2)$$

T_{mrt} = température moyenne radiante (°C),

v_a = vitesse d'air (m/s),

D = diamètre du globe (= 0.15 m),

ε = émissivité (= 0.95)

T_g = température globe (°C),

T_a = température d'air (°C).

Lorsque $v=0$, $T_{mrt} = T_g$.

Pour des individus restant à l'ombre, la température radiante moyenne est souvent considérée comme étant égale à la température ambiante de l'air.

IV- 1.2.3. L'humidité de l'air.

Un changement dans l'humidité de l'atmosphère affecte la sensation thermique dans la mesure où une personne aura plus chaud, transpirera davantage et se sentira moins à l'aise (McIntyre, 1980). Spécialement sous des conditions chaudes, lorsque les pertes de chaleur convectives (E_{cv}) et radiatives (E_{ry}) sont minimales, l'évaporation par sudation E_{sw} est un mécanisme important dans le maintien du confort. Lorsque la sueur sur la surface de la peau s'évapore, la chaleur latente est extraite du corps et un effet de refroidissement se produit.

L'humidité influence les pertes de chaleur respiratoires et évaporatoires. Lorsque l'humidité augmente, les pertes de chaleur diminuent. Cependant, selon Givoni (1998), l'humidité relative n'influence la sensation thermique qu'au-dessous d'un certain niveau.

IV- 1.2.4. La vitesse du vent.

La vitesse du vent est le facteur principal affectant l'état du confort thermique. Elle réduit la sensation de chaleur en raison de la perte de chaleur convective élevée à partir du corps et la réduction de la température de la peau. Cet effet varie selon que les vents soient forts ou faibles car les conséquences sur la perception des phénomènes thermiques sont différentes pour les deux cas.

Les différences de perception des variables environnementales participant classiquement au confort thermique sont données dans le tableau ci-après :

Tableau IV- 2. Effets du vent sur la perception du confort thermique en fonction des conditions de températures d'air.

	Température d'air		Rayonnement solaire		Rayonnement thermique	
	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
Vent fort, $V > 12$ m/s	Fort accroissement de la sensation de froid	Accroissement de la sensation de fraîcheur jusqu'à 33°C, au-delà, effet de "sèche-cheveux"	Légère compensation de la sensation de froid	Annulation partielle de l'effet de surchauffe dû à l'absorption solaire	Effet sensible totalement annulé	Effet sensible négligeable
Vent faible à nul, $V_a < 6$ m/s	Plein effet de la température d'air : sensation de froid possible	Plein effet de la température : sensation de chaleur possible	Forte compensation de la sensation de froid par effet direct et effet de "dièdre"	Aggravation de la sensation de chaleur par effet direct et "effet de dièdre"	Compensation de la sensation de froid par "effet de dièdre"	Aggravation de la sensation de chaleur par "effet de dièdre".

Source : (Guyot et Izard 1989/99).

- par condition de vents faibles ($V_a < 6$ m/s), le confort thermique dans les espaces extérieurs repose à peu près sur les mêmes variables que celui du confort à l'intérieur des habitations et lieux de travail. Des différences sont néanmoins à relever puisque le rayonnement solaire prend place parmi les paramètres agissants, de même que la vitesse d'air due au vent. La convection participe au bilan d'échanges thermiques entre le corps et l'environnement, avec les effets bénéfiques cités précédemment. Les champs radiatifs conservent toute leur importance,
- la présence de vents forts (vitesse > 12 m/s) en revanche exacerbe l'influence des échanges convectifs entre le corps et l'environnement au point de rendre négligeables les effets dus aux autres modes d'échange et, notamment, les échanges radiatifs. Le principal paramètre à associer à la vitesse de l'air, qui peut provoquer par ailleurs un inconfort mécanique, est donc la température de l'air,
- la sensation de "froid" (en hiver) est toujours accrue par la vitesse d'air qui accélère les pertes convectives du corps, même à travers le vêtement. Les champs radiatifs, qu'ils soient d'origine solaire ou d'origine thermique, ne corrigent que très marginalement ces sensations de froid,
- dans les conditions chaudes, l'effet des déplacements d'air sur le confort est bénéfique jusqu'à une température de 33°C environ (Guyot et Izard 1989/99). À des températures environnementales supérieures, l'augmentation de la vitesse de l'air augmente la sensation thermique de chaleur. Il y a un effet de "sèche-cheveux" qui place l'utilisateur en situation de stress par apport de chaleur convective et de déshydratation rapide (Guyot et Izard 1989/99),
- en présence de rayonnement solaire, seul le vent peut ramener la charge thermique solaire à des proportions acceptables. Les travaux de Penwarden (1974) (cité par Sacré 1983) montrent qu'un sujet passant d'une zone ensoleillée en air calme (vent de 0.5 m/s) à une zone à l'ombre où souffle le vent de 5 m/s doit ressentir une diminution de la charge thermique équivalente à une baisse de la température de l'air de 13°C.

Ainsi, la température, l'humidité, les mouvements de l'air et les échanges d'énergie radiante sont importants pour le maintien du bilan thermique du corps humain. En été, le degré de charge calorifique est déterminé essentiellement par le rayonnement solaire, et est très élevé sous un

rayonnement solaire direct (Jendritzky et Sievers 1989, cité par Koppe et al. 2004). Dans ces conditions, seul le vent, par effet convectif, peut réduire le stress thermique. Cet effet dépend néanmoins des températures d'air.

IV- 1.3. Les indices de confort thermique.

Le confort thermique et la sensation thermique sont des phénomènes bipolaires qui varient de "trop froid" à "trop chaud" avec le confort ou la sensation neutre au milieu. Ce continuum de sensations a été décrit par plusieurs échelles (Fanger 1970, ASHRAE, 2001). Ces échelles sont similaires en nature, employant un indice numérique avec des valeurs positives représentant le côté chaud du confort neutre et des valeurs négatives représentant le côté froid du confort neutre (Soligo et al. 1998).

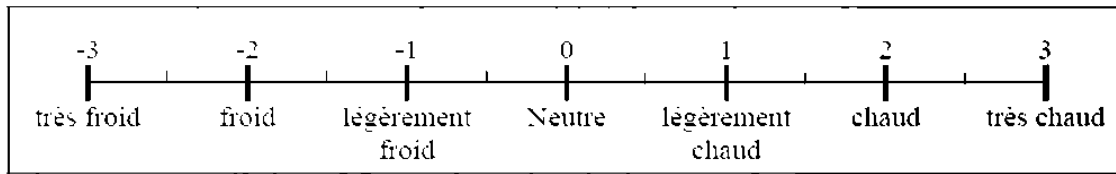


Fig. IV- 2. Échelle de sensation thermique de l'ASHRAE (2001).

Un indice de confort thermique est une valeur unique qui intègre les effets des paramètres fondamentaux de l'homme dans n'importe quel environnement thermique de telle sorte que sa valeur varie en fonction du stress thermique rencontré par les individus (Givoni 1998).

Tout le long du vingtième et au cours du vingt et unième siècle, des études ont été conduites sur les conditions de confort et un grand nombre d'indices ont été suggérés (plus de 40) et utilisés dans le monde. Au début, l'objectif de l'indice a été limité à l'estimation de l'effet combiné des variables environnementales (approche physique) (Leistner 1951, Scharlau 1950, King 1951, Thom 1959, Sohar 1980 (cités par Becker et al. 2003). Plus tard, les effets du taux métabolique et de l'habillement ont également été pris en compte (approche physiologique) (Fanger 1972, Givoni 1978, de Freitas 1985 (cité par Spagnolo et de Dear 2003), Jendritzky et al. 1990 (cité par Ali-Toudert et al. 2005). Selon l'approche utilisée pour leur détermination, les indices thermiques peuvent être classés par conséquent en deux catégories (Tableau IV- 3) :

- des indices "empiriques" : ce sont des modèles multi-variables dérivés de manière empirique qui calculent la sensation thermique sur la base de mesure de température d'air, rayonnement solaire, humidité et vitesse de vent (Leistner 1951, Scharlau 1950, King 1951, Thom 1959, Sohar 1980 (cité par Becker et al. 2003)). Ces modèles présentent l'avantage de prédire le confort thermique de manière précise mais ont l'inconvénient d'être restreints au type d'environnement et de climat dans lequel l'étude a pris place. Parmi ces indices, nous citons la température effective (ET), la température résultante (TR) et la température de bulbe humide (TBH),
- des indices rationnels ou physiologiques : ces indices, plus complets, intègrent toutes les variables environnementales et comportementales et sont basés sur des calculs impliquant l'équation du bilan thermique de l'être humain (ASHRAE 2001). L'application de ces modèles d'équilibre énergétique permet le calcul de la perception thermique moyenne d'un groupe de personnes dans certains endroits au cours de certaines activités, basée sur la disponibilité des données climatiques.

Tableau IV- 3. Les indices de confort thermique pour les environnements intérieurs et extérieurs (Fanger 1970, Givoni 1978, et ASHRAE 2001).

Indice	Définition
Indices empiriques	
ET : température effective	Établi dans les monogrammes, et représente la sensation thermique instantanée estimée expérimentalement à une combinaison de T_a , RH et V
RT : Température résultante	comparable à ET mais testé pour un temps plus long afin d'atteindre l'équilibre thermique
HOP: Température opérative humide	Température d'un environnement uniforme à une humidité relative RH = 100% dans laquelle une personne perd la même quantité totale de chaleur de la peau comme d'un environnement réel (comparable à ET* mais RH vaut 50% pour HOP)
OP : Température opérative	Moyenne arithmétique de T_a et T_{mrt} qui inclue les flux thermiques radiatifs et solaires mesurés par des coefficients d'échange.
WCI Indice de refroidissement du vent	Basé sur le taux de perte de chaleur de la peau exposée cause par le vent et le froid et est fonction de T_a et V, approprié pour les conditions d'hiver
Indices rationnels	
ICT: Indice de contrainte thermique	Considère que la plage de conditions où il est possible de maintenir l'équilibre thermique, la transpiration est secrétée à un taux suffisant pour atteindre le refroidissement évaporatif.
ICC : Indice de contrainte de chaleur	Rapport de la perte de chaleur totale évaporative E_{hr} requise à l'équilibre thermique à la perte de chaleur évaporative maximale E_{mx} possible pour l'environnement, pour des conditions de régime stable, ($S_{peau}=S_{corps}=0$) et $T_{peau}=35C$ constante.
ET* Nouvelle température effective	Température de l'environnement standard (RH = 50%, $T_a = T_{mrt}$, $v < 0.15 \text{ ms}^{-1}$) dans laquelle le sujet pourrait éprouver la même sudation SW et T_{peau} que dans un environnement réel. Il est calculé pour de faibles activités et une vêtue légère.
SET* Température effective standard	Similaire à ET* mais avec des vêtements variables. La vêtue est standardisée pour l'activité concernée.
OUT_SET* Température effective standard extérieure	Similaire à SET* mais adaptée à l'extérieur par la prise en compte des flux du rayonnement solaire. Conditions intérieures de référence : $T_{mrt} = T_a$; RH = 50% ; $v = 0.15 \text{ ms}^{-1}$.
PMV and PT Vote moyen prédit Température perçue.	Le PMV exprime la variance sur une échelle de -3 à +3 du bilan thermique de l'Homme et PT la température d'un environnement standardisé qui atteint le même PMV que l'environnement réel. La vêtue et l'activité sont variables.
PET Température physiologique équivalente	La température à laquelle dans un établissement intérieur type $T_{mrt} = T_a$; VP = 12h Pa; $v = 0.1 \text{ ms}^{-1}$, le bilan thermique du corps humain (vêtue légère, 0.9clo) est maintenue avec une température de corps et de peau égale à celles sous des conditions réelles, unité °C
WBGT : indice de température Globe de bulbe humide.	

La majorité de ces indices ont été développés pour des espaces intérieurs, la quantification du confort thermique étant plus complexe dans un environnement extérieur (Givoni 1998, Höppe 2002). Bien que des tentatives aient été portées sur la modification des modèles intérieurs existants pour une application extérieure, des indices ont été spécialement conçus pour des environnements extérieurs tels que l'indice de température physiologique équivalente (PET), l'indice de contrainte thermique (ICT), l'indice de contrainte thermique humain (ICTH), l'indice TSP4, l'indice OUT-SET* et l'indice de température Globe de bulbe humide (WBGT). Certains indices, tels que l'indice de Contrainte Thermique (ICT) (MacIntyre 1980, Givoni 1998) et l'indice de température Globe de bulbe humide (WBGT) (MacIntyre 1980, Emmanuel 2005) ont surtout été développés pour des conditions extérieures extrêmement chaudes, ils sont considérés de ce fait comme des indices de stress thermique plutôt que des indices de confort thermique (MacIntyre 1980, Epstein et Moran 2006).

IV- 1.3.1. L'indice PET.

Cet indice a été calculé par le modèle de bilan thermique MEMI (Munich Energy Balance for Individuals) par Mayer et Höppe (1987). L'idée fondamentale est de transférer les conditions thermiques extérieures à des conditions fictives intérieures dans lesquelles les mêmes sensations thermiques seront ressenties par les individus. Le PET est défini par une température d'air à laquelle le bilan énergétique du corps humain pour les conditions d'intérieur est équilibré par les mêmes températures internes et de peau et taux de sudation que ceux calculés pour les conditions externes réelles. Le calcul du PET requiert des données sur la température de l'air (T_a), la pression de vapeur (V_p), la vitesse d'air (v) et la température moyenne de rayonnement (TMR). D'après les expériences des thermo-physiologues, des valeurs de 29 C du PET peuvent être considérées comme valeurs confortables en milieux extérieurs. Ces valeurs ne sont cependant pas définies pour un climat chaud et sec. Aucune zone de confort pour des conditions extérieures en climat chaud et sec n'est en fait définie pour cet indice. Cependant, en se basant sur l'étude de terrain conduite par Ahmed (2003) à Dhaka durant les mois chauds et humides de l'été, Johansson (2006) fixe la valeur de PET à 33 C comme limite d'inconfort supérieure dans son étude sur le confort thermique dans la ville de Fez (Maroc) en climat chaud et sec.

IV- 1.3.2. L'indice ICT (indice de contrainte thermique).

Cet indice tient compte de la température d'air, de l'humidité d'air, du métabolisme, de la température de peau, d'une sudation maximale égale à 100 g/h et le stress de chaleur déterminé par le rapport du rafraîchissement requis par évaporation et de la capacité d'évaporation de l'air. L'indice de contrainte est adapté à l'analyse des contributions des facteurs métabolisme et ambiance et pour la prédiction de l'effort physiologique imposé aux sujets au repos et au travail. Tant que l'équilibre thermique peut être maintenu, on considère qu'il est fiable dans les domaines situés entre la zone de confort et la contrainte sévère, au-delà de cette limite, l'indice ne peut plus être appliqué (Givoni 1978).

IV- 1.3.3. L'indice ICTH.

Il tient compte de la température de l'air, de l'humidité et la vitesse d'air, du rayonnement solaire, du métabolisme, de l'habillement et de la température de peau. Ce facteur est utilisé à la limite supérieure de la zone de confort.

IV- 1.3.4. L'indice TSP4.

Cet indice est en fonction du taux de sudation en 4 heures d'exposition. Utilisé en conditions chaudes, ce facteur tient compte du métabolisme, du type de vêtement, de la vitesse d'air, de l'humidité de l'air, de la température d'air et de la température radiante moyenne.

IV- 1.3.5. L'indice OUT-SET*.

Cet indice de confort thermique est calculé en introduisant la température radiante moyenne dans le calcul de l'indice de confort thermique SET* (température standard effective). Le calcul de cette température est effectué dans un environnement isotherme ($T_a = T_{\text{trrt}}$, HR=50%, $v_a = 0.15$ m/s) avec la même température moyenne de peau, et la même mouillure cutanée w que dans un environnement réel.

IV- 1.3.6. Les indices DISC.

Ces indices sont souvent utilisés dans les climats chauds et humides. Ils estiment et évaluent la condition du confort en fonction de la mouillure cutanée et du débit sudoral.

Au fil des ans, les indices thermiques ont été sévèrement critiqués, essentiellement en raison de leur inhabilité à fournir une évaluation réaliste sous une exposition de régime transitoire et inclure les facteurs psychologiques (Nikolopoulou et Steemers 2003, Becker et al. 2003, Stathopoulos et al. 2004, Nikolopoulou et Lykoundis 2006, Eliasson et al. 2007). En effet, bien que certaines corrélations entre le niveau de confort et les paramètres physiques soient observées, il s'avère que les paramètres météorologiques ne peuvent pas expliquer à eux seuls les niveaux de confort humain. D'autres facteurs peuvent influencer l'intervalle de tolérance pour le confort humain comme l'expérience, les attentes, le sens du contrôle, la nature de l'environnement, le besoin de stimulation et l'acclimatation (Becker et al. 2003, Nikolopoulou et Steemers 2003, Stathopoulos et al. 2004, Nikolopoulou et Lykoundis 2006). À titre d'exemple, la comparaison des sensations thermiques calculées et observées dans une étude entreprise sous des conditions extrêmement chaudes et arides dans le désert Israélien (Becker et al. 2003) montre des différences considérables entre l'inconfort prévu par l'application de l'indice physiologique (PMV et DISC) et le confort perçu par les individus. La considération des facteurs d'adaptation et d'expectation thermique peut expliquer ces différences.

IV- 1.3.7. Choix de l'indice de confort thermique dans les zones arides et chaudes.

Il doit être noté que la plupart des études de confort quantitatives sont effectuées avec des sujets américains et européens, acclimatés naturellement à un climat tempéré. Carmona (1986, cité par Givoni 1998) note que ces résultats doivent être traités avec précaution dans le contexte des pays tropicaux où la population est acclimatée à un climat plus chaud.

Dans les climats chauds et secs, les indices les plus utilisés sont l'indice de contrainte thermique (ICT) (MacIntyre 1980, Givoni 1998, Pearlmutter et al. 2007), l'indice de température physiologique équivalente (PET) (Ali-Toudert et al. 2005, Johansson 2006), l'indice de confort thermique humain (ICTH) (Harlan et al. 2006) et l'indice d'inconfort DISC (Becker et al. 2003). Bien que ces indices présentent des applications limitées dans les espaces extérieurs, ils constituent néanmoins un outil d'évaluation de l'environnement thermique (Spagnolo et de Dear 2003). Ils ne permettent pas d'obtenir des réponses précises à une situation de confort en

extérieur mais plutôt d'évaluer l'incidence d'une décision d'aménagement sur les niveaux résultants, en termes de tendance ou de comparaison (Vinet 2000, Johansson 2006).

Comme l'indice PET a déjà été utilisé par des études conduites dans un contexte climatique proche de celui de notre recherche (Ali-Toudert et al. 2005, Johansson 2006), il sera choisi dans le cas de notre étude. L'objectif est de comparer les résultats obtenus avec ceux des recherches précédentes.

Les paramètres environnementaux (température d'air, humidité relative, vitesse de vent, température de rayonnement moyenne) et comportementaux (vêtue et activités) interviennent dans les nombreux échanges thermiques entre l'individu et son environnement. L'équilibre de ce bilan conduit à la définition de certains indices qui permettent de quantifier l'environnement thermique de manière rationnelle. Ces indices de confort thermique doivent être utilisés de manière relative et non absolue car la notion du confort thermique est très personnalisée dans la mesure où les individus sont psychologiquement différents.

Dans la section suivante, seront traitées les questions de confort d'ensemble dans les espaces urbains en relation avec la perception des usagers. Cette partie nous permettra de mieux comprendre la relation entre les paramètres climatiques agissant sur le confort thermique et la perception de ces paramètres par les usagers. L'objectif est d'analyser la perception du paramètre vent dans le confort en extérieur.

IV- 2. Les questions de confort d'ensemble dans les espaces urbains.

La recherche sur le confort en espace extérieur implique différentes conditions non rencontrées dans les études sur le confort intérieur. Les piétons peuvent être exposés aux intenses rayonnements solaires et aux vents, facteurs qui modifient largement leurs réponses aux conditions de température et d'humidité (Givoni et al. 2003). Certaines études ont essayé d'analyser les relations existantes entre les paramètres micro-météorologiques et ceux caractérisant les sensations de confort thermique perçues par les usagers dans les espaces urbains extérieurs.

Une des plus connues est celle conduite dans le cadre du projet européen RUROS (*Rediscovering the urban realm and open spaces*). Dans le contexte de cette recherche, les conditions de confort thermique extérieur sont évaluées à partir d'une campagne de mesures sur le terrain dans 14 sites répartis en Europe du Nord et du Sud (Nikolopoulou et Lykoudis 2006).

L'analyse des données collectées révèle des corrélations entre paramètres microclimatiques et conditions de confort, la température d'air et le rayonnement solaire étant les facteurs déterminants. L'humidité joue en revanche un rôle secondaire dans la sensation de confort d'ensemble. Les effets du vent sont moins négligeables et varient selon leur intensité, les climats et les saisons. En été, les vents forts sont associés à l'inconfort dans les climats du Nord comme Kassel et Sheffield (avec les températures d'air les plus faibles T_a de 21.3 et 21.9°C respectivement) tandis qu'ils apparaissent plus tolérables dans les villes du Sud caractérisées par les températures d'air les plus élevées. Dans ces zones climatiques, les conditions de vents trop forts contribuent néanmoins à l'inconfort, en particulier dans la ville d'Athènes où la température d'air pour la saison excède 30°C. En Automne et en hiver, les vents forts constituent une source d'inconfort pour toutes les villes étudiées.

Ces résultats indiquent que le confort augmente avec la réduction des vitesses de vent, avec un effet de refroidissement du vent souhaitable à différentes saisons. À des températures d'air faibles et des vitesses de vent élevées, cet effet devient particulièrement indésirable. Le vent constitue de ce fait un des principaux paramètres physiques sur lesquels il faut agir pour atteindre le confort. Ces conclusions confirment l'étude entreprise par Eliasson et al. (2007) à Göteborg (Suède) en climat froid. Les auteurs démontrent en effet qu'en plus de la température d'air et l'indice de couverture nuageuse, la vitesse du vent a une influence importante sur l'évaluation par les usagers du temps, des perceptions des espaces publics et leur fréquentation. L'analyse des données météorologiques et comportementales indiquent que la fréquentation des espaces augmente lorsque les vents sont calmes et que la température d'air et le rayonnement solaire augmentent. Le temps est perçu comme plus froid à des vitesses de vent élevées, des températures d'air faibles et un ciel clair. Il est également observé que les conditions de ciel clair sont perçues comme importantes pour les activités extérieures. Ces résultats montrent qu'en climat froid, la vitesse du vent, la température d'air et le rayonnement solaire ont une influence importante sur les composantes fonctionnelle et psychologique des espaces publics. Ils concordent avec les précédentes recherches réalisées en Scandinavie (Carlestam 1968 (cité par Eliasson et al. 2007), Thorsson et al. 2004).

Dans un contexte climatique plus chaud, en Nouvelle Zélande, Walton et al. (2007) constatent que l'influence du vent a le plus grand effet sur le confort extérieur alors que celle du rayonnement solaire est secondaire. Il s'avère par ailleurs que les personnes s'adaptent de manière active aux conditions climatiques dans les environnements extérieurs. Le vent, le soleil et la température peuvent être évalués séparément pour leurs contributions à ce besoin d'ajustement climatique. Il s'avère en outre que c'est la nature du vent qui influence l'adaptation pour atteindre le confort : la rafale de vent maximale est le confort le plus important prédisant l'adaptation, suivie par la vitesse de vent moyenne d'une période de 10 min. La vitesse de vent instantanée est importante parce qu'une légère brise est agréable tandis qu'une brise plus forte est source d'inconfort. La température ambiante est en revanche le facteur le moins influent dans l'adaptation afin d'atteindre le confort.

Dans une étude conduite dans trois sites différents à l'Université de Birmingham (Royaume Uni), Metje et al. (2008) montrent également la complexité de la détermination des relations entre le niveau de confort piéton et les paramètres météorologiques. Les résultats de leurs études indiquent que la température d'air et la vitesse du vent ont une influence claire sur le niveau de confort humain tandis que le rayonnement solaire et l'humidité relative ne montrent pas une telle relation forte. En examinant la différence entre la perception et la préférence, les auteurs indiquent que la préférence pour des températures élevées est faible tandis que la préférence pour des conditions de vents faibles est plus forte. Globalement, il semble y avoir une valeur seuil de la vitesse du vent de 5 m/s au-dessus de laquelle les gens se sentent mal à l'aise. Fait intéressant, le seuil de 5 m/s est utilisé dans beaucoup de critères de confort de vent mais une prudence doit être prise avec les différentes périodes de calcul des moyennes.

Par ailleurs, dans une étude sur le confort extérieur conduite à Dhaka, en climat tropical (chaud et humide), Ahmed (2003) souligne la faible influence de la ventilation sur l'augmentation de la limite supérieure de la température de confort. L'auteur observe néanmoins qu'à des températures inférieures à 34°C, l'écoulement d'air augmente le nombre de personnes satisfaites du point de vue thermique. En fait, les résultats de l'étude indiquent que la ventilation agit surtout sur la limite supérieure acceptable de l'humidité relative. Ainsi, si une remarquable adaptation à l'humidité élevée comprise entre 70 et 80% est observée même en l'absence de vent, le niveau d'humidité pour le confort peut s'étendre jusqu'à 95% avec un vent d'une vitesse au-dessus de 2 m/s.

Enfin, Becker et al. (2003) entreprennent une étude sur la perception thermique dans le Kibbutz de Yotvata (Israël) sous des conditions climatiques extrêmement chaudes et arides. Ces auteurs

observent que durant la période de transition du jour vers la nuit (après le coucher du soleil, vers 18 :00 h), l'augmentation de la vitesse du vent à des températures élevées de 40°C n'entraînent pas un effet de surchauffe conformément à l'équation du bilan thermique humain mais plutôt une sensation de confort. Cette différence entre la sensation thermique observée et calculée est expliquée par le fait que le confort thermique n'est pas dépendant uniquement de facteurs physiologiques mais aussi de facteurs psychologiques. Ce phénomène peut être attribué à un facteur d'expectation thermique qui signifie dans ce cas qu'après une longue période de stress thermique, même un refroidissement léger, combiné à un facteur psychologique d'un refroidissement attendu après le coucher du soleil, crée une impression de confort thermique. Givoni (1998) rapporte les mêmes observations en soulignant que dans les régions chaudes et sèches, même avec une température de l'air de 40°C, un vent léger réduit généralement l'inconfort en réduisant l'humidité de la peau, spécialement lorsque l'on reste à l'extérieur et qu'on est exposé au soleil. Ainsi, dans les régions subtropicales et en dépit de l'opinion commune, l'effet du vent n'est pas toujours considéré comme indésirable.

Conclusion.

Il est connu que la valeur du confort souvent utilisée pour la détermination du confort ou l'inconfort des individus est un paramètre extrêmement subjectif. Il y a par ailleurs différentes réponses à la combinaison des paramètres météorologiques suivant le type de climat et l'adaptation joue un rôle important. Toutefois, quelques soient les réponses apportées à la perception du confort humain en extérieur, le vent apparaît toujours comme facteur déterminant même si un paramètre à lui seul ne suffit pas à l'évaluation des conditions de confort thermique. La température de l'air a un impact important sur le confort de l'individu puisqu'elle est liée au bilan thermique du corps humain, néanmoins, son effet est étroitement liée aux conditions de vent et ne peut être traitée isolément de la vitesse de vent.

Comme l'efficacité de l'évaporation augmente avec la vitesse du vent, il est souvent souhaitable de réduire la vitesse du vent dans les climats froids, mais le contraire est parfois vrai dans les climats chauds puisque l'effet de refroidissement est désiré. À des températures élevées néanmoins, au-delà de 34°C, l'augmentation des vitesses de vent n'induit pas de refroidissement mais un effet de surchauffe conformément à l'équation du bilan thermique humain, tel est le cas dans les climats chauds et secs. Il est cependant important de préciser qu'en raison des facteurs d'adaptation, même à des températures de l'air élevées de l'ordre de 40°C, l'augmentation de la vitesse d'air peut induire une sensation de confort.

La température, l'humidité, les mouvements de l'air et les échanges d'énergie radiante sont importants pour le maintien du bilan thermique du corps humain. Les structures urbaines modifient tous ces éléments du climat et il est important de connaître l'impact de ces formes urbaines sur l'environnement thermique des villes du désert.

CHAP. V. FORMES URBAINES ET MICROCLIMATS DANS LES VILLES DU DESERT.

Dans ce chapitre, une attention particulière est apportée à l'effet des formes urbaines sur l'environnement thermique et les conditions de confort en extérieur dans les zones climatiques subtropicales.

V- 1. Caractéristiques climatiques des zones désertiques chaudes.

Les régions arides du monde incluent celles qui se trouvent dans les ceintures de la toundra, communément appelées déserts froids, et celles se situant dans la ceinture équatoriale, dénommées déserts chauds.

Les déserts chauds se situent dans les latitudes subtropicales, approximativement entre 15 et 30° Nord et Sud de l'Équateur, dans l'Asie Centrale et Orientale, le moyen orient, l'Afrique, l'Amérique du Sud et dans la partie Nord et centrale de l'Australie. Ils occupent environ 1/3 des terres du monde et sont souvent composées de sable et de surfaces rocheuses, la végétation est éparse. Le Sahara est le désert le plus grand au monde, il couvre la plupart des régions de l'Afrique du Nord.

Chaud et sec, le désert représente l'exemple classique d'un environnement climatique extrême (Oke 1987) qui peut être expliqué par (Golany 1978) :

- un déficit en précipitations,
- des températures élevées favorisant l'évapotranspiration,
- la présence d'un anticyclone durable empêchant le retour de nouvelles précipitations,
- l'éloignement de la région par rapport aux côtes et donc à l'humidité océanique,
- la présence de montagnes favorisant l'effet de fœhn sur le versant opposé, empêchant la venue de précipitations.

V- 1.1. Le bilan énergétique des surfaces du désert.

Le bilan radiatif d'un désert est caractérisé par un important rayonnement incident et réfléchi. À l'exception de la poussière, l'atmosphère du désert est généralement très claire parce que la teneur en vapeur d'eau est faible et les nuages sont généralement absents. De ce fait, il est assez fréquent que 80% des radiations cosmiques à ondes courtes atteignent la surface du désert au cours de la journée (Oke 1987). Combiné au fait que le soleil est souvent proche du zénith dans les sub-tropiques, cela produit une très forte incidence solaire. Cependant, l'impact du rayonnement incident est quelque peu réduit par le fait que la plupart des déserts ont un albédo relativement élevé et les pertes de courtes longueurs d'ondes sont de ce fait également importantes. Les rayonnements de grandes longueurs d'ondes réfléchis sont également importants.

Toute l'énergie rayonnante dans le désert est dissipée en chaleur sensible (c.-à-d. chauffer l'air ou le sol) en raison du très faible taux d'évaporation. La majorité du surplus radiatif journalier est transporté dans l'atmosphère par turbulence (Q_H). En fait, durant le cycle de 24 heures (Fig. V- 1), Q_H consomme environ 90% de Q^* laissant 10% seulement à la chaleur du sol parce que l'évaporation est presque négligeable.

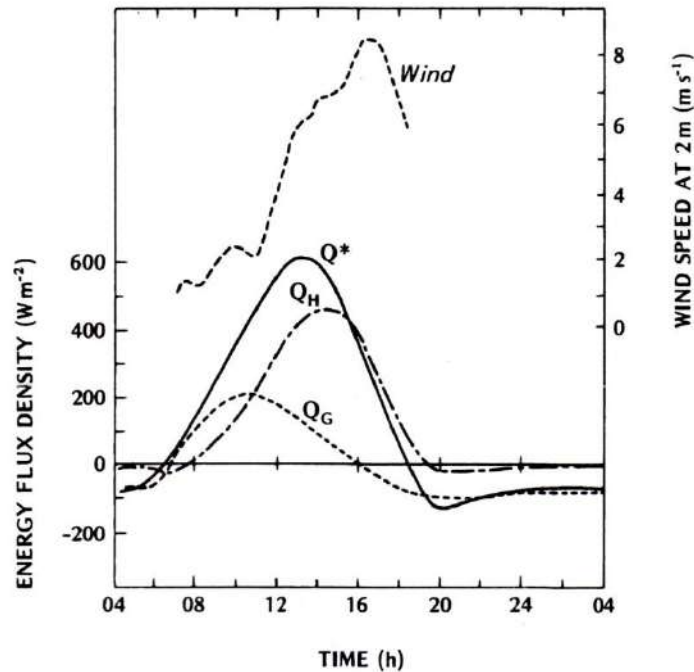


Fig. V- 1. Les composantes du bilan énergétique et la vitesse du vent dans le désert : 10-11 juin 1950, à El-Mirage, Californie (35°N). (Oke 1987, après Vehrencamp 1953).

V- 1.2. Le régime des températures.

Comme l'évaporation est presque inexistante, les régions désertiques sont caractérisées essentiellement par leur aridité, des températures journalières d'été élevées, des plages de températures diurnes importantes et une irradiation solaire élevée. Dans certaines régions, les températures diurnes types d'été sont comprises entre 32 et 36°C tandis que dans les régions les plus chaudes, elles peuvent être bien au-dessus de 40°C et même supérieures à 45°C (Givoni 1998). Elles peuvent être aussi élevées que 54°C au Sahara en Algérie (Seltzer 1946) et 56°C à Tucson en Arizona (Oke 1987). Au niveau de la surface, les températures peuvent même approcher 80°C. Les plantes et les animaux en mesure de survivre dans de telles températures extrêmes présentent des adaptations physiologiques ou comportementales. Les humains ressentent la surchauffe pendant le jour et le froid au cours de la nuit. Avec une faible humidité relative journalière, les températures sont bien dans les limites de confort pour plusieurs heures de la journée (Pearlmutter et al. 2006).

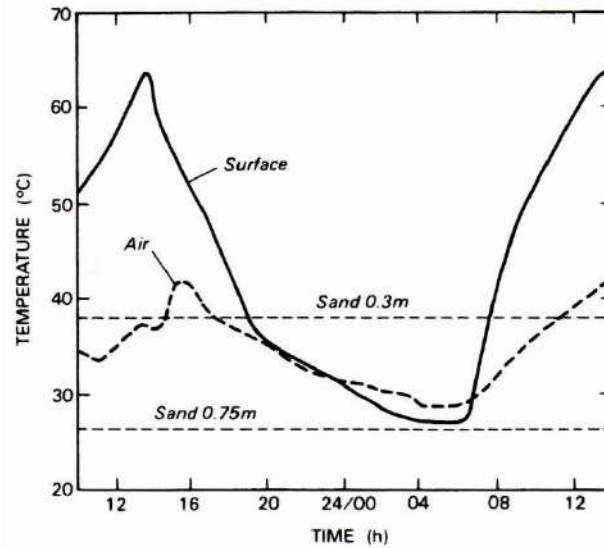


Fig. V- 2. Températures de l'air et de surface en deux profondeurs dans le sable du Sahara central à la mi-août (Oke 1987, après Peel 1974).

V- 1.3. L'humidité relative.

Dans les régions chaudes et sèches, l'humidité relative fluctue dans un modèle opposé à la température de l'air (Givoni 1998), les taux d'humidité relative sont de ce fait très faibles au cours de la journée, pouvant atteindre des valeurs de 4% en été.

V- 1.4. Le régime des vents.

L'importante fluctuation dans la stabilité atmosphérique donne lieu à un modèle de vitesses de vent fort et régulier (Oke 1987) (Fig. V- 1). La forte convection qui se produit au cours de la journée induit une hausse des vitesses de vent alors qu'au cours de la nuit, en raison de la stabilité atmosphérique, les vents s'affaiblissent au voisinage du sol (Oke 1987). En raison de la rareté de la végétation en mesure de réduire les déplacements d'air, les régions désertiques sont de ce fait venteuses. Les vents évacuent l'air humide qui se trouve autour des plantes et du sol et accroissent par conséquent l'évapotranspiration.

Les vents du désert sont suffisamment forts pour que les particules de sable et de poussière soient en suspension dans l'air, ce qui engendre des problèmes d'érosion, de réduction de la visibilité et de dépôt de poussière. Ce dernier phénomène peut enterrer les plantes, contaminer l'eau et la nourriture, salir les maisons d'habitations et créer un inconfort considérable pour les êtres humains.

En combinant l'architecture et l'urbanisme, il est possible d'adapter le vent et le soleil rudes du désert afin de réduire le stress thermique caractéristique de ces régions. Pour ce faire, il est néanmoins important de comprendre la relation complexe entre la forme urbaine et les conditions microclimatiques.

V- 2. Les formes urbaines et l'adaptation climatique en milieu désertique.

La recherche sur la relation entre la forme urbaine et le climat tend à identifier les formes vernaculaires traditionnelles comme une combinaison réussie de l'architecture, l'urbanisme et le climat. Cette théorie qui dresse un parallèle entre le climat et la forme urbaine est supportée par la croyance commune et acceptée selon laquelle les climats rudes tels que les climats chauds et arides confrontent ceux qui y vivent à des défis uniques. Les réponses apportées à ces défis sont continuellement améliorées à travers des générations par des pratiques et des erreurs et évoluent par conséquent en une solution "propre" à ces conditions climatiques (Mills 1999). Ainsi, en se basant sur cette théorie, la nécessité de l'adaptation humaine aux climats chauds et secs a induit le développement de formes urbaines compactes dont les microclimats sont reconnus pour être plus modérés que ceux de l'environnement naturel (Golany 1980). Quelle que soit la variété des formes architecturales et urbaines produites, les mêmes principes bioclimatiques étaient mis en œuvre (Givoni 1998) : adoption de murs épais et de matériaux locaux à forte inertie thermique, structuration des espaces pour permettre une circulation de l'air par convection par le chebek qui domine le patio central (wast ad dar), compacité du tissu urbain pour réduire la surface d'exposition au soleil, largeur réduite des rues et des passages pour se protéger des vents, création de protections horizontales sous forme de passages couverts, etc. Cette somme de principes bioclimatiques concourait à une protection maximale contre le soleil et le vent en donnant à la totalité de l'établissement urbain traditionnel les mêmes caractéristiques bioclimatiques que les habitations qui le composaient.

Cette hypothèse d'une forme urbaine parfaitement adaptée à son environnement est tellement ancrée dans la recherche et la philosophie architecturale que sa validité a été rarement contestée. Très peu d'études ont ainsi dépassé les seules approches formelles (qualitatives) pour évaluer quantitativement les performances climatiques de ces formes bâties. Les rares recherches qui ont porté sur cet aspect (Pearlmutter et al. 1999, Grundström et al. 2003, Ali-Toudert et al. 2005, Bourbia et Awbi 2004, Johansson 2006) affirment toutes que la compacité spatiale de la structure urbaine, telle qu'elle est exprimée par les proportions géométriques de ses rues et de ses bâtiments, peut être influente dans la détermination de ses caractéristiques thermiques et l'amélioration des conditions de confort en espace extérieur.

Dans ce qui suit, seront présentées de manière plus exhaustive les principales études qui ont porté sur l'effet de la forme urbaine (géométrie des rues, leur orientation, particularités morphologiques, etc.) sur les conditions thermiques dans les climats chauds et arides.

V- 2.1. La compacité urbaine et le confort thermique dans le désert du Néguev.

L'une des premières recherches sur l'effet de la forme urbaine compacte sur les conditions thermiques dans un environnement aride est celle de Pearlmutter et al. (1999) qui analysent les conditions microclimatiques dans les rues piétonnes d'un quartier de maisons à patio dans la région aride du Néguev dans le sud d'Israël (la ville de Dimona). Le quartier est caractérisé par un tracé régulier et compact, des rues étroites et symétriques avec un prospect H/W égal à 1 ($H=W=3$). Les données empiriques, prises à partir des mesures dans deux canyons urbains d'orientation Est-ouest et Nord-sud, sont intégrées avec un modèle numérique représentant l'ensemble des échanges thermiques entre un piéton et son environnement urbain.

L'analyse des données climatiques montre qu'en été, la rue orientée N-S permet un meilleur ombrage de ses surfaces, particulièrement durant les heures de faible altitude solaire (en début de matinée et tard dans l'après-midi). En hiver, cette orientation N-S assure en revanche une meilleure pénétration du rayonnement solaire que dans une orientation E-O. La comparaison des températures d'air indique par ailleurs que l'air est de 1 à 3°C plus chaud dans les canyons qu'au-dessus des toits, avec en été, les températures d'air les plus élevées observées dans la rue E-O. En ce qui concerne les modèles d'écoulement d'air, les vitesses de vent varient en fonction de l'angle d'incidence du vent ambiant avec l'axe de la rue, les réductions les plus élevées sont observées pour des incidences perpendiculaires et les meilleures pénétrations s'effectuent pour des incidences parallèles. Pour ces dernières conditions de vent parallèle, la vitesse du vent peut être très élevée, atteignant 2/3 de l'écoulement libre au-dessus du toit.

L'analyse des flux énergétiques indique qu'en hiver, la géométrie compacte du tissu urbain procure des conditions relativement chaudes au courant de la journée, avec comme paramètre principal la protection contre les vents froids. En été, la surchauffe dans le canyon est d'abord ressentie comme un phénomène nocturne. En période diurne, durant les heures de stress thermique, les espaces urbains compacts produisent un potentiel "îlot de fraîcheur" dans la mesure où un piéton dans la rue canyon absorbe moins d'énergie thermique que dans un environnement ouvert. Cet effet est basé surtout sur les conditions thermiques du corps humain dans la rue plutôt que sur l'air ambiant. Il est attribué à plusieurs facteurs que sont l'ombre procurée par la rue canyon durant une grande partie de la journée, la réduction de l'exposition du piéton au rayonnement de grande longueur d'onde et l'importante inertie thermique de la rue. Au courant de la journée, la ventilation n'est pas le facteur dominant puisque son efficacité est limitée par les températures d'air élevées et les vitesses de vent faibles. La ventilation est néanmoins cruciale en début de matinée et en fin de journée, lorsque les vents sont forts et froids. Durant cette période, l'orientation des rues est importante. Les conditions extérieures peuvent de ce fait être améliorées de manière significative à travers une combinaison d'ombre et de ventilation.

Ces résultats sont confirmés par les mêmes auteurs (Pearlmutter et al. 2007) dans une étude plus exhaustive conduite en été dans un établissement urbain réel d'échelle réduite. Le modèle urbain est composé de "bâtiments" schématisés, ordonnés en rangées de bâtiments linéaires (Fig. V-3) qui représentent une "surface" urbaine homogène. Les "rues canyons" dans lesquelles les mesures microclimatiques sont prises sont de géométrie urbaine locale variée (prospect H/W de 0.33, 0.66, 0.1 et 2.0) et d'orientation différentes (N-S, E-O, NO-SE (parallèle au vent) et NE-SO (perpendiculaire au vent)).

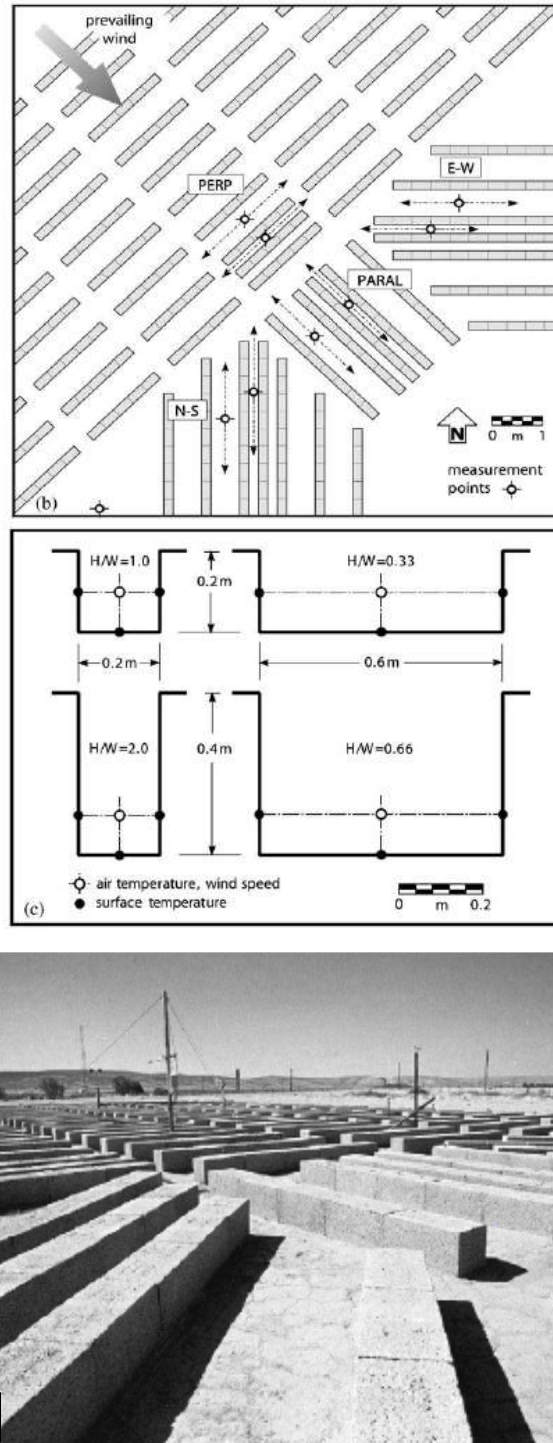


Fig. V- 3. Le plan d'ensemble de l'étude à échelle réduite conduite par Pearlmutter et al. (2007): La figure montre : (b) et (d) : l'ordonnance de rugosité en amont et la zone de rues canyons et l'emplacement des points de mesure dans ces canyons, (c) : les sections de rues canyons.

Les résultats indiquent clairement que la géométrie de la rue canyon compacte peut réduire le gain de chaleur du piéton durant presque toutes les heures d'été mais que la réduction est dépendante de l'orientation de la rue. En effet, le gain d'énergie du piéton au cours de la journée

est plus faible dans la rue canyon avec le prospect le plus grand et dont l'axe est orienté nord-sud ou proche de cette direction. Ces rues fortement étroites ($H/W=2$) maintiennent un bilan énergétique proche de zéro au cours des heures de l'après-midi lorsque d'autres configurations produisent des gains de plus de 200 W/m^2 . Une telle géométrie de rue compacte sert à protéger les piétons du stress thermique à des heures critiques à travers un mécanisme d'interception de l'énergie, de stockage et de décalage.

En été, pour des rues Nord-sud, le confort thermique du piéton peut être fortement modifié par la géométrie seule de la rue. Ce dernier paramètre a en revanche peu d'effet sur le stress thermique dans une orientation E-O (Fig. V- 4).

Les données d'hiver montrent par ailleurs qu'une rue compacte Est-ouest conduit à des pertes thermiques du corps excessives en raison du faible ensoleillement de la rue. En revanche, cette perte de chaleur (au moins vers midi) est fortement réduite dans une rue nord-sud.

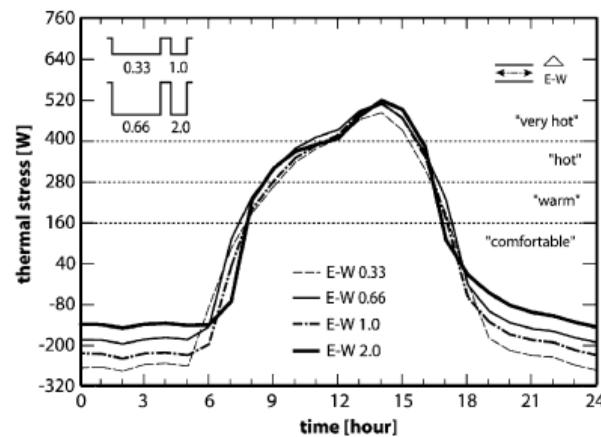


Fig. V- 4. L'indice de contrainte thermique pour des rues E-O de prospects H/W variés. Pearlmutter et al. (2007).

Au cours de la matinée et de la nuit, la relation générale entre les rues canyons est inversée, avec les canyons les plus compacts maintenant les taux de perte énergétique les plus faibles. Les différences d'une rue à une autre durant cette période sont d'une magnitude plus faible, avec des variations maximales de moins de 50 W/m^2 . Il peut être vu également que le refroidissement nocturne est légèrement plus grand dans les rues alignées parallèlement à l'écoulement du vent que dans celles qui lui sont perpendiculaires.

Les effets de refroidissement par la ventilation sont visibles même de jour vu que l'inconfort est moins grave dans les rues parallèles au vent. Les auteurs indiquent en effet que le stress potentiel d'un espace ouvert est amplifié lorsque l'exposition solaire excessive est combinée à une ventilation insuffisante. Alors que le niveau de stress thermique du piéton dans la configuration N-S la plus ombragée ($H/W=2.0$) ne dépasse jamais 350 W (Fig. V- 5a), les rues qui sont largement exposés au rayonnement et qui, en même temps, ne sont pas alignés à l'écoulement libre ($H/W=0.33/0.66$) sont soumises à des niveaux de stress thermiques qui dépassent 700 W (Fig. V- 5b).

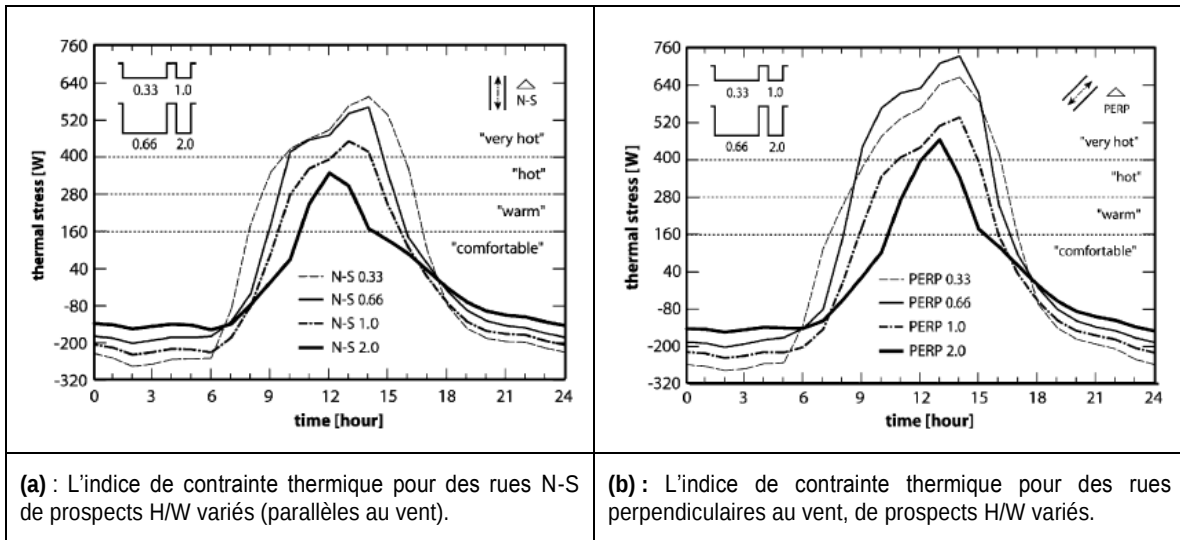


Fig. V- 5. L'indice de contrainte thermique selon le degré de ventilation des rues canyons (Pearlmutter et al. 2007)

Ces résultats indiquent que dans un climat chaud et aride, les rues canyons compactes peuvent réduire de manière significative l'inconfort thermique du piéton à condition qu'elles soient orientées approximativement Nord-Sud. Dans les canyons Est-ouest, l'effet de la géométrie de la rue est moins prononcé. Il est par ailleurs démontré que l'orientation des rues dans la même direction que les vents frais d'été peuvent améliorer les conditions de confort thermique. La ventilation urbaine est importante dans la réduction du stress thermique en climat chaud et sec; néanmoins, elle doit être combinée avec l'ombrage des espaces urbains.

V- 2.2. La géométrie urbaine et l'environnement thermique au Sud du Maroc.

Dans la ville chaude et aride de Fez (Maroc), sous une latitude moyenne de 34°N, Grundström et al. (2003) confirment l'effet de la géométrie urbaine sur l'environnement thermique urbain en comparant les microclimats respectifs d'un quartier traditionnel à très forte densité spatiale (H/W compris entre 7 et 10) et une nouvelle extension urbaine, au tracé plus régulier et à faible densité spatiale (H/W compris 0.5 et 0.7). Les données de terrain montrent l'existence d'un îlot de chaleur urbain nocturne au niveau des deux quartiers de la ville avec néanmoins une surchauffe plus importante dans le quartier traditionnel. Au cours de la journée en revanche, durant l'après-midi, la température maximale du quartier traditionnel est d'environ 8°C plus basse que celle du site de référence au niveau de l'aéroport. L'îlot de fraîcheur ainsi identifié se produit uniquement dans le quartier traditionnel de structure très compacte, les températures de l'air dans le quartier moderne étant légèrement supérieures à celles du site de référence.

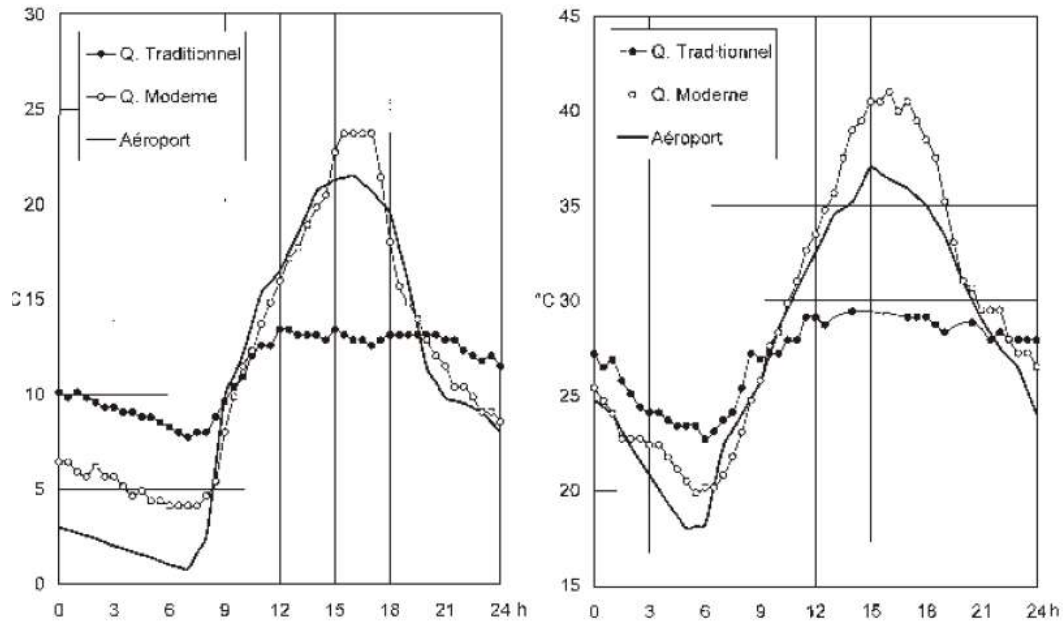


Fig. V- 6. Températures de l'air relevées dans les quartiers d'habitation de la ville de Fez ainsi qu'à l'aéroport au cours d'une journée d'hiver (à gauche) et d'été (à droite).

La comparaison des températures intra-urbaines relevées dans les deux quartiers révèle par ailleurs des différences importantes, aussi bien en été qu'en hiver. Durant la période la plus froide du jour, la rue du quartier traditionnel est de 2 à 4°C plus chaude et durant la période la plus chaude du jour, cette même rue présente une température de près de 10°C inférieure à celle du quartier moderne. L'amplitude diurne se situe autour de 20°C pour le quartier d'habitation moderne alors qu'elle ne dépasse pas les 6°C dans le quartier traditionnel.

Ces résultats confirment l'importance du prospect H/W dans le climat urbain: les grandes différences dans le prospect H/W (et le facteur d'ouverture au ciel) entre les deux quartiers explique que le quartier moderne, caractérisé par des prospects H/W plus faibles et un facteur d'ouverture au ciel plus grand, est non seulement soumis à un plus fort rayonnement solaire direct et diffus mais aussi à une plus forte perte de rayonnement de grande longueur d'onde vers la voûte céleste. Ce qui explique pourquoi le quartier moderne est plus chaud le jour et plus froid la nuit. En raison de la forte inertie thermique du quartier traditionnel, la Médina résiste mieux aux variations climatiques comparées à la nouvelle zone urbaine. Son climat stable est pour une grande part due à la forte densité du tissu urbain et au prospect H/W élevé.

Toutefois, contrairement aux résultats obtenus par Pearlmutter et al. (1999) et Pearlmutter et al. (2006), l'orientation des rues semble sans effet sur les régimes des températures aussi bien dans le tissu traditionnel que dans le quartier moderne. Ces résultats sont en rapport avec la géométrie des rues analysés. Dans le quartier traditionnel, les rues sont tellement compactes et sinueuses que le rayonnement solaire pénètre rarement, indépendamment de l'orientation des rues. Dans le quartier moderne en revanche, les rues sont tellement larges que les différences de températures entre elles peuvent être nivelées par les mouvements d'air horizontaux (Johansson, 2006). L'effet simulé de l'orientation des rues sur les températures de l'air indique cependant qu'une rue orientée Est-ouest est plus chaude qu'une rue orientée nord-sud. La différence se situe entre 2 et 5°C avec une différence maximale au cours de l'après-midi.

En termes d'écoulements d'air, la densité des constructions de la Médina influe sur la vitesse du vent qui est inférieure à celle constatée dans le quartier moderne. Dans ce dernier quartier, la vitesse du vent est de 0.8 m/s en hiver et 0.7 m/s en été alors qu'elle est de 0.4 m/s dans l'entité traditionnelle, hiver comme été. L'étude constate aussi une faible interaction entre l'air horizontal et vertical dans le quartier traditionnel, ce qui a pour effet la maintenance des différences entre les températures de l'air dans le canyon et la couche d'air au-dessus du toit. Les échanges convectifs en présence dans le quartier traditionnel sont essentiellement des phénomènes nocturnes et le taux de ventilation dans la Médina est faible.

Pour conclure de l'effet de la géométrie urbaine sur le confort thermique extérieur, cette étude indique qu'en considération des possibilités d'ensoleillement du quartier moderne, le confort d'hiver est meilleur que celui de la Médina pendant la journée. Au cours de l'été en revanche, la vieille ville, de forte densité urbaine, a un impact régulateur sur le microclimat qui est plus confortable que celui du quartier moderne.

V- 2.3. La forme urbaine vernaculaire et le confort thermique dans le Sahara Algérien.

L'effet de la géométrie urbaine sur l'ombrage des surfaces de la rue canyon pour différentes orientations est examiné en outre par Bourbia et Awbi (2004) dans une étude comparative à El-Oued, au sud de l'Algérie, sous une latitude de 33.22°N. L'objectif est d'évaluer la mesure dans laquelle ces paramètres influent sur la température dans la rue. Les données de terrain confirment les résultats de Grundström et al. (2003) et montrent des températures de l'air et de surface plus faibles dans le quartier traditionnel, caractérisé par les prospects les plus élevés. La température de l'air maximale enregistrée en été pour une rue d'orientation nord-sud dans la vieille ville ($H/W = 2$) est de 4 à 5 degrés inférieures à celle du quartier contemporain ($H/W=0.5$). L'analyse numérique révèle de son côté que lorsque le prospect d'une rue est faible ($H/W=0.5$), la fraction d'ombrage produite n'excède pas les 35 % et ceux, même pour une rue d'orientation Nord-sud.

En hiver, les mesures sur site montrent qu'il n'existe pas une grande différence dans les températures extérieures entre les deux sites et la campagne avoisinante. La caractéristique la plus importante de la forme construite de l'entité traditionnelle à El-Oued serait donc la protection des bâtiments de l'irradiation solaire d'été : seulement une petite proportion des bâtiments demeure exposée aux rayonnements solaires directs. Le tissu moderne est en revanche exposé à l'irradiation solaire une grande partie de la journée et l'asphalte, de couleur sombre couvrant les surfaces, agit comme un "piège à chaleur".

Concernant l'influence de l'orientation, et en accord avec les conclusions de Pearlmutter et al. (1999), Pearlmutter et al. (2006) et Pearlmutter et al. (2007), l'analyse des données de terrain indique que dans les deux quartiers analysés, la rue Est-ouest présente des températures de l'air et de surface plus élevées que celles d'une rue Nord-sud. Les résultats montrent par ailleurs que dans les rues Est-ouest, les températures de surface tendent à être similaires, indépendamment du prospect de la rue (0.5 - 2). Ceci s'explique par le fait que les canyons Est-ouest montrent une pénétration maximale du rayonnement solaire en été. La simulation numérique confirme ces résultats et révèle qu'une rue d'orientation nord-sud et de prospect supérieur ou égal à 1.5, peut induire en été un degré d'ombrage de 40 à 80 % de l'aire totale du canyon. En revanche, une rue d'orientation Est-ouest ne peut pas procurer plus de 30 % d'ombrage pour des prospects H/W supérieurs ou égal à 2.

Ces résultats témoignent de l'effet de l'orientation sur les températures de l'air et de surface. À elle seule, la géométrie urbaine ne suffit pas à réduire le stress thermique, elle doit être combinée avec une orientation correcte des rues.

Par ailleurs, des mesures sur site sont conduites en été dans différentes rues canyons de la ville traditionnelle de Beni-Izguen dans la partie Nord du Sahara algérien (latitude subtropicale de 32.40N) (Ali Toudert et al. 2005). L'objectif de l'étude est l'évaluation de l'effet de la géométrie des rues canyons sur le confort thermique en extérieur. Une approche biométéorologique est utilisée et le confort thermique est exprimé par l'index de température physiologique équivalente (PET).

De manière quantitative, les résultats montrent un inconfort thermique élevé, avec une température de rayonnement moyenne et un PET atteignant un maximum de 74 et 55°C respectivement. En l'absence d'ombrage, le stress thermique est observé au cours des heures de matinée et au moins pour une grande partie de la journée. Les résultats indiquent que l'ombrage induit par des prospects élevés réduit de manière substantielle l'inconfort thermique des piétons au niveau de la rue canyon. Les prospects élevés ($H/W = 4$) réduisent l'exposition à l'énergie solaire et affectent le pourcentage d'absorption des rayonnements de courtes longueurs d'ondes. Ils réduisent également l'influence de l'orientation. Cependant, il est observé que l'orientation N-S est la plus confortable excepté aux environs de midi, et une rue orientée NE-SO est plus stressante qu'une rue NO-SE puisque les effets d'ombrage sont plus effectifs dans ce cas. La période d'inconfort thermique pour des orientations intermédiaires est plus courte avec des rues étant toujours partiellement ombragées, et offrent par conséquent une alternative d'ajustement aux piétons.

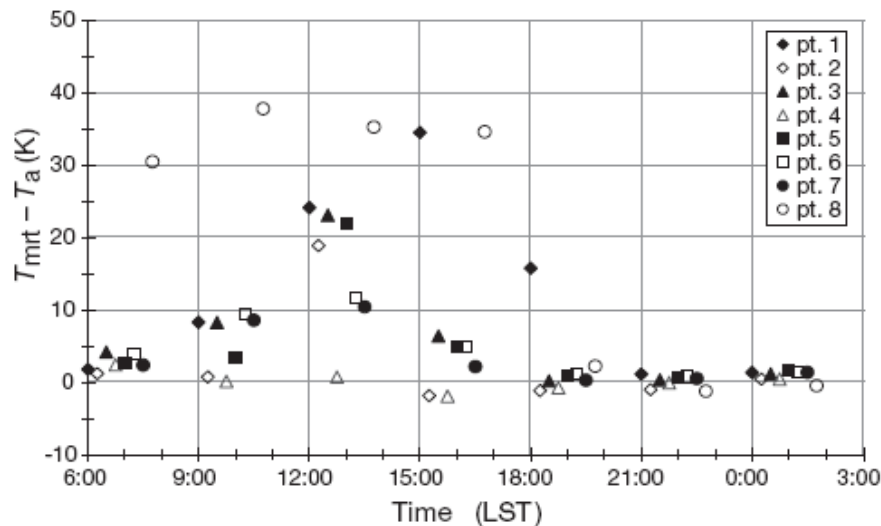


Fig. V- 7. Différence entre la température radiante moyenne (T_{mrt}) et la température de l'air (T_a) à 1.2 m au-dessus du sol durant une journée type d'été dans le ksar de Beni-Izguen. (Source : Ali-Toudert et al. 2005)

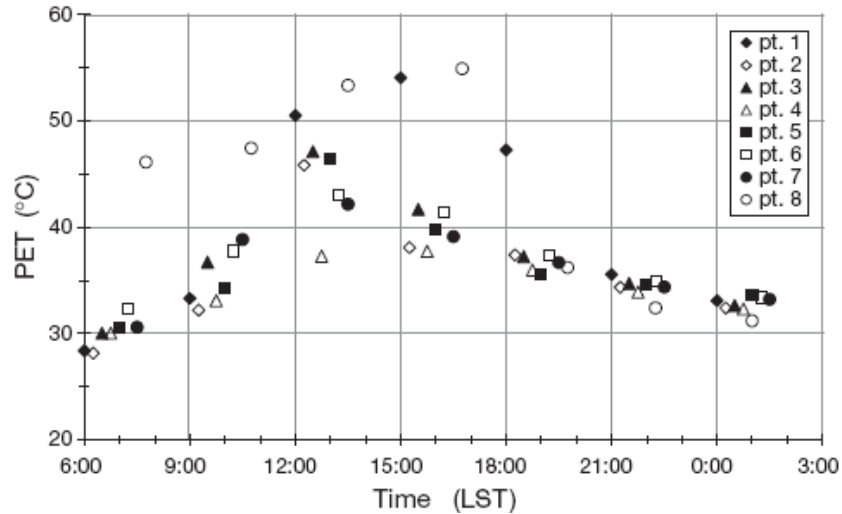


Fig. V- 8. La température physiologique équivalente (PET) à 1.2 m au-dessus du sol durant une journée type d'été dans le ksar de Beni-Isguen. (Source : Ali-Toudert et al. 2005)

Le gain de chaleur absorbé par une personne debout est élevé même tôt dans la matinée ou tard dans l'après-midi en raison de la position du soleil. Ce gain d'énergie dépend de : l'exposition du corps lui-même et l'exposition des surfaces urbaines environnantes. La représentation distincte des rayonnements de courtes et grandes longueurs d'ondes révèle que le rayonnement de grande longueur d'onde est une source significative de perte de chaleur et les valeurs absolues excèdent largement le rayonnement de courte longueur d'onde absorbé. Par conséquent, l'ombrage des surfaces urbaines environnantes est aussi important que l'ombrage de la personne en vue de réduire le stress thermique.

Les passages couverts enregistrent les valeurs de PET les plus faibles puisque la chaleur émise à partir des surfaces est notablement plus faible en comparaison avec les autres canyons, ce qui corrobore l'utilité des galeries comme passages piétons.

Contrairement à l'opinion commune, la température de l'air observée est modérément inférieure dans les canyons urbains en comparaison à un emplacement libre ($\Delta T_{\max} = 2 \text{ K}$), ce qui contraste avec les différences de températures très élevées rapportées par Coronel et Alvarez (2001) et Grundström et al. (2003).

L'étude montre également l'existence d'une ventilation urbaine dans les rues de la vieille ville compacte sans pouvoir l'expliquer pour autant. Les auteurs indiquent que la vitesse du vent joue un rôle important dans la sensation du confort final et l'influence de la vitesse du vent diffère selon que l'emplacement soit irradié ou non, c.-à-d. des valeurs de température de rayonnement moyennes (T_{mrt}) faibles ou élevées. Explicitement, l'augmentation de la vitesse du vent améliore la sensation de confort : pour des vitesses de vent de 2 à 5 m/s, PET peut décroître jusqu'à 12 K dans le cas d'un inconfort extrême contre 2 à 4 K pour des emplacements avec des valeurs de T_{mrt} faibles. Ces résultats sont en accord avec ceux de Pearlmutter et al. (1999), Pearlmutter et al. (2006) et Pearlmutter et al. (2007) qui mettent en exergue l'importance de la ventilation urbaine dans la réduction du stress thermique d'été.

Les conclusions de cette étude confirment les études précédentes sur l'effet de la géométrie urbaine dans la réduction du stress thermique d'été dans les villes du désert. Elles soulignent également l'importance de l'orientation et des protections horizontales (passages couverts). De même, cette recherche met en exergue le rôle important de la ventilation dans l'amélioration du confort thermique d'été.

Conclusion.

Les résultats des études développées ci-dessus (Pearlmutter et al. 1999, Grundström et al. 2003, Bourbia et Awbi 2004, Ali Toudert et al. 2005, Pearlmutter et al. 2006, Johansson et al. 2006, Pearlmutter et al. 2007) indiquent clairement que dans un environnement chaud et aride, le confort thermique d'un piéton peut être modifié de manière considérable par la géométrie de la rue et son orientation.

En été, pour des rues Nord-sud, le confort thermique du piéton peut être fortement modifié par la géométrie seule de la rue. Dans les canyons Est-ouest en revanche, l'effet de la géométrie de la rue est moins prononcé.

En hiver, l'orientation N-S assure une meilleure pénétration du rayonnement solaire que dans une orientation E-O, ce qui conduit un meilleur confort thermique du piéton, au moins aux environs de midi.

Ces résultats démontrent l'effet dominant de l'irradiation solaire sur le confort extérieur dans de telles régions. Les effets du vent ne sont cependant pas négligeables puisque l'inconfort ressenti le jour est moins sévère dans les rues parallèles au vent et le refroidissement nocturne y est plus important. Combinée à des effets d'ombrage, la ventilation par le vent permet l'amélioration du confort thermique d'été.

Les études portant sur la promotion de la ventilation urbaine dans les zones subtropicales demeurent cependant très rares car la ventilation urbaine n'est pas considérée comme un facteur important dans la réduction du stress thermique d'été. Elle est présentée comme un facteur secondaire et les stratégies déployées en vue de l'amélioration du confort thermique se basent principalement sur des objectifs d'ombrage en été et d'ensoleillement en hiver.

Par ailleurs, les effets des vents froids d'hiver sont inexplorés puisqu'il est supposé que les formes urbaines compactes offrent une protection contre ces vents en réduisant la vitesse des écoulements dans les canyons urbains. Les études de Pearlmutter et al. (1999), Ali-Toudert et al. (2005), Pearlmutter et al. (2006) et Pearlmutter et al. (2007) indiquent pourtant la présence de vitesses de vent élevées en dépit de la forte compacité des tissus urbains analysés. La compacité seule du tissu urbain, exprimée par la géométrie de ses rues, ne suffit donc pas à protéger des vents forts caractéristiques des zones arides. Ces phénomènes demeurent inexpliqués et leurs effets sur le confort thermique peu connus.

Au travers de l'étude bibliographique développée dans les chapitres II, III, IV et V, il a été mis en exergue l'effet de la morphologie urbaine (c.-à-d. la structure tridimensionnelle des bâtiments, les espacements entre eux et leur orientation) sur l'environnement thermique et aérodynamique aux échelles de la ville d'une manière générale et de la rue canyon de manière plus spécifique.

Ainsi, dans les processus de modification du climat de la ville et de réchauffement des surfaces urbaines, la morphologie urbaine joue un rôle important : elle agit essentiellement sur le pourcentage de rayonnement solaire absorbé. Elle influence le processus de piégeage des rayonnements solaires incidents et des rayonnements de grande longueur d'onde réfléchis, la réduction du transfert turbulent dû à la réduction des vitesses de vent et le pourcentage de chaleur anthropique restituée. Ces effets se traduisent essentiellement par un effet de surchauffe nocturne locale dans les rues canyons. L'effet de surchauffe nocturne, identifié comme îlot de chaleur urbain, est par ailleurs fortement dépendant de la vitesse des vents, ce qui souligne l'importance de la ventilation urbaine dans le refroidissement des masses bâties. La ventilation urbaine est de ce fait un aspect important à considérer en été en raison de son influence sur le bilan thermique

de la rue, la réduction de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain et l'amélioration du confort thermique d'une manière générale.

À l'échelle de la canopée urbaine, l'état de l'art révèle une connaissance abondante sur les caractéristiques d'écoulement d'air dans une rue canyon isolée, entité formée par deux bâtiments. La structure de ces écoulements d'air ne dépend pas uniquement de la géométrie de la rue exprimée par le prospect H/W mais est également fonction de la géométrie du bâtiment représentée par le rapport L/H, la configuration de la rue (symétrique ou asymétrique), la forme de la toiture, la surface urbaine, les conditions d'écoulements au-dessus des toits (vitesse et direction) ainsi que des effets thermiques dus à l'irradiation solaire. Il faut souligner néanmoins qu'une grande partie de ces connaissances est obtenue à travers des expériences de visualisation et de modélisation numérique, les études sur site étant plus rares. Par ailleurs, les observations de terrain se limitent presque exclusivement à l'échelle de la rue canyon, prise isolément. Rares sont les expériences entreprises aux échelles plus larges et emboîtées du quartier et de la ville. En outre, la plupart des études portent sur des problèmes de pollution et de dispersion des polluants. Les aspects liés au confort thermique et la ventilation demeurent peu étudiés, notamment dans les tissus urbains compacts, caractérisés par des propriétés de ventilation relativement faibles. Enfin, il faut souligner que la plupart des études sur site menées jusqu'ici sont réalisées dans des villes nord-américaines ou européennes, dans un autre contexte climatique et géographique que celui des climats chauds et secs des zones arides. Ces zones nécessitent pourtant une meilleure compréhension des phénomènes aérodynamiques en raison de l'importance des vents forts et des conditions de températures extrêmes caractéristiques de ces climats. En fait, dans de telles zones arides, la plupart des recherches entreprises sur les microclimats urbains et le confort thermique extérieur ne s'intéresse qu'aux aspects liés au rayonnement solaire et aux températures d'air. Ces études révèlent que le confort thermique d'un piéton peut être modifié de manière considérable par la géométrie de la rue et son orientation ainsi que par l'usage de protections horizontales (passages couverts). Toutefois, seule l'irradiation solaire est considérée comme facteur dominant sur le confort thermique extérieur. La ventilation urbaine est présentée comme un facteur secondaire sur la réduction du stress thermique d'été et les effets des vents forts, chauds et secs en été, froids et humides en hiver, demeurent inexplorés. De ce fait, les stratégies déployées en vue de l'amélioration du confort thermique se basent principalement sur des objectifs d'ombrage en été et d'ensoleillement en hiver. Des recherches récentes montrent cependant que quelques soient les réponses apportées à la perception du confort humain en extérieur, le vent apparaît toujours comme facteur déterminant, même si un paramètre à lui seul ne suffit pas à l'évaluation des conditions de confort thermique. Certes, la température de l'air a un impact important sur le confort de l'individu puisqu'elle est liée au bilan thermique du corps humain, néanmoins, son effet est étroitement liée aux conditions de vent et ne peut être traitée isolément de la vitesse de vent.

CHAP. VI. Application du protocole à un cas d'étude.

En conclusion de la recherche bibliographique, il apparaît que l'environnement aéraulique dépend de nombreux paramètres physiques qu'il faut pouvoir isoler de manière à comprendre les influences mutuelles et *in fine*, permettre de mieux planifier les villes pour bénéficier et/ou se protéger du vent.

Aussi, notre recherche porte sur l'étude des écoulements d'air dans les textures urbaines denses, caractérisées par des géométries irrégulières et une topographie complexe. Elle vise à évaluer les liens entre écoulements d'air, topographie et morphologie urbaine (configuration des bâtiments et orientation) et déduire les paramètres physiques fondamentaux dans les modifications microclimatiques. Elle se base sur une approche globale et de détail et retient pour cas d'étude le quartier traditionnel de la ville de Ghardaïa, dans la Pentapole du M'zab, en milieu chaud et sec. Ce choix est justifié *a priori* par les qualités d'intégration supposées citées par de nombreux auteurs.

VI.1. Présentation du cas d'étude.

VI- 1.1. Inscriptions territoriale et géographique.

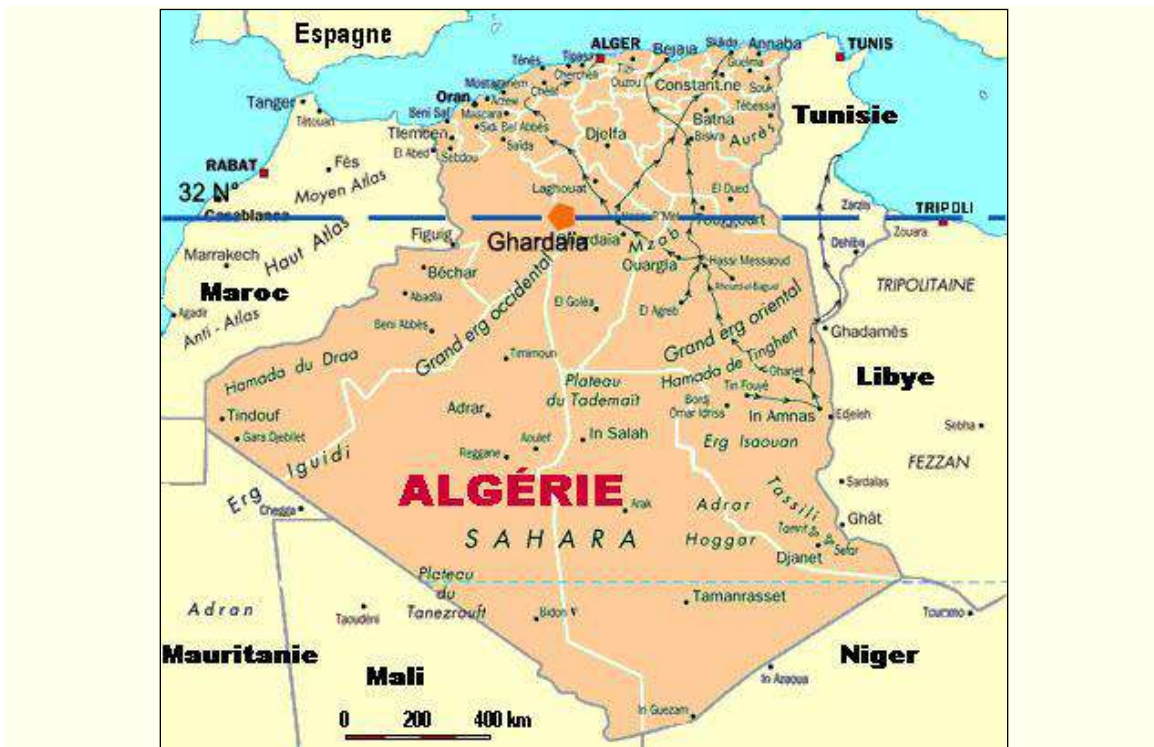


Fig. VI- 1. Inscription territoriale et géographique de la vallée du M'zab.

Source : <http://www.tlfg.ulaval.ca/ax/afrique/algeriecarte.htm>.

La Vallée du M'Zab se trouve dans le Sahara algérien à 600 km au sud d'Alger, capitale de l'Algérie. Elle est comprise entre 32° et 33°20' de latitude Nord et 2°30' de longitude Est. Elle est située sur un plateau rocheux, entaillé et d'origine calcaire, dit "Hamada". En général, la surface montre de la roche nue, lissée par l'érosion éolienne. Ces érosions ont façonné un ensemble de pitons et de monticules escarpés formant la "sebka" (filet) au milieu de laquelle s'écoule l'oued M'Zab.

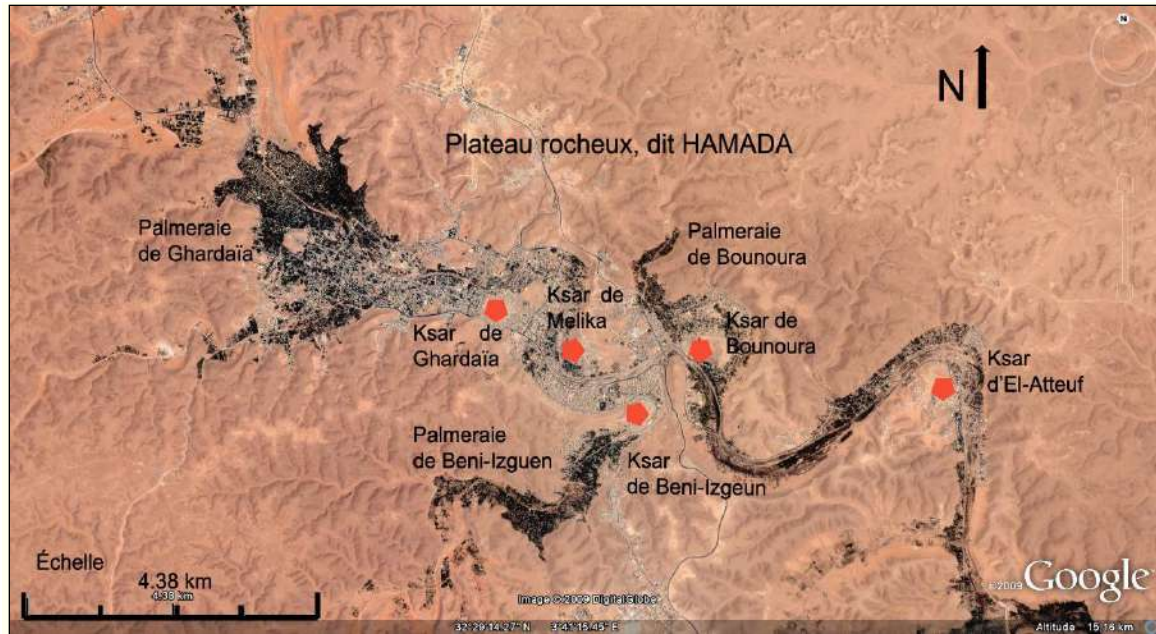


Fig. VI- 2. Illustration de la vallée du M'zab avec les cinq ksour implantés tout le long de l'oued M'Zab. Adaptée à partir de Google Earth.

La vallée du M'zab est d'une altitude variable entre 300 et 800 mètres environ et mesure 20 km de long sur 2 km de large (Benyoucef 1986). Elle est composée d'espaces minéraux, les ksour, et d'espace végétal, les palmeraies qui entourent ces derniers. Sept ksour forment la vallée du M'Zab. Cinq sont situés sur les berges de l'oued M'Zab et forment ainsi la Pentapole du M'Zab. Ce sont Beni-Isguen, Bounoura, El Atteuf, Ghardaïa et Melika. Deux ksour, Guerrarra et Berriane, sont situés en revanche à quelques kilomètres de la Pentapole.

VI- 1.2. Bref aperçu historique: le parcours humain.

L'idéologie des mozabites trouve ses racines dans la doctrine Kharidjite ; celle-ci est la conséquence d'un fait historique datant de la fin du VII^{ème} siècle. Ce fait historique prit place dans la péninsule arabique lorsqu'un groupe de fidèles musulmans proclama sa désobéissance au pouvoir central concernant la question du khalifat ou légation du pouvoir. Ce schisme entraîna une répression sanglante des fidèles kharidjites qui furent contraints de quitter la péninsule arabique et de s'implanter en Afrique du Nord pour y continuer leur lutte. C'est ainsi que s'édifièrent à partir du début du VIII^{ème} siècle différents établissements humains qui furent soumis à différentes guerres et conquêtes. Parmi ces villes, la ville de Tahert (située aux abords de l'actuelle ville de Tiaret en Algérie) fut édifée en 757 sur les hauts plateaux. A la suite de l'effondrement de l'état de Tahert en 909, ses habitants se réfugièrent dans la province de Ouargla à 200 km au sud de la vallée du M'Zab. Ils y édifèrent la ville de Sedrata qui était décrite comme une ville faste et riche. Elle fut le siège de plusieurs batailles, ce qui poussa ses habitants à trouver refuge dans l'actuelle vallée du M'Zab, site désertique et aride.

Le choix du site « dur et aride » de la vallée répondait ainsi à une volonté des kharidjites de sauvegarder leur religion et doctrine car *“depuis 1012, période de croissance d'El Atteuf, premier ksar érigé, les Mozabites ou « Beni Mozab, ont choisi de vivre en autarcie pour sauvegarder leur idéologie et résister aux menaces de l'extérieur”* (Benyoucef 1986). L'idéologie kharidjite et ses

préceptes religieux stricts ont dicté la formalisation d'un ordre bâti serré, reflet de la cohésion de son corps social. La première cité, El-Atteuf, fut édifée en 1012, puis vinrent successivement Bounoura (1046), Ghardaïa (1053), Melika (1124) et Beni-Izguen (1347). L'intervalle moyen entre l'une et l'autre est de 2 km à l'exception d'El-Atteuf, située à 6km de Bounoura. En s'éloignant de la pentapole, Guerrara fut fondée en 1630 et Berriane en 1679.

L'importance de l'espace temps écoulé entre l'implantation du premier K'sar en 1011 et la création du dernier en 1679 (plus de six siècles et demi) laisse suggérer la constitution d'un savoir faire riche et une adaptation aux conditions de l'environnement naturel rude.

VI- 1.3. Caractéristiques climatiques de la vallée du M'zab.

Le climat chaud et sec qui caractérise la vallée du M'zab se traduit par une sécheresse excessive combinée à des températures journalières élevées, un rayonnement solaire intense, des amplitudes de température journalière importantes, un taux d'humidité relative très faible en été ainsi que des vents forts, froids et humides en hiver, chauds et secs en été.

VI- 1.3.1. Le rayonnement solaire global.

L'éclairement énergétique global horizontal est important et peut atteindre des valeurs maximales instantanées de l'ordre de 1040 W/m² en été (juin/juillet). En hiver, ces valeurs varient entre 510 W/m² et 700 W/m² (URAER). Ces conditions impliquent des températures d'air élevées (ONM).

VI- 1.3.2. Les températures de l'air.

Les étés sont chauds et secs avec des températures d'air moyennes mensuelles comprises entre 32 et 36°C et des températures moyennes maximales de 40-42°C. Les températures maximales absolues peuvent atteindre 46°C tandis que les températures minimales absolues varient entre 19 et 21°C respectivement en juillet et août (ONM, Ghardaïa).

Le ciel est dégagé le plus gros de l'année, permettant la surchauffe solaire durant la journée et le refroidissement nocturne durant la nuit. Il en résulte de larges amplitudes thermiques journalières, aux environs de 14-15°C et parfois même plus en été, de l'ordre de 20°C.

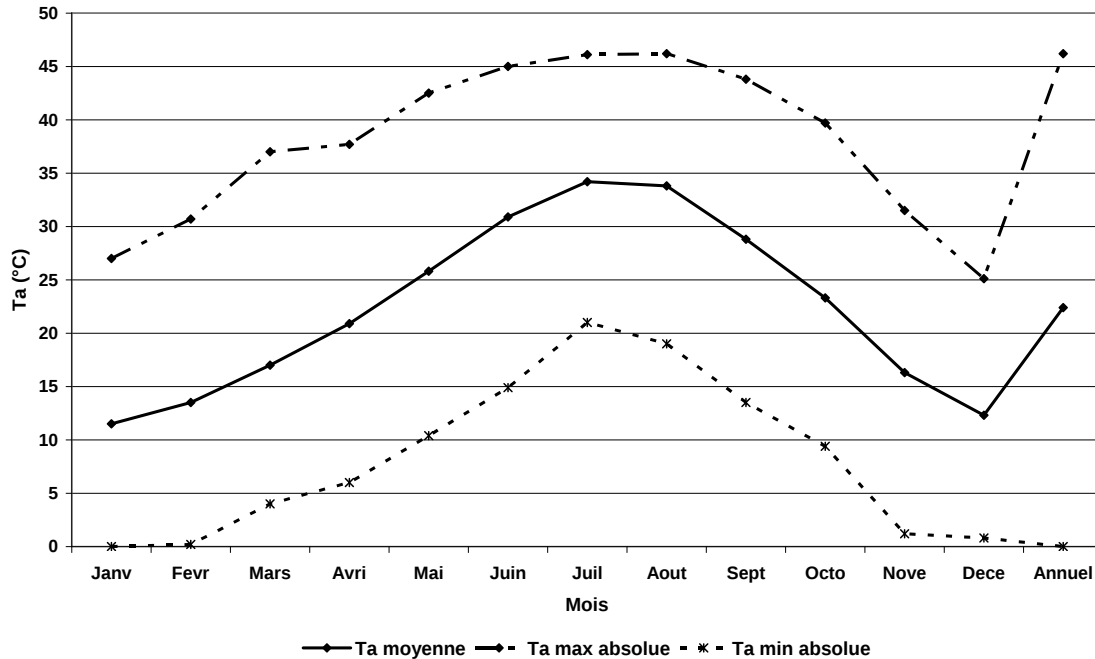


Fig. VI- 3. Variation mensuelle des températures de l'air moyenne, maximale et minimale de la ville de Ghardaïa. Graphe effectué à partir des données sur une période de 10 ans : 1995-2004. (ONM, Ghardaïa).

Les hivers sont froids et relativement humides, avec des températures d'air minimales absolues chutant jusqu'à 0°C en janvier. Les températures d'air moyennes varient entre 9 et 14°C et les températures maximales absolues sont comprises entre 20 et 27°C. L'amplitude moyenne mensuelle varie entre 9 et 12.5°C tandis que l'amplitude maximale est de l'ordre de 15-17°C.

Les amplitudes mensuelles estivales sont plus importantes que les amplitudes hivernales. L'amplitude moyenne annuelle est de 12-13°C mais peut atteindre la valeur de 20°C.

VI- 1.3.3. L'humidité relative.

En été, l'humidité relative moyenne varie entre 23 et 27% avec des valeurs d'humidité relative moyenne minimale et maximale respectives de 19 et 35%. La sécheresse caractéristique de la région peut atteindre des valeurs extrêmes avec des taux d'humidité relative minimale compris entre 2 et 6 %. En revanche, le taux d'humidité relative maximale peut atteindre 50 à 52%.

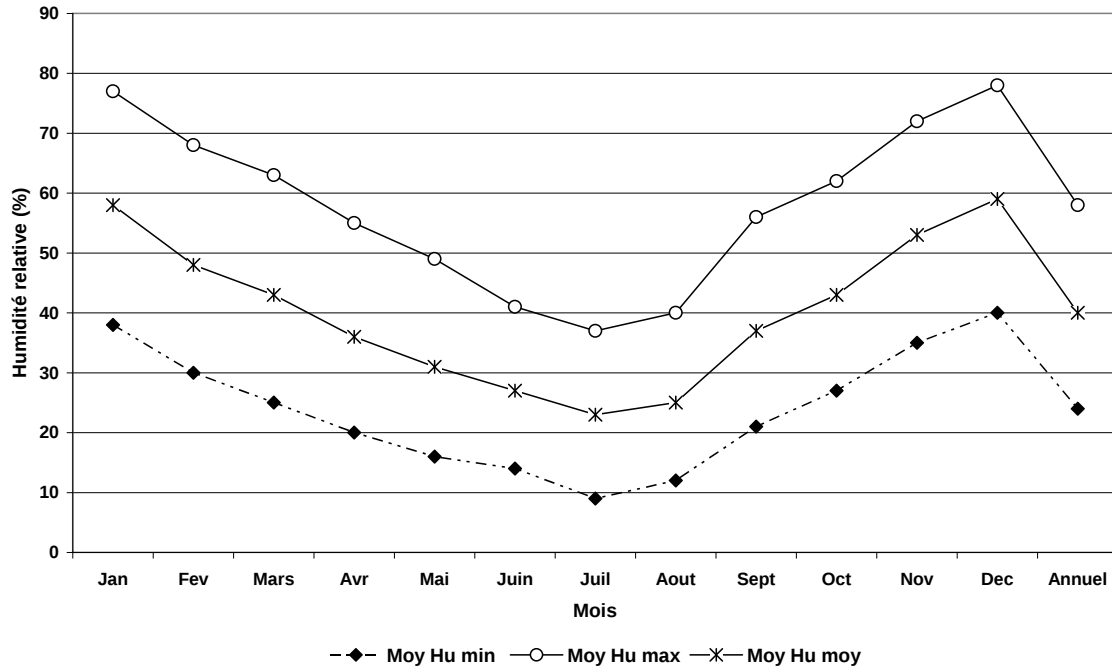


Fig. VI- 4. Graphe de la moyenne de l'humidité relative maximale, minimale et moyenne de la ville de Ghardaïa sur une période de dix ans. Période 1995-2004. (ONM, Ghardaïa).

Les hivers sont relativement humides avec des valeurs d'humidité relative moyenne de l'ordre de 58%. L'humidité relative moyenne maximale varie entre 67 et 78% tandis que l'humidité relative moyenne minimale est comprise entre 39 et 49%. Certains hivers peuvent être particulièrement humides avec des taux d'humidité relative maximale de 85-88%. En revanche, les hivers les plus secs sont caractérisés par des valeurs d'humidité relative n'excédant pas 22-28%. L'humidité relative moyenne annuelle est comprise entre 37 et 47%.

VI- 1.3.4. La pluviométrie.

La moyenne annuelle de la hauteur de pluie se situe entre 50 et 70 mm avec des années de sécheresse où la hauteur ne dépasse pas 20 à 30 mm. Les extrêmes enregistrés sont au maximum 120.5 mm et au minimum 18 mm. Il faut une forte pluie de plusieurs heures pour provoquer la crue de l'oued. Certaines années, le taux de précipitations est tellement important que cela engendre des inondations et d'importantes pertes humaines et matérielles.

VI- 1.3.5. Le régime des vents.

Ghardaïa se caractérise par des vents moyens compris entre 1.00 et 5.00 m/s qui représentent 50 % des vents annuels. La vitesse moyenne est de 4.00 m/s. Les vents les plus forts, supérieurs à 6.00 m/s, représentent 28% des vents synoptiques dont 9% sont supérieur à 10.00 m/s.

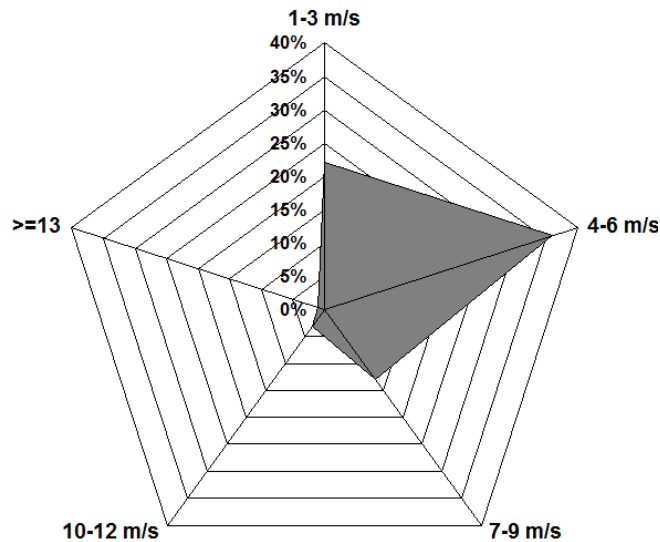


Fig. VI- 5. Pourcentage des vents selon leur intensité de la ville de Ghardaïa sur la base des données d'une période de 10 ans : 1992-2002 (ONM, Ghardaïa).

Les vents dominants sont de direction Nord-Ouest en hiver (10,44%), Nord-Est en été (12,44%). Ils sont forts, froids et relativement humides en hiver, chauds et secs en été.

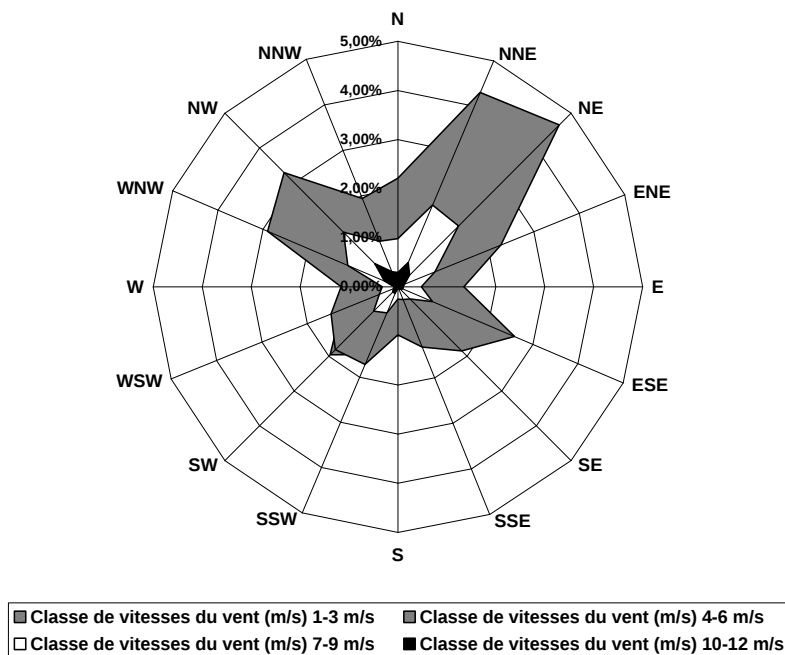


Fig. VI- 6. Rose des vents de la ville de Ghardaïa établie sur la base des données d'une période de 10 ans : 1992-2002 (ONM, Ghardaïa).

L'analyse de la vitesse moyenne du vent moyen, prise à l'échelle du mois, permet de voir la variation mensuelle du vent au cours de l'année. Le vent moyen est caractérisé par une

croissance à partir de janvier à avril, une diminution à partir du mois de mai. Les plus fortes valeurs sont enregistrées au printemps ou en début d'été (mars, avril, mai et juin) et sont de direction dominante Sud-est. Les vents atteignent des vitesses de 16.00 m/s et plus et sont à l'origine de fortes tempêtes de sable.

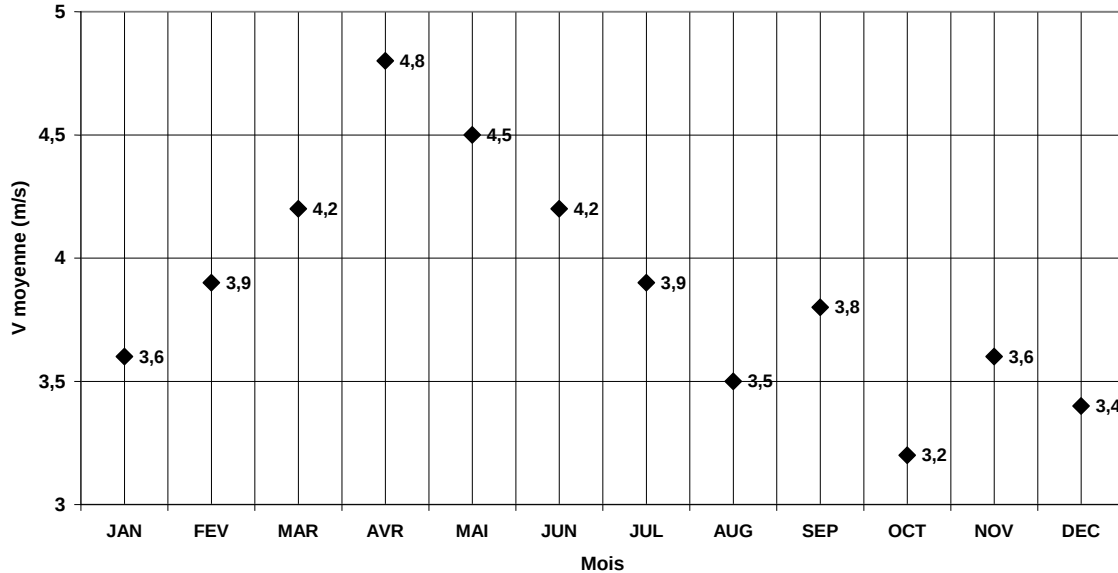


Fig. VI- 7. Evolution mensuelle des vitesses du vent moyen de la ville de Ghardaïa sur la base des données d'une période de dix ans : 1992-2002 (ONM, Ghardaïa).

Au cours du cycle journalier, la variation du régime des vents se caractérise par des vitesses élevées au milieu de la journée et des vents faibles à calmes au cours de la nuit. La forte convection qui se produit au cours de la journée induit en effet une hausse des vitesses de vent alors qu'au cours de la nuit, en raison de la stabilité atmosphérique, les vents s'affaissent au voisinage du sol.

VI- 1.3.6. Les vents de sable.

Les tempêtes de sable constituent une des principales contraintes climatiques et un facteur de nuisance en zone aride. A Ghardaïa, 19 tempêtes de sables sont recensées en l'espace de 10 ans. Elles ont surtout lieu au mois de mai et février. Elles se présentent comme un sable qu'un vent fort et turbulent soulève à grande hauteur. Le devant de la tempête peut se présenter comme un mur élevé et large. La visibilité minimale peut être réduite à 100 m, avec des vitesses de vents correspondantes de 36 m/s. Si l'on se réfère aux données de l'Office Nationale de Météorologie, il faut une vitesse de vent minimale de 15 m/s pour déclencher une tempête de sable. Pour des vitesses de vent supérieures à 16 m/s, le ciel est invisible.

La durée d'une tempête de sable varie entre 15 min et 3h00 de temps mais peut atteindre une durée de 8h00. Ces tempêtes sont essentiellement de direction Ouest Sud-ouest, Ouest Nord-Ouest et Ouest, et ce quelque soit la période de l'année.

Le tableau ci-après présente un recensement de toutes les tempêtes de sable ayant eu lieu à Ghardaïa entre 1995 et 2004.

Tableau VI- 1. Tempêtes de sable sur une période de 10 ans (1995-2004) à Ghardaïa. (ONM, Ghardaïa).

Année	Mois	Durée	Visibilité minimale	Direction	Vitesse
2004	21 février	8h	500 m	210°	23 m/s
	3 mars	2h40	300 m	30°	17 m/s
2003	31 Janvier	30 min	400 m	300°	32 m/s
2002	7 mai	1h45	900 m	280°	21 m/s
	22 mai	15 min	300 m	230°	25 m/s
	19 août	2h20	500 m	60°	23 m/s
2001	3 mai	2h00	200 m	340°	22 m/s
2000	21 mai	2h00	500 m	270°	15 m/s
1998	14 juillet	2h00	500 m	280°	17 m/s
	11 septembre	10 min	50 m	270°	30 m/s
1997	20 avril	1h00	500 m	240°	26 m/s
1996	6 février	11h00	300 m	300°	22 m/s
	14 février	1h00	100 m	290°	27 m/s
1995	11 mai	15 min	600 m	250°	34 m/s
	4 septembre	1h40	100 m	290°	36 m/s

Parallèlement aux vents de sable, des phénomènes moins spectaculaires mais tout aussi contraignants caractérisent Ghardaïa : ce sont les chasses sables. Ces dernières se présentent comme des particules de sable soulevées par le vent en quantité suffisante pour voiler ou masquer les objets très bas mais sans réduire de façon appréciable la visibilité au niveau de l'œil. Les chasses sable élevées se caractérisent par une visibilité inférieure à 5 Km et une élévation par rapport au sol supérieure à 2 m tandis que les chasses sable basses induisent une visibilité inférieure à 9 Km et une élévation par rapport au sol inférieure à 2 m.

Sur une période de 10 ans, l'Office National de Météorologie a recensé 515 jours de chasse sable, soit en moyenne 50 jours par an. Ce phénomène se produit essentiellement au mois d'avril, mai et août, coïncidant avec les périodes de vents forts caractéristiques de la vallée du M'zab.

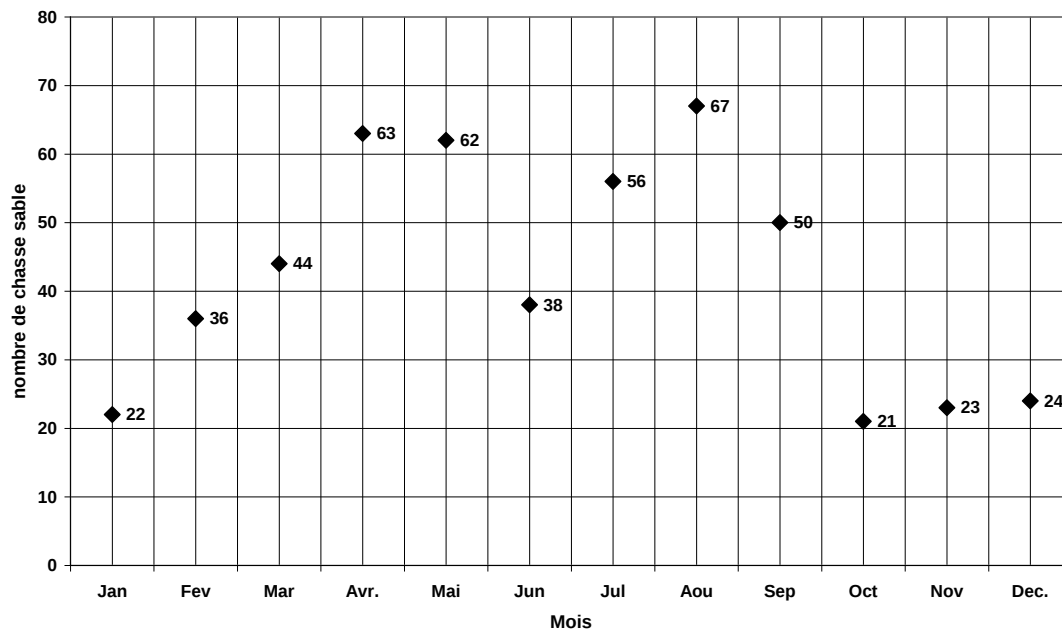


Fig. VI- 8. Nombre de jours avec chasse de sable de la ville de Ghardaïa sur une période de 10 ans. 1995-2004. (ONM, Ghardaïa).

Ainsi, la vallée du M'zab, comme tant de régions désertiques, se caractérise essentiellement par son aridité, des températures journalières d'été élevées, des plages de températures diurnes importantes, une irradiation solaire élevée ainsi que des vents forts et violents qui peuvent constituer un facteur de gêne important pour le confort humain. D'une vitesse moyenne de 4.00 m/s, le vent peut atteindre une valeur de 20.00 m/s et dans des cas extrêmes, 36.00 m/s, provoquant des tempêtes de sable. Ces dernières constituent une des principales contraintes climatiques dans la vallée du M'Zab. La protection contre les vents forts, froids et humides en hiver, chauds et secs en été, constitue de ce fait une priorité dans l'aménagement urbain et doit être pris en considération au même titre que la protection contre l'intense rayonnement solaire d'été caractéristique des régions du désert.

VI- 1.4. Urbanisme et architecture.

La fondation des cités du M'zab résulte d'une initiative volontaire. L'option est prise pour un mode de croissance et d'urbanisation qui repose sur la multiplication de noyaux urbains à territoires autonomes qui bénéficient de monticules à bâtir et de vallées à cultiver (Ben-youcef 1986). La multiplication de ces cités ne relève pas d'un problème de saturation mais d'une volonté de préservation de l'équilibre nature/culture. Les fondateurs devaient délimiter et préserver tout d'abord les espaces propices à la végétation, ceux creusés au fond de la vallée et sillonnés par les cours d'oueds. C'est ainsi que furent édifiées les célèbres villes du M'zab, ou "Ksour", sur les pitons rocheux, possédant chacune son propre territoire (bâti/végétal).

VI- 1.4.1. Le ksar.

Les ksour de la vallée du M'zab sont un type d'habitat traditionnel présaharien où les maisons se regroupent à l'intérieur de murs défensifs renforcés par des tours d'angles. Ils se caractérisent par

une structure serrée, compacte, fortement influencée par le climat d'une part et les pratiques sociales d'autre part.

Du point de vue climatique, une somme de principes a été mise en œuvre aux échelles architecturales et urbaines pour s'adapter à un milieu particulièrement difficile. Les maisons d'habitation sont des constructions en pierre, avec des murs épais, à forte inertie thermique. Elles comportent généralement un étage et une terrasse dotée de galeries et sont organisées autour d'un patio central concentrant l'aération et l'éclairage. Les galeries à arcades sont orientées généralement au sud pour profiter de la chaleur ambiante en hiver. Le gabarit des maisons est régi par le droit à l'ensoleillement, aucune maison ne doit porter ombre à sa voisine. L'alignement des maisons est respecté et il est interdit aux façades de dépasser la hauteur de 7 mètres. En réponse à un climat aride et rude, les surfaces exposées au soleil sont réduites aux seules terrasses et façades d'accès sur rues et les maisons sont mitoyennes. Dans les espaces extérieurs, des protections horizontales sous forme de passages couverts permettent de s'abriter du soleil.

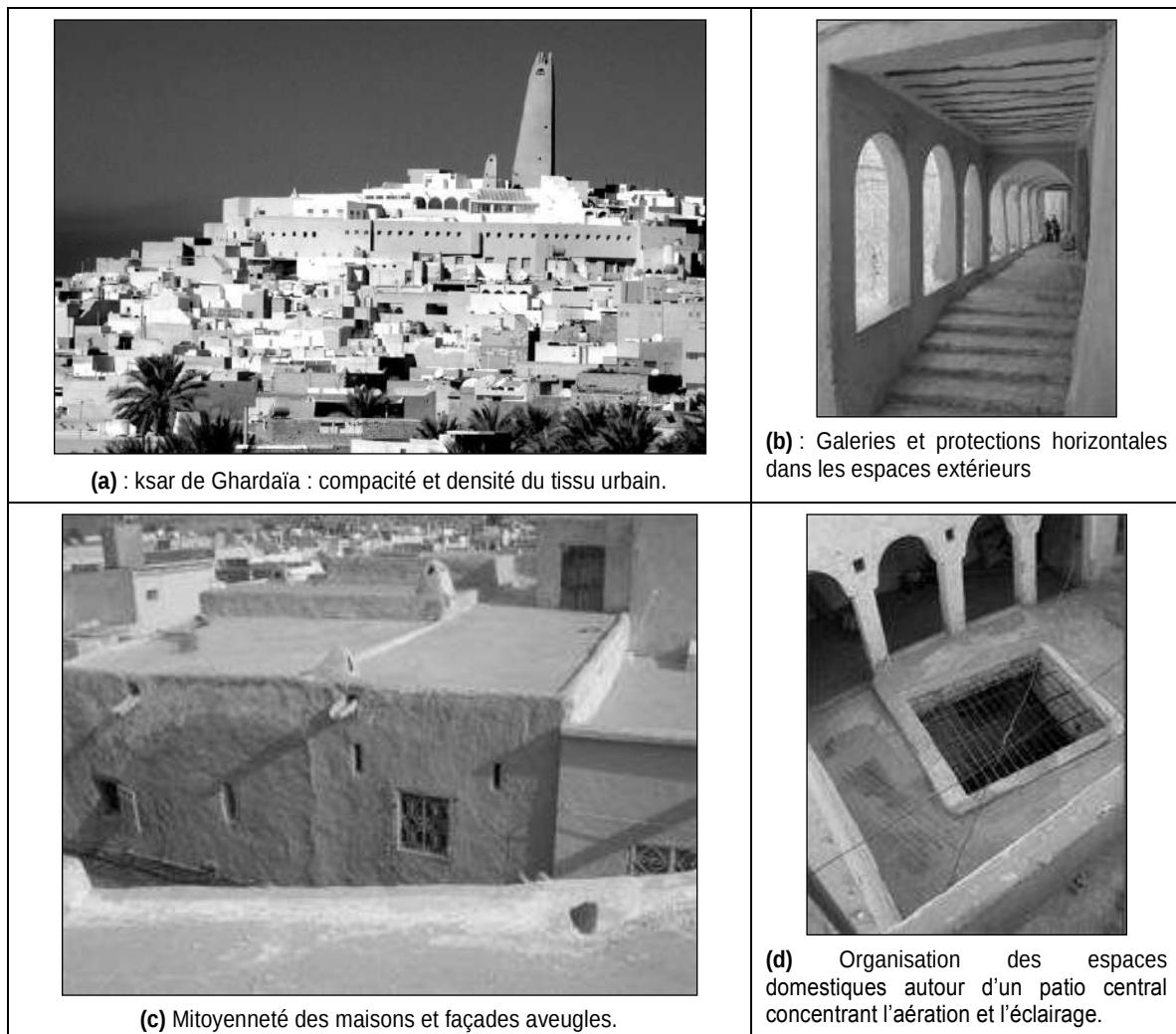


Fig. VI- 9. Mise en œuvre d'un ensemble de principes bioclimatiques dans les ksour.

VI- 1.4.2. La palmeraie.

Elle constitue l'entité végétale et agricole de l'oasis et se développe le long de l'oued M'zab et de l'oued N'Fissa. La distribution de l'eau se fait à travers un système d'irrigation dont les canaux sont intégrés dans les rues et ruelles de la palmeraie. Le système combiné d'évaporation et d'évapotranspiration augmente l'humidité de l'air dans la palmeraie et offre ainsi un microclimat agréable, surtout en été (Kitous et al. 2004, Kitous et al. 2006). Ceci explique le mouvement migratoire saisonnier ksar/palmeraie qui s'effectue durant cette saison.

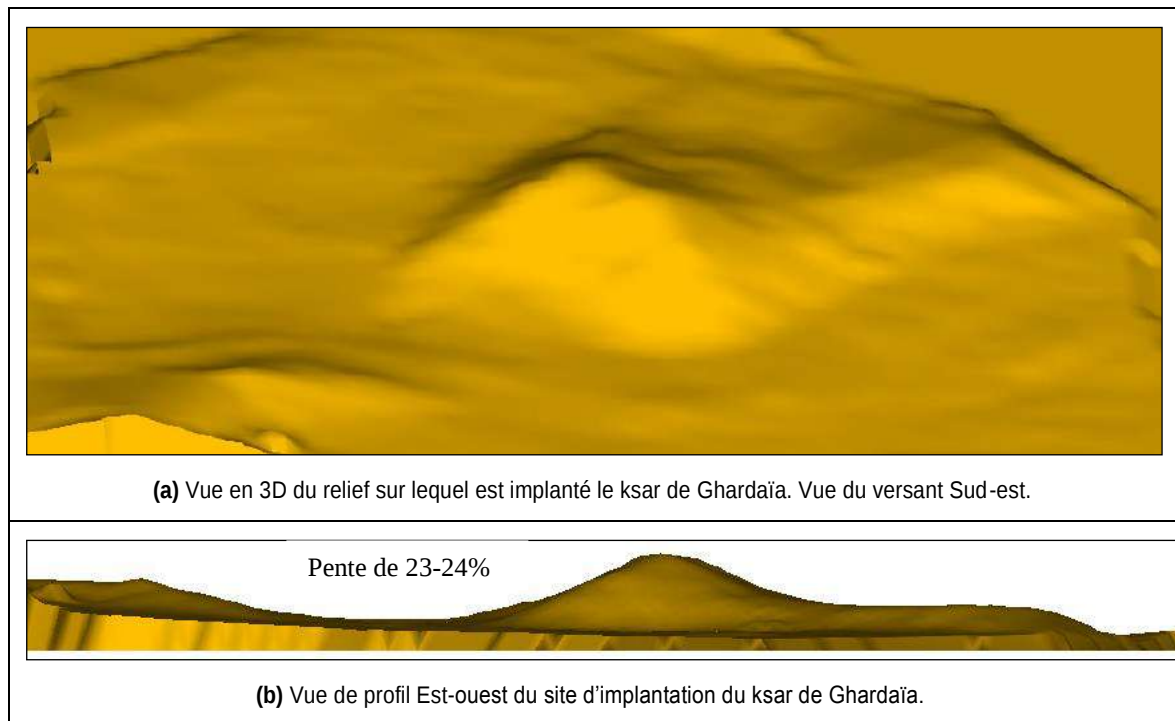
VI- 1.5. Caractéristiques topo-morphologiques du ksar de Ghardaïa.

Le ksar de Ghardaïa se caractérise par une topographie urbaine complexe : un relief naturel accidenté d'une part et une morphologie des formes bâties irrégulière d'autre part.

VI- 1.5.1. Particularités topographiques.

La morphologie du site d'implantation du ksar est complexe, caractérisée par deux parties bien distinctes : une partie accidentée, sous forme de colline, avec des pentes variant entre 11 et 24% (voir profils Est-ouest et Nord-Sud, Fig. VI- 10) et une partie plane, s'étalant tout autour de la butte. Cette configuration particulière du relief va générer un climat local, appelé "topoclimat" dont il faudra déterminer les spécificités.

La forme naturelle du terrain sur lequel est bâti le ksar suggère en effet que les particularités topographiques de ce dernier peuvent affecter le modèle de distribution des écoulements d'air à l'intérieur de la vieille ville. Il convient alors de déterminer la manière dont de tels effets interagissent avec ceux de la morphologie urbaine et s'ils sont en mesure d'améliorer la ventilation naturelle dans les structures urbaines denses.



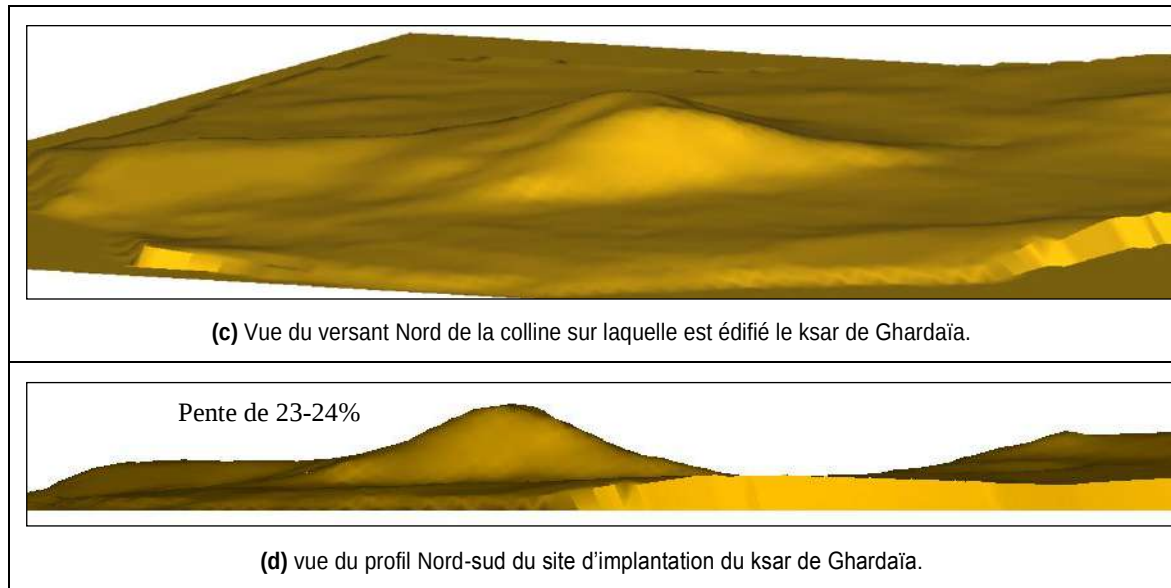


Fig. VI- 10. Vues en 3 D du site d'implantation du Ksar de Ghardaïa (réalisées à partir du logiciel Topocad).

VI- 1.5.2. Morphologie des formes bâties du ksar de Ghardaïa.

La morphologie urbaine caractéristique du vieux ksar, en relation avec les écoulements d'air, est identifiée par (voir Chap. III) :

- le degré de compacité de la structure urbaine, défini par le prospect moyen H/W et la densité plane des constructions, c.-à-d., le rapport entre la surface bâtie et la surface totale du plan : $\lambda_p = A_p/A_T$, où (A_p) représente la surface du bâtiment au sol et (A_T) la surface totale du plan,
- la directionnalité de la trame urbaine par rapport aux vents dominants,
- la configuration étagée des constructions (distribution des hauteurs).

VI- 1.5.2.1. Compacité et directionnalité de la structure urbaine.

Le ksar de Ghardaïa se développe sur une superficie de 21 hectares. Son tracé est fortement influencé par la forme du relief. Aussi, deux parties sont à distinguer : la partie haute, implantée sur la colline et la partie basse, sur le terrain plat.

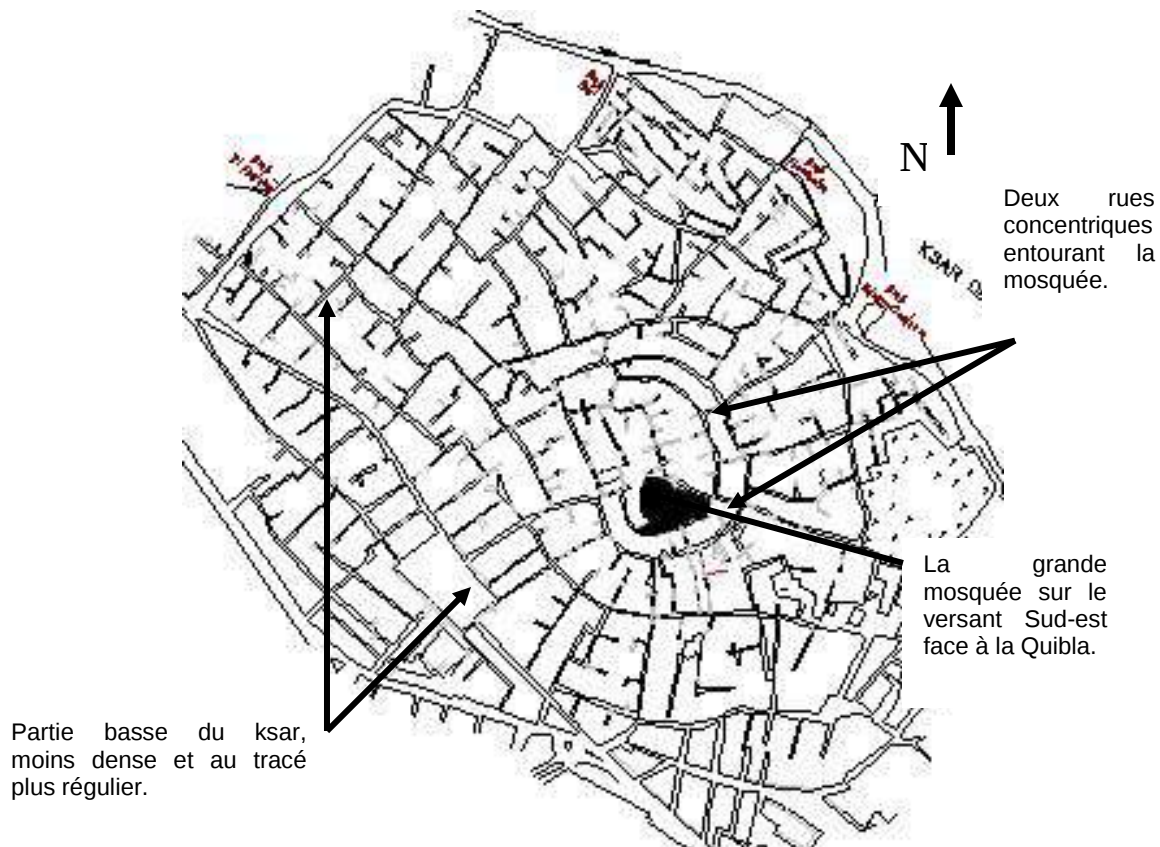


Fig. VI- 11. Tracé organique du ksar de Ghardaïa : compacité et densité des formes bâties.

La partie haute du ksar est le lieu du premier établissement urbain. Son tracé s'organise selon une structure concentrique induite par la topographie du site. Le réseau viaire résultant comprend deux rues concentriques entourant la mosquée et des radiales qui descendent vers la partie basse du ksar. Ces dernières sont très déclives, avec des pentes de 23 à 24% en moyenne. Les rues sont d'orientation multiple, leur profil moyen (H/W) varie entre 2.50 et 6.

Dans la partie basse et plane de la ville, le tracé est en revanche plus régulier, en dents de scie et constitue une extension du premier établissement humain. La trame urbaine est orientée globalement dans la direction Nord-est Sud-ouest et les profils de rue varient entre 1.5 et 2.

Tableau VI- 2. Caractéristiques morphologiques du ksar de Ghardaïa.

	Forme du tracé	Directionnalité	H/W
Partie haute : Lieu du premier établissement urbain	Forme accidentée, tracé concentrique, épousant la forme du relief	Direction multiple	$2.5 < H/W < 5.5$
Partie basse : Extension du ksar	Tracé plus régulier, en dents de scie, topographie plate n'imposant aucune contrainte.	Direction privilégiée NE-SW.	$1.5 < H/W < 2$

À l'échelle de tout le ksar, les trajectoires des passages et des rues sont brisées, ménageant parfois des passages couverts. Elles jouent un rôle dans la création d'obstacles au passage du vent. La forte densité plane des constructions laisse suggérer par ailleurs une faible pénétration du vent et la présence d'un écoulement rasant dans les rues du ksar (voir Chap. III). Dans ces conditions, quels sont les paramètres morphologiques en mesure de modifier le modèle des écoulements d'air dans le ksar et améliorer les mécanismes de ventilation, même dans les rues les plus profondes ?

VI- 1.5.2.2. Configuration étagée des formes bâties et proéminence du lieu de culte.

Dans la partie haute du ksar, sur la colline, les maisons d'habitation s'étagent en escalier afin de s'adapter à la nature accidentée du terrain. La plupart des rues sont de ce fait asymétriques en raison de la forme du relief et la disposition étagée des constructions. La mosquée, érigée au sommet, occupe un îlot entier sur le flanc sud-est et est ceinturée d'un mur haut et dégagé de 10 mètres. Son minaret, de forme pyramidale, s'élève de 20 mètres. Par son échelle et sa façade Sud exposée, la mosquée constitue un élément dominant et une rupture morphologique dans l'ensemble urbain. Elle est l'élément générateur de la cité. C'est à partir d'elle et autour d'elle que se développent les maisons en escalier.

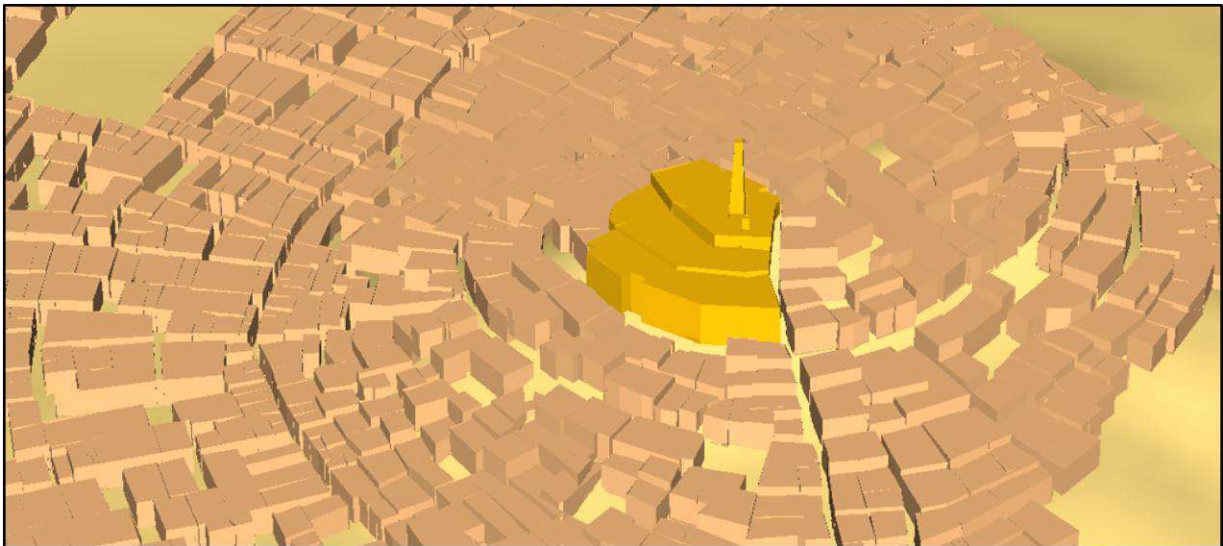


Fig. VI- 12. Vue en 3D sur le versant Sud du ksar de Ghardaïa montrant la rupture morphologique créée par la mosquée.

La configuration étagée des formes bâties du ksar et les profils de rues asymétriques constituent une caractéristique urbaine particulièrement intéressante, pouvant apporter un éclairage nouveau sur l'effet que peut avoir une telle morphologie sur les écoulements d'air. De même la présence d'un élément urbain dominant telle que la mosquée peut contribuer à une distribution originale des écoulements d'air à l'échelle de tout le ksar.

En résumé, la forme naturelle du terrain sur lequel est bâti le ksar suggère que les particularités topographiques de ce dernier peuvent affecter le modèle de distribution des écoulements d'air à l'intérieur de la vieille ville. De même, la configuration étagée de ses formes bâties et la proéminence d'un élément dominant laisse supposer une distribution originale des écoulements d'air à l'échelle du ksar. Il convient alors de déterminer la manière dont les effets topographiques

interagissent avec ceux de la morphologie urbaine et contribuent à l'accélération des écoulements d'air dans le ksar en dépit de la très forte compacité de sa structure urbaine.

VI.2. Méthodologie.

VI- 2.1. Les méthodes adoptées dans l'étude des écoulements d'air en milieu urbain.

Les connaissances actuelles des phénomènes aérauliques en milieu urbain proviennent de trois sources que sont les campagnes de mesure sur site, les études en soufflerie atmosphérique et enfin la modélisation numérique. Enfin, un certain nombre de démarches combinent mesures et modélisation.

VI- 2.1.1. Les mesures sur site.

Les mesures sur le site ont l'avantage d'être représentatives d'une situation réelle où l'influence de tous les immeubles et obstacles est incluse. Les premières campagnes de mesures en climatologie urbaine sont apparues dans les années 70 en Amérique du Nord (Vancouver, Canada, Nunez et Oke 1977) pour se développer par la suite sur les autres continents. L'inconvénient d'une telle démarche est que celle-ci peut devenir coûteuse puisque, idéalement, la période de mesure devrait être assez étendue pour couvrir les combinaisons de vitesses et de directions de vent les plus fréquentes, ce qui nécessite un grand nombre de points de mesure.

L'échelle d'investigation est différente selon l'objectif des travaux, puisqu'elle peut aussi bien concerner les phénomènes autour d'un bâtiment ou à l'intérieur d'une rue que la couche d'atmosphère au-dessus d'une agglomération urbaine. Ainsi, en fonction de l'échelle, différents problèmes se posent:

- dans la canopée urbaine (échelle micro), la complexité des mesures réside dans le fait que la mesure du vent et sa direction sont fortement sensibles à la distorsion du vent moyen et la turbulence par les obstacles. Sachant que la morphologie urbaine présente une forte hétérogénéité, les observations de la distribution (verticale et horizontale) du vent ne peuvent être effectuées qu'à l'aide d'un grand nombre de sondes. Cependant, la question du nombre de stations et leur emplacement est à considérer et dépend des objectifs initiaux, sachant que les problèmes de la représentativité spatiale et de la sécurité de l'instrumentation déployée se posent,
- dans la couche limite urbaine (échelle locale), les mesures doivent être effectuées au-dessus du niveau des toits, à une altitude qui dépend de la vitesse et la direction du vent, la stabilité de l'atmosphère et la répartition des bâtiments ou la hauteur des obstacles. Cette hauteur de mesure est jusqu'à 2 à 3 fois l'espace horizontal entre les éléments (Garra 1980), ce qui implique de placer les capteurs au sommet des mâts d'hauteur suffisante,
- pour l'ensemble de la ville (échelle méso), l'obtention de paramètres homogènes est compliquée par la présence d'obstacles très variés : le problème de la représentativité des mesures se pose.

Notons que la définition de la surface rurale de référence n'est pas aisée non plus puisque le site doit être dégagé de toute influence urbaine, topographique (flanc de colline, fond de vallée...) ou de la végétation.

VI- 2.1.2. Les mesures en laboratoire.

La ventilation est associée à un transport d'air: agir sur la ventilation est donc un problème d'aérodynamique où les écoulements de l'air dépendent des directions des vents, des formes et tailles des bâtiments et des rues. C'est pourquoi les accélérations, intensités, tourbillons ou zones mortes sont parfois étudiées en soufflerie. Des mesures sur maquettes sont réalisées dans des souffleries où l'écoulement du vent est reproduit analogiquement. L'approche sur maquette est intéressante dans la mesure où les phénomènes peuvent être quantifiés dans leur contexte, tout en permettant un grand nombre de combinaisons de vitesses et de directions du vent.

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (C.S.T.B) possède à Nantes la plus grande soufflerie atmosphérique d'Europe. Cet outil de simulation reproduit les différents types statistiques de vent (mer, campagne, banlieue et centre-ville) dans la gamme d'échelle allant du 1/500^{ème} (étude d'effets topographiques) au 1/100^{ème} (réponse dynamique des structures, ventilation naturelle des cellules, etc.). Les études d'environnement urbain (confort des espaces extérieurs, pollution, etc.) se font en général sur des maquettes volumétriques à l'échelle du 1/200^{ème}. Toutefois, ces maquettes ne reproduisent pas les irrégularités urbaines et les détails architecturaux qui agissent pourtant sur la structure des écoulements.

Il est par ailleurs possible de tester l'environnement éolien pour de nouvelles surfaces lorsque ces dernières sont encore en stade de planification et de tester de nouveaux aménagements. Cette démarche permet aux concepteurs de se situer très rapidement dans leurs choix. Cependant, il est essentiel de développer un modèle précis de la surface concernée ainsi que de ses environs. Ainsi, des essais en soufflerie peuvent être coûteux en temps et en argent.

VI- 2.1.3. La modélisation numérique.

Une alternative à la soufflerie est de développer un modèle numérique de l'espace et de ses environs afin d'y simuler la circulation de l'air : une sorte de soufflerie virtuelle. Les programmes pour ce type de simulations sont appelés «logiciels de simulation en dynamique des fluides» (CFD) et comportent l'avantage d'évaluer n'importe quelle combinaison de vitesses et de directions du vent et de configuration de l'espace et des environs. Ils sont désignés pour calculer les écoulements des fluides à une petite échelle et sont utilisés pour simuler l'écoulement urbain et la dispersion, comprendre les processus de dynamique des fluides et fournissent des solutions pratiques à certains problèmes de dispersion et de pollution de l'air. Les modèles de CFD sont utilisés pour le calcul de l'écoulement dans et autour des bâtiments de formes complexes et dans les canyons urbains.

Le développement et l'utilisation des modèles CFD sont un domaine très actif de la recherche. Les modèles deviennent de plus en plus sophistiqués en termes de méthodes numériques, de structure de maillage et d'approches modélisant la turbulence. Les calculs impliquent néanmoins des ressources informatiques considérables. L'utilisation de moyens de simulation numérique se heurte en outre à des difficultés qui tiennent autant à la complexité de la structure turbulente des écoulements au voisinage de la canopée urbaine qu'à celle des morphologies du tissu urbain. Par nécessité, la géométrie doit être fortement simplifiée et on se trouve le plus souvent avec une rue bordée de murs continus, de même géométrie, soit des conditions qui ne correspondent pas à la réalité terrain. Si les résultats de telles simulations s'avèrent en général satisfaisants dans les conditions particulières pour lesquelles le modèle a été conçu (ciel clair, climat et saison, géométrie urbaine, etc.), ils s'adaptent assez mal aux autres situations.

Le recours à la modélisation ne peut s'effectuer par ailleurs sans l'association à des données de terrain, que ce soit pour alimenter les entrées du modèle ou pour les confronter aux sorties. Les

mesures doivent toujours être faites en fonction du modèle utilisé et dans le but de répondre à un objectif.

VI- 2.1.4. Conclusion : approche adoptée par notre étude.

Ainsi, en regard de la double complexité de la climatologie et de la morphologie du cadre bâti, les interactions entre ces deux niveaux d'investigation sont nombreuses et les techniques de l'expérimentation en soufflerie atmosphérique et la simulation numérique permettent d'explorer les effets croisés des divers paramètres physiques et climatiques concernés. Elles possèdent l'avantage de pouvoir comparer de nombreuses configurations de rue et notamment de rapport H/L mais demeurent cependant caricaturales vis à vis de la scène traitée (symétrie des bâtiments, géométrie en deux dimensions, longueur infinie des rues, façades planes, etc.). Le choix délibéré d'un site plat réduit les effets de la topographie qui sont dans ce cas insignifiants. Les informations recueillies peuvent mettre en relation certains paramètres mais ne peuvent qu'approcher la réalité physique de la ville qui n'est pas un enchaînement de rues parallèles mais un environnement géométrique complexe dans lequel les écoulements aérauliques et les échanges thermiques sont délicats à évaluer, particulièrement dans le cas d'une topographie urbaine complexe. En revanche, les mesures sur site ont l'avantage de rendre compte de la complexité des phénomènes physiques, notamment dans le cas de topographies urbaines complexes, difficilement modélisables telles que les structures urbaines vernaculaires, caractérisées par une morphologie urbaine irrégulière et une topographie complexe.

Aussi, afin de déterminer les mécanismes d'écoulements d'air et leurs effets sur les conditions thermiques dans la vieille ville de Ghardaïa, notre étude s'appuiera sur des mesures sur site. Elle mettra en œuvre une série de campagnes de mesure des principaux paramètres climatiques, avec différentes résolutions spatiales. Les modèles d'écoulements et les forces mises en jeu seront examinés à travers les échelles microclimatiques de la rue et du quartier et celles au-dessus de la canopée urbaine (dans la sous-couche de rugosité).

VI- 2.2. Les campagnes de mesure : protocole, procédure et instrumentation.

La méthodologie adoptée par notre étude se base sur la collecte de données climatiques sur terrain et met en œuvre une série de campagnes de mesure d'hiver et d'été, caractéristiques des conditions extrêmes de confort. Des mesures sont enregistrées sur des sites de référence et dans le ksar, dans les rues et au-dessus des toits. Ces mesures sont complétées par celles prises à l'aéroport par le Centre National de Météorologie, ONM.

VI- 2.2.1. Échelles d'intervention.

En milieu urbain, les mouvements de l'air ne peuvent être appréhendés dans la rue, prise isolément. La surface urbaine, ou le quartier, détermine dans une certaine mesure les caractéristiques de l'écoulement dans le canyon urbain et l'interaction des échelles doit être prise en compte dans n'importe quelle description de l'écoulement (Chap. III). Aussi, nous partons de l'hypothèse selon laquelle le ksar de Ghardaïa est un ensemble complexe (ruelle, quartier, ksar) qu'il faut étudier en tant que tel. Nous pensons qu'il existe une complémentarité entre les différents dispositifs architecturaux et urbains représentatifs de ce quartier (toiture terrasse, disposition étagée des rues et maisons d'habitation tout autour de la colline, profil de rues asymétrique, ruelles profondes et de forme courbe, passages couverts, proéminence du lieu de culte au point le plus haut du ksar, etc., ...). De ces articulations et emboîtement d'échelles,

résulte une distribution des écoulements d'air propre à la vieille ville. Les mouvements d'air en présence dans le ksar seraient donc un phénomène local dû à une configuration spatiale dans son ensemble. Dès lors, nous déduisons deux échelles d'intervention:

- **l'échelle du quartier** qui porte sur l'étude de la distribution des écoulements d'air à travers tout le ksar,
- **l'échelle de la rue**, représentative de conditions d'écoulement spécifiques dans la rue canyon.

VI- 2.2.1. Protocole de mesure.

L'analyse de l'effet des formes urbaines représentatives du ksar sur les écoulements d'air nécessite :

- la mesure du vent libre bien au-dessus de la canopée urbaine (au-dessus de la sous-couche de rugosité, dans la sous-couche inertielle). Cette mesure est importante car elle constitue une mesure de référence qui permet d'apprécier les modifications du vent par les obstacles urbains,
- la mesure des écoulements d'air à différents emplacements dans le ksar, dans les rues et au-dessus des toits, en vue de connaître l'effet des formes urbaines et de la topographie sur le régime de distribution des écoulements d'air. Des points de mesure sont choisis dans tout le ksar en fonction de leur représentativité de la morphologie urbaine caractéristique de la vieille ville.

VI- 2.2.2.1. Localisation de la mesure du vent de référence (ou vent local).

Le vent libre, ou vent de référence, est un vent non perturbé par les éléments de rugosité au voisinage du sol. Les mesures doivent être effectuées bien au-dessus du niveau des toits, à une altitude qui dépend de la répartition des bâtiments ou la hauteur des obstacles. Cette hauteur de mesure est située au-dessus de la sous-couche de rugosité urbaine qui se prolonge jusqu'à une hauteur d'environ $1.5 z_h$ dans les aires denses et même plus dans les sites moins denses (Oke 2004, voir Chap.III). Dans le cas du ksar de Ghardaïa, caractérisé par une configuration urbaine en escalier et la présence à son sommet d'un minaret d'une hauteur de 20 mètres, la hauteur minimale acceptable de la mesure est au moins 30 mètres au-dessus du minaret, ce qui implique de placer les capteurs au sommet de mâts très hauts, difficiles à installer dans un tel site. Aussi, la mesure du vent de référence a porté sur le site du plateau Khetala, site dégagé, surplombant la vallée du M'zab et loin de tout effet topographique (effet de vallée ou flanc de colline). La mesure du vent local est prise à 10 m au-dessus du niveau du sol, au-dessus d'une ancienne guérite, dans un site gardé. La sécurité de l'instrumentation déployée est de ce fait assurée.



Fig. VI- 13. Le point de mesure de référence sur le plateau Khetala (Point situé à 1000.00 m du centre du ksar à vol d'oiseau).

VI- 2.2.2.2. Choix des points de mesure dans le ksar.

Dans le ksar de Ghardaïa, la caractérisation des microclimats urbains (écoulements d'air et températures d'air et de surface) est liée à deux caractéristiques physiques importantes que sont :

- les particularités topographiques du site d'implantation qui dépendent des phénomènes d'exposition au vent et au soleil (Escourrou 1991),
- la morphologie des formes bâties du ksar, laquelle est définie par la géométrie urbaine et la directionnalité de la trame viaire (voir Chap. III).

Aussi, pour analyser les différents facteurs d'influence (topographie et morphologie urbaine) sur les écoulements d'air et l'environnement thermique, les points de mesure sont choisis en fonction des paramètres influents (Chap. III) que sont:

- la topographie urbaine, c'est à dire :
 - l'orientation des versants par rapport au soleil,
 - l'exposition des versants par rapport aux vents locaux,
 - l'emplacement des rues par rapport aux éléments topographiques (au pied ou au sommet de la colline).
- la morphologie urbaine, en l'occurrence :
 - la direction de la trame urbaine par rapport aux vents au-dessus des toits,
 - la géométrie urbaine (prospect de la rue hauteur/largeur H/W, rapport L/H, nature du profil : symétrique ou asymétrique),

- les particularités architecturales et urbaines (passage couvert),
- l'emplacement des rues par rapport aux éléments bâtis proéminents : l'édifice de la mosquée.

VI- 2.2.2.3. Les paramètres climatiques mesurés.

Les mesures ne portent pas uniquement sur le paramètre vent mais sur l'ensemble des variables environnementales ayant une incidence sur le confort thermique (Chap. IV, Chap. V), en l'occurrence :

- la vitesse moyenne horizontale du vent (v) et sa direction (dd),
- le rayonnement solaire global horizontal (E_g),
- la température de l'air (T_a),
- la température globe ou la température moyenne radiante (T_{mrt}),
- les températures de surface des murs et du sol (T_{mur} , T_{sol}),
- l'humidité relative (HR).

VI- 2.2.2.4. Les méthodes de mesure employées.

Les campagnes de mesure s'effectuent selon deux méthodes de mesure bien distinctes :

- a. la première méthode est basée sur des mesures instantanées dans le ksar à travers un parcours urbain,
- b. la seconde s'appuie sur des mesures en continu en des points fixes, répartis à travers le ksar.

a. La méthode du parcours urbain.

La méthode du parcours urbain s'appuie sur des mesures ponctuelles à travers un parcours urbain constitué d'un ensemble de points de mesure couvrant une typologie représentative variée, la plus exhaustive possible. Sa métrologie permet de mettre en évidence des variations climatiques sur ce parcours urbain. Les points de mesure sont choisis à travers tout le ksar en fonction de critères liés à la morphologie urbaine et l'orientation des versants. Les prises de mesure sont effectuées à l'aide d'instruments portables qui permettent le déplacement d'un point à un autre du parcours en un laps de temps très court.

Parallèlement aux relevés ponctuels effectués dans les rues du ksar, des mesures de référence sont enregistrées en continu sur le site de Khetala à l'aide d'une station de mesure automatique.

b. Les mesures en continu, en des points fixes.

La méthode basée sur des mesures en des points fixes permet d'effectuer des mesures simultanées et en continu à travers le ksar, sur toute la période de la campagne de mesure. Les données sont enregistrées grâce à des micro-stations automatiques et sont récupérées à la fin de la campagne de mesure. Comparée à la méthode du parcours urbain, cette méthode permet la collecte d'une masse de données simultanées nettement plus importante, et par conséquent, une lecture plus précise des variations microclimatiques à travers le cycle

journalier. Néanmoins, le nombre de points de mesure est plus limité puisqu'il est conditionné par le nombre de stations disponibles.

VI- 2.2.2.5. Déroulement des campagnes de mesure.

Les campagnes de mesure s'établissent sur deux périodes de l'année caractéristiques des conditions extrêmes de confort : période chaude : juillet - août, période froide : janvier - février. En outre, comme l'évolution temporelle du microclimat peut être observée sur une période de temps de l'ordre de 24 heures (cycle journalier, voir Chap. II), quelques jours de mesure seulement suffisent pour rendre compte des variations microclimatiques dues à la morphologie urbaine représentative du ksar de Ghardaïa.

En tout, cinq campagnes de mesures sont effectuées entre juin 2003 et août 2006 :

- deux premières campagnes de mesures, basées sur la méthode des parcours urbains, réalisées en juin 2003 et février 2004 et d'une durée respective de deux et trois jours : ce sont des campagnes de mesure exploratoires,
- trois dernières campagnes de mesures, basées sur des mesures en continu, réalisées en février et septembre 2005 ainsi qu'en août 2006, d'une durée respective de 5, 8 et 10 jours.

a. Les campagnes de mesure basées sur la méthode des parcours urbains.

Les campagnes de mesure, effectuées en juin 2003 et février 2004, sont basées sur des mesures ponctuelles selon la méthode des parcours urbains. Elles coïncident avec des périodes anticycloniques, sous des conditions de ciel clair pour la plupart des cas.

- la première campagne de mesure d'été présente un caractère exploratoire. Elle est effectuée pendant deux jours non consécutifs, les 24 et 26 juin 2003. Ce premier travail a pour objectifs de :
 - vérifier les aspects liés à l'instrumentation et indiquer le caractère non standardisé des procédures de mesure (confection d'abri, temps de stabilisation des capteurs, etc.),
 - s'assurer de la pertinence du choix du parcours afin de choisir les aspects les plus intéressants,
 - évaluer la durée des prises de mesure.
- la seconde campagne est réalisée pendant trois jours ininterrompus, du 11 au 13 février 2004. Elle a pour objectif d'analyser les conditions thermiques d'hiver et de compléter les résultats obtenus à partir de la campagne d'été de 2003. Trois points de mesure supplémentaires sont intégrés dans le parcours urbain.

i. Choix du parcours.

La première série de mesure réalisée a pour but d'étudier l'impact de l'orientation des rues, du prospect H/W ainsi que celui de l'orientation des versants et de l'altitude sur le microclimat urbain. Le parcours choisi présente un caractère exploratoire et englobe de ce fait une étendue maximale. Ce choix est justifié par la volonté d'accéder à un maximum de caractéristiques morphologiques qui permettent de retenir les aspects les plus pertinents pour l'étude.

Le parcours urbain de la campagne de juin 03 est composé de dix points distincts, tandis que trois points de mesure supplémentaire sont intégrés au protocole de mesure de la campagne d'hiver de février 04 (Fig. VI- 14). Le choix de ces points s'est fait comme suit :

- trois points à différentes altitudes (au niveau le plus haut (Pt.7), intermédiaire (Pt.8) et le plus bas du ksar (Pt.9) Ces points permettent la mesure des effets topographiques (altitude),
- quatre points de même altitude, de même prospect H/W mais d'orientation différente, situés sur une rue concentrique, en contrebas de la mosquée (Pt.1, Pt.2, Pt.3 et Pt.4). Ces points permettent la mesure des effets topographiques d'une part (orientation des versants) et ceux de l'orientation d'autre part. Ce choix s'est également fait selon les informations des habitants qui considèrent cette rue comme étant l'endroit le plus venteux et le plus frais du Ksar. Une partie de la rue concentrique (Pt.3) est ainsi connue sous l'appellation locale de "rue du vent" ou "rue de la fraîcheur" (Avrith N'Thasmouthi),
- deux autres points dans des ruelles très étroites et en pente, dont l'une couverte (Pt.5). Ces points permettent la mesure des effets de canalisation,
- un espace complètement dégagé, constitué par la place du marché,
- les trois points de mesure supplémentaires correspondent à des rues de prospects variés.

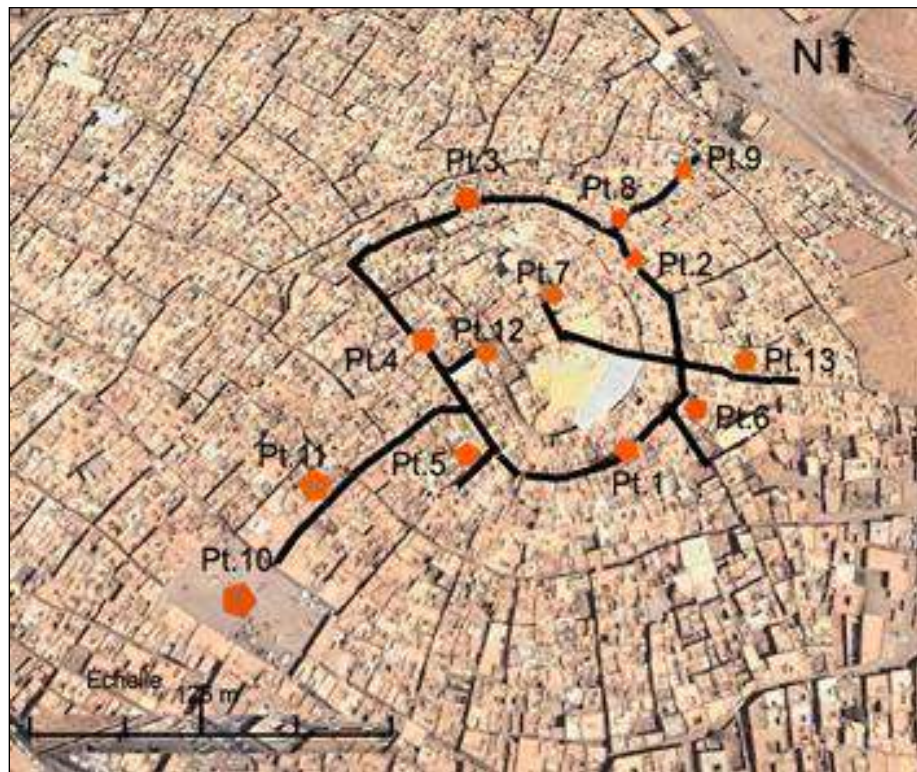


Fig. VI- 14. Illustration des points de mesure des campagnes de juin 03 et février 04 (Les points de mesure 11, 12 et 13 sont des points supplémentaires intégrés dans le parcours urbain de la campagne de février 04).

On obtient de la sorte un parcours piétonnier intégrant (Tableaux VI- 3 et VI- 4) :

- des rues à orientation différente (Nord-est sud-ouest, Nord-sud, Ouest est, Nord-ouest sud-est, Est ouest),
- des rues de prospects H/W variés, compris entre 1.7 et 5.5,
- des rues horizontales et en pente,
- des rues exposées et des passages couverts,

- des rues au niveau bas de la colline et des rues à son niveau le plus haut,
- des rues situées sur chacun des versants de la colline.

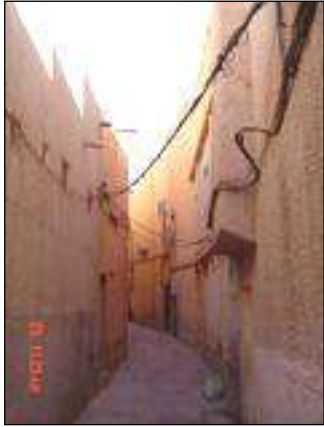
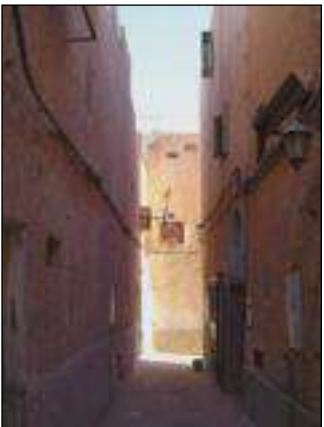
Les points de mesure choisis sont des espaces essentiellement piétons, dénués de source de chaleur artificielle (circulation motorisée). Les microclimats urbains générés dépendent principalement de la géométrie urbaine, des matériaux de construction utilisés et des caractéristiques topo-climatiques.

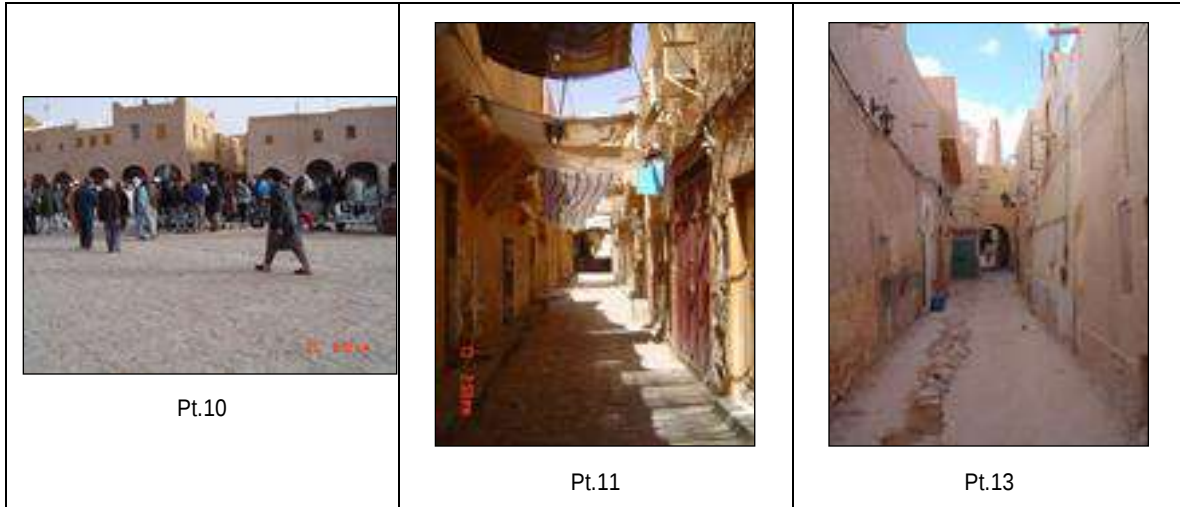
Tableau VI- 3. Caractéristiques des points de mesure sélectionnés lors des campagnes de mesure de juin 03 et février 04.

Identification des points de mesure		Description							
		h ₁ (m)	h ₂ (m)	W (m)	(h ₁ +h ₂)/2W	orientation	revêtement		
							mur 1	mur 2	sol
Pt.1	versant Sud	6.04	6.04	2.22	Profil symétrique. H/W= 2.72	NE-SO (55°)	Sable + chaux de couleur sable	Ciment de couleur jaune	Ciment de couleur grise
Pt.2	versant Est	6.86	6.86	2.10	Profil symétrique. H/W= 3.27	NO-SE (140°)	sable	Chaux de couleur ocre	Pierre de couleur gris-blanc
Pt.3	versant Nord	6.76	4.42	1.93	Profil asymétrique H/W=2.89	E-O (80°)	Ciment+ chaux de couleur ocre	Ciment + chaux de couleur rose	Pierre + ciment de couleur grise.
Pt.4	versant Ouest	8.24	8.24	2.51	Profil symétrique. H/W= 3.28	NO-SE (135°)	Chaux de couleur sable	Chaux de couleur sable	Pierre + ciment de couleur grise.
Pt.5	canyon en pente sur versant Ouest.	5.50	5.50	1.00	Profil symétrique. H/W = 5.50	NE-SO (50°)	Chaux de couleur sable	Chaux de couleur sable	Pierre de couleur grise.
Pt.6	Passage couvert, en pente, sur versant Sud.	5.50	5.50	1.00	-----	NO-SE	Chaux de couleur sable	Chaux de couleur sable	Pierre de couleur grise.

Pt.7	Le point le plus haut du parcours, au sommet de la colline.	8.50	8.50	2.5	Profil symétrique. H/W= 3.40	NO-SE (150°).	Chaux de couleur sable	Chaux de couleur sable	Pierre + ciment de couleur grise.
Pt.8	Les points 8 et 9 sont pris sur le même canyon en pente sur versant Est.	5.80	5.80	2.00	Profil symétrique. H/W =2.90	NE-SO (40°)	Sable + ciment de couleur sable	Chaux de couleur ocre	Ciment de couleur grise
Pt.9	Pt 8 point bas de la rue. Pt 9. point haut de la rue.	6.00	5.00	2.00	Profil asymétrique. H/W =2.75	NE-SO (30°)	Chaux de couleur sable	Chaux de couleur sable	Pierre + ciment de couleur grise.
Pt.10	Place du marché, point le plus bas du parcours	8.00	8.00	W ₁ =74.1 W ₂ =38.0	H/W ₁ = 0.11 H/W ₂ = 0.21	Place du marché	Chaux de couleur sable	Chaux de couleur sable	Pierre de couleur grise.
Les points 11, 12 et 13 sont intégrés dans le parcours urbain de la campagne de mesure de février 04.									
Pt. 11	Partie plate de la radiale située sur le versant Ouest	8.00	6.00	2.83	Profil asymétrique H/W=2.47	NE-SO (42°)	Granito de couleur sable	Béton de couleur gris	Pierre + ciment de couleur gris.
Pt.12	versant Ouest	5.50	4.50	1.10	Profil asymétrique. H/W= 4.54	NE-SO (30°)	Pierre de couleur grise	Granito de couleur sable	Pierre+ ciment de couleur grise
Pt. 13	Partie plate de la radiale Est convergeant vers la mosquée.	4.70	4.70	2.70	Profil symétrique, H/W=1.71	E-O (90°)	sable	sable	Pierre + ciment de couleur gris-blanc

Tableau VI- 4. Vues sur les points de mesure.

		
Pt.1	Pt.2	Pt.3
		
Pt.4	Pt.5	Pt.6
		
Pt.7	Pt.8	Pt.9



ii. Paramètres climatiques mesurés et instrumentation déployée.

Les paramètres météorologiques mesurés :

- Sur le site de référence :

Les paramètres climatiques de référence mesurés sur le plateau Khetala sont la vitesse du vent horizontale et sa direction, le rayonnement global horizontal, la température d'air et l'humidité relative. Les mesures sont enregistrées automatiquement toutes les heures.

- Dans le ksar :

Les paramètres climatiques mesurés dans les rues du ksar sont :

- la vitesse du vent horizontale (moyenne, maximale et minimale) et sa direction : la vitesse du vent moyenne est mesurée selon la composante horizontale (v) au milieu des canyons, à hauteur d'homme (1.30 m du niveau du sol). Elle est calculée sur un intervalle de temps de 60 secondes. La direction du vent est indiquée par la fumée d'une tige d'encens,
- l'humidité relative (HR), prise au milieu des canyons, à 1.30 m du niveau du sol,
- la température de l'air (T_a), prise à l'ombre, au milieu des canyons, à 1.30 m du niveau du sol,
- la température globe ou température moyenne radiante (T_{mr}), prise au milieu des canyons, à 1.30 m du niveau du sol,
- les températures de surface des murs et du sol (T_{mur} et T_{sol}), prises à 0.50 m du niveau des surfaces.

L'instrumentation déployée :

Deux types d'instruments de mesure sont utilisés :

- une station de mesure automatique fixe pour les données de référence,
- des instruments portables pour les mesures en discontinu dans le Ksar.

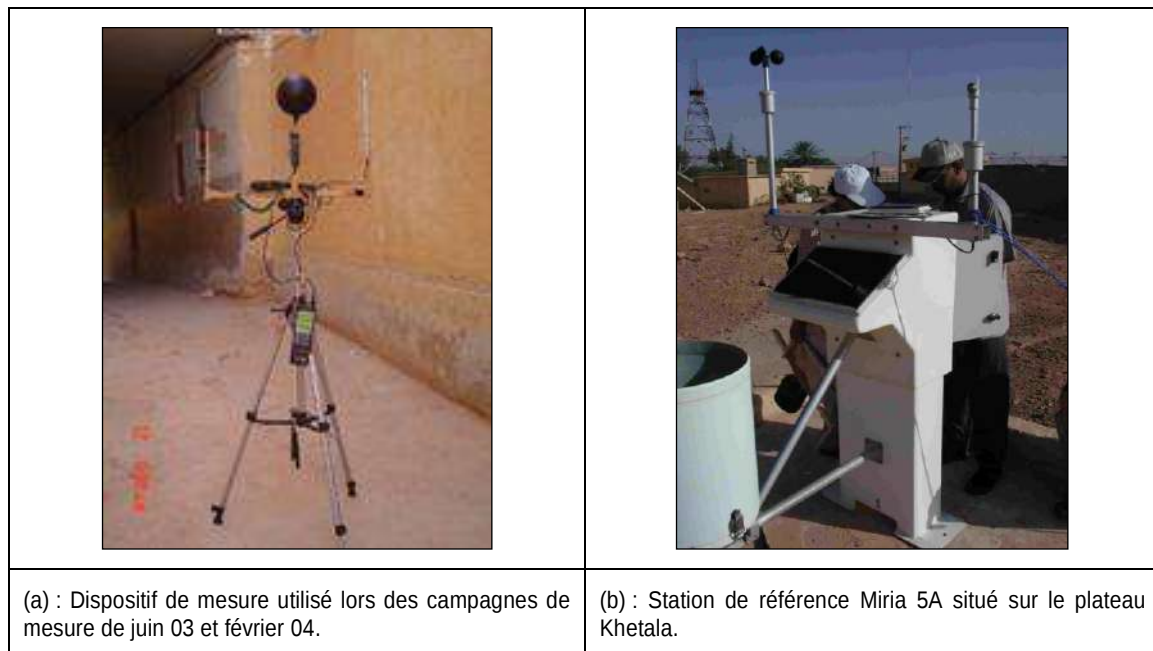


Fig. VI- 15. Instrumentation déployée lors des campagnes exploratoires de juin 03 et février 04.

- **une station de mesure automatique fixe pour les données de référence :**

La station de mesure MIRIA 5A est une centrale de mesure et d'acquisition autonome. Elle est constituée d'un coffret étanche qui contient la centrale d'acquisition ainsi qu'une alimentation. Le système est complété par un panneau solaire et une gamme de capteurs. Elle est alimentée par des batteries rechargeables. Lorsque qu'un programme d'acquisition est en exécution, le panneau solaire maintiendra en charge les batteries au cours de l'année. Les paramètres climatiques sont mesurés toutes les heures. La collecte de données se fait par liaison directe à un PC.

Les capteurs utilisés sont :

- un anémomètre-girouette à coupelle, de type TAVID 87 qui mesure la vitesse du vent et sa direction en environnement extérieur. Il est caractérisé par une plage de mesure de vitesse de vent de 0 à 60 m/s et une précision de ± 0.5 m/s. La plage de mesure de la direction du vent est 0-360°.
- une sonde de température et d'humidité relative de type Jules RICHARD qui combine la mesure de la température d'air et l'humidité relative. Elle est protégée dans un abri anti-radiation ventilé. La plage de mesure est respectivement de -20° à +60°C et 0 à 100% (-20 à +70°C) pour la température d'air et l'humidité relative.

- **des instruments portables pour les mesures en discontinu dans le Ksar :**

Les prises de mesure s'effectuent à l'aide d'un dispositif mobile adapté à la déclivité du terrain (trépied flexible). Il permet l'enregistrement simultané des différentes données climatiques à hauteur d'homme (1.30 m du niveau du sol). Les instruments de mesure sont protégés contre le rayonnement solaire direct par le moyen d'un abri ventilé confectionné en système de " brises soleil " à l'aide d'assiettes creuses en carton de couleur blanche.

Les capteurs utilisés sont :

- un anémomètre à hélice (Testo 435) : la vitesse du vent est mesurée à l'aide d'un instrument digital portable Testo 435 qui permet l'affichage de la valeur de vitesse de vent instantanée, le calcul de la valeur moyenne par nombre de points ou par temps et la détermination des valeurs maximale et minimale. Il permet également le calcul du débit volumique (quantité d'air qui peut s'écouler par unité de temps) en pi^3/min (pied cube par minute), m^3/sec et m^3/h . Il est caractérisé par une plage de mesure de 0.2 à 40 m/s et une résolution de 0.01 m/s à partir de 0.2 à 10 m/s et 0.1 m/s à partir de 10 à 40 m/s.
- un thermomètre numérique type K (Kimo TK 50) : la température opérative T_o ou température moyenne radiante T_{mrt} . est mesurée par un thermomètre numérique qui comprend une sonde de température thermocouple type K ($\varnothing$ 4,5 mm) que l'on insère dans une sphère noire ($\varnothing$ 150 mm). Il est caractérisé par une plage de -200 à 1300 °C, une précision de $\pm 2\%$ de lecture $+1$ °C, une résolution de 0,1 °C à partir de -200 à $+999$ °C, 1 °C au-delà.
- un instrument collecteur de température et humidité (LUTRON HT 3004) : la température d'air T_a et l'humidité relative HR sont mesurées à l'aide d'un instrument doté d'une sonde thermocouple de type K (la température d'air) et d'une sonde capacitive à film mince (humidité relative). Il est caractérisé par une plage de mesure de 10 à 95 % HR, 0 à 60°C (32 à 140°F); une résolution de 0.1 % HR; 0.1°C et 0.1°F et une précision de l'humidité (23 ± 5 °C après calibration) : $\geq 70\%$ HR $\pm$ (4% de lecture + 1%), $\leq 70\%$ HR $\pm$ (4% HR) et de température de $+0.8$ °C, ± 1.5 °F.
- un thermomètre infrarouge (Testo 825-T1) : les mesures de température de surface sont effectuées à l'aide d'un thermomètre infrarouge sans contact. Il est caractérisé par une plage de mesure est de -50 à $+400$ °C, une précision de ± 2 °C ou $\pm 2\%$ de valeur mesurée (vm) et une résolution de 0.5°C.

Tableau VI- 5. Récapitulatif du protocole de mesure des campagnes basées sur la méthode des parcours urbains.

Facteur climatique mesuré	Type de capteur	remarque	Vue sur l'appareil de mesure
Vitesse du vent (v)	Anémomètre à coupelle	Mesure la vitesse moyenne de la turbulence Mesure les maxima et minima.	
Direction du vent (dd)	Tiges d'encens (fumée)	Indique la direction du vent	
Humidité relative (HR)	Thermocouple	Mesure la valeur de l'humidité relative.	 LUTRON HT-3004
Température sèche (T_a)	Thermocouple	Mesure la température de l'air	

Température de rayonnement	Sphère noire avec un thermocouple	Mesure la température moyenne résultant des rayonnements de grandes et courtes longueurs d'ondes à partir de différentes directions.	
Température de surface	Thermocouple	Mesure la température de surface des façades et du sol.	

iii. Calibrage des instruments de mesure.

Les instruments de mesure déployés ont été calibrés par l'ONM (Office National de Météorologie).

iv. Déroulement des campagnes de mesure de juin 2003 et février 2004.

Les relevés sont effectués dans le ksar à intervalle régulier de trois heures (prises de mesure de 6h00, 9h00, 12h00, 15h00, 18h00, 21h00, 00h00, 03h00). Par ailleurs, afin d'éviter des évolutions temporelles, la prise de mesure du parcours urbain s'effectue en un temps limité ne dépassant pas 60 à 80 min. La durée moyenne d'une prise de données climatiques pour chaque point urbain requiert 8 min, le temps que les valeurs climatiques affichées se stabilisent. Ces valeurs sont affichées directement sur le cadran du lecteur multimètres et sont consignées sur des fiches. Enfin, la comparaison des données climatiques mesurées dans le ksar avec celles recueillies par la station de référence permet d'apprécier les évolutions respectives.

v. Problèmes rencontrés.

Parmi les problèmes rencontrés, nous retenons ceux liés à :

- l'instrumentation :
 - en site dégagé, la température de l'air fluctue en présence du vent,
 - les données de la station de référence n'ont pu être récupérées,
- la durée du parcours :
 - l'intervalle de temps entre la première mesure et la dernière pour un même parcours pose le problème de la précision et de la non correspondance des résultats,
- la complexité des mesures :
 - la mesure du vent et sa direction est fortement fluctuante. Les mesures du vent, discontinues et non simultanées, ne sont de ce fait qu'indicatives. Par ailleurs, dans la

rue, la structure de l'écoulement est fortement corrélée à celle en présence au-dessus de la canopée urbaine (Chap. III). Des mesures simultanées et en continu, au-dessus des toits et dans les rues, sont donc indispensables afin de rendre compte de la complexité des écoulements d'air dans la vieille ville de Ghardaïa.

b. Les mesures en continu, en des points fixes.

Les trois dernières campagnes de mesure, réalisées en février et septembre 2005 ainsi qu'en août 2006, sont basées sur des mesures en continu et sont planifiées en tenant compte des résultats des précédentes campagnes de mesure. Les données sont enregistrées automatiquement grâce à des micro-stations automatiques fixées au-dessus des toits et dans les rues. Des visites sont cependant effectuées quotidiennement sur site afin de vérifier que les instruments de mesure sont intacts et opérationnels.

➤ La 1^{ère} campagne de mesure en continu.

Elle est effectuée pendant cinq jours consécutifs, du 19 au 24 février 05. Elle porte sur l'étude de la distribution des vents à travers le ksar et leurs implications sur le comportement thermique d'hiver. La campagne de mesure coïncide avec des conditions généralement anti-cycloniques, c'est-à-dire des journées ensoleillées avec un ciel clair et dégagé. Les vents locaux sont de direction Ouest et Nord-Ouest, de différentes intensités. Les températures moyennes journalières varient entre 10.5 et 12.8°C avec des valeurs maximales comprises entre 14 et 19°C.

Tableau VI- 6. Conditions météorologiques de la 1^{ère} campagne de mesure en continu (19- 24 février 2005).

date		Conditions météorologiques	
		ciel	vents
1 ^{er} jour	19 février	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Présence de vent
2 ^{ème} jour	20 février	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Présence de vent
3 ^{ème} jour	21 février	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Présence de vent
4 ^{ème} jour	22 février	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Présence de vent
5 ^{ème} jour	23 février	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Absence de vent

➤ La 2^{ème} campagne de mesure en continu ou "campagne de précision".

La 2^{ème} campagne de mesure en continu est une campagne de "précision". Elle est menée du 06 au 13 septembre 05 selon deux protocoles différents :

- le premier, à l'échelle du ksar, est identique à celui de la campagne d'hiver. Il a pour objectif d'évaluer le comportement aéraulique du ksar pour des directions de vent d'été (orientation Est et Sud) et apprécier leurs effets sur les conditions thermiques. L'acquisition de données de référence au-dessus du plateau devait compléter les résultats de la campagne d'hiver.
- le second protocole porte sur l'échelle du fragment urbain et a pour objectif l'étude de l'influence du passage couvert sur les écoulements d'air. La campagne de mesure coïncide avec des conditions de vents forts et une tempête de sable.

Tableau VI- 7. Conditions météorologiques de la 2nd campagne de mesure en continu (06-13 septembre 2005).

date		Conditions météorologiques	
		ciel	vents
1 ^{er} jour	06 septembre	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Absence de vent
2 ^{ème} jour	07 septembre	Ciel couvert	Présence de vent
3 ^{ème} jour	08 septembre	Ciel couvert	Présence de vent fort chargé de sable.
4 ^{ème} jour	09 septembre	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Présence de vent
5 ^{ème} jour	10 septembre	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Absence de vent
6 ^{ème} jour	11 septembre	Journée ensoleillée et ciel dégagé la matinée, ciel couvert en fin d'après-midi.	Vents faibles en matinée, rafale de vent en fin de d'après-midi.
7 ^{ème} jour	12 septembre	Ciel couvert	Présence de vents forts chargés de poussière
8 ^{ème} jour	13 septembre	Ciel clair, partiellement couvert de nuages	Absence de vents

➤ La 3ème campagne de mesure ou “effets de détails”.

Elle est conduite du 06 au 15 août aux échelles du ksar et du fragment urbain. Elle est complémentaire à la campagne de septembre 2005 et a pour objectif l'analyse des écoulements d'air et leurs implications thermiques sous conditions de vents faibles et de température extrême. Un point de mesure additionnel, situé en dehors du ksar, sur un site plat (ksar de Tafilalt), est intégré dans le protocole en vue de confirmer les hypothèses développées sur l'effet de la morphologie urbaine.

Tableau VI- 8. Conditions météorologiques de la 3^{ème} campagne de mesure en continu (06-15 août 2006).

date		Conditions météorologiques	
		Ciel	vents
1 ^{er} jour	06 août	Ciel couvert, présence de pluie.	Présence de vent
2 ^{ème} jour	07 août	Ciel partiellement couvert	Présence de vent, vent de sable en fin d'après-midi.
3 ^{ème} jour	08 août	Ciel partiellement couvert.	Présence de vent, vent de sable en fin d'après-midi
4 ^{ème} jour	09 août	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Présence de vent
5 ^{ème} jour	10 août	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Absence de vent
6 ^{ème} jour	11 août	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Absence de vent
7 ^{ème} jour	12 août	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Absence de vent la journée, Présence de vent au cours de la nuit
8 ^{ème} jour	13 août	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé	Présence de vent.
9 ^{ème} jour	14 août	Ciel chargé de particules de sable.	Présence de vent.
10 ^{ème} jour	15 août	Journée ensoleillée, ciel clair et dégagé.	Absence de vent

i. Choix des points de mesure.

À l'échelle du ksar :

Six points de mesure sont retenus à partir du premier protocole de mesure basé sur la méthode du parcours urbain, ce nombre étant déterminé en fonction des objectifs initiaux d'une part et du nombre de stations automatiques disponibles d'autre part.

Les points de mesure retenus sont :

- les quatre points situés sur la rue concentrique située en contrebas de la mosquée (Pt.1, Pt.2, Pt.3 et Pt.4). Ces points présentent la particularité d'être de même altitude, de géométrie urbaine proche (même valeur de prospect avec néanmoins une différence dans la nature du profil : symétrique ou asymétrique), d'orientation différente et situés chacun sur un des versants de la colline. Dès lors, une étude comparative peut être établie entre les rues face au vent et celles sous le vent,
- deux points dans la partie basse du ksar (Pt.11 et Pt.13). Les profils de rue sont plus larges que ceux situés en hauteur. Une étude comparative peut être établie entre ces rues dans la partie basse et plane et celles situées au niveau haut du ksar (caractéristiques au-dessus des toits),
- le point de mesure supplémentaire intégré dans le protocole de la campagne d'août 06 est caractérisé par un prospect H/W=1.71 et une orientation E-O.

À l'échelle du fragment urbain :

Un fragment urbain est choisi pour une étude exhaustive et a pour but la mise en évidence de phénomènes aérauliques locaux dus à des dispositifs urbains particuliers représentatifs de l'architecture saharienne que sont les passages couverts.

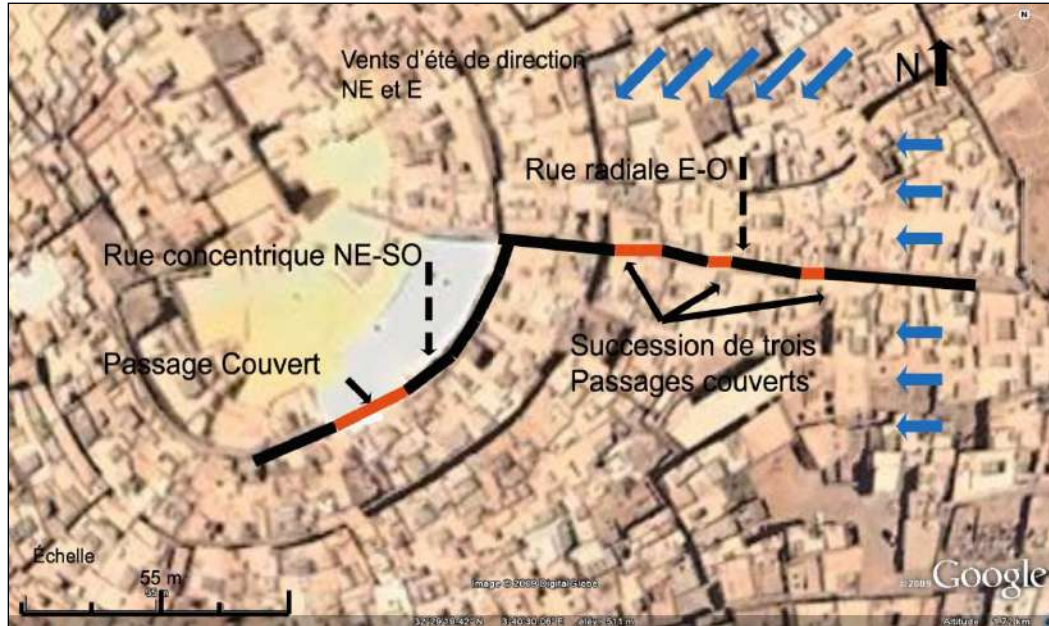


Fig. VI- 16. Fragment urbain sélectionné en vue de l'étude de l'effet des PC sur les écoulements d'air.

Le fragment urbain sélectionné est constitué de deux rues partiellement couvertes (Fig. VI- 16) :

- La première rue concentrique : elle délimite la mosquée et est couverte en son milieu par un PC d'une longueur de 15.50m. Ce dernier est orienté NE-SO, dans la même direction que les vents dominants d'été. La morphologie de la rue n'est pas uniforme et trois parties bien distinctes sont relevées, le passage couvert étant la zone médiane.
 - le tronçon de rue Nord-est : caractérisé par une géométrie de rue asymétrique, de profil H/W variant entre 4.30 et 3.80. L'une des parois de la rue est le mur de la mosquée, avec une hauteur de 9.60 mètres,
 - le passage couvert : il est caractérisé par une longueur de 15.50 m, une hauteur de 3.12 m et une largeur de 2.75 m,
 - le tronçon de rue Sud-ouest : caractérisé par un élargissement sous forme d'entonnoir. Le prospect moyen H/W est d'environ 1.80.

		
(a)	(b)	(c)
a) : Tronçon Sud-ouest de la rue concentrique, sous forme d'entonnoir. $H/W = [(\frac{1}{2} (H_1+H_2))]/W = 1.80$	b) : Le passage couvert dans la rue concentrique. $H = 3.12 \text{ m}$; $L = 15.50 \text{ m}$; $W = 2.75$.	c) : Tronçon Nord-est de la rue concentrique délimitant la mosquée. $H/W = [(\frac{1}{2} (H_1+H_2))]/W = 3.80$

Fig. VI- 17. Vues sur la rue concentrique comportant le PC d'une longueur de 15.50 m.

- La seconde rue radiale : elle converge vers la mosquée. Elle est de direction Est-ouest et se caractérise par un prospect $H/W=1.73$. Dans sa partie basse et plate, elle présente la particularité d'être partiellement couverte par trois passages couverts successifs d'une longueur respective de 7.00, 5.00 et 7.00 mètres. La partie délimitée entre deux des passages couverts constitue un espace découvert entouré de maisons d'habitation, d'une longueur de 10.50 et 17.50 mètres respectivement.

		
(a) et (b) : Segment de rue délimité par deux PC. Profil symétrique, $H/W = 1.73$		(c) : Intérieur du PC d'une longueur de 7.00 m.

Fig. VI- 18. Vue sur la rue radiale comportant trois PC successifs.

ii. Mesures et instrumentation déployée.

Les mesures réalisées en continu dans le ksar de Ghardaïa sont :

- les vecteurs vents horizontaux (vitesse du vent horizontale (v) et sa direction (dd)),
- la température d'air (T_a) dans des abris d'air ventilés,
- le rayonnement global horizontal (E_g),
- les températures de surface des murs et du sol (T_{mur} , T_{sol}),
- l'humidité relative (HR).

Ces mesures ont nécessité le déploiement d'une instrumentation importante qui se traduit en dix micro-stations automatiques de type Hobo 512 K, une station automatique de type Campbell et quatre enregistreurs de type Testo 445.

➤ La station de mesure Hobo 512 K :



Fig. VI- 19. Micro-station Hobo 512 K utilisée dans les campagnes de mesure en continu.

Les micro-stations automatiques Hobo 512 K (Fig. VI- 19) sont des centrales d'enregistrement qui disposent de 4 voies de mesures (4 capteurs différents) et dont la capacité mémoire est importante (500 000 données. Ex : avec un pas d'acquisition d'une minutes et 4 capteurs en service, l'autonomie est d'environ 35 mois). Ces centrales sont autonomes électriquement (alimentation par piles) et peuvent donc être déployées rapidement en pleine nature et pour au moins un an sans avoir à changer les piles. Les données sont ensuite récupérées directement dans un PC.

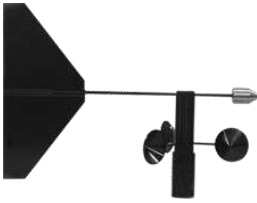
Les capteurs utilisés (Tableau VI- 9) sont :

- un combiné anémomètre-girouette qui mesure le vecteur vent horizontal (vitesse du vent et sa direction).
La plage de mesure de vitesse est de 0 à 44 m/s avec un seuil de 0.5 m/s. La précision est ± 0.5 m/s pour une vitesse < 17 m/s ($\pm 3\%$ de 17 à 30 m/s, $\pm 4\%$ de 44 à 99 m/s). La résolution est de 0.19 m/s.

La plage de mesure de direction est de 0-358°, avec une précision de $\pm 5^\circ$ et une résolution de 1.4°,

- une sonde de température et d'humidité relative qui combine la mesure de la température et de l'humidité relative. Elle est protégée dans un abri d'air ventilé.
La plage de mesure est -40°C à +75°C et 0 à 100% HR. La précision de température est $> \pm 0,7^\circ\text{C}$ à +25 °C et l'humidité $> \pm 3\%$ de 0°C à +50°C, $\pm 4\%$ dans un environnement condensé. La résolution est 0.4°C et 0.5% (à 25°C). Le temps de réponse est de 8mn et 5mn en HR dans un air à 2 m/s.
- un pyranomètre en silicone qui mesure le rayonnement global horizontal à travers une plage spectrale de 300 à 1100 nm². Le pyranomètre est calibré pour un usage en ensoleillement naturel et n'est pas désigné pour une lumière artificielle.

Tableau VI- 9. Capteurs utilisés avec la station de mesure Hobo 512 K.

Types de capteurs	Paramètres mesurés	Caractéristiques techniques			
		Plage de mesure	précision	résolution	seuil
 Combiné Anémomètre-Girouette.	vitesse	0 à 44 m/s (0 à 99 mph).	± 0.5 m/s (± 1.1 mph), $\pm 3\%$: 17 à 30 m/s (38 à 67 mph), $\pm 4\%$: 30 à 47 m/s (67 à 105 mph)	0.19 m/s (0.42 mph)	0.5 m/s (1.1 mph)
	direction	0 à 358°, 2° zone morte.	± 0.5 m/s (± 1.1 mph)	1.4 Degrés	0.5 m/s (1.1 mph)
 Sonde de température et d'humidité relative avec abri ventilé.	Température de l'air	-40°C à 75°C (-40°F à 167°F)	$\pm 0.2^\circ\text{C}$ de 0°C à 50°C ($\pm 0.36^\circ\text{F}$ à travers 32°C à 122°F)	0.02°C à 25°C (0.04°F à 77°F)	
	Humidité relative	0 à 100% RH de -40°C à 75°C (-40°F à 167°F).	$\pm 2.5\%$ RH de 10 à 90% RH	0.1%RH à 25°C (77°F)	
 Pyranomètre.	Rayonnement solaire global horizontal	0 à 1280 W/m ²	± 10 W/m ² ou $\pm 5\%$, plus grand sous la lumière solaire. L'erreur induite par la température additionnelle : ± 0.38 W/m ² /°C à partir de 25°C (0.21 W/m ² /°F à partir de 77°F)	1.25 W/m ²	

² nm : nanomètre: Unité de mesure de longueur du système international valant 10⁻⁹ mètre, ce qui correspond à un milliardième de mètre.

➤ La station de mesure Campbell :

La station de mesure Campbell est une centrale de mesure et d'acquisition autonome, avec un enregistreur de grande capacité mémoire (32 000 lectures). Elle est constituée d'un coffret étanche qui contient la centrale d'acquisition ainsi qu'une alimentation. Le système est complété par un panneau solaire et une gamme de capteurs. Elle est alimentée par des batteries rechargeables. Lorsque qu'un programme d'acquisition est en exécution, le panneau solaire 5 W maintiendra en charge les batteries au cours de l'année. La collecte de données se fait par liaison directe à un PC.

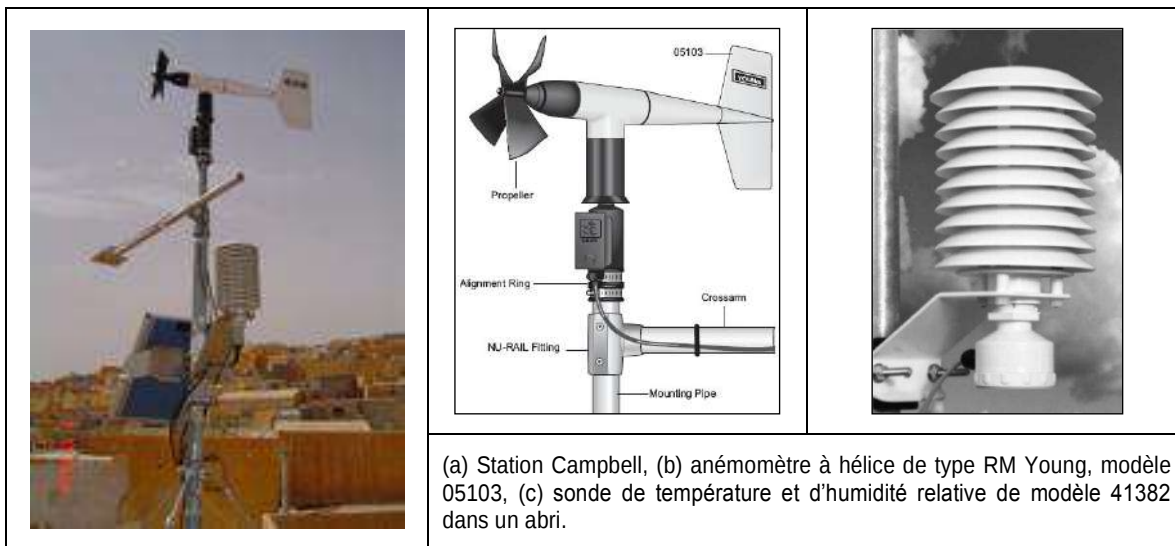


Fig. VI- 20. Station de mesure Campbell.

Les capteurs utilisés sont :

- un anémomètre à hélice, de type RM Young, modèle 05103 qui mesure la vitesse du vent et sa direction en environnement extérieur. Il est caractérisé par une plage de mesure de vitesse de vent de 0 à 100 m/s (0 à 224 mph) ; une précision de ± 0.3 m/s (± 0.6 mph) et un seuil de démarrage de 1.0 m/s (2.2 mph). La plage de mesure de la direction du vent est 0-360°, sa précision de $\pm 3^\circ$ et son seuil de démarrage à un déplacement de 10° de 1.1 m/s (2.2 mph),
- une sonde de température et d'humidité relative de modèle 41382 qui combine la mesure de la température d'air et l'humidité relative. Elle est protégée dans un abri anti-radiation ventilé. La plage de mesure est respectivement de -50° à $+50^\circ$ (-50° à $+150^\circ\text{F}$) et 0 à 100%RH pour la température d'air et l'humidité relative. La précision est de $\pm 0.3^\circ\text{C}$ et $\pm 2\%\text{RH}$.

➤ L'enregistreur de données Testo 445 :

Comme le type de capteur de vent utilisé (anémomètre-girouette) par les stations de mesure Hobo et Campbell ne permet pas la détection des vitesses de vent faibles inférieures à la valeur seuil de 0.5 m/s, des sondes thermiques additionnelles ont été intégrées dans le protocole. Elles sont caractérisées par une plus grande sensibilité aux fluctuations de l'air (seuil de 0.03 m/s) et sont connectées à des unités d'enregistrement de type Testo 445.

L'instrument Testo 445 (Tableau VI- 10) est un appareil portable qui mesure et enregistre jusqu'à six paramètres incluant la température, la vitesse, la qualité de l'air interne, l'humidité relative, le

point de rosée et l'enthalpie. Il possède un enregistreur de données interne capable de stocker de l'information avec un maximum de 3000 lectures. Les données mesurées peuvent être consultées sur l'écran ou sauvegardées et analysées directement sur un PC. Il peut être autonome (alimentation par piles) ou branché directement à une prise de courant électrique. Les sondes thermiques utilisées sont la sonde 3 fonctions et la sonde à bulbe chaud pour la mesure de la température et la vitesse d'air.

Tableau VI- 10. Caractéristiques de l'instrument de mesure Testo 445.

	Type de sonde	Plage de mesure	Précision
 Instrument Testo 445.	 Sonde thermique tri-fonction.	0 à +10 m/s 0 à +100 %RH, -20 à +70 °C	$\pm(0.03 \text{ m/s} \pm 5\% \text{ de } v_m)$ (0 à 10m/s) $\pm 2 \text{ \%RH}$ (+2 à +98 %RH) $\pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ (0 à +50 °C) $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (plage restante).
	 Sonde thermique à bulbe chaud	0 à +10 m/s, -20 à +70 °C	$\pm (0.03 \text{ m/s} \pm 5\% \text{ de } v_m)$ (0 à +10 m/s).

iii. Calibrage des instruments de mesure.

La station de mesure Campbell et les instruments de mesure portables déployés lors de l'ensemble des campagnes de mesure ont été calibrés par l'ONM. En ce qui concerne les micro-stations de mesure automatiques Hobo 512K utilisées, elles étaient neuves, acquises avec un certificat de calibrage.

iv. Protocole de mesure.

Échelle du quartier.

- Stations de mesure au-dessus des toits :

Dans le ksar de Ghardaïa, les toitures terrasses se développent rarement en une seule surface plane, elles présentent généralement des galeries couvertes et des espaces domestiques. C'est au-dessus de ces espaces, au point le plus haut et le plus dégagé des terrasses que sont installées les stations de mesure automatiques. Un trépied métallique d'une hauteur de 2 mètres permet de fixer les différents capteurs formant la centrale de mesures météorologiques. Il est équipé de deux bras de montage (49 cm) sur lesquels sont fixés les capteurs de rayonnement global horizontal (pyranomètre) et de vitesse de vent et sa direction (anémomètre-girouette). Ce dernier capteur est placé au niveau haut du dispositif, n'ayant aucun obstacle autour de lui.

- Stations de mesure dans les rues :

Dans les rues, les sondes de mesure sont placées au milieu de la longueur de la rue afin d'éviter les effets induits par les intersections de rue. Le choix de la hauteur à laquelle fixer l'instrumentation déployée est conditionné par l'aspect sécuritaire. Aussi, pour mettre les sondes à l'abri de tout acte de vandalisme et pour ne pas entraver l'usage des espaces urbains, elles sont placées à 2/3 de hauteur de façade des rues. Un support constitué d'une

barre horizontale de 120 cm de longueur et d'une tige verticale de 60 cm de hauteur ($\varnothing = 60$ mm.) est fixé dans chacune des rues sélectionnées. Il porte une station de mesure automatique enregistrant la vitesse du vent horizontal et sa direction, la température de l'air et le rayonnement global horizontal. La position des capteurs est approximativement équidistante des deux façades de bâtiments de telle sorte que les mesures soient prises au milieu de la section de rue (Fig. VI- 21c). La température de surface est mesurée instantanément à l'aide de thermocouples et ne nécessite donc aucun dispositif particulier.

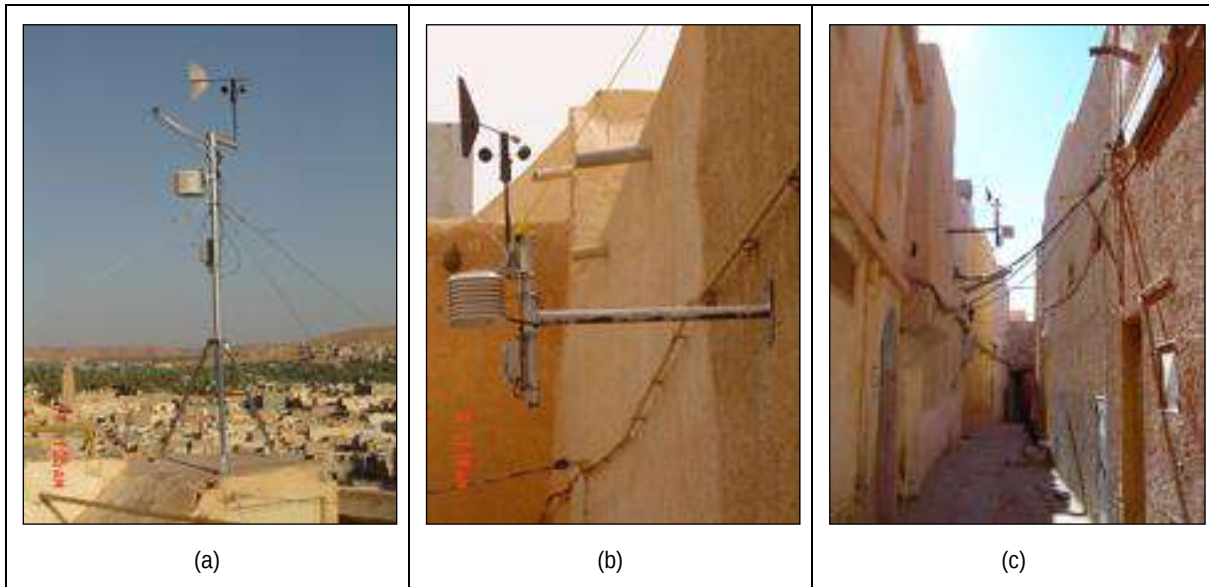


Fig. VI- 21. Vues sur les stations de mesure automatiques Hobo au-dessus des toits et dans les rues canyons.

Échelle du fragment urbain.

- La rue concentrique.

Afin d'évaluer au mieux l'effet du passage couvert sur l'écoulement moyen de la rue, un profil horizontal de vent est mesuré sur toute la longueur de la rue à l'aide de deux micro-stations Hobo et quatre capteurs anémomètres thermiques (type Testo 445) disposés à l'intérieur du passage couvert et à l'extérieur, de part et d'autre de ses extrémités Est et Ouest (Fig. VI- 22b et VI- 22c). Les capteurs anémomètres thermiques sont fixés à 1.50 m de l'extrémité Est du passage couvert, en son milieu et à 1.50 et 12.90 m de son extrémité Ouest. Ils sont alignés à la même hauteur, du même côté de la façade, à environ 3/4 de hauteur du passage couvert (équivalent à 2.70 m au-dessus du niveau du sol). Ils sont fixés sur des supports métalliques de section tubulaire $\varnothing = 20$ mm et sont directement alimentés en électricité à partir d'une des maisons donnant sur la rue (appartenant à la Mosquée).

Comme les anémomètres thermiques ne permettent pas la mesure de la direction du vent, deux micro-stations Hobo sont placées respectivement dans les sections de rue Nord-est et Sud-ouest, à une distance respective de 22.50 et 5.00 m des extrémités du passage couvert (Fig. VI- 22a). Les stations sont fixées à une hauteur h égale à 2/3 de la hauteur de la façade de la rue (Fig. VI- 22d).

- La rue radiale.

Sur le tronçon de rue situé dans la partie basse de la rue, une station de mesure automatique est fixée à 2/3 de hauteur de façade. C'est au milieu du segment de rue découvert délimité par deux PC et d'une longueur de 17.50 m que les mesures sont effectuées. Deux mesures de référence sont prises au-dessus des toits du versant Sud (Fig. VI- 22a).

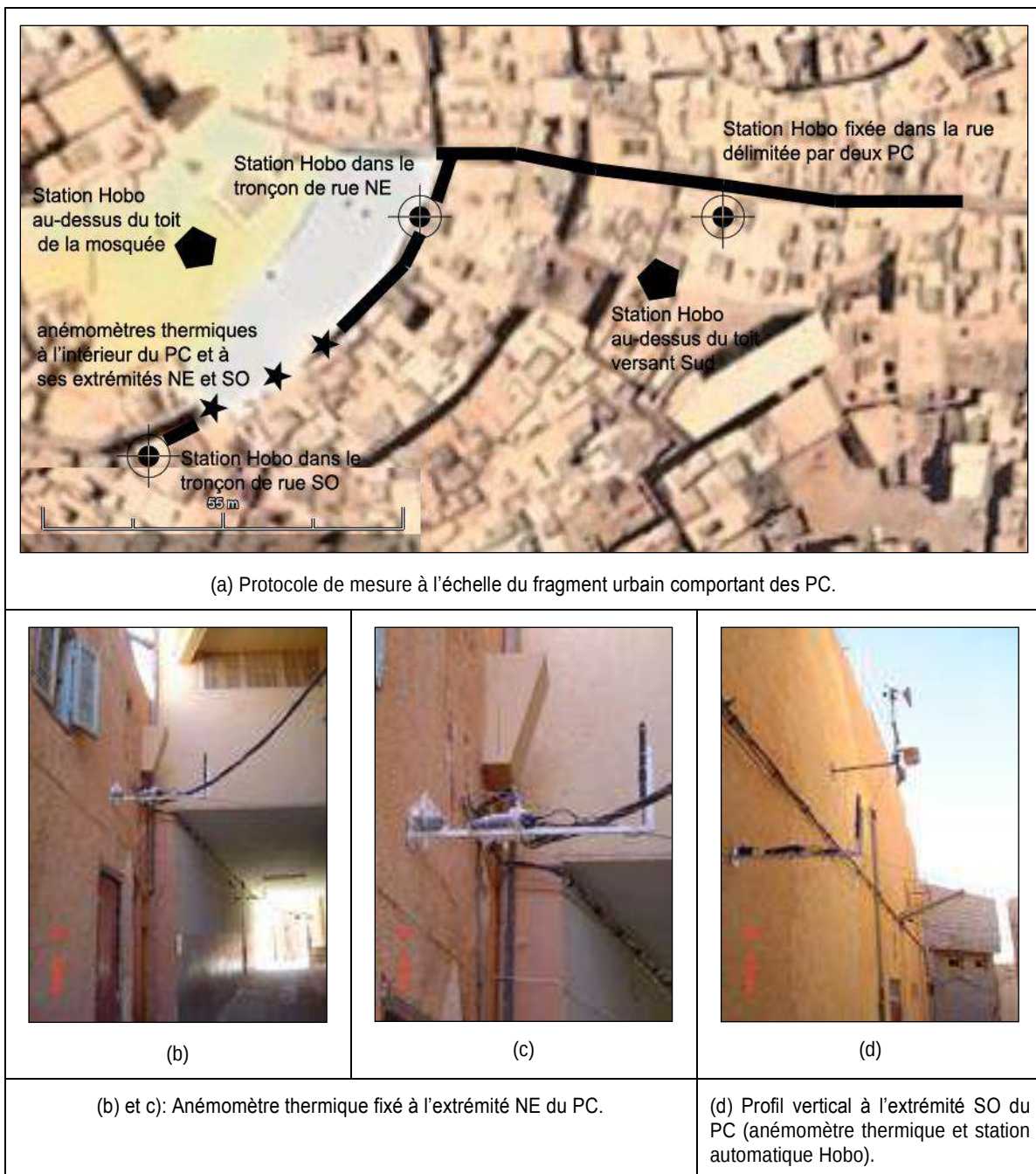


Fig. VI- 22. Protocole de mesure relatif à l'étude de l'effet des PC sur les écoulements d'air.

Tableau VI- 11. Récapitulatif des différents capteurs utilisés lors des campagnes de mesure à Ghardaïa.

capteurs	nombre	provenance	Variables mesurées	Utilisation des données
Anémomètre-girouette (Hobo)	10	Laboratoire EPAU LAE	Vitesse de la composante du vent moyen horizontale. Direction de la composante du vent moyen horizontale	Etude de l'écoulement moyen dans le ksar (dans les rues et au-dessus des toits)
Anémomètre-girouette (campbell)	1	Laboratoire EPAU LAE	Vitesse de la composante du vent moyen horizontale. Direction de la composante du vent moyen horizontale	Etude de vent de référence au-dessus de la station Khetala.
Anémomètre tri-fonctions	2	Laboratoire EPAU (1) LAE Laboratoire GRECAU (1)	Vitesse du vent	Etude de l'écoulement à l'échelle du passage couvert, mesure des vitesses de vent faibles
Anémomètre à bulbe chaud	2	Laboratoire EPAU LAE	Vitesse du vent	Etude de l'écoulement à l'échelle du passage couvert, mesure des vitesses de vent faibles
pyranomètre	4	Laboratoire EPAU LAE	Rayonnement solaire global horizontal	Etude de la température dans les rues et au-dessus des toits
sonde température et humidité relative (Hobo)	10	Laboratoire EPAU LAE	Température de l'air	Etude de l'implication du vent sur le comportement thermique du ksar
sonde température et humidité relative (Campbell)	1	Laboratoire EPAU LAE	Température de l'air.	Etude de la température de référence.
thermomètre infrarouge avec visée laser	1	Laboratoire GRECAU (Toulouse)	Température de surface	Etude de l'implication du vent sur le comportement thermique du ksar.

v. Acquisition et exploitation des données.

Acquisition des données.

- Fréquence d'acquisition :

Comme la variabilité du vent peut s'effectuer sur une période de temps très courte, de l'ordre de quelques secondes (Chap. II), les différents enregistreurs automatiques sont programmés pour une acquisition des données en continu de 60 secondes. Cette fréquence d'acquisition permet de photographier avec précision la distribution horizontale du vent à travers le ksar.

- Programmation et récupération des données :

Des logiciels correspondant à chaque type de station déployée sont utilisés pour la programmation et la récupération des données.

- les micro-stations Hobo sont programmées par le logiciel BoxCar Pro 4.3 (synchronisation de l'horloge interne, pas de temps d'archivage, heure et date de démarrage différé ou de l'arrêt des relevés etc.) qui permet le transfert des valeurs enregistrées directement sur un PC. Le programme permet en outre de tracer des graphiques et d'exporter les données recueillies vers d'autres applications (Excel). Les données mesurées sont collectées à la fin de la campagne et sont converties sous format Excel,
- le logiciel Testo Comfort X35 permet la programmation des instruments Testo 445 et la récupération des données sur un PC. Les données sont récupérées toutes les 12h00 en raison de la capacité mémoire limitée de l'enregistreur (3000 données maximum). Les données recueillies sont ensuite converties sous format Excel,
- la station Campbell : un programme est établi afin d'enregistrer les données et les récupérer directement sur un PC. Les données sont récupérées à la fin de la campagne de mesure.

Exploitation des données.

L'exploitation des données est effectuée par le biais du programme Microsoft office Excel 2003 et des logiciels Lakes Environmental WRPLOT View (version 5.9 développé par The et al.), Statistica de StatSoft, et AutoCAD 2005 de AUTODESK. Ces programmes permettent le contrôle et la gestion des valeurs recueillies ainsi que la visualisation des phénomènes aérauliques mesurés.

- le programme Microsoft office Excel 2003 est un outil d'analyse, de partage et de gestion d'informations dans des tableaux. Il permet de mettre facilement en forme toutes les données et leur traitement quantitatif et qualitatif : visualisation instantanée sous forme de tableaux et de graphiques,
- le logiciel Lakes Environmental WRPLOT View (version 5.9, The et al.) est un programme de rose des vents. Il importe des données à partir de l'application Excel et permet d'afficher le tracé des roses de vents (diagramme étoilé) et les tableaux de distribution des fréquences pour différentes classes de vitesse de vent et de direction. Le nombre de direction du vent est défini par l'utilisateur et varie entre 4 et 36.

Dans le cas de notre étude, des roses de vent sont créées pour visualiser l'écoulement du vent au-dessus des toits et dans les rues canyons. Les directions du vent sont classées en 16 secteurs de 22.5 degrés. Au-dessus du toit, les valeurs de vitesse de vent sont classées selon les classes suivantes : 0 - 2 m/s ; 2 - 4 m/s ; 4 - 6 m/s ; ≥ 6 m/s. Dans la rue canyon en revanche, les valeurs de vitesse de vent sont classées selon les classes suivantes : 0 - 0.5 m/s ; 0.5 - 1.0 m/s ; 1.0 - 2.0 m/s ; ≥ 2.0 m/s,

- le logiciel Statistica (version 8) est un système d'analyse des données, de représentation graphique, de gestion de bases de données et de développement d'applications personnalisées. Il réalise des opérations mathématiques en précision (ex. test de précision numérique et statistique pour la détermination des coefficients de corrélation entre deux variables).

A partir des données simultanées mesurées dans les rues canyons et au-dessus des toits, le logiciel permet la détermination de corrélations empiriques entre les écoulements d'air dans la rue et au-dessus du toit. L'équation statistique obtenue est caractérisée par un coefficient de détermination. Ce coefficient de détermination, désigné par le symbole R^2 ,

permet de juger de la validité statistique de l'équation représentant la courbe de régression. Il peut prendre n'importe quelle valeur comprise entre 0 et 1. Plus sa valeur est élevée, plus le degré de validité de l'équation est élevé. À la limite, une valeur de 1 signifierait que la régression explique entièrement le comportement de la variable dépendante (vitesses d'air dans la rue en fonction de celle mesurée au-dessus du toit),

- les scripts AutoCAD : ce sont des fichiers texte qui contiennent une série de commandes AutoCAD permettant d'automatiser les tâches de séquence rapide. Le script créé dans notre étude est utilisé pour la visualisation des écoulements d'air dans le ksar. Il contient les mesures de vent recueillies au niveau de chaque station. Ces données sont obtenues à partir de fichiers Excel et converties sous format texte. La visualisation des vecteurs vents (vitesse et direction) est effectuée en 2D selon un intervalle de temps de 20 secondes,
- le programme PET est utilisé pour le calcul de l'indice de confort PET (Température Physiologique Équivalente). C'est un programme élaboré en langage FORTRAN-77. Les données sont présentées sous format texte et peuvent être converties sous format Excel.

Tableau VI- 12. Récapitulatif des campagnes de mesure effectuées dans le cadre de l'étude.

Campagnes de mesure	Durée de la campagne	Types de mesure	données météorologiques mesurées
Juin 2003: exploratoire	deux jours non consécutifs : les 24 et 26 juin 03.	Mesures de référence en continu sur le plateau Khetala (données horaires)	température sèche (T_a), température de rayonnement (T_{mr}), température de surface (T_s), vitesse (v) et direction du vent (dd), humidité relative (RH).
Février 2004	trois jours consécutifs : du 11 au 13 février 04.	Mesures en discontinu dans les rues du Ksar selon la méthode des parcours urbains toutes les 3 heures.	
Février 2005: mesure en continu.	quatre jours consécutifs: du 19 au 24 février 05.	Mesures de référence en continu sur le plateau Khetala et le site dégagé de l'aéroport (données horaires). Mesures de référence dans le fond de la vallée (toutes les 5 min.)	rayonnement global horizontal (E_g), température sèche (T_a), vitesse (v) et direction du vent (dd), humidité relative (RH).
		Mesures en continu, simultanées, dans les rues et au-dessus des toits : toutes les 60 secondes. Mesures mobiles instantanées, dans les rues toutes les 3 heures.	rayonnement global horizontal (E_g), température sèche (T_a), température de surface (T_s), vitesse (v) et direction du vent (dd), humidité relative (RH).

Septembre 2005: campagne de précision	huit jours consécutifs, du 06 au 13 septembre 05 selon deux protocoles : 1^{er} protocole à l'échelle du quartier, 2^{ème} protocole à l'échelle du fragment urbain.	Mesures de référence en continu sur le plateau Khetala (données toutes les 60 secondes).	température sèche (T_a), vitesse (v) et direction du vent (dd), humidité relative (RH).
		Mesures en continu, simultanées, dans les rues et au-dessus des toits : toutes les 60 secondes. Mesures mobiles instantanées, dans les rues toutes les 3 heures.	rayonnement global horizontal (E_g), température sèche (T_a), température de surface (T_s), vitesse (v) et direction du vent (dd), humidité relative (RH).
Août 2006: campagne de détails.	Dix jours consécutifs, du 06 au 15 août 06 selon deux protocoles : 1^{er} protocole à l'échelle du quartier. Un point de mesure supplémentaire est intégré : rue canyon courte dans le ksar de Tafilalt (sur le plateau) 2^{ème} protocole à l'échelle du fragment urbain.	Mesures de référence en continu sur le plateau Khetala (données toutes les 60 secondes).	température sèche (T_a), vitesse (v) et direction du vent (dd), humidité relative (RH).
		Mesures en continu, simultanées, dans les rues et au-dessus des toits : toutes les 60 secondes. Mesures mobiles instantanées, dans les rues toutes les 3 heures.	rayonnement global horizontal (E_g), température sèche (T_a), température de surface (T_s), vitesse (v) et direction du vent (dd), humidité relative (RH).

vi. Problèmes rencontrés.

- des problèmes d'acquisition des données de référence sur le plateau Khetala lors de la campagne de février 2005,
- les conditions météorologiques pas toujours favorables (présence de vents forts) ont exigé la réalisation de la campagne d'août 2006 et son prolongement sur une période de cinq jours pour couvrir les conditions de vents faibles,
- le non fonctionnement de la station de mesure Campbell lors de la campagne de septembre 05, ce qui a impliqué l'élimination d'un point de mesure (Pt.13).

Conclusion.

Notre recherche porte sur l'étude des écoulements d'air dans les textures urbaines denses, caractérisées par des géométries irrégulières et une topographie complexe. Elle vise à évaluer les liens entre écoulements d'air, topographie et morphologie urbaine (configuration des bâtiments et orientation) et déduire les paramètres physiques fondamentaux dans les modifications microclimatiques. Elle se base sur une approche globale et de détail et retient pour cas d'étude le quartier traditionnel de la ville de Ghardaïa, dans la Pentapole du M'zab, en milieu chaud et sec.

Ce choix est justifié *a priori* par les qualités d'intégration supposées citées par de nombreux auteurs. La forme naturelle du terrain sur lequel est bâti le ksar ainsi que la configuration étagée des formes bâties qui en résulte constituent par ailleurs une caractéristique urbaine particulièrement intéressante, pouvant apporter un éclairage nouveau sur l'effet que peut avoir une telle topographie urbaine sur les écoulements d'air.

La méthodologie adoptée se base sur la collecte de données climatiques sur terrain et met en œuvre une série de campagnes de mesure d'hiver et d'été, caractéristiques des conditions extrêmes de confort. Des mesures sont enregistrées sur des sites de référence et dans tout le ksar, dans les rues et au-dessus des toits. En tout, cinq campagnes de mesure des principaux paramètres agissant sur le confort thermique en extérieur sont effectuées entre juin 2003 et août 2006. Les deux premières campagnes sont réalisées en juin 2003 et février 2004. Elles sont basées sur des mesures instantanées dans le ksar à travers un parcours urbain et ont pour but d'étudier l'impact de la topographie (orientation des versants) et la morphologie urbaine (orientation des rues, prospect H/W, protections horizontales) sur les conditions thermiques du ksar en été et en hiver. Les trois dernières campagnes de mesures, réalisées en février et septembre 2005 ainsi qu'en août 2006, sont par contre basées sur des mesures en continu en des points fixes, répartis à travers le ksar. Elles ont nécessité le déploiement d'une instrumentation importante et ont pour objectif l'évaluation du comportement aéraulique du ksar pour différentes directions de vent d'hiver et d'été et apprécier leurs effets sur les conditions thermiques.

Les mesures sur site ont permis de constituer une base de données d'hiver et d'été. À partir de cette base de données, plusieurs phénomènes ont pu être mis en évidence. Leur analyse est développée dans les chapitres VII et VIII de cette thèse.

CHAP. VII. LES ÉCOULEMENTS D’AIR DANS LES RUES DU KSAR : *analyse et discussion.*

Les effets d’emboîtement des échelles climatiques nécessitent la compréhension des phénomènes au-dessus de la canopée urbaine (dans la sous-couche de rugosité) avant ceux, microclimatiques, liés à la morphologie urbaine (Chap. III).

VII- 1. Conditions des écoulements d'air au-dessus des toits.

Dans le ksar de Ghardaïa, les écoulements au-dessus des toits semblent dépendre de la topographie du site d'implantation d'une part et la morphologie proéminente de la mosquée d'autre part.

VII- 1.1. Effet de la topographie du site.

Sur les versants du Ksar, les caractéristiques des écoulements d'air se manifestent différemment en fonction de la direction du vent. D'une manière générale, la comparaison des vitesses d'air au-dessus des toits montre des versants exposés au vent, caractérisés par les vitesses d'air les plus élevées du Ksar et des directions de vent stables dans le même sens que le vent incident. Les versants à l'abri du vent sont en revanche caractérisés par des vitesses de vent faibles et des directions fortement fluctuantes.

Trois conditions de vent sont à distinguer selon les directions de vent rencontrées lors des différentes campagnes de mesure.

VII- 1.1.1. Conditions de vents forts à moyens de direction Sud.

Dans le cas de vents de référence de direction Sud, les vitesses de vent les plus élevées sont observées sur les versants Sud et Ouest. Lorsque la vitesse moyenne du vent libre sur le plateau est de 6.00 m/s et que les vitesses instantanées atteignent des valeurs maximales de 17.00 m/s, les toits Sud et Ouest exposés au vent présentent des vitesses moyennes et maximales respectives de 3.00 et 12.00 à 13.00 m/s.

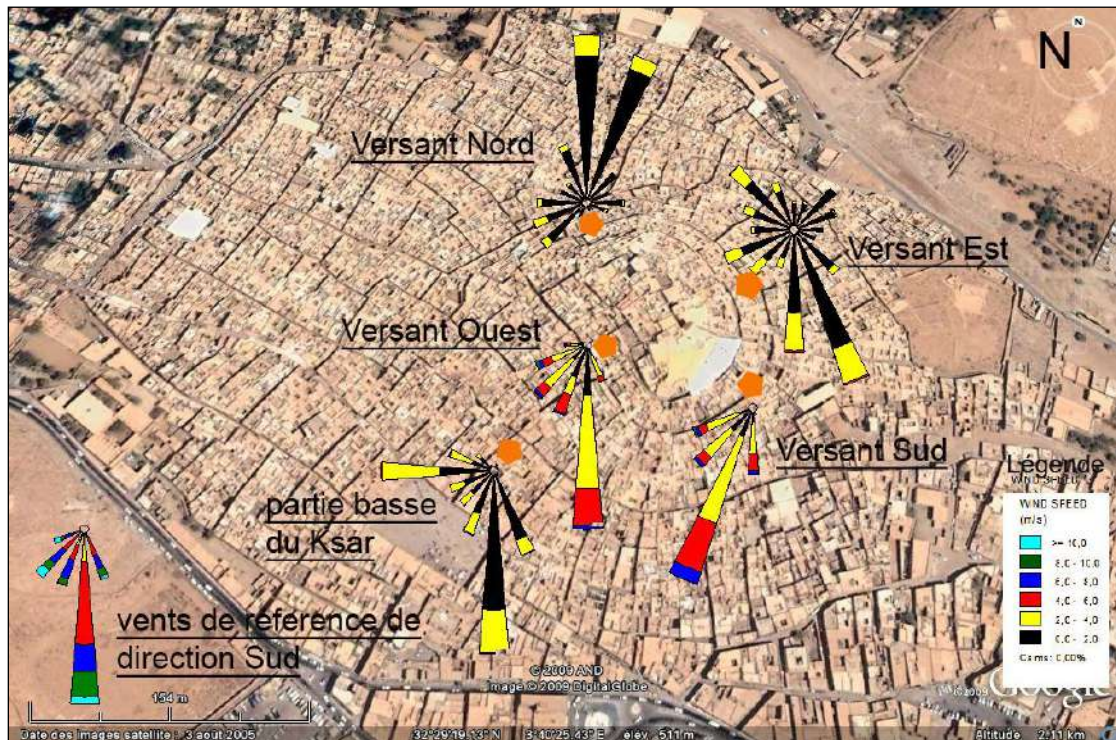


Fig. VII- 1. La distribution des écoulements d'air au-dessus des toits du ksar de Ghardaïa : cas de vents de référence de direction Sud (campagne de Septembre 05).

En outre, sur un même versant face au vent, les points de mesure situés dans la partie haute de la colline sont plus exposés que ceux situés dans la partie basse. Ainsi, lorsque le point situé au niveau haut du versant Ouest présente une vitesse moyenne de 2.80 m/s, la vitesse moyenne enregistrée dans la partie basse du versant est de 1.50 m/s.

Sur le versant Nord qui est dans ce cas à l'abri du vent, les vitesses de vent moyennes sont faibles, d'une valeur de 1.00 à 1.25 m/s tandis que les vitesses maximales instantanées sont de l'ordre de 5.50 m/s.

La comparaison de la direction du vent au-dessus des toits montre par ailleurs des versants Sud et Ouest exposés au vent, caractérisés par des directions de vent stables dans le même sens que le vent libre soufflant sur le plateau. Les toits Nord situés sous le vent enregistrent en revanche des directions fluctuantes, opposées à celle du vent incident (Fig. VII- 1).

VII- 1.1.2. Conditions de vents forts à moyens, de direction Ouest.

Sur la figure (VII- 2), il peut être observé que lorsque le vent ambiant est de direction dominante Ouest, les vitesses de vent les plus élevées sont relevées au niveau des toits situés sur les versants Nord et Ouest. Une légère accélération est même observée sur le versant Nord qui constitue en fait une zone de contournement du vent. La vitesse de vent moyenne fluctue entre 2.60 et 3.50 m/s tandis que les vitesses d'air maximales sont de l'ordre de 7.50-9.50 m/s. Sur les versants Est et Sud en revanche, la vitesse de vent moyenne n'excède pas 1.50 m/s, avec des valeurs maximales comprises entre 2.50 et 3.50 m/s.

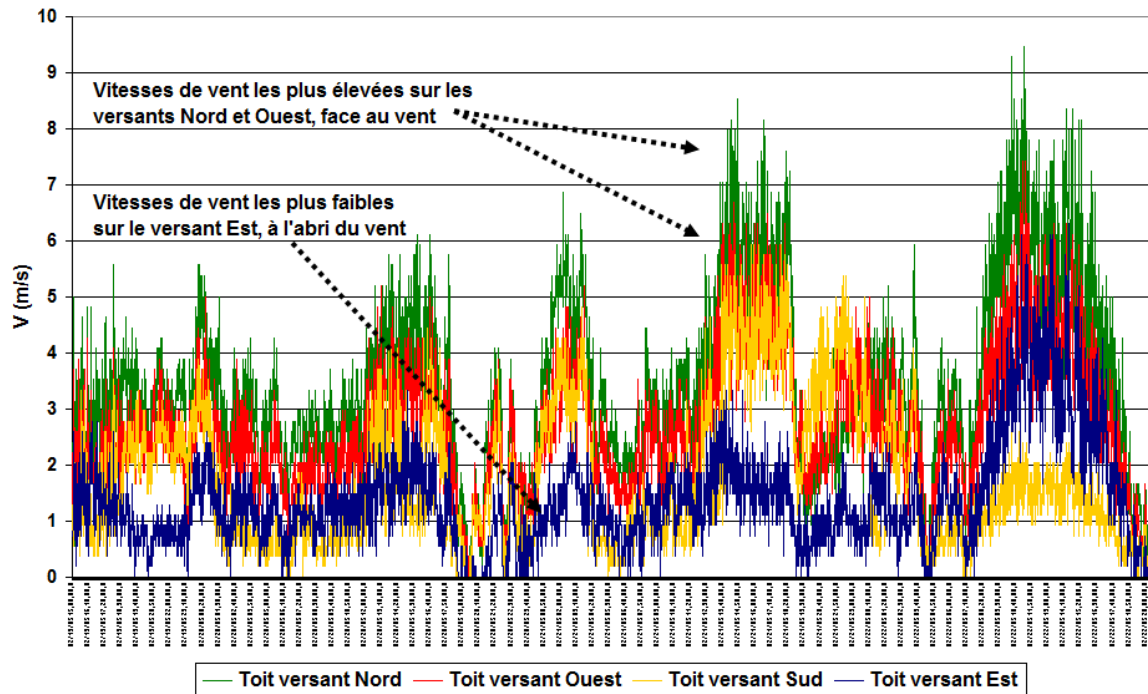


Fig. VII- 2. Comparaison des vitesses de vent au-dessus des toits dans le ksar de Ghardaïa (19 – 22 février 2005).

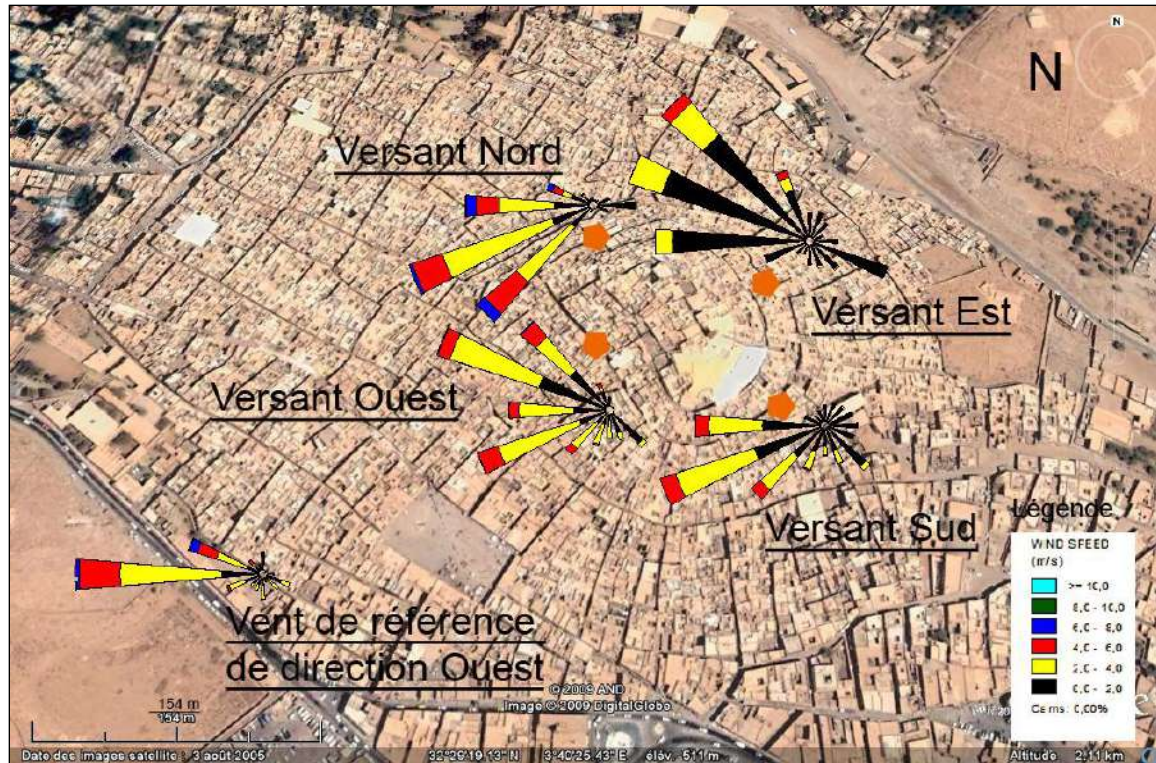


Fig. VII- 3. La distribution des écoulements d'air au-dessus des toits du ksar de Ghardaïa : cas de vents de référence de direction Ouest (campagne de Février 05).

La comparaison des directions des vents au-dessus des toits indique que sur les versants Nord et Ouest, les directions de vent sont stables, proches de celles du vent libre soufflant dans la vallée. Ces directions varient entre 240 (Ouest Sud-ouest) et 330° (Nord Nord-ouest). Sur les versants Est et Sud en revanche, les vents sont fortement instables et fluctuent dans toutes les directions.

VII- 1.1.3. Conditions de vents forts à moyens de direction Nord.

Lorsque les vents libres sur le plateau sont de direction dominante Nord, les versants Nord et Est sont face au vent et enregistrent les vitesses d'air les plus élevées du Ksar. En revanche, le versant Sud, à l'abri du vent, se caractérise par les vitesses d'air les plus faibles. Pour un vent libre sur le plateau d'une vitesse moyenne de 4.85 m/s, la vitesse d'air moyenne enregistrée sur le versant Nord est de 3.15 m/s alors qu'elle n'excède pas 1.00 m/s sur le versant Sud.

La partie basse du ksar enregistre quant à elle des vitesses d'air moyennes d'une valeur de 2.00 m/s, valeur inférieure à celle observée au sommet de la colline.

La direction des écoulements sur les versants Nord et Est face au vent sont stables et suivent de près celles du vent sur le plateau tandis que le versant Sud, à l'abri du vent, se caractérise par de fortes fluctuations.

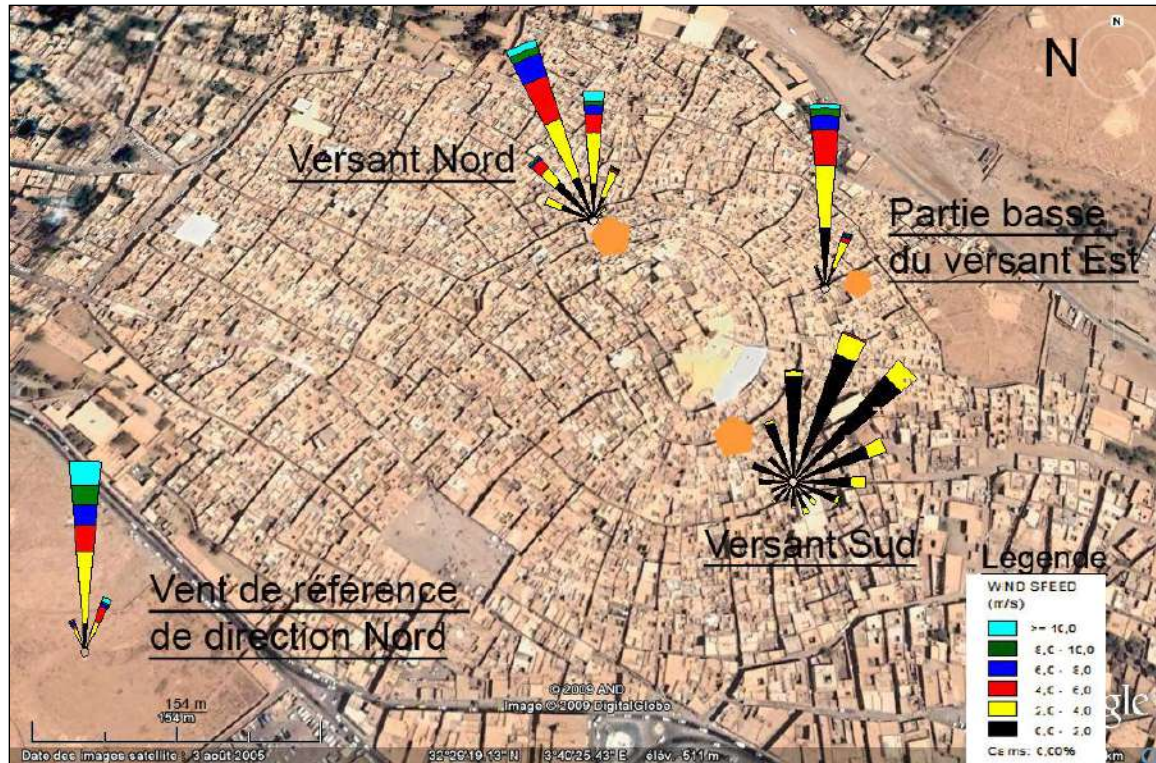


Fig. VII- 4. La distribution des écoulements d'air au-dessus des toits du ksar de Ghardaïa : cas de vents de référence de direction Nord (campagne de mesure d'août 06).

Ainsi, si les versants face au vent enregistrent les valeurs de vitesse de vent les plus élevées et des directions stables proches de celles du vent libre sur le plateau, sur les versants sous le vent, l'intensité des écoulements est faible et les directions sont fortement fluctuantes.

Les caractéristiques de l'écoulement décrites ci-dessus pour différentes directions de vent incident correspondent à celles d'un écoulement autour d'une colline caractérisée par une pente "modérée" (pente<30%) (Oke 1987). La topographie du site semble dicter l'écoulement d'ensemble du ksar. Toutefois, la morphologie particulière de l'édifice de la mosquée génère des modifications dans les écoulements d'air en créant des zones à l'abri du vent ou en réduisant les vitesses de vent au niveau des zones de contournement du vent.

VII- 1.2. Effet de l'élément proéminent de la mosquée.

D'une manière générale, un relief non uniforme et à pente "modérée" (pente<30%) perturbe la distribution du vent et induit des modèles d'écoulement d'air caractérisés par une accélération de la vitesse d'air sur la pente face au vent et une décélération du côté sous le vent (Oke 1987). En plan, un écoulement latéral est observé avec une accélération du vent sur les zones de contournement. Du côté sous le vent, l'intensité de l'écoulement est faible et correspond à une zone de forte turbulence. Or dans le ksar de Ghardaïa qui est édifié sur une colline, le modèle de distribution des écoulements d'air ne découle pas uniquement de l'effet topographique. En fait, le Ksar présente une distribution originale des écoulements d'air, fonction de la topographie du site d'implantation d'une part (comme nous venons de le voir) et de l'obstacle urbain constitué par la grande mosquée située sur le versant Sud du Ksar d'autre part.

Les effets aérodynamiques induits par le grand bâtiment de la mosquée varient en fonction de la direction des vents dominants.

VII- 1.2.1. Conditions de vent incident de direction Sud.

Lorsque le vent souffle du Sud, le versant Sud est face au vent tandis que les versants Est et Ouest constituent des zones de contournement du vent. Il est donc supposé se créer un écoulement stable et de forte intensité sur ces versants directement exposés au vent. L'analyse des vitesses et directions du vent mesurées au-dessus des toits indique cependant que si les versants Sud et Ouest se caractérisent par des vents de direction stable et d'une intensité élevée d'une valeur moyenne et maximale instantanée respectives de 3.00 et 10.20 m/s, le comportement du versant Est diffère fondamentalement. Ce sont en fait des vitesses d'air faibles et des directions de l'écoulement fortement fluctuantes qui sont enregistrées au niveau de ce versant (Fig. VII- 5 et VII- 6). La vitesse d'air moyenne n'excède guère la valeur de 1.25 m/s tandis que les vitesses maximales instantanées sont de 5.40 m/s.

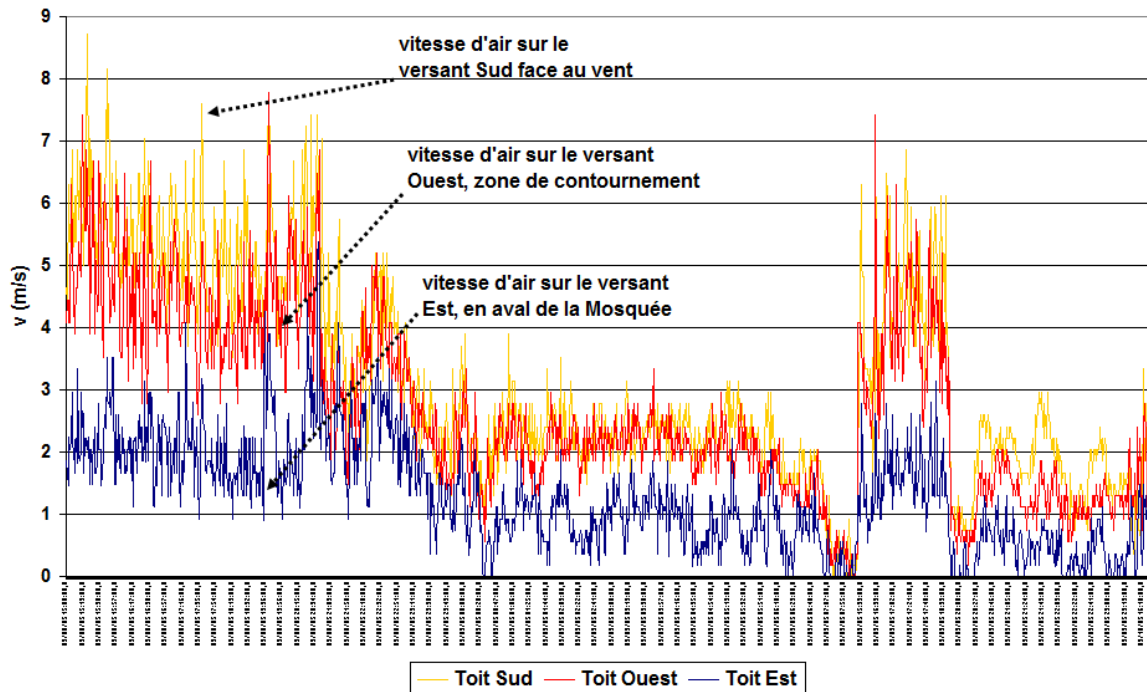


Fig. VII- 5. Variation de la vitesse d'air au-dessus des toits des versants Sud, Ouest et Est du Ksar de Ghardaïa : cas des vents incidents Sud (données Septembre 05).

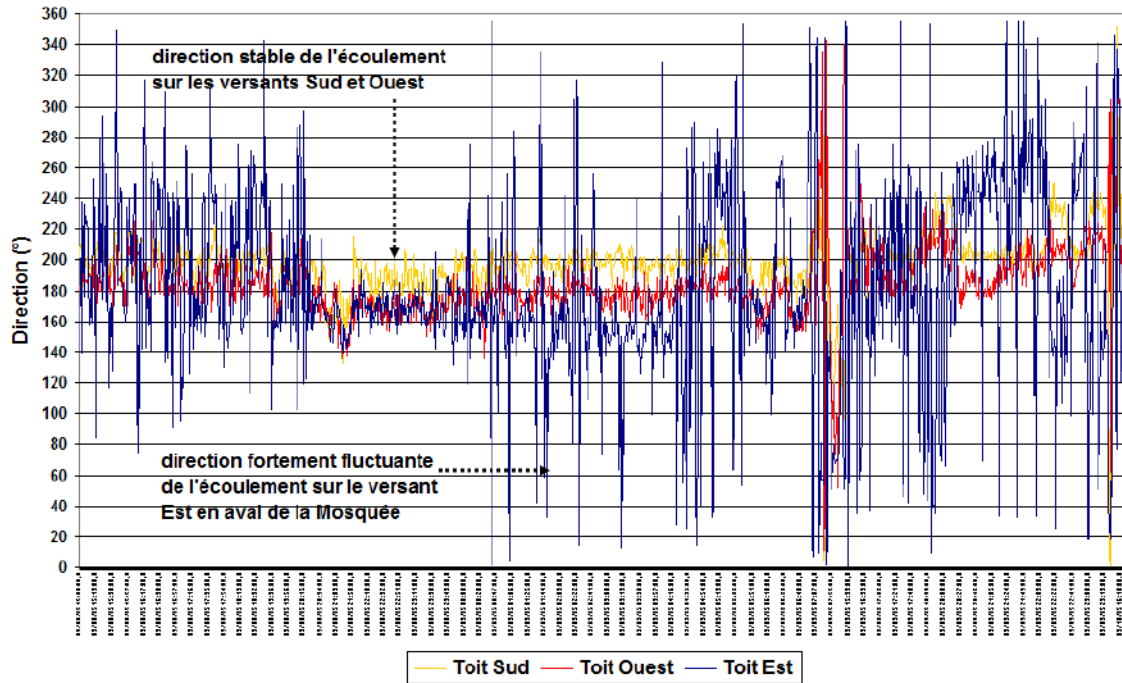


Fig. VII- 6. Variation de la direction de l'écoulement au-dessus des toits des versants Sud, Ouest et Est du Ksar de Ghardaïa : cas des vents incidents Sud (données Septembre 05).

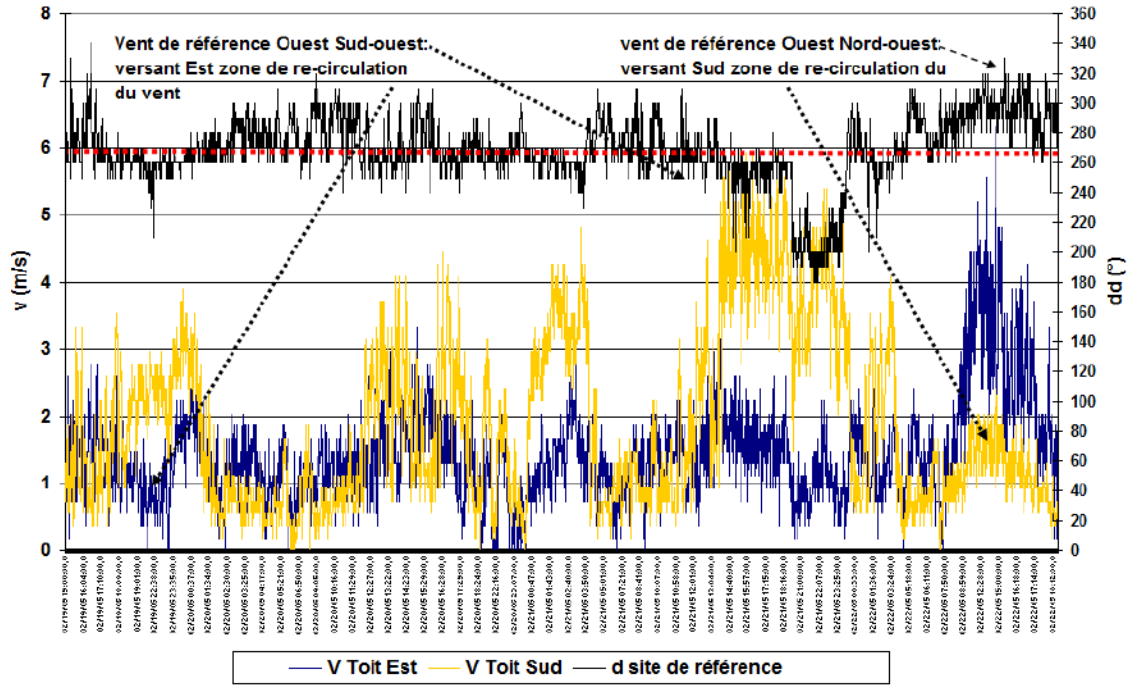
Ces caractéristiques de vitesse et de direction de l'écoulement indiquent l'existence d'une zone de sous-pression, résultat probablement de l'effet de l'obstacle urbain constitué par le grand bâtiment de la mosquée. Edifié sur le versant Sud-est (face à la Quibla) et en amont du versant Est, la grande mosquée dévie l'écoulement de sa trajectoire et crée une zone de re-circulation du vent au niveau du versant Est.

L'analyse des données pour des directions de vents incidents Ouest indique par ailleurs que lorsque l'obstacle urbain constitué par la mosquée n'entrave pas l'écoulement de l'air au-dessus de la canopée urbaine, il réduit néanmoins son intensité.

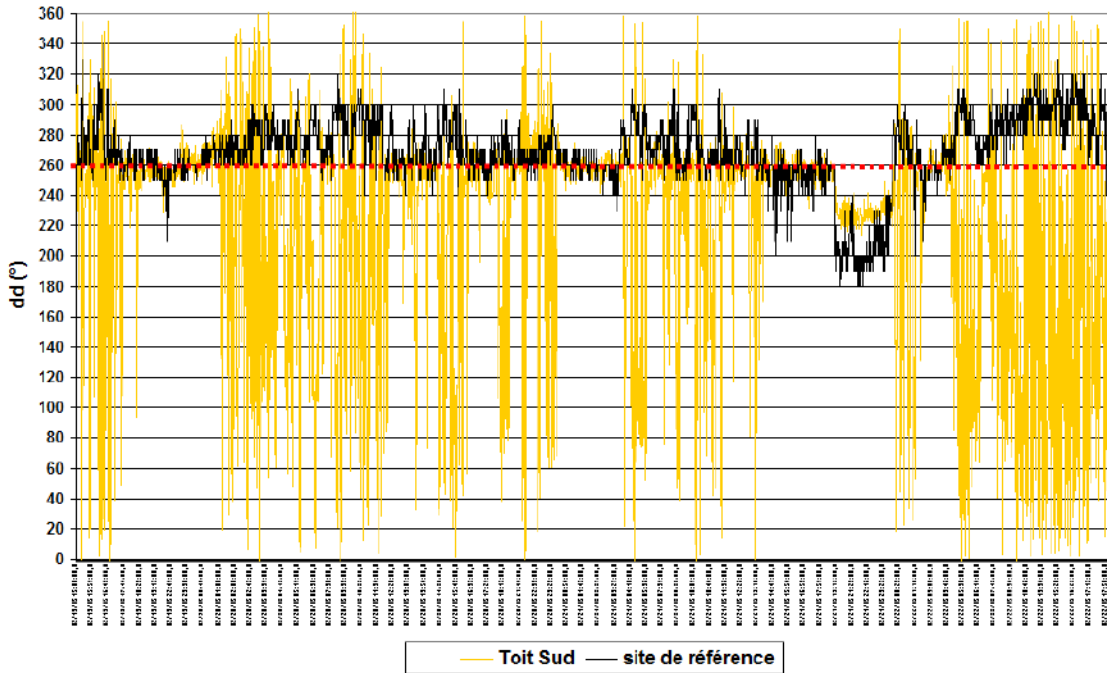
VII- 1.2.2. Conditions de vent incident de direction Ouest.

Lorsque le vent est de direction Ouest, des changements dans la direction du vent, aussi minimes soient-ils, peuvent produire un impact important sur les modèles de l'écoulement au-dessus de la canopée du Ksar.

La superposition des courbes de vitesse et direction du vent (Fig. VII- 7a et VII- 7b) indique que selon la direction du vent de référence, il s'établit une zone de "re-circulation" ou d'écoulement stable sur les versants Sud et Est du Ksar.



(a) : Variation de la vitesse d'air sur les versants Est et Sud selon la direction des vents dominants Ouest.



(b) : Variation de la direction de l'écoulement sur le versant Sud selon la direction des vents dominants Ouest.

Fig. VII- 7. Variation du comportement aéraluque des versants Sud et Est selon la direction du vent de référence : **(a)** : lorsque le vent de référence est de direction Ouest sud-ouest, le versant Est est à l'abri du vent tandis que le versant Sud est exposé au vent. **(b)** : En revanche, pour un vent Ouest nord-ouest, le versant Sud devient sous le vent en raison de la présence de l'édifice de la Mosquée.

- Lorsque les vents de référence sont orientés Ouest Sud-ouest, c'est sur les versants Nord et Ouest que sont observées les vitesses de vent les plus élevées. Sur le versant Sud en revanche, même si l'écoulement est stable, la forte rugosité du bâtiment de la Mosquée réduit fortement son intensité. Des écarts moyens de 1.00 m/s sont relevés entre les versants Nord et Sud, tous deux zones de contournement de l'écoulement latéral.

Une zone de re-circulation, marquée par des vitesses d'air très faibles et une forte turbulence, se crée en revanche sur le versant Est.

- Lorsque les vents de référence sont orientés Ouest Nord-ouest (270-320°), il se crée au niveau du versant Sud une zone de re-circulation, induite probablement par l'effet aérodynamique du bâtiment de la mosquée. Ce phénomène se produit pour une certaine direction de vent Ouest proche de 250-270°. Sur le versant Est en revanche, il s'établit un écoulement stable.

En fonction de l'angle d'incidence du vent libre avec le bâtiment de la mosquée, il s'établit une zone de "re-circulation" du vent ou d'écoulement stable sur les versants Sud et Est. Ces résultats confirment les études de terrain et les expériences en laboratoire sur l'effet de l'hétérogénéité des hauteurs sur le modèle des écoulements d'air en milieu urbain (Neophytou et Britter 2005, Hanna et al. 2006, Camelli et al. 2006) : les mouvements d'air peuvent être induits en fonction des bâtiments situés en amont, les effets aérodynamiques des bâtiments proéminents étant les plus influents. Il peut être conclu dans ce cas que la surface urbaine située "en amont" détermine dans une certaine mesure la structure de l'écoulement, et donc le niveau de ventilation dans une rue canyon donnée.

Conclusion sur les écoulements d'air au-dessus des toits.

L'écoulement général du ksar semble découler de :

- la topographie du site d'une part : elle modèle l'écoulement général en induisant :
 - un versant face au vent, caractérisé par des vitesses d'air élevées et des directions stables, dans le même sens que le vent incident,
 - un versant à l'abri du vent, caractérisé par des vitesses d'air faibles et des directions fluctuantes,
- la morphologie urbaine du ksar d'autre part : selon la direction du vent incident, le bâtiment de la mosquée crée une zone de re-circulation du vent au niveau des versants Sud et Est ou une circulation d'écoulement stable avec néanmoins une réduction des vitesses d'air due à la forte rugosité de l'obstacle urbain.

VII- 2. Conditions des écoulements d'air à l'échelle microclimatique.

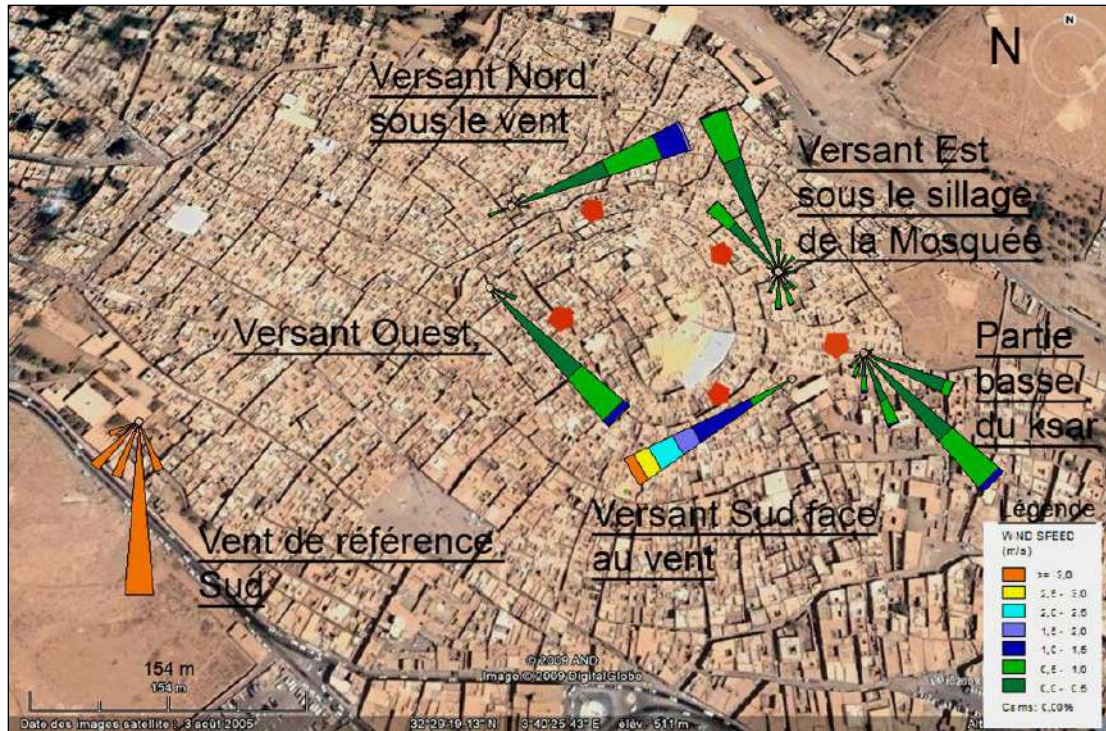
D'une manière générale, les conditions climatiques au-dessus des toits préfigurent du comportement microclimatique à l'échelle des espaces extérieurs. Ainsi, les écoulements d'air dans les rues sont étroitement liés aux conditions aérauliques au dessus des toits. Ils sont fonction de la topographie du site d'une part et la morphologie urbaine d'autre part.

VII- 2.1. Effet de la topographie du site.

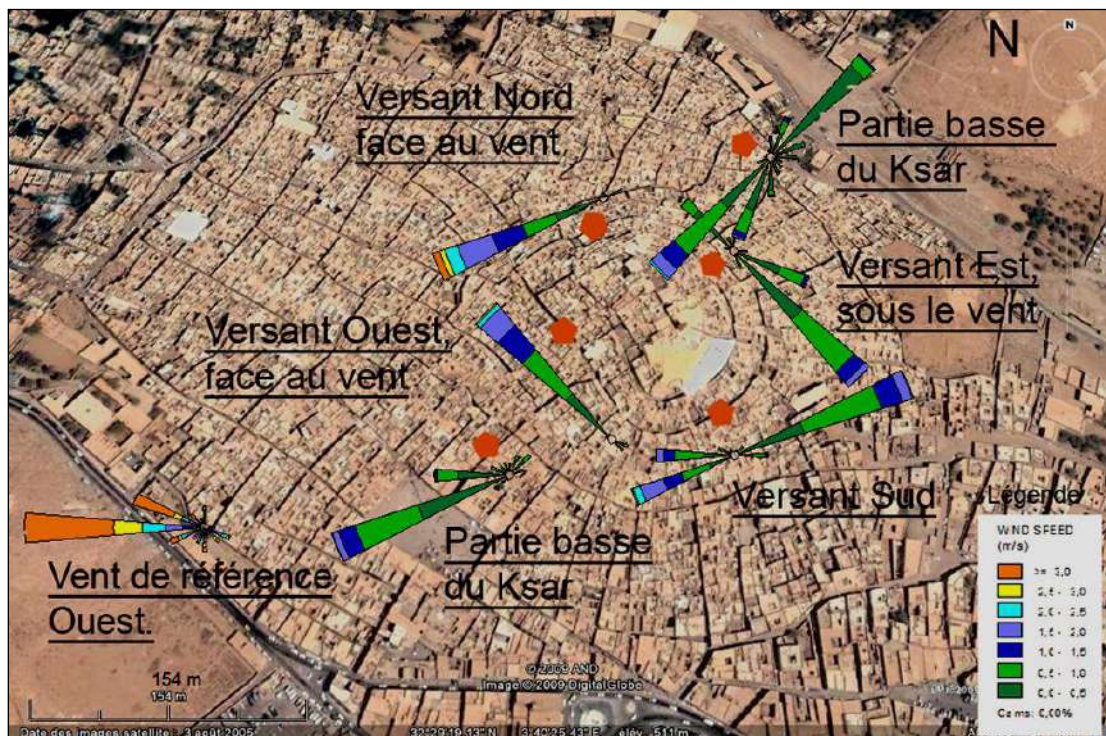
La distribution des vents dans les rues du Ksar relève d'abord du climat au-dessus de la canopée urbaine en accord avec les phénomènes d'exposition au vent des versants. En effet, en dépit de la forte compacité du tissu vernaculaire du Ksar, les vents pénètrent dans les rues de la vieille ville et reproduisent les mêmes caractéristiques d'écoulement que ceux observées au-dessus des toits, en l'occurrence :

- des rues situées sur les versants face au vent caractérisées par des vitesses de vent élevées et des directions stables, orientés dans la direction de la rue, dans le même sens que le vent incident au-dessus des toits,
- les rues des versants sous le vent enregistrant en revanche des vitesses d'air faibles et caractérisées par de fortes fluctuations liées à la turbulence du flux dans le sillage des obstacles urbains,
- sur un même versant face au vent, les rues situées dans la partie basse de la ville, sur un relief plat, moins exposées au vent que celles situées au sommet.

Les figures (VII- 8a et VII- 8b) illustrent respectivement la répartition des écoulements d'air dans les rues canyons pour des vents libres de direction Ouest et Sud.



(a). La distribution des écoulements d'air dans les rues du ksar de Ghardaïa : cas des vents dominants de direction Sud (données Septembre 05).



(b). La distribution des écoulements d'air dans les rues du ksar de Ghardaïa : cas des vents dominants de direction Ouest (données Février 05).

Fig. VII- 8. La distribution des écoulements d'air dans les rues du ksar de Ghardaïa pour différentes directions de vent incident.

VII- 2.1.1. Conditions de vents ambiants de direction dominante Sud :

Pour des conditions de vents incidents de direction Sud, il peut être clairement vu que :

- les rues situées sur le versant Sud face au vent enregistrent les vitesses d'air les plus élevées du ksar, avec des valeurs moyennes de l'ordre de 1.50 m/s et des vitesses maximales instantanées atteignant 4.00 m/s. Les vents au-dessus des toits enregistrent en revanche des vitesses moyennes de 3.00 m/s et des vitesses maximales instantanées de 10.00 m/s,
- les rues situées sur le versant Nord sous le vent se caractérisent par les vitesses d'air les plus faibles du parcours. Les vitesses d'air moyennes enregistrées sont de l'ordre de 0.40 m/s tandis que les vitesses instantanées maximales avoisinent les 1.50-1.80 m/s. Au-dessus des toits, la vitesse d'air moyenne est d'une valeur de 1.25 m/s tandis que les vitesses maximales instantanées sont de 5.50 m/s,
- les rues situées dans la partie basse du ksar, sur un relief plat, enregistrent des vitesses d'air moyennes faibles, de l'ordre de 0.30-0.50 m/s et des vitesses instantanées maximales de 1.30 m/s. La vitesse moyenne enregistrée au-dessus du toit est de 1.50 m/s.

VII- 2.1.2. Conditions de vents ambiants de direction dominante Ouest :

Lorsque les vents dominants sont en revanche de direction Ouest

- les rues situées sur les versants Nord et Ouest face au vent se caractérisent par les vitesses d'air les plus élevées du ksar, les valeurs moyennes sont comprises entre 0.80 et 1.20 m/s avec des vitesses maximales variant entre 3.50 et 5.00 m/s. Au-dessus des toits, la vitesse de vent moyenne varie entre 2.60 et 3.50 m/s tandis que les vitesses d'air maximales sont de l'ordre de 7.50-9.50 m/s.
- les rues situées sur les versants Est et Sud sous le vent présentent les vitesses d'air les plus faibles du parcours. Les vitesses d'air moyennes enregistrées sont de l'ordre de 0.45 – 0.50 m/s tandis que les vitesses maximales avoisinent les 2.00 m/s. Au-dessus des toits, la vitesse de vent moyenne est de l'ordre de 1.50 m/s, avec des valeurs instantanées maximales comprises entre 2.50 et 3.50 m/s.
- les rues situées dans la partie basse de la ville, sur un relief plat, sont moins exposées au vent que celles qui sont situées au sommet, de manière étagée. La différence entre les vitesses d'air moyennes au niveau des points de mesure situés dans les parties basse et haute du versant Ouest est de 0.50 m/s tandis que l'écart maximal atteint une valeur de 1.20 m/s.

Les conditions observées au-dessus des toits préfigurent du comportement aéraulique dans les rues canyons. Selon l'exposition au vent des versants, il existe de nombreuses zones de confinement mais également des parties fortement ventilées avec des conditions aérauliques proches de celles préexistantes au-dessus des toits. À une échelle plus fine néanmoins, l'écoulement de l'air va se modifier d'une rue "canyon" à une autre rue d'un même versant face au vent en fonction de la configuration urbaine, c'est-à-dire, la géométrie urbaine de la rue et du bâtiment (H/W , H/L), la nature des profils des rues canyons (symétrique ou asymétrique) ainsi que leur orientation par rapport aux vents dominants.

VII- 2.2. Effets de la configuration urbaine sur les écoulements d'air.

Les données simultanées, mesurées dans les rues canyons et au-dessus des toits, sont utilisées pour la détermination de corrélations empiriques liant les écoulements d'air dans les rues et ceux imposés au-dessus de la canopée urbaine. A partir de ces fonctions de corrélations générales, des paramètres physiques morphologiques particuliers sont identifiés comme étant des facteurs physiques importants intervenant dans la structure des écoulements d'air dans les rues canyons. Puisque un seul point de mesures dans chaque rue canyon ne permet pas d'inférer des informations détaillées sur les flux, des hypothèses sur la structure des écoulements d'air dans les rues canyons sont développées en accord avec les résultats d'études précédentes.

Les données utilisées sont limitées à celles enregistrées sur les versants face au vent en raison de la stabilité des écoulements caractéristiques de ces zones. En fonction de l'angle d'incidence du vent ambiant sur l'axe de la rue, trois conditions d'écoulements sont analysées :

- cas des vents parallèles où l'angle d'incidence du vent au-dessus du toit avec l'axe de la rue est $\beta = 0^\circ$ (ou 180°) $\pm 10^\circ$,
- cas des vents perpendiculaires où l'angle d'incidence du vent au-dessus du toit avec l'axe de la rue est $\beta = 90^\circ$ (ou 270°) $\pm 10^\circ$,
- cas des vents obliques où l'angle d'incidence du vent au-dessus du toit avec l'axe de la rue est :
 - $\beta = 22^\circ$ (ou 202°) $\pm 10^\circ$,
 - $\beta = 44^\circ$ (ou 224°) $\pm 10^\circ$,
 - $\beta = 66^\circ$ (ou 246°) $\pm 10^\circ$.

VII- 2.2.1. Effet de l'orientation des rues.

L'orientation des rues par rapport aux vents dominants est déterminante dans la caractérisation de l'environnement aéraulique puisqu'elle favorise le déplacement des vents ou encore freine la pénétration de l'air à l'intérieur des rues canyons (et a par conséquent un effet sur les températures de l'air).

La comparaison des vitesses d'air dans les rues et au-dessus des toits en fonction de l'angle d'incidence (β) révèle l'existence d'une corrélation empirique entre les écoulements supérieur et secondaire dans certaines rues du Ksar. Cette relation est linéaire, de type " $y = a \cdot x + b$ ", dans laquelle " y " représente la réduction de l'écoulement dans la rue, " a " représente le facteur de réduction et " x " l'écoulement au-dessus du toit. Sur le tableau (VII- 1) sont illustrées les corrélations empiriques déterminées dans les rues canyons en faisant varier l'angle d'incidence β .

Tableau VII- 1. Corrélations entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans les rues du ksar en fonction de l'angle d'incidence β .

Configuration de la rue	Conditions au-dessus du toit		Corrélation	R^2	$V_{\text{moy rue}}$ (m/s)	Nr. de données
	V_{moy} (m/s)	Angle d'incidence β				
Rue Pt.3 (versant Nord) H/W= 2.89. (Février 05).	3.15	$\beta = 0^\circ (\pm 10^\circ)$	$y = 0,5175x - 0,1177$	$R^2 = 0,94$	1.50	
	3.65	$\beta = 22^\circ (\pm 10^\circ)$	$y = 0,4827x - 0,0887$	$R^2 = 0,89$	1.66	681
	3.94	$\beta = 44^\circ (\pm 10^\circ)$	$y = 0,3954x - 0,2186$	$R^2 = 0,79$	1.34	112
Rue Pt. 1 (versant Sud), H/W= 2.73. (Septembre 05).	3.20	$\beta = 0^\circ (\pm 10^\circ)$	$y = 0,5204x + 0,1465$	$R^2 = 0,87$	1.80	369
	3.56	$\beta = 22^\circ (\pm 10^\circ)$	$y = 0,4746x + 0,1604$	$R^2 = 0,87$	1.85	449
	3.50	$\beta = 44^\circ (\pm 10^\circ)$	$y = 0,4089x + 0,1722$	$R^2 = 0,89$	1.60	576
	3.50	$\beta = 66^\circ (\pm 10^\circ)$	$y = 0,3209x + 0,0879$	$R^2 = 0,79$	1.23	72
Rue Pt. 4 (versant Ouest) (Février 05). H/W= 3.28	2.28	$\beta = 22^\circ (\pm 10^\circ)$	$y = 0,4796x - 0,0596$	$R^2 = 0,86$	1.00	38
	3.74	$\beta = 44^\circ (\pm 10^\circ)$	$y = 0,3249x + 0,2662$	$R^2 = 0,72$	1.48	86
	3.90	$\beta = 66^\circ (\pm 10^\circ)$	$y = 0,254x - 0,0815$	$R^2 = 0,60$	0.91	212
	3.15	$\beta = 90^\circ (\pm 10^\circ)$	-----	$R^2 = 0,47$	0.37	212
Rue située sur le ksar de Tafilalet (août 06). H/W=1.71. Secteur Nord-est	3.62	$\beta = 0^\circ (\pm 10^\circ)$	$\approx$	$R^2 = 0,53$	1.52	1164
	2.72	$\beta = 22^\circ (\pm 10^\circ)$	-----	$R^2 = 0,56$	1.41	295
	2.60	$\beta = 44^\circ (\pm 10^\circ)$	-----	$R^2 = 0,52$	1.15	174
	2.34	$\beta = 66^\circ (\pm 10^\circ)$	-----	$R^2 = 0,10$	0.42	62
	2.34	$\beta = 90^\circ (\pm 10^\circ)$	-----	$R^2 = 0,06$	0.34	78
Secteur Sud-est	2.70	$\beta = 22^\circ (\pm 10^\circ)$	-----	$R^2 = 0,56$	0.88	276
	1.91	$\beta = 44^\circ (\pm 10^\circ)$	-----	$R^2 = 0,06$	0.52	108
	2.51	$\beta = 66^\circ (\pm 10^\circ)$	-----	$R^2 = 0,13$	0.63	127
	3.23	$\beta = 90^\circ (\pm 10^\circ)$	-----	$R^2 = 0,29$	0.79	243
Secteur Sud-ouest	3.74	$\beta = 22^\circ (\pm 10^\circ)$	-----	$R^2 = 0,64$	1.43	328
	3.40	$\beta = 44^\circ (\pm 10^\circ)$	-----	$R^2 = 0,32$	0.78	161
	3.21	$\beta = 66^\circ (\pm 10^\circ)$	-----	$R^2 = 0,07$	0.72	172

Les résultats indiquent clairement que le facteur de réduction obtenu varie en fonction de l'angle d'incidence (β). Pour des conditions de vent ambiant similaires, la vitesse du vent est le plus sévèrement atténuée à un angle d'incidence maximale ($66-90^\circ$) et est moins réduite à des angles d'incidence les plus faibles ($0-22^\circ$). Ces résultats concordent avec ceux de Pearlmutter et al. (2007) et Assimakopoulos et al. (2006) qui soulignent que la réduction de vent la plus faible dans la rue canyon est observée pour des vents incidents parallèles.

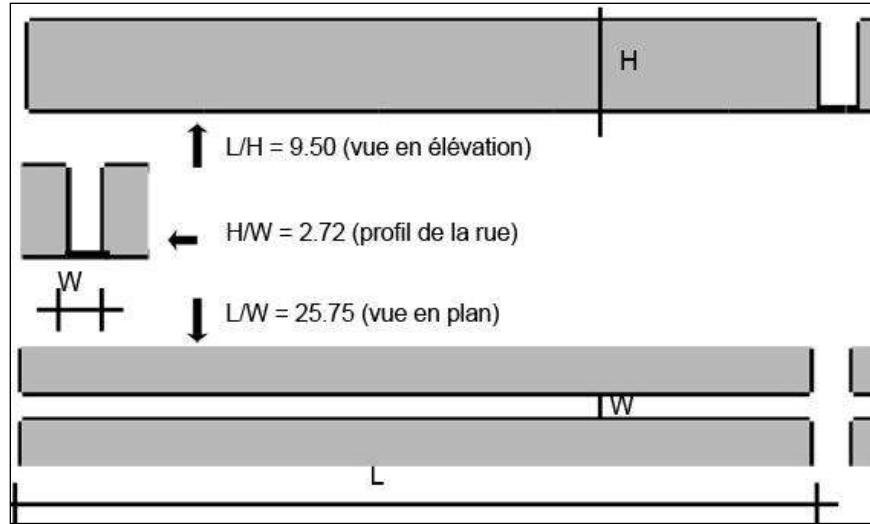
Dans le cas de notre étude, et pour des conditions de vents incidents parallèles, les réductions les plus faibles sont de l'ordre de 48 à 49% du vent libre au-dessus des toits. Elles sont observées dans les rues canyons de prospect respectif égal à 2.72 et 2.89 (Pt. 1 et 3). Dans ces deux canyons pourtant très étroits, le facteur de réduction diminue progressivement, passant d'environ 0.52 pour des directions de vent parallèles à environ 0.32 pour des vents obliques de $66^\circ (\pm 10^\circ)$. Les vitesses d'air moyennes mesurées varient entre 1.80 et 1.23 m/s selon l'angle d'incidence du vent ambiant. Ces résultats témoignent de l'importance de l'orientation des rues par rapport aux vents dominants.

À elle seule, la direction des vents incidents par rapport à l'axe de la rue ne suffit cependant pas à expliquer l'intensité des écoulements observée dans les rues compactes de la vieille ville. D'une rue canyon à l'autre en effet, les écoulements d'air varient en fonction des particularités morphologiques propres à chaque rue. De ces particularités urbaines influentes, la géométrie des bâtiments, ou la longueur (L) de la rue canyon, peut modifier la nature des écoulements en termes d'intensité et de structure.

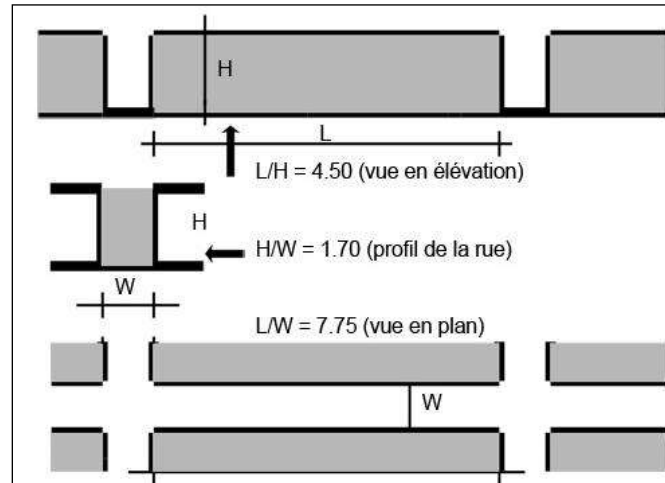
VII- 2.2.2. Effet de la longueur de la rue canyon (L).

La longueur de la rue canyon exprimée par les rapports L/H et L/W (L : longueur des bâtiments ou distance séparant deux intersections principales; H : hauteur de bâtiments bordant la rue canyon, W : largeur de la rue) affecte le modèle d'écoulement dans la rue canyon (Yamartino et Wiegand 1986, Santamouris et al. 1999, Louka et al. 2000, Kastner-Klein et al. 2004, Assimakopoulos et al. 2006, Georgakis et Santamouris 2006). Afin d'évaluer cet effet, deux rues symétriques de longueur L différente sont étudiées. La première rue canyon est longue, de rapport L/H égal à 9.50, tandis que la seconde est courte, de rapport L/H égal à 4.50 (Fig. VII-9).

- la rue canyon longue sélectionnée est située sur le versant Sud du ksar de Ghardaïa (Pt.1). Son choix se justifie par ses caractéristiques morphologiques relativement régulières (hauteur de bâtiments relativement homogène, profil symétrique). Elle est caractérisée par une hauteur (H) de 6.04 m, une largeur (W) de 2.22 m et une longueur (L) égale à 57.00 m. Le prospect de rue H/W est égal à 2.73, le rapport H/L est de 9.50 et le rapport L/W est égal à 25.75,
- la rue canyon courte est située dans le ksar de Tafilalt, sur un plateau. C'est une rue symétrique, caractérisée par une hauteur (H) de 7.80 m, une largeur (W) de 4.50 m et une longueur (L) égale à 35.34 m. Le prospect de rue H/W est égal à 1.71, le rapport H/L est de 4.53 et le rapport L/W est de 7.75.



(a). Caractéristiques géométriques de la rue canyon longue (Pt.1, versant Sud).



(b). Caractéristiques géométriques de la rue canyon courte (Pt. Taf.).

Fig. VII- 9. Caractéristiques géométriques des rues canyons de géométrie longue et courte.**Tableau VII- 2.** Caractéristiques géométriques des points de mesure situés dans le ksar de Tafilalt et le ksar de Ghardaïa (Pt.1).

Point de mesure	profil	H	W	H/W	L	L/H	L/W
Pt.Taf (Rue Tafilalt)	symétrique	7.80	4.56	1.71	35.34	4.53	7.75
Pt.1 (Rue versant sud)	symétrique	6.04	2.22	2.72	57.04	9.44	25.75.

VII- 2.2.2.1. Les écoulements d'air dans la rue canyon longue.

Caractéristiques générales.

La figure (VII- 10) donne la variation des écoulements d'air mesurés au-dessus du toit pour des conditions de vents incidents de direction Sud (data de la campagne de mesure de septembre 05).

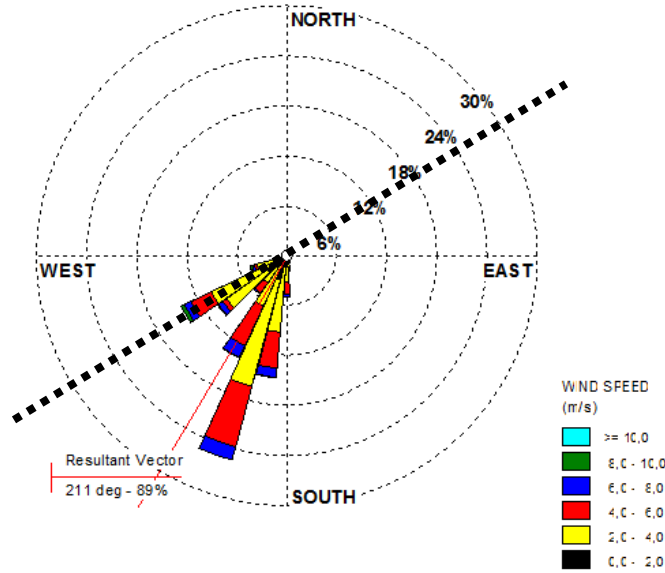


Fig. VII- 10. Rose des vents au-dessus du toit de la rue canyon longue (Pt.1) établie sur la base de 1598 données (Campagne Septembre 05).

Au-dessus du toit, le vent ambiant se caractérise par des vitesses d'air maximales instantanées de 10.50 m/s et une valeur moyenne de 3.35 m/s. Ces vents sont de direction dominante Sud-ouest (60.30% des vents totaux), faisant un angle oblique avec l'axe de la rue.

Dans la rue canyon en revanche, l'écoulement horizontal fluctue entre 0.00 et 6.30 m/s et présente une vitesse moyenne élevée, d'une valeur de 1.68 m/s. La comparaison de cette vitesse d'air mesurée dans la rue avec celle imposée au-dessus du toit montre que le couplage entre les deux écoulements supérieur et secondaire est bien établi. Tel qu'il est indiqué dans la figure (VII- 11), l'équation statistique obtenue est sous forme linéaire et s'écrit comme suit :

$$y = 0,4555x + 0,1486, R^2 = 0,82 \quad (\text{VII- 1})$$

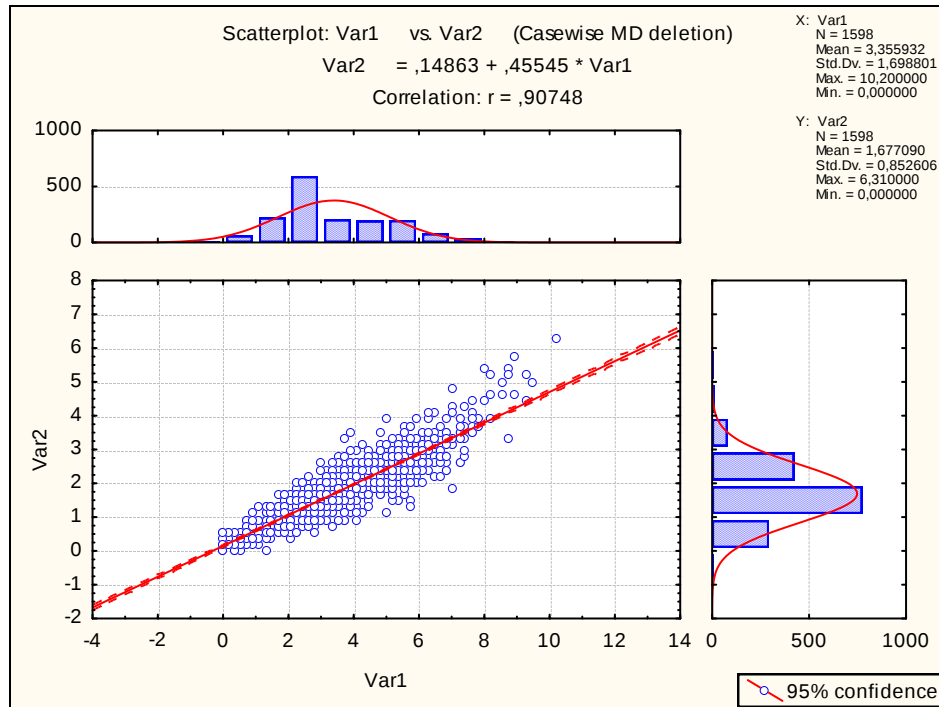


Fig. VII- 11. Corrélation entre les vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit pour tout angle d'incidence confondue (campagne septembre 2005).

Le coefficient de détermination R^2 obtenu, supérieur à 0.8, confirme la validité de l'équation statistique déterminée et indique clairement que l'écoulement horizontal dans la rue canyon est entièrement gouverné par l'écoulement imposé au-dessus du toit. Il peut être noté par ailleurs que l'écoulement moyen mesuré dans la rue représente 0.45 du vent libre au-dessus du toit, ce qui n'est pas négligeable vu la forte compacité de la rue canyon.

L'aspect le plus remarquable demeure néanmoins la direction constante de l'écoulement qui est parallèle à l'axe de la rue canyon quelque soit l'angle d'incidence du vent ambiant (Fig. VII- 12).

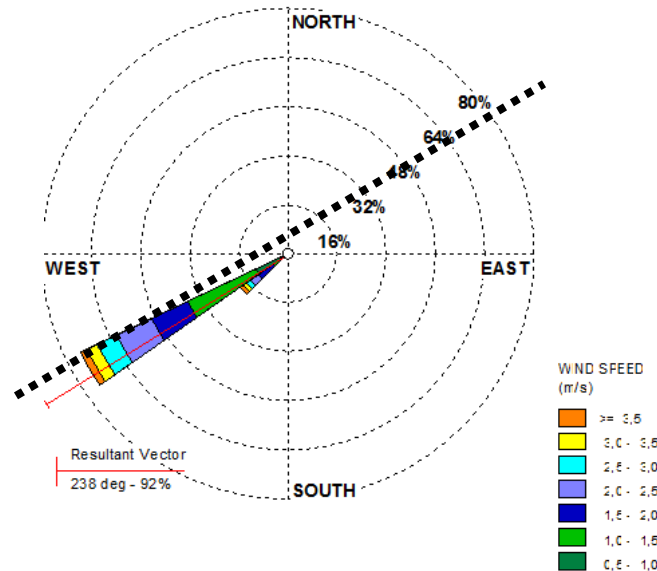


Fig. VII- 12. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon longue (Pt.1) établie sur la base de 1598 données (Campagne Septembre 05).

La combinaison des vitesses d'air élevées et la direction parallèle de l'écoulement le long de la rue témoigne de la présence d'un effet de canalisation induit par la configuration particulière de la rue canyon. Pour mieux apprécier ce phénomène, une analyse spécifique de la vitesse du vent et sa direction dans la rue canyon pour différents angles d'incidence est présentée ci-dessous.

i) Conditions de vents parallèles à l'axe de la rue.

L'incidence parallèle à l'axe de la rue correspond à des vents libres au-dessus du toit de directions Nord-est (45-65°) et Sud-ouest (225-245°) (Fig. VII- 13). Les conditions de vent parallèles rencontrées au cours de la campagne de mesure de septembre 05 correspondent à des vents soufflant du Sud-ouest.

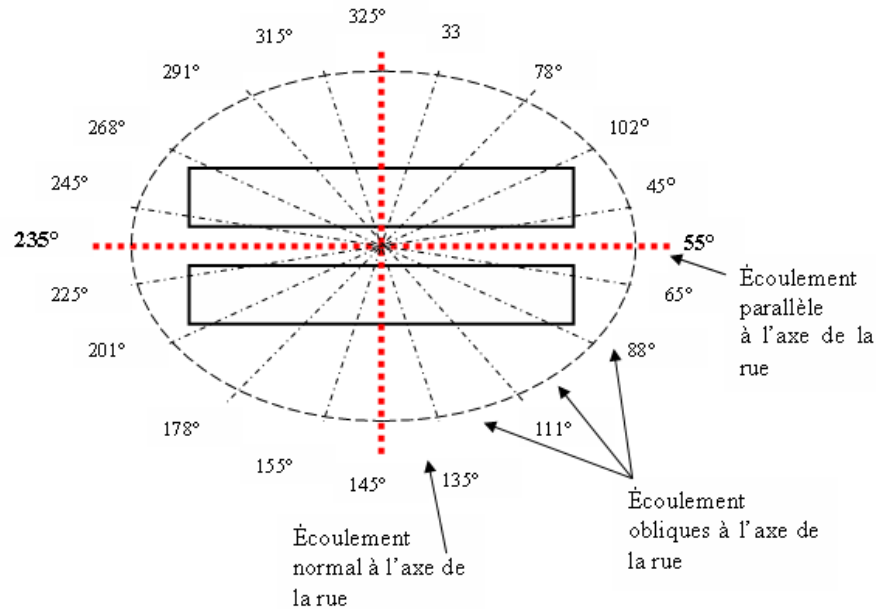


Fig. VII- 13. Classification des angles d'incidence du vent ambiant en parallèle, perpendiculaire et oblique par rapport à l'axe de la rue canyon longue (Pt.1).

Les données au-dessus du toit sont caractérisées par une vitesse de vent maximale et moyenne respective de 9.28 et 3.17 m/s. En ce qui concerne l'intensité de l'écoulement horizontal dans la rue, les valeurs observées sont très élevées, avec des vitesses maximales de 5.57 m/s et des écoulements moyens de 1.80 m/s.

L'analyse de la corrélation entre les vitesses de vent au-dessus du toit et dans la rue canyon révèle par ailleurs que l'écoulement mesuré dans la rue est lié à l'écoulement imposé au-dessus du toit par la relation linéaire suivante :

$$y = 0,5204x + 0,1465, \text{ avec } R^2 = 0,8681. \quad (\text{VII- 2})$$

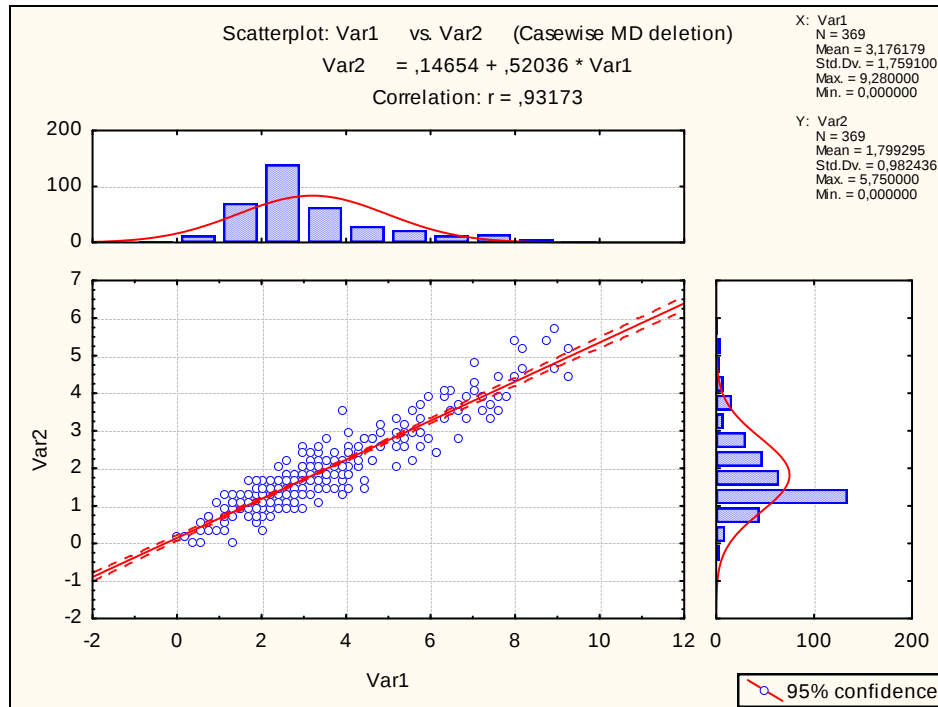


Fig. VII- 14. Corrélation entre les vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit dans le cas d'une incidence parallèle à l'axe de la rue (Pt.1) (campagne septembre 2005).

La valeur du coefficient de détermination R^2 , élevée et proche de 0.9, permet de valider l'équation statistique obtenue et suggère que l'écoulement horizontal mesuré dans la rue canyon est entièrement gouverné par l'écoulement imposé au-dessus du toit. La valeur élevée du facteur de réduction déterminé indique en outre que dans la rue canyon, l'intensité de l'écoulement horizontal n'est réduite qu'à 0.52 de l'écoulement imposé au-dessus.

Par ailleurs, tel qu'il est illustré sur la rose des vents (Fig. VII- 15), l'écoulement horizontal est caractérisé par une direction parallèle à l'axe du canyon, dans la même direction que le vent incident. Cette direction de l'écoulement est en accord avec les études de terrain précédentes (Nunez et Oke 1977, Nakamura et Oke 1988, Santamouris et al. 1999, Dobre et al. 2005) qui notent qu'en cas d'incidence parallèle à l'axe de la rue, la direction de l'écoulement dans le canyon est presque toujours parallèle à l'axe de la rue.

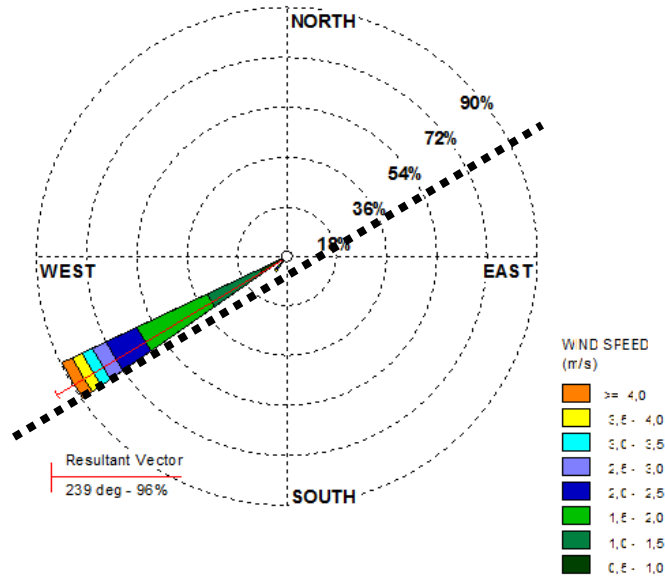


Fig. VII- 15. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon longue (Pt.1) établie sur la base de 369 données : cas d'une incidence parallèle à l'axe de la rue (Campagne Septembre 05).

L'écoulement horizontal est ainsi étiré, accéléré entre les bâtiments et ne présente aucune structure tourbillonnaire (Assimakopoulos et al., 2006). Cet effet de canalisation induit le long du canyon peut expliquer l'importance des vitesses de vent mesurées dans la rue de configuration urbaine pourtant très compacte. Elle révèle par ailleurs que la ventilation de la rue ne s'effectue dans ce cas que par déplacement advectif.

ii) Conditions de vents obliques à l'axe de la rue.

Les vents incidents obliques sont dominants et représentent un pourcentage de 60.30% des vents totaux. Ils sont caractérisés par une vitesse moyenne de 3.50 m/s et des valeurs maximales instantanées de 8.00-8.75 m/s.

➤ Cas d'un angle d'incidence oblique de 22° à l'axe de la rue (201-225°).

Dans la rue canyon, l'écoulement horizontal est important, avec une vitesse moyenne de 1.85 m/s et une valeur maximale de 4.00 m/s. Cet écoulement est lié à l'écoulement imposé au-dessus du toit par la relation linéaire suivante :

$$y = 0,4746x + 0,1604, R^2 = 0,8732 \quad (\text{VII- 3})$$

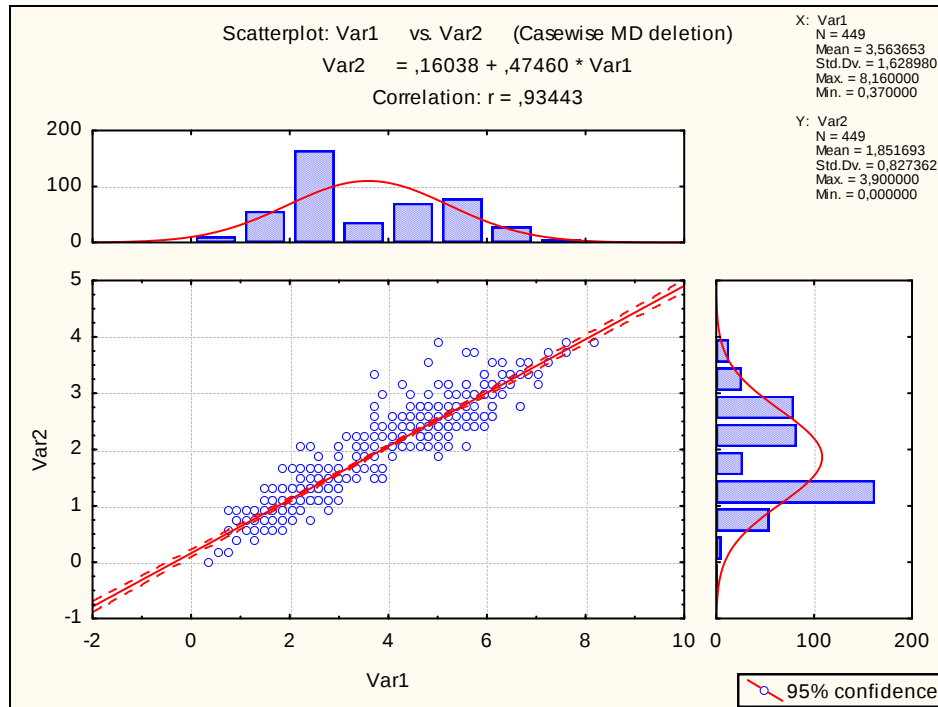


Fig. VII- 16. Corrélation entre les vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit dans le cas d'une incidence oblique de 22° à l'axe de la rue (campagne septembre 2005).

Le coefficient de détermination R^2 , d'une valeur proche de 0.9, confirme la validité de l'équation statistique déterminée et suggère que l'écoulement dans la rue est complètement gouverné par l'écoulement au-dessus du toit. Quant au coefficient de réduction obtenu, il indique que l'intensité de l'écoulement mesuré dans la rue représente 0.47 de la vitesse du vent ambiant au-dessus du toit. La réduction du vent s'effectue ainsi de manière progressive, passant de 0.52 pour une incidence parallèle à 0.47 pour un angle oblique de 22° ($\pm 10^\circ$).

En termes de direction de l'écoulement, la rose des vents (Fig. VII- 17) indique que dans 97.10 % des cas, l'écoulement horizontal est orienté dans le même sens que le vent incident, parallèlement à l'axe de la rue (225-245°). L'écoulement est de ce fait canalisé et ne présente aucune structure tourbillonnaire verticale.

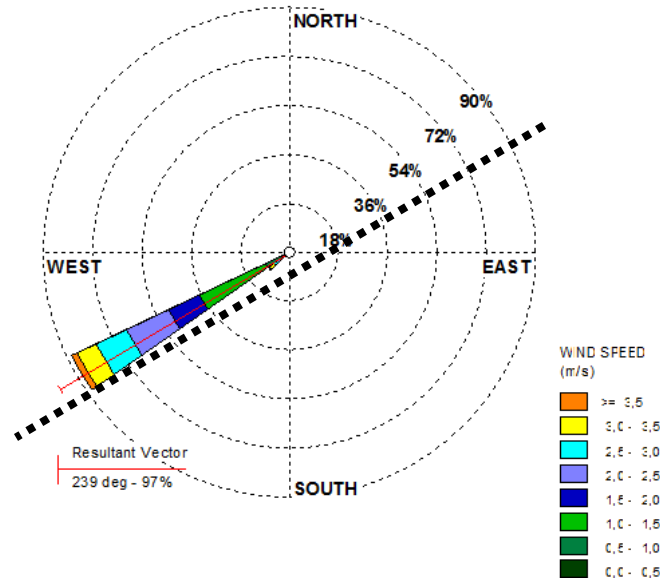


Fig. VII- 17. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon longue (Pt.1) établie sur la base de 449 données : cas d'une incidence oblique de $22 (\pm 10^\circ)$ à l'axe de la rue (Campagne Septembre 05).

Les mêmes observations en termes de survitesse et de canalisation de l'écoulement le long de la rue longue sont observées pour des angles d'incidence plus grands (44 et $66^\circ \pm 10^\circ$).

➤ Cas d'un angle d'incidence oblique de 44° à l'axe de la rue ($178-201^\circ$).

L'intensité moyenne de l'écoulement horizontal mesurée dans la rue canyon est de 1.60 m/s tandis que les vitesses d'air maximales instantanées atteignent des valeurs de 3.50 m/s. Tel qu'il est indiqué par l'équation de corrélation déterminée entre les vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit (VII- 4), le vent moyen mesuré dans le canyon n'est réduit qu'à 0.40 du vent libre au-dessus du toit.

$$y = 0,4089x + 0,1722, R^2 = 0,8904 \quad (\text{VII- 4})$$

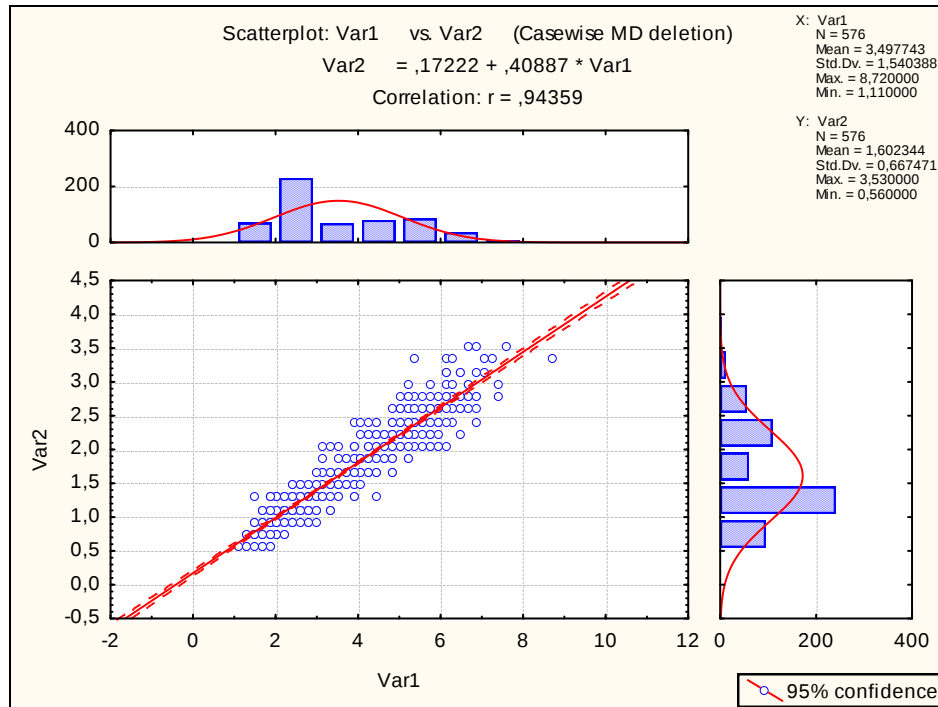


Fig. VII- 18. Corrélation entre les vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit dans le cas d'une incidence oblique de 44° à l'axe de la rue (campagne septembre 2005).

L'importance des vitesses d'air observées dans la rue canyon pour une telle configuration de rue compacte et la direction toujours parallèle de l'écoulement confirment l'hypothèse selon laquelle un phénomène de canalisation se produit le long du canyon urbain. En effet, la rose des vents (Fig. VII- 19) révèle que même dans le cas d'une incidence oblique de 44° ($\pm 10^\circ$), l'écoulement mesuré dans la rue est, dans 96% des cas, orienté parallèlement à l'axe du canyon, dans le même sens que le vent incident.

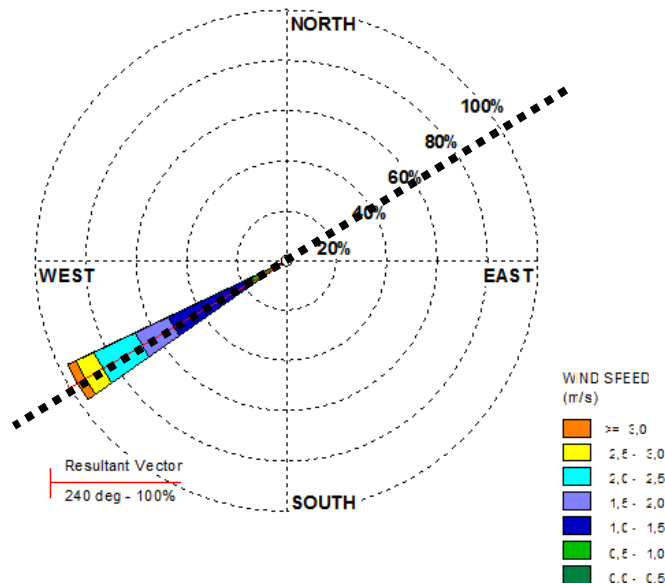


Fig. VII- 19. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon longue (Pt.1) établie sur la base de 449 données : cas d'une incidence oblique de 44° à l'axe de la rue (Campagne Septembre 05).

Sachant que le vent ambiant au-dessus du toit est oblique à l'axe de la rue, une telle direction de l'écoulement n'est pas envisagée. En fait, il est supposé se développer le long du canyon étroit un modèle d'écoulement de structure tourbillonnaire, entraîné par l'écoulement au-dessus du toit et caractérisé par une direction oblique, directement opposé au vent incident (Nakamura et Oke 1998). Cet écoulement est considéré comme la combinaison d'une re-circulation de vortex au niveau du toit et une canalisation le long du canyon urbain (Johnson et Hunter 1999). La direction de l'écoulement horizontal dans la rue serait de ce fait expliquée comme une superposition linéaire des composantes parallèle et perpendiculaire du vent au-dessus du toit. La première composante entraînerait le vortex du canyon et la deuxième déterminerait l'étirement du vortex (Yamartino et Wiegand 1986, Dobre et al. 2005). Or, dans le cas présent, un changement complet dans la structure de l'écoulement est observé. La composante horizontale le long du canyon semble dominer la circulation du vortex et imposer la direction parallèle à l'écoulement horizontal le long de la rue canyon. Un phénomène de canalisation du vent s'établit bien ainsi dans la rue canyon compacte et longue de rapport L/W égal à 25.75. Ces observations concordent avec les expériences en laboratoire par Yamartino et Wiegand (1986) qui indiquent que lorsque $L/W = 20$, la composante le long du canyon commence à dominer le vortex. La composante horizontale transversale disparaît dans ce cas et il peut être supposé dans ces conditions que les échanges d'air verticaux avec la couche supérieure cessent. La géométrie des bâtiments, ou la distance "L" séparant deux intersections principales, peut ainsi modifier la structure de l'écoulement dans la rue canyon.

➤ Cas d'un angle d'incidence oblique de 66° à l'axe de la rue (155-178°).

Dans la rue canyon, l'écoulement horizontal présente une vitesse moyenne de 1.23 m/s et des valeurs maximales instantanées de l'ordre de 2.60 m/s. L'étude de la corrélation entre les vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit indique que cet écoulement mesuré dans la rue est lié à l'écoulement imposé au-dessus du toit par la relation linéaire suivante :

$$y = 0,3209x + 0,0879, R^2 = 0,7952 \quad (\text{VII- 5})$$

L'équation statistique déterminée, validée par la valeur du coefficient de détermination proche de 0.8, révèle que l'intensité de l'écoulement dans la rue représente 0.32 du vent libre au-dessus du toit. La réduction du vent passe ainsi de 0.52 pour une incidence parallèle à 0.32 pour un vent oblique proche de la perpendiculaire.

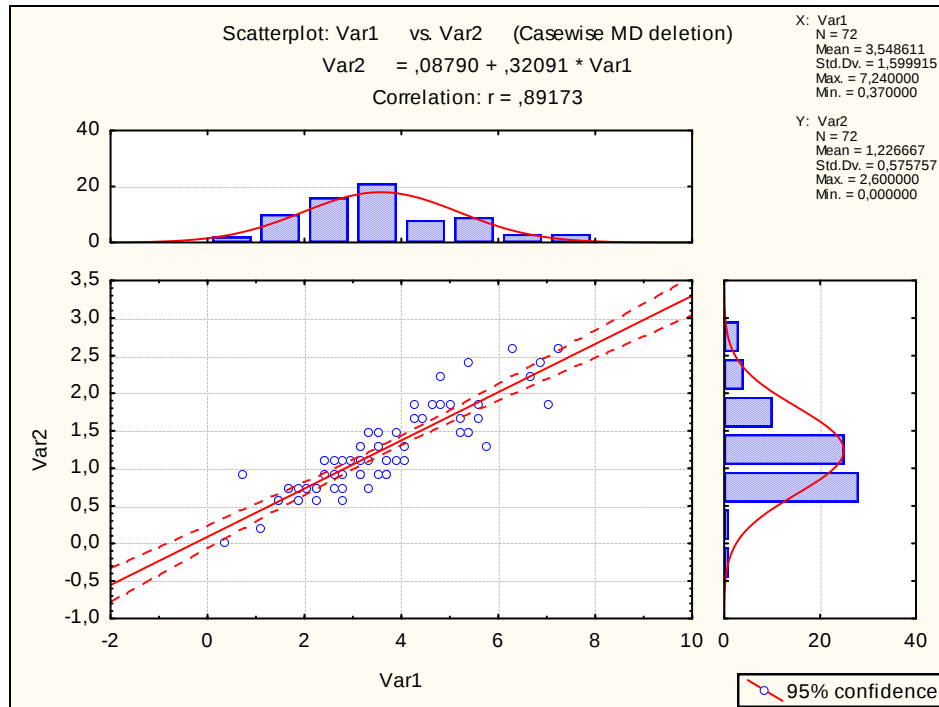


Fig. VII- 20. Corrélation entre les vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit dans le cas d'une incidence oblique de 66° à l'axe de la rue (campagne septembre 2005).

En ce qui concerne la direction de l'écoulement, elle est similaire à celle mesurée précédemment pour des directions de vents parallèle et obliques de 22 et 44° ($\pm 10^\circ$). Dans 93.00 % des cas en effet, l'écoulement est canalisé le long de la rue canyon. L'effet d'élongation et de canalisation ainsi révélé le long du canyon urbain pour un tel angle d'incidence proche de la perpendiculaire peut induire une accélération de l'écoulement et expliquer l'importance des vitesses d'air observées dans la rue canyon compacte et longue.

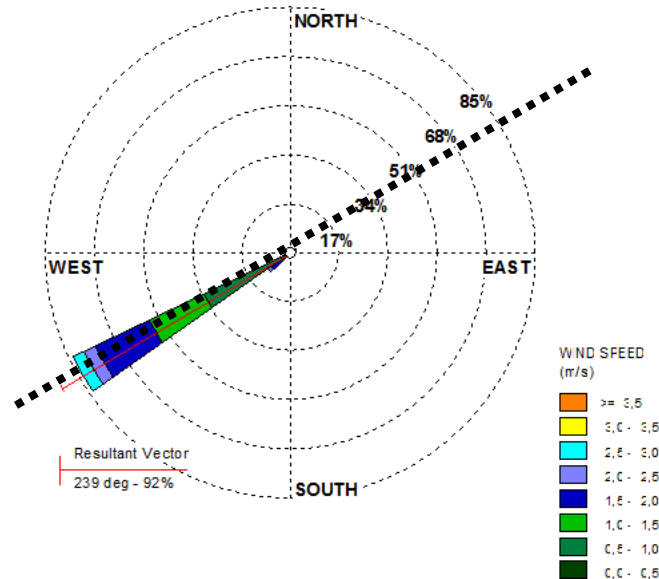


Fig. VII- 21. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon longue (Pt.1) établie sur la base de 72 données : cas d'une incidence oblique de 66° à l'axe de la rue (Campagne Septembre 05).

Des données relatives à un angle d'incidence perpendiculaire ne sont malheureusement pas disponibles. Il aurait été intéressant de voir si l'effet de canalisation induit par la longueur de la rue canyon se produit également pour une direction de l'écoulement perpendiculaire à l'axe de la rue.

Conclusion :

Pour des conditions de vents ambiants stables d'une vitesse moyenne de 3.20-3.50 m/s, la comparaison des vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit indique que les écoulements supérieur et secondaire suivent une corrélation linéaire, fonction de l'angle d'incidence β (Tableau VII- 3).

Tableau VII- 3. Récapitulatif des corrélations entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue canyon longue (Pt.1), cas de vents forts à moyens, de direction Sud. (Septembre 05).

Conditions au-dessus du toit		Direction de l'écoulement horizontal dans la rue canyon	Corrélation empirique	Coefficient de détermination	Nr. de données
V_{moy}	Angle d'incidence				
3.20 m/s	$\beta = 0^\circ \pm 10^\circ$	Parallèle à l'axe de la rue	$y = 0,5204x + 0,1465$	$R^2 = 0,8681$	369
3.56 m/s.	$\beta = 22^\circ \pm 10^\circ$	Parallèle à l'axe de la rue	$y = 0,4746x + 0,1604$	$R^2 = 0,8732$	449
3.50 m/s	$\beta = 44^\circ \pm 10^\circ$	Parallèle à l'axe de la rue	$y = 0,4089x + 0,1722$	$R^2 = 0,8904$	576
3.50 m/s	$\beta = 66^\circ \pm 10^\circ$	Parallèle à l'axe de la rue	$y = 0,3209x + 0,0879$	$R^2 = 0,7952$	72

Pour tous les angles d'incidence considérés, le coefficient de détermination R^2 est très proche de 0.9, ce qui suggère que le couplage entre les deux écoulements supérieur et secondaire est établi dans la rue canyon longue et compacte de prospect $H/W=2.73$ et de rapport $L/W=25.75$. L'écoulement dans la rue canyon longue est de ce fait entièrement gouverné par l'écoulement imposé au-dessus du toit.

La combinaison de la vitesse d'air et la direction de l'écoulement dans la rue canyon révèle en outre un important phénomène de canalisation qui se traduit par des survitesses le long de la rue et une direction de l'écoulement horizontal toujours parallèle à l'axe du canyon, et ce, indépendamment de l'angle d'incidence du vent ambiant. Dans la rue canyon compacte et longue de rapport L/W égal à 25.75, l'écoulement horizontal est étiré, accéléré entre les bâtiments et ne présente aucune structure tourbillonnaire. Ces résultats concordent avec les expériences en laboratoire par Yamartino et Wiegand (1986) qui indiquent que lorsque $L/W = 20$, la composante le long du canyon domine le vortex et la composante horizontale transversale disparaît dans ce cas.

Dans la rue canyon profonde et longue, la structure de l'écoulement est strictement bidimensionnelle et la ventilation de la rue ne s'effectue que par déplacement advectif. Un modèle d'écoulement fondamentalement différent, probablement de structure tridimensionnelle, est en revanche observé dans la rue canyon plus courte, de rapports L/W égal à 7.75 et H/L de 4.53.

VII- 2.2.2.2. Les écoulements d'air dans la rue canyon courte

Les caractéristiques des écoulements d'air dans la rue canyon courte sont étudiées à partir des données de la campagne d'été en août 2006. Rappelons que la rue sélectionnée est située sur un plateau, et de ce fait, dénuée de tout effet topographique (effet de colline).

Caractéristiques générales.

Au dessus du toit, la vitesse du vent ambiant varie entre 0.50 et 7.50 m/s, avec une vitesse moyenne de 3.15 m/s. Ce vent est de direction dominante Est, représentant environ 50% des vents totaux mesurés (Fig. VII- 22). Ces conditions de vitesses de vent sont similaires à celles mesurées au-dessus du toit du canyon long précédemment analysé et permettent de ce fait l'établissement d'une étude comparative.

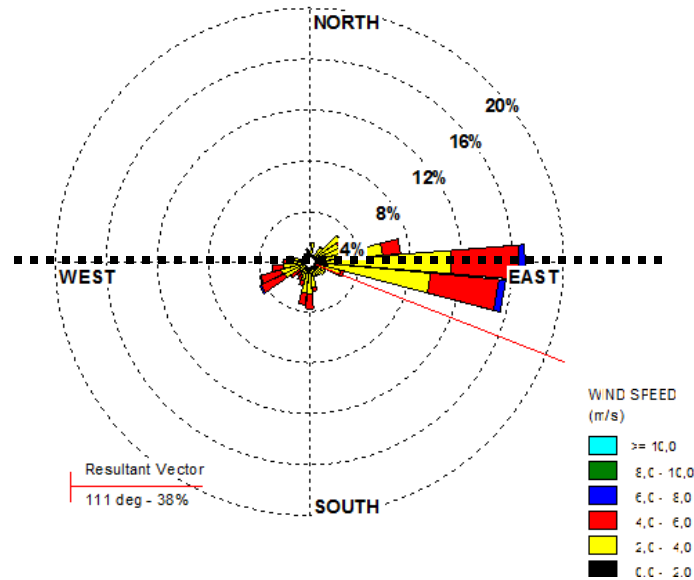


Fig. VII- 22. Rose des vents au-dessus du toit de la rue canyon courte (Ksar de Tafilalt) établie sur la base de 3477 données (campagne Août 2006).

En ce qui concerne l'écoulement horizontal mesuré dans la rue canyon, son intensité varie entre 0.00 et 4.27 m/s avec une vitesse moyenne de 1.15 m/s. Dans 33.85 % des cas, la direction de l'écoulement est dans le même sens que le vent incident, dans une direction oblique de 22° ($\pm 10^\circ$) par rapport à l'axe de la rue canyon. En revanche, 32.80% des écoulements sont de direction opposée à celle du vent incident ($265-315^\circ$).

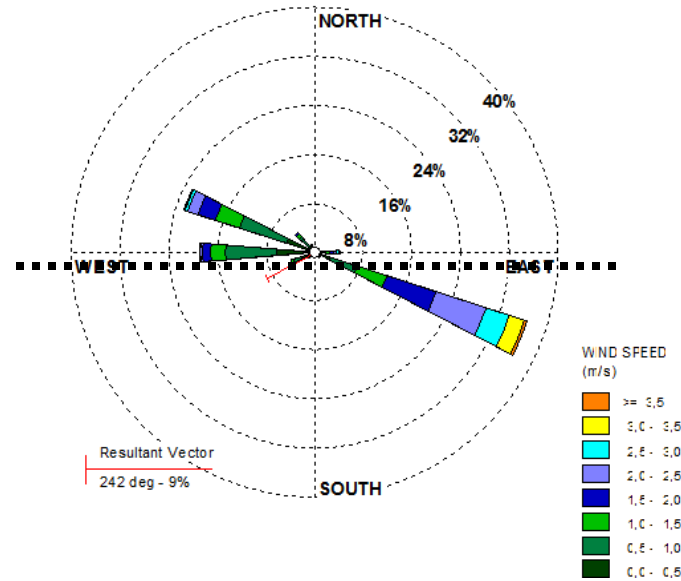


Fig. VII- 23. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon courte (Ksar de Tafilalt) établie sur la base de 3477 données (Campagne de mesure Août 06).

Ces caractéristiques de l'écoulement d'air horizontal dans la rue canyon courte diffèrent fondamentalement de celles observées dans la rue longue et compacte. Elles suggèrent la présence d'un modèle d'écoulement de structure tridimensionnelle en raison de la direction oblique de l'écoulement enregistrée dans la rue canyon ($22 (\pm 10^\circ)$).

Une analyse spécifique de la vitesse d'air et sa direction dans la rue canyon pour différents angles d'incidence est présentée ci-dessous :

i) Conditions de vents perpendiculaires à l'axe de la rue.

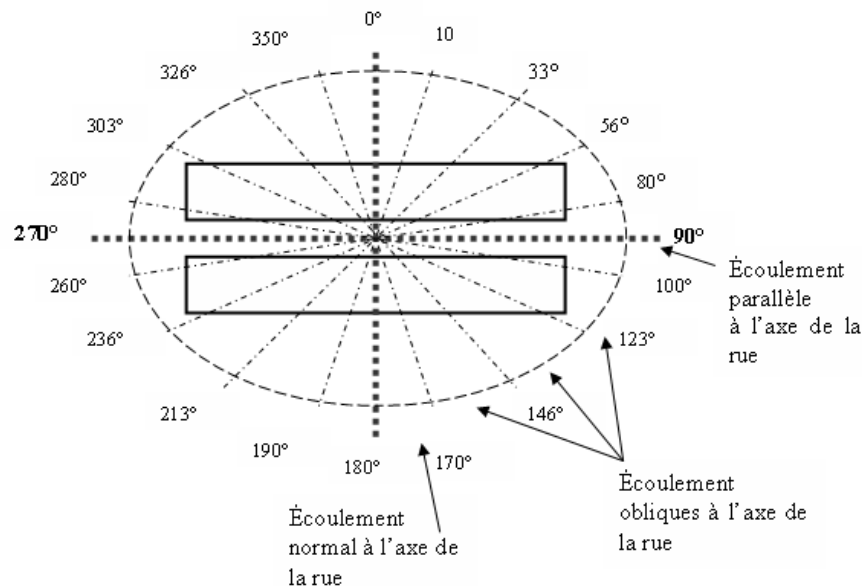


Fig. VII- 24. Classification des angles d'incidence du vent ambiant en parallèle, perpendiculaire et oblique par rapport à l'axe de la rue canyon courte située dans le ksar de Tafilalt.

L'analyse de l'écoulement d'air dans le canyon pour des angles d'incidence perpendiculaire à l'axe de la rue est réalisée pour des conditions de vent ambiant de direction Sud (170-190°, Fig. VII- 24). La vitesse de ce vent libre varie entre 0.50 et 5.75 m/s, avec une vitesse moyenne de 3.20 m/s. Dans la rue canyon en revanche, l'écoulement se caractérise par une intensité moyenne de 0.80 m/s et une vitesse maximale instantanée de 2.04 m/s.

Toutefois, contrairement au cas précédemment analysé, la comparaison directe des vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit n'indique aucune corrélation empirique entre les deux écoulements ($R^2=0.29$). Sur la figure (VII- 25), il peut être observé en effet que les deux vitesses d'air dans la rue canyon et au-dessus du toit se caractérisent par un éparpillement considérable.

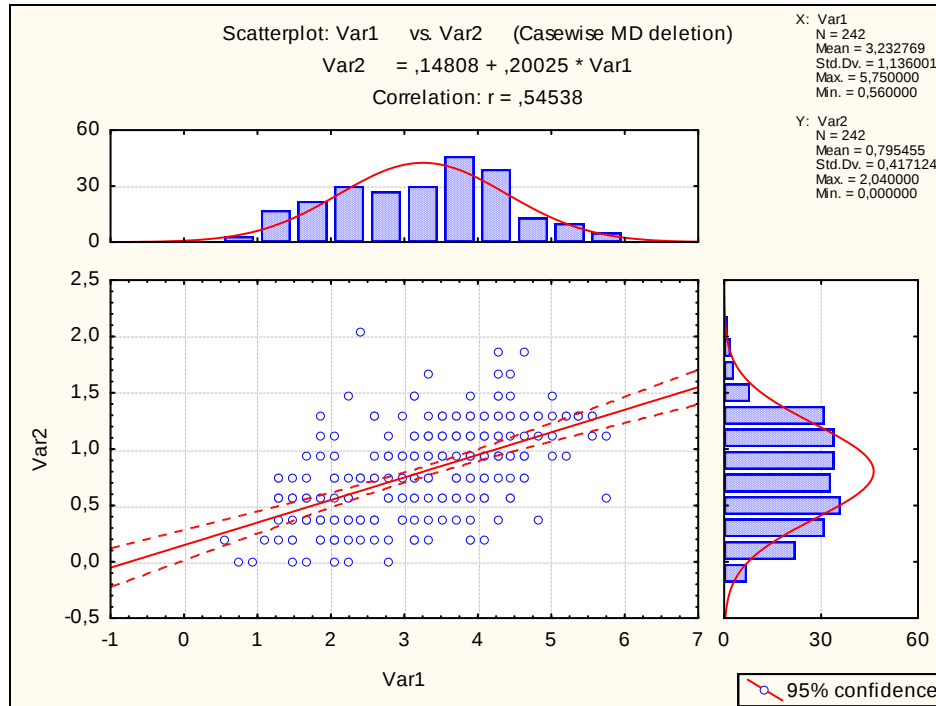


Fig. VII- 25. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue courte dans le cas d'une incidence perpendiculaire à l'axe de la rue (campagne août 2006).

Des études précédentes (DePaul et Sheih 1986, Nakamura et Oke 1988, Kim et Baik 1999) ont démontré que dans le cas d'un angle d'incidence perpendiculaire à l'axe de la rue, les vitesses de vent ambiant doivent être au-dessus des valeurs seuils respectives de 2.00 et 3.70 m/s pour que le couplage entre les écoulements supérieur et secondaire soit établi dans des canyons urbains de prospects H/W respectifs de 1.4 et 2 (DePaul et Sheih 1986, Kim et Baik 1999). Or dans le cas de la rue présente de prospect H/W=1.70, la valeur de vitesse de vent seuil pour laquelle le lien entre les deux écoulements se crée n'est pas claire.

Toutefois, la comparaison des vitesses minimale, moyenne et maximale de l'écoulement dans la rue en fonction de différentes classes de vent ambiant au-dessus du toit (Fig. VII- 26) indique que l'intensité moyenne de l'écoulement horizontal augmente en fonction de l'accroissement de la vitesse du vent ambiant. L'écoulement horizontal dans la rue n'est donc pas découplé de l'écoulement imposé au-dessus du toit, il en est au contraire dépendant.

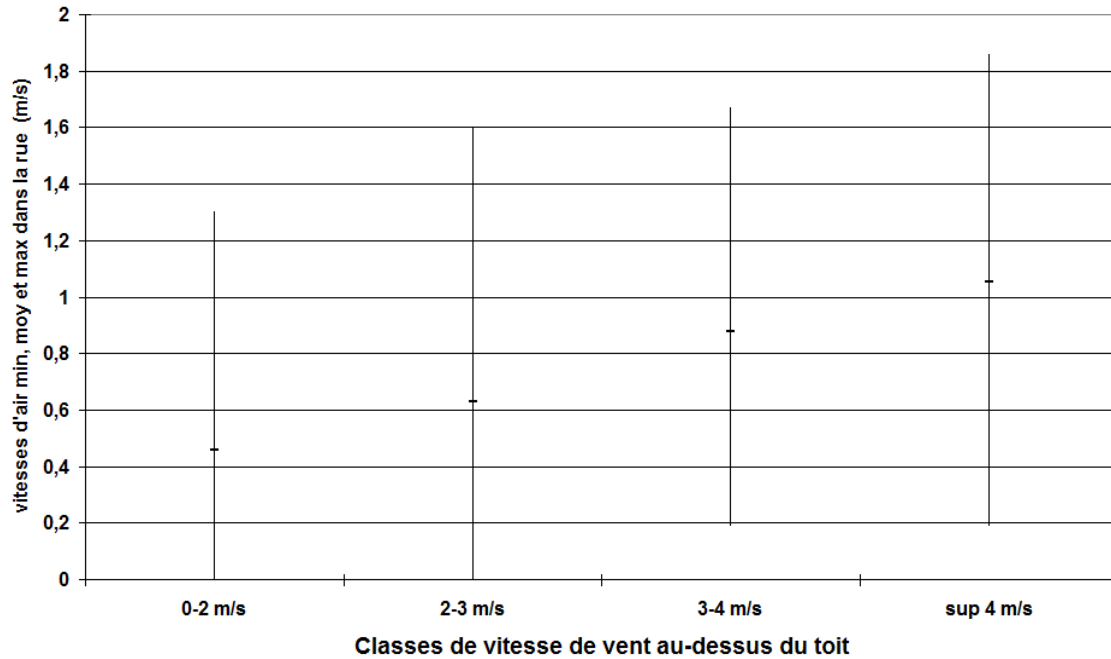


Fig. VII- 26. Variation de l'intensité minimale, moyenne et maximale de l'écoulement horizontal dans la rue canyon en fonction de quatre classes de vitesses de vent incident perpendiculaire: $0.0 \leq v < 2.0$ m/s; $2.0 \leq v < 3.0$ m/s, $3.0 \leq v < 4.0$ m/s, $v \geq 4.0$ m/s. (Data août 2006).

En fait, l'absence d'une corrélation empirique claire entre les deux écoulements supérieur et secondaire est surtout due au fait que l'écoulement dans la rue canyon n'est pas gouverné uniquement par le vent imposé au-dessus du toit mais peut résulter également de mécanismes advectifs induits aux intersections de la rue canyon (Santamouris et al. 1999, Georgakis et Santamouris 2006). Cette hypothèse est confirmée par la direction à composantes oblique et parallèle de l'écoulement horizontal mesuré dans le canyon urbain.

L'analyse de la distribution de la direction de l'écoulement horizontal dans la rue indique en effet une direction fluctuante en provenance de l'Ouest (258 et 326°) (Fig. VII- 27). Dans 52.90 % des cas, la direction mesurée est à dominance oblique (22 et 44° ($\pm 10^\circ$)) tandis que 18.20% des écoulements correspondent à une canalisation le long de la rue canyon (direction parallèle à l'axe de la rue).

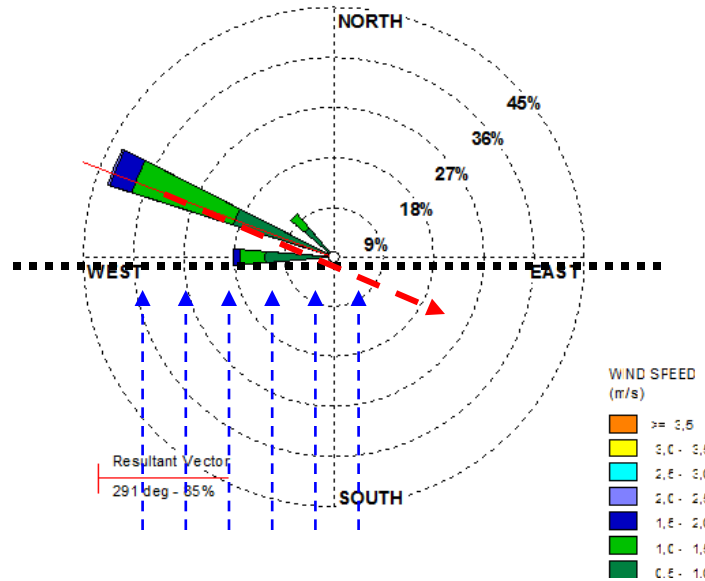


Fig. VII- 27. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon courte (Ksar de Tafilalt) établie sur la base de 242 données : cas d'une incidence perpendiculaire à l'axe de la rue (Campagne de mesure Août 06).

Sachant que le vent incident est perpendiculaire à l'axe de la rue, un tel écoulement n'est pas envisagé. En effet, selon l'image conventionnelle décrite dans la littérature, dans la rue canyon de prospect $H/W=1.70$, il est supposé s'établir un modèle d'écoulement vertical à structure tourbillonnaire, entraîné par l'écoulement imposé au-dessus du toit et caractérisé dans sa partie supérieure et au voisinage du sol par une direction perpendiculaire à l'axe de la rue (Chap. III). Or, dans le cas présent, la direction de l'écoulement horizontal mesuré se caractérise par une direction dominante oblique de $22^\circ (\pm 10^\circ)$ et même une canalisation le long de la rue en provenance de la direction Ouest. De telles directions de l'écoulement horizontal dans la rue canyon suggèrent la présence d'une composante horizontale le long du canyon urbain, initiée probablement à l'intersection Ouest de la rue canyon tel que postulé par Hoydich et al. (1974). L'écoulement horizontal mesuré dans la rue serait de ce fait "mixte", c.-à-d., le résultat d'une circulation de vortex verticale entraînée par l'écoulement au-dessus du toit et une circulation tourbillonnaire horizontale créée par différence de pression aux angles de la rue canyon.

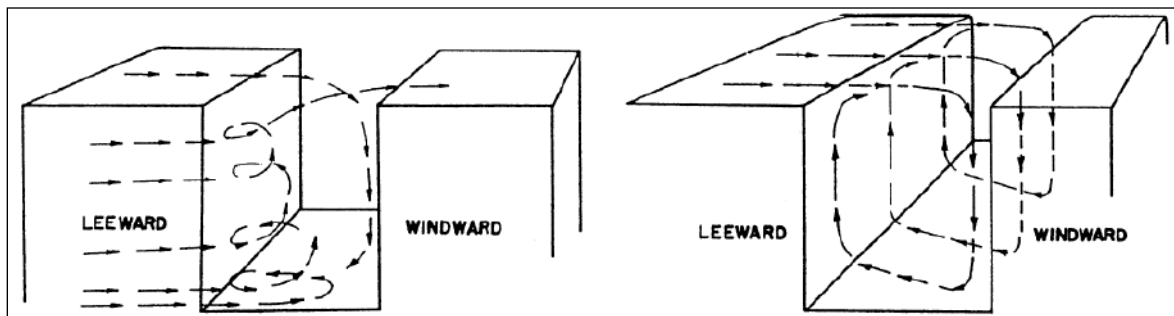


Fig. VII- 28. Les modèles de re-circulation dans les rues canyons pour une direction de vent incident perpendiculaire : a) Interaction en 3D des vortex d'angles et de cavité au voisinage des arrêtes d'une rue canyon courte. b) re-circulation dans une rue canyon en 2D (Theurer, 1999, à partir de Hoydich et al. 1974).

Conformément au modèle d'écoulement illustré sur la figure (VII- 28), les tourbillons "d'angles" pourraient s'étendre en spirale le long de la rue en interagissant avec le tourbillon vertical à l'intérieur du canyon, améliorant de ce fait la ventilation de la rue (Theurer 1999, Kastner-Klein et al. 2004).

Lorsque les mécanismes advectifs dominent la circulation du vortex, un effet de canalisation se produit le long de la rue. Ceci peut expliquer pourquoi l'écoulement horizontal mesuré est, dans 18.20% des cas, parallèle à l'axe du canyon. Dans ces conditions, la circulation de vortex disparaît (Santamouris et al. 1999).

Des observations similaires sur les effets de canalisation générés aux angles des rues canyons sont rapportées par Santamouris et al. (1999), Brown et al. (2004), Pol et Brown (2008) et Georgakis et Santamouris (2006) dans des canyons urbains de rapport L/H respectifs de 7.14, 3.14 et 1.73. L'extension spatiale de ce phénomène ne peut toutefois pas être déterminée dans la présente étude en raison de l'existence d'un seul point de mesure dans la rue canyon.

En fait, selon des études en laboratoire et de modélisation numérique (Louka et al. 2000, Kastner-Klein et al. 2004, Assimakopoulos et al. 2006), les vortex d'angles s'affaiblissent en se déplaçant le long de la longueur du canyon et un modèle d'écoulement de faible intensité et de direction uniforme s'installe. Hoydich et Dabberdt (1988) observent des mécanismes d'advection se développant à partir des angles des bâtiments jusqu'au milieu du bloc, créant une zone de convergence au milieu du canyon. Kastner-Klein et al. (2004) qui mesurent directement ces mouvements tourbillonnaires d'angles dans une expérimentation en soufflerie dans une rue canyon de prospect $H/W = 1$ et de rapport L/H égal à 5, révèlent que lorsque la longueur du canyon augmente ($L/H = 10$), le tourbillon d'angle disparaît. De même, les études de terrain par Brown et al. (2004) et Pol et Brown (2008) notent que si un effet de canalisation est observé à proximité des intersections d'une rue canyon de rapport L/H égal à 3.14, la canalisation à travers le canyon entier est plutôt rare (Pol et Brown 2008).

Dans le cas présent, il est important de noter que les mesures ne sont pas effectuées à égale distance des intersections Est et Ouest de la rue canyon. Le point de mesure est situé à une distance $l = 1/3 L$ (L =longueur totale de la rue) de l'extrémité Ouest de la rue. Sachant que l'écoulement horizontal induit par les effets de coin n'est pas uniforme à travers la longueur du canyon (Hoydich et al. 1974, Kastner-Klein et al. 2004), l'écoulement mesuré dans la rue pourrait témoigner davantage des effets tourbillonnaires induits à proximité de l'intersection Ouest de la rue. Ceci pourrait expliquer la direction de l'écoulement horizontal en provenance de l'Ouest et son caractère fluctuant.

Pour conclure des caractéristiques de l'écoulement pour un angle d'incidence perpendiculaire, les résultats obtenus indiquent clairement que la structure de l'écoulement horizontal change fondamentalement dans la rue canyon courte ($L/H = 4.53$ et $L/W = 7.75$) en comparaison avec ce qui est décrit dans la littérature. Les mécanismes advectifs induits aux intersections de la rue canyon modifient le régime d'écoulement qui devient tridimensionnel, produit d'une circulation verticale et d'une canalisation horizontale le long du canyon urbain. Ceci résulte en des modèles de ventilation différents. Dans la rue canyon courte, la ventilation est assurée à la fois par échange d'air vertical et déplacement horizontal.

ii) Conditions de vents parallèles à l'axe de la rue.

L'analyse de l'écoulement d'air horizontal dans la rue canyon pour des angles d'incidence parallèle à l'axe de la rue est effectuée pour deux conditions de vent ambiant. La première série de données correspond à un vent incident parallèle soufflant de la direction Est ($80-100^\circ$) tandis que la seconde série se réfère à des vents incidents Ouest ($260-280^\circ$) (Fig. VII- 24).

Les vents d'Est représentent 89.20 % des mesures enregistrées et se caractérisent par des vitesses de vent maximale et moyenne respectives de 7.00 et 3.62 m/s. Les vents d'Ouest sont en revanche moins dominants (10.80%) et légèrement moins forts avec des vitesses maximale instantanée et moyenne respectives de 6.12 et 3.00 m/s.

La figure (VII- 29) donne la variabilité de l'intensité de l'écoulement horizontal dans la rue lorsque le vent incident parallèle est de direction Est.

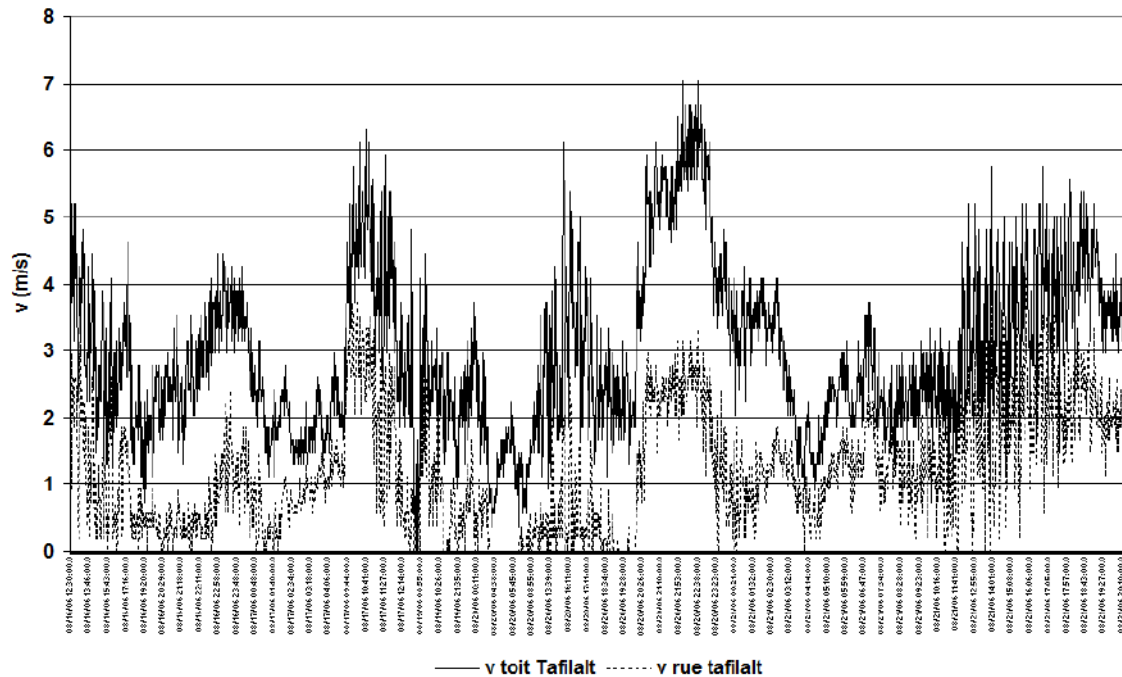


Fig. VII- 29. Comparaison des vitesses d'air dans la rue canyon et au-dessus du toit pour un vent incident parallèle de direction Est. Août 2006.

Dans la rue canyon, les vitesses de vent mesurées sont importantes, avec une vitesse maximale instantanée de 3.71 m/s et une valeur moyenne de 1.52 m/s. Quoique élevée, cette valeur de vitesse de vent moyenne est plus faible que celle mesurée dans la rue canyon longue de configuration urbaine pourtant plus compacte (Pt.1, H/W=2.73). Pour des mêmes conditions de vent ambiant parallèle au-dessus du toit, l'intensité de l'écoulement peut être ainsi plus importante dans une rue canyon longue et très étroite que dans une rue courte, de prospect moins profond.

Par ailleurs, en dépit des vitesses d'air élevées mesurées au-dessus du toit et dans le canyon urbain, l'analyse de la corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue n'indique pas de corrélation significative entre les écoulements au-dessus du toit et dans la rue canyon, le coefficient de détermination R^2 étant d'une valeur de 0.53.

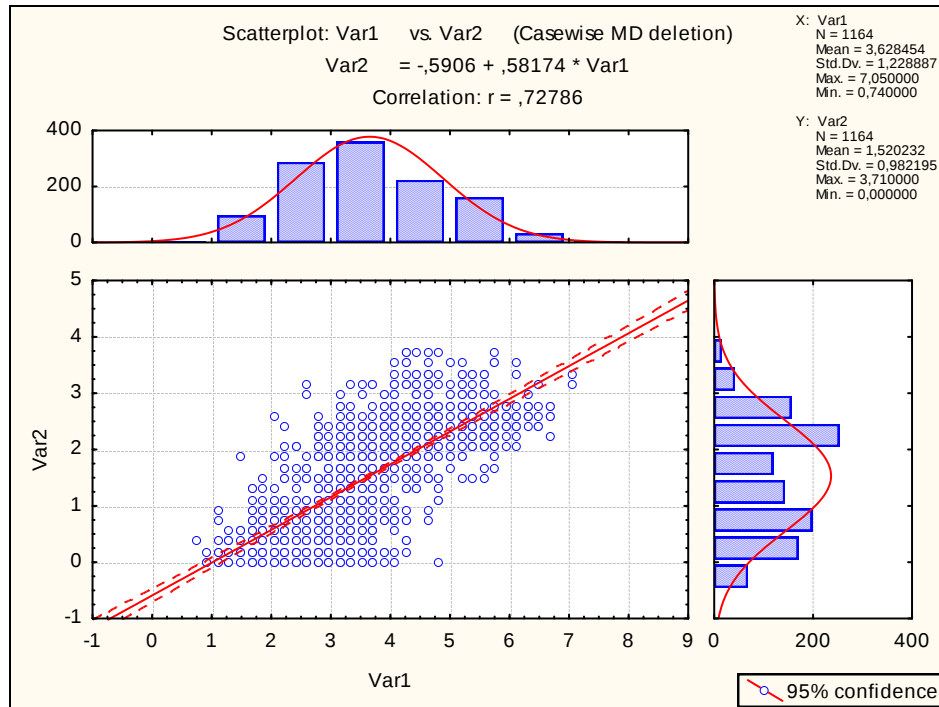


Fig. VII- 30. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue courte dans le cas d'une incidence parallèle à l'axe de la rue (campagne août 2006).

L'absence d'une corrélation entre les écoulements au-dessus du toit et dans la rue canyon de prospect $H/W = 1.71$ ne peut être due à la vitesse du vent au-dessus du toit vu que pour ces mêmes conditions du vent ambiant, le couplage est établi entre les écoulements supérieur et secondaire (c.-à-d., à l'intérieur de la rue et au-dessus du toit) dans la rue canyon de prospect plus grand (Pt.1, $H/W=2.73$). Une analyse plus exhaustive des données révèle en fait que les vitesses minimale, moyenne et maximale de l'écoulement horizontal dans la rue canyon augmentent avec l'augmentation de la vitesse du vent ambiant au-dessus du toit (Fig. VII- 31). Ces résultats indiquent qu'il n'y a pas de rupture entre les deux écoulements supérieur et secondaire.

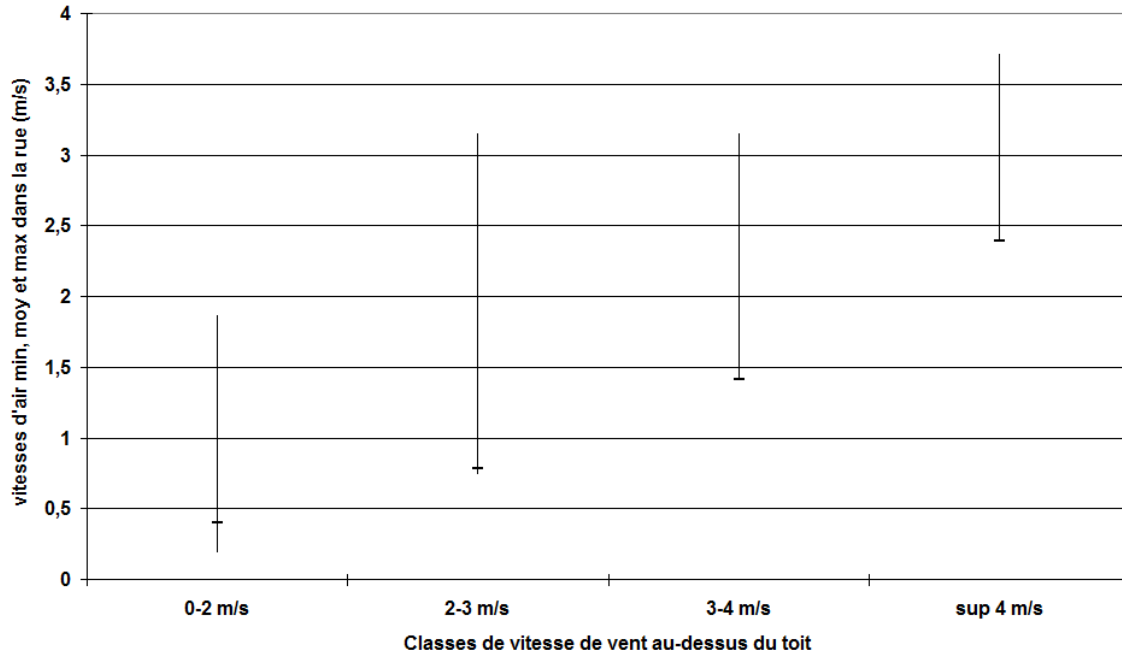


Fig. VII- 31. Variation de l'intensité minimale, moyenne et maximale de l'écoulement horizontal dans la rue canyon courte en fonction de quatre classes de vitesses de vent incident parallèle ($0.00 \leq v < 2.00$ m/s; $2.00 \leq v < 3.00$ m/s, $3.00 \leq v < 4.00$ m/s, $v \geq 4.00$ m/s) (data août 2006).

La faible corrélation obtenue entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue canyon suggère en fait que l'écoulement horizontal dans la rue est un écoulement "mixte". À l'inverse des résultats obtenus dans la rue longue de rapport L/H égal à 9.44 et L/W de 25.75, dans le cas présent ($L/H=4.5$, $L/W=7.75$), l'écoulement ne résulte pas uniquement de l'écoulement imposé au-dessus du toit mais peut provenir également d'écoulements tourbillonnaires horizontaux initiés par des différences de pression au niveau des angles de la rue canyon. Ce sont les mêmes conclusions auxquelles aboutissent Santamouris et al. (1999) et Georgakis et Santamouris (2006) qui rapportent, sous des conditions de vents parallèles, la présence de vortex d'angles horizontaux interférant avec l'écoulement horizontal mesuré dans des rues canyons compacts, de prospect compris entre 2.5 et 3.3 et de rapport L/H respectifs de 7.14 et 1.74.

En interagissant avec l'écoulement horizontal entraîné par l'écoulement imposé au-dessus du toit, les mouvements tourbillonnaires d'angles ne modifient pas la structure de l'écoulement dans la rue canyon dans la mesure où il s'agit de la résultante de deux écoulements horizontaux. En revanche, la direction de l'écoulement peut être modifiée et une distribution non uniforme peut se créer dans la rue canyon.

En fait, l'analyse de la distribution de l'écoulement horizontal dans la rue canyon indique des directions différentes selon que le vent souffle de l'Ouest ou de l'Est. Tel qu'il est illustré sur les figures (VII- 32) et (VII- 33), lorsque le vent incident est de direction Est ($80-100^\circ$), la rose des vents indique un écoulement horizontal unidirectionnel et oblique (22°), dans le même sens que le vent incident. Lorsque le vent souffle de l'Ouest en revanche, l'écoulement horizontal dans la rue se caractérise par une direction fluctuante comprise entre 236 et 303° , ce qui correspond à des angles d'incidence parallèle et oblique de 22° par rapport à l'axe du canyon.

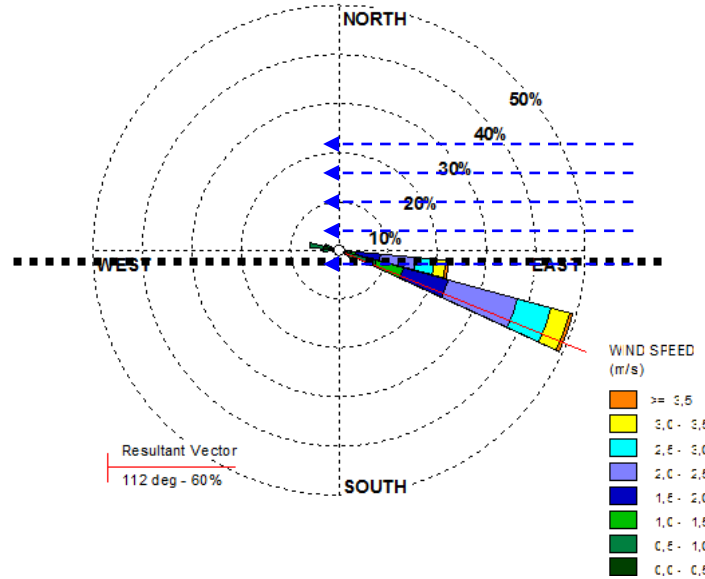


Fig. VII- 32. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon courte (Ksar de Tafilalt) établie sur la base de 1164 données : cas d'un vent incident parallèle de direction Est (Campagne de mesure Août 06).

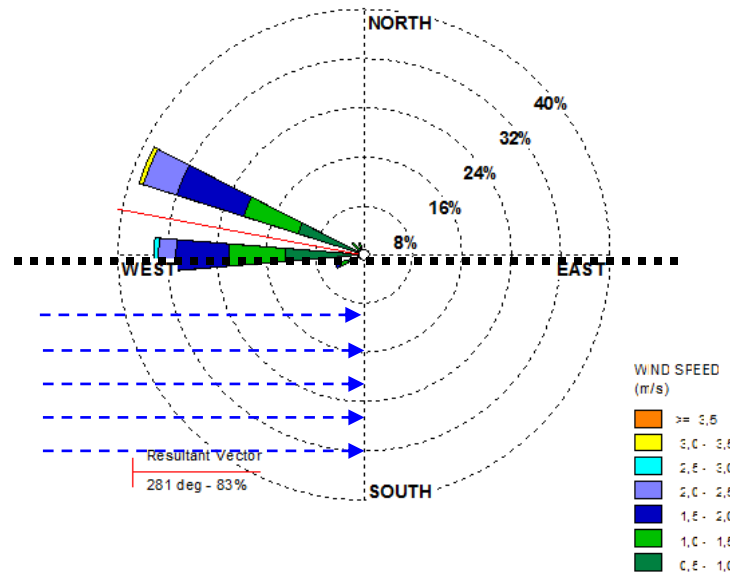


Fig. VII- 33. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon courte (Ksar de Tafilalt) établie sur la base de 141 données : cas d'un vent incident parallèle de direction Ouest (Campagne de mesure Août 06).

De telles directions obliques et fluctuantes de l'écoulement ne sont pas envisagées pour une incidence parallèle. Lorsque le vent incident est parallèle à l'axe de la rue, il est supposé se créer un écoulement de direction presque toujours parallèle à l'axe de la rue canyon (Nakamura et Oke 1988, Santamouris et al. 1999).

Les caractéristiques de vitesse d'air et de direction décrites ci-dessus suggèrent l'existence d'un écoulement mixte dans la rue canyon. Cet écoulement serait la résultante d'un écoulement horizontal unidirectionnel (entraîné par l'écoulement au-dessus du toit) et d'un écoulement de structure tourbillonnaire horizontal initié aux angles de la rue canyon. Les mécanismes advectifs

induits ne modifient cependant pas la structure bidimensionnelle de l'écoulement dans la rue et les modèles de ventilation de la rue s'effectuent par déplacement advectif.

iii) Conditions de vents obliques à l'axe de la rue.

L'analyse des mesures pour une incidence oblique à l'axe de la rue révèle la nature complexe de l'écoulement dans le canyon urbain. Cet écoulement est instable et la ventilation de la rue est fortement variable et dépend de la direction du vent. Des changements dans la direction du vent, aussi minimes soient-ils, peuvent produire un impact important sur les modèles d'écoulement d'air.

Les données collectées sont divisées en quatre séries de mesures, correspondant chacune à un secteur de vent : c.-à-d., secteurs de vent Nord-est, Sud-est, Sud-ouest et Nord-ouest.

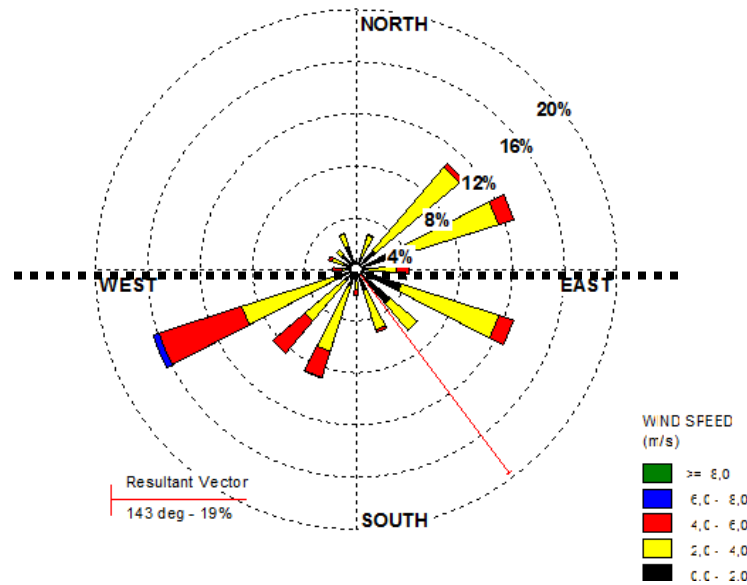


Fig. VII- 34. Rose des vents dans la rue courte établie à partir de 1852 données, cas de vents incidents obliques à l'axe de la rue (août 06).

- les vents de secteurs Nord-est représentent 23.50 % des écoulements obliques et sont caractérisés par une vitesse moyenne de 2.65 m/s,
- les vents de secteur Sud-est représentent 24.00 % des écoulements obliques et présentent une vitesse moyenne comprise entre 1.90 et 2.70 m/s,
- les vents de secteur Sud-ouest représentent 33.63 % des écoulements obliques et sont caractérisés par les vitesses de vents moyennes les plus élevées, variant entre 3.20 et 3.75 m/s,
- enfin, les vents de secteur Nord-ouest ne représentent que 7.20% des écoulements et présentent des vitesses moyennes comprises entre 1.60 et 2.70 m/s.

Les caractéristiques des vents obliques décrites nous permettent de distinguer deux conditions de vent obliques :

- les vents relativement forts, d'une vitesse moyenne comprise entre 3.50 et 3.70 m/s. Ces vitesses de vent sont suffisamment importantes pour qu'un couplage s'établisse entre les écoulements supérieur et secondaire dans la rue canyon de prospect $H/W=1.71$ (Chap. IV). Ces vents correspondent au secteur Sud-ouest,

- les vents moyens à faibles, d'une vitesse moyenne comprise entre 1.90 et 2.50 m/s. Ces vitesses de vent sont au-dessous de la valeur seuil à partir de laquelle le couplage entre les écoulements supérieur et secondaire peut être établi dans la rue (Chap. IV). Ces conditions correspondent aux secteurs de vent Nord-est et Sud-est. Les vents de secteur Nord-ouest sont à négliger étant donné le faible pourcentage des écoulements d'air correspondants.

Pour éviter les redondances, seuls les principaux résultats seront présentés.

a) Conditions de vents forts à moyens.

Au-dessus du toit, le vent ambiant, de direction Sud-ouest, se caractérise par des vitesses moyennes de 3.20 à 3.75 m/s et des vitesses maximales instantanées comprises entre 6.50 et 7.50 m/s.

➤ Cas d'un angle d'incidence de 22° à l'axe de la rue (236-260°).

Au-dessus du toit, le vent ambiant est d'une vitesse moyenne de 3.74 m/s et les valeurs maximales instantanées sont de 7.50 m/s environ. Dans la rue canyon, l'écoulement se caractérise par une valeur moyenne de 1.43 m/s et une intensité maximale instantanée de 4.27 m/s. Ces vitesses d'air sont nettement plus faibles que celles mesurées dans la rue canyon longue et compacte (Pt.1) où des effets de survitesse sont observés.

L'étude de la corrélation entre les deux vitesses au-dessus du toit et dans la rue canyon indique l'existence d'une relation linéaire, $y = 0,5021x - 0,449$, avec un coefficient de détermination R^2 d'une valeur de 0.65.

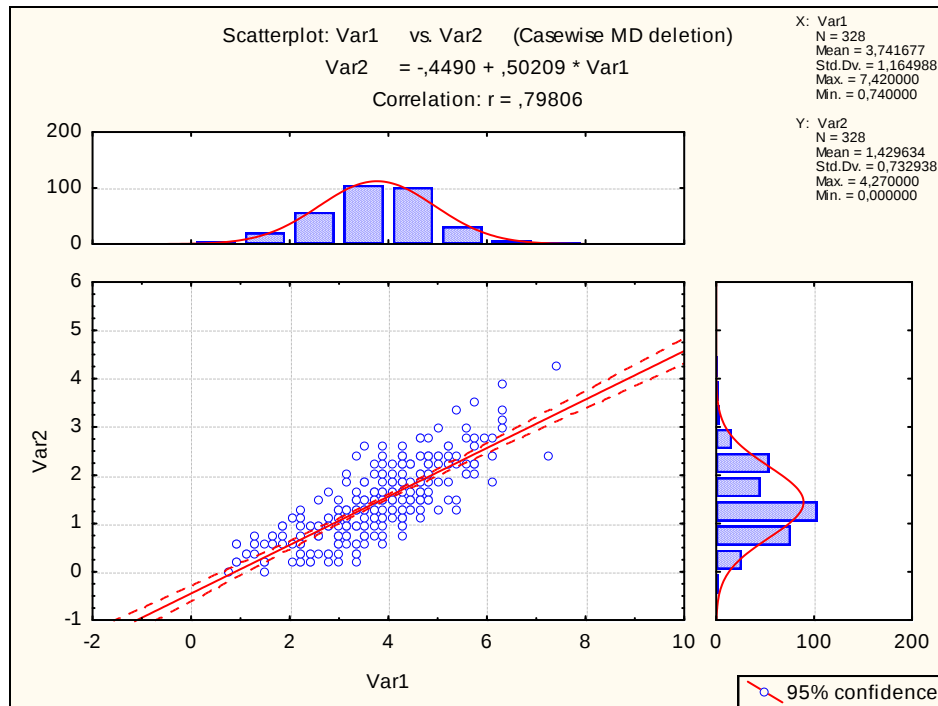


Fig. VII- 35. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue courte dans le cas d'une incidence oblique de $22^\circ \pm (10^\circ)$ à l'axe de la rue (campagne août 2006).

Ces résultats suggèrent que, même si l'écoulement dans la rue ne peut être expliqué entièrement en fonction de l'écoulement imposé au-dessus du toit ($R^2 = 0.65$), il en est néanmoins fortement dépendant. Ceci peut s'expliquer par les vitesses de vent ambiant élevées, d'une valeur moyenne proche de 4.00 m/s qui permettent l'établissement d'une circulation secondaire stable dans la rue canyon. La comparaison des vitesses d'air moyennes au-dessus du toit et dans la rue canyon pour différentes classes de vent ambiant indique en effet que l'intensité de l'écoulement dans la rue canyon augmente de façon significative avec l'augmentation de la vitesse du vent ambiant au-dessus du toit (Fig. VII- 36).

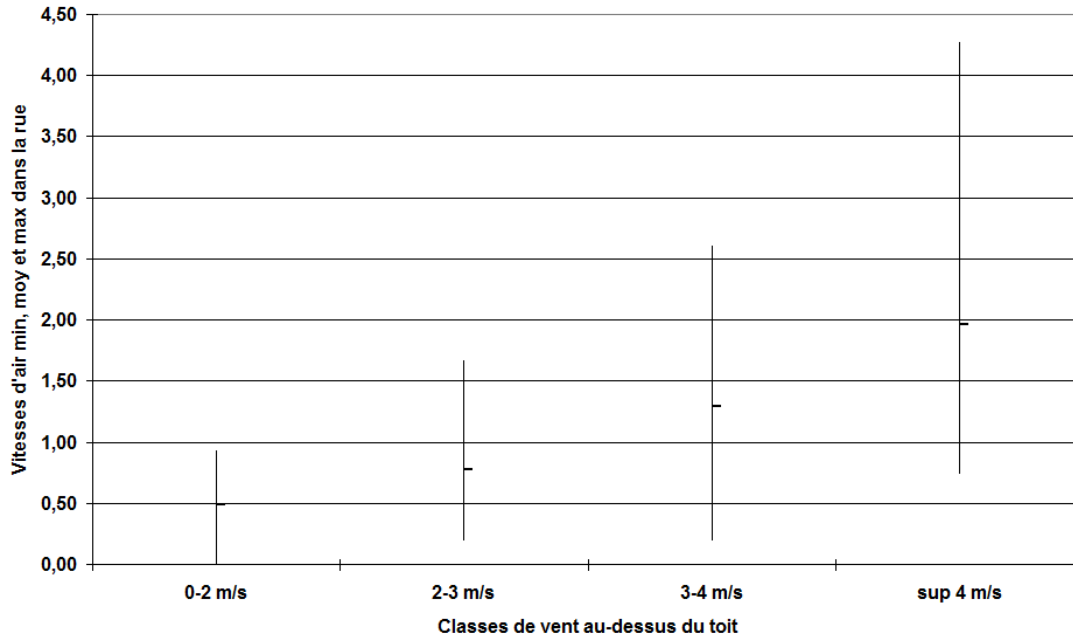


Fig. VII- 36. Variation de l'intensité minimale, moyenne et maximale de l'écoulement horizontal dans la rue canyon courte en fonction de quatre classes de vitesses de vent incident oblique de 22° à l'axe de la rue: $0.00 \leq v < 2.00$ m/s; $2.00 \leq v < 3.00$ m/s; $3.00 \leq v < 4.00$ m/s; $v \geq 4.00$ m/s (data août 2006).

La valeur relativement moyenne du coefficient de détermination R^2 suggère en fait que l'écoulement horizontal dans la rue est un écoulement "mixte", résultat probablement d'une circulation verticale entraînée à partir de l'écoulement imposé au-dessus du toit et d'une circulation de vortex horizontale initiée par différence de pression aux angles de la rue canyon. Cette hypothèse est confirmée par la direction à composantes oblique et parallèle de l'écoulement horizontal mesuré dans le canyon urbain.

L'analyse de la distribution de la direction de l'écoulement horizontal mesuré dans la rue révèle en effet une direction à composante oblique importante (63.00% des cas) mais aussi une canalisation le long de la rue canyon (17.70%) (Fig. VII- 37).

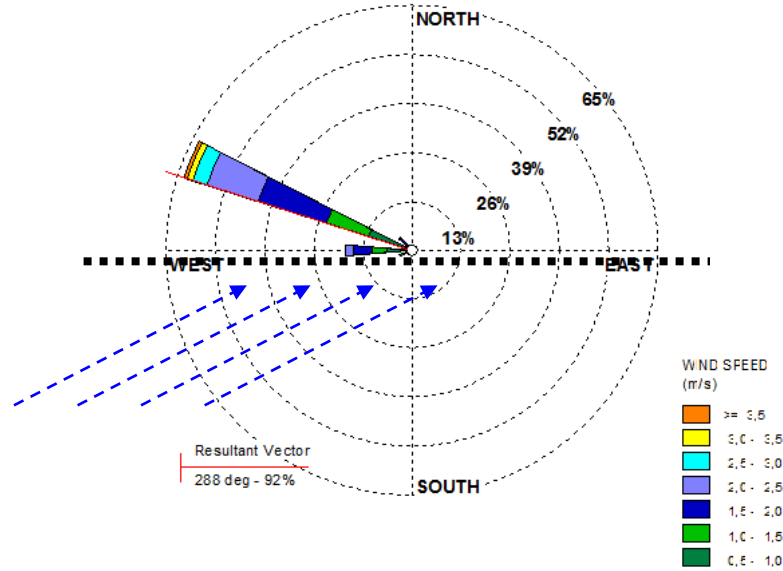


Fig. VII- 37. Rose des vents dans la rue canyon courte effectuée à partir de 328 données : cas d'une incidence oblique de $22^\circ \pm (10^\circ)$ à l'axe de la rue (vents Sud-ouest, août 06).

Ces observations sont similaires à celles de Bächlin et Plate (1988) qui rapportent dans une expérience en soufflerie atmosphérique l'existence d'un effet de canalisation sous des conditions de vent obliques. Bien que cette canalisation soit moyennement forte, les profils verticaux ont montré l'existence simultanée de vortex alignés horizontalement et de vortex à rotation verticale dans le canyon. Dans ces conditions, il est supposé que le vent d'incidence oblique pénétrant dans la rue canyon soit réfléchi sur la façade sous le vent et entraîne avec lui les vortex d'angles (Brown et al. 2004).

Dans le cas de la présente étude, la direction oblique de l'écoulement horizontal mesuré découlerait de ce fait de la superposition de la composante perpendiculaire à l'axe de la rue (entraînée à partir de l'écoulement imposé au-dessus du toit) et de la composante horizontale le long de la rue canyon (induite par différence de pression aux angles de la rue, Johnson et Hunter, 1999). En ce qui concerne la fraction d'écoulement horizontal canalisée observée, elle peut résulter en revanche de l'effet dominant de la composante parallèle horizontale sur la circulation de vortex verticale dans la rue canyon (Georgakis et Santamouris 2006).

Pour conclure, les caractéristiques de l'écoulement horizontal décrites ci-dessus suggèrent la présence d'un écoulement mixte, à structure tridimensionnelle, résultat probablement de la réflexion du vent incident sur la façade sous le vent et de l'écoulement horizontal entraîné par les vortex d'angles. Ces résultats, contraires à ceux obtenus dans le cas de la rue canyon longue, suggèrent que la ventilation de la rue s'effectue à la fois par échange vertical et déplacement horizontal.

b) Conditions de vents ambiants faibles.

Les vents soufflant du Sud-est présentent des vitesses moyennes comprises entre 1.90 et 2.50 m/s. Les vitesses de vent les plus faibles ($v=1.90$ m/s) sont observées pour un angle d'incidence de vent oblique de $44^\circ \pm (10^\circ)$.

➤ Cas d'un angle d'incidence de 44° à l'axe de la rue (123-146°).

En raison de la faible vitesse du vent ambiant d'une valeur moyenne de 1.90 m/s, l'écoulement horizontal dans la rue n'est pas lié à l'écoulement imposé au-dessus du toit ($R^2 = 0.18$). Il présente des vitesses d'air très faibles, caractérisées par une intensité moyenne de 0.53 m/s et des valeurs instantanées maximales d'environ 1.50 m/s.

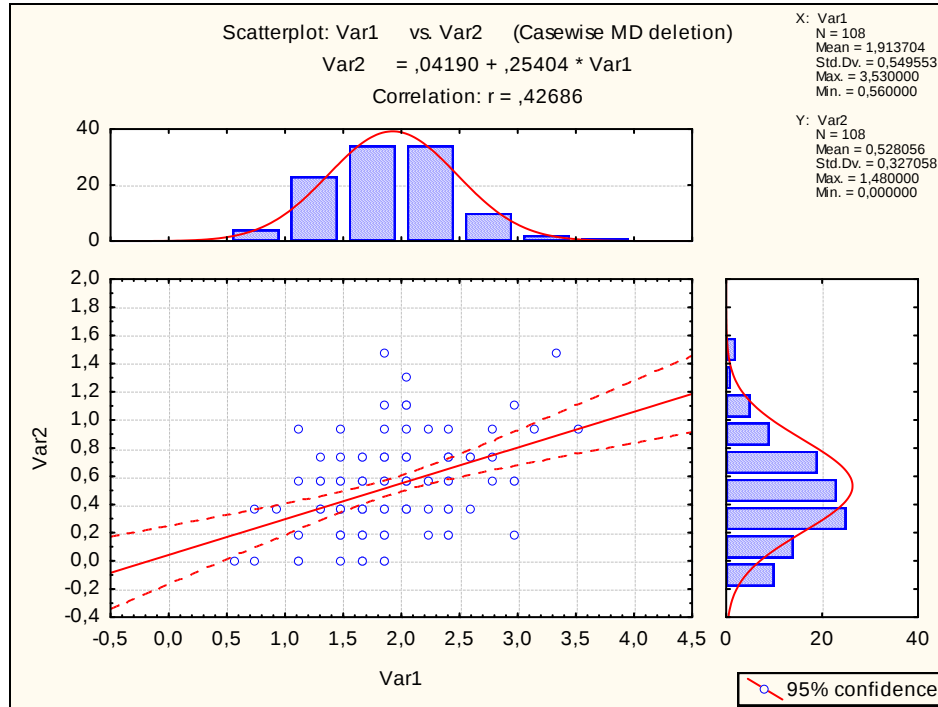


Fig. VII- 38. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue courte dans le cas d'une incidence oblique de 44° à l'axe de la rue (vents Sud-est, campagne août 2006).

Dans ces conditions, il peut être suggéré que les phénomènes associés à des écoulements thermiques et des mécanismes advectifs initiés aux intersections de la rue soient dominants (Santamouris et al. 1999, Georgakis et Santamouris 2006).

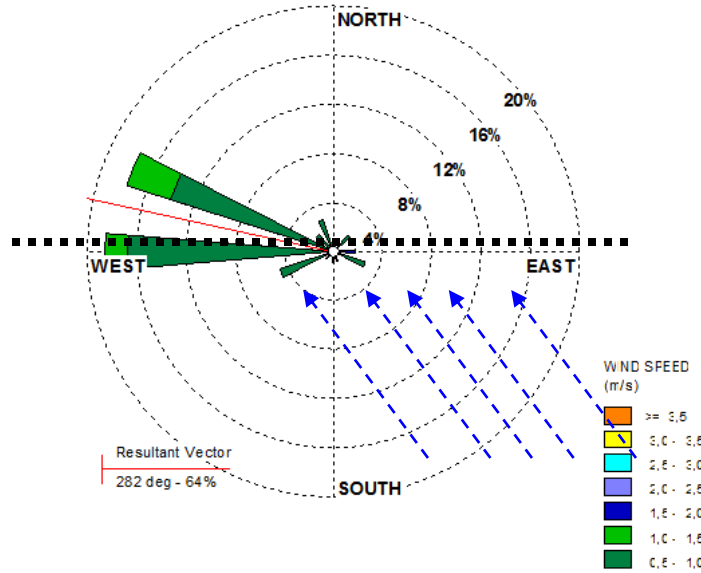


Fig. VII- 39. Rose des vents dans la rue canyon courte effectuée à partir de 108 données : cas d'une incidence oblique de $44^\circ \pm (10^\circ)$ à l'axe de la rue (vents Sud-est, août 06).

Sur la figure (VII- 39), il est clairement observé que l'écoulement horizontal dans la rue provient de l'Ouest, dans une direction opposée à celle du vent incident. Cet écoulement est fluctuant, caractérisé par une composante oblique et une canalisation relativement importante (27.80% des écoulements). Sachant que des directions similaires sont enregistrées pour un angle d'incidence perpendiculaire, l'hypothèse selon laquelle une partie de l'écoulement horizontal mesuré dans la rue puisse résulter de vortex horizontaux générés par différence de pression à l'intersection Ouest de la rue canyon se confirme. Ceci peut expliquer le changement de direction de l'écoulement dans la rue canyon et sa provenance à partir de la direction Ouest. Des conclusions similaires sont rapportées par Georgakis et Santamouris (2006) qui identifient sous des conditions de vents incidents obliques faibles l'existence de vortex d'angles dans une rue canyon courte de prospect $H/W = 3.3$ et de rapport $L/H = 1.74$. Selon ces auteurs, lorsque l'écoulement dans la rue est découplé de l'écoulement imposé au dessus du toit, les vortex intermittents d'angles constituent le principal phénomène gouvernant l'écoulement horizontal le long de la rue canyon. Les auteurs soulignent que dans la plupart des cas, la composante le long du canyon observée est opposée à l'écoulement horizontal imposé au-dessus du toit.

C'est également ce qui est observé dans notre présente étude dans le cas d'un angle d'incidence oblique de $66^\circ \pm (10^\circ)$.

➤ Cas d'un angle d'incidence de 66° à l'axe de la rue ($146-170^\circ$).

Au-dessus du toit, le vent ambiant se caractérise par une vitesse moyenne de 2.50 m/s et les vitesses maximales instantanées sont de l'ordre de 5.75 m/s. Dans la rue canyon en revanche, l'intensité de l'écoulement est faible, d'une valeur moyenne de 0.63 m/s et une vitesse instantanée maximale de 1.48 m/s.

Cet écoulement semble être découplé de l'écoulement imposé au-dessus du toit ($R^2 = 0.22$) et les vitesses d'air mesurées dans la rue et au-dessus du toit se caractérisent par un éparpillement considérable (Fig. VII- 40).

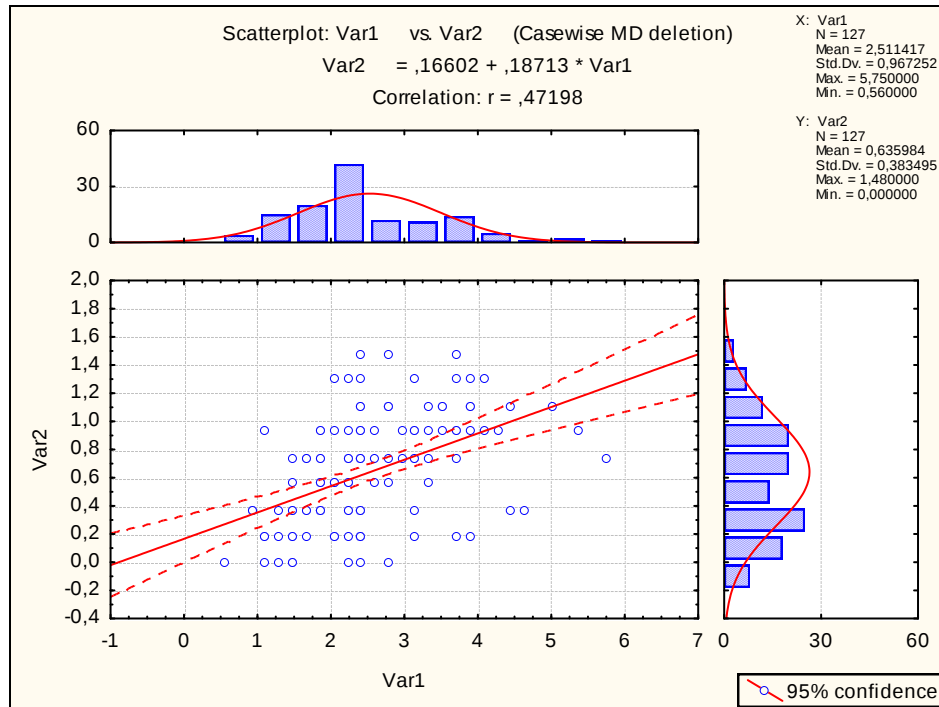


Fig. VII- 40. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue courte dans le cas d'une incidence oblique de $66^\circ \pm (10^\circ)$ à l'axe de la rue (vents Sud-est, août 06).

La rupture entre les deux écoulements au-dessus du toit et dans la rue canyon est due à la faible vitesse du vent ambiant ($v=2.50$ m/s) qui n'est pas suffisante pour permettre l'établissement d'un couplage entre les deux écoulements supérieur et secondaire. Dans ce cas, des phénomènes associés à des écoulements thermiques et des mécanismes advectifs initiés aux intersections de la rue peuvent être dominants (Santamouris et al. 1999, Georgakis et Santamouris 2006).

L'analyse de la direction de l'écoulement dans la rue canyon indique clairement un effet de canalisation le long de la rue canyon (Fig. VII- 41). Dans 22.50% des cas, la direction de l'écoulement (dont l'intensité est supérieure à 0.5 m/s) est parallèle à l'axe de la rue, dans une direction opposée au vent incident. Ces résultats, similaires à ceux obtenus pour différents cas d'angles d'incidence perpendiculaire et obliques et sous conditions de vents faibles, confirment l'hypothèse selon laquelle une partie de l'écoulement horizontal mesuré dans la rue puisse résulter de vortex horizontaux générés par différence de pression à l'intersection Ouest de la rue canyon.

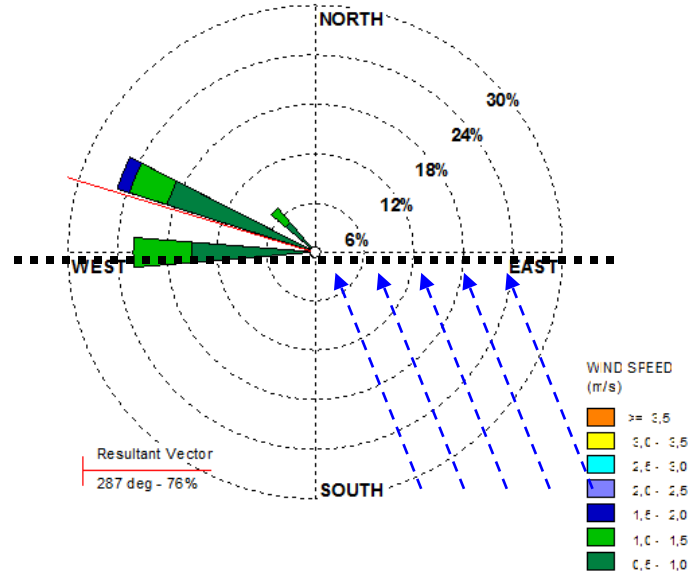


Fig. VII- 41. Rose des vents dans la rue canyon courte effectuée à partir de 127 données : cas d'une incidence oblique de $66^\circ \pm (10^\circ)$ à l'axe de la rue (vents Sud-est, août 06).

En ce qui concerne les effets thermiques, il est important de noter que l'écoulement horizontal observé dans la rue canyon est mesuré à différentes heures du jour mais également au cours de la nuit, indépendamment des phénomènes de surchauffe solaire et des contrastes thermiques (verticaux et horizontaux) qui peuvent exister dans la rue canyon. Il peut être donc affirmé qu'une partie de l'écoulement horizontal puisse être générée mécaniquement, sans convection thermique.

L'analyse des données dans la rue urbaine courte de rapports H/L égal à 4.53 et L/W de 7.75 indique une faible corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue canyon. Les coefficients de détermination obtenus sont pour la plupart inférieurs à 0.6 (tableau VII- 4), ce qui suggère que, contrairement au cas de la rue longue et compacte (H/L=9.44 et L/W=25.75), l'écoulement dans la rue n'est pas gouverné uniquement par l'écoulement imposé au-dessus du toit mais peut être affecté également par des vortex horizontaux induits aux intersections de la rue canyon.

Cette hypothèse est confirmée par les directions similaires, à composante oblique et parallèle, qui sont enregistrées pour différents cas d'angles d'incidence à l'axe de la rue.

Tableau VII- 4. Récapitulatif des corrélations entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue canyon courte le cas de vents forts à moyens (août 06).

Conditions au-dessus du toit			Direction de l'écoulement dans la rue	Corrélation	R ²	V _{moy} dans la rue	Nr. de données
Angle d'incidence β (± 10°)		V _{moy} (m/s)					
Quadrant Nord-est.	0°	3.62	Unidirectionnel, oblique de 22°± 10°, dans le même sens que le vent incident.	-----	R ² = 0,53	1.52	1164
	22°	2.72	Unidirectionnel, oblique de 22°± 10°, dans le même sens que le vent incident.	-----	R ² = 0,56	1.41	295
	44°	2.60	Unidirectionnel, oblique de 22°± 10°, dans le même sens que le vent incident.	-----	R ² = 0,52	1.15	174
	66°	2.34	Ecoulement négligeable	-----	R ² = 0,10	0.42	62
	90°	2.34	Ecoulement négligeable	-----	R ² = 0,06	0.34	78
Quadrant Sud-est.	22°	2.70	Fluctuant	-----	R ² = 0,56	0.88	276
	44°	1.91	Fluctuant, à composante oblique et parallèle, en provenance de l'Ouest, dans le sens opposé au vent incident.	-----	R ² = 0,06	0.52	108
	66°	2.51	Fluctuant, à composante oblique et parallèle, en provenance de l'Ouest, dans le sens opposé au vent incident.	-----	R ² = 0,13	0.63	127
	90°	3.23	Fluctuant, à composante oblique et parallèle, en provenance de l'ouest	-----	R ² = 0,29	0.79	243
	Quadrant Sud-ouest	22°	3.74	Fluctuant, à composante oblique et parallèle, en provenance de l'Ouest, dans le même sens que le vent incident.	-----	R ² = 0,64	1.43
44°		3.40	Fluctuant, à composante oblique et parallèle, en provenance de l'Ouest, dans le même sens que le vent incident.	-----	R ² = 0,32	0.78	161
66°		3.21	Fluctuant, à composante oblique et parallèle, en provenance de l'Ouest, dans le même sens que le vent incident.	-----	R ² = 0,07	0.72	172

Un phénomène de canalisation, initié par différence de pression aux angles de la rue, peut ainsi modifier l'écoulement d'air dans la rue canyon courte en termes de structure, direction et intensité.

- Lorsque les conditions au-dessus du toit permettent l'établissement d'une circulation secondaire dans la rue canyon de prospect $H/W=1.71$, c.-à-d., la vitesse moyenne du vent ambiant est comprise entre 3.20 et 3.75 m/s :
 - Pour un angle d'incidence perpendiculaire à l'axe de la rue,
Les résultats obtenus indiquent clairement que la structure de l'écoulement change fondamentalement dans la rue canyon de prospect H/W égal à 1.71 en comparaison avec l'image classique simplifiée en 2D de l'écoulement en vortex entraîné par le vent ambiant au-dessus du toit. Dans la rue canyon, l'écoulement présente une structure tridimensionnelle, résultat probablement de la circulation de vortex au-dessus du toit et d'une canalisation le long de la rue. Le modèle de ventilation dans la rue canyon s'effectue dans ce cas par échange vertical et déplacement horizontal.
 - Pour un angle d'incidence parallèle à l'axe de la rue,
La structure de l'écoulement n'est pas modifiée et la ventilation de la rue s'effectue par déplacement d'air horizontal.
 - Pour un angle d'incidence oblique,
Les résultats indiquent que dans la plupart des cas, l'écoulement horizontal dans la rue n'est pas gouverné uniquement par l'écoulement imposé au-dessus du toit mais résulte également de vortex horizontaux développés aux intersections de la rue canyon. Un régime d'écoulement mixte, produit d'une circulation de vortex vertical et d'une circulation horizontale le long de la rue peut alors se produire.
- Lorsque le vent incident est faible (vitesse moyenne comprise entre 1.90 et 2.50 m/s) et qu'aucun lien entre l'écoulement dans la rue et au-dessus du toit ne peut être établi, l'écoulement dans la rue résulterait d'effets thermiques et/ou de vortex intermittents établis aux angles de la rue canyon. Les vortex horizontaux constituent le principal phénomène qui gouverne l'écoulement horizontal dans la rue canyon. Ces mouvements sont particulièrement intéressants pour la ventilation de la rue sous conditions de vent faible. Les valeurs de l'écoulement mesuré, d'une intensité moyenne de 0.50-0.70 m/s ne sont pas négligeables pour le confort d'été.

En résumé, l'aspect le plus important à retenir est le caractère tridimensionnel de l'écoulement dans la rue canyon courte pour des angles d'incidence perpendiculaire et obliques à l'axe de la rue. Cette structure tridimensionnelle de l'écoulement, grâce à ses composantes transversale et horizontale, assure une meilleure ventilation dans les rues courtes en comparaison avec les rues canyons longues et compactes. Dans les rues canyons courtes en effet, la ventilation urbaine est assurée à la fois par phénomène d'advection le long de la rue et par échange vertical avec l'écoulement libre au-dessus du toit. Dans les rues les plus longues en revanche, les effets de canalisation sont nettement plus importants mais la ventilation de la rue n'est assurée que par déplacement d'air horizontal, les échanges d'air verticaux étant presque nuls.

Conclusion sur l'effet de la longueur de la rue L.

La géométrie des bâtiments, ou la distance "L" séparant deux intersections principales, peut modifier la structure de l'écoulement dans la rue canyon. Elle détermine le taux d'échange avec l'air au-dessus de la canopée urbaine et agit sur l'intensité de l'écoulement horizontal dans la rue canyon, ce qui a des effets sur le confort thermique.

Pour des conditions de vents élevées, d'une vitesse moyenne de 3.20-3.70 m/s.

Tableau VII- 5. Caractéristiques des écoulements d'air dans les rues canyons de longueur L différente.

Caractéristiques de la rue	Nature de l'écoulement dans la rue	Incidence perpendiculaire	Incidence parallèle	Incidence oblique
- H/W= 1.71, - L/W=7.75	mixte	oblique et parallèle	fluctuante : oblique et parallèle	oblique et parallèle
- H/W=2.73 - L/W= 25.75	circulation secondaire imposée par l'écoulement supérieur	Données non disponibles.	parallèle	Parallèle

- Lorsque la rue est courte ($L/H=4.53$; $L/W=7.75$) :
 - L'écoulement mesuré dans la rue canyon est mixte. Il n'est pas gouverné exclusivement par l'écoulement imposé au-dessus du toit mais résulte également de mécanismes advectifs initiés aux angles de la rue canyon. Dans ces conditions, la canalisation le long de la rue modifie de manière fondamentale la structure de l'écoulement dans le canyon. Les vortex d'angles interagissent avec la circulation de vortex vertical et améliorent de ce fait la ventilation de la rue. Ceci est particulièrement vrai pour un angle d'incidence perpendiculaire à l'axe de la rue où la structure de l'écoulement devient tridimensionnelle. Toutefois, la nature turbulente de l'écoulement peut constituer une gêne, notamment par vent fort.
- Lorsque la rue canyon est longue et compacte, c.-à-d., $L/H=9.44$ et $L/W \geq 20$:
 - Les vortex d'angles s'affaiblissent en se déplaçant le long du canyon urbain, l'écoulement moyen dans la rue n'est de ce fait gouverné que par l'écoulement imposé au-dessus du toit.
 - pour une incidence parallèle à l'axe de la rue, un phénomène de canalisation important se crée et se traduit par une accélération de l'écoulement tout le long de la rue canyon. Pour des conditions de vent ambiant similaires au-dessus du toit, les vitesses d'air mesurées dans la rue canyon longue et de prospect H/W égal à 2.73 sont plus élevées que celles enregistrées dans la rue canyon courte, de configuration urbaine pourtant moins compacte ($H/W=1.71$). Les survitesses engendrées peuvent constituer un facteur de gêne mécanique et thermique non négligeable aussi bien en hiver qu'en été,
 - pour une direction oblique fluctuant entre 22 et $66^\circ (\pm 10^\circ)$, la composante le long du canyon domine le vortex et un phénomène de canalisation se produit le long de la rue canyon. L'écoulement est étiré entre les parois de la rue et ne présente aucune structure tourbillonnaire. Les échanges verticaux avec

l'air au-dessus de la canopée urbaine cessent et la ventilation de la rue ne s'effectue dans ce cas que par déplacement advectif.

Pour des conditions de vents faibles, inférieurs à 2.50 m/s.

L'écoulement mesuré dans la rue canyon courte provient en partie des mécanismes advectifs créés aux intersections de la rue canyon. Ces écoulements, d'une intensité moyenne de 0.50-0.70 m/s, sont forts appréciables pour le confort thermique d'été.

En résumé, l'analyse des écoulements d'air dans deux rues de longueur "L" différente confirme les études précédentes (Yamartino et Wiegand 1986, Santamouris et al. 1999, Louka et al. 2000, Kastner-Klein et al. 2004, Assimakopoulos et al. 2006, Georgakis et Santamouris 2006) sur l'importance de la géométrie du bâtiment dans les mécanismes de ventilation de la rue canyon. Les résultats indiquent que le prospect H/W seul ne suffit pas à déterminer la structure des écoulements dans la rue canyon. La longueur de la rue canyon qui peut être exprimée par le rapport L/H mais aussi par le rapport L/W influence fortement les caractéristiques de l'écoulement et modifie de manière fondamentale la structure de l'écoulement, et donc les modes de ventilation et les conditions de confort dans la rue canyon.

VII- 2.2.3. Effet de l'asymétrie des rues canyons.

Afin de mieux appréhender l'effet aérodynamique des profils asymétriques sur la structure des écoulements d'air, la rue canyon de configuration asymétrique située sur le versant Nord (Pt.3) fait l'objet d'une analyse spécifique. La rue canyon symétrique située sur le versant Sud (Pt. 1) est sélectionnée comme rue de "référence".

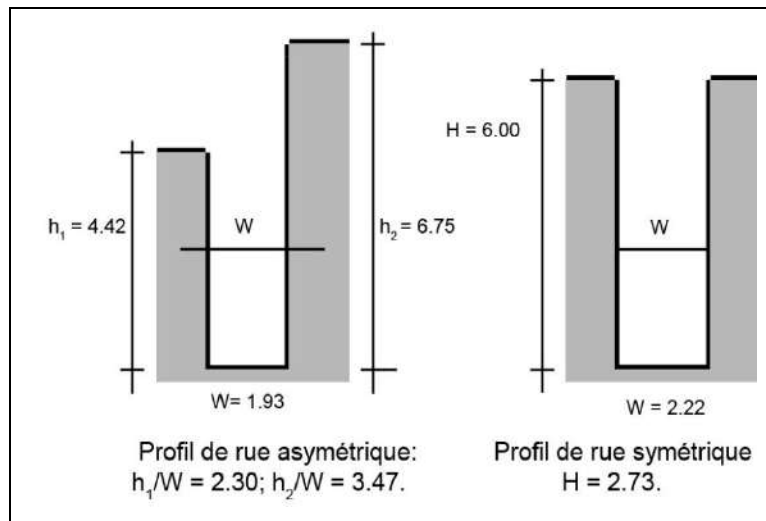


Fig. VII- 42. Caractéristiques géométriques des rues canyons asymétrique et symétrique analysées (vues de profil).

Caractéristiques géométriques de la rue canyon asymétrique.

La rue canyon située sur le versant nord dans la partie haute du Ksar de Ghardaïa (Pt.1) est caractérisée par une configuration urbaine asymétrique.

- les hauteurs de bâtiments h_1 et h_2 sont de 4.42 et 6.76 m respectivement, avec $h_1 = 0.65.h_2$. Le prospect moyen ($H/W = \frac{1}{2} (h_1 + h_2)/W$) est de 2.89, avec $h_1/W = 2.30$ et 3.47 et $h_2/W = 3.47$,

- la longueur L (distance entre deux intersections principales) est de 65.00 m et le rapport L/H est égale à 11.60,
- la rue est de forme courbe, caractérisée par une partie brisée. L'orientation est Est-ouest ($\alpha = 80^\circ$).

Caractéristiques géométriques de la rue symétrique de référence.

La rue canyon située sur le versant Sud (Pt.1) est sélectionnée comme rue de "référence". Elle est caractérisée par une configuration urbaine symétrique et présente les mêmes caractéristiques géométriques de prospect et de longueur de rue que le canyon asymétrique.

- la hauteur H de bâtiment est égale à 6.04 et le prospect H/W de 2.73 est très proche de celui de la rue asymétrique analysée,
- la longueur L est égale à 57.04 m et le rapport L/H est de 9.50,
- la rue est de forme courbe régulière et son orientation est NE-SO ($\alpha = 55^\circ$).

Tableau VII- 6. Caractéristiques géométriques de la rue canyon asymétrique et du canyon de référence.

Rue canyon	Description des points de mesure.							
	α	h_1 (m)	h_2 (m)	W (m)	L (m)	$(h_1+h_2)/W$	L/W	L/H
Rue asymétrique (versant Nord)	80° (E-O)	4.42	6.76	1.93	65.00	2.89	33.65	11.60
Rue symétrique (versant Sud)	55° (NE-SO)	6.04	6.04	2.22	57.04	2.73	25.75	9.50

VII- 2.2.3.1. Les écoulements d'air dans le canyon de référence.

Les caractéristiques des écoulements d'air dans la rue canyon de référence sont analysées en détail dans la section relative à l'effet de la longueur de la rue sur les écoulements d'air dans la rue canyon. Les principales conclusions obtenues sont présentées ci-dessous.

- au-dessus du toit, le vent ambiant se caractérise par des vitesses d'air maximales instantanées de 10.50 m/s et une valeur moyenne de 3.35 m/s. Dans la rue canyon en revanche, l'écoulement horizontal fluctue entre 0.00 et 6.30 m/s et présente une vitesse moyenne élevée, d'une valeur de 1.68 m/s,
- la comparaison des vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit indique que les écoulements supérieur et secondaire suivent une corrélation linéaire, fonction de l'angle d'incidence β . Pour tous les angles d'incidence considérés, le coefficient de détermination R^2 est très proche de 0.9, ce qui suggère que l'écoulement dans la rue est entièrement gouverné par l'écoulement imposé au-dessus du toit,
- les roses des vents établies pour différents cas d'incidence parallèle et obliques à l'axe de la rue indiquent par ailleurs un effet de canalisation le long du canyon indépendamment de l'angle d'incidence du vent ambiant au-dessus du toit. Cet effet de canalisation induit par la longueur de la rue se traduit par une accélération de l'écoulement le long de la rue canyon et une direction constante parallèle à l'axe de la rue. La composante le long du canyon domine la circulation du vortex, ce qui réduit fortement les échanges d'air verticaux avec l'air libre au-dessus. La ventilation s'effectue dans ce cas par déplacement advectif.

VII- 2.2.3.2. Les écoulements d'air dans la rue canyon asymétrique.

L'analyse de l'écoulement d'air dans la rue canyon asymétrique implique deux situations différentes selon la direction du vent par rapport aux parois verticales de la rue canyon (Fig. VII- 43) :

- le premier cas correspond à un vent incident soufflant sur le mur le plus haut de la rue canyon, c.-à-d., une configuration de rue asymétrique descendante, avec $h_1/W = 3.47$,
- le second cas correspond à un vent incident soufflant sur le mur le plus bas de la rue canyon, c.-à-d., une configuration de rue asymétrique ascendante, avec $h_2/W = 2.30$.

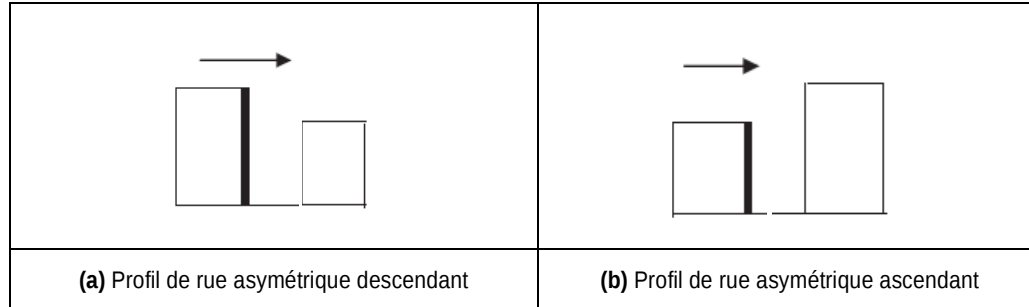


Fig. VII- 43. Schéma d'une configuration de rue asymétrique ascendante et descendante (le sens de la flèche indique la direction du vent).

Caractéristiques générales de l'écoulement dans la rue canyon asymétrique.

Les caractéristiques des écoulements d'air dans la rue canyon asymétrique sont analysées à partir des données de la campagne d'hiver de Février 2005 caractérisée par des vents dominants de direction Ouest. Pour ces conditions de vent de référence, le versant Nord sur lequel est située la rue canyon asymétrique est face au vent.

Les roses des vents représentées par les figures (VII- 44) et (VII- 45) illustrent les caractéristiques de l'écoulement ambiant au-dessus du toit et dans la rue canyon.

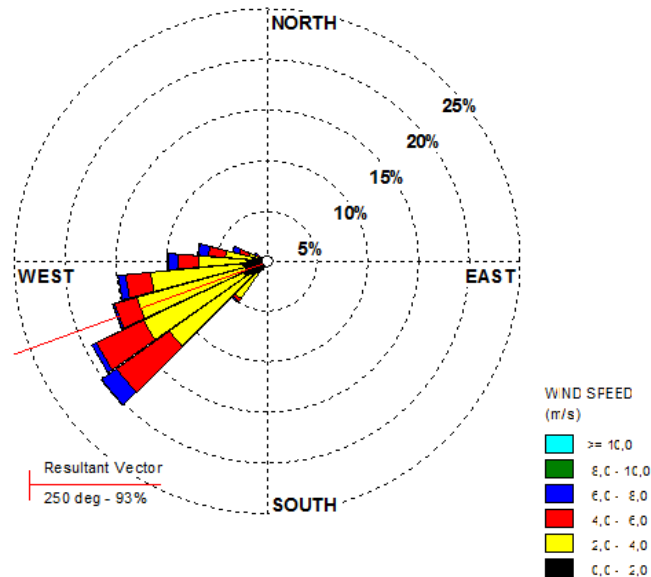


Fig. VII- 44. Rose des vents au-dessus du toit de la rue asymétrique établie sur la base de 4860 données (Pt.3, campagne février 05).

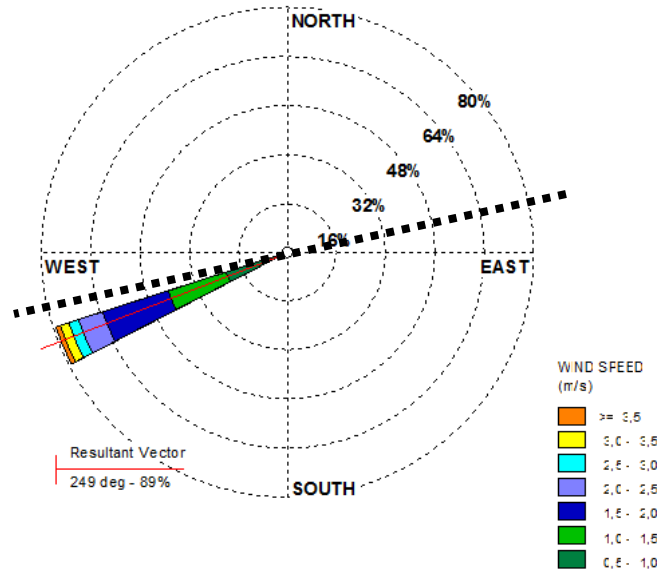


Fig. VII- 45. Rose des vents dans la rue asymétrique établie sur la base de 4860 données (Pt.3, campagne février 05).

Au-dessus du toit, les vents sont de direction dominante Sud-ouest et présentent une vitesse moyenne égale à 3.30 m/s et des valeurs instantanées maximales de 9.50 m/s. Ces conditions, très proches de celles mesurées au niveau de la rue symétrique de référence ($v_{\text{moy}}=3.35$ m/s, $v_{\text{max}}=10.50$ m/s), permettent l'établissement d'une étude comparative entre les écoulements d'air dans les deux canyons asymétrique et symétrique de référence.

L'intensité de l'écoulement horizontal mesurée dans la rue canyon fluctue entre 0.00 et 4.82 m/s avec une vitesse moyenne de 1.23 m/s. La direction dominante est oblique, faisant un angle de 22° avec l'axe de la rue. La structure de l'écoulement est de ce fait fondamentalement différente de celle observée dans le cas de la rue symétrique de référence qui, rappelons le, est caractérisée par un régime d'écoulement bidimensionnel, résultat d'un important phénomène de canalisation. Les différences observées entre la structure des écoulements dans les deux rues ne peuvent être dues à l'effet de la longueur (L) vu que les deux canyons urbains sont caractérisés par un rapport L/W important, supérieur à 20.

Une analyse spécifique de la vitesse du vent et sa direction dans la rue canyon asymétrique pour différents angles d'incidence est présentée ci-dessous :

i) Conditions de vents parallèles à l'axe de la rue.

L'incidence parallèle à l'axe de la rue correspond à des vents libres au-dessus du toit de directions Est ($70-90^\circ$) et Ouest ($250-270^\circ$) (Fig. VII- 46). Les conditions de vent parallèles rencontrées correspondent à des vents soufflant de l'Ouest (données de la campagne de mesure de février 05). Ces vents représentent 28.84% des vents totaux et se caractérisent par une vitesse de vent maximale et moyenne respective de 9.50 et 3.15 m/s.

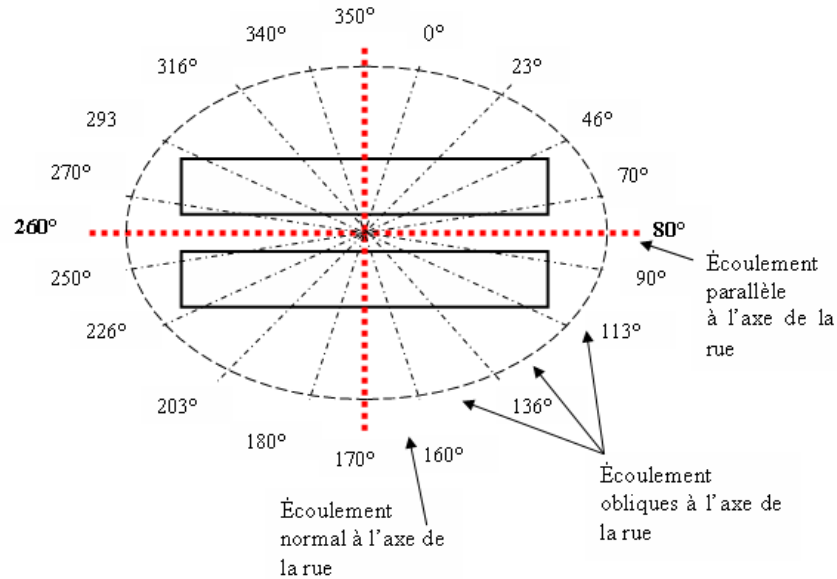


Fig. VII- 46. Classification des angles d'incidence du vent ambiant par rapport à l'axe de la rue canyon asymétrique (Pt.3).

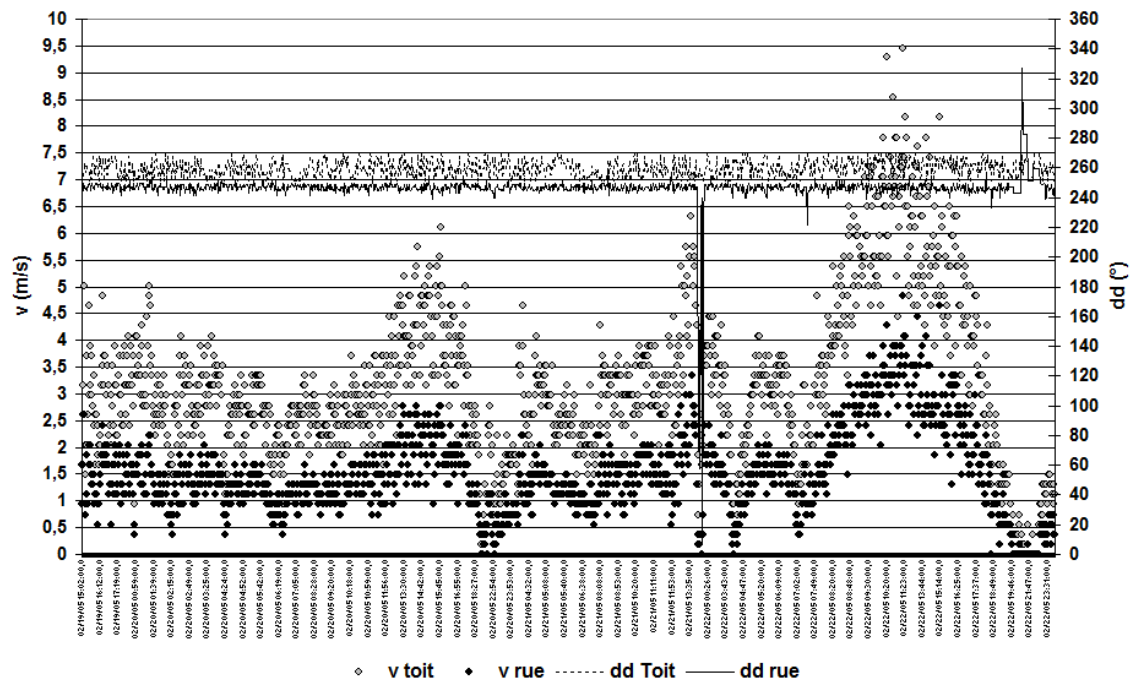


Fig. VII- 47. Variation des écoulements d'air au-dessus du toit et dans la rue asymétrique : cas d'une incidence parallèle à l'axe de la rue (Février 2005).

La figure (VII- 47) donne la variation des écoulements d'air mesurés dans la rue canyon et au-dessus du toit pour des conditions de vents parallèles.

Dans la rue canyon, l'écoulement horizontal observé présente des vitesses d'air très élevées, d'une valeur maximale instantanée d'environ 5.00 m/s et d'une intensité moyenne de 1.50 m/s. L'écoulement dans la rue est donc tout aussi important que celui mesuré dans la rue canyon symétrique de référence.

Par ailleurs, tel que c'est illustré sur la figure (VII- 48.), la comparaison des vitesses d'air dans la rue canyon et au-dessus du toit révèle une corrélation significative entre les écoulements supérieur et secondaire. Il peut être observé que l'écoulement dans la rue canyon est lié à l'écoulement imposé au-dessus du toit par la relation linéaire suivante :

$$y = 0,5175x - 0,1177, R^2 = 0,9396. \quad (\text{VII- 6})$$

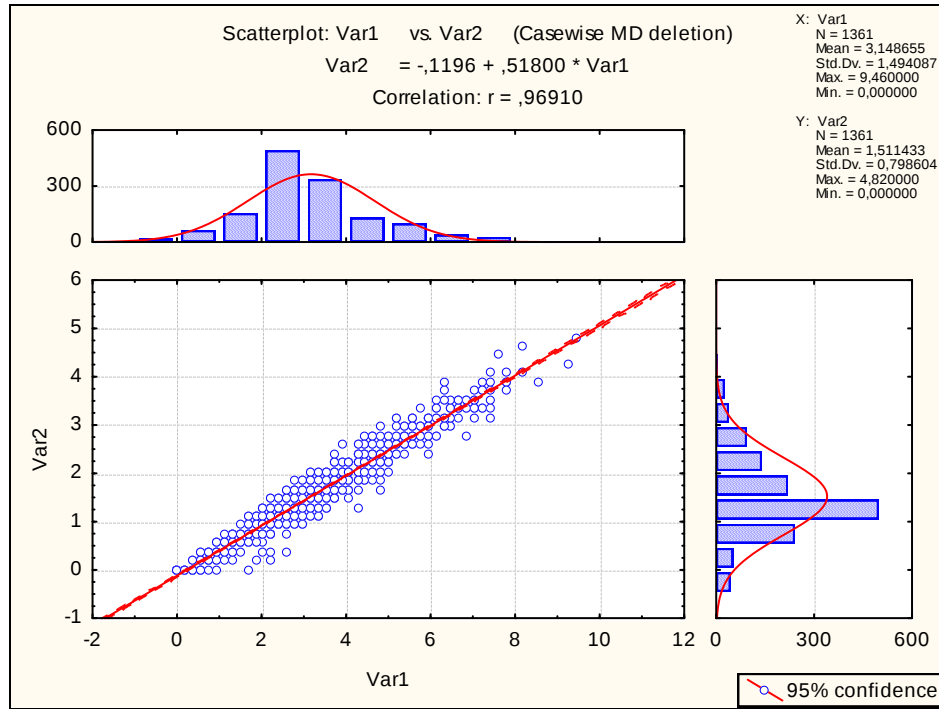


Fig. VII- 48. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue asymétrique dans le cas d'une incidence parallèle à l'axe de la rue (Février 2005).

La valeur du coefficient de détermination R^2 , très élevée et supérieure à 0.9, permet d'expliquer entièrement le comportement de l'écoulement dans la rue asymétrique en fonction de l'écoulement mesuré au-dessus de la canopée urbaine. L'écoulement dans la rue est bien une circulation secondaire générée par l'écoulement imposé au dessus du toit. La valeur du facteur de réduction obtenue, d'environ 0.52, est tout aussi élevée que celle déterminée dans le canyon de référence.

En ce qui concerne la direction de l'écoulement dans la rue canyon, la rose des vents (Fig. VII- 49) indique que dans 85.75% des cas, l'écoulement est dans le même sens que le vent incident, dans une direction faisant un angle de 22° par rapport à l'axe de la rue canyon. Cette direction oblique de l'écoulement peut suggérer l'existence d'un écoulement tridimensionnel qui favorise les échanges avec l'air au-dessus de la canopée en comparaison avec le cas d'une rue de configuration symétrique. Néanmoins, ces résultats doivent être pris avec précaution dans la mesure où la structure de l'écoulement est déduite mais jamais observée.

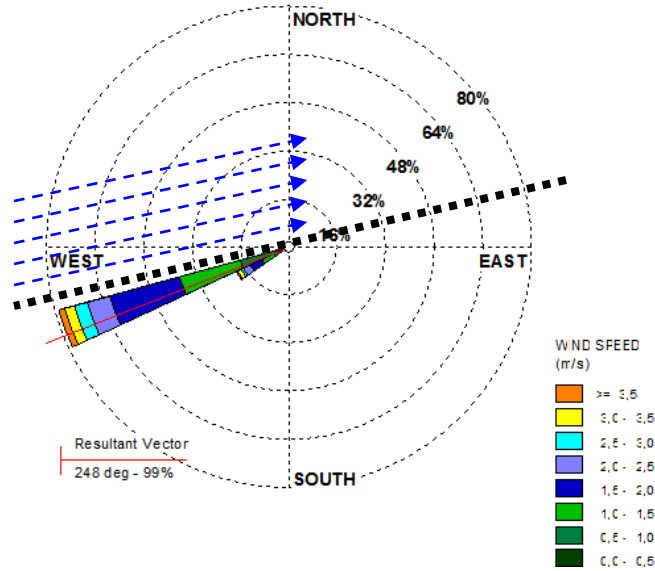


Fig. VII- 49. Rose des vents dans la rue asymétrique établie sur la base de 1361 données : cas d'un vent ambiant parallèle (campagne février 05).

ii) Conditions de vents obliques à l'axe de la rue.

a. Cas de la rue canyon de configuration descendante.

Les vents incidents soufflant sur le mur le plus haut de la rue correspondent aux vents de secteur Sud-ouest. Ces vents sont caractérisés par une vitesse moyenne de 3.00 à 3.50 m/s et des valeurs maximales instantanées de 8.00 à 8.50 m/s.

La direction de ces vents, comprise entre 203 et 250° (S-SO et O-SO), correspond à deux angles d'incidence oblique par rapport à l'axe de la rue canyon, en l'occurrence :

- $dd_{\text{toit}} = 226-250^\circ$, $\beta = 22^\circ \pm 10^\circ$,
- $dd_{\text{toit}} = 203-226^\circ$, $\beta = 44^\circ \pm 10^\circ$.

➤ Cas d'un angle d'incidence oblique de 22° à l'axe de la rue.

Dans la rue canyon, l'écoulement se caractérise par une intensité moyenne de 1.17 m/s et des valeurs maximales instantanées de l'ordre de 4.00 m/s. Ces valeurs de vitesses d'air sont inférieures à celles mesurées dans le canyon de référence où, pour de mêmes conditions de vent ambiant au-dessus du toit ($v_{\text{Toit}} = 3.50$ m/s), l'intensité moyenne dans la rue est égale à 1.85 m/s.

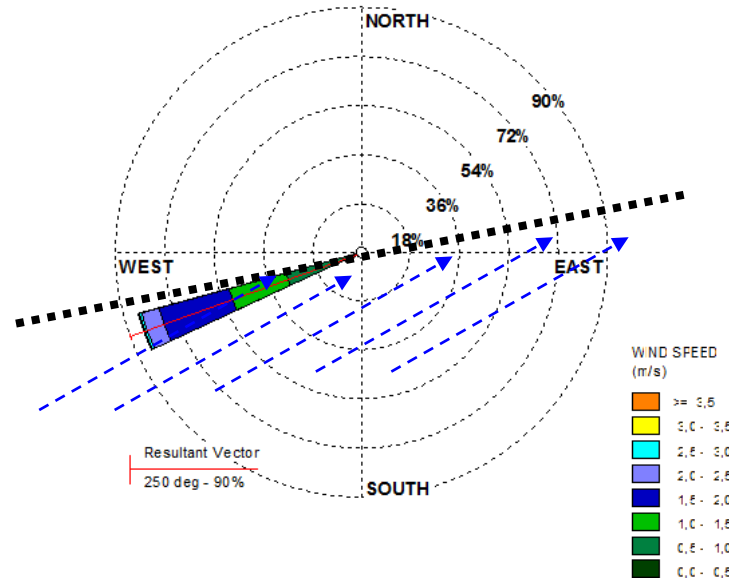


Fig. VII- 50. Rose des vents dans la rue asymétrique de configuration descendante établie sur la base de 2051 données : cas d'une incidence oblique de $22^\circ \pm 10^\circ$ à l'axe de la rue (Pt.3, campagne février 05).

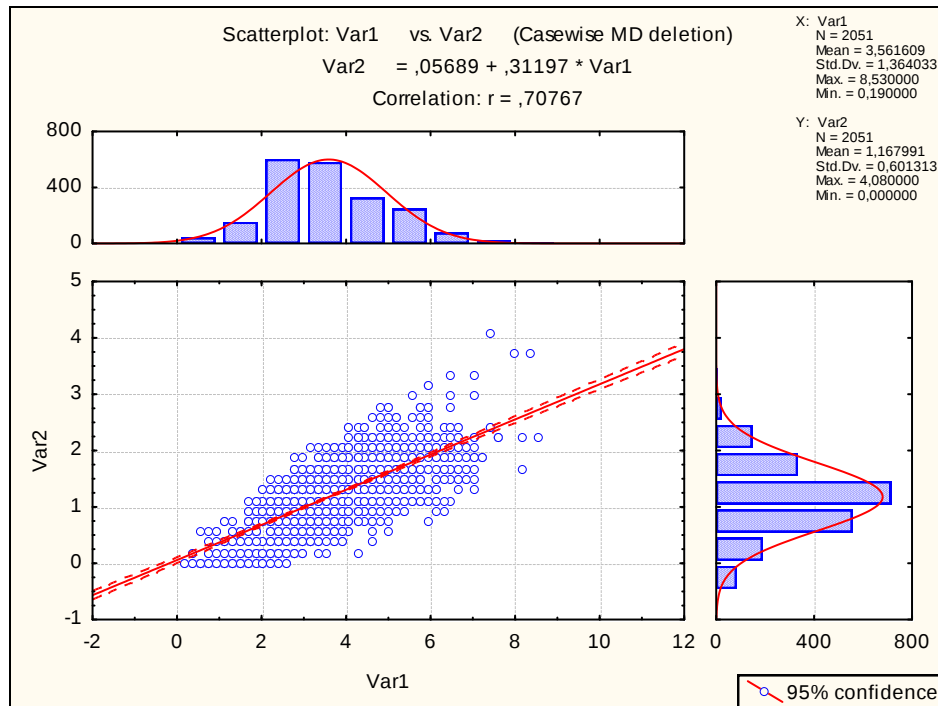


Fig. VII- 51. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue asymétrique de configuration descendante dans le cas d'une incidence oblique de $22 (\pm 10^\circ)$ à l'axe de la rue (Pt.3, Février 2005).

La comparaison des vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit ne révèle par ailleurs aucune corrélation empirique entre les deux écoulements, le coefficient de détermination R^2 étant égal à 0.50 (Fig. VII- 51).

L'inexistence d'une corrélation entre les deux écoulements dans la rue canyon et au-dessus du toit ne peut être attribuée aux conditions du vent ambiant vu que pour ces mêmes conditions de

vent incident ($v=3.55$ m/s), le couplage entre les écoulements supérieur et secondaire est établi dans la rue canyon de référence (Pt.1, $H/W=2.73$).

En fait, la faible corrélation obtenue entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue canyon est due à la configuration de rue descendante qui réduit le taux de pénétration du vent dans le canyon urbain. La réduction du vent s'opère de manière brusque, passant d'environ 0,52 pour des directions de vent parallèles à environ 0,31 pour des vents obliques de 22° ($\pm 10^\circ$). Cette forte réduction du vent est encore plus accentuée dans le cas d'un angle d'incidence oblique de 44° ($\pm 10^\circ$).

➤ Cas d'un angle d'incidence oblique de 44° à l'axe de la rue ($203-226^\circ$).

Pour un vent incident d'une vitesse moyenne de 3.50 m/s, l'écoulement dans la rue canyon est caractérisé par des vitesses d'air très faibles, d'une valeur moyenne de 0.55 m/s. Dans 60.00% des cas, l'écoulement est inférieur à 0.50 m/s et seulement 12.00% sont supérieurs à 1.00 m/s (Fig. VII- 52). Ces vitesses d'air sont nettement plus faibles que celles mesurées dans la rue de référence et représentent environ 0.26 de la vitesse du vent ambiant imposé au-dessus du toit.

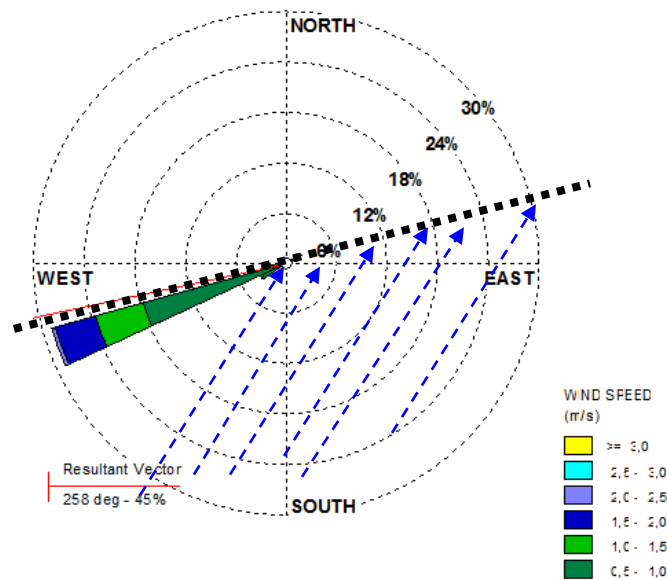


Fig. VII- 52. Rose des vents dans la rue asymétrique de configuration descendante établie sur la base de 465 données : cas d'une incidence oblique de 44° ($\pm 10^\circ$) à l'axe de la rue (Pt.3, campagne février 05).

Les résultats obtenus dans les deux cas d'incidence oblique (22° et 44° ($\pm 10^\circ$)) confirment les conclusions de Theurer et al. (1992) qui démontrent que la différence de hauteur des bâtiments peut changer de manière significative le champ d'écoulement dans la rue canyon. En fait, des études précédentes conduites par modélisation numérique (Baik et al. 2000, Assimakopoulos et al. 2000, Assimakopoulos et al. 2003, Huang et al. 2002) ont démontré que dans le cas d'une configuration de rue "descendante", et pour un angle d'incidence perpendiculaire à l'axe de la rue, un système de double vortex s'établit dans la rue, avec un premier vortex couvrant la partie supérieure de la rue et un vortex secondaire généré à l'intérieur du canyon. Le vortex supérieur ressemble dans une certaine mesure à un écoulement de rugosité isolé tandis que le vortex inférieur, de faible intensité, se caractérise par une sorte de stagnation. Cette structure complexe à double vortex a pour effet de réduire les échanges d'air locaux avec l'écoulement libre au-dessus du toit et la ventilation de la rue est de ce fait inhibée. Dans la présente étude, aucune donnée sur une incidence perpendiculaire n'est disponible. Il peut néanmoins être affirmé que

dans le cas d'une incidence oblique, la circulation de l'écoulement horizontal est sévèrement réduite dans la rue asymétrique de configuration descendante. La vitesse d'air moyenne est plus intense dans la rue de référence de même hauteur de bâtiments que dans la rue asymétrique de configuration descendante.

b. Cas de la rue canyon de configuration ascendante.

La configuration de rue ascendante correspond à des vents incidents en provenance du secteur Nord-ouest et soufflant sur le mur le plus bas de la rue canyon. La vitesse moyenne de ces vents est de 3.65-3.94 m/s et les valeurs maximales instantanées sont de l'ordre de 8.50 m/s. La direction de ces vents, comprise entre 270 et 340° (O-NO et N-NO), induit deux angles d'incidence oblique par rapport à l'axe de la rue, en l'occurrence :

- dd.toit = 270-293°, $\beta = 22^\circ \pm 10^\circ$,
- dd.toit = 293-316°, $\beta = 44^\circ \pm 10^\circ$,

➤ Cas d'un angle d'incidence oblique de 22° à l'axe de la rue.

L'écoulement horizontal mesuré dans la rue de configuration ascendante présente des vitesses d'air plus élevées que celles mesurées dans le premier cas de configuration descendante. La vitesse moyenne est de 1.66 m/s tandis que l'intensité maximale instantanée atteint des valeurs de 8.20 m/s.

La comparaison directe des vitesses d'air dans la rue canyon et au-dessus du toit indique une corrélation significative entre les deux écoulements. Dans la rue canyon, l'écoulement horizontal est lié à l'écoulement horizontal imposé au-dessus du toit par la relation linéaire suivante :

$$y = 0,4827x - 0,0887, \text{ avec } R^2 = 0,8988. \quad (\text{VII- 7}).$$

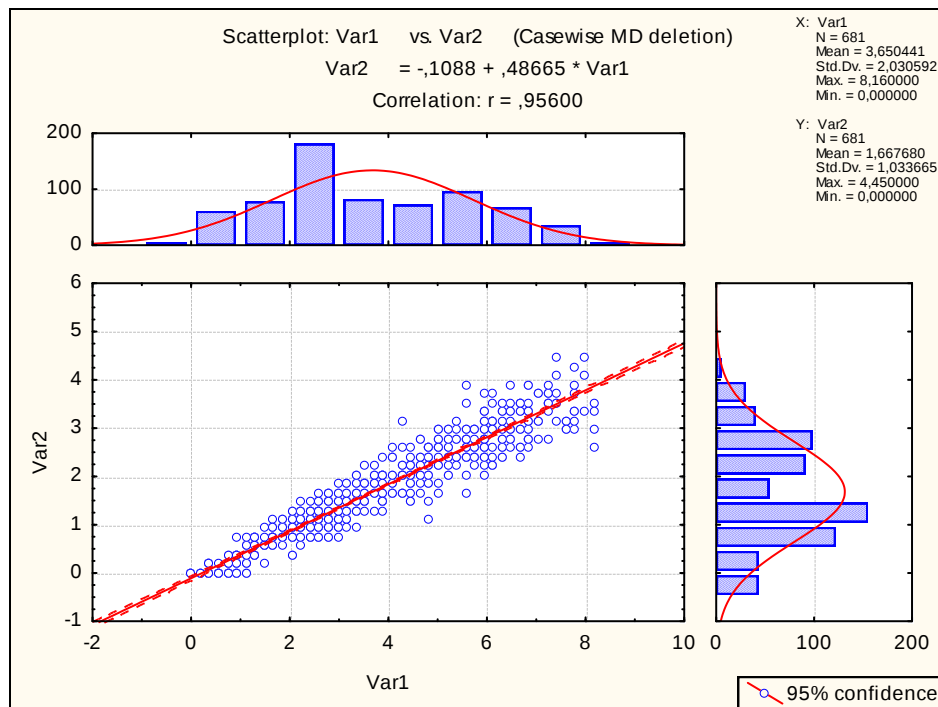


Fig. VII- 53. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue asymétrique de configuration ascendante dans le cas d'une incidence oblique de 22° ($\pm 10^\circ$) à l'axe de la rue (Février 2005).

Le coefficient de détermination R^2 , d'une valeur proche de 0.9, indique que l'écoulement dans la rue est entièrement gouverné par l'écoulement imposé au-dessus du toit. Le facteur de réduction du vent, égal à 0.48, montre par ailleurs que la réduction du vent s'opère de manière progressive en comparaison avec celle produite dans la configuration de rue descendante. L'intensité de l'écoulement d'air horizontal est de ce fait plus importante dans le cas d'une configuration de rue ascendante. Pour des conditions de vents ambiants obliques similaires (3.50 m/s), la vitesse d'air moyenne dans la rue ascendante est d'environ 0.50 m/s plus intense que dans le cas de la configuration descendante. Les écarts de vitesse d'air enregistrés dans les deux types de configuration de rue sont toutefois plus importants dans le cas d'une incidence oblique de 44° ($\pm 10^\circ$).

➤ Cas d'un angle d'incidence oblique de 44° à l'axe de la rue.

Dans la rue canyon, l'écoulement horizontal moyen est nettement plus important que celui mesuré dans la rue canyon de configuration descendante. Pour des conditions de vent ambiant au-dessus du toit presque similaires (3.95 vs 3.50 m/s), la vitesse d'air moyenne mesurée dans la rue de configuration ascendante est de 1.34 m/s alors qu'elle n'excède pas la valeur de 0.55 m/s dans le cas de la configuration descendante.

L'étude de la corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue (Fig. VII- 54) indique l'établissement d'un couplage entre les deux écoulements supérieur et secondaire. Dans la rue canyon, l'écoulement est lié à l'écoulement imposé au-dessus du toit par la relation linéaire suivante :

$$y = 0,3954x - 0,2186, R^2 = 0,7997. \quad (\text{VII- 8})$$

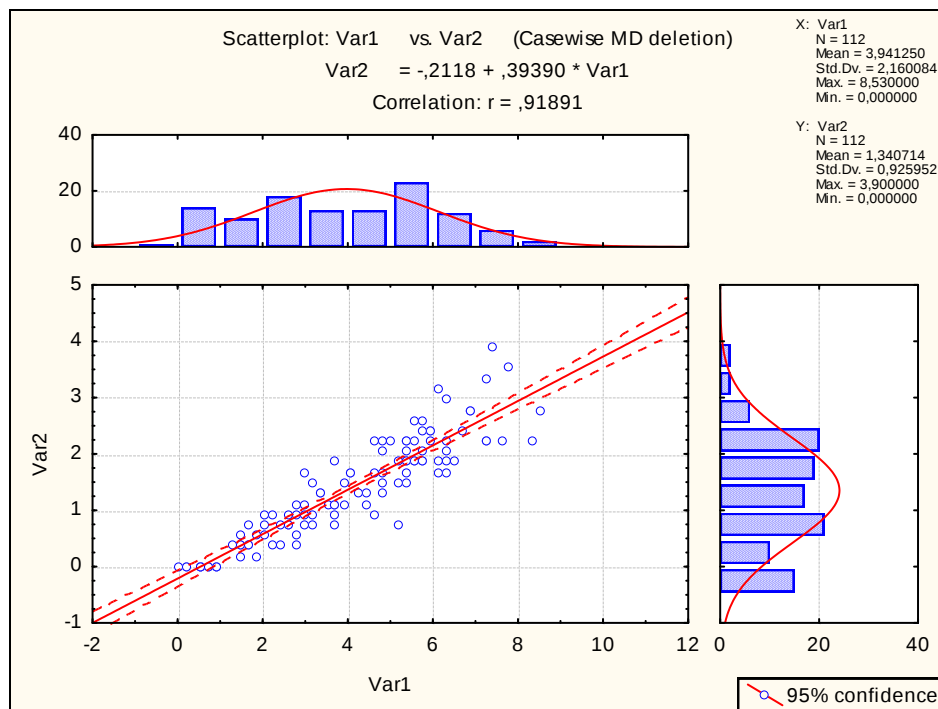


Fig. VII- 54. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue asymétrique de configuration ascendante dans le cas d'une incidence oblique de 44° ($\pm 10^\circ$) à l'axe de la rue (Février 2005).

La valeur du coefficient de détermination R^2 , d'une valeur proche de 0.8 (0,79), permet de valider l'équation statistique obtenue et suggère que l'écoulement dans la rue est entièrement gouverné par l'écoulement imposé au-dessus du toit. Le facteur de réduction déterminé, d'une valeur de 0.39, est supérieur à celui obtenu dans le cas d'une configuration de rue descendante (0.26). Ces résultats permettent de confirmer l'hypothèse selon laquelle la pénétration du vent est plus importante lorsque la façade la plus basse est face au vent (Assimakopoulos et al. 2000/2003, Huang et al. 2002).

Il est cependant important de noter que l'intensité de l'écoulement horizontal mesurée dans la rue de configuration ascendante n'est pas plus importante que celle enregistrée dans le canyon de référence. De très faibles écarts sont en effet observés entre les deux écoulements d'air, avec les valeurs les plus élevées enregistrées dans le canyon symétrique de référence. Les facteurs de réduction sont d'une valeur très proche (tableau VII- 7).

Tableau VII- 7. Récapitulatif des corrélations entre les écoulements au-dessus du toit et dans la rue asymétrique (Pt.3), cas de vents forts à moyens, de direction Ouest. (Février 05).

Configuration de la rue	Conditions au-dessus du toit		Direction	Corrélation	R^2	Nr. de données
	V_{moy} (m/s)	Angle d'incidence				
Rue asymétrique	3.15	$\beta = 0^\circ \pm 10^\circ$	parallèle	$y = 0,5175x - 0,1177$	$R^2 = 0,94.$	1361
configuration de rue descendante	3.55	$\beta = 22^\circ \pm 10^\circ$	Parallèle fluctuant	$y = 0,312x + 0,0569$	$R^2 = 0,50$	2051
	3.50	$\beta = 44^\circ \pm 10^\circ$	Parallèle fluctuant	$y = 0,2681x - 0,3579$	$R^2 = 0,70$	407
configuration de rue ascendante	3.65	$\beta = 22^\circ \pm 10^\circ$	oblique	$y = 0,4827x - 0,0887$	$R^2 = 0,89.$	681
	3.94	$\beta = 44^\circ \pm 10^\circ$	oblique	$y = 0,3954x - 0,2186$	$R^2 = 0,79.$	112
Rue canyon symétrique de référence	3.20	$\beta = 0^\circ \pm 10^\circ$	parallèle	$y = 0,5204x + 0,1465$	$R^2 = 0,87$	369
	3.56	$\beta = 22^\circ \pm 10^\circ$	parallèle	$y = 0,4746x + 0,1604$	$R^2 = 0,87$	449
	3.50	$\beta = 44^\circ \pm 10^\circ$	parallèle	$y = 0,4089x + 0,1722$	$R^2 = 0,89$	576

En fait, la différence fondamentale ne réside pas dans l'intensité des écoulements mais plutôt dans leur direction à l'intérieur des rues canyons. Dans la rue symétrique de référence de rapport $H/L=9.5$ ($L/W=25.75$), un effet de canalisation et une direction parallèle à l'axe de la rue se produit quelque soit l'angle d'incidence du vent ambiant. En revanche, dans la rue asymétrique de configuration ascendante et de rapport H/L proche (11.60) ($L/W=33.65$), l'écoulement horizontal présente une direction oblique par rapport à l'axe de la rue canyon. Cet effet est particulièrement visible dans le cas d'une incidence oblique de $44^\circ (\pm 10^\circ)$.

Dans le cas d'un angle d'attaque de $44^\circ (\pm 10^\circ)$ en effet, l'analyse de la distribution de la direction de l'écoulement horizontal dans la rue indique que dans 65.20% des cas, l'écoulement est réfléchi sur la façade sous le vent, faisant un angle oblique avec l'axe de la rue canyon. Dans 54.45% des cas, la direction de l'écoulement fait un angle de 22° avec l'axe de la rue tandis que 10.75% des écoulements présentent une direction oblique de $44^\circ (\pm 10^\circ)$.

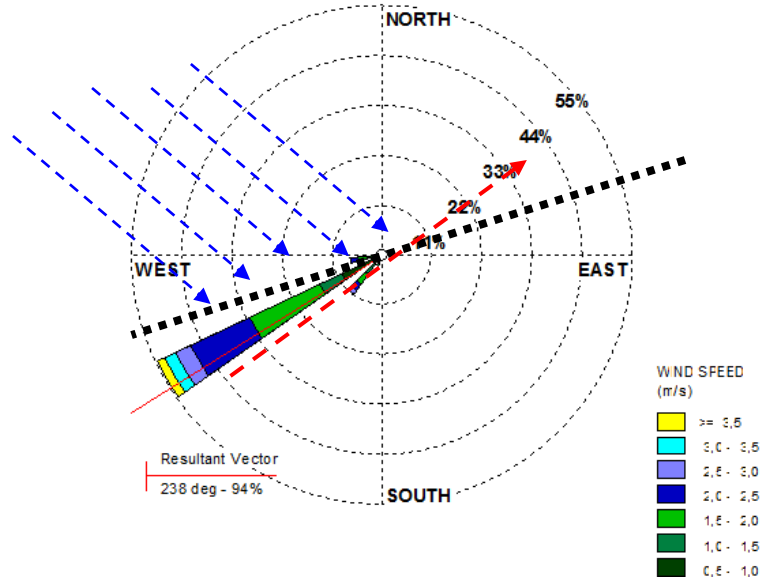


Fig. VII- 55. Rose des vents dans la rue asymétrique de configuration ascendante établie sur la base de 112 données : cas d'une incidence de $44^\circ (\pm 10^\circ)$: l'écoulement dans la rue est réfléchi sur la façade sous le vent faisant un angle de 22° (54.45%) et 44° (10.75%) avec l'axe de la rue. L'effet de canalisation est très faible, avec à peine 7.15% des écoulements d'air (février 05)

Sachant que la direction oblique de l'écoulement est expliquée comme une superposition linéaire des composantes parallèle et perpendiculaire du vent au-dessus du toit, il peut être avancé que l'écoulement dans la rue canyon asymétrique est le produit d'une circulation de vortex verticale et une canalisation le long de la rue. Malgré l'importante longueur L de la rue asymétrique, la composante le long du canyon ne domine pas la circulation du vortex et la ventilation de la rue semble s'effectuer par échanges d'air verticaux et déplacement horizontal. Ces résultats sont contraires à ceux obtenus dans le cas de la rue symétrique de référence où l'effet de canalisation domine. L'effet de la hauteur des bâtiments face au vent semble "dominer" l'effet de la longueur de la rue canyon. Ces résultats suggèrent que la configuration ascendante améliorerait les échanges d'air verticaux avec la couche au-dessus, et ce même dans la rue canyon la plus longue. Ces conclusions sont en accord avec les modélisations numériques de Assimakopoulos et al. (2000/2003) et l'étude conduite en soufflerie atmosphérique par Dabberdt et Hoydysh (1991) qui indiquent que pour une incidence perpendiculaire à l'axe de la rue, les propriétés de ventilation dans une rue asymétrique "ascendante" sont plus importantes que celles d'une rue symétrique.

En résumé, l'analyse des données mesurées dans la rue canyon de profil asymétrique et de prospect moyen $H/W=2.89$ indique que les caractéristiques de l'écoulement dans la rue canyon varient selon l'orientation du vent par rapport aux bâtiments bordant la rue canyon. Les résultats montrent que pour une incidence oblique de 22° et $44^\circ (\pm 10^\circ)$, l'intensité de l'écoulement est plus importante dans le cas d'une configuration ascendante que dans celui d'une configuration descendante :

- lorsque le vent incident souffle sur la façade la plus basse (configuration ascendante), le coefficient de détermination R^2 est très proche de 0.9 et le facteur de réduction diminue

progressivement, passant d'environ 0,52 pour des directions de vent parallèles à environ 0,39 pour des vents obliques de $44^\circ (\pm 10^\circ)$,

- lorsque le vent souffle sur la façade la plus haute en revanche (configuration descendante), R^2 est relativement faible, avec des valeurs comprises entre 0.5 et 0.7, révélant une faible corrélation entre les deux écoulements supérieur et secondaire. La réduction approche 0.31 dans le cas de vent incident de $22^\circ (\pm 10^\circ)$ tandis qu'elle n'excède pas 0.26 pour des angles d'incidence de 44° .

Par ailleurs, la comparaison avec la rue de référence révèle que dans le cas d'une incidence oblique, la structure de l'écoulement est fondamentalement différente selon qu'il s'agisse d'une configuration de rue canyon symétrique ou asymétrique :

- dans la rue canyon longue et symétrique, la composante parallèle de l'écoulement domine la circulation de vortex et l'écoulement est canalisé le long de la rue canyon. La ventilation s'effectue essentiellement par déplacement advectif,
- la configuration ascendante de la rue canyon accentue en revanche la circulation verticale de l'écoulement. La ventilation de la rue s'effectue à la fois par déplacement horizontal et circulation verticale.

Ces résultats confirment les études précédentes conduites par simulation numérique et en laboratoire (Dabberdt et Hoydysh 1991, Theurer et al. 1992, Baik et al. 2000, Huang et al. 2002, Assimakopoulos et al. 2000/2003, Savory et al. 2004) sur le rôle de la géométrie des rues asymétriques dans le modèle des écoulements d'air. Dans ces études cependant, seule l'incidence perpendiculaire dans des modèles 2D de rues canyons asymétriques a été analysée. Aucune donnée sur l'écoulement horizontal n'est valable.

VII- 2.2.4. Effet de la forme courbe des rues canyons.

Comme certaines rues du Ksar sont légèrement courbes, la direction du vent n'est jamais exactement perpendiculaire à l'axe de la rue. Ceci résulte dans des déviations de la direction de l'écoulement incident par rapport à l'axe de la rue, ce qui permet une meilleure pénétration du vent dans le canyon. La structure de l'écoulement dans la rue canyon peut même changer fondamentalement et induire des modèles de ventilation différents : une légère déviation du vent de la direction perpendiculaire modifie la structure de l'écoulement qui devient canalisé le long de la rue canyon.

Tel qu'il est présenté par la rose des vents (Fig. VII- 56), l'écoulement mesuré dans la rue située sur le versant Nord est canalisé le long de la rue alors que le vent incident est perpendiculaire à l'axe du canyon urbain. Pour un vent ambiant d'une vitesse moyenne de 2.60 m/s, l'intensité de l'écoulement dans la rue est de 0.95 m/s, ce qui représente environ 50% du vent libre au-dessus du toit.

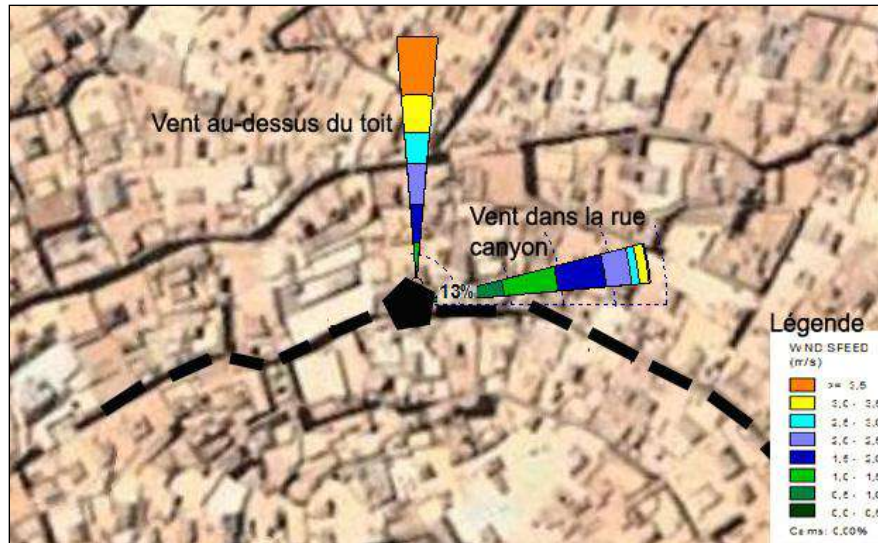


Fig. VII- 56. Rose des vents dans la rue de forme courbe dans le cas d'un angle d'incidence perpendiculaire à l'axe de la rue (Pt.3).

Il s'avère ainsi que les mouvements d'air sont induits par la topographie du site, l'étroitesse et la longueur des rues, l'irrégularité de leur tracé, la nature du profil ainsi que l'orientation de la trame urbaine par rapport aux vents dominants. Mais, d'une rue à l'autre d'un même quartier, et au sein d'une même rue, des phénomènes aérodynamiques, très localisés, existent également (effet de coin, effet de venturi, effet de sillage). Ils sont générés par des morphologies urbaines particulières. Le passage couvert, dispositif urbain représentatif des ksour du Sahara, constitue une de ces particularités urbaines qui nécessite une étude plus exhaustive.

VII- 2.2.5. Effets du passage couvert.

Un fragment urbain est choisi pour une étude exhaustive et a pour but la mise en évidence des effets aérodynamiques du passage couvert (PC). Le fragment urbain sélectionné est constitué de deux rues partiellement couvertes. La première rue est concentrique et est couverte en son milieu par un PC d'une longueur de 15.50m tandis que la seconde est une radiale et présente la particularité d'être ponctuée par la présence de trois passages couverts successifs d'une longueur respective de 7.00, 5.00 et 7.00 mètres. La partie délimitée entre deux des passages couverts constitue un espace découvert entouré de bâtiments, d'une longueur de 17.50 mètres. C'est au milieu de ce tronçon de rue découvert que les mesures sont effectuées (Protocole de mesure, Chap. VI).

Caractéristiques des écoulements d'air dans le fragment urbain.

La figure (VII- 57) présente la distribution horizontale des écoulements d'air dans le fragment urbain comportant des PC.

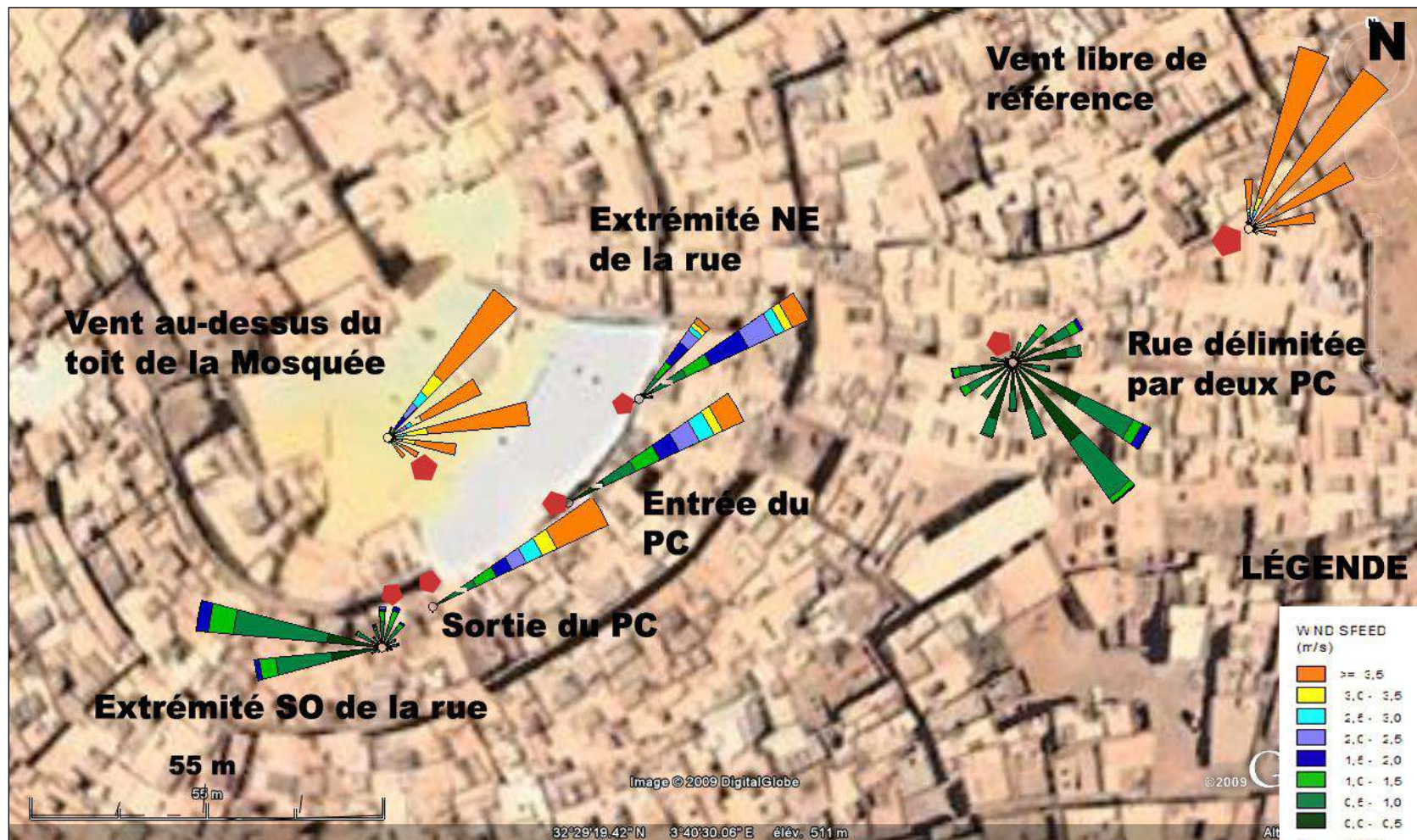


Fig. VII- 57. Distribution horizontale des écoulements d'air le long du fragment urbain comportant des PC (roses des vents établies chacune sur la base de 3198 données, septembre 2005).

La distribution des écoulements d'air à travers le fragment urbain indique une différence fondamentale dans les deux rues analysées. Tandis que des écoulements importants sont observés dans la rue concentrique, des mouvements d'air fortement fluctuants et d'une faible intensité caractérisent le tronçon de rue délimitée par deux PC.

L'influence du PC se manifeste ainsi de deux manières :

- un premier phénomène local qui se traduit par une accélération de l'air à l'intérieur du passage couvert situé dans la rue concentrique,
- un second phénomène qui se traduit par une forte réduction de la vitesse d'air à l'extérieur du PC, à l'extrémité SO de la rue concentrique ainsi que dans le tronçon de rue délimitée par deux passages couverts, ces derniers constituant un obstacle horizontal à la pénétration du vent à partir de la couche au-dessus.

VII- 2.2.5.1. Effet de survitesse et d'accélération à l'intérieur du PC.

i) Conditions du vent au-dessus du toit de la mosquée.

L'analyse du vent au-dessus du toit de la mosquée indique des vitesses d'air comprises entre 0.00 et 11.10 m/s, avec une intensité moyenne d'environ 4.00 m/s (3.92 m/s). La direction dominante de ces vents est Nord-est, dans une direction parallèle à l'axe de la rue concentrique et du passage couvert.

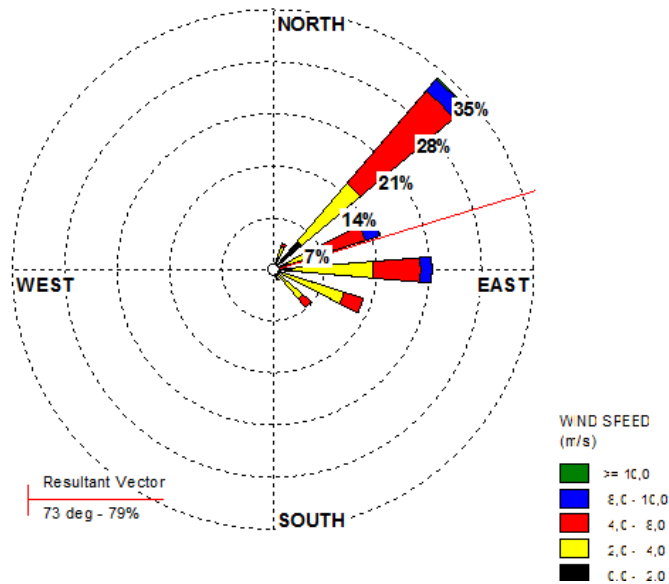


Fig. VII- 58. Rose des vents au-dessus du toit de la mosquée établie sur la base de 5456 données (campagne septembre 05).

Comme le vent dominant est de direction Nord-est, il s'engouffre dans le PC à partir de son extrémité Nord-est et ressort à partir de son extrémité Sud-ouest (Fig. VII- 57). On peut considérer dans ce cas l'extrémité Nord-est comme étant l'entrée du PC tandis que l'extrémité Sud-ouest représente sa sortie.

ii) Les écoulements d'air dans la rue concentrique.

La figure (VII- 59) illustre les vitesses d'air moyennes mesurées le long de la rue concentrique comportant le passage couvert (PC).

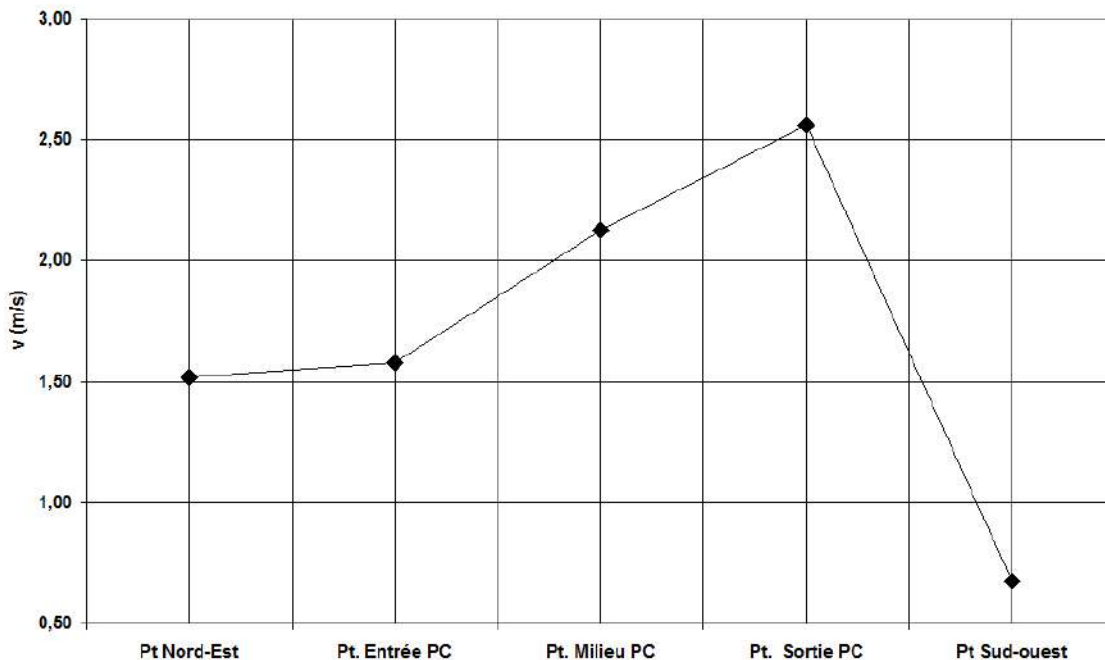


Fig. VII- 59. Comparaison de la vitesse moyenne horizontale le long du fragment urbain comportant le PC (données septembre 2005).

La comparaison des écoulements d'air en différents points de mesure le long de la rue canyon révèle des vitesses d'air moyennes relativement voisines au niveau de l'extrémité Nord-est et à l'entrée du PC tandis qu'un phénomène de sur vitesse se produit à l'intérieur même du PC. Ainsi, alors que le vent moyen mesuré dans le tronçon de rue Nord-est est d'environ 1.60-1.70 m/s, la vitesse d'air moyenne atteint une valeur de 2.20 m/s au milieu du PC. C'est toutefois à la sortie Sud-ouest du PC que les vitesses d'air les plus élevées sont mesurées avec une valeur moyenne de 2.70 m/s. Les vitesses de vent instantanées enregistrées en ce dernier point de mesure peuvent être aussi importantes que celles mesurées au-dessus du toit et atteindre des valeurs maximales de 12.50 m/s. C'est ce qu'on appelle la zone de jet. Après cette zone, l'air se détend et les vitesses chutent. L'extension spatiale de ce phénomène d'accélération du vent demeure en effet limitée vu qu'une décélération du vent se produit à la sortie du PC. Les vitesses d'air moyennes mesurées à une distance de 12.00 mètres à partir de l'extrémité Sud-ouest du PC sont identiques à celles observées dans le tronçon de rue Nord-est.

Ce phénomène, très local, se produit même lorsque les vents sont faibles, moins de 2.00 m/s en moyenne au-dessus des toits. Dans ces conditions, à la différence des rues Nord-est et Sud-ouest découvertes où les écoulements d'air moyens n'excèdent pas les valeurs respectives de 0.30 et 0.15 m/s, des mouvements d'air, d'une intensité moyenne de 0.82 m/s et d'une valeur instantanée maximale de 2.25 et 2.77 m/s, sont mesurés sous le passage couvert et au niveau de sa sortie Sud-ouest (Fig. VII- 60). Ces brises légères, fortement appréciées en été, participent de manière non négligeable à la ventilation de la rue et à l'amélioration du confort thermique des piétons.

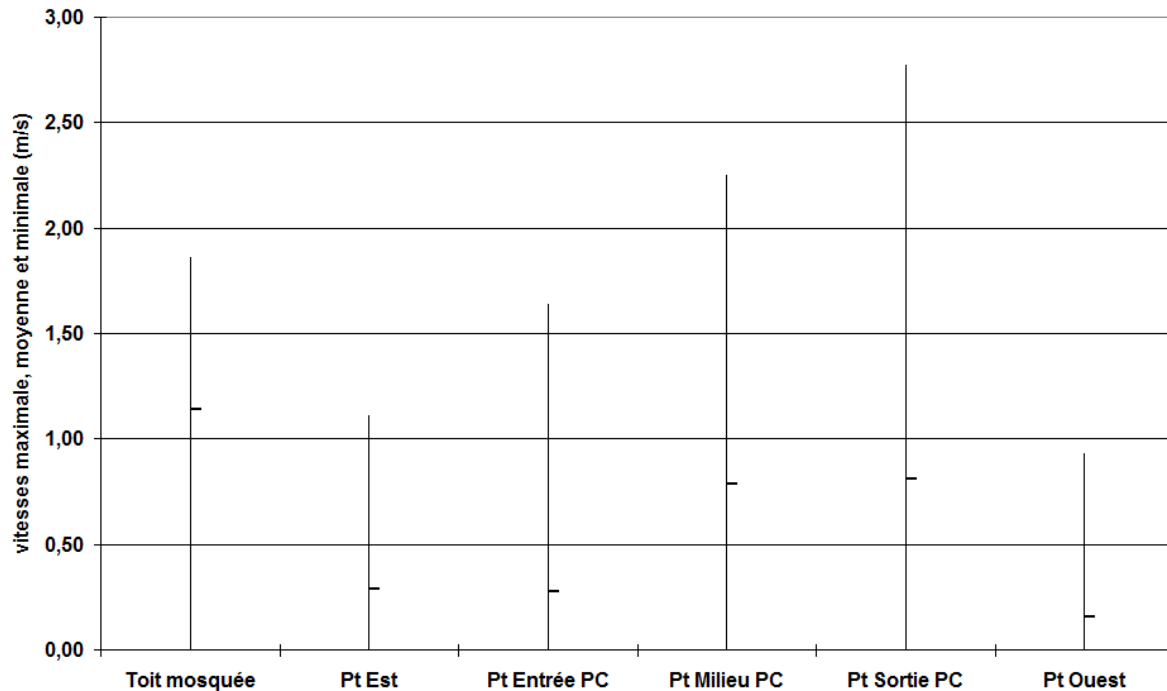


Fig. VII- 60. Comparaison des vitesses d'air horizontales moyenne et maximale au-dessus du toit et le long du fragment urbain comportant le PC sous conditions de vents faibles (données septembre 05).

iii) Relation entre les écoulements d'air entrant (dans) et sortant du PC.

La comparaison directe des vitesses d'air des écoulements entrant (dans) et sortant du PC (données de la campagne de septembre 2005) indique l'existence d'une corrélation empirique entre les deux écoulements. Cette relation est linéaire, de type $y = a.x + b$, dans laquelle y représente l'accélération de l'écoulement mesuré à 1.50 mètres de la sortie du PC, x l'écoulement entrant mesuré à 1.50 mètres de l'entrée du passage couvert, et (a) le facteur d'accélération de l'écoulement.

La corrélation empirique déterminée s'écrit comme suit :

$$y = 1,3465x + 0,4373, R^2 = 0,8634 \quad (\text{VII- 9})$$

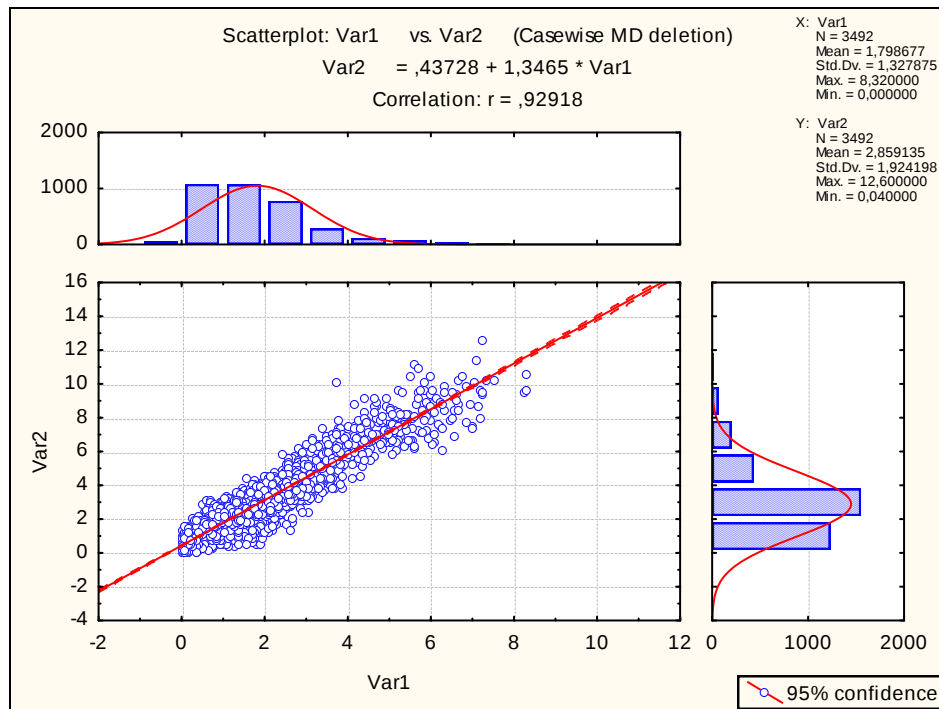


Fig. VII- 61. Corrélation entre les écoulements entrant et sortant du PC d'une longueur de 15.50 m : cas de vents ambiants de directions confondues (données septembre 05).

La valeur du coefficient de détermination R^2 , élevée et proche de 0.9, permet d'expliquer entièrement le comportement de l'écoulement sortant en fonction de l'écoulement entrant. Le paramètre (a) qui exprime le facteur d'accélération du vent indique que l'intensité de l'écoulement sortant représente environ 1.35 de la vitesse du vent s'engouffrant à l'intérieur du PC. Une augmentation de la vitesse du vent de 35% se produit ainsi le long du passage couvert d'une longueur de 15.50 m.

Une analyse plus exhaustive des données révèle toutefois que le phénomène de survitesse observé dépend de la direction du vent ambiant par rapport à l'axe du PC. Dans ce cas, ce n'est pas toujours tout le volume d'air qui s'engouffre dans le PC.

Tableau VII- 8. Corrélation entre les écoulements entrant et sortant du PC en fonction de la direction du vent ambiant par rapport à l'axe du PC.

Condition au-dessus du toit		corrélation	R^2	N.br de données
V_{moy} (m/s)	Angle d'incidence β			
4.70	$0 \pm 10^\circ$	$y = 1,4562x + 0,3789$	$R^2 = 0,89$	614
4.40	$22 \pm 10^\circ$	$y = 1,3029x + 0,666$	$R^2 = 0,90$	1108
3.50	$44 \pm 10^\circ$	$y = 1,0784x + 1,1453$	$R^2 = 0,82$	710
3.20	$66 \pm 10^\circ$	$y = 0,9674x + 1,3553$	$R^2 = 0,76$	368
3.50	$90 \pm 10^\circ$	$y = 1,0034x + 1,321$	$R^2 = 0,71$	113

Sur le tableau (VII- 8), il peut être remarqué que l'accélération la plus importante se produit lorsque le PC est dans l'axe des vents dominants. Dans ces conditions, l'intensité de l'écoulement sortant peut atteindre 1.45 de l'écoulement entrant dans le PC et les vitesses d'air moyennes mesurées à l'intérieur du PC et à sa sortie immédiate peuvent atteindre des valeurs de 3.50 à 4.00 m/s pour des vents ambiants d'une valeur moyenne très proches (4.50 m/s). Pour des angles d'incidence proche de la perpendiculaire en revanche, cet effet disparaît et aucun phénomène de survitesse ne se produit à l'intérieur du PC. Ces observations signifient que plus le volume d'air est canalisé vers le PC, plus les survitesses peuvent être significatives. Autrement dit, les échanges tridimensionnels ne doivent pas favoriser la ventilation à travers le PC.

L'effet aérodynamique du PC décroît ainsi avec l'augmentation de l'angle d'incidence du vent ambiant.

iv) Rôle des effets thermiques.

Afin de vérifier si des effets thermiques quelconques interviennent dans ce phénomène d'accélération des mouvements d'air sous conditions de vents faibles, une comparaison des températures de l'air T_a est effectuée entre les trois points de mesure situés respectivement aux extrémités NE et SO ainsi qu'à l'intérieur du PC.

Tel qu'il est indiqué par la figure (VII- 62), les conditions de vent faibles sont observées au cours de la nuit. L'analyse de T_a montre par ailleurs un refroidissement nocturne plus important au niveau du point de mesure situé à l'extrémité SO du PC, rue découverte, caractérisée par un prospect moyen de 1.80. L'écart ΔT_a , observé entre ce point de mesure et l'intérieur du PC, atteint environ 2.0°C. En revanche, l'extrémité NE du PC, rue couverte en partie et caractérisée par un profil de rue plus étroit ($H/W=4.30$), présente une température de l'air T_a pratiquement identique à celle enregistrée à l'intérieur du PC. L'écart ΔT_a n'excède pas 0.9°C.

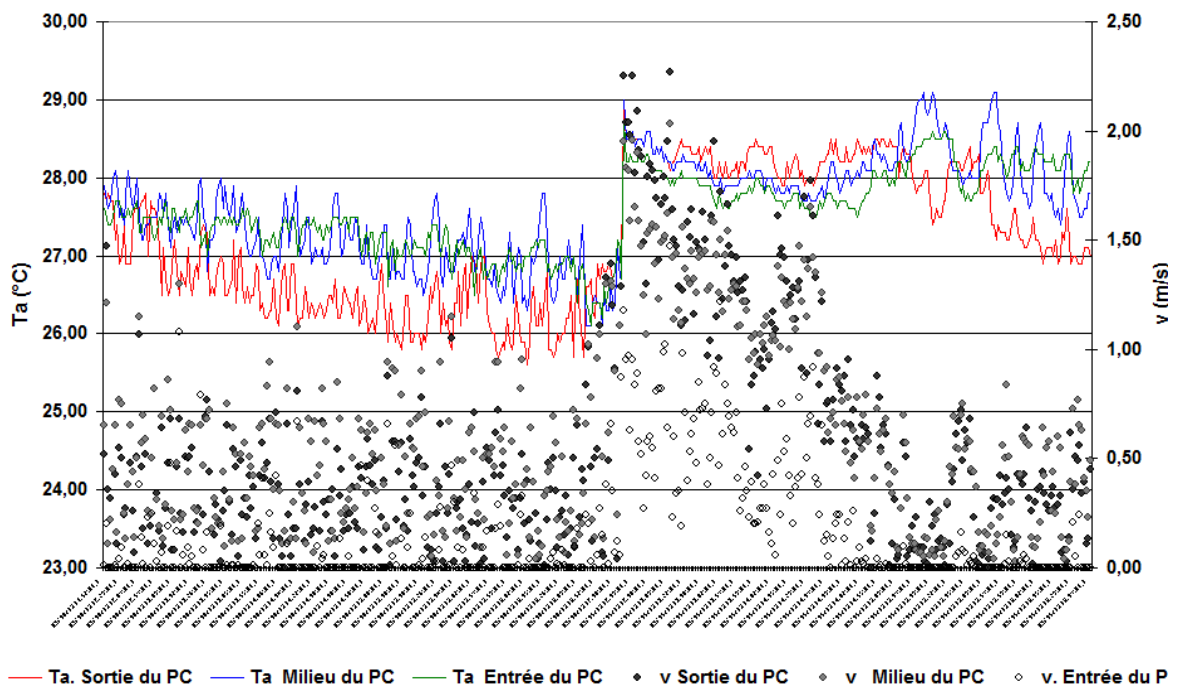


Fig. VII- 62. Conditions thermiques et de vent dans le PC au cours de la nuit : le phénomène d'accélération se produit mécaniquement, en l'absence de phénomène thermique convectif.

L'absence d'un gradient thermique horizontal entre les deux points de mesure situés à l'entrée du PC et en son milieu ne permet la création d'aucun mouvement convectif horizontal. Dans ces conditions, il peut être suggéré que le déplacement d'air observé à l'intérieur du PC au cours de la nuit soit induit uniquement par force mécanique.

Ainsi, l'influence du passage couvert se manifeste par une forte accélération de l'air. Ce phénomène, très local, se produit même lorsque les vents sont faibles. Il dépend de la direction du vent ambiant par rapport à l'axe de la rue couverte. Son effet est maximal pour une direction de vent parallèle et décroît avec l'augmentation de l'angle d'incidence du vent ambiant.

Paradoxalement, l'effet du PC ne se réduit pas seulement à un phénomène de survitesse local mais peut constituer au contraire une protection horizontale à la pénétration du vent à partir de la couche au-dessus. Cet effet de protection est d'autant plus visible que la rue est courte et constituée de plusieurs PC. Les faibles vitesses d'air observées dans certaines rues du ksar s'expliquent en effet par la présence de tels dispositifs urbains qui freinent la pénétration du vent à l'intérieur des rues canyons, du moins dans leur voisinage immédiat.

VII- 2.2.5.2. Effet de réduction du vent dans la rue délimitée par des PC.

Afin de mieux apprécier l'effet de protection observée dans la section de rue délimitée par deux PC, la rue canyon située sur le ksar de Tafilalt, de même orientation Est-ouest et un profil de rue H/W identique ($H/W=1.71$), est sélectionnée comme rue de référence. Cette dernière rue ne présente aucune protection horizontale susceptible de réduire la pénétration du vent à l'intérieur du canyon urbain.

Caractéristiques des écoulements d'air dans les rues.

L'aspect le plus remarquable à noter est le faible niveau de ventilation en présence dans la rue canyon délimitée par les PC. La présence de tels obstacles doit probablement créer une "perte de charge", c'est à dire une résistance à l'écoulement de l'air qui "préférerait" passer au dessus des toits. Ainsi, alors que les vitesses de vents au-dessus du toit varient entre 0.00 et 14.50 m/s et sont d'une valeur moyenne de 3.25 m/s, les écoulements dans la rue sont très faibles et l'intensité moyenne n'excède guère 0.55 m/s, ce qui représente à peine 0.22 de la vitesse du vent libre au-dessus du toit.

En fait, la variation de l'angle d'incidence du vent ambiant au-dessus du toit induit peu de changement dans l'intensité de l'écoulement à l'intérieur de la rue canyon. Pour des mêmes conditions de vent ambiant au-dessus du toit, la vitesse moyenne de l'écoulement demeure faible et est presque identique pour une direction de vent proche de la parallèle ($22 \pm 10^\circ$) que pour une incidence perpendiculaire à l'axe de la rue.

Sur le tableau (VII- 9.), il peut être observé que lorsque le vent ambiant est d'une valeur moyenne de 2.50 m/s (vent de secteur Sud-est), l'intensité de l'écoulement dans la rue canyon n'excède pas la valeur moyenne 0.50 m/s indépendamment de l'angle d'incidence du vent ambiant avec l'axe de la rue. En revanche, pour ces mêmes conditions de vent ambiant au-dessus du toit, les mouvements d'air sont nettement plus importants dans le canyon de référence et leur intensité varie entre 1.15 et 0.63 m/s pour une incidence respective de 44 et $66^\circ (\pm 10^\circ)$.

Tableau VII- 9. Intensité des écoulements d'air dans les rues canyons en fonction de l'angle d'incidence du vent ambiant avec l'axe de la rue.

Secteur de vent	Angle d'incidence β	Ecoulement dans la rue de référence (Ksar de Tafilalt)		Ecoulement dans la rue du ksar de Ghardaïa	
		Au-dessus du toit	Dans la rue	Au-dessus du toit	Dans la rue
Secteur Nord-est	$0^\circ \pm 10^\circ$	3.62 m/s	1.52 m/s	2.60 m/s	0.52 m/s
	<u>$22^\circ \pm 10^\circ$</u>	<u>2.72 m/s</u>	<u>1.41 m/s</u>	<u>2.97 m/s</u>	<u>0.60 m/s</u>
	<u>$44^\circ \pm 10^\circ$</u>	<u>2.60 m/s</u>	<u>1.15 m/s</u>	<u>3.64 m/s</u>	<u>0.68 m/s</u>
	$66^\circ \pm 10^\circ$	2.34 m/s	0.42 m/s	3.96 m/s	0.70 m/s
	$90^\circ \pm 10^\circ$	2.34 m/s	0.34 m/s	4.50 m/s	0.86 m/s
Secteur Sud-est	$0^\circ \pm 10^\circ$	3.62 m/s	1.52 m/s	2.60 m/s	0.52 m/s
	$22^\circ \pm 10^\circ$	2.70 m/s	0.88 m/s	2.50 m/s	0.38 m/s
	$44^\circ \pm 10^\circ$	1.91 m/s	0.52 m/s	2.57 m/s	0.38 m/s
	<u>$66^\circ \pm 10^\circ$</u>	<u>2.51 m/s</u>	<u>0.63 m/s</u>	<u>2.50 m/s</u>	<u>0.36 m/s</u>
	<u>$90^\circ \pm 10^\circ$</u>	<u>3.23 m/s</u>	<u>0.79 m/s</u>	<u>3.61 m/s</u>	<u>0.48 m/s</u>
Secteur Sud-ouest	$0^\circ \pm 10^\circ$	3.28 m/s	1.11 m/s		
	$22^\circ \pm 10^\circ$	3.74 m/s	1.43 m/s	2.78 m/s	0.48 m/s
	$44^\circ \pm 10^\circ$	3.40 m/s	0.78 m/s	3.08 m/s	0.41 m/s
	$66^\circ \pm 10^\circ$	3.21 m/s	0.72 m/s	3.93 m/s	0.49 m/s
	<u>$90^\circ \pm 10^\circ$</u>	<u>3.23 m/s</u>	<u>0.79 m/s</u>	<u>3.61 m/s</u>	<u>0.48 m/s</u>

Les données révèlent en fait que l'intensité de l'écoulement est plus importante dans la rue de référence même pour des conditions de vent ambiant plus faibles. Des mouvements d'air d'une intensité supérieure à 1.00 m/s sont ainsi enregistrés dans le canyon de référence sous des conditions de vent ambiant d'une valeur moyenne de 2.60 m/s alors que pour des vitesses de vent ambiant nettement plus importantes (3.50 m/s), la vitesse d'air n'excède pas 0.68 m/s dans la rue délimitée par des PC. Ces derniers constituent un obstacle à la pénétration du vent dans la rue canyon.

L'effet du PC semble ainsi mitigé dans la mesure où il crée une résistance à l'écoulement de l'air dans la rue canyon mais induit en revanche une accélération locale.

L'influence du passage couvert se manifeste par :

- une forte accélération de l'air à l'intérieur et à la sortie immédiate du passage couvert. Ce phénomène, très local, se produit même lorsque les vents sont faibles, moins de 2.00 m/s en moyenne au-dessus des toits. Ces vents légers sont particulièrement appréciés en été et participent de manière non négligeable à la ventilation de la rue. Les survitesses engendrées dans ce genre de passage couvert peuvent créer cependant un environnement fortement déplaisant lorsque les vents ambiants sont élevés, orientés dans une direction parallèle à l'axe de la rue,
- une forte réduction de la vitesse d'air à l'extérieur du PC, dans la rue délimitée par le (les) passage(s) couvert(s), ce dernier constituant un obstacle horizontal à la pénétration du vent à partir de la couche au-dessus. Cet effet est d'autant plus marquant que la distance séparant les PC est réduite.

Conclusion sur les effets de la configuration urbaine sur les écoulements d'air :

Les mesures sur site révèlent la nature complexe des écoulements d'air dans les rues urbaines analysées. Clairement, l'analyse des données montre que la structure urbaine influence fortement les modèles d'écoulements et de ventilation dans les rues canyons. Les éléments morphologiques les plus influents dans la caractérisation de ces écoulements sont essentiellement la géométrie des rues et leur orientation :

1. Les écoulements d'air sont fortement corrélés à la direction des rues par rapport aux vents incidents. Les vitesses d'air les plus élevées sont observées pour des directions de vents parallèles à l'axe de la rue tandis que les plus faibles sont enregistrées pour une incidence perpendiculaire. Lorsque la direction au-dessus du toit est proche de la parallèle, l'écoulement dans la rue est réduit à 50%-52%. Les vitesses d'air en présence dans les rues peuvent alors être importantes et particulièrement contraignantes pour le confort de l'individu, hiver comme été. Seule une direction perpendiculaire à l'axe des rues permet en fait une protection des vents indésirables puisqu'ils sont réduits de 75 %. Ces résultats concordent avec ceux de Pearlmutter et al. (2007) et Assimakopoulos et al. (2006) qui soulignent que la réduction de vent la plus faible dans la rue canyon est observée pour des vents incidents parallèles.

Les facteurs de réduction obtenus, compris entre 0.52 et 0.25, indiquent la forte pénétration du vent dans les rues canyons en dépit de leur configuration urbaine compacte. Ces valeurs très fortes de vitesses d'air mesurées dans des rues de profils étroits s'expliquent essentiellement par les effets de canalisation induits par la longueur (L) des rues canyons compactes ainsi que par la morphologie étagée du site interceptant les vents au-dessus des toits et redirigeant ces vents dans les rues.

2. La longueur de la rue canyon qui peut être exprimée par le rapport L/H mais aussi par le rapport L/W influence fortement les caractéristiques de l'écoulement et modifie de manière fondamentale la structure de l'écoulement. Elle agit sur l'intensité de l'écoulement et détermine le taux d'échange avec l'air au-dessus de la canopée urbaine :
 - dans la rue canyon longue, les résultats révèlent un important phénomène de canalisation traduit par une direction toujours parallèle à l'axe du canyon, indépendamment de la direction des vents incidents. En revanche, dans la rue canyon courte, les mesures ont montré des directions de l'écoulement fluctuant entre les directions parallèle et oblique à l'axe de la rue canyon, et ce même pour

des vents ambiants perpendiculaires. Sur la base de ces observations, a été développé l'hypothèse selon laquelle un écoulement tridimensionnel, le vecteur somme d'une recirculation de vortex et une canalisation générée à l'intersection de la rue, pourrait se produire à l'intérieur de la rue canyon courte. Ceci résulte dans des modèles de ventilation différents. Dans la rue canyon courte, la ventilation serait assurée à la fois par échange d'air vertical et déplacement horizontal. Dans la rue longue en revanche, l'écoulement est étiré entre les parois de la rue et ne présente aucune structure tourbillonnaire. Les échanges verticaux avec l'air au-dessus de la canopée urbaine cessent et la ventilation de la rue ne s'effectue dans ce cas que par déplacement advectif,

- dans le cas d'un angle d'incidence parallèle, les effets de canalisation et de survitesse observés sont plus importants dans la rue canyon compacte et longue tandis que dans la rue plus courte et moins compacte, ces effets sont moindres. Les survitesses engendrées dans le canyon long peuvent constituer un facteur de gêne mécanique et thermique non négligeable pour le piéton.

Ces résultats confirment les études précédentes sur l'importance de la longueur L dans les mécanismes de ventilation de la rue canyon. Ils indiquent que le prospect H/W seul ne suffit pas à déterminer la structure des écoulements dans la rue canyon.

3. La différence de hauteur des bâtiments induite par la morphologie étagée du site peut changer de manière significative le champ d'écoulement dans la rue canyon :

- Dans le cas d'une incidence oblique, la configuration de rue descendante réduit le taux de pénétration du vent dans le canyon urbain. La vitesse d'air moyenne est plus intense dans la rue de même hauteur de bâtiments et dans la rue de profil asymétrique ascendant que dans la rue asymétrique descendante,
- les rues asymétriques de configuration ascendante semblent accentuer les échanges d'air verticaux entre l'intérieur de la rue et l'écoulement libre au-dessus des toits. En effet, en dépit de l'importante longueur de la rue asymétrique, le phénomène de canalisation tend à être plus faible dans la rue asymétrique que dans la rue canyon symétrique : dans la rue asymétrique, des directions obliques sont observées pour différentes conditions de vents incidents. Ceci suggère que l'écoulement serait tridimensionnel et la ventilation de la rue se produirait par conséquent par transport advectif et échanges d'air verticaux. Ces conclusions sont en accord avec les modélisations numériques de Baik et al. (2000), Huang et al. (2002), Assimakopoulos et al. (2000/2003), Bady et al. (2006) et l'étude conduite en soufflerie atmosphérique par Dabberdt et Hoydysh (1991) qui indiquent que pour une incidence perpendiculaire à l'axe de la rue, les propriétés de ventilation dans une rue asymétrique "ascendante" sont plus importantes que celles d'une rue symétrique.

4. La forme courbe de la rue permet une meilleure pénétration du vent dans la rue canyon.

5. L'influence du passage couvert se manifeste de deux manières :

- grâce à ses effets aérodynamiques, le passage couvert crée un phénomène de survitesse local qui peut constituer un moyen de ventilation des rues, notamment en été. Les survitesses engendrées dans ce genre de dispositif urbain peuvent générer cependant un environnement déplaisant lorsque les vents ambiants sont forts et violents, dans la même direction que l'axe de la rue couverte. Pour des

angles d'incidence proche de la perpendiculaire, cet effet disparaît en revanche et aucun phénomène de survitesses ne se produit. L'effet aérodynamique du PC décroît ainsi avec l'augmentation de l'angle d'incidence du vent ambiant,

- en tant que protection horizontale, le PC peut constituer un obstacle à la pénétration du vent à partir de la couche au-dessus. Cet effet est d'autant plus visible que la rue est courte et constituée de plusieurs PC.

Une variété de conditions d'écoulement existe ainsi selon la localisation dans le groupement urbain et la direction du vent. Des zones où l'écoulement est canalisé, accéléré, freiné, stagné ou en re-circulation peuvent être observées. Des échanges importants prennent place dans les intersections de rues, les PC créent des écoulements additionnels qui favorisent la ventilation des rues ou au contraire aggravent les conditions de confort en extérieur et les profils de rues asymétriques accentuent les échanges entre l'intérieur de la rue et l'écoulement au-dessus des toits. Tous ces effets se combinent pour créer un écoulement d'air local, fonction de la forme des bâtiments et leur disposition dans la trame urbaine.

L'effet de la topographie urbaine n'est cependant pas négligeable et joue un rôle important dans ces mécanismes d'écoulement d'air et de ventilation urbaine spécifiques au Ksar de Ghardaïa.

Conclusion générale sur les écoulements d'air dans les rues du Ksar de Ghardaïa.

Ce chapitre présente une analyse détaillée des modèles d'écoulement d'air en présence dans une configuration urbaine complexe de type vernaculaire. Les résultats ont révélé l'importance des mouvements d'air en présence dans une telle structure compacte. Ils ont par ailleurs permis de mettre en exergue de nombreux mécanismes responsables de la ventilation urbaine. Ces mécanismes intègrent les effets de canalisation dans les rues canyons, les champs d'écoulement complexes aux intersections des rues, les effets aérodynamiques dus à des dispositifs urbains particuliers et les échanges verticaux et horizontaux responsables de la "respirabilité" (Neophytou et Britter 2005) de la vieille ville.

De tels mécanismes sont essentiellement gouvernés par la topographie du site d'une part et la morphologie urbaine d'autre part.

- **La topographie du lieu :**

L'exposition des versants aux vents dominants détermine les conditions d'écoulements d'air dans les rues canyons : les rues situées face au vent et disposées de manière étagée enregistrent les vitesses d'air les plus élevées du Ksar et des directions de l'écoulement stables. Les rues qui sont à l'abri des vents sont caractérisées en revanche par des vitesses de vent très faibles et des directions fluctuantes.

- **La morphologie urbaine :**

L'étude des écoulements d'air à l'échelle de tout le quartier traditionnel de Ghardaïa a permis de confirmer les conclusions des études précédentes sur le lien entre morphologie urbaine et écoulements d'air, à savoir :

- l'importance de l'emboîtement des échelles,
- l'importance de la direction de la trame urbaine par rapport aux vents dominants (Kastner-Klein et Plate 1999, Pearlmutter et al. 1999, Pearlmutter et al. 2007, Assimakopoulos et al. 2006),
- l'importance de la géométrie du bâtiment et de la longueur du canyon (L) dans la ventilation de la rue (Hoydysh et al. 1974, Yamartino et Wiegand 1986, Hoydysh et Dabberdt 1988, Johnson et Hunter 1999, Santamouris et al. 1999, Louka et al. 2000, Brown et al. 2004, Brown et al. 2006, Kastner-Klein et al. 2004, Assimakopoulos et al. 2006, Georgakis et Santamouris 2006, Pol et Brown 2008),
- l'importance des irrégularités urbaines tels que les profils de rue asymétriques (Dabberdt et Hoydysh 1991, Theurer et al. 1992, Assimakopoulos et al. 2000, Assimakopoulos et al. 2003, Baik et al. 2000, Huang et al. 2002, Savory et al. 2004, Bady et al. 2006),
- l'importance de l'hétérogénéité des hauteurs (Chan et al. 2003, Neophytou et Britter 2005),
- et enfin, l'importance des éléments de la rue (présence de PC).

1. Importance de l'emboîtement des échelles.

La distribution des vents dans les rues du Ksar relève d'abord du climat au-dessus de la canopée urbaine en accord avec les phénomènes d'exposition au vent des versants. À l'échelle microclimatique, la prise en considération des bâtiments environnants (édifice de la mosquée), des rues adjacentes (les intersections de rues) et des éléments architecturaux et

urbains spécifiques (présence de PC) permet la compréhension des écoulements d'air dans une rue urbaine donnée.

2. Importance de la direction de la trame urbaine par rapport au vent dominant.

L'orientation des rues par rapport aux vents dominants est déterminante dans la caractérisation de l'environnement aérodynamique puisqu'elle favorise le déplacement des vents ou encore freine la pénétration de l'air à l'intérieur des rues canyons. Pour des conditions de vent ambiant similaires, la vitesse du vent est le plus sévèrement atténuée à un angle d'incidence maximale (66-90°) et est moins réduite à des angles d'incidence les plus faibles (0-22°). Les réductions les plus faibles sont de l'ordre de 48% du vent ambiant tandis que les plus élevées atteignent un taux de réduction de 75%.

3. Importance de la longueur de la rue "L".

Dans la rue canyon, les modèles d'écoulement d'air ne dépendent pas uniquement de la géométrie de la rue exprimée par le prospect H/W mais sont également fonction de la longueur de la rue, représentée par le rapport L/H mais aussi L/W. Ce dernier rapport agit sur la composante longitudinale de l'écoulement et induit des effets de canalisation le long de la rue canyon.

Lorsque la rue est longue et étroite, c.-à-d., $L/W = 25.75$, la composante longitudinale domine la circulation de vortex et l'effet de canalisation est identifié comme la principale caractéristique du modèle d'écoulement dans la rue, indépendamment de l'angle d'incidence du vent ambiant. La ventilation de la rue ne s'effectue dans ce cas que par circulation horizontale. L'effet de canalisation induit génère par ailleurs des survitesses qui peuvent être fortement contraignantes, hiver comme été.

Dans la rue canyon courte en revanche, un écoulement hypothétique est identifié comme le résultat d'une circulation de vortex verticale entraînée par l'écoulement au-dessus du toit et une circulation horizontale créée par différence de pression aux angles de la rue canyon. La ventilation de la rue serait de ce fait contrôlée par l'interaction entre les vortex d'angles horizontaux et l'écoulement au-dessus du toit. De tels modèles d'écoulements sont cependant observés uniquement pour des vitesses de vent au-dessus du toit d'une valeur seuil de 3.20-3.50 m/s. Sous des conditions de vents faibles, seuls les mécanismes d'angles semblent intervenir. Ces mouvements sont un facteur important pour la ventilation de la rue.

Les effets induits par la longueur L de la rue canyon peuvent être de ce fait soit favorables pour la ventilation de la rue canyon ou au contraire constituer une gêne thermique et mécanique, notamment en hiver, sous conditions de vents forts. Ils doivent être pris en considération dans la conception des espaces urbains. En termes urbanistiques, cela reviendrait à agir sur la longueur de la rue canyon.

4. Importance des irrégularités urbaines.

i. L'asymétrie des rues canyons :

La configuration de rue asymétrique modifie la structure de l'écoulement dans la rue canyon et agit sur l'intensité des échanges verticaux avec l'écoulement libre au-dessus de la canopée urbaine. Selon que le bâtiment face au vent soit plus haut ou plus bas que le bâtiment sous le vent, la ventilation de la rue peut être accentuée ou au contraire réduite. La configuration de rue ascendante est celle qui permet un meilleur mixage de l'air et peut améliorer de ce fait la ventilation de la rue. Notons par ailleurs que la morphologie étagée du site d'implantation privilégie ce type de configuration urbaine.

ii. Les formes courbes des rues canyons :

Comme les rues sont légèrement courbes, la direction du vent n'est jamais exactement perpendiculaire à l'axe de la rue. Ceci résulte dans des déviations de la direction de l'écoulement incident par rapport à l'axe de la rue, ce qui permet une meilleure pénétration du vent dans les rues canyons.

5. Importance de l'hétérogénéité des hauteurs.

L'influence de la différence entre les hauteurs des bâtiments est non négligeable puisqu'elle agit sur le degré d'interaction entre l'écoulement dans la rue canyon avec l'air libre au-dessus du toit. Cet effet n'agit pas uniquement sur le canyon asymétrique pris isolément mais influence également les écoulements d'air des rues situées en aval du bâtiment le plus haut. Tel est le cas de l'édifice de la mosquée qui dévie le vent de sa trajectoire et crée des re-circulations au niveau des rues canyons situées en aval, les effets aérodynamiques de ce bâtiment proéminent étant le plus influent. Lorsque l'obstacle urbain constitué par la grande mosquée n'entrave pas l'écoulement de l'air au-dessus de la canopée urbaine, il réduit néanmoins son intensité. La surface urbaine située "en amont" détermine dans une certaine mesure la structure de l'écoulement, et donc le niveau de ventilation dans une rue canyon donnée.

6. Importance des éléments de la rue (présence de PC).

La présence des protections horizontales dans la rue canyon modifie les conditions d'écoulement dans la rue canyon et agit de ce fait sur le niveau de ventilation et les conditions de confort dans la rue canyon. Grâce à ses effets aérodynamiques, le passage couvert crée un phénomène de survitesse local qui peut constituer un moyen de ventilation des rues, notamment en été. L'effet aérodynamique du PC dépend cependant de l'angle d'incidence du vent ambiant. Les survitesses les plus importantes et les plus contraignantes sont observées pour des directions de vent parallèles à l'axe de la rue tandis que l'effet tend à disparaître dans le cas d'une incidence perpendiculaire.

Paradoxalement, en tant que protection horizontale, le PC peut constituer un obstacle à la pénétration du vent à partir de la couche au-dessus. Cet effet de protection peut être particulièrement utile dans la conception urbaine.

L'analyse des écoulements d'air dans le Ksar de Ghardaïa a pu mettre en exergue d'importants mouvements aérauliques dans les rues de la vieille ville. Il reste à déterminer l'effet de ces vents sur les conditions de confort thermique du piéton dans les espaces extérieurs.

CHAP. VIII. FORME URBAINE ET MICROCLIMATS DANS LE KSAR DE GHARDAÏA.

Dans cette partie de notre recherche, nous nous proposons d'étudier l'effet de la forme urbaine compacte sur les conditions thermiques dans le ksar de Ghardaïa. Le but est de comprendre la manière dont la structure urbaine représentative du ksar de Ghardaïa modifie les éléments du climat et les conditions de confort thermique en extérieur.

VIII- 1. Conditions climatiques au-dessus des toits.

VIII- 1.1. Le rayonnement solaire incident.

Hiver comme été, l'irradiation solaire globale horizontale est similaire au-dessus des toits des différents versants du ksar de Ghardaïa. Les éclairagements énergétiques instantanés sont intenses et atteignent des valeurs maximales de 690 à 750 W/m² en hiver et 895-910 W/m² en été (données des campagnes de mesure de février 05 et août 06). Ces conditions impliquent des températures de l'air élevées et similaires au-dessus des toits du Ksar sous des conditions de vents faibles.

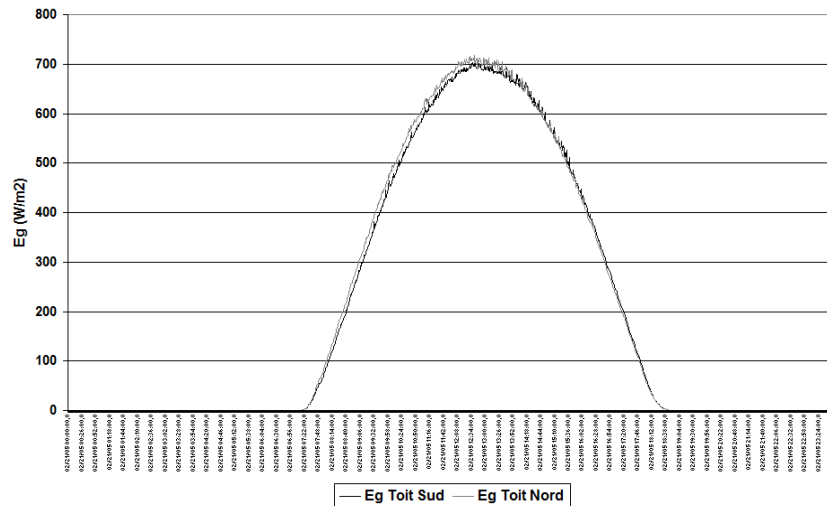


Fig. VIII- 1. Les éclairagements énergétiques incidents au-dessus des toits des versants Nord et Sud au cours d'une journée ensoleillée d'hiver, ciel clair et dégagé : 21 février 05 (campagne février 05).

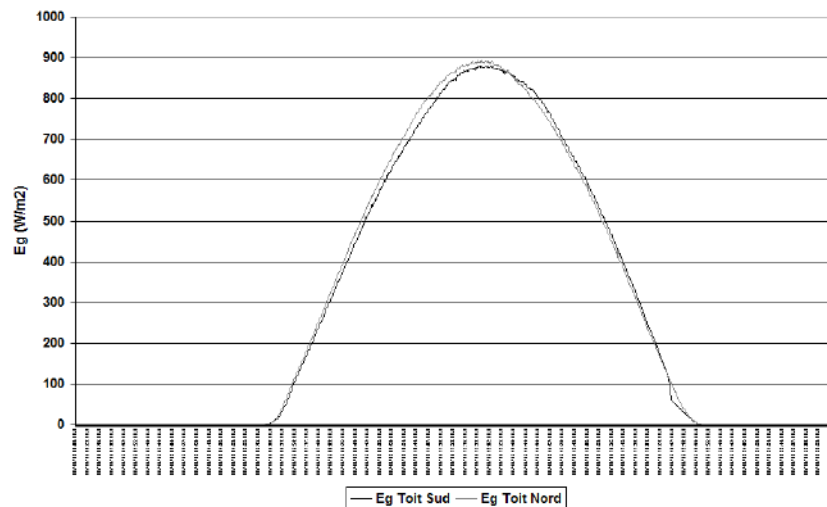


Fig. VIII- 2. Les éclairagements énergétiques incidents au-dessus des toits des versants Nord et Sud au cours d'une journée ensoleillée d'été, ciel clair et dégagé: 10 août 06 (campagne de mesure d'été en août 05).

VIII- 1.2. La température de l'air.

D'une manière générale, les températures de l'air résultent du bilan radiatif au voisinage du sol. Au cours du cycle journalier, elles présentent de larges fluctuations en fonction de celles des différentes composantes du bilan d'énergie. Dans le Ksar de Ghardaïa, les températures de l'air mesurées en été varient entre 22 et 42°C avec des amplitudes journalières de l'ordre de 10 à 11°C (données août 06). En hiver en revanche, T_a fluctue entre 4 et 19.5°C et les amplitudes journalières varient entre 10 et 15°C (données février 05) selon les conditions du vent. Les fluctuations les plus grandes sont observées en l'absence de vent.

VIII- 1.2.1. Effet de la topographie du site sur la température de l'air.

En l'absence de vents, la distribution des températures de l'air au-dessus des toits est homogène et s'explique par les conditions de rayonnement proches aussi bien en été qu'en hiver. La différence de température de l'air n'excède pas 0.4°C pour des vitesses de l'air moyennes de 2.50 et 1.00 m/s sur les versants face au vent et sous le vent. Des écarts de températures de l'air ne sont enregistrés en fait que sous des conditions de vents contrastées entre les différents versants du Ksar, les versants exposés au vent étant les plus froids.

En hiver, les écarts les plus importants, de l'ordre de 2.5°C, sont enregistrés sous des conditions de vents forts et froids soufflant de l'Ouest. Sous ces conditions en effet, le versant nord, zone d'accélération du vent (vitesse moyenne 5.50 m/s), enregistre les températures de l'air les plus fraîches du ksar (T_a maximale : 13.30°C) tandis que sur le versant sud, à l'abri du vent (vitesse moyenne 1.50 m.s⁻¹), sont observées les valeurs de températures de l'air les plus élevées (T_a maximale : 15.60°C). C'est ce qui est observé sur les figures (VIII- 3) et (VIII- 4) ci-après dans lesquelles sont représentées les variations de T_a en fonction du rayonnement solaire global horizontal d'une part et la vitesse du vent d'autre part.

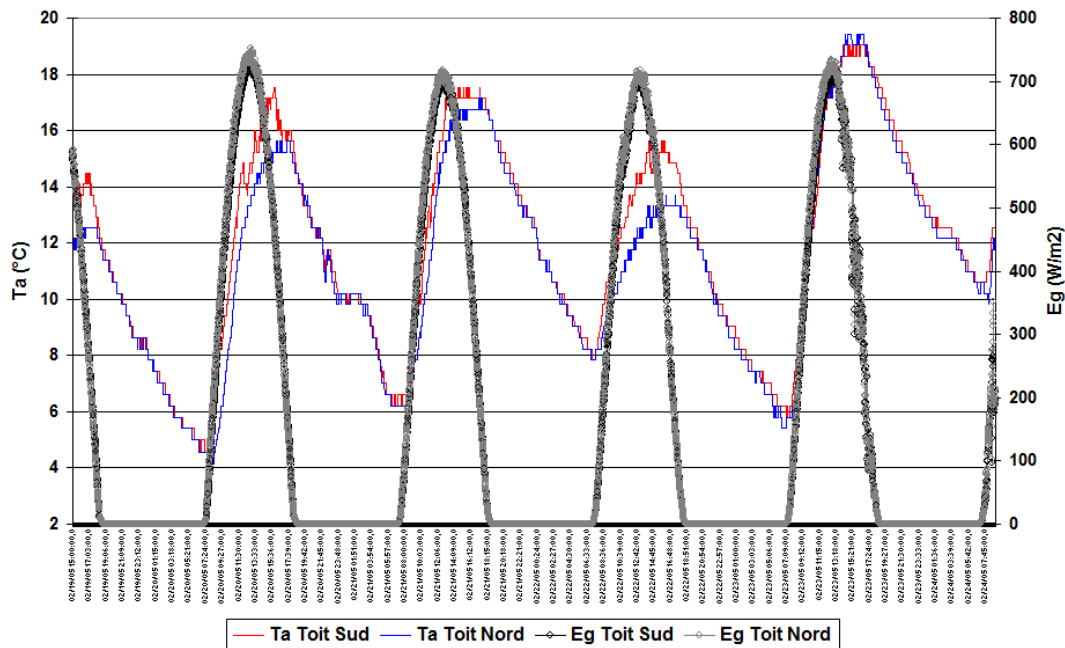


Fig. VIII- 3. Variation de T_a et de E_g sur les versants Nord et Sud du Ksar de Ghardaïa du 19 au 24 février 05. Il peut être noté que les variations de T_a sont indépendantes du rayonnement global horizontal (E_g) vu que ce dernier est identique sur les toits des deux versants Nord et Sud. (Campagne de mesure d'hiver en février 05).

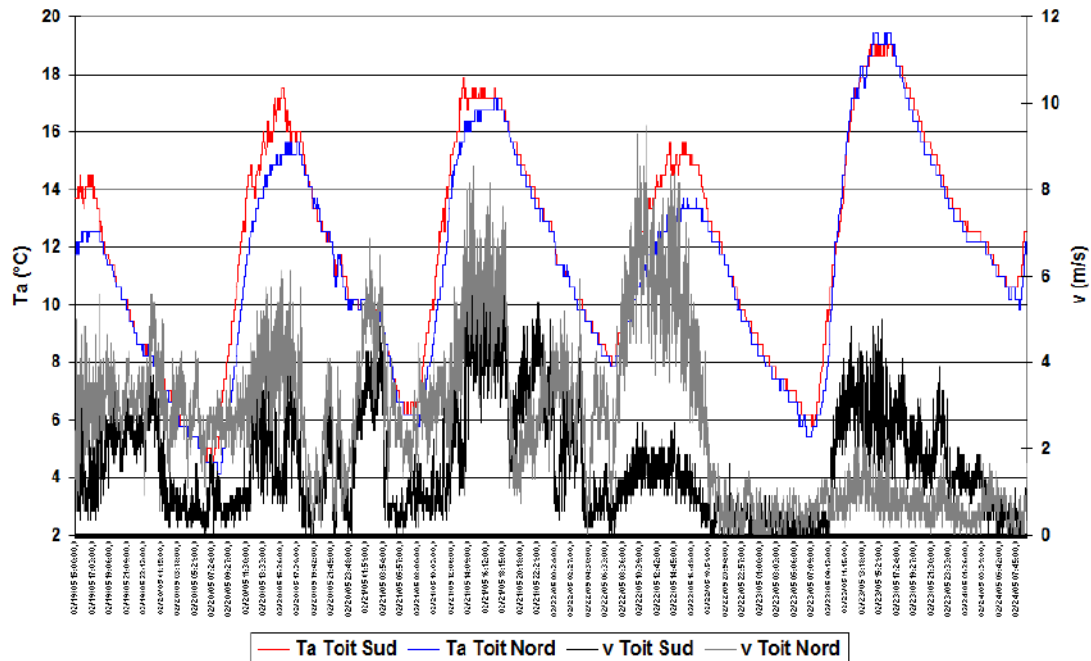


Fig. VIII- 4. Variation de T_a au-dessus des toits des versants Nord et Sud du ksar de Ghardaïa en fonction de la vitesse du vent (v) : du 19 au 24 février 05. Le versant Nord, fortement exposé au vent, enregistre les températures d'air les plus faibles.

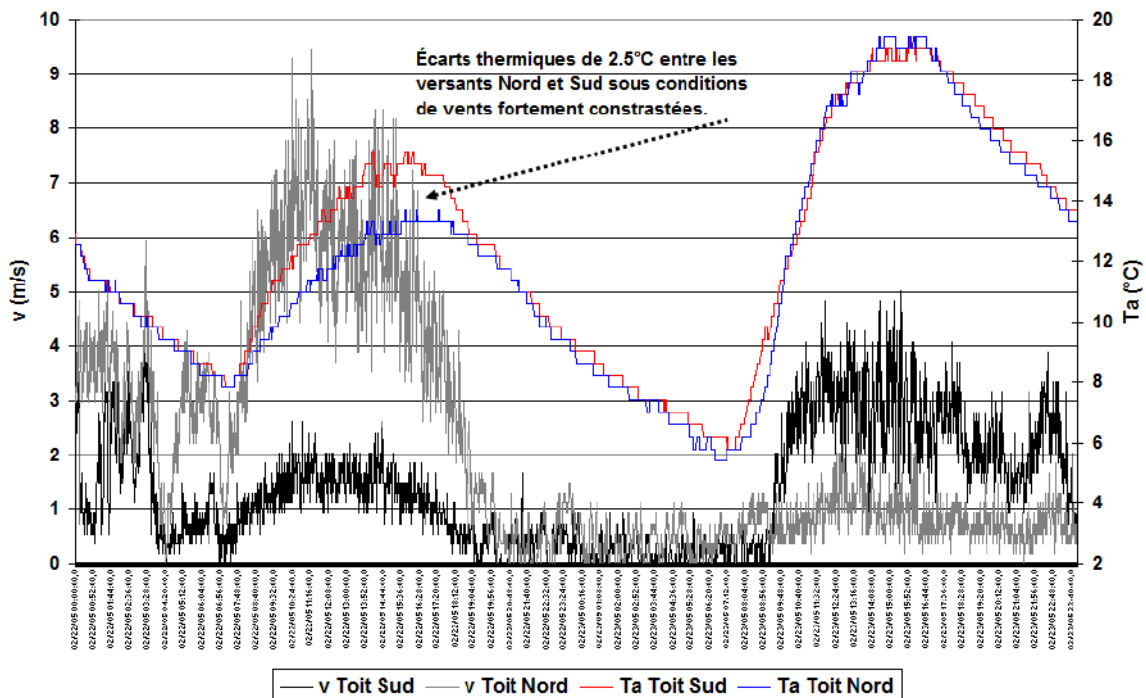


Fig. VIII- 5. Zoom sur les journées du 22 et 23 février caractérisées par des conditions thermiques et aérodynamiques différentes au-dessus des toits des versants Nord et Sud. La journée du 22, le versant Nord, fortement exposé au vent, enregistre les températures d'air les plus faibles (Campagne février 05).

L'effet de l'exposition des versants aux vents dominants est tout aussi marqué en été. Les températures de l'air présentent de très larges variations sur les différents versants en fonction des conditions du vent. La figure (VIII- 6) montre à titre d'exemple la variation des températures de l'air sur les versants Nord et Sud au cours de cinq journées consécutives du mois d'août 06 durant lesquelles la vitesse de vent et sa direction a varié. On peut remarquer que le versant le plus frais est celui qui est le plus exposé au vent. L'écart $\Delta(T_a)$ peut atteindre une valeur de 2.0°C aux heures les plus chaudes de la journée lorsque le versant face au vent présente une vitesse de l'air moyenne de 3.00 m.s^{-1} et que la vitesse de vent avoisine les 2.00 m/s sur le versant sous le vent.

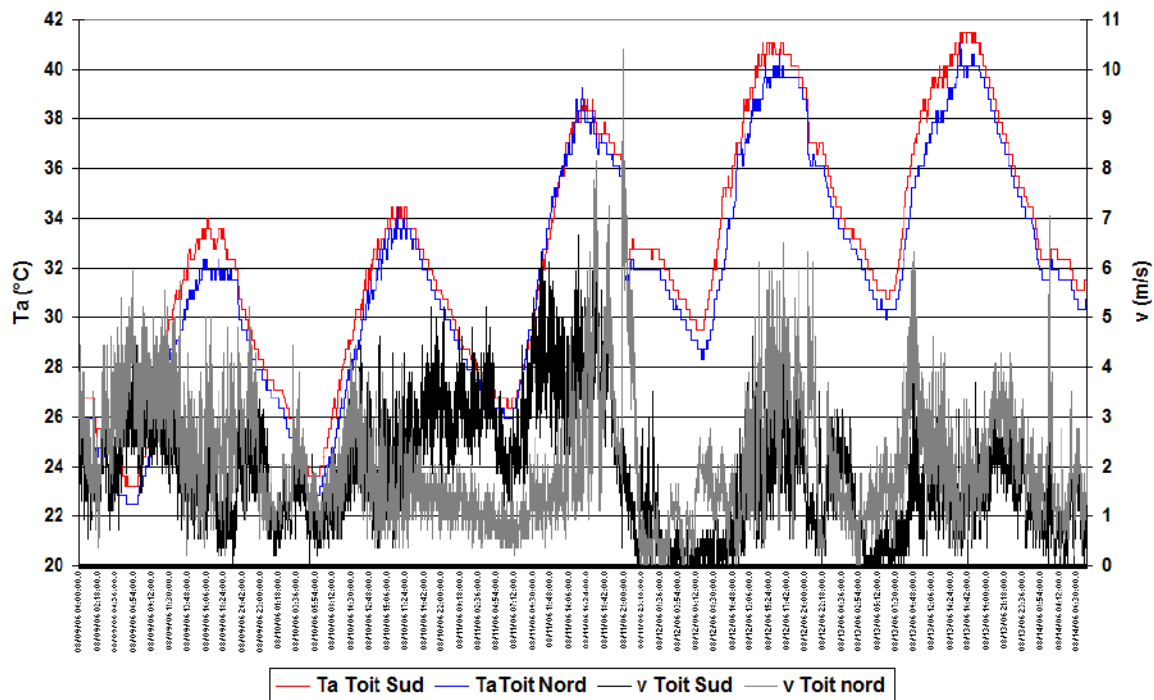


Fig. VIII- 6. Variations de T_a au-dessus des toits des versants Nord et Sud en fonction des conditions du vent du 09 au 13 août 06 (campagne d'août 06).

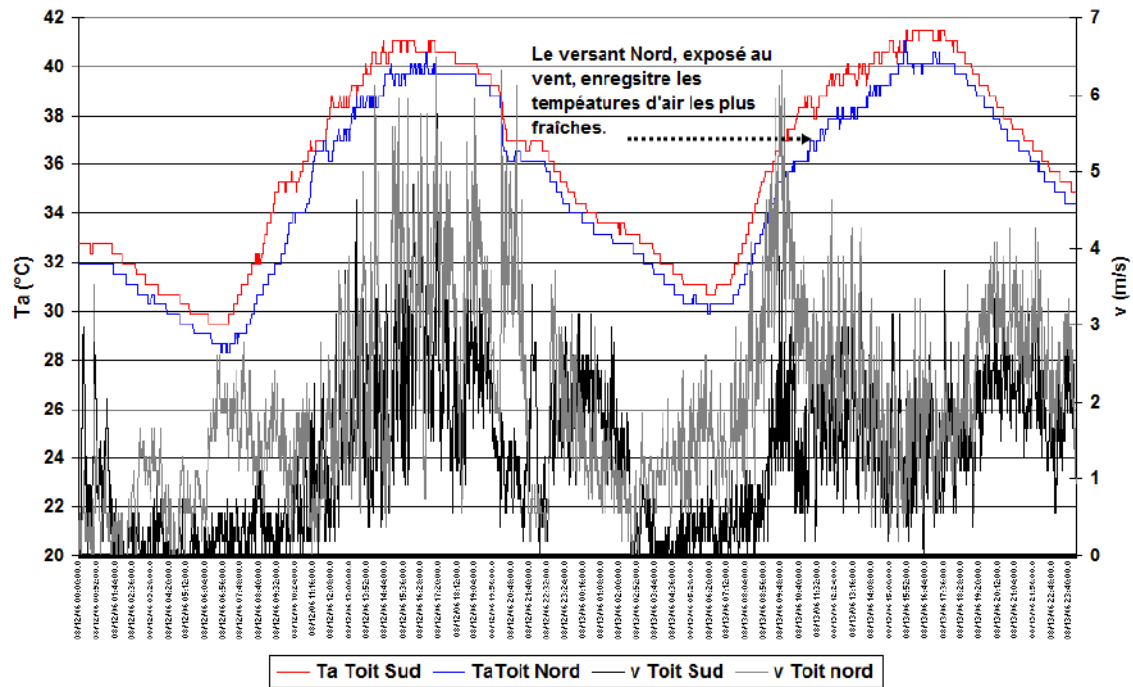


Fig. VIII- 7. Variations de T_a au-dessus des toits des versants Nord et Sud en fonction des conditions du vent au cours des journées du 12 et 13 août 06 (campagne d'été août 06). Le versant Nord fortement exposé au vent, enregistre les températures d'air les plus fraîches.

L'exposition des versants aux vents dominants détermine les conditions thermiques au-dessus des toits. Les versants face au vent, caractérisés par les vitesses d'air les plus élevées du ksar, sont ceux qui enregistrent les températures de l'air les plus fraîches. Ces conditions thermiques au-dessus des toits, fonction du vent, ont une incidence directe sur le comportement thermique à l'échelle des rues.

VIII- 2. Caractéristiques microclimatiques.

Dans le ksar de Ghardaïa, la caractérisation des microclimats urbains est liée à deux caractéristiques physiques importantes que sont :

- l'orientation des versants sur lesquels est édifié l'établissement urbain,
- la configuration urbaine du Ksar, identifiée par son degré de compacité (relation entre la hauteur des bâtiments et la largeur qui les sépare) et l'orientation des rues.

Nous analyserons l'influence de chacun de ces facteurs sur les principaux paramètres climatiques qui ont un impact sur le confort extérieur.

VIII- 2.1. Le rayonnement solaire.

VIII- 2.1.1. Effet de pente sur le rayonnement solaire.

L'effet d'orientation des pentes sur le rayonnement solaire est maximum au niveau des rues canyons. Il est cependant plus sensible en hiver lorsque le soleil est plus bas sur l'horizon. Dans ces conditions, dans le ksar de Ghardaïa, la rue du versant nord de prospect proche de 3 reçoit au plus 24 % du rayonnement solaire incident capté dans la rue du versant sud.

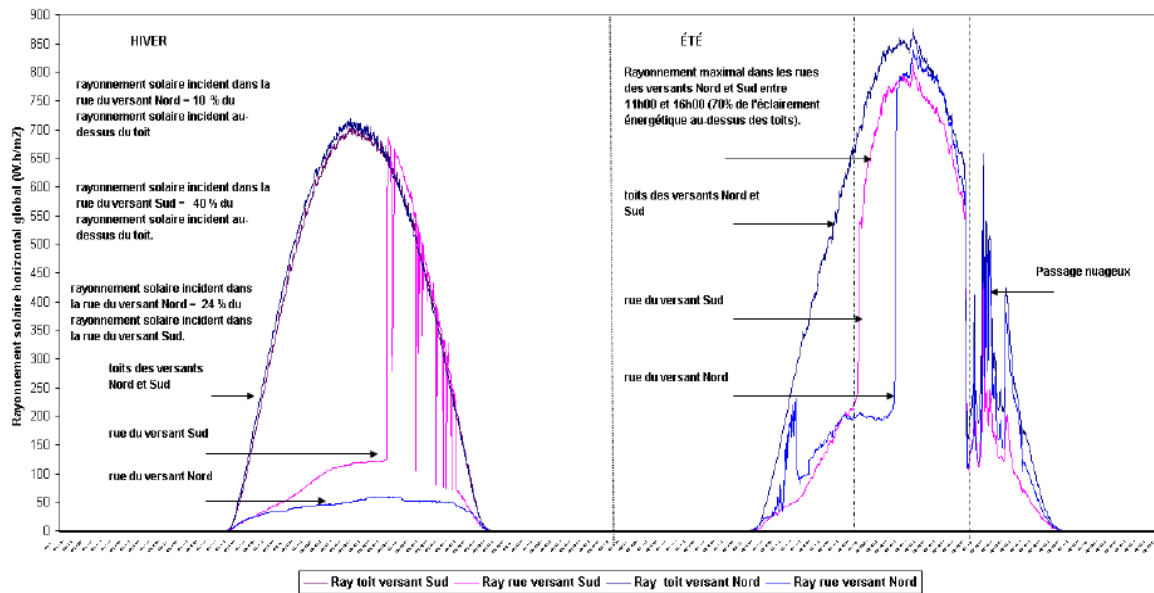


Fig. VIII- 8. La comparaison des éclairagements énergétiques incidents au-dessus du toit et dans les rues des versants Nord et Sud du ksar de Ghardaïa, en hiver et en été.

À l'inverse, en raison de la hauteur du soleil, l'effet d'orientation des pentes est négligeable en été. Les éclairagements énergétiques reçus dans les deux rues sont identiques et relativement importants.

Ainsi, selon la variation saisonnière, l'effet de pente peut être très important dans la caractérisation des microclimats propres aux rues du ksar de Ghardaïa. Le régime de distribution des températures de l'air et de surface en dépend.

VIII- 2.1.2. Effet du prospect H/W sur le rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire incident dans les rues est fonction de la hauteur du soleil, donc de la variation saisonnière. En été, à Ghardaïa, le soleil, haut sur l'horizon, permet une pénétration maximale du rayonnement solaire même dans les rues les plus étroites (Arnfield 1990). Ainsi, pour des prospects H/W d'une valeur proche de 3, l'éclairement énergétique incident dans les rues représente 70 % de celui reçu sur le toit. En hiver en revanche, le rayonnement solaire incident dépend du profil de la rue mais également de l'orientation des versants.

VIII- 2.2. La température de l'air.

À l'échelle microclimatique, la morphologie urbaine commande deux phénomènes thermiques inéluctables que sont :

- la répartition des zones ombrées et ensoleillées,
- les champs radiatifs solaire et thermique qui en découlent.

Ces effets, liés à la géométrie des rues et leur orientation, peuvent être cependant amplifiés ou au contraire réduits selon la latitude (Arnfield 1990) et l'environnement. À Ghardaïa, dans les rues canyons, les apports radiatifs sont fortement imprégnés des conditions locales (au-dessus des toits) et dépendent de :

- l'exposition des versants par rapport au soleil,
- l'orientation des rues par rapport au soleil,
- la géométrie des rues,
- les matériaux de construction utilisés. Comme les matériaux de construction sont pratiquement identiques à travers les rues du Ksar, l'effet de l'albédo est considéré comme identique dans les rues canyons.

Dans ce qui suit, seront analysés en détail chacun des paramètres topographiques et morphologiques influents.

VIII- 2.2.1. Effet de la topographie du site sur la température de l'air.

En été, en l'absence de vent, la comparaison des températures de l'air T_a à travers les rues du ksar montre un modèle de distribution de température horizontale relativement homogène, indépendamment de l'orientation des versants, du profil de la rue et son orientation. En hiver en revanche, les conditions thermiques sont fortement contrastées entre les différents points de mesure et des écarts jusqu'à 2.5°C peuvent être observés entre la rue située sur le versant Nord (Pt. 3) et le reste des rues canyons. Ces résultats, contraires à ceux observés en été, sont fortement corrélés à l'orientation des versants et la géométrie solaire.

En été, l'orientation des versants par rapport au soleil est négligeable sur la distribution des températures de l'air en raison de la géométrie solaire caractéristique de ces latitudes (32° N, hauteur maximale du soleil : 81°). Aussi, les températures de l'air sont relativement homogènes à travers les rues du Ksar eu égard aux conditions de rayonnement solaire identiques. L'orientation par rapport aux vents dominants est néanmoins importante dans la mesure où les rues face au vent, mieux ventilées sous des conditions de vents forts, sont plus fraîches de 1.0 à 2.5°C au cours du cycle journalier. Ainsi, avec une vitesse d'air moyenne de 1.60 m/s, la rue située sur le versant Nord est de 1.5 à 2.0°C plus fraîche au cours de la journée que la rue située sur le versant Sud dont la vitesse d'air moyenne n'excède pas 0.90 m/s. Au cours de la nuit en revanche, ΔT_a peut atteindre la valeur de 2.80°C lorsque les vitesses d'air moyennes sont de 3.00 et 2.00 m/s respectivement dans les rues face au vent (versant nord) et sous le vent (versant Sud).

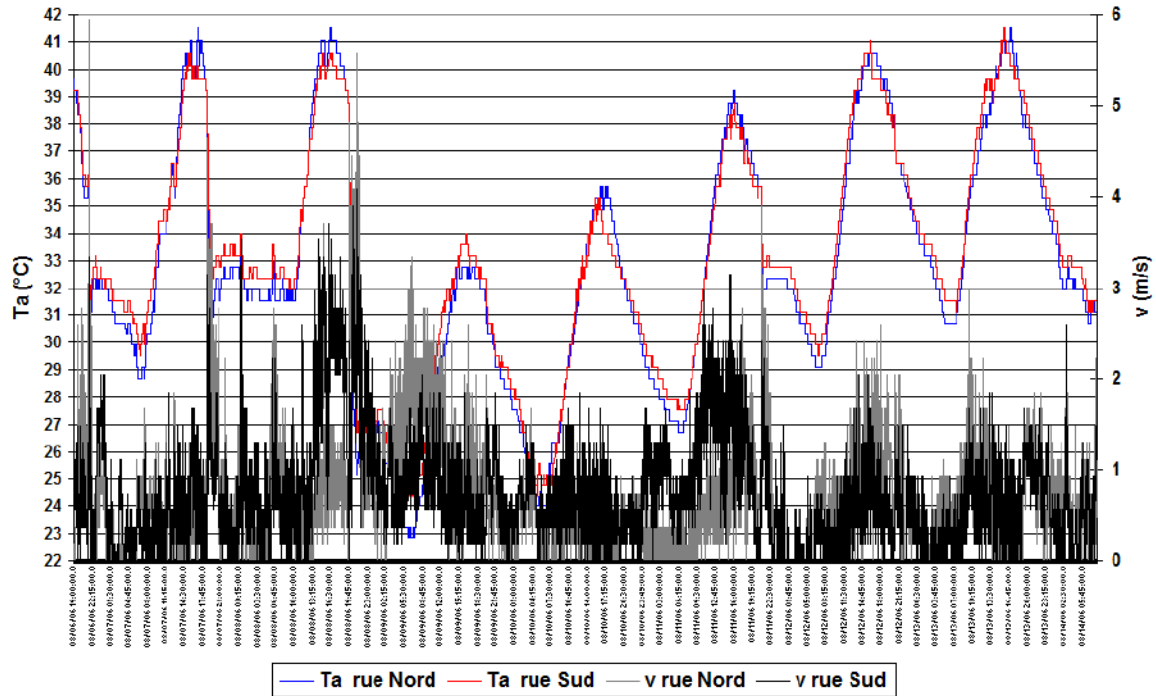


Fig. VIII- 9. Variations des températures de l'air dans les rues des versants Nord et Sud en fonction des conditions de vent : du 07 au 13 Août 06.

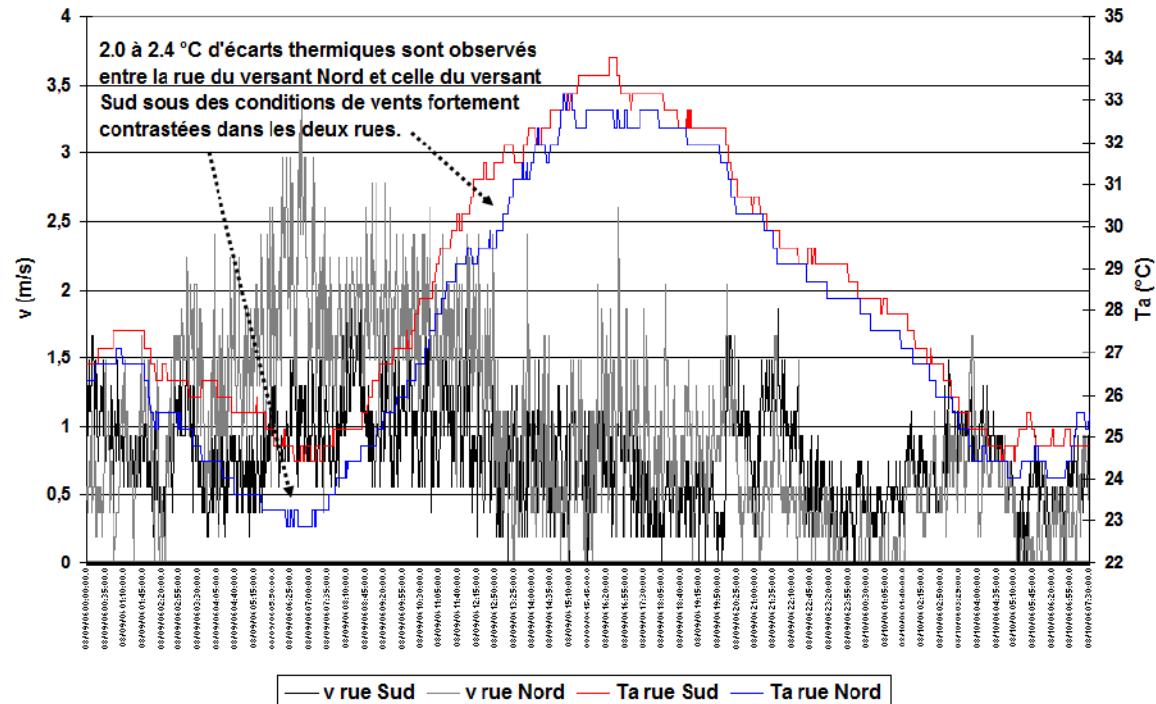


Fig. VIII- 10. Zoom sur une journée caractérisée par des conditions de vent fortement contrastées qui sont à l'origine d'un gradient thermique de l'ordre de 2 à 2.4°C entre les rues canyons situées sur les versants Nord et Sud. Les vents incidents sont de direction Nord. 09 août 06 (campagne de mesure d'été en août 06).

En hiver par contre, en raison de la faible altitude du soleil et de l'étroitesse des angles azimut, l'inclinaison et l'orientation des pentes ont un très grand effet sur les températures de l'air diurnes, le rayonnement solaire capté dans les rues des versants Nord et Sud étant fortement contrastés. Tel qu'il est indiqué sur la figure (VIII- 11), les températures de l'air maximales et minimales les plus faibles sont observées au cours du cycle journalier dans la rue située sur le versant Nord, à l'ombre. La rue du versant sud (l'adret), soumise à un éclairage énergétique trois fois supérieur, présente en revanche des températures de l'air supérieures de 1.0 à 2.0°C, l'écart de température de l'air ($\Delta(T_a)$) étant plus important au milieu de la journée. Les gradients thermiques les plus grands sont observés sous les conditions de vent les plus contrastées. Lorsque le vent souffle du Nord et de l'Ouest, la rue du versant Nord, fortement exposée, subit un refroidissement plus important de sa température de l'air. En revanche, un vent incident de direction Sud accentue le réchauffement de la rue du versant Sud qui enregistre une augmentation de T_a . Dans les deux conditions de vent différentes, le gradient thermique observé entre les deux rues de l'ubac et de l'adret s'accroît.

Il s'avère en effet que l'effet thermique du vent observé dans les rues du Ksar ne dépend pas uniquement de la vitesse mais aussi de son origine : c'est-à-dire : vent chaud ou froid.

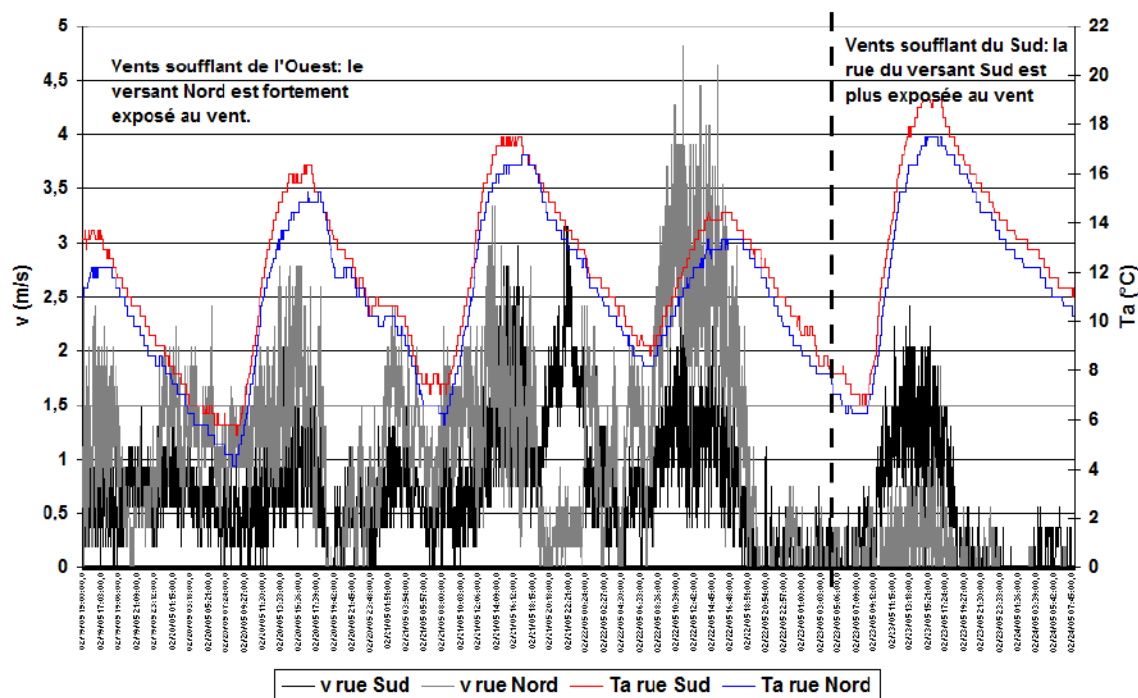


Fig. VIII- 11. Conditions thermiques contrastées dans les rues des versants Nord et Sud en fonction des conditions du vent : du 19 au 23 février 05.

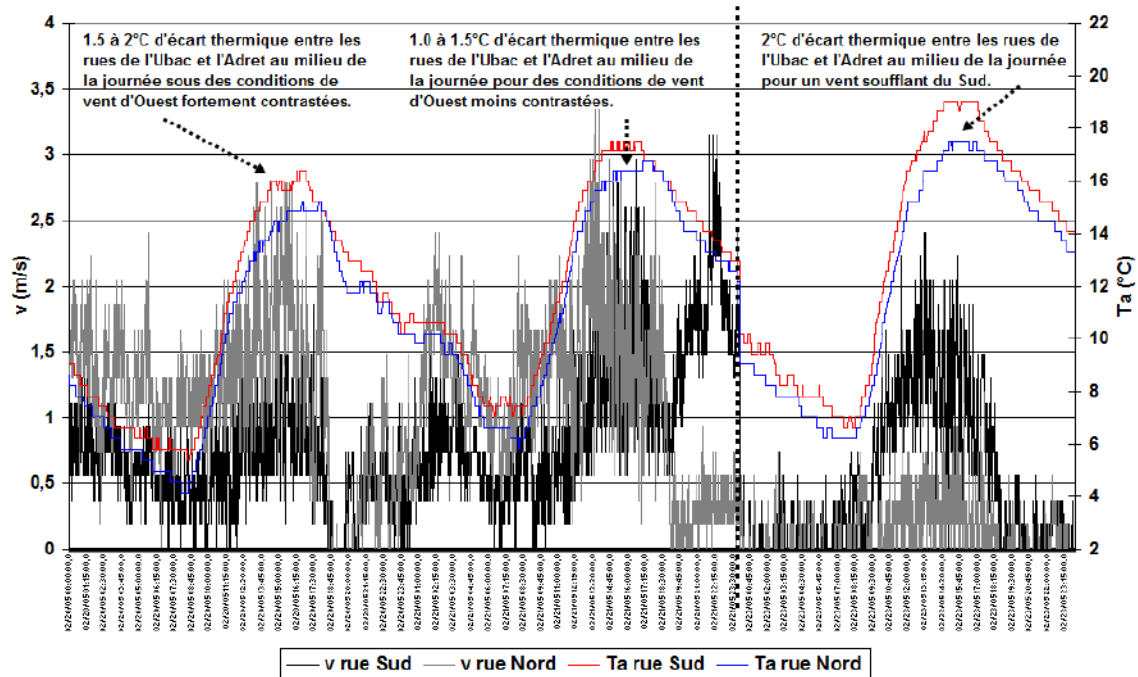


Fig. VIII- 12. Zoom sur le comportement thermique des rues situées sur l'adret et l'ubac selon les conditions du vent. 20, 21 et 23 février 05 (campagne d'hiver en février 05).

VIII- 2.2.2. Les effets thermiques du vent selon sa nature.

Dans les régions sèches, la plus grande partie de l'énergie est évacuée sous forme de flux convectif de chaleur. L'augmentation de la vitesse du vent s'accompagne alors par une réduction de la température de l'air (Guyot 1997). C'est ce qui est observé à Ghardaïa dans le cas des vents frais d'été ou des vents froids d'hiver.

En été, les conditions thermiques prévalant dans les différentes rues du Ksar peuvent être très contrastées en fonction des conditions de vent. Les rues les mieux ventilées peuvent être en effet de 1 à 2.5°C plus fraîches au cours du cycle journalier (Fig. VIII- 10). Ces effets de refroidissement par la ventilation sont visibles de jour comme de nuit, il est cependant important de noter qu'ils ne dépendent pas uniquement de la vitesse du vent mais aussi de sa nature : vent chaud ou froid.

La figure (VIII- 13) présente les résultats de mesures effectuées dans la rue canyon située dans le ksar de Tafilaït au cours de plusieurs journées consécutives du mois d'août (campagne août 06) durant lesquelles les conditions de rayonnement sont restées stables mais où, en revanche, la vitesse du vent et sa direction a varié.

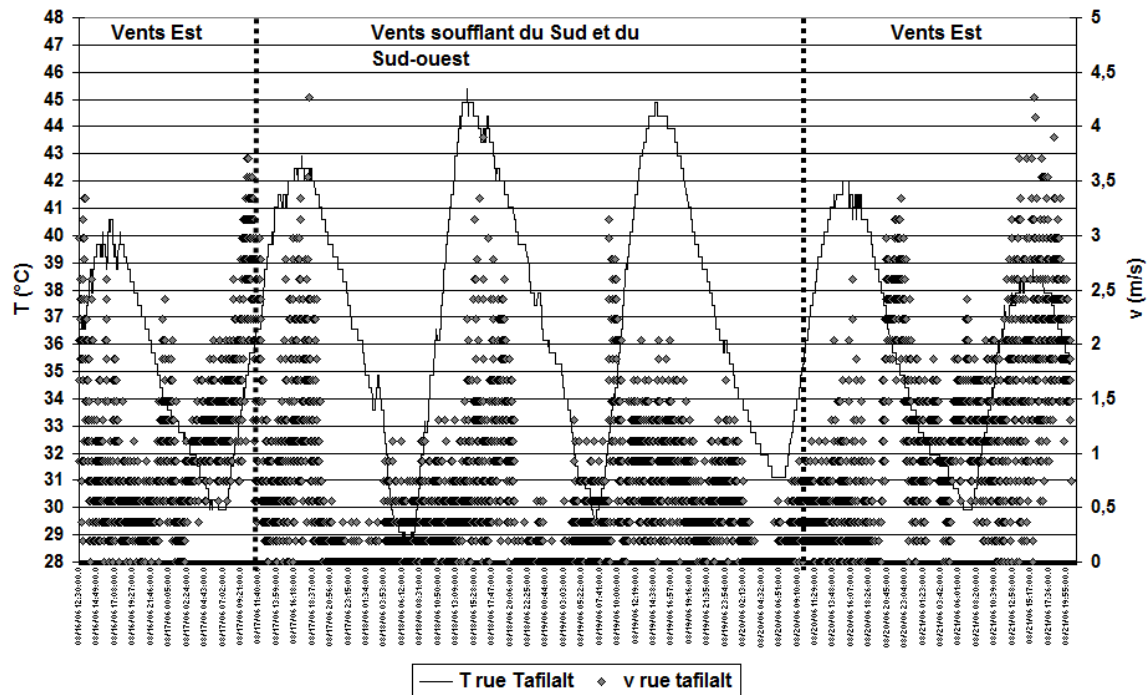


Fig. VIII- 13. Variation des températures de l'air (T_a) dans la rue du ksar de Tafilalt en fonction de la vitesse du vent et sa direction : du 16 au 21 août 06.

Les résultats indiquent clairement que le vent peut réduire la chaleur dans la rue canyon même durant les heures de stress thermique d'été mais que la réduction est dépendante de l'origine des vents. Il peut être observé en effet que l'élévation maximum de la température de l'air est mesurée au milieu de la journée et varie en fonction de la direction du vent, les valeurs maximales étant plus importantes en présence de vents soufflant du Sud. C'est ainsi qu'en période de sirocco (vents forts, chauds et secs de direction Sud) et avec une vitesse d'air moyenne de 0.88 m.s^{-1} dans la rue canyon, la température de l'air maximale T_a peut atteindre des valeurs de $44.5\text{--}45.00^\circ\text{C}$. À une même vitesse d'air moyenne dans la rue (0.93 m/s) mais de direction Est en revanche, T_a maximale est de 4.5°C plus fraîche et n'excède pas la valeur de 40.60°C aux heures les plus chaudes de la journée.

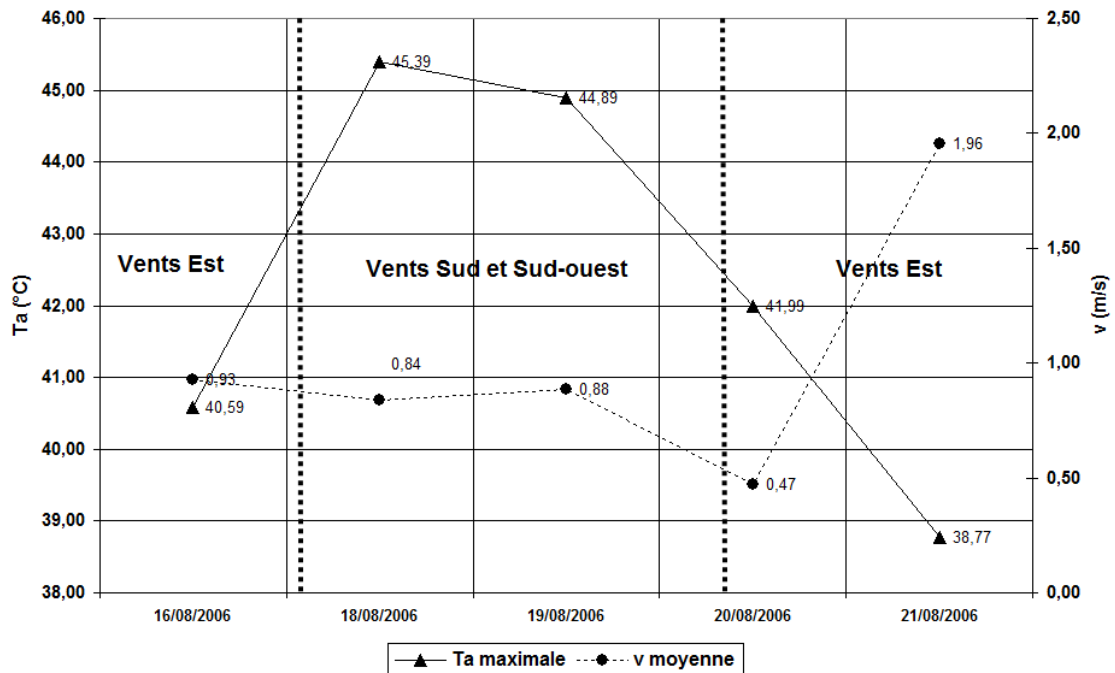


Fig. VIII- 14. Variation de la température de l'air maximale en fonction de la vitesse d'air moyenne et son origine dans la rue du ksar de Tafilalt : du 16 au 21 août 06.

Ces observations révèlent qu'en période de vents chauds et secs en provenance du Sud, la ventilation urbaine n'est pas influente puisque son efficacité est limitée par les températures de l'air élevées. La ventilation est néanmoins cruciale lorsque les vents sont forts et froids de direction Nord-est et Est. Dans ces conditions de vents frais d'été, l'augmentation de la vitesse d'air s'accompagne par un refroidissement important de l'air. La figure (VIII- 14) indique que pour un vent de direction Est d'une vitesse moyenne de 0,50 m/s dans la rue canyon, la température de l'air maximale mesurée est d'environ 42,00°C tandis qu'à une vitesse moyenne de 1,96 m/s, elle est réduite de 3,20°C ($T_a = 38,80^\circ\text{C}$). Durant cette période, l'orientation des rues dans l'axe des vents frais d'été est importante. Les conditions extérieures peuvent être améliorées en effet de manière significative à travers des effets de refroidissement de l'air par le vent.

En hiver en revanche, les vents froids peuvent être à l'origine d'une importante gêne thermique. Ces vents soufflent de l'Ouest et sont accompagnés d'une importante baisse des températures de l'air. Sur la figure (VIII- 15) est représentée la variation de la température de l'air dans la rue située sur le versant Sud du ksar de Ghardaïa au cours de trois journées d'hiver durant lesquelles deux conditions de vent sont observées : celles de vents forts à moyens de direction Ouest et celles de vents moyens à faibles de direction Sud.

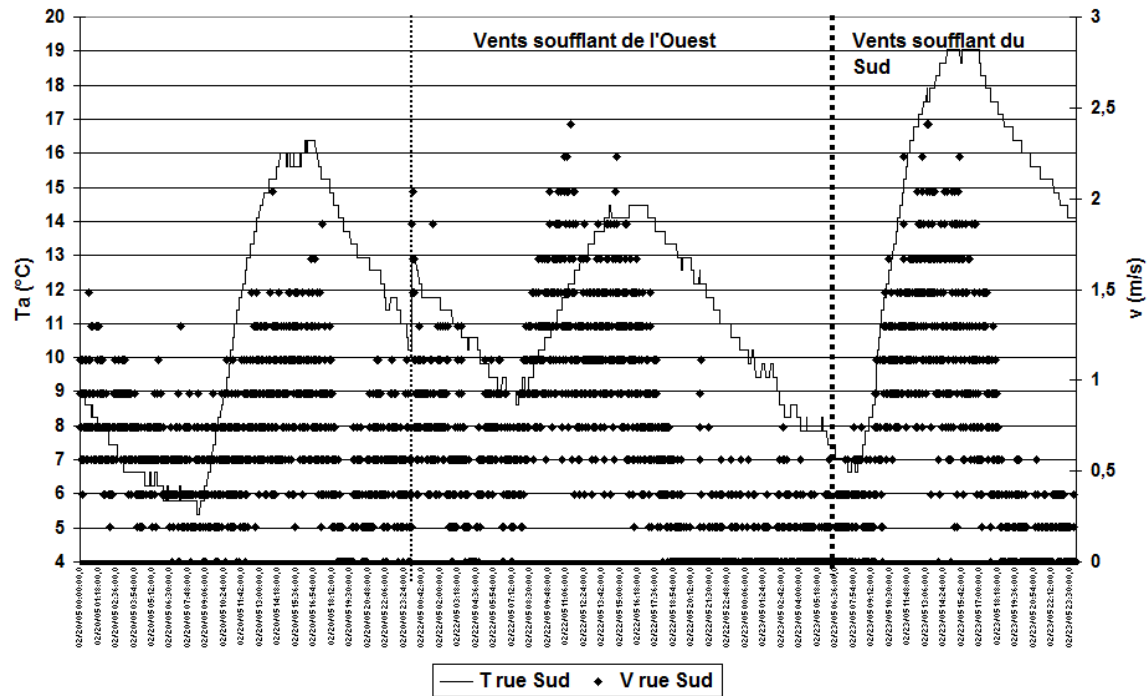


Fig. VIII- 15. Variation de la température de l'air en fonction de la direction du vent dans la rue située sur le versant Sud du Ksar : journées du 20, 22 et 23 février 05.

Il peut être clairement noté que de larges variations se produisent en fonction des conditions du vent. Les températures de l'air maximales sont plus faibles en la présence des vents forts de direction Ouest alors que les vents du Sud, plus chauds, induisent un sensible réchauffement de l'air. Ainsi, avec une vitesse d'air moyenne de 0.90 m/s et de direction Ouest, la température de l'air maximale mesurée dans la rue est d'environ 14.50°C aux environs de 15h00 tandis qu'à une même vitesse d'air moyenne (1.00 m/s) mais de direction Sud, elle s'élève de 4.50°C. La présence des vents Sud s'accompagne ainsi par un accroissement important de T_a qui atteint la valeur maximale de 19.00°C.

Comme le révèle ces résultats, le vent agit sur le régime de distribution des températures de l'air à travers les rues canyons. Cet effet thermique du vent ne dépend toutefois pas uniquement de la vitesse mais aussi de son origine. En hiver, les vents soufflant du Sud permettent un réchauffement de l'air alors que les vents froids d'hiver de direction Ouest sont à l'origine d'un important refroidissement. En été en revanche, si les vents frais de direction Nord-est et Est permettent de réduire les températures d'air aux heures les plus chaudes de la journée, les vents chauds et secs en provenance du Sud induisent une importante élévation des températures de l'air et la ventilation des espaces urbains n'est de ce fait pas efficace. Les effets thermiques du vent améliorent de ce fait ou au contraire aggravent selon la saison et la nature des vents les conditions de confort thermique à l'échelle des espaces extérieurs. Cet aspect ne doit pas être négligé dans les processus de conception urbaine.

Pour conclure, il s'avère que les effets topographiques observés au-dessus des toits se prolongent jusqu'au niveau des rues :

- si l'effet d'orientation des pentes par rapport au soleil est négligeable en été, il détermine le niveau d'ensoleillement des rues en hiver. Les rues du versant nord sont

celles qui sont le moins bien exposées au rayonnement solaire direct. À l'inverse, les rues du versant Sud sont soumises à un meilleur ensoleillement et enregistrent les températures de l'air les plus élevées,

- l'exposition des versants aux vents dominants accentue les contrastes thermiques entre les rues face au vent et sous le vent. Hiver comme été, les températures de l'air sont sensibles aux conditions du vent.

L'effet thermique du vent varie cependant selon sa nature. En hiver, les vents soufflant du Sud permettent un réchauffement de l'air alors que les vents froids d'hiver de direction Ouest sont à l'origine d'un important refroidissement. En été en revanche, les vents frais de direction Nord-est et Est permettent de réduire les températures d'air aux heures les plus chaudes de la journée tandis que les vents chauds et secs en provenance du Sud induisent une importante élévation des températures de l'air.

VIII- 2.2.3. Effets de la morphologie urbaine sur la température de l'air.

VIII- 2.2.3.1. Effet de l'orientation des rues sur la température de l'air.

En été, contrairement aux études de terrain menées par Pearlmutter et al. (1999), Bourbia et Awbi (2004), Coronel et Alvarez (2001) et Pearlmutter et al. (2006), l'effet de l'orientation de la rue sur le modèle des températures de l'air n'est pas évident. Tel qu'il est illustré dans la figure (VIII-16.), la différence créée par l'orientation dans l'exposition solaire des rues durant les heures de la journée est négligeable en été, sous conditions de vents faibles. Elle n'induit guère plus de 0.50 à 1.00°C d'écart entre les rues d'orientation Est-ouest et Nord-sud.

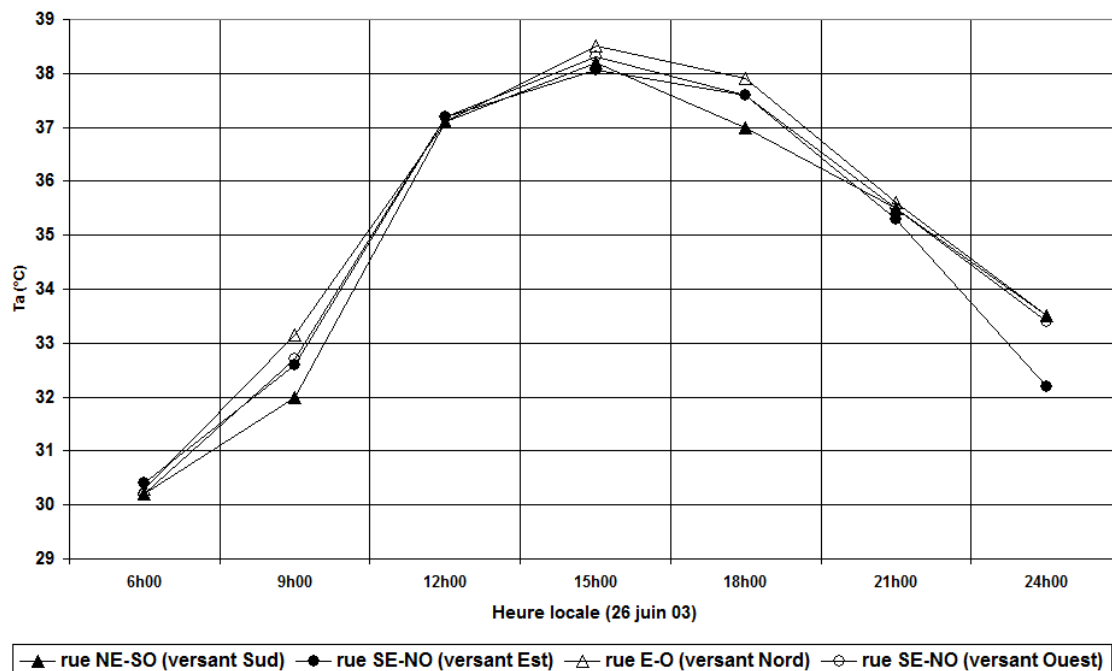


Fig. VIII- 16. Variation de la température de l'air en fonction de l'orientation des rues : 26 juin 03.

Les rues sont ainsi surchauffées au cours des heures de la journée indépendamment de l'orientation en raison de la hauteur du soleil et de l'effet de piégeage radiatif induit par la forte compacité des rues canyons (Meir et al. 1995). Ces résultats confirment ceux de Grundström et al. (2003) et Ali-Toudert et al. (2004).

Sous conditions de vent faible, l'orientation demeure également sans effet sur le régime de distribution de T_a en hiver. En raison de la forte compacité des rues et du faible angle d'incidence du rayonnement solaire en hiver, les rues sont pratiquement à l'ombre toute la journée, indépendamment de leur orientation. La différence dans l'orientation des rues n'induit guère plus de 0.5 à 0.7°C d'écart entre les différentes rues du ksar. Ces résultats sont en accord avec ceux de Grundström et al. (2003).

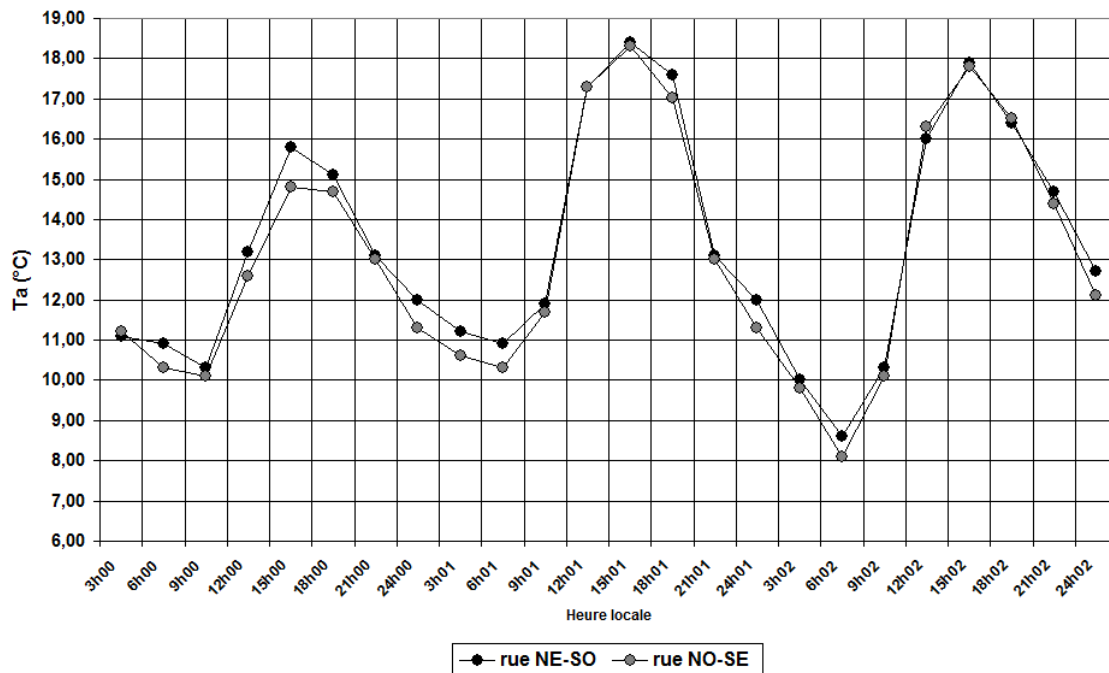


Fig. VIII- 17. Variation de la température de l'air dans deux rues situées sur le versant Est et d'orientation respective NE-SO et NO-SE : du 11 au 13 février 04.

VIII- 2.2.3.2. Effet du prospect H/W sur la température de l'air.

En été, aucun modèle spécifique de distribution des températures de l'air en relation avec la géométrie n'est observé dans la configuration urbaine compacte du ksar de Ghardaïa. La différence de température entre les différentes rues canyons au cours de la journée n'est pas significative. La figure (VIII- 18) illustre l'évolution journalière de T_a au cours d'une journée du mois de juin.

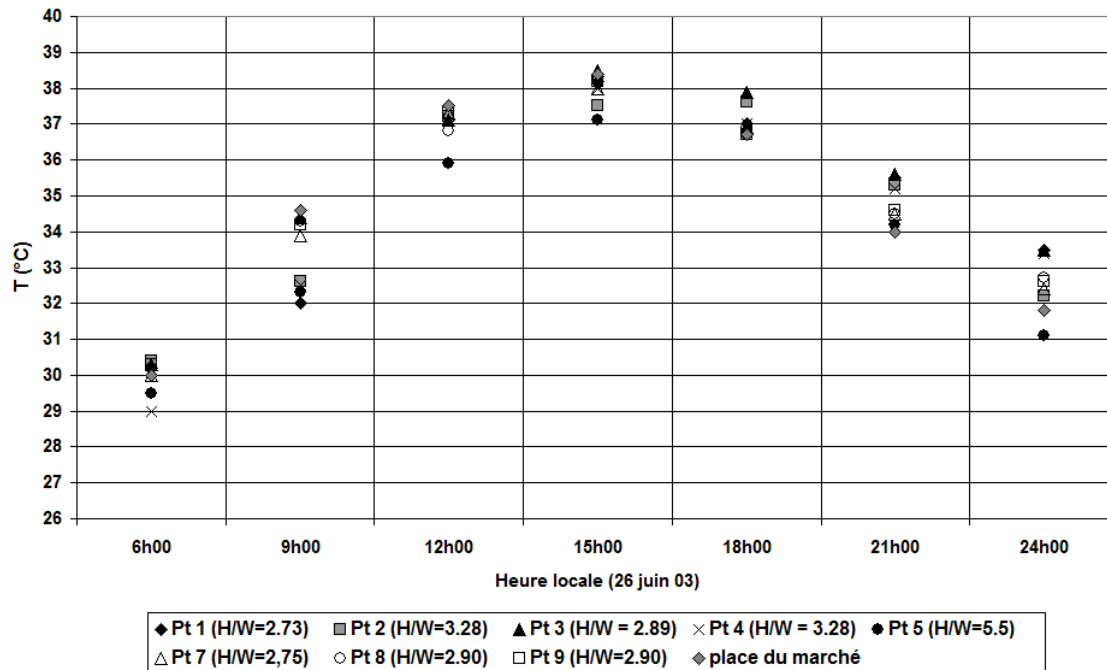


Fig. VIII- 18. Distribution horizontale de T_a à travers les rues du ksar de profil compris entre 0.11 et 5.5 (26 juin 03).

D'une manière générale, T_a tend à croître à partir de 6.00 h du matin pour atteindre une valeur maximale de 38-38.5°C aux environs de 15h00. Au-delà, T_a décroît graduellement jusqu'à atteindre la valeur minimale de 29-29.5°C au petit matin (6h00). Pour tous les points de mesure, les températures de l'air T_a sont presque identiques, l'écart maximal $\Delta(T_a)$ entre la rue la plus profonde (H/W=5.5) et l'espace le plus dégagé, en l'occurrence la place du marché (H/W=0.11-0.21) n'excède pas 1.50°C aux environs de 15h00, avec les températures les plus élevées observées sur le point dégagé. Au cours de la nuit et aux premières heures de la journée, cet écart est encore plus faible et n'excède pas 0.5°C, ce qui indique qu'il n'existe pas de relation claire entre la température de l'air et le facteur d'ouverture au ciel, du moins dans les conditions du ksar de Ghardaïa.

Les effets du prospect sur les températures de l'air ne sont pas plus marqués en hiver dans la mesure où les contrastes thermiques observés au milieu de la journée entre les rues canyons compactes et la place du marché n'excèdent pas 1.5 à 2.0°C. Pour des rues canyons de prospect H/W variant entre 1.71 et 4.54, les écarts thermiques sont encore moins significatifs. En effet, avec une altitude faible, le rayonnement solaire pénètre difficilement dans les rues compactes lesquelles demeurent à l'ombre la presque totalité de la journée. Il en résulte des écarts thermiques très faibles entre les différentes rues canyons situées sur un même versant. La différence maximale $\Delta(T_a)$ entre les rues de profil H/W respectif de 2.5 (pt.11) et 4.54 (pt. 12) sur le versant Ouest n'excède pas 0.80°C au milieu de la journée.

Par ailleurs, la distribution des températures de l'air nocturnes n'indique aucune relation claire avec la géométrie urbaine, l'écart $\Delta(T_a)$ entre les différentes rues canyons n'excède pas 0.5°C. Le facteur d'ouverture au ciel seul ne suffit donc pas à expliquer la variation de la température de l'air même en hiver.

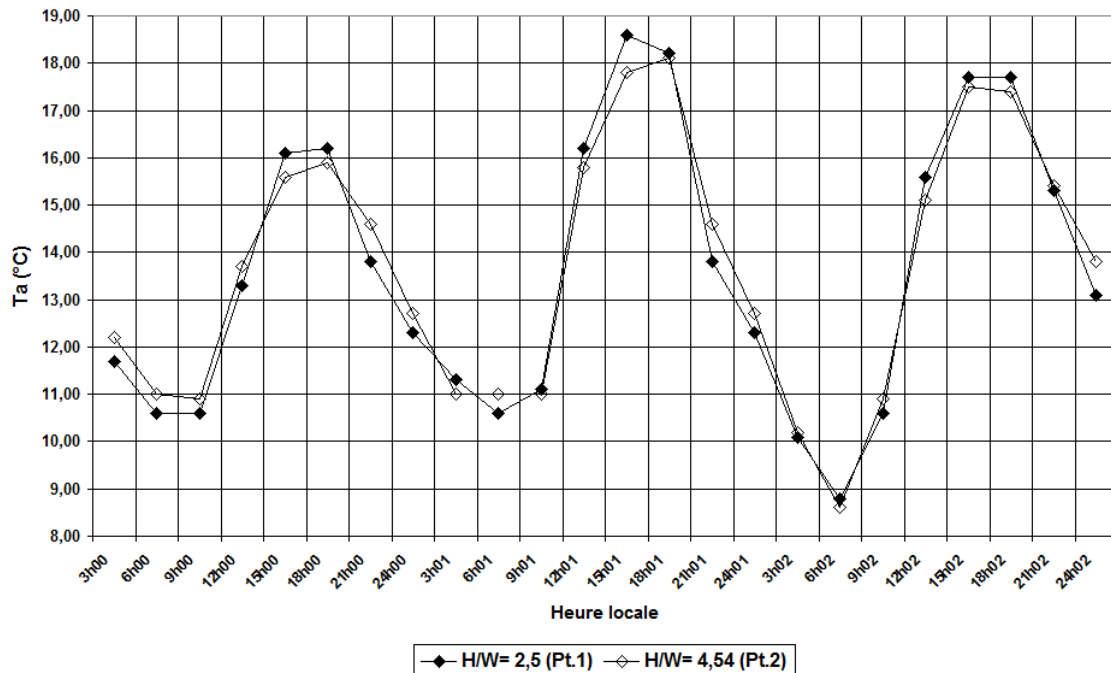


Fig. VIII- 19. Variation de T_a en fonction du profil H/W dans deux rues situées sur le versant Ouest du ksar de Ghardaïa : du 11 au 13 février 04.

L'absence de grandes différences de température de l'air entre les rues canyons compactes et l'espace ouvert du Ksar au cours du cycle journalier révèle la faible influence de la géométrie urbaine sur le modèle des températures de l'air d'hiver et d'été, du moins dans une structure aussi compacte que celle du ksar de Ghardaïa. Les résultats obtenus, en accord avec ceux d'Eliasson et al. (1996) et Ali-Toudert et al. (2004), indiquent clairement que même si la géométrie urbaine est d'importance, la température de l'air des rues canyons est gouvernée par des facteurs régionaux plus complexes. La ventilation urbaine et les effets advectifs constituent un de ces facteurs comme cela a été démontré.

VIII- 2.2.3.3. Effet du passage couvert sur la température de l'air.

En été, l'analyse des données climatiques montre des températures de l'air T_a presque identiques à travers les rues du ksar à l'exception du passage couvert (Pt.6) qui enregistre les températures de l'air les plus basses. En effet, au milieu de la journée, avec le transfert de chaleur turbulent croissant induit par les surfaces irradiées (Nunez et Oke 1977), l'écart de température devient plus important entre les rues ensoleillées et le passage couvert qui est à l'abri du rayonnement solaire direct. L'écart maximal $\Delta(T_a)$, de l'ordre de 2.80°C , est atteint vers 15h00 sous conditions de vent faible. Au cours de la nuit en revanche, les écarts thermiques s'estompent. En ce qui concerne la saison hivernale, les contrastes thermiques observés sont plus faibles et n'excèdent pas 1.5°C au milieu de la journée.

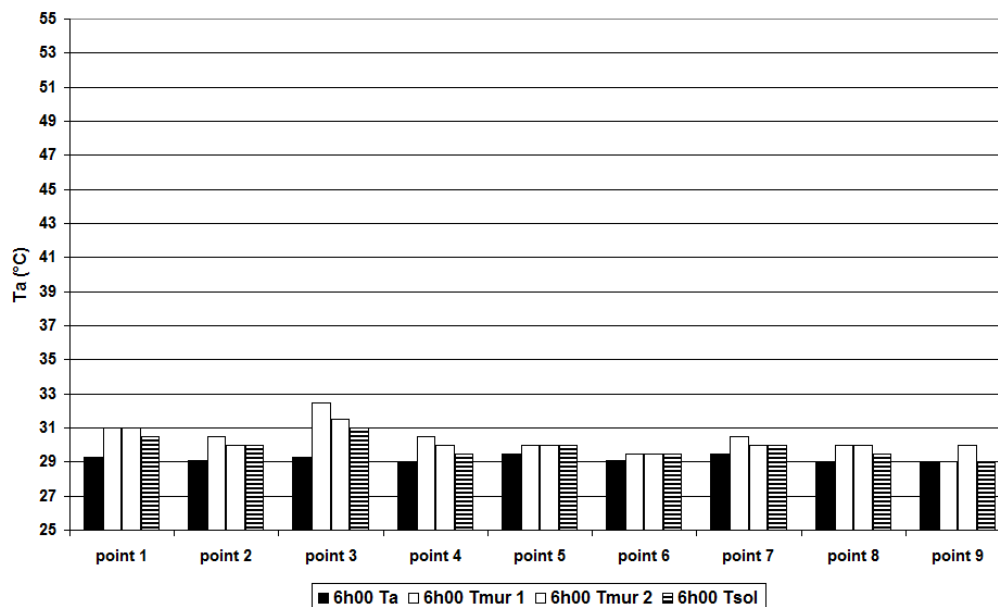
L'analyse des données de terrain indique un régime de distribution horizontale des températures de l'air T_a homogène qui n'est influencé ni par la géométrie urbaine des rues canyon ni leur orientation. En fait, l'homogénéité des températures de l'air observées dans les rues du ksar au cours du cycle journalier en l'absence de vent s'explique par :

- les conditions de rayonnements solaires proches dans les rues compactes eu égard à la géométrie solaire caractéristique des latitudes moyennes :
 - en été, le soleil, haut sur l'horizon, permet une pénétration maximale du rayonnement solaire même dans les rues les plus étroites (Arnfield 1990), indépendamment de l'orientation,
 - en hiver, avec une altitude faible, le rayonnement solaire pénètre difficilement dans les rues compactes situées sur un même versant. Ces rues demeurent à l'ombre la presque totalité de la journée, indépendamment de l'orientation,
- l'inertie thermique du tissu compact du ksar qui induit des montées et des descentes de températures très lentes, ce qui génère une température uniforme à travers l'ensemble du tissu urbain traditionnel, été comme hiver, de jour comme de nuit.

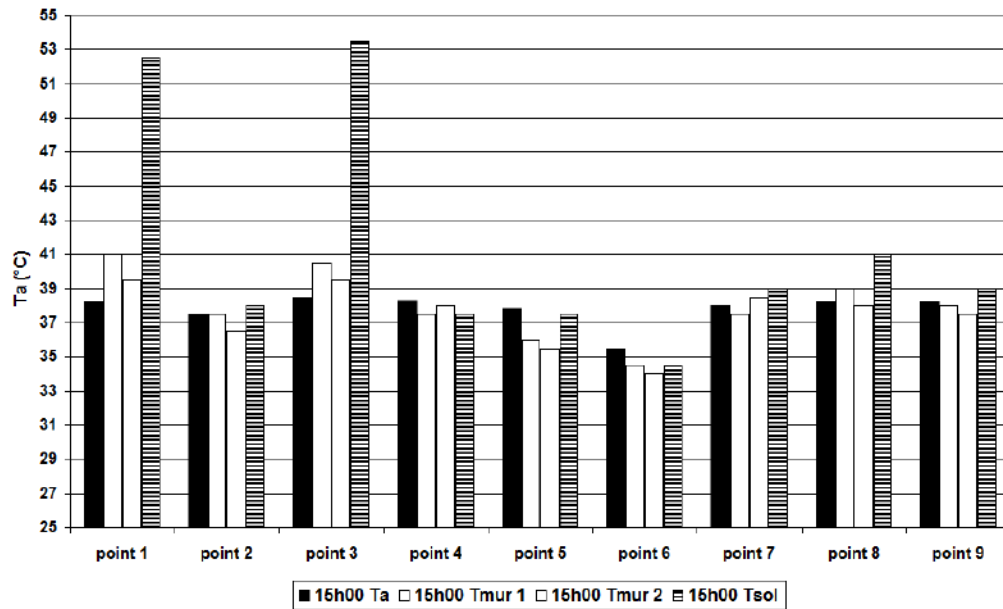
VIII- 2.3. Les températures de surface.

Les résultats de cette étude montrent des modèles de température de surface très différents de ceux de la température de l'air. En fait, au cours de la matinée (6h00-9h00) et durant la nuit, les températures de surface suivent de près celles de l'air et montrent de petites différences entre les différents canyons urbains. Dans la plupart des cas, la température de surface est légèrement plus élevée que la température de l'air correspondante. Au milieu de la journée en revanche, les données montrent des variations importantes dans les températures de surface comparées à celles de l'air. Ces variations sont indépendantes de l'orientation des versants mais peuvent être clairement corrélées à la géométrie de la rue et son orientation.

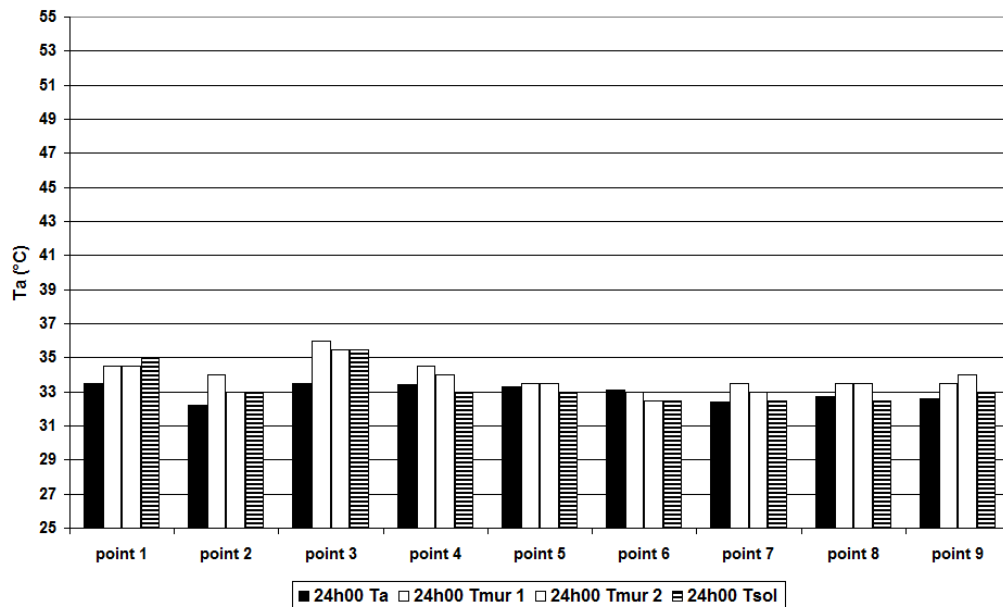
La distribution horizontale des températures de surface des murs et du sol, T_{mur} et T_{sol} , en été est donnée par les Fig. (VIII- 20 (a), (b) et (c)).



(a) : Évolution des températures de l'air et de surface à travers les rues du Ksar à 6h00 du matin.



(b) : Évolution des températures de l'air et de surface à travers les rues du Ksar à 15h00



(c) : Évolution des températures de l'air et de surface à travers les rues du Ksar à minuit.

Fig. VIII- 20. Évolution des températures de l'air et de surface à travers les rues du Ksar à 6h00, 15h00 et 24h00. 26 juin 03.

Au cours du cycle journalier, les températures de surface des façades T_{mur} fluctuent en moyenne entre 30.00 et 39.00°C et présentent des amplitudes thermiques journalières comprises entre 8.00 et 10.00°C. En raison de la haute altitude du soleil et du faible angle d'incidence sur les parois verticales (Arnfield 1990), la durée d'exposition des parois verticales des rues canyons est relativement courte et le principal gain de chaleur de ces surfaces provient du rayonnement diffus et réfléchi. Les températures de surface des façades opposées sont de ce fait pratiquement

identiques et la différence maximale ΔT_{mur} entre une façade exposée et celle qui est à l'ombre n'excède pas 2.00°C .

La comparaison de la température de surface des parois verticales et celle du sol montre cependant d'importants contrastes thermiques aux heures les plus chaudes de la journée. En fait, en dépit de la forte compacité des rues canyons ($2.75 \leq H/W \leq 5.5$), les surfaces horizontales sont fortement exposées au rayonnement solaire incident. Avec un angle d'incidence compris entre 0 et 81° en été, le rayonnement solaire direct atteint les surfaces du sol des canyons les plus profonds (Arnfield 1990) et T_{sol} peut atteindre une valeur de 54°C . De ces différences dans le niveau d'exposition et d'ombrage des surfaces horizontales et verticales dans les canyons urbains, résultent des écarts thermiques $\Delta(T_{\text{mur}}-T_{\text{sol}})$ relativement importants selon la géométrie de la rue et son orientation.

En hiver en revanche, en raison de la faible altitude solaire et la forte compacité urbaine, les rues sont pratiquement à l'ombre toute la journée et les températures de surface des façades opposées et du sol, T_{mur} et T_{sol} , d'une même rue sont pratiquement identiques. Au cours du cycle journalier, T_{mur} et T_{sol} fluctuent en moyenne entre 10 et 18°C et présentent des amplitudes thermiques journalières comprises entre 8 et 10°C . La différence maximale $\Delta(T_{\text{mur}}-T_{\text{sol}})$ entre les parois verticales et horizontale dans une même rue n'excède pas 2°C . En revanche, des écarts thermiques existent dans les valeurs relevées d'une rue canyon à l'autre selon l'orientation des versants, la géométrie des rues et leur orientation.

VIII- 2.3.1. Effet de la topographie du site sur les températures de surface.

L'effet de pente sur les températures de surface est identique à celui observé sur les températures de l'air : négligeable en été mais plus marqué en hiver lorsque le soleil est plus bas sur l'horizon : dans ces conditions, les rues situées sur l'adret (versant ensoleillé) présentent des températures de surface (façades et sol) plus chaudes de 2 à 4°C au milieu de la journée. Ainsi, lorsque sur le versant sud les températures de murs et de sol sont de l'ordre de 16 et 18°C aux environs de $12\text{h}00 - 15\text{h}00$, elles avoisinent les 14°C dans la rue située sur le versant Nord.

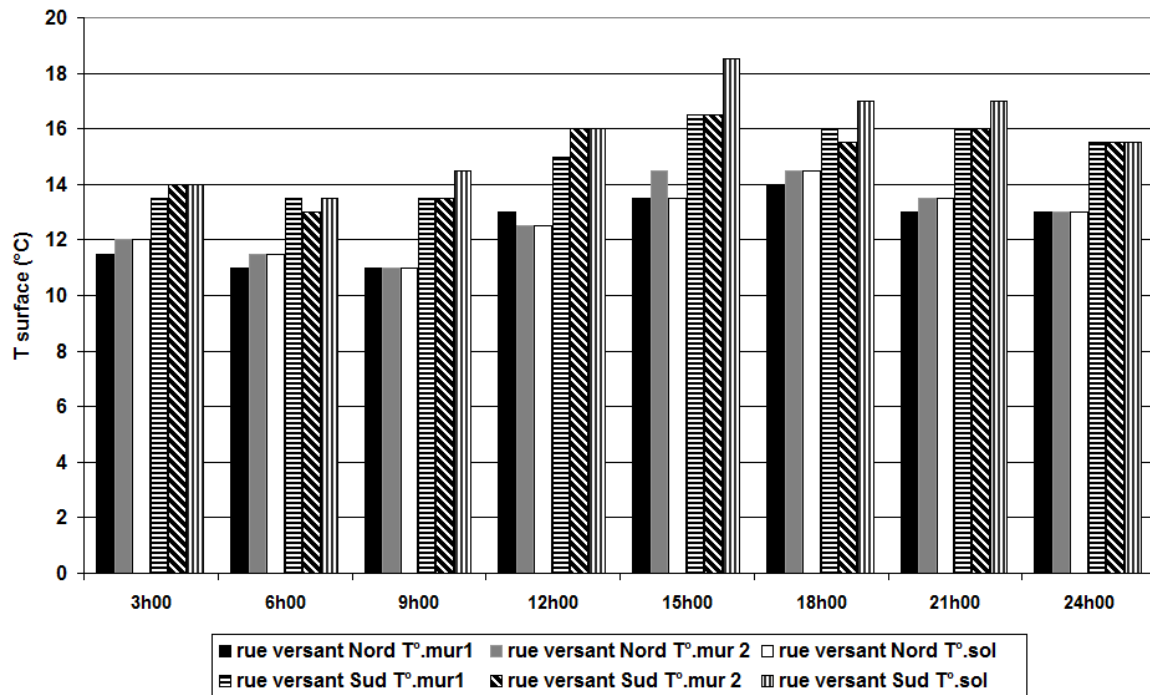


Fig. VIII- 21. Évolution des températures de surface d'hiver dans les rues situées sur les versants Nord et Sud : 12 février 04.

Hiver comme été, les températures de surface sont en outre influencées par l'exposition des versants par rapport aux vents dominants. Sous conditions de vents forts, les rues face aux vents présentent des températures de surface plus basses en comparaison avec celles des rues sous le vent. Les écarts thermiques entre les surfaces des différentes rues sont cependant liés à d'autres facteurs que sont la géométrie des rues et leur orientation.

VIII- 2.3.2. Effets de la morphologie urbaine sur les températures de surface.

VIII- 2.3.2.1. Effet de l'orientation des rues.

En été, l'orientation des canyons semble être un facteur d'importance dans le comportement thermique des surfaces des rues, particulièrement celui des températures de surfaces horizontales : ces dernières sont effectivement soumises à une importante surchauffe lorsqu'elles sont orientées dans la direction Est-ouest et NE-SO.

La figure (VIII- 22) indique en effet que l'alignement Est-ouest (Pt.3, H/W=2.89) et NE-SO (Pt.1, H/W=2.73) des rues canyons résulte dans l'irradiation maximale des surfaces horizontales au milieu de la journée. En revanche, les rues compactes d'orientation proche de la direction Nord-sud et NO-SE (Pt.2 et Pt.4 ; H/W=3.28) sont moins exposées au rayonnement solaire direct et montrent des variations moins importantes dans leur température de surface horizontale.

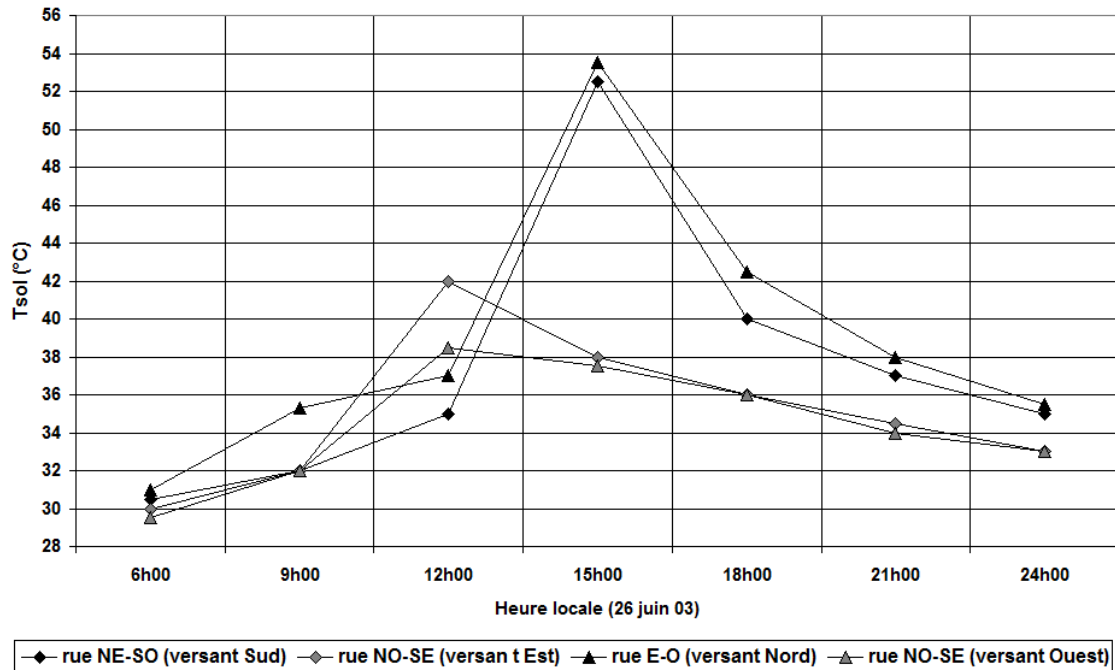


Fig. VIII- 22. Variation des températures de sol (T_{sol}) en fonction de l'orientation des canyons : 26 juin 03.

En fait, la différence dans l'orientation crée une certaine asymétrie dans l'exposition solaire des rues durant les heures de la journée. Le rayonnement solaire direct atteint une portion considérablement plus grande d'aire de surface dans une rue Est-ouest que dans une rue Nord-sud en début de matinée et en fin d'après midi (Meir et al. 1995). Cette importante contribution du rayonnement solaire direct apparaît être un facteur important dans l'accélération du réchauffement des surfaces de la rue Est-ouest. Aux environs de 15h00, les températures de surface de sol des canyons d'orientation Est-ouest atteignent des valeurs maximales de 52-54°C (Pt.1 et 3) tandis que dans les rues de direction Nord-sud et Nord-ouest sud-est, T_{sol} n'excède pas la valeur maximale de 42°C aux environs de midi.

L'amplitude thermique journalière d'une surface horizontale est maximum au niveau d'une rue Est-ouest et peut atteindre 25°C. Dans une rue Nord-sud en revanche, elle ne dépasse guère 12°C. Les simulations numériques par Arnfield (1990) confirment ces résultats et montrent que sous les latitudes moyennes, le sol d'une rue canyon de prospect $H/W=3$ et d'orientation Est-ouest reçoit approximativement 60% du rayonnement incident sur une surface horizontale non obstruée. La surface horizontale d'une rue N-E ne reçoit en revanche que 17% de ce rayonnement (Arnfield 1990).

En ce qui concerne les parois verticales des rues canyons, elles semblent être également influencées par l'orientation des rues. Les températures des murs bordant les rues Est-ouest ($T_{mur}=42^{\circ}\text{C}$) sont de 2 à 4°C supérieures à celles des rues Nord-sud ($T_{mur}=38^{\circ}\text{C}$). Il doit être noté cependant que l'absorption totale d'ensemble est augmentée par les réflexions internes dans les rues compactes.

L'effet de l'orientation des rues sur les températures de surface est cependant moins marqué en hiver. En raison de la géométrie solaire d'hiver, les rues compactes sont à l'ombre une grande partie de la journée et les différences les plus importantes se produisent aux environs de midi, lorsque l'orientation proche de la direction N-S permet une incidence considérablement plus élevée du rayonnement direct sur les surfaces des murs et du sol qu'une orientation Est-ouest.

La figure (VIII- 23) montre que la rue NO-SE (Pt.8) chauffe plus vite que la rue NE-SW (Pt.2) aux environs de midi, avec des écarts thermiques respectifs ΔT_{mur} , et ΔT_{sol} de 2.5 et 4°C. Ces différences résultent de la pénétration solaire dans la rue NO-SE à partir du Sud. D'une manière moins prononcée, les rues d'orientation E-W et NE-SO captent le rayonnement solaire provenant du SO au cours de l'après-midi mais les contrastes de température de surface entre les rues n'excèdent pas 1.5°C.

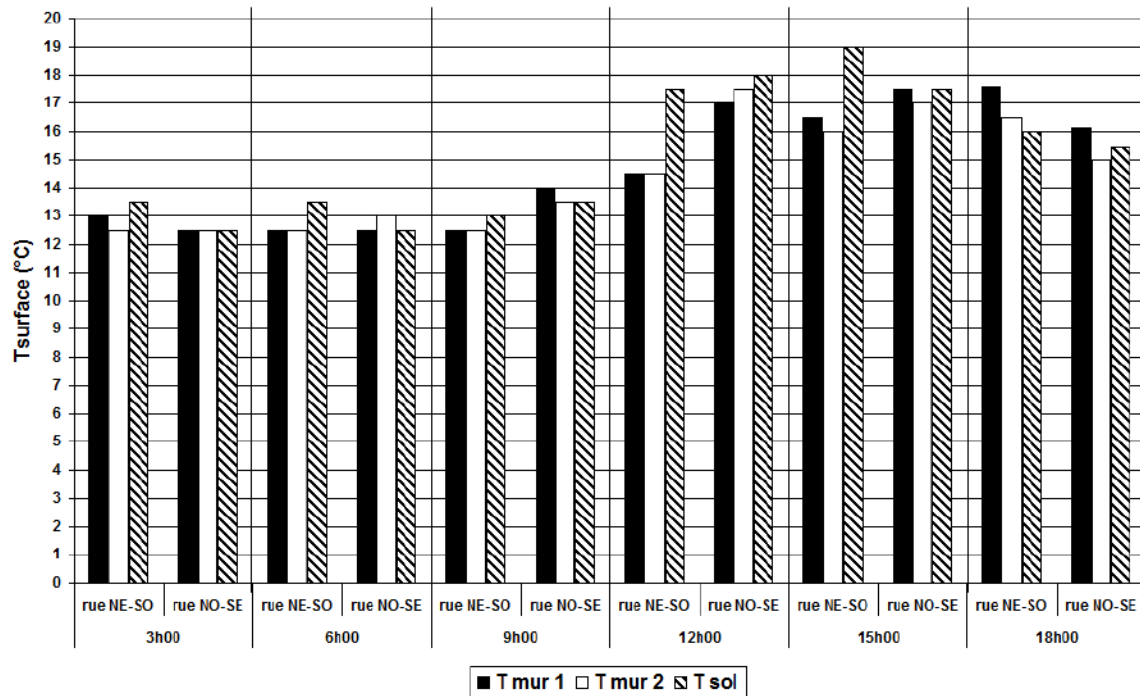


Fig. VIII- 23. Variation des températures de surface T_{mur} et T_{sol} en fonction de l'orientation des rues : 12 février 04.

En conclusion, il peut être affirmé qu'au cours de l'été, l'orientation des rues a une influence sur le flux solaire reçu au voisinage du sol, en particulier les rues orientées Est-Ouest. Les pics sont enregistrés aux environs de 15h00 lorsque l'altitude élevée du soleil permet une pénétration maximale dans la cavité du canyon. Les rues N-S et NO-SE permettent en revanche un meilleur ombrage de leurs surfaces, particulièrement durant les heures de faible altitude solaire. En hiver, cette orientation N-S et NO-SE assure cependant une meilleure pénétration du rayonnement solaire aux environs de midi. Ces résultats sont en accord avec les modélisations numériques par Arnfield (1990) et les travaux de terrain par Pearlmutter et al. (1999), Bourbia et Awbi (2004), Pearlmutter et al. (2006) et Pearlmutter et al. (2007).

VIII- 2.3.2.2. Effet du prospect H/W.

En été, la comparaison des températures de surface T_{mur} et T_{sol} des différentes rues canyons laisse apparaître l'influence du prospect H/W. Sur la figure (VIII- 24.), il peut être observé que les températures de surface les plus faibles et les plus homogènes sont présentes dans la rue canyon la plus profonde (Pt.5, H/W=5.5, NE-SW). Avec des températures respectives de 35-36°C et 37-38°C au milieu de la journée (12h00-15h00), T_{mur} et T_{sol} sont très voisines, l'écart thermique maximal $\Delta(T_{\text{mur}}-T_{\text{sol}})$ n'excède pas 2.5°C.

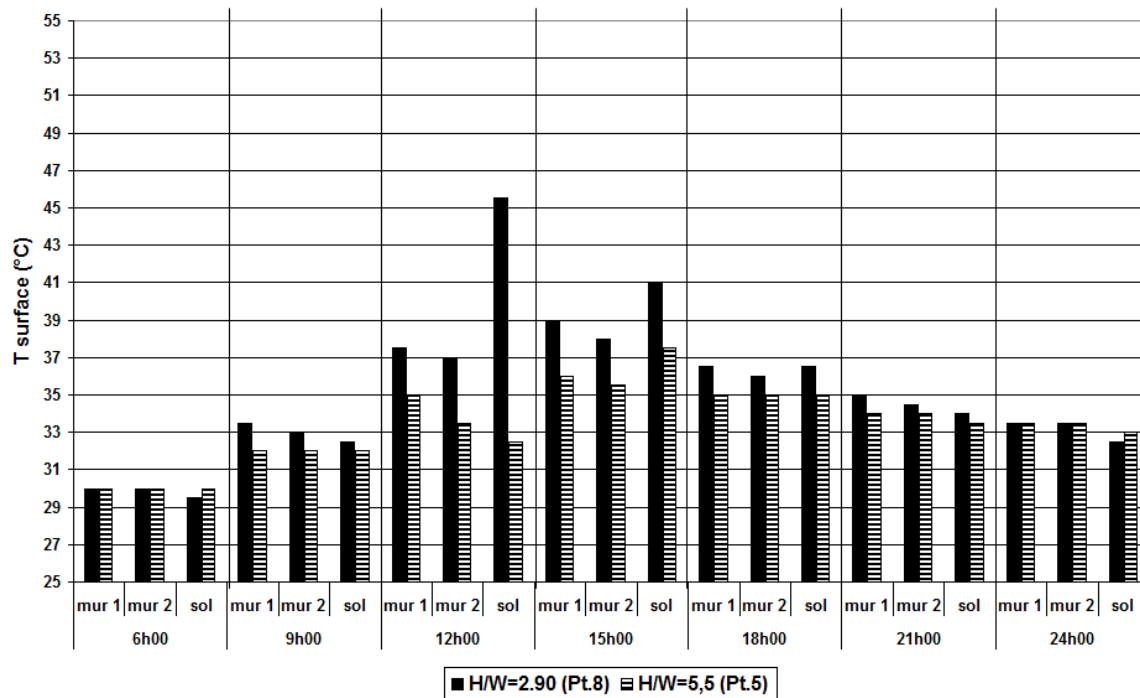


Fig. VIII- 24. Variation des températures de surface en fonction de la géométrie urbaine : 26 juin 03.

Le canyon de même orientation NE-SO mais de profil plus large ($H/W=2.90$) montrent en revanche des valeurs plus élevées et une variation plus importante dans ses températures de surface. T_{mur} est de l'ordre de $38-39^{\circ}\text{C}$ tandis que T_{sol} atteint une valeur maximale de 45.5°C . Pour des rues d'orientation NE-SO, des écarts thermiques ΔT_{mur} de 3°C et ΔT_{sol} de 10°C sont ainsi enregistrés entre la rue de prospect $H/W=5.5$ et les canyons de prospect H/W proche de 3.

En été, le modèle des températures de surface serait donc fortement corrélé à la structure urbaine. Les températures de surface sont plus homogènes et décroissent avec l'augmentation du prospect H/W . L'amplitude de ce phénomène dépend néanmoins de l'orientation de la rue vu que l'importante élévation solaire permet une irradiation directe des sols des canyons orientés Est-ouest même les plus compacts. Ces résultats corroborent les études de terrain par Bourbia et Awbi (2004), Ali-Toudert et al. (2005), Pearlmutter et al. (2006) ainsi que les simulations numériques par Arnfield (1990), Bourbia et Awbi (2004) et Grundström et al. (2003).

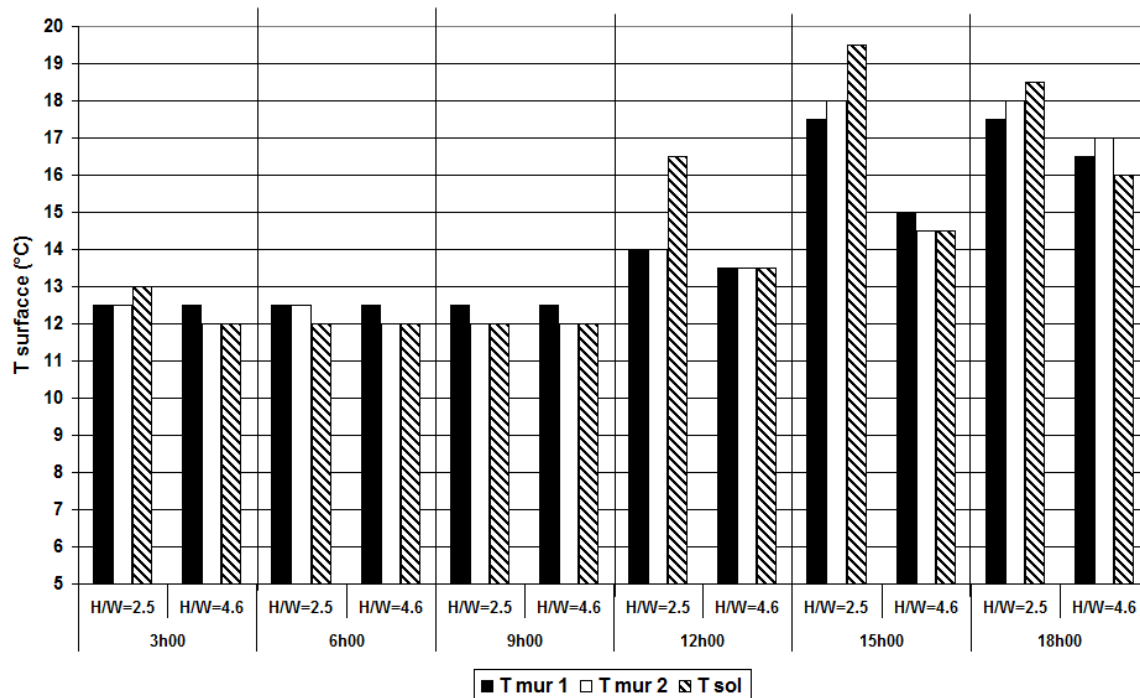


Fig. VIII- 25. Variation des températures de surface en fonction de la géométrie urbaine : 12 février 04.

En hiver, sur les versants ensoleillés (Sud et Ouest), l'effet du prospect H/W sur les températures de surface est également non négligeable. Dans la figure (VIII- 25.), les températures de surface des rues situées sur le versant Ouest, de même orientation NE-SW et de prospect H/W respectif de 2.5 et 4.6 sont comparées entre elles. Les résultats indiquent que les températures de surface les plus faibles sont présentes dans le canyon le plus étroit avec des écarts thermiques maximaux ΔT_{mur} et ΔT_{sol} respectifs de 3 et 5°C. L'ensoleillement des rues décroît ainsi avec l'augmentation du prospect H/W. Ces résultats sont en accord avec les simulations numériques par Arnfield (1990) et témoignent de l'importance de la géométrie urbaine dans le microclimat urbain.

VIII- 2.3.2.3. Effet du passage couvert.

L'effet du passage couvert sur les températures de surface est identique à celui observé sur les températures de l'air : étant à l'abri de l'irradiation solaire directe, elles sont faibles et homogènes. Elles varient entre 12 et 17°C au cours du cycle journalier en hiver tandis qu'elles n'excèdent pas les valeurs comprises entre 29.5 et 34.5°C au cours de l'été. L'écart $\Delta(T_s)$ entre les différentes surfaces du PC n'excède pas 0.5 à 1.5°C hiver comme été.

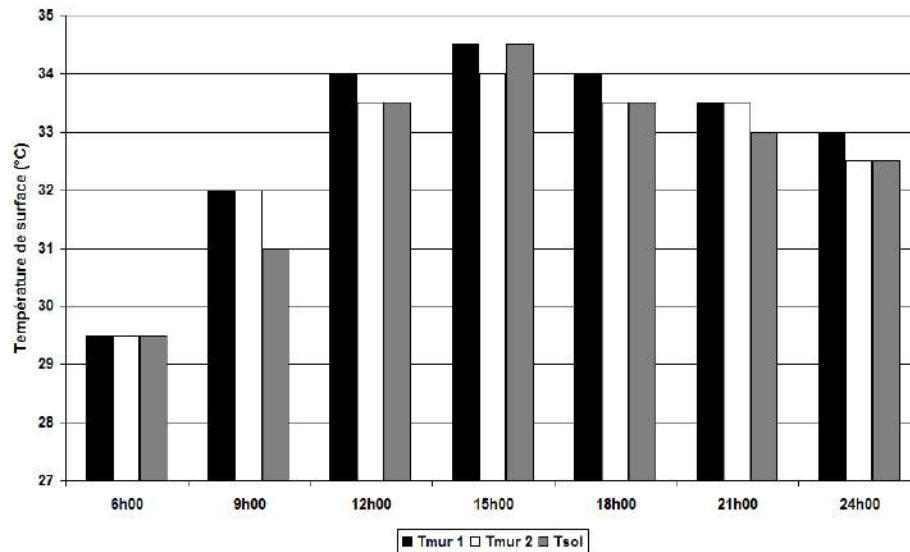


Fig. VIII- 26. Variations des températures de surface du PC au cours du cycle journalier en été : 26 juin 03.

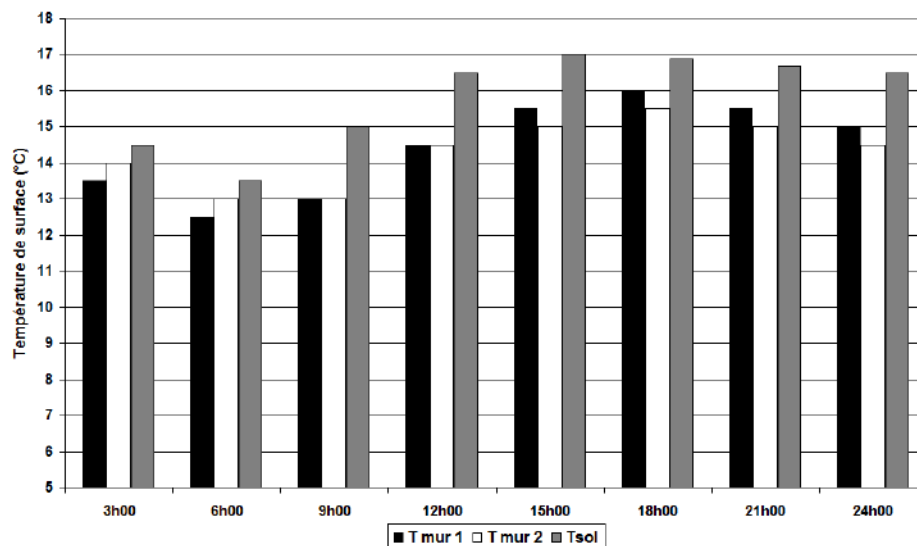


Fig. VIII- 27. Variations des températures de surface du PC au cours du cycle journalier en hiver : 13 février 05.

Les contrastes thermiques avec les rues découvertes peuvent être importants et atteindre des valeurs $\Delta(T_{\text{mur}})$ et $\Delta(T_{\text{sol}})$ respectifs de 14 et 20°C en été. En hiver en revanche, ces contrastes sont nettement moins importants et n'excèdent pas 5°C.

Ainsi, contrairement au régime de distribution horizontale des températures de l'air, celui des températures de surface des murs et du sol est hétérogène et montre l'influence de la géométrie urbaine et l'orientation des rues. En été, en raison de la hauteur du soleil, les rues Est-ouest et NE-SO sont soumises à une importante surchauffe de leur surface horizontale au milieu de la journée. Dans ces conditions, les contrastes thermiques induits entre les températures de surface des murs et du sol peuvent atteindre 14°C alors qu'elles n'excèdent pas les 3-4°C dans les rues Nord-sud et NO-SE. Ces dernières permettent un meilleur ombrage de leurs surfaces,

particulièrement durant les heures de faible altitude solaire. En hiver, cette orientation N-S et NO-SE assure en revanche une meilleure pénétration du rayonnement solaire aux environs de midi. Ces résultats sont en accord avec les modélisations numériques par Arnfield (1990) et les travaux de terrain par Pearlmutter et al. (1999), Bourbia et Awbi (2004), Ali-Toudert et al. (2005), Pearlmutter et al. (2006), Pearlmutter et al. (2007).

Le modèle des températures de surface serait par ailleurs fortement corrélé à la géométrie urbaine tel que rapporté par les études de terrain par Pearlmutter et al. (1999), Bourbia et Awbi (2004) et Ali-Toudert et al. (2005) ainsi que les simulations numériques par Arnfield (1990), Bourbia et Awbi (2004) et Grundström et al. (2003). Hiver comme été, les températures de surface décroissent en effet avec l'augmentation du prospect. En termes d'ombrage, un prospect étroit réduit l'exposition directe des surfaces horizontale et verticales dans la rue canyon. L'amplitude de ce phénomène dépend néanmoins de l'orientation de la rue. En été, l'orientation Est-ouest est la moins judicieuse vu qu'elle permet la surchauffe maximale des surfaces horizontales des rues, même les plus profondes.

À elle seule, la géométrie urbaine ne suffit donc pas à réduire le stress thermique d'été, elle doit être combinée à une orientation correcte des rues.

VIII- 2.4. La température moyenne radiante.

La température moyenne radiante T_{mrt} est obtenue en convertissant la température globe mesurée dans les rues canyons. Cette conversion est donnée par l'équation suivante (ASHRAE Fundamental Handbook, 2001, Chap. 14).

$$T_{mrt} = [(1.10 \cdot 10^8 v_a^{0.6}) / \epsilon D^{0.4} * (T_g - T_a) + (T_g + 273)^4]^{1/4} - 273,$$

T_{mrt} = température moyenne radiante (°C),

v_a = vitesse d'air (m/s),

D = diamètre du globe (= 0.15 m),

E = émissivité (= 0.95)

T_g = température globe (°C),

T_a = température d'air (°C).

La figure (VIII- 28) montre le cycle journalier de la température moyenne radiante T_{mrt} d'été à l'intérieur des rues canyons d'orientation et de géométrie différentes.

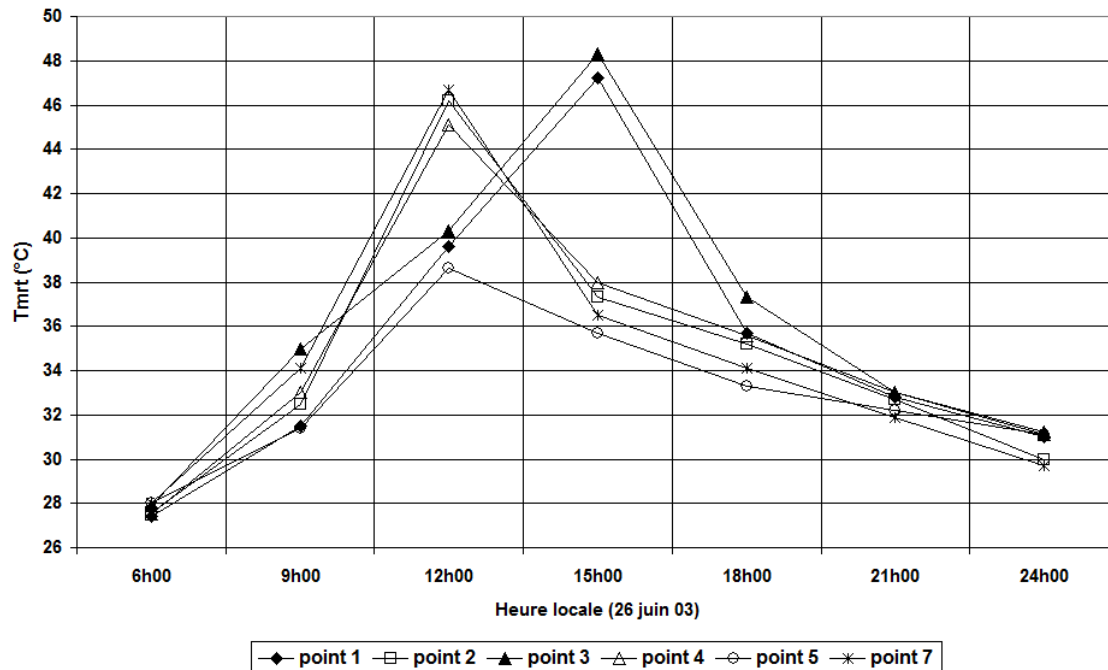


Fig. VIII- 28. Variation de T_{mrt} à travers les rues du ksar au cours du cycle journalier. 26 juin 03.

Tout comme pour le modèle des températures de surface, T_{mrt} suit de près celui des températures de l'air en début de matinée et au cours de la nuit avec des valeurs respectives de 27.5 et 30-32°C. Durant cette période, des similitudes entre les différents points de mesure sont observées et les écarts d'une rue à l'autre sont d'une magnitude très faible, avec des variations maximales ΔT_{mrt} de 1-1.5°C. C'est au milieu de la journée (12h00-15h00) que des différences sensibles apparaissent : la température moyenne radiante T_{mrt} maximale varie en effet entre 36.00 et 52.00°C et ΔT_{mrt} fluctue entre 7.5 et 12.5 °C selon la géométrie de la rue et son orientation.

VIII- 2.4.1. Effet de la topographie du site sur la température moyenne radiante.

L'effet de pente sur les températures de rayonnement est identique à celui observé sur les températures de l'air et de surface : négligeable en été.

VIII- 2.4.2. Effets de la morphologie urbaine sur la température moyenne radiante.

VIII- 2.4.2.1. Effet de l'orientation des rues.

L'influence de l'orientation peut être observée dans la figure (VIII- 29) où, en raison des modèles d'ombrage différents dans les rues N-S et E-O, une asymétrie est observée dans l'exposition du piéton au rayonnement moyen durant les heures de la journée.

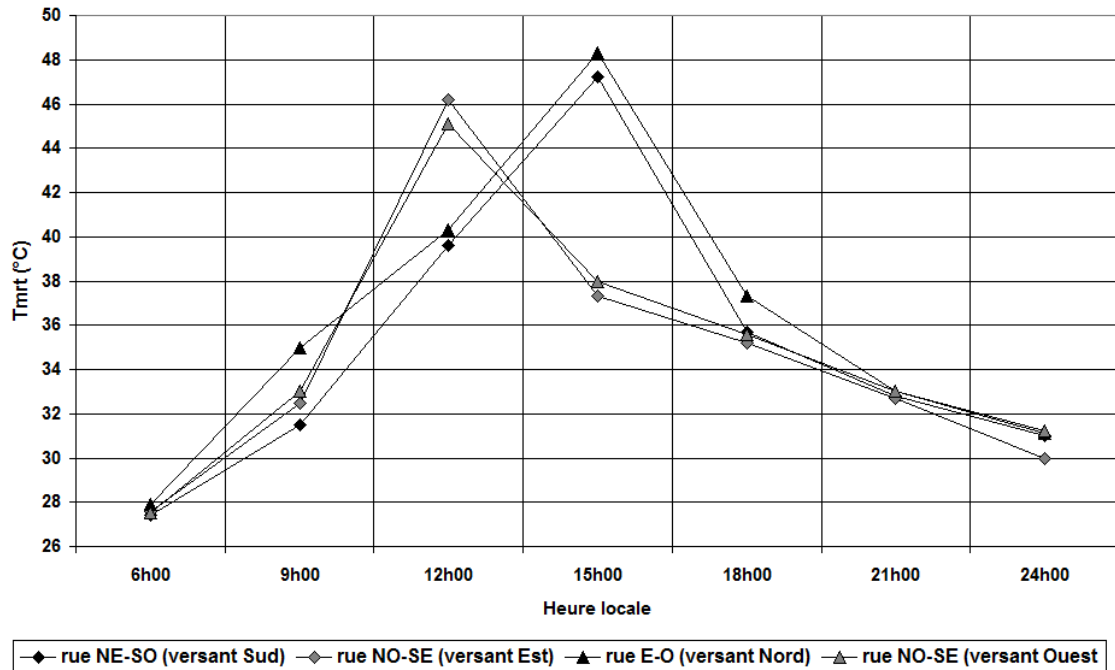


Fig. VIII- 29. Variation de T_{mrt} en fonction de l'orientation de la rue : 26 juin 03.

Dans les rues Nord-sud et NO-SE, les réductions du rayonnement moyen sont plus importantes durant la matinée et l'après-midi qu'aux environs de midi où T_{mrt} atteint une valeur maximale de 46°C. Le corps est protégé du rayonnement solaire de faible incidence provenant de l'Est au cours de la matinée, et de l'Ouest dans l'après-midi. Il est cependant fortement exposé aux environs de midi mais la durée d'exposition et l'amplitude du rayonnement sont moins importantes que dans les rues Est-ouest dont T_{mrt} atteint une valeur maximale de 48-50°C aux environs de 15h00.

À l'échelle de la journée, les rues N-S sont mieux protégées du rayonnement solaire que les rues E-O. La géométrie solaire dicte ainsi un ombrage préférentiel des rues orientées Nord-sud, particulièrement durant les heures de faible latitude solaire.

VIII- 2.4.2.2. Effet du prospect H/W.

L'influence du prospect sur la température de rayonnement est illustrée dans la figure (VIII- 30.) où T_{mrt} dans la rue compacte de $H/W=5.5$ est comparée avec les valeurs mesurées dans les rues de même orientation NE-SW mais de prospect plus large ($H/W=2.80-2.90$).

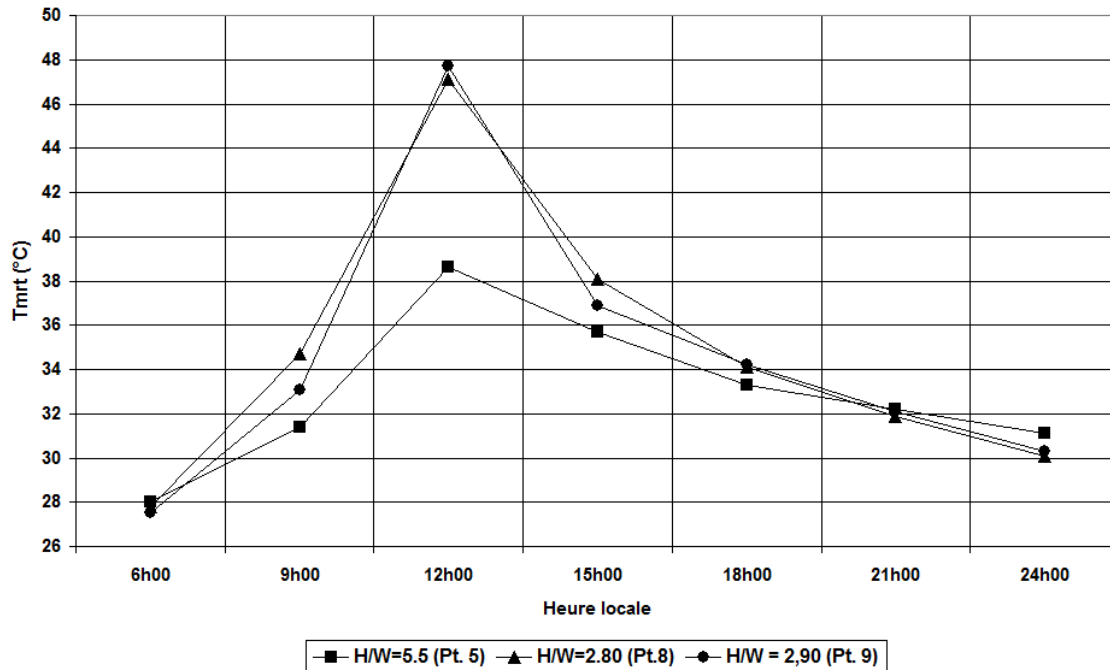


Fig. VIII- 30. Variation de T_{mrt} en fonction du profil de la rue : 26 juin 03.

Comme il peut être noté, dans les rues les plus larges ($T_{mrt} = 48^{\circ}\text{C}$), un piéton est exposé à un rayonnement moyen beaucoup plus élevé que dans la rue très profonde ($T_{mrt} = 38^{\circ}\text{C}$). L'écart thermique ΔT_{mrt} est maximal en début d'après-midi (15h00), avec une magnitude de l'ordre de 10 à 14°C . Le piéton reçoit moins de rayonnement avec l'augmentation du prospect H/W en raison du degré d'ombrage induit. Cette relation corrobore avec le modèle observé pour les températures de surface et montre que la géométrie urbaine est un facteur d'importance dans la détermination du confort thermique du piéton.

VIII- 2.4.2.3. Effet du passage couvert.

En été, la chaleur émise à partir des surfaces du passage couvert est notablement plus faible en comparaison avec les autres canyons exposés au rayonnement solaire direct. Les valeurs T_{mrt} enregistrées en ce point sont les plus basses et les plus homogènes de tout le Ksar. Pendant que la température moyenne radiante varie entre 29 et 49°C au niveau du point le plus exposé du Ksar (place du marché), dans le PC, les valeurs de T_{mrt} fluctuent entre 28 et 35°C au cours de la journée et sont de 5 à 14°C plus faibles que celles des autres rues canyons au milieu de la journée.

Ces résultats soulignent l'effet de rafraîchissement du PC et mettent en exergue l'utilité des protections horizontales comme passages piétons.

En résumé, les résultats indiquent clairement que la géométrie de la rue canyon compacte peut réduire le gain de chaleur du piéton durant presque toutes les heures d'été mais que la réduction est dépendante de l'orientation de la rue : dans les rues Nord-sud et NO-SE, les réductions du rayonnement moyen sont plus importantes durant la matinée et l'après-midi qu'aux environs de midi mais la durée d'exposition et l'amplitude du rayonnement sont moins importantes que dans les rues Est-ouest. Le rayonnement solaire reçu par un piéton au cours de la journée serait ainsi

plus faible dans la rue canyon avec le prospect le plus grand et dont l'axe est orienté Nord-sud ou proche de cette direction. Cette relation corrobore avec le modèle observé pour les températures de surface et montre que la géométrie urbaine est un facteur d'importance dans la détermination du confort thermique du piéton tel qu'il a été démontré par Pearlmutter et al. (1999), Grundström et al. (2003), Bourbia et Awbi (2004), Ali-Toudert et al. (2005), Pearlmutter et al. (2006) et Pearlmutter et al. (2007).

VIII- 2.5. Le confort thermique dans les rues du Ksar.

L'indice thermique PET ou "Température physiologique équivalente" est calculé pour la période d'été en utilisant un programme obtenu directement de l'auteur (PET_neu, Höppe 2001). Le calcul du PET requiert des données sur la température de l'air T_a (°C), la pression de vapeur V_p (Pa), la vitesse d'air v (m/s) et la température moyenne de rayonnement T_{mrt} (°C). Toutes ces variables sont mesurées lors de la campagne de juin 03. Notons cependant que la valeur de la pression de vapeur V_p est obtenue à partir de la mesure de l'humidité relative RH et de la température de l'air T_a (avec V_p (pression de vapeur) = RH * V_p max, avec V_p max = $6.11 \cdot 10^{(7.45 \times T_a / (234.5 + T_a))}$).

La figure (VIII- 31) montre l'évolution de PET d'une personne au milieu de la rue canyon (1.50 m du niveau du sol) le long du cycle journalier en été. Les valeurs de PET sont comparées pour toutes les rues d'orientation et de géométrie différentes.

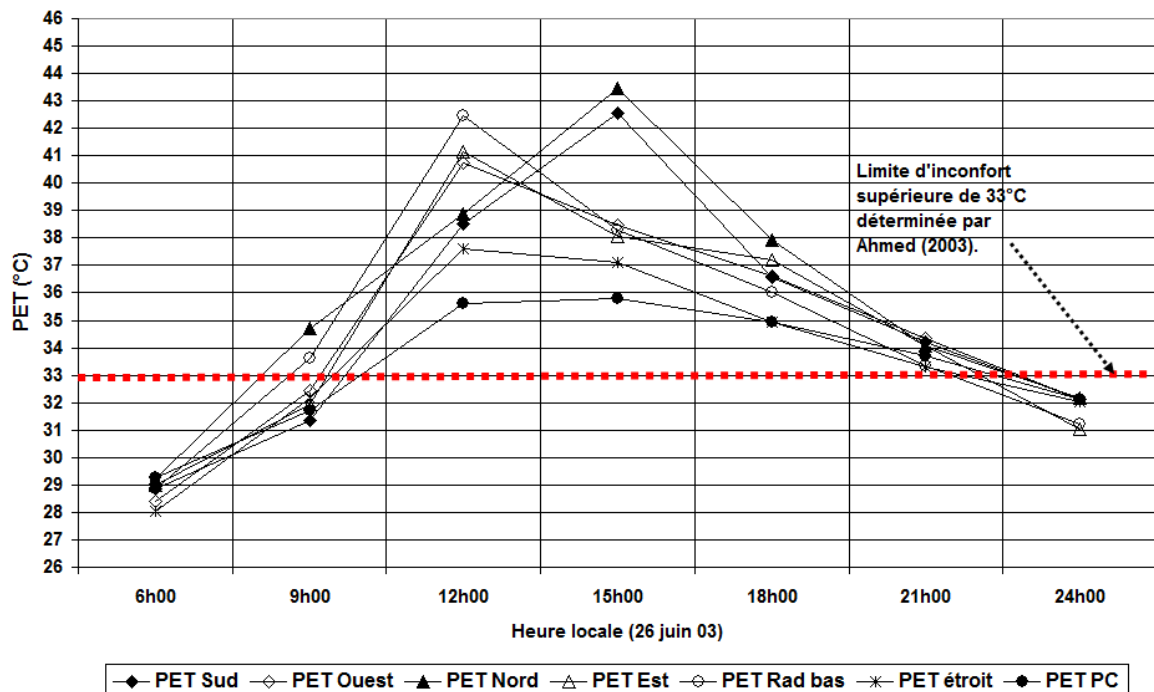


Fig. VIII- 31. Variation de PET dans les rues du Ksar au cours du cycle journalier. 26 juin 03.

Au cours de la nuit et des premières heures du matin, les différences d'une rue à l'autre sont négligeables, PET est de 27.50 à 29°C avant 9h00 et 31.90°C après 21h00. Durant cette période,

il peut être noté que dans toutes les rues du ksar, les conditions sont dans la zone de confort supposée de 33.0°C (Ahmed 2003) indépendamment de la géométrie urbaine et l'orientation. Entre 10h00 et 18h00 en revanche, les valeurs de PET excèdent le seuil d'inconfort thermique et atteignent des valeurs maximales comprises entre 37.50 et 45.0°C en début d'après-midi (12h00-15h00). Ces valeurs sont très proches de celles obtenues par Ali-toudert (2005) qui observe un niveau de contrainte thermique très élevé aux environs de midi dans les rues du Ksar de Beni-Izgeun. C'est en effet au cours de cette période de la journée (12h00-15h00) que des différences sensibles apparaissent d'une rue canyon à l'autre. Etroitement corrélés au modèle de T_{mt} , ces écarts sont fonction de la géométrie de la rue et son orientation.

VIII- 2.4.1. Effet de la topographie du site sur le confort thermique.

En raison de la géométrie solaire caractéristique de l'été, l'effet de pente est négligeable sur le confort thermique du piéton.

VIII- 2.4.2. Effets de la morphologie urbaine sur le confort thermique.

VIII- 2.5.2.1. Effet de l'orientation des rues.

Tel qu'il peut être observé dans la figure (VIII- 32), l'inconfort journalier du piéton est moins sévère dans les rues d'orientation N-S et NO-SE, à l'exception de midi où en raison de l'importante altitude solaire, l'effet d'ombrage n'est pas assuré. Dans la rue d'orientation Est-ouest en revanche, le piéton peut expérimenter le stress thermique pour une durée de temps plus longue, c.-à-d., tôt dans la matinée (9h00) et tout le long de l'après-midi. Les valeurs de PET sont extrêmement élevées, elles atteignent presque 45°C en début d'après-midi, indiquant ainsi un niveau de stress thermique très important dans les rues d'orientation E-O et NE-SO.

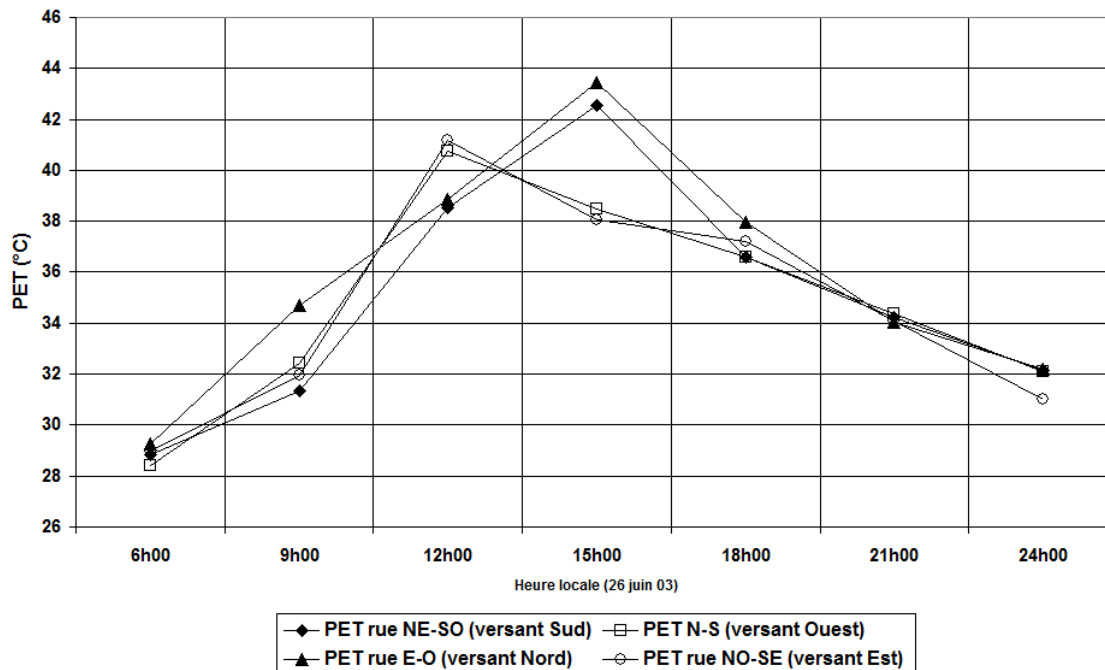


Fig. VIII- 32. Variation de PET en fonction de l'orientation de la rue canyon : 26 juin 03.

Ces résultats confirment les études de terrain et de modélisation numérique précédentes (Pearlmutter et al. 1999, Bourbia et Awbi 2004, Ali Toudert et al. 2005, Pearlmutter et al. 2006, Pearlmutter et al. 2007) et indiquent que l'orientation N-S et NO-SE sont plus confortables excepté aux environs de midi.

VIII- 2.5.2.2. Effet du prospect H/W.

La géométrie de rue compacte sert à protéger les piétons du stress thermique à des heures cruciales de la journée. Cet effet est illustré dans la figure (VIII- 33.) où PET dans la rue compacte de $H/W=5.5$ est comparée avec les valeurs mesurées dans la rue de même orientation NE-SO mais de prospect plus large ($H/W=2.90$).

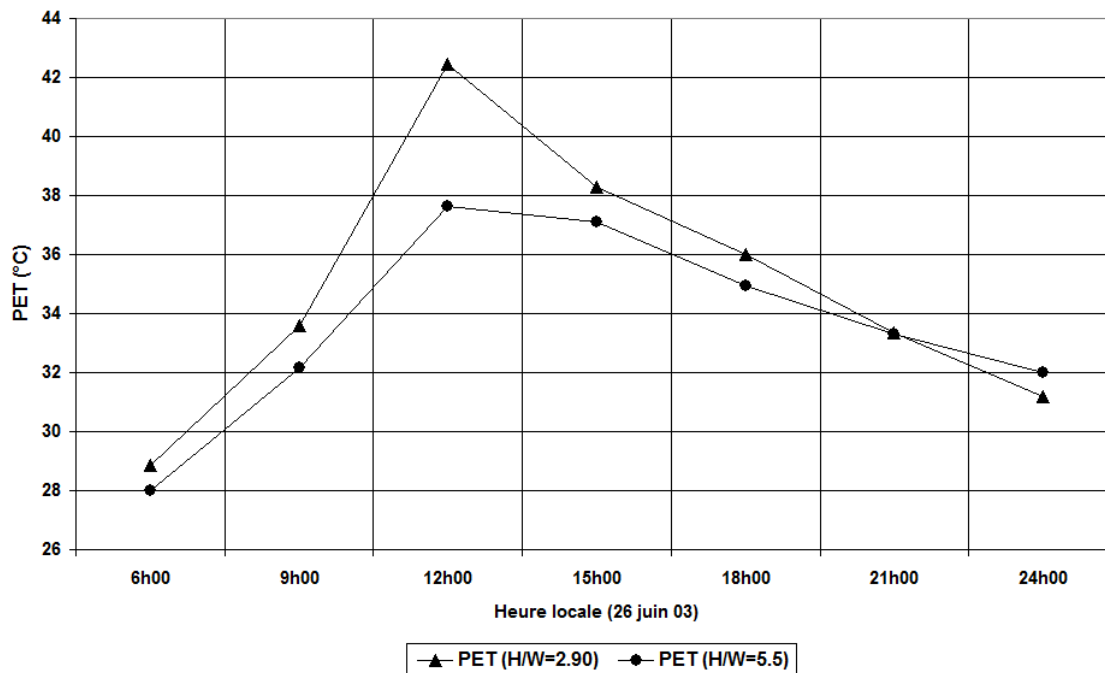


Fig. VIII- 33. Variation de PET en fonction du profil de la rue : 26 juin 03.

Tandis que le niveau de stress thermique n'excède pas 37.60°C aux environs de midi dans une configuration étroite protégée de manière maximale ($H/W=5.5$), la rue largement exposée au rayonnement solaire direct et de profil moins compact ($H/W=2.90$) est soumise à des niveaux de stress thermique de plus de 5 à 8°C .

Les résultats indiquent ainsi que l'ombrage induit par des prospects élevés réduit de manière substantielle l'inconfort thermique des piétons au niveau de la rue canyon.

VIII- 2.5.2.3. Effet du passage couvert.

Dans le passage couvert, les valeurs de PET sont très stables et varient dans une plage de 28 et 35°C le long du cycle journalier. Des écarts $\Delta(\text{PET})$ importants, jusqu'à 14°C , sont observés entre le PC et les rues découvertes, largement exposées au rayonnement solaire direct. Ces écarts dépendent néanmoins de la géométrie de la rue et son orientation, les contrastes thermiques les plus importants étant observés avec les rues d'orientation E-O et NE-SO.

Les conclusions de cette analyse confirment les études précédentes (Pearlmutter et al. 1999, Grundström et al. 2003, Bourbia et Awbi 2004, Ali Toudert et al. 2005, Pearlmutter et al. 2006, Pearlmutter et al. 2007) sur l'effet de la géométrie urbaine dans la réduction du stress thermique d'été dans les villes du désert. Elles soulignent également l'importance de l'orientation et des protections horizontales (passages couverts). Il est toutefois important de noter que les contraintes thermiques d'un espace ouvert peuvent en outre être amplifiées ou au contraire réduites selon les conditions de ventilation de la rue canyon.

VIII- 2.5.1. Effet de la ventilation urbaine sur le confort thermique.

L'effet de la ventilation urbaine sur la réduction du stress thermique d'été peut être observé en comparant les conditions de confort thermique calculées dans les rues canyons caractérisées par une même configuration urbaine (géométrie urbaine et orientation) mais dont les conditions de vents sont contrastées. Les résultats montrent clairement que l'inconfort thermique est moindre dans la rue caractérisée par les vitesses d'air les plus élevées en raison des effets de refroidissement par la ventilation du vent.

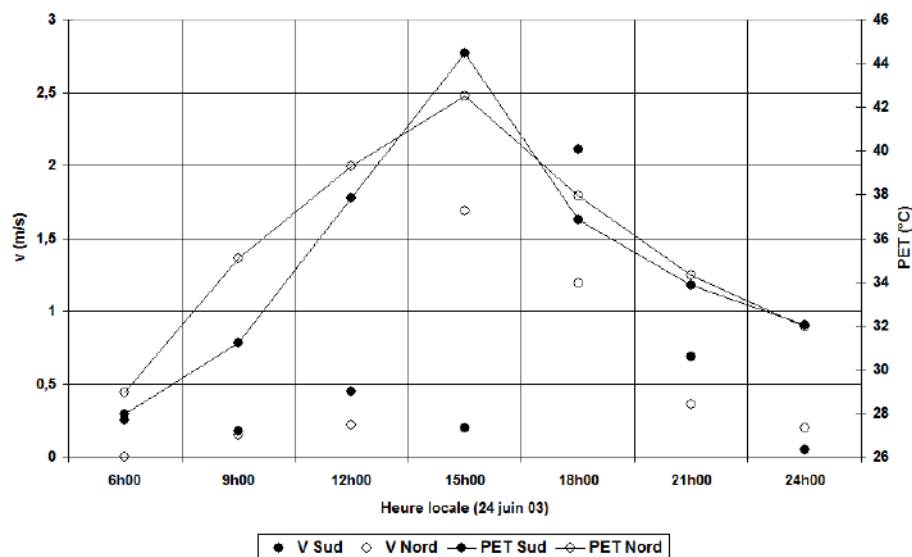


Fig. VIII- 34. Effet du vent sur les conditions de confort thermique (données juin 03).

Ainsi, avec des vitesses d'air d'une vitesse moyenne de 1.70 m/s, la valeur de PET maximale mesurée dans la rue du versant Nord ($H/W=2.89$, E-O) est d'environ 42.50°C aux environs de 15h00 tandis qu'elle est de 2.0°C plus élevée dans la rue du versant Sud ($H/W=2.73$, NE-SO) dont la vitesse d'air n'excède pas 0.20 m/s. Cet effet modérateur du stress thermique par le vent est encore plus visible dans un espace complètement dégagé (Place du marché, Pt.10) où un écart $\Delta(PET)$ de presque 4.0°C est observé au milieu de la journée lorsque la vitesse d'air augmente de 0.35 à 1.30 m/s. Ce sont les mêmes résultats auxquels aboutissent Ali-Toudert et al. (2005) qui indiquent que la vitesse du vent joue un rôle important dans la sensation du confort final et l'influence de la vitesse du vent diffère selon que l'emplacement soit irradié ou non. Ces auteurs indiquent que pour des vitesses de vent de 2.0 à 5.0 m/s, PET peut décroître jusqu'à 12.0°C dans le cas d'un inconfort extrême contre 2.0 à 4.0°C pour des emplacements avec des valeurs de T_{mrt} faibles. Ces conclusions confirment également celles de Pearlmutter et al. (1999), Pearlmutter et al. (2006) et Pearlmutter et al. (2007) qui notent qu'en milieu aride, le stress potentiel d'un espace

ouvert est amplifié lorsque l'exposition solaire excessive est combinée à une ventilation insuffisante.

Dans le cas de notre étude, au cours de la nuit, l'effet de la ventilation n'est cependant pas visible en raison des vitesses de vent très faibles mesurées dans les rues canyons.

En conclusion, comme le montre ces résultats, la ventilation par le vent peut réduire les niveaux de stress thermique dans les espaces extérieurs même aux heures les plus chaudes de la journée. Les effets thermiques du vent varient cependant selon qu'il s'agisse d'un vent frais ou d'un vent chaud et sec comme cela a été démontré.

Conclusion sur les microclimats caractéristiques du ksar de Ghardaïa.

Ce chapitre sur les microclimats urbains en relation avec la forme urbaine représentative des établissements traditionnels en zone désertique nous a permis de mettre en exergue l'effet de la topographie et la morphologie urbaine sur l'environnement thermique propre au ksar de Ghardaïa et les conditions de confort qui en découlent.

1. La topographie du lieu.

A partir des données analysées, il apparaît que l'exposition des versants par rapport au soleil mais également aux vents détermine les conditions thermiques dans les rues canyons :

- l'orientation des versants par rapport au soleil détermine le niveau d'ensoleillement des rues en hiver. Les rues des versants nord sont celles qui sont le moins bien exposées au rayonnement solaire direct. À l'inverse, les rues des versants sud sont soumises à un meilleur ensoleillement et enregistrent les températures de l'air et de surface les plus élevées,
- l'exposition des versants aux vents dominants accentue ou au contraire aplanit les contrastes thermiques existant entre les versants ensoleillés et à l'ombre. Hiver comme été, le vent agit sur les températures de l'air et de surface des rues face au vent. Cet effet thermique dépend néanmoins de l'origine des vents. Les vents froids d'hiver et d'été de direction respective Ouest et Est permettent le refroidissement des températures tandis que les vents chauds soufflant du Sud sont à l'origine d'une augmentation des températures d'air et de surface.

2. La morphologie urbaine.

Les résultats de notre étude indiquent clairement que dans un environnement chaud et aride, le confort thermique d'un piéton peut être modifié de manière considérable par la géométrie de la rue et son orientation.

- **La géométrie de la rue.**

Contrairement à ce que l'on aurait pu prévoir, la comparaison des températures de l'air dans les rues du ksar indique qu'il n'existe pas de relation claire entre la température de l'air et la géométrie urbaine. La distribution horizontale de T_a montre un modèle uniforme à travers les rues de prospect variant entre 2.75 et 5.5. Les résultats obtenus, en accord avec ceux d'Eliasson et al. (1996) et Ali-Toudert et al. (2004), indiquent clairement que même si la géométrie urbaine est d'importance, la température de l'air des rues canyons est gouvernée par des facteurs régionaux plus complexes.

L'effet de la géométrie urbaine est cependant plus important sur la température de surface puisque cette dernière est gouvernée par le bilan énergétique local. Hiver comme été, les températures de surface décroissent en effet avec l'augmentation du prospect. En termes d'ombrage, cela signifie qu'un prospect étroit réduit l'exposition directe des surfaces horizontale et verticales dans la rue canyon. Le piéton reçoit ainsi moins de rayonnement avec l'augmentation du prospect H/W en raison du degré d'ombrage induit. Cette relation démontre que la géométrie urbaine est fondamentale dans le contrôle thermique des espaces extérieurs en zone subtropicale.

Le contrôle thermique par l'ajustement des prospects seuls présente cependant un effet limité, il doit être combiné à une orientation correcte des rues canyons.

- **L'orientation des rues canyons.**

Contrairement aux études de terrain par Pearlmutter et al. (1999), Bourbia et Awbi (2004), Pearlmutter et al. (2006) et Coronel et Alvarez (2001), l'orientation de la rue semble sans influence sur le modèle des températures de l'air en raison des effets combinés de la géométrie solaire, la forte compacité urbaine représentative de la vieille ville de Ghardaïa ainsi que l'inertie des matériaux constituant les parois des rues canyons. En été, en l'absence de vent, les rues sont ainsi surchauffées au cours des heures de la journée indépendamment de l'orientation en raison de la hauteur du soleil et de l'effet de piégeage radiatif induit par la forte compacité des rues canyons (Meir et al. 1995). De même, en hiver, en raison de la forte compacité des rues et du faible angle d'incidence du rayonnement solaire, les rues sont pratiquement à l'ombre toute la journée, indépendamment de leur orientation.

Les résultats de cette étude montrent cependant des modèles de température de surface très différents, fortement influencés par l'orientation des rues. En été, en raison de l'importante élévation solaire, l'orientation Est-ouest et NE-SO permet la surchauffe maximale des surfaces horizontales des rues, même les plus profondes. Les rues N-S et NO-SE permettent en revanche un meilleur ombrage de leurs surfaces, particulièrement durant les heures de faible altitude solaire. En hiver, cette orientation N-S et NO-SE assure cependant une meilleure pénétration du rayonnement solaire aux environs de midi, ce qui induit un meilleur confort thermique du piéton. La géométrie solaire dicte ainsi un ombrage préférentiel des rues orientées Nord-sud, hiver comme été. Ces résultats sont en accord avec les modélisations numériques par Arnfield (1990) et les travaux de terrain par Pearlmutter et al. (1999), Bourbia et Awbi (2004), et Ali-Toudert et al. (2005), Pearlmutter et al. (2006) et Pearlmutter et al. (2007).

- **Les protections horizontales.**

Hiver comme été, les températures de l'air et de surface les plus basses sont enregistrées au niveau du passage couvert. En été, le PC constitue l'espace le plus confortable pour le piéton en raison de l'effet d'ombre qu'il procure. Les valeurs de T_{mrt} et PET calculées en ce point sont très stables et varient dans une plage de 28 et 35°C, valeurs qui ne sont pas très loin du seuil d'inconfort thermique supposé de 33°C. Ces résultats soulignent l'utilité des protections horizontales comme passages piétons.

3. Les effets thermiques du vent.

En plus de l'ajustement thermique par la géométrie urbaine, il s'avère en outre que la ventilation par le vent peut réduire les niveaux de stress thermique dans les espaces extérieurs même aux heures les plus chaudes de la journée. Les effets thermiques du vent varient cependant selon qu'il s'agisse d'un vent frais ou d'un vent chaud et sec. En hiver, les vents froids soufflant de l'Ouest sont fortement contraignants car ils sont à l'origine d'un important refroidissement de l'air. En été en revanche, les vents frais de direction Nord-est et Est permettent de réduire l'inconfort durant les heures de stress thermique. En période de sirocco cependant, l'inconfort thermique est amplifié. Les effets thermiques du vent améliorent de ce fait ou au contraire aggravent selon la saison et la nature des vents les conditions de confort thermique à l'échelle des espaces extérieurs.

À partir des résultats présentés ci-dessus, trois conclusions peuvent être retenues :

1. la géométrie urbaine joue un rôle important dans le comportement thermique des espaces extérieurs,
2. l'orientation correcte des rues par rapport à la géométrie solaire mais aussi aux vents peut améliorer les conditions de confort thermique des espaces extérieurs,

3. l'amélioration des conditions microclimatiques des espaces extérieurs dépend de la dynamique d'ombrage mais aussi de la ventilation urbaine.

Les principales conclusions obtenues confirment les études précédentes (Pearlmutter et al. 1999, Grundström et al. 2003, Bourbia et Awbi 2004, Ali-Toudert et al. 2005, Pearlmutter et al. 2006, Pearlmutter et al. 2007) sur l'effet des formes urbaines compactes sur l'amélioration de l'environnement thermique en extérieur dans les villes du désert.

4. Conclusion sur le confort thermique à l'intérieur des rues canyons.

Le calcul de l'indice de confort PET indique que le piéton expérimente le stress thermique durant plusieurs heures de la journée, tôt dans la matinée jusqu'à tard dans l'après-midi. Les résultats indiquent cependant que l'ombrage induit par des prospects élevés réduit de manière substantielle l'inconfort thermique des piétons au niveau de la rue canyon et l'inconfort journalier du piéton est moins sévère dans les rues d'orientation N-S et NO-SE, à l'exception de midi où en raison de l'importante altitude solaire, l'effet d'ombrage n'est pas assuré. L'inconfort thermique ressenti par un piéton au cours de la journée serait ainsi plus faible dans la rue canyon avec le prospect le plus grand et dont l'axe est orienté nord-sud ou proche de cette direction. Cette conclusion corrobore les résultats obtenus par (Pearlmutter et al. 1999, Grundström et al. 2003, Bourbia et Awbi 2004, Ali-Toudert et al. 2005, Pearlmutter et al. 2006, Pearlmutter et al. 2007)

CHAP. IX. CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Notre travail avait pour objectif d'explorer l'effet d'une topographie complexe et des formes urbaines compactes et irrégulières sur les mécanismes d'écoulement d'air dans les rues canyons en zone subtropicale, examiner l'effet de ces phénomènes sur l'environnement thermique et les conditions de confort durant le cycle journalier et trouver des outils de prédiction des vitesses d'air dans les rues pour les urbanistes et architectes.

Nous présentons ici un bilan de notre recherche qui sera suivi par des propositions d'application et recommandations urbanistiques. Nous mettons ensuite en lumière un certain nombre de perspectives d'évolution.

IX- 1. Bilan de notre recherche.

Au travers de l'étude bibliographique présentée dans les chapitres III et IV, nous nous sommes intéressées aux différents paramètres physiques agissant sur les écoulements d'air en milieu urbain. La structure de ces derniers ne dépend pas uniquement de la géométrie de la rue exprimée par le prospect H/W mais est également fonction de la géométrie du bâtiment représentée par le rapport L/H, la configuration de la rue (symétrique ou asymétrique), la forme de la toiture, la surface urbaine, les conditions d'écoulements au-dessus des toits (vitesse et direction) ainsi que des effets thermiques dus à l'irradiation solaire. Suite à cet état de l'art, nous avons souligné le manque d'expériences en sites réels, notamment celles qui abordent les mouvements d'air dans des configurations urbaines complexes.

Par ailleurs, afin de comprendre l'environnement thermique propre aux zones climatiques chaudes et sèches, dans le chapitre V a été abordé l'effet de la forme urbaine (géométrie des rues, leur orientation, particularités morphologiques, etc.) sur les microclimats et les conditions de confort thermique en extérieur. Cette recherche bibliographique a révélé que le confort thermique d'un piéton pouvait être modifié de manière considérable par la géométrie de la rue et son orientation ainsi que par l'usage de protections horizontales (passages couverts). Toutefois, nous avons constaté que dans de telles régions arides, seule l'irradiation solaire était considérée comme facteur dominant sur le confort thermique extérieur. La ventilation urbaine était présentée comme un facteur secondaire sur la réduction du stress thermique d'été et les effets des vents forts, chauds et secs en été, froids et humides en hiver, demeuraient inexplorés. C'est pourquoi, notre étude s'est appuyée sur une approche quantitative basée sur des mesures de terrain mettant en relation mouvements d'air et conditions de confort dans les villes du désert. Elle a mis en œuvre une série de campagnes de mesure des principaux paramètres climatiques agissant sur le confort thermique en extérieur. Le cas d'étude retenu est l'établissement traditionnel de Ghardaïa, caractérisé par une topographie complexe et une morphologie urbaine compacte et irrégulière.

Les mesures sur site ont permis de constituer une base de données d'hiver et d'été. À partir de cette base de données, plusieurs phénomènes ont pu être mis en évidence. Leur analyse a été développée dans les chapitres VII et VIII de cette thèse.

Dans l'ensemble, l'étude a permis une meilleure compréhension de l'influence d'une morphologie urbaine complexe sur les mouvements d'air dans les rues canyons. Tout d'abord, une première observation à l'échelle de tout le Ksar a révélé l'importance des mouvements d'air en présence dans la vieille ville en dépit de la forte compacité de son tracé. De tels mouvements sont gouvernés par : i) la topographie du site d'une part, ii) la morphologie urbaine d'autre part.

Les résultats de notre étude ont montré en effet que la distribution des vents dans les rues du Ksar relève d'abord du climat au-dessus de la canopée urbaine en accord avec les phénomènes d'exposition au vent des versants. Les rues les plus exposées sont celles qui sont situées sur les versants face au vent. En ce qui concerne l'effet de la forme urbaine, nous avons identifié les éléments morphologiques influents suivants : la direction de la trame urbaine par rapport aux vents dominants, la géométrie du bâtiment et la longueur du canyon (L), les profils de rue asymétriques, la forme légèrement courbe de certaines rues, la présence des rues adjacentes (les intersections de rues), l'hétérogénéité des hauteurs de bâtiments (édifice de la mosquée) ainsi que la présence des passages couverts.

L'étude a en effet révélé que les vitesses de vent varient en fonction de l'angle d'incidence du vent ambiant avec l'axe de la rue. Les réductions les plus élevées sont observées pour des incidences perpendiculaires et les meilleures pénétrations s'effectuent pour des directions parallèles. Pour ces dernières conditions d'incidence parallèle, la vitesse du vent peut être très élevée, atteignant 0.52 de l'écoulement libre au-dessus du toit.

En ce qui concerne l'effet de la longueur de la rue, les résultats des différentes campagnes de mesure ont mis en évidence la tridimensionnalité des écoulements d'air dans des rues canyons courtes, même en cas de vents incidents perpendiculaires. Dans les canyons longs en revanche, l'effet de canalisation est identifié comme la principale caractéristique du modèle d'écoulement dans la rue, indépendamment de l'angle d'incidence du vent ambiant. Cet effet génère un écoulement bidimensionnel et la ventilation est essentiellement gouvernée par la composante horizontale le long du canyon. La longueur de la rue canyon agit ainsi sur la composante longitudinale de l'écoulement et détermine le niveau d'échanges avec l'air libre au-dessus du toit. Son effet agit également sur l'intensité de l'écoulement dans la mesure où l'écoulement horizontal est plus important dans la rue longue et compacte que dans un canyon plus court et moins profond. Dans ces conditions, les effets de survitesses induits peuvent être fortement contraignants, hiver comme été. A partir des résultats obtenus, il peut être conclu que l'approche simplifiée en 2D utilisée dans la modélisation numérique ne peut procurer des résultats satisfaisants pour des applications urbanistiques dans les configurations urbaines complexes.

De cette étude, il ressort en outre que l'effet des rues de configuration asymétrique n'est pas négligeable car il agit sur les échanges d'air verticaux avec l'extérieur. Les rues asymétriques de profil ascendant sont celles qui permettent une meilleure pénétration de l'air à partir de la couche au-dessus et donc, un meilleur mixage de l'air. Elles peuvent améliorer de ce fait la ventilation de la rue canyon, même la plus étroite. Il est important de noter par ailleurs que la morphologie étagée du site d'implantation privilégie ce type de configuration urbaine asymétrique et favorise la pénétration de l'air dans les rues canyons.

De plus, l'analyse des données a permis de constater que la différence entre les hauteurs des bâtiments n'agit pas uniquement sur le canyon asymétrique pris isolément mais influence également les écoulements d'air des rues situées en aval du bâtiment le plus haut. Tel est le cas de l'édifice de la mosquée qui dévie le vent de sa trajectoire et crée des re-circulations au niveau des rues canyons situées en aval. La surface urbaine située "en amont" détermine dans une certaine mesure la structure de l'écoulement, et donc le niveau de ventilation dans une rue canyon donnée. Ces résultats soulignent l'importance de l'emboîtement des échelles dans la description des écoulements d'air dans le ksar de Ghardaïa.

Plus localement, cette recherche nous a permis de mettre en évidence les effets aérodynamiques des passages couverts qui se manifestent par une forte accélération de l'air. Ce phénomène, très local (à l'intérieur du PC et dans la zone de jet), se produit même lorsque les vents sont faibles. Il dépend de l'angle d'incidence du vent ambiant. Les survitesses les plus importantes sont observées pour des directions de vent parallèles à l'axe du PC tandis que l'effet tend à disparaître dans le cas d'une incidence perpendiculaire. Globalement, les rues qui présentent des PC sont moins bien ventilées que les rues non couvertes du fait de la résistance que les PC offrent à la pénétration du vent à partir de la couche au-dessus. En fait, le bénéfice des PC est à rechercher davantage dans la protection solaire qui induit une baisse des températures en été.

Ainsi, tandis que les géométries urbaines isolées idéalisées ont constitué l'objet d'étude de nombreuses recherches précédentes, notre recherche a permis de mettre en exergue et quantifier l'influence d'une topographie complexe et des irrégularités urbaines sur les modèles d'écoulement d'air. Elle a également pris en considération le caractère fluctuant du vent qui est rarement perpendiculaire à l'axe de la rue, ce qui rend la réalité plus complexe. Contrairement à la plupart des études précédentes, les conditions de vents incidents parallèles et obliques sont analysées en détail.

En réponse à la question générale de cette thèse, on peut affirmer que :

4. l'influence de la topographie est déterminante dans le régime de distribution des écoulements d'air dans les rues du ksar de Ghardaïa. Son effet "l'emporte" en quelque sorte sur les effets

de la morphologie urbaine en accentuant la force du vent sur les versants face au vent et la réduisant en augmentant la turbulence sur les versants sous le vent,

5. la surface urbaine dans son ensemble détermine les caractéristiques de l'écoulement dans le canyon urbain et l'interaction des échelles ne peut être ignorée dans la compréhension des phénomènes aérauliques en présence dans les rues canyons. La circulation de l'air dans la rue canyon est d'abord liée aux écoulements d'air ayant lieu à une échelle plus large qui est celle du quartier,
6. les particularités urbaines modifient la structure des écoulements d'air et génèrent des phénomènes aérauliques importants (rue canyon longue, passage couvert, asymétrie des profils, forme irrégulière de la rue canyon).

Les deux facteurs modifiant les conditions de confort étant le vent et le soleil, nous avons analysé en seconde étape l'influence de la morphologie urbaine sur le comportement thermique et les conditions de confort dans les rues de la vieille ville. Notre principale préoccupation ici était d'évaluer les microclimats en relation avec la forme urbaine afin de pouvoir combiner à la fois des stratégies de ventilation urbaine et de protection des vents indésirables du désert tout en assurant une protection maximale de l'irradiation solaire.

De façon générale, l'analyse a permis de constater que les modifications des microclimats résultent à la fois de la topographie du lieu et la morphologie urbaine.

L'effet de la topographie a mis en exergue l'importance du facteur vent qui est à l'origine des contrastes thermiques les plus prégnants. A partir des données analysées en effet, il ressort que si l'orientation des versants par rapport au soleil détermine le niveau d'ensoleillement des rues en hiver, l'exposition des versants aux vents dominants accentue ou au contraire aplatit les contrastes thermiques existant entre les versants ensoleillés et à l'ombre. Cet effet dépend de l'origine des vents.

En ce qui concerne la forme urbaine, les résultats de notre étude montrent que les éléments morphologiques les plus influents dans la caractérisation microclimatique sont essentiellement la géométrie de la rue, son orientation ainsi que les protections horizontales (PC).

IX- 1.1. La géométrie de la rue.

L'analyse des données de terrain indique la faible influence de la géométrie urbaine sur le modèle des températures de l'air. En revanche, l'effet de la géométrie urbaine est plus important sur la température de surface puisque cette dernière est gouvernée par le bilan énergétique local. Les températures de surface décroissent avec l'augmentation du prospect. En termes d'ombrage, cela signifie qu'un prospect étroit réduit l'exposition directe des surfaces dans la rue canyon. Le piéton reçoit ainsi moins de rayonnement avec l'augmentation du prospect H/W en raison du degré d'ombrage induit. Cette relation démontre que la géométrie urbaine est fondamentale dans le contrôle thermique des espaces extérieurs en zone subtropicale. Le calcul de l'indice de confort PET indique en effet que l'ombrage induit par des prospects élevés réduit de manière substantielle l'inconfort thermique ressenti par le piéton dans la rue canyon en été.

IX- 1.2. L'orientation de la rue.

L'effet de l'orientation est identique à celui du prospect : négligeable sur le modèle des températures de l'air et plus significatif sur celui des températures de surface. En été, l'orientation Est-ouest et NE-SO permettent la surchauffe maximale des surfaces horizontales des rues, même

les plus profondes. Les rues N-S et NO-SE permettent en revanche un meilleur ombrage de leurs surfaces, particulièrement durant les heures de faible altitude solaire. En hiver, cette orientation N-S et NO-SE assure cependant une meilleure pénétration du rayonnement solaire aux environs de midi. La géométrie solaire dicte ainsi un ombrage préférentiel des rues orientées Nord-sud et NO-SE, hiver comme été.

En termes de confort thermique, les résultats indiquent qu'en été, le stress thermique journalier du piéton est moins sévère dans les rues d'orientation N-S et NO-SE, à l'exception de midi où en raison de l'importante altitude solaire, l'effet d'ombrage n'est pas assuré. L'inconfort thermique ressenti par un piéton au cours de la journée serait donc plus faible dans la rue canyon avec le prospect le plus grand et dont l'axe est orienté Nord-sud ou proche de cette direction.

Notre étude révèle ainsi que le contrôle thermique par l'ajustement des prospects seuls présente un effet limité, il doit être combiné à une orientation correcte des rues canyons.

IX- 1.3. Les protections horizontales.

L'analyse des données a permis de mettre en exergue l'effet des protections horizontales dans la réduction du stress thermique d'été. Le PC constitue l'espace le plus confortable pour le piéton en raison de l'effet d'ombre qu'il procure. En plus de cet effet d'ombre, le passage couvert peut constituer un moyen de ventilation des rues en été, lorsque les écoulements d'air sont faibles.

Les conclusions de cette analyse confirment les études précédentes (Pearlmutter et al. 1999, Grundström et al. 2003, Bourbia et Awbi 2004, Ali Toudert et al. 2005, Pearlmutter et al. 2006, Pearlmutter et al. 2007) sur l'effet de la morphologie urbaine dans la réduction du stress thermique d'été dans les villes du désert. Elles soulignent également l'importance de l'action du vent sur l'environnement thermique et les conditions de confort durant le cycle journalier.

IX- 1.4. Les effets thermiques du vent.

Les résultats indiquent clairement que la ventilation par le vent peut réduire les niveaux de stress thermique dans les espaces extérieurs même aux heures les plus chaudes de la journée. Cet effet modérant du stress thermique par le vent varie cependant selon son origine : vent chaud et sec ou vent froid et humide.

L'étude révèle qu'en été, en période de sirocco, la ventilation urbaine n'est pas influente puisque son efficacité est limitée par les températures de l'air élevées. La ventilation est néanmoins cruciale lorsque les vents sont forts et froids de direction Nord-est et Est. Dans ces conditions de vents frais d'été, l'augmentation de la vitesse d'air s'accompagne par un refroidissement important de l'air. En hiver les vents forts et froids soufflant de l'Ouest constituent en revanche un facteur aggravant du confort thermique.

Les effets thermiques du vent améliorent de ce fait ou au contraire aggravent selon la saison et la nature des vents les conditions de confort thermique à l'échelle des espaces extérieurs. Leurs effets devraient par conséquent conditionner les choix d'aménagement urbain. L'exigence principale est la protection contre les vents forts et dominants de direction Ouest en hiver, Sud en été. Cet aspect ne doit pas être négligé dans les processus de conception urbaine.

En résumé, l'étude des écoulements d'air en présence dans le ksar de Ghardaïa a mis en exergue l'importance du facteur vent qui est à l'origine des contrastes climatiques les plus prégnants. Les principales conclusions que l'on peut retenir sont :

- une forte pénétration du vent qui prévaut dans les rues du Ksar, avec des versants face aux vents fortement exposés. Seuls les versants sous le vent offrent des conditions de protection importantes,
- l'action du vent sur le régime de distribution des températures de l'air. Le vent constitue un facteur aggravant du confort en hiver mais aussi en été. Son effet devrait par conséquent conditionner les choix de conception urbaine,
- enfin, l'effet modérateur des vents frais sur le stress thermique d'été.

IX- 2. Principes de conception et applications dans un climat chaud et sec.

La réhabilitation d'un espace extérieur existant ou la conception d'un nouvel espace peuvent offrir la possibilité d'améliorer les conditions de confort extérieur. Dans des climats aussi extrêmes que les zones subtropicales, il est impossible de procurer des conditions de confort tout le long du cycle journalier. Cependant, avec une conception urbaine adéquate, le niveau de stress thermique et sa durée peuvent être réduits.

Bien qu'il soit difficile de proposer des recommandations détaillées pour l'aménagement des espaces urbains, il y a néanmoins certaines considérations que le concepteur doit absolument prendre en compte de manière à améliorer les conditions de confort dans les espaces extérieurs. Les recommandations issues de nos conclusions peuvent s'appliquer à n'importe quel site, néanmoins, pour les besoins de l'application à un cas d'étude, nous prendrons les données de Ghardaïa, notamment en termes de caractéristiques du vent (direction et fréquence).

IX- 2.1. La protection contre les vents indésirables.

- Orientation des rues :
 - privilégier l'orientation de la trame des rues à la fois perpendiculairement aux vents froids d'hiver et aux vents chauds et secs d'été. Une direction oblique de 45° peut constituer une alternative aux deux exigences de protection contre les vents indésirables de direction Ouest et Sud.

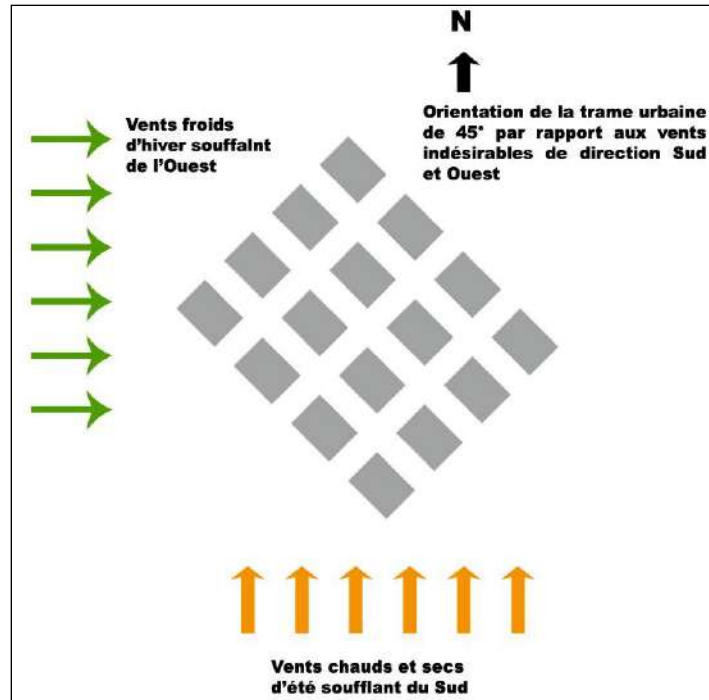


Fig. IX- 1. Orientation de la trame urbaine de 45° par rapport aux vents indésirables de direction Sud et Ouest.

- Longueur des rues canyons :

- éviter des longueurs de rue importantes qui peuvent privilégier les effets de canalisation et de survitesses et engendrer ainsi un environnement désagréable. Cet effet peut survenir lorsque le rapport L/W est égal à 20. Pour des résultats quantifiés, des simulations numériques sont à recommander,
- casser l'alignement de la rue (des rues incurvées ne conviennent pas car la résistance au vent est faible dans de telles rues),
- augmenter la résistance au vent par des éléments bâtis ou la plantation d'arbres. La végétation constitue un paravent efficace car les branches et les feuilles ralentissent le vent sans pour autant créer beaucoup de turbulence. Dans ce cas, il est nécessaire de combiner différents types de végétation par exemple en utilisant des arbres pour protéger en hauteur (palmiers) et des arbustes/buissons pour la protection près du sol.

- Profil des hauteurs :

- adopter des hauteurs différentes à travers le quartier avec les hauteurs augmentant en direction des vents dominants de direction Ouest et Sud afin de réduire la pénétration de ces vents indésirables dans les rues,

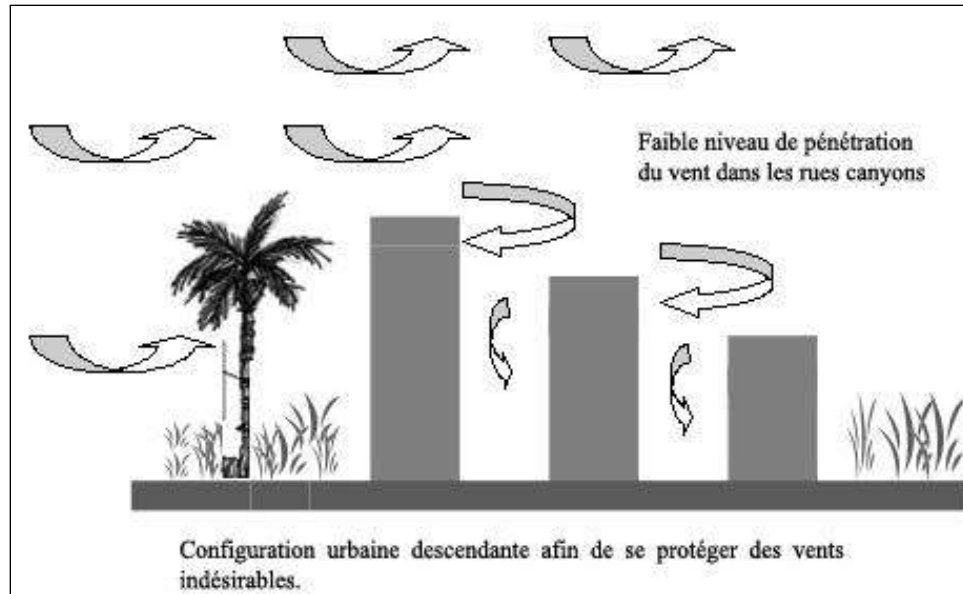


Fig. IX- 2. Configuration urbaine descendante en vue d'une protection contre les vents d'Ouest et du Sud.

Passages couverts :

- les passages situés sous les immeubles menant à un espace ouvert peuvent former une sorte d'entonnoir où le vent peut s'accélérer et engendrer un environnement déplaisant. Pour éviter cet effet, orienter les passages couverts perpendiculairement à la direction des vents indésirables.

IX- 2.2. Favoriser la ventilation urbaine.

Pour favoriser et améliorer l'environnement du vent dans les villes, il est important d'optimiser la conception urbaine pour une meilleure pénétration de l'air, spécialement au domaine public.

Afin de favoriser un régime d'écoulement de structure tridimensionnelle le plus favorable à la ventilation des rues canyons, il est recommandé de :

- Orientation des rues :
 - aligner la trame des rues principales dans une direction oblique de 20 degrés par rapport à la direction des vents frais d'été,
- Longueur des rues canyons :
 - diviser le site d'intervention de telle sorte à éviter des parcelles de géométrie longue et linéaire,
 - la longueur des rues perpendiculaires aux vents dominants doit être aussi courte que possible, avec H/L de l'ordre de 5 environ afin de favoriser un régime d'écoulement tridimensionnel, favorable à la ventilation de la rue.
- Profil des hauteurs :
 - adopter des hauteurs différentes à travers le quartier avec les hauteurs diminuant en direction des vents dominants de direction Est et NE,

- adopter des espaces ouverts et des bâtiments de faible hauteur dans les quartiers à forte densité afin de créer des poches d'air,
- éviter les obstructions et les grands bâtiments qui bloquent les vents frais de direction Est et NE.
- Perméabilité des bâtiments :
 - créer des passages de ventilation le long des vents frais d'été de direction NE et Est,
 - créer des vides entre les blocs de bâtiments et à différents niveaux du bâtiment. Ces passages peuvent constituer un moyen de ventilation lorsque les vents sont de faible intensité. Il faut les orienter dans une direction oblique par rapport aux vents frais d'été afin d'éviter l'effet "entonnoir".

IX- 2.3. La protection contre l'irradiation solaire.

Le premier point qui émerge lors du processus de conception est le profil saisonnier de l'usage de l'espace extérieur. Durant la saison estivale, le contrôle de la température est essentiel afin d'atteindre le confort. Plus particulièrement, l'ombre est le facteur le plus important permettant le contrôle de la température ainsi qu'un facteur déterminant du confort thermique. En hiver en revanche, le point principal du processus de conception est de favoriser l'ensoleillement. Entre se protéger du rayonnement solaire d'été et assurer un bon ensoleillement en hiver, l'alternative peut consister en :

- Profils de rues :
 - Dans les régions arides, la conception urbaine compacte améliore les conditions microclimatiques vu que les rues canyons avec un prospect étroit réduisent le stress thermique journalier en été. Les rues très compactes ne sont cependant pas préconisées. Pour des prospects de rues variant entre 2.5 et 5.5, le choix doit porter sur les moins profonds de telle sorte à assurer un bon ensoleillement des rues en hiver et une ventilation urbaine efficace. Des simulations numériques sont toutefois à recommander afin de déterminer les valeurs de prospects les plus performants en fonction de l'orientation de la rue canyon.
- Orientation des rues :
 - opter pour une orientation des espaces de circulation en fonction de leur usage, ce qui revient à :
 - privilégier l'orientation des axes piétons principalement dans l'axe Nord-sud vu que le stress thermique journalier du piéton est moins sévère dans ces rues en été. Les prospects de ces passages pourront être relativement profonds,
 - orienter les axes mécaniques selon un axe Est-ouest. Les prospects de ces rues seront plus larges, les façades sud bordant ces rues pourront profiter de la sorte du rayonnement solaire d'hiver.
 - une orientation intermédiaire de la trame viaire, principalement dans l'axe NO-SE, pourrait être également envisagée. Cette orientation pourra concilier à la fois les exigences de protection du rayonnement solaire et des vents indésirables de direction Sud et Ouest, tout en permettant l'exposition aux vents frais d'été de direction Est et NE.

- Protections horizontales :

Des protections horizontales sont à privilégier tout en considérant les restrictions potentielles qu'elles peuvent induire sur la ventilation de l'espace extérieur. Les installations horizontales, incluant les passages couverts et le type "pergola", permettent d'offrir de l'ombre durant une grande période de la journée et sont utiles pour ombrager chemins ou espaces étendus en longueur telles les zones piétonnes. Là encore, elles doivent être conçues de manière à empêcher l'effet d'entonnoir qui peut créer un environnement aéraulique fort désagréable pour le confort du piéton.

IX- 2.4. Synthèse : Favoriser la ventilation des rues tout en se protégeant des vents indésirables et du rayonnement intense du désert.

Entre se protéger des vents indésirables et du rayonnement solaire d'été tout en assurant la ventilation des espaces urbains et un bon ensoleillement en hiver, l'alternative peut consister en :

- une orientation des rues perpendiculaire à la direction des vents indésirables de direction dominante Ouest et Sud. Comme la ventilation des rues favorise en revanche une direction parallèle ou oblique aux vents d'Est, une orientation intermédiaire NE-SO de la trame urbaine peut constituer une alternative aux deux exigences conflictuelles que sont la protection contre les vents violents d'une part et la ventilation des espaces extérieurs d'autre part. Cette orientation permet de capter les vents frais de direction Est et NE et réduire en même temps le taux de pénétration des vents chauds et froids de direction respective Sud et Ouest,

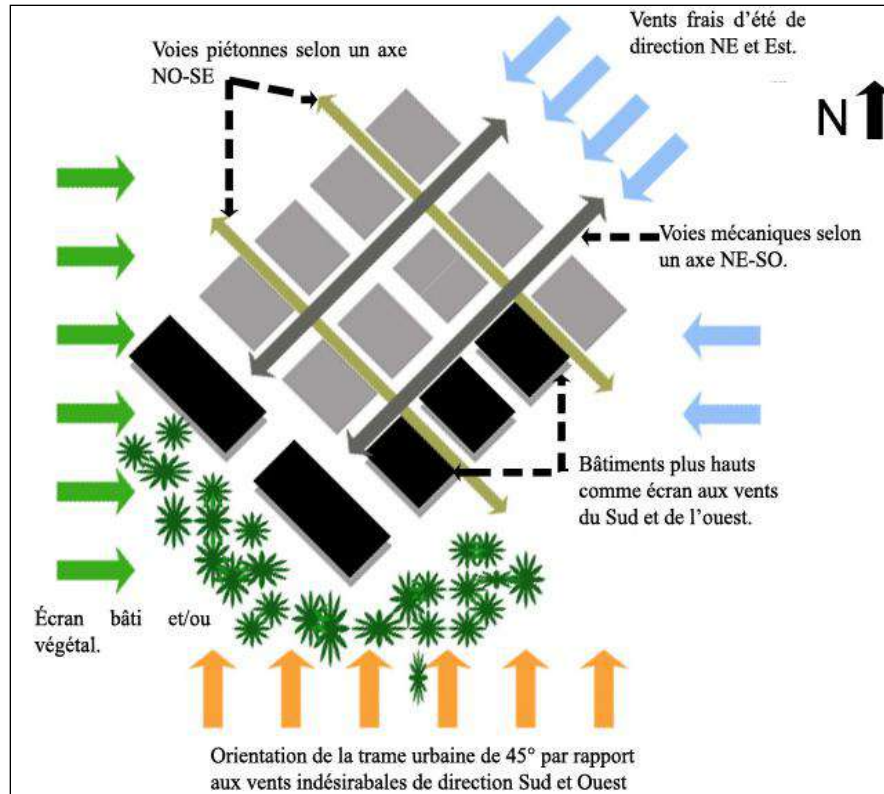


Fig. IX- 3. Recommandations en vue d'une protection des vents et du rayonnement solaire, tout en assurant la ventilation des rues canyons.

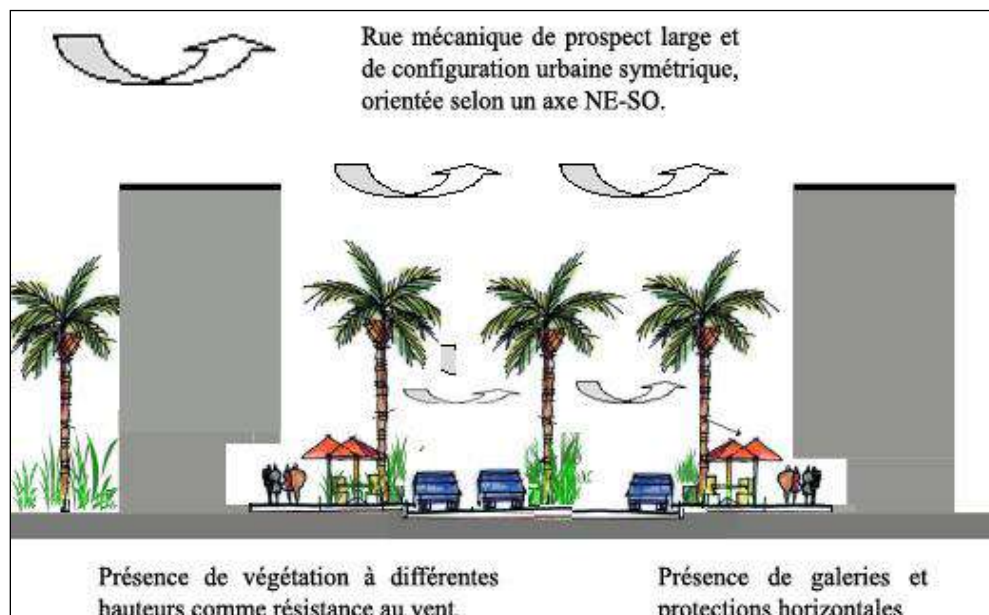


Fig. IX- 4. Schéma représentatif d'une voie mécanique selon un axe NE-SO.

- orienter les axes piétons essentiellement dans l'axe NO-SE vu que le stress thermique journalier du piéton est moins sévère dans ces rues. Pour cette direction de rues piétonnes,

adopter des profils de rue ascendants, avec le bâtiment le plus bas face aux vents en provenance de l'Est et du Nord-est. Cette configuration de rue favorisera la pénétration des vents frais d'été tout en empêchant la pénétration des vents indésirables de direction Ouest et Sud. Pour éviter la pénétration des vents NO, des protections horizontales peuvent être utilisées dans le tronçon de rue NO,

- orienter les axes mécaniques selon un axe NE-SO. Les prospects de ces rues seront plus larges, les façades Sud-est bordants ces rues pourront profiter de la sorte du rayonnement solaire d'hiver. De part et d'autre de la chaussée, des galeries et protections horizontales pourront être aménagées le long des zones piétonnes. Les profils de ces rues pourraient être en revanche symétriques afin d'éviter la pénétration des vents de direction Sud et Ouest.
- enfin, quelque soit l'usage de l'espace public, privilégier des rues canyons courtes afin d'éviter les effets de canalisation tout en accentuant les échanges d'air verticaux qui sont favorables à la ventilation des rues.

IX- 3. Limites et perspectives.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de coopération interuniversitaire, financé par le CMEP (Comite Mixte d'Évaluation et de Prospective de la coopération interuniversitaire de la coopération franco-algérienne). Même si les objectifs définis au départ sont en grande partie atteints, il reste encore de nombreuses données acquises qui méritent d'être analysées. C'est le cas des mesures réalisées dans la palmeraie, le ksar traditionnel de Beni-izguen et le nouveau quartier d'habitation à Beni-Izguen, caractérisé par un tracé moins compact et la présence de végétation. L'analyse de ces données permettra une meilleure compréhension de l'effet de la palmeraie sur le refroidissement nocturne des masses bâties. Des mesures à l'échelle de toute la vallée ont également été effectuées et pourront nous renseigner sur les effets topographiques induits à une telle échelle, notamment les écoulements d'air catabatiques.

À l'échelle microclimatique, ce travail a nécessité un investissement important dans la métrologie climatique de terrain. Pour compléter cette information, il est nécessaire d'avoir recours à une étude paramétrique basée sur la simulation numérique qui analysera :

- l'effet de la longueur de la rue sur la structure des écoulements d'air dans les rues canyons,
- l'effet de la dimension du passage couvert (longueur, hauteur et largeur) sur les phénomènes de survitesse observés,
- l'effet des profils de rue de configuration asymétrique sur le niveau d'échange d'air entre la rue et la couche au-dessus.

Des recommandations de conception urbaine détaillées pour la ville de Ghardaïa n'ont pu être développées. Ces recommandations devraient intégrer la dimension à donner aux rues canyons en termes de profil H/W afin de pouvoir contrôler les conditions thermiques d'hiver et d'été.

Par ailleurs, l'effet des forces thermiques sur le régime des écoulements d'air n'a pu être mis en évidence. Leur analyse représentera une information supplémentaire précieuse sur la compréhension des phénomènes aérauliques et les processus de ventilation urbaine dans de tels climats chauds et secs.

Dans cette étude, les effets de l'adaptation climatique ne sont pas considérés. Des études de terrain portant sur l'influence de l'environnement climatique sur la perception thermique des

usagers sont nécessaires. Elles permettront de dégager des zones de confort propres au climat chaud et sec de Ghardaïa.

Enfin, il est important d'établir des études portant sur l'interface échelle urbaine (espace extérieur)/échelle architecturale (maison d'habitation).

Bibliographie

Climat urbain – Architecture et Urbanisme.

- 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, pp. 183-200.
- ARNFIELD, A., 1990. Street design and urban canyon solar access. *Energy and Buildings*, Vol. 14, pp. 117-131.
- ARNFIELD, A.J. and MILLS, G.M., 1994. An analysis of the circulation characteristics and energy budget of a dry, asymmetric east-west urban canyon. I. Circulation characteristics. *International Journal of Climatology*, Vol. 14 (2), pp. 119-134.
- ARNFIELD, A.J., 1990. Canyon geometry, the urban fabric and nocturnal cooling: a simulation approach. *Physical Geography*, Vol. 11 (3), pp. 220-239.
- ARNFIELD, A.J., 2003. Review: Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, Vol. 23, pp. 1–26.
- ARNFIELD, A.J., 2005. Micro- and mesoclimatology. *Progress in Physical Geography*, Vol. 29 (3), pp. 426–437.
- ARNFIELD, A.J., 2006. Micro- and mesoclimatology. *Progress in Physical Geography*, Vol. 30 (5), pp.677–689.
- ARNFIELD, A.J., and GRIMMOND, C.S.B., 1998. An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling. *Energy and Buildings*, Vol. 27, pp. 61-68.
- BOZONNET, E., BELARBI, R., ALLARD, F., 2005. Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach. *Solar Energy*, Vol. 79, pp. 10–24.
- BROWN, M.J., and PARDYJAK, E.R., 2001. Temperature Measurements Collected from an Instrumented Van in Salt Lake City, Utah as part of URBAN 2000. Submitted to: International Society of Environmental Hydraulics Conference. Tempe, AZ, December 2001. 7p.
- BROWN, M.J., GRIMMOND, C.S.B., 2001. Sky view factor measurements in downtown Salt Lake City - Data report for the DOE CBNP URBAN Experiment, Oct. 2000. Internal Report, March, 2001. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico. LA-UR-01-1424, 44p.
- BROWN, M.J., GRIMMOND, C.S.B., RATTI, C., 2001: Comparison of methodologies for computing sky view factor in urban environment. In *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*. Tempe, AZ. Internal Report Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico. LA-UR-01-4107. 7p.
- CAPELUTO, I.G., YEZIORO, A., SHAVIV, E., 2003. Climatic aspects in urban design—a case study. *Building and Environment*, Vol. 38, pp. 827 – 835.

- CHUNG, U., CHOI, J. AND YUN, J.I. 2004. Urbanization effect on the observed change in mean monthly temperatures between 1951–1980 and 1971–2000 in Korea. *Climatic Change*, Vol. 66, pp. 127–36.
- COOK, J., 1996. Architecture indigenous to extreme climates. *Energy and Buildings*, Vol. 23, pp. 277-291.
- CORBELLA, O.D., and MAGALHAES, M.A.A.A., 2008. Conceptual differences between the bioclimatic urbanism for Europe and for the tropical humid climate. *Renewable Energy*, Vol. 33, pp. 1019–1023.
- CORONEL, J. F., and ALVAREZ, S., 2001. Experimental work and analysis of confined urban spaces. *Solar Energy*, Vol. 70 (3), pp. 263–273.
- DE SCHILLER, S., and EVANS, J.M., 1996. Training architects and planners to design with urban microclimates. *Atmospheric Environment*, Vol. 30 (3), pp. 449-454.
- ELIASSON, I. 2000. The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning*. Vol.48, pp. 31-44.
- ELIASSON, I., 1996. Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment*, Vol. 30 (3), pp. 379-392.
- ELLEFSEN, R., 1990/91. Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities. *Energy and Buildings*, Vol. 15-16, pp. 1025-1049.
- ELNAHAS, M.M. 2003. The effects of urban configuration on urban air temperatures. *Architectural Science Review*. Vol. 46, N.2, pp. 135-138.
- ESCOURROU, G., 1996. Climat et microclimat urbains, pollutions atmosphériques et nuisances météorologiques localisées. IAURIF. 168p.
- ESCOURROU, G., 1991. Le climat et la ville. Paris : Edit. Nathan. 191p.
- ESCOURROU, G., 1981. Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat. Paris, New-York, Barcelone, Milan : Edit MASSON. 169p.
- FERRANTE, A., SANTAMOURIS, M., KORONAKI, I., MIHALAKAKOU, G., PAPANIKOLAU, N. 1998. The design parameters' contribution to improve urban microclimate : an extensive analysis within the frame of POLIS research project in Athens. In *Proceedings of EPIC'98, 2nd European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings and 3rd International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings*. 19-21 November, Lyon, ENTPE, pp. 757-762.
- GIRIDHARAN, R., GANESAN, S., LAU, S.S.Y., 2004. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, Vol. 36, pp. 525–534.
- GIRIDHARAN, R., LAU, S.S.Y., GANESAN, S., 2005. Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. *Energy and Buildings*, Vol. 37, pp. 964–971.
- GIRIDHARAN, R., LAU, S.S.Y., GANESAN, S., GIVONI, B., 2007. Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 3669–3684.
- GIVONI, B., 1978. *L'homme, l'architecture et le climat*. Paris : Moniteur, 460p.
- GIVONI, B., 1998. *Climate Considerations in Building and Urban Design*. New York: Van Nostrand Reinhold, 480 pp.

- GOLANY, G.S., 1996. Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*, Vol. 30 (3), pp. 45-65.
- GRIMMOND, C.S.B., 2006. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol.84, pp.3-22.
- GRIMMOND, C.S.B, POTTER, S.K., ZUTTER, H.N., SOUCH, C., 2001. Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. *International Journal of Climatology*, Vol. 21, pp. 903-913.
- GRIMMOND, C.S.B., SALMOND, J.A., OKE, T.R., OFFERLE, B., LEMONSU, A. 2004. Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: Heat, mass (water and carbon dioxide), and momentum. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, 19p.
- GROSSO, M., 1998. Urban form and renewable energy potential. *Renewable Energy*, Vol. 15, pp. 331-336.
- GUYOT, G. 1997. *Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes*. Paris : Edit. Masson. 505p.
- HERBERT, J.M., and HERBERT, R.D., 2002. Simulation of the effects of canyon geometry on thermal climate in city canyons. *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 59, pp. 243–253.
- HERBERT, J.M., JOHNSON, G.T., ARNFIELD, A.J., 1998. Modelling the thermal climate in city canyons. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 13, pp. 267–277.
- JOHNSON, G.T., OKE, T.R., LYONS, T.J., STEYN, D.G., WATSON, I.D., VOOGT, J.A., 1991. Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night. Part 1: Theory and tests against field data. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 56, pp.275-294.
- KIM, Y.-H., and BAIK, J.-J., 2005. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 44, pp. 591-605.
- KIM, Y.-H., and BAIK, J.-J., 2002. Maximum urban heat island intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 41, pp. 651-659.
- KLYSIK, K. and FORTUNIAK, K., 1999. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 3885-3895
- KOLOKOTRONI, M., GIANNITSARIS, I., WATKINS, R., 2006. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 383–392.
- KONDO, A., UENO, M., KAGA, A., YAMAGUCHI, K., 2001. The influence of urban canopy configuration on urban albedo. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 100, pp.225–242.
- MARKUS, T.A., and MORRIS, E.N. 1980. *Buildings, climate and energy*. London: Pitman.
- MERLIN, P. and TRAISNEL, J.P., 1996. *Énergie, environnement et urbanisme durable*. Paris : Presses Universitaires de France. 126p.
- MESTAYER, P., JOFFRE, S., BAKLANOV, A., 2004. The Urban Boundary Layer Structure for NWP and UAQ models. In *FUMAPEX: Integrated Systems for Forecasting Urban Meteorology, Air Pollution and Population Exposure*. Parameterisation of the nocturnal UBL for NWP and UAQ models. Sweden: Editors: Alexander Baklanov, Sergej Zilitinkevich, (D4.6 Report), pp.4-11.
- MESTAYER, P.G., DURAND, P., AUGUSTIN, P., BASTIN, S., BONNEFOND, J.M., BENECH, B., CAMPISTRON, B., COPPALLE, A., DELBARRE, H., DOUSSET, B., DROBINSKI, P.,

- DRUILHET, A., FREJAFON, E., GRIMMOND, C.S.B., GROLEAU, D., IRVINE, M., KERGMARD, C., KERMADI, S., LAGOUARDE, J.P., LEMONSU, A., LOHOU, H., LONG, N., MASSON, V., MOPPERT, C., NOILHAN, J., OFFERLE, B., OKE, T.R., PIGEON, G., PUYGRENIER, V., ROBERTS, S., SAID, F., SALMOND, J.A., TALBAUT, M., VOOGT, J.A., 2005. The urban boundary-layer field campaign in Marseille (UBL/CLU ESCOMPTE): set-up and first results. *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 114, pp. 315–65.
- MILLS, G., 1993. Simulation of the energy budget of an urban canyon – I. Model structure and sensitivity test. *Atmospheric Environment*, Vol. 27B, pp.157-170.
- MILLS, G. and ARNFIELD, A.J., 1993. Simulation of the energy budget of an urban canyon – II. Comparison of model results with measurements. *Atmospheric Environment*, Vol. 27B (2), pp. 151-181.
- MILLS, G., 2006. Progress toward sustainable settlements: a role for urban climatology. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 84, pp. 69–76.
- MILLS, G., 1999. Urban climatology and urban design. In: *The 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology*, Sydney, Australia, pp. 541-544.
- MONTAVEZ, J.P., RODRIGUEZ, A., JIMENEZ, J.I., 2000. A study of the urban heat island of Granada. *International Journal of Climatology*, Vol. 20, pp. 899–911.
- NUNEZ, M. and OKE, T.R., 1977. The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 16, pp. 11-19.
- OFFERLE, B., ELIASSON, T., GRIMMOND, C.S.B., HOLMER, B., 2007. Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 122 (2), pp. 273-292.
- OKE, T.R., 2004. Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites. 27th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, Banff, 25-29 October, 2004.14p.
- OKE, T.R., 1997. Urban environments. In: Bailey WG, OKE,T.R., Rouse WR (eds.). *The Surface Climates of Canada*. Montreal: McGill/Queens University: Press, pp 303–327.
- OKE, T. R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, Vol. 11, pp. 103–113.
- OKE, T.R., 1987. *Boundary layer climates*. Second edition. London, New-York: Routledge. 423p.
- OKE, T.R., 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, Vol. 1, pp. 237-254.
- OKE, T.R., 1976. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, Vol. 14 (4), pp. 268-276.
- OKE, T.R., JOHNSON, G.T., STEYN, D.G., WATSON, D., 1991. Simulation of surface urban heat islands under ‘ideal’ conditions at night. Part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 56, pp. 339-358.
- PEARLMUTTER, D., 2007. Architecture and climate: The environmental continuum. *Geography Compass*, Vol. 1/4, pp. 752–778.

- PEARLMUTTER, D., BERLINER, P., SHAVIV, E., 2003a. Development of a scale-modeling technique for urban microclimatic analysis. In Proceedings of Fifth International Conference on Urban Climate, Lodz, Poland, September 2003.
- PEARLMUTTER, D., BERLINER, P., SHAVIV, E., 2003b. Analyzing the microclimatic influence of urban canyon geometry with an open-air scale model. In Proceedings of Passive and Low Energy Architecture, 20th International Conference, Santiago de Chile, November 2003.
- Rapport RUROS. 2004. Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces. Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain: une approche bioclimatique. Centre for Renewable Energy Sources (C.R.E.S.). 67p.
- RATTI, C., RAYDAN, D., STEEMERS, K., 2003. Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 49–59.
- RIZWAN, A.M., DENNIS, Y.C.L., LIU, C., 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 20, pp. 120–128.
- SAILOR, D.J., and FAN, H., 2002. Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities. *Atmospheric Environment*, Vol. 36, pp. 713–725.
- SANTAMOURIS, M., 1998. The Athens urban climate experiment. In Proceedings of PLEA'98, Lisbon, Portugal, June 1998, pp. 147-152.
- SCHERER, D., FEHRENBACH, U., BEHA, H.-D., PARLOW, E., 1999. Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4185-4193.
- SOUCH, C. and GRIMMOND, S., 2006. Applied climatology: urban climate. *Progress in Physical Geography*, Vol. 30 (2), pp. 270–279.
- STEEMERS, K., BAKER, N., CROWTHER, D., DUBIEL, J., NIKOLOPOULOU, M.H., RATTI, C., 1996. City texture and microclimate. *Urban Design Studies*, Vol. 3, pp. 25–50
- SWAID, H., 1993. The Role of radiative-convective interaction in creating the microclimate of urban street canyons. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 64, pp. 231–259.
- SWAID, H., BAR-EL, M., HOFFMAN, M.E., 1993. A bioclimatic design methodology for urban outdoor spaces. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 48, pp. 49-61.
- VOOGT, J.A., and OKE, T.R., 1997. Complete Urban Surface Temperatures. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 36, pp. 1117-1132.
- YAMAMOTO, Y., 2006. Measures to mitigate urban heat islands. *Quarterly Review*, Vol. 18, pp. 65-83.
- YANNAS, S., 2001. Toward more sustainable cities. *Solar Energy*. Vol. 70, No. 3, pp. 281–294.
- YOKOHARIA, M., BROWN, R.D., KATO, Y., YAMAMOTO, S., 2001. The cooling effect of paddy fields on summertime air temperature in residential Tokyo, Japan. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 53, pp. 17-27.

Confort thermique

- AHMED, K.S., 2003. Comfort in urban spaces: defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments. *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 103–110.
- ALI-TOUDERT, F., and MAYER, H., 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*. Vol. 41, pp. 94–108.
- ALI-TOUDERT, F., and MAYER, H., 2007. Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy*, Vol. 81, pp. 742–754.
- ALI-TOUDERT, F., DJENANE, M., BENSALAM, R., MAYER, H., Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. 2004. *Climate Research*, Vol. 28, pp. 243-256.
- ALI-TOUDERT, F., 2005. Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate. PhD Thesis. *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg*, Nr. 15, University of Freiburg, Germany.
- ASHRAE 2001. *Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta. GA.
- AULICIEMS, A., and KALMA, J.D., 1979. A climatic classification of human thermal stress in Australia. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 18, pp. 616-626.
- BECKER, S., POTCHTER, O., YAAKOV, Y., 2003. Calculated and observed human thermal sensation in an extremely hot and dry climate. *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 747-756.
- BERGER, X., 1998. Human thermal comfort at Nîmes in summer heat. In *Proceedings of EPIC'98, 2nd European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings and 3rd International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings*. 19-21 November, Lyon, ENTPE, pp. 201-206.
- ELIASSEN, I., KNEZB, I., WESTERBERG, U., THORSSON, S., LINDBERG, F., 2007. Climate and behaviour in a Nordic city. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 82, pp. 72–84.
- EMMANUEL, R. 2005. Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. *Building and Environment*. Vol. 40, pp. 1591–1601.
- EPSTEIN, Y., and Daniel S. MORAN, D.S., 2006. Thermal comfort and the heat stress indices. *Industrial Health*, Vol. 44, pp. 388–398.
- EPSTEIN, Y., and MORAN, D.S., 2006. Thermal comfort and the heat stress indices. *Industrial Health*, Vol. 44, pp. 388–398.
- FANGER, P.O., 1970. *Thermal comfort*. Danish Technical Press, Copenhagen.
- FANGER, P.O., 1972. *Thermal comfort*. New York: McGraw-Hill.
- GAITANIA, N., MIHALAKAKOUA, G., SANTAMOURIS, M., 2007. On the use of bioclimatic architecture principles in order to improve thermal comfort conditions in outdoor spaces. *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 317–324.
- GIVONI, B., NOGUCHI, M., SAARONI, H., POCHTER, O., YAACOV, Y., FELLER, N., BECKER, S., 2003. Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 77-86.

- GRUNDSTRÖM, K., JOHANSSON, E., MRAISI, M., OUAHRANI, D., 2003. Climat et urbanisme – la relation entre confort thermique et la forme du cadre bâti. Report 8. Housing Development and Management. Lund University.
- HÖPPE, P., 2002. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, Vol. 34, pp. 661-665.
- HÖPPE, P., 2001. Calculation of the Physiologically Equivalent Temperature. Personal Communication, 2001.
- HÖPPE, P., 1999. The physiological equivalent temperature: a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, Vol. 43 (2), pp. 71-75.
- JOHANSSON, E., 2006. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, Vol. 41, pp. 1326–1338.
- JOHANSSON, E., 2006. Urban design and outdoor thermal comfort in warm climates. Studies in Fez and Colombo. PhD Thesis. Housing, Developement & Management. Architecture & Built Environment. Lund Institute of Technology, N.3, Lund University, Sweden.
- MASMOUDI, S., MAZOUZ, S., 2004. Relation of geometry, vegetation and thermal comfort around buildings in urban settings, the case of hot arid regions. *Energy and Buildings*, Vol. 36, pp. 710–719.
- MATZARAKIS, A., and MAYER, H., 2000. Atmospheric conditions and human thermal comfort in urban areas. In: 11th Seminar on Environmental Protection “Environment and Health”. 20.-23. November 2000, Thessaloniki, Greece, pp. 155-166.
- MCINTYRE, D.A., 1980. Indoor climate. London: Applied Science Publishers.
- METJE, N., STERLING, M., BAKER, C.J., 2008. Pedestrian comfort using clothing values and body temperatures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, pp. 412–435.
- MOUJALLED, B., 2007. Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. Thèse de doctorat. Institut des Sciences Appliquées de Lyon. Département Génie Civil et Bâtiments. École Nationale des Travaux Publics de l'État. Lyon.
- NAGARA, K., SHIMODA, Y., MIZUNO, M., 1996. Evaluation of the thermal environment in an outdoor pedestrian space. *Atmospheric Environment*, Vol.30, pp. 497–505.
- NIKOLOPOULOU, M., and LYKOUDIS, S. 2006. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries. *Building and Environment*. Vol. 41, pp. 1455–1470.
- NIKOLOPOULOU, M., and STEEMERS, K., 2003. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 95–101.
- NIKOLOPOULOU, M., BAKER, N., STEEMERS, K., 2001. Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. *Solar Energy*, Vol. 70 (3), pp. 227–235.
- OCHOA, J.M.I., and MARINCIC, I., 2005. Thermal comfort in urban spaces: The case of very warm and dry climate. International Conference “Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment”, May 2005, Santorini, Greece, pp. 785-789.

- PEARLMUTTER, D., BERLINER, P., SHAVIV, E., 2007. Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyons. *Building and Environment*. Vol. 42, pp. 2396–2409
- PEARLMUTTER, D., BERLINER, P., SHAVIV, E., 2006. Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy. *Building and Environment*, Vol.41, pp 783–795.
- SACRÉ, C., 1983. Le confort dans les espaces extérieurs: analyse microclimatique. Nantes, CSTB, 138 p.
- SOLIGO, M.J., IRWIN, P.A., WILLIAMS, C.J., SCHUYLER, G.D., 1998. A comprehensive assessment of pedestrian comfort including thermal effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 77&78, pp. 753-766.
- SPAGNOLO, J., and DE DEAR, R. 2003. A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and Environment*. Vol. 38, pp. 721-738.
- STATHOPOULOS, T., 2006. Pedestrian level winds and outdoor human comfort. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 94, pp. 769–780.
- STATHOPOULOS, T., WU, H., ZACHARIAS, J., 2004. Outdoor human comfort in an urban climate. *Building and Environment*, Vol. 39, pp. 297 – 305.
- STATHOPOULOS, T., WU, H., ZACHARIAS, J., 2004. Outdoor human comfort in an urban climate. *Building and Environment*, Vol. 39, pp. 297 – 305.
- THORSSON, S., LINDQVIST, M., LINDQVIST, S., 2004. Thermal bioclimatic conditions and patterns of behavior in an urban park in Goteborg, Sweden. *International Journal of Biometeorology*, Vol. 48, pp. 149–56.
- WALTON, D., DRAVITZKI, V., DONN, M., 2007. The relative influence of wind, sunlight and temperature on user comfort in urban outdoor spaces. *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 3166–3175.

Écoulements d'air.

- AHMAD, K., KHARE, M., CHAUDHRY, K.K., 2005. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections - a review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93, pp. 697–717.
- ALLWINE, K. J., SHINN, J. H., STREIT, G. E., CLAWSON, K. L., BROWN.M., 2002. Overview of Urban 2000. A Multiscale Field Study of Dispersion through an Urban Environment. *Bulletin of American Meteorological Society*. April 2002, pp. 521-536.
- ALLWINE, K.J, CLAWSON, K.L., FLAHERTY, J.E., HEISER, J.H, HOSKER, R.P., LEACH, M.J., STOCKHAM, L.W., 2007. Urban dispersion program: urban measurements applied to emergency response. *Seventh Symposium on the Urban Environment*, 10-13 September 2007, San Diego, CA. 5p.
- ALLWINE, K.J, LEACH, M.J., STOCKHAM, L.W., SHINN, J.S., HOSKER, R.F., BOWERS, J.F, PACE, J.C., 2004. Overview of Joint Urban 2003- An atmospheric dispersion study in Oklahoma city. *Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone Symposium*, 84th AMS, 11-15 January 2004, Seattle, Washington. 9p.
- ALLWINE, K.J., and FLAHERTY, J.E., 2006. Urban Dispersion Program MSG05 Field Study: Summary of Tracer and Meteorological Measurements. PNNL-15969, Pacific Northwest

- National Laboratory, Richland, WA. [Available online at:
http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-15969.pdf].
- ALLWINE, K.J., and FLAHERTY, J.E., 2007. Urban Dispersion Program Overview and MID05 Field Study Summary. PNNL-16696. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA. [Available online at:
http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-16696.pdf].
- ALLWINE, K.J., RICHLAND, W.A., CLAWSON, K., LEACH, M.J., BURROWS, D., WAYSON, R., FLAHERTY, J., ALLWINE, E., 2004. Urban dispersion processes investigated during the joint urban 2003 study in Oklahoma City. Fifth Conference on the Urban Environment, American Meteorological Society, Vancouver, August, paper 1.1.
- ASSIMAKOPOULOS, V.D., APSIMON, H.M., MOUSSIOPOULOS, N., 2003. A numerical study of atmospheric pollutant dispersion in different two-dimensional street canyon configurations. *Atmospheric Environment*, Vol. 37 (29), pp. 4037-4049.
- ASSIMAKOPOULOS, V.D., GEORGAKIS, C., SANTAMOURIS, M., 2005. Comparison of computed and measured wind fields within street canyons. In International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece, pp. 1027-1032.
- ASSIMAKOPOULOS, V.D., GEORGAKIS, C., SANTAMOURIS, M., 2006. Experimental validation of a computational fluid dynamics code to predict the wind speed in street canyons for passive cooling purposes. *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 423-434.
- BÄCHLIN, W., THEURER, W., PLATE, E.J., 1992. Dispersion of gases released near the ground in built-up areas. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 41-44, pp. 1135-1142.
- BADY, M.F., KATO, S., HUANG, H., 2006. Analysis of ventilation efficiency indices inside a local domain in an urban area using two building model. Part (I): Effect of void width and building height. *SEISAN-KENKYU*, Vol.58 (1), pp.64-69.
- BADY, M.F., KATO, S., TAKAHASHI, T., HUANG, H., 2007. Analysis of ventilation efficiency indices inside a local domain in an urban area using two building model. Part (II): Effect of wind direction. *SEISAN-KENKYU*, Vol. 59 (3), pp.254-257.
- BAIK, J.-J., PARK, R.S., CHUN, H.-Y., KIM, J.-J., 2000. A Laboratory Model of Urban Street-Canyon Flows. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 39 (9), pp.1592-1600.
- BAIK, J.-J. and KIM, J.-J., 1999. A Numerical Study of Flow and Pollutant Dispersion Characteristics in Urban Street Canyons. *Journal of applied Meteorology*, Vol. 38, pp. 1576-1589.
- BALOGUN, AA., Tomlin, AS., WOOD, CR., BARLOW, JF., BELCHER, SE., SMALLEY, RJ., LINGARD, JJN., Arnold, SJ., DOBRE, A., ROBINS, AG., MARTIN, D., SHALLCROSS, DE., 2010. In-street wind direction variability in the vicinity of a busy intersection in central London. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.136, pp.489–513.
- BENTHAM, T., BRITTER, R., 2003. Spatially averaged flow within obstacle arrays. *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 2037–2043.
- BERGER, X. et al., 1998. La climatisation urbaine passée et présente. *Les Cahiers de la Recherche Architecturales*, Vol. 42/43, pp. 127-137.

- BERKOWICZ, R., BRITTER, R., DI SABATINO, S., 2004. TRAPOS. Optimisation of modelling methods for traffic pollution in streets. Cambridge Environmental Research Consultants Ltd and Cambridge University. 114p.
- BERNARD, F., 2002. Meteorology applied to urban air pollution problems Draft Progress Report. COST 715 Workshop on Meteorology applied to urban air pollution problems. 12p.
- BLOCKEN, B. and CARMELIET, J., 2004. Pedestrian wind environment around buildings: Literature review and practical examples. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, Vol. 28 (2), pp. 107-159.
- BONNEAUD, F., 2004. Ventilation naturelle de l'habitat dans les villes tropicales. Contribution à l'élaboration d'outils d'aide à la conception. Thèse de doctorat. École doctorale de Mécanique, Thermique et Génie Civil de Nantes. Université de Nantes.
- BORNSTEIN, R.D. and JOHNSON, D.S., 1977. Urban-rural wind velocity differences. *Atmospheric Environment*, Vol. 11, pp. 597-604.
- BOTTEMA, M., 1992. Wind climate and urban geometry. Rapport N. 92.63.K. December 1992. Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, Vakgroep Fago. 213p.
- BOTTEMA, M., 1999. Towards rules of thumb for wind comfort and air quality. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4009-4017.
- BOWKER, G.E., PERRY, S.G., HEIST, D.K., 2006. A comparison of airflow patterns from the Quic Model and an atmospheric wind tunnel for a two-dimensional building array and a multi-city block region near the world trade centre site. AMS 6th Symposium on the Urban Environment, Atlanta, GA, United States, January 29, 2006 through February 2, 2006. J5.4, 6p.
- BOZONNET, E., BELARBI, R. ALLARD, F. 2006. Modelling air flows around buildings in urban environment. International Workshop on Energy Performance and Environmental Quality of Buildings, July 2006, Milos island, Greece, 6p.
- BRITTER, R.E., HANNA, S.R., 2003. Flow and dispersion in urban areas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 35, pp.469-496.
- BROWN, M., LEACH, M., CALHOUN, R., SMITH, S., STEVENS, C., REISNER, J., LEE, B., CHIN, S., DECROIX, D., 2001. Multiscale Modeling of Air Flow in Salt Lake City and the Surrounding Region. Submitted to: ASCE Structures Congress 2001, Washington, DC, May, 2001. 15p.
- BROWN, M., POL, S., COIRIER, W., KIM, S., HUBER, A., NELSON, M., KLEIN, P., FREEMAN, M., GOWARDHAN, A., 2006. Experimental and model-computed area-averaged vertical profiles of wind speed for evaluation of mesoscale urban canopy schemes. In The Sixth Symposium of the Urban Environment. Atlanta GA, January 28-February 2, 2006, American Meteorological Society, Boston, paper 1.7, 15 p.
- BROWN, M.J., KHALSA, H., NELSON, M., BOSWELL, D., 2004. Street canyon flow patterns in a horizontal plane: measurements from the Joint Urban 2003 field experiment. Submitted to: AMS 5th Symposium on the Urban Environment, Vancouver, B.C., August 2004. 12p.
- BROWN, M.J., LAWSON, R.E., DECROIX, D.S., LEE, R.L., 2000. Mean flow and turbulence measurements around a 2-D array of building in a wind tunnel. 11th Joint AMS/AWMA conference on the applications of air pollution meteorology. Long Beach, CA, January, 2000. 7p.

- BROWN, M.J., LEACH, M., REISNER, J., STEVENS, D., SMITH, S., CHIN, S., STEVENS, C., LEE, B., 2000. Numerical modeling from mesoscale to urban scale to building scale. Submitted to: 3rd AMS Urban Environment Symposium, Davis, CA, August, 2000.
- BROWN, M.J., BOSWELL, D., STREIT, G., NELSON, M., MCPHERSON, T., HILTON, T., PARDYJAK, E.R., POL, S., RAMAMUTHY, P., HANSEN, B., KSATNER-KLEIN, P., CLARK, J., MOORE, A., WALKER, D., FELTON, N., STRICKLAND, D., BROOK, D., PRINCEVAC, M., ZAJIC, D., WAYSON, R., MACDONALD, J., FLEMING, D., STORWOLD, D., 2004. Joint Urban 2003 street experiment. Eighth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface. Paper J7.3, 11p.
- CA, V.T., ASAEDA, T., ITO, M., ARNFELD, S., 1995. Characteristics of wind field in a street canyon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 57, pp. 63-80.
- CADIOU, H., 1996. La mesure du vent : sa perturbation par les obstacles. Note Technique, n°33, 8p.
- CALHOUN, R., GOUVEIA, F., SHINN, J., CHAN, S., STEVENS, D., LEE, R., LEONE, J., 2004. Flow around a complex building: comparisons between experimental and a Reynolds-averaged Navier-Stokes approach. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 43 (5), pp. 696-710.
- CAMELLI, F., HANNA, S.R., LÖHNER, R., 2006. FEFLO CFD model study of flow and dispersion as influenced by tall buildings in New-York city. In *Proceedings of Sixth Symposium on Urban Environment*, paper J5.7, 9p.
- CARPENTIERI, M., and ROBINS, A.G., 2009. Wind tunnel experiments of flow and dispersion in a real urban area. In *The seventh International Conference on Urban Climate*. 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan.
- CHAN, A.T., ELLEN, S.P., SUBASH, S., SAMAD, C., 2001. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality. *Atmospheric Environment*, Vol. 35 (32), pp. 5681–5691.
- CHAN, S.T., LUNDQUIST, J.K., 2006. A study of stability conditions in an urban area. In *AMS 6th Symposium on the Urban Environment*, Atlanta, GA, United States, January 29, 2006 through February 2, 2006. J5.11, 8p.
- CHAN, A.T., WILLIAM, T.W., ELLEN, S.P., 2003. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality—part II: multiple canopies and canyons. *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 2761–2772.
- CHEN, G.Y. 2004. Using computational tools to factor wind into architectural environment design. *Energy and Buildings*, Vol. 36 (12), pp. 1197-1209.
- CHENG, H., HAYDEN, P., ROBINS, A.G., CASTRO, I.P. 2007. Flow over cube arrays of different packing densities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol. 95, pp. 715–740.
- CHENG, H., HAYDEN, P., ROBINS, A.G., CASTRO, I.P., 2007. Flow over cube arrays of different packing densities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95, pp. 715–740.
- CHENG, X. and HU, F., 2005. Numerical studies on flow fields around buildings in an urban street canyon and cross-Road. *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 22 (2), pp. 290–299.

- CHENG, Y., LIEN, F.S., YEE, E., SINCLAIR, R., 2003. A comparison of large Eddy simulations with a standard k- ϵ Reynolds-averaged Navier-Stokes model for the prediction of a fully developed turbulent flow over a matrix of cubes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, pp. 1301-1328.
- CHRISTEN, A., VOGT, R., ROTACH, M.W., 2003. Profile measurements of selected turbulence characteristics over different urban surfaces. In *Proceedings of the 4th International Conference on Urban Air Quality*, Prague, March 25-27 2003, pp. 408-411.
- COCEAL, O., THOMAS, T.G., CASTRO, I.P., BELCHER, S. E., 2006. Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 121, pp.491-519.
- COST Action 715. 2005. Meteorology applied to urban air pollution problems. Final Report. Bulgaria: Demetra Ltd Publishers, 282p.
- DABBERDT, W. AND HOYDYSH, W., 1991. Street canyon dispersion: sensitivity to block shape and entrainment. *Atmospheric Environment*, Vol. 25A, pp. 1143-1153.
- DAVIDSON, M.J., MYLNE, K.R., JONES, C.D., PHILLIPS, J.C., PERKINS, R.J., FUNG, J.C.H., HUNT, J.C.R., 1995. Plume dispersion through large groups of obstacles- A field investigation. *Atmospheric Environment*, Vol. 29 (22), pp. 3245-3256.
- DAVIDSON, M.J., SNYDER, W.H., LAWSON, R.E., HUNT, Jr. and J.C.R., 1996. Wind tunnel simulations of plume dispersion through groups of obstacles. *Atmospheric Environment*, Vol. 30 (22), pp. 3715-3731.
- DEPAUL, F.T., SHEIH, C.M., 1986. Measurements of wind velocities in a street canyon. *Atmospheric Environment*, Vol. 20, pp. 455-459.
- DOBRE, A., ARNOLD, S.J., SMALLEY, R.J., BODDY, J.W.D., BARLOW, J.F., TOMLING, A.S., BELCHER, S.E., 2005. Flow field measurements in the proximity of an urban intersection 1 in London, UK. *Atmospheric Environment*, Vol. 39 (26), pp. 4647-4657.
- DORAN, J.C., FAST, J.D., HOREL, J., 2002. The VTMX 2000 campaign. *Bulletin of American Meteorological Society*, April 2002, pp. 537-551.
- ELIASSON, I., OFFERLE, B., GRIMMOND, C.S.B., LINDQVIST, S., 2006. Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon. 2006. *Atmospheric Environment*, Vol. 40, pp. 1-16.
- FEHRENBACH, U., SCHERER, D., PARLOW, E., 2001. Automated classification of planning objectives for the consideration of climate and air quality in urban and regional planning for the example of the region of Basel/Switzerland. *Atmospheric Environment*, Vol. 35, pp. 5605-5615.
- FINARDI, S., MORSELLI, M.G., JEANNET, P., 1997. Wind Flow Models over Complex Terrain for Dispersion Calculations. Cost Action 710 Workshop. Pre-processing of Meteorological Data for Dispersion Models. Report of Working Group 4. 51p.
- GANDEMER, J., 1975. Wind environment around buildings: aerodynamic concept. In: *Fourth International conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, London Heathrow, September 1975. Heathrow (1975), Cambridge University Press, pp. 423-432.
- GANDEMER, J., 1986. Du diagnostic à l'expérimentation en soufflerie : contribution à la conception des espaces urbains. In *Acte du Colloque des 24 et 25 avril 1986 : Conception des formes urbaines et contrôle énergétique*. Nantes, pp. 123-146.

- GANDEMER, J., and GUYOT, A., 1976. Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti. Guide méthodologique et conseils pratiques. CSTB Nantes, groupe ABC. 130p.
- GEORGAKIS, G. and SANTAMOURIS, M., 2006. Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. *Energy and Buildings*, Vol. 38, pp. 367–376.
- GEORGAKIS, G. and SANTAMOURIS, M., 2005. Canyon effects: Calculation of wind speed in an urban street canyon with the aid of a semi-empirical model based on experimental data. International Conference “Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment”, May 2005, Santorini, Greece, pp. 117-124.
- GRIMMOND, C.S.B. and OKE, T.R., 1999. Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 38, pp. 1262-1292.
- GRIMMOND, C.S.B., KING, T.S., ROTH, M., OKE, T.R., 1998. Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 89, pp. 1-24.
- GUYOT, A., and IZARD, J.L., 1998/99. Les effets urbains. Diagnostic vent - microclimat. EUROMÉDITERRANÉE Zac Joliette, Laboratoire ABC, École d'architecture de Marseille Luminy, pp. 36-40.
- HANNA, S., BROWN, M.J., CAMELLI, F.E., CHAN, S.T., COIRIER, W.J., HANSEN, O.R., HUBER, A.H., KIM, S., REYNOLDS, R.M., 2006. Detailed simulations of atmospheric flow and dispersion in downtown Manhattan. An application of five computational fluid dynamics models. *Bulletin of American Meteorological Society*, pp.1713-1726.
- HANNA, S., REYNOLDS, M., HEISER, J., BORNSTEIN, R., 2004. Plans for the Madison Square Garden 2004 (MSG04) tracer experiment in Manhattan. Fifth Conference on Urban Environment, Vancouver, BC, paper 1.5., 7p.
- HANNA, S., WHILE, J., ZHOU, Y., KOSHELEVA, A., 2006. Analysis of Joint Urban 2003 (JU2003) and Madison Square Garden (MSG05) meteorological and tracer data. In Sixth Symposium on the Urban Environment. Paper J7.1. 20p.
- HANNA, S.R., BRITTER, R., FRANZESE, P., 2003. A baseline urban dispersion model evaluated with Salt Lake City and Los Angeles tracer data. *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 5069–5082.
- HANNA, S.R., TEHRANIAN, S., CARISSIMO, B., MACDONALD, R.W., LOHNER, R., 2002. Comparisons of model simulations with observations of mean flow and turbulence within simple obstacle arrays. *Atmospheric Environment*, Vol. 36, pp. 5067–5079.
- HANNA, S.R., WHITE, J., AND ZHOU, Y., 2007. Observed winds, turbulence, and dispersion in built-up downtown areas in Oklahoma City and Manhattan. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 125 (3), pp. 441-468.
- HOSKER, R.P., 1984. Flow and diffusion near obstacles. *Atmospheric Science and Power Production*, Publication DOE/TIC-27601, US Department of Energy, Washington, DC, pp. 241–326.
- HOYDYSH, W., GRIFFITHS, R., OGAWA, Y., 1974. A scale model study of the dispersion of pollution in street canyons. 67th APCA Meeting, Denver, CO.
- HOYDYSH, W.G., and DABBERDT, W.F., 1988. Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons. *Atmospheric Environment*. Vol. 22, pp. 2677-2689.

- HUANG, Z., Wang, J., Wu, Z., Xie, Z., 2002. Study of impact of street layout and thermal radiation on air quality by numerical simulation. In *Better Air Quality in Asian and Pacific Rim Cities (BAQ 2002)*, 16 Dec 2002 – 18 Dec 2002, Hong Kong SAR, 6p.
- HUNT, J.C.R., CARRUTHERS, D.J., BRITTER, R.E., DAISH, N.C., 2004. Dispersion from accidental releases in urban areas. A report prepared for ADMLC (UK Atmospheric Dispersion Modelling Liaison Committee). Cambridge Environmental Consultants Ltd, 106p.
- HUNT, J.C.R., ABELL, C.J., PETERKA, J.A., WOO, H., 1978. Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles: applying topology to flow visualisation. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 86, pp. 179–200.
- HUNTER, L.J., WASTON, I.D., JOHNSON, G.T., 1990-91. Modelling air flow regimes in urban canyons. *Energy and Buildings*, Vol. 15-16, pp. 315-324.
- HUNTER, L.J.; JOHNSON, G.T.; WATSON, I.D., 1992: An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. *Atmospheric Environment*, Vol. 26b, pp. 425–432.
- HUSSAIN, M., and LEE, B.E., 1980. An investigation of wind forces on three dimensional roughness elements in a simulated atmospheric boundary layer flow. Part II- Flow over large arrays of identical roughness elements and the effect of frontal and side aspect ratio variations. Report BS 56, Department of Building Sciences. University of Sheffield, UK.
- JACKSON, P. S., 1981. On the displacement height in the logarithmic velocity profile. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 111, pp. 15–25.
- JOHNSON, G.T., and HUNTER, L.J. 1999. Some insights into typical urban canyon airflows. *Atmospheric Environment*. Vol. 33, pp. 3991-3999.
- KANDA, M., 2006. Large-eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 118 (1), pp.151–168.
- KANDA, M., MORIWAKI, R., KASAMATSU, F., 2004. Large-eddy simulation of turbulent organized structures within and above explicitly resolved cube arrays. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 112 (2), pp. 343-368.
- KASTNER-KLEIN, P. and PLATE, E.J., 1999. Wind-tunnel study of concentration fields in street canyons. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 3973-3979.
- KASTNER-KLEIN, P. and ROTACH, M.W., 2004. Mean flow and turbulence characteristics in an urban roughness sublayer. *Boundary-Layer Meteorology*. Vol. 111 (1), pp. 55-84.
- KASTNER-KLEIN, P., BERKOWICZ, R., BRITTER, R., 2004. The influence of street architecture on flow and dispersion in street canyons. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 87, pp.121–131.
- KASTNER-KLEIN, P., ROTACH, M.W., BROWN, M.J., LAWSON, R.E., 2000. Spatial variability of mean flow and turbulence fields in street canyons. 3rd AMS Urban Environment Conference, Davis, CA. Aug. 2000, 3p.
- KIM, J.-J., and BAIK, J.-J., 2004. A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG k- ϵ turbulence model. *Atmospheric Environment*, Vol. 38, pp. 3039–3048.
- KIM, J.-J. and BAIK, J.-J., 2001. Urban street-canyons flows with bottom heating. *Atmospheric Environment*, Vol. 35 (20), pp. 3395-3404.

- KIM, J.-J. and BAIK, J.-J., 1999. A numerical study of thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 38, pp. 1249-1261.
- KOSS, H.H., 2006. On differences and similarities of applied wind comfort criteria. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 94, pp. 781–797.
- KOVAR-PANSKUS, A., LOUKA, P., SINI, J.-F., SAVORY, E., CZECH1, M., ABDELQARI, A., MESTAYER, P. G., TOY, N., 2002. Influence of geometry on the mean flow within urban street canyons. A comparison of wind tunnel experiments and numerical simulations. *Water, Air, and Soil pollution*, Vol. 2 (5-6), pp. 365-380.
- LEE, R.L., HUMPHREYS, T., CHAN, S.T., 2004. CFD simulations of Joint Urban Atmospheric Dispersion Field study. In *Symposium on the Urban Environment*, Vancouver B.C. Canada, August 23-27, 2004. 4p.
- LI, X.-X., LIU, C.-H., LEUNGA, D.Y.C., LAM, K.M., 2006. Recent progress in CFD modelling of wind field and pollutant transport in street canyons. *Atmospheric Environment*, Vol. 40, pp. 5640–5658.
- LIEN, F.S. and YEE, E., 2004. Numerical modelling of the turbulent flow developing within and over a 3-D building array, part I: a high-resolution Reynolds-averaged Navier-Stokes approach. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 112, pp.427-466.
- LIU, C.-H., LEUNG, D., BARTH, M.C., 2005. On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation. *Atmospheric and Environment*, Vol. 39 (9), pp.1567-1574.
- LOUKA, P., BELCHER, S.E., HARRISON, R.G. 1998. Modified street canyon flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol. 74-76, pp. 485-493.
- LOUKA, P., BELCHER, S.E., HARRISON, R.G., 2000. Coupling between air flow in streets and the well-developed boundary layer aloft. *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp.2613-2621.
- LOUKA, P., KETZEL, M., SAHM, P., GUILLOTEAU, E., MOUSSIOUPOULOS., N., SINI, J.-F., MESTAYER, P.G., BERKOWICZ, R., 2001. CFD intercomparison exercise within TRAPOS European research network. In *7th International Conference on Environmental Science and Technology – Syros 3-6/9/2001*. 8p.
- LOUKA, P., VACHON, G., SINI, J.-F., MESTAYER, P.G., ROSANT, J.-M., 2002. Thermal effects on the airflow in a street canyon-Nantes' 99 experimental results and model simulations. *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 2, pp. 351-364.
- LOUKA, P., VACHON, G., SINI, J.-F., MESTAYER, P.G., ROSANT, J.-M., 2001. Thermal effects on the airflow in a street canyon – Nantes '99 experimental results and model simulation. *The 3rd international conference on Urban Air Quality – Loutraki 19-23 March 2001*. 4p.
- LUN, Y.F., MOCHID, A., MURAKAMI, S., YOSHINO, H., SHIRASAWA, T., 2003. Numerical simulation of flow over topographic features by revised k- ϵ models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, pp. 231–245.
- MACDONALD, R., GRIFFITHS, R., CHEAH, S., 1997. Field experiments of dispersion through regular arrays of cubic structures. *Atmospheric Environment*, Vol. 31 (6), pp. 783-795.
- MACDONALD, R.W., 2000. Modeling thermal velocity profile in the urban canopy layer. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 97, pp. 25–45.

- MACDONALD, R.W., GRIFFITHS, R. F., HALL, D. J., 1998. A comparison of results from scaled field and wind tunnel modeling of dispersion in arrays of obstacles. *Atmospheric Environment*, Vol. 32 (22), pp. 3845-3862.
- MAVROIDIS, I., 2000. Velocity and concentration measurements within arrays of obstacles. *Global Nest: the International Journal*, Vol. 2 (1), pp. 109-117.
- MAYER, H. AND HÖPPE, P., 1987. Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical of Applied Climatology*, Vol. 38, pp. 43-49.
- MCCORMICK, R. A., 1971. Air pollution in the locality of buildings. *Philosophical Transaction for the Royal Society of London. Series A*, Vol. 269, pp. 515-526.
- MCDONALD, R., GRIFFITHS, R., CHEAH, S., 1997. Field experiments of dispersion through regular arrays of cubic structures. *Atmospheric Environment*. Vol. 31, pp. 783-795.
- MERONEY, R., RAFAILIDIS, S., PAAGEAU, M., 1996: Dispersion in idealized urban street canyons. *Air Pollution Modeling and Its Application XI*, Vol. 21, NATO.
- MERONEY, R.N., 1982. Turbulent diffusion near buildings, in: E.J. Plate (Ed.), *Engineering Meteorology*, Elsevier, Amsterdam, 1982, pp. 425-481.
- MOCHIDA, A., and LUN, I.Y.F., 2008. Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, pp. 1498-1527.
- MURAKAMI, S., 2004. Indoor/outdoor climate design by CFD based on the Software Platform. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 849-863.
- MURAKAMI, S., OOKA, R., MOCHIDA, A., YOSHIDA, S., KIM, S., 1999. CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 81, 57-81.
- NAKAMURA, Y. and OKE, T., 1988. Wind, temperature, and stability conditions in an East-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment*, Vol. 22, pp. 2691-2700.
- NEOPHYTOU, M.K-A., and BRITTER, R.E., 2005. Modelling the wind flow in complex urban topographies: a computational-fluid-dynamics simulation of the central London area. In 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics. Limassol, 29 June – 1 July, 2005, 8p.
- NIACHOU, K., LIVADA, L., SANTAMOURIS, M., 2005. A study of temperature and wind distribution inside two urban street canyons in Athens. In International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece, pp.125-131.
- PAN, H., LI, X., BROWN, M.J., BAIK, J.-J., 2007. Mean flow pattern through a simple mock urban array water channel experiments and modeling. In The Seventh Symposium of the Urban Environment. 10-13 September, 2007. San Diego, CA, paper 13.2, 5p.
- PANAO, M.O., GONÇALVES, H., FERRAO, P., 2006. Air flow exchange velocity of urban canyon cavities due to thermal spatial differences. In Proceedings of Passive and Low Energy Architecture. The 23rd International Conference, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006.
- PLATE, E.J. 1999. Methods of investigating urban wind fields - physical models. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 3981-3989.

- PLATE, E.J. and KIEFER, H. 2001. Wind loads in urban areas. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp.1233–1256.
- PLATE, E.J., 1995. Urban climates and urban climate modeling: an introduction, in: Cermak, et al. (Eds.), *Wind Climates in Cities*, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute in Waldbronn, Germany NATO ASI Series, Vol. 277, Kluwer, Dordrecht, Netherlands, pp. 33–38.
- POL, S.U. and BROWN, M.J., 2008. Flow Patterns at the Ends of a Street Canyon: Measurements from the Joint Urban 2003 Field Experiment. Submitted to *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol.47, pp.1413-1426.
- 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.
- RATTI, C., DI SABATINO, S., BRITTER, R., 2006. Urban texture analysis with image processing techniques: winds and dispersion. *Theoretical and applied climatology*, Vol. 84 (1-3), pp. 79-90.
- RATTI, C., DI SABATINO, S., BRITTER, R., BROWN, M., CATON, F., BURIAN, S., 2002. Analysis of 3-D urban database with respect to pollution dispersion for a number of European and American cities. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 2, pp.459–469.
- RAUPACH, M.R., ANTONIA, R.A., RAJAGOPALAN, P.G., 1991. Rough wall turbulent boundary layers. *Applied Mechanics reviews*, Vol. 44, pp. 1-25.
- ROBINS, A., 2004. DAPPLE – Initial field and wind tunnel results. 9th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. Paper 5.33, pp. 147-150.
- ROTACH, M.W., 2001. Simulation of urban-scale dispersion using a lagrangian stochastic dispersion model. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 99, pp. 379-410.
- ROTACH, M.W., 1999. On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. *Atmospheric and Environment*, Vol. 33 (24-25), pp. 4001-4008.
- ROTACH, M.W., 1995. Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, Vol. 29, pp. 1473-1486.
- ROTACH, M.W., VOGT, R., BERNHOFER, C., BATCHVAROVA, E., CHRISTEN, A., CLAPIER, A., FEDDERSEN, B., GRYNING, S.E., MARTUCCI, G., MAYER, H., MITEV, V., OKE, T.R., PARLOW, E., RICHNER, H., ROTH., M., ROULET., Y.A., RUFFIEUX, D., SALMOND, J.A., SCHATZMANN, M., VOOGT., J.A., 2005. BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 81, pp. 231–261.
- SANTAMOURIS, M., PAPANIKOLAOU, N., KORONAKIS., I., LIVADA, I., ASIMAKOPOULOS, D., 1999: Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4503-4521.
- SANTIAGO, J.L., MARTILLI, A., MARTIN, F., 2006. Passive tracer dispersion over a regular array of cubes using CFD simulations. In the 14th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the Air and Waste Management Association. 28 – 30 January, 2006, Atlanta, GA. Paper 6.4, 5p.
- SAVORY, E, ROTACH, M.W., CHAUVET, C., GUILLOTEAU, E., KASTNER-KLEIN, P., KOVAR-PANSKUS, A., LOUKA, P., SAHM, P., CASTELLI, S.T., 2004. Street architecture and air quality. In BERKOWICZ, R., BRITTER, R., DI SABATINO, S. TRAPOS. Optimisation of

- modelling methods for traffic pollution in streets. Cambridge Environmental Research, Consultants Ltd and Cambridge University. Cambridge Environmental Research Consultants Ltd and Cambridge University. pp. 8-21.
- SINI, J.F., ANQUETINI, S., MESTAYER, P., 1996. Pollutant dispersion and thermal effects in Urban street canyons. *Atmospheric Environment*, Vol. 30 (15), pp. 2659-2677.
- SMITH, W.S., REISNER, J.M., KAO, C.-Y.J., 2001. Simulations of flow around a cubical building: comparison with towing-tank data and assessment of radiatively-induced thermal effects. *Atmospheric Environment*, Vol. 35, pp. 3811-3821.
- THEURER, W., 1999. Typical building arrangements for urban air pollution modeling. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4057-4066.
- UEHARA, K., MURAKAMI, S., OIKAWA, S., WAKAMATSU, S., 2000. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons. *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 1553-1562.
- Urban Climate News, 2008. Breeze block blamed for urban heat island in Hong Kong. Issue N. 28, Urban Climate News, June 2008, p.2 (WWW.urban-climate.org).
- VACHON, G., 2001. Transfert des polluants des sources fixes et mobiles dans la canopée urbaine : Évaluation expérimentale. Thèse de doctorat. École doctorale de Mécanique, Thermique et Génie Civil de Nantes. Université de Nantes.
- VARDOULAKIS, S., FISHER, B.E.A., PERICLEOUS, K., GONZALEZ-FLESCA, N., 2003. Modelling air quality in street canyons: A review. *Atmospheric Environment*, Vol.37, pp. 155-182.
- 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. École doctorale de Mécanique, Thermique et Génie Civil de Nantes. Université de Nantes.
- WEBER, S., KUTTLER, W., WEBER, K., 2006. Flow characteristics and particle mass and number concentration variability within a busy urban street canyon. *Atmospheric Environment*, Vol.40, pp. 7565-7578.
- WIERINGA, J., 1993: Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 63, pp. 323-363.
- WILLEMSINA, E., and WISSE, J.A., 2007. Design for wind comfort in The Netherlands: Procedures, criteria and open research issues. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95, pp. 1541-1550.
- WILLIAM, M.D., BROWN, M.J., PARDYJAK, E.R. 2002: Development of the QUIC Plume dispersion model for flow around buildings, 4th AMS Symposium on Urban Environment. Norfolk, VA.
- XIAOMIN, X., ZHEN, H., JIASONG, W., 2006. The impact of urban street layout on local atmospheric environment. *Building and Environment*, Vol. 41, pp. 1352-1363.
- XIE, X., HUANG, Z., WANG, J.-S., 2005. Impact of building configuration on air quality in street canyon. *Atmospheric Environment*, Vol. 39, pp. 4519-4530.
- XIE, X., LIU, C.H., LEUNG, D.Y.C., 2007. Impact of building facades and ground heating on wind flow and pollutant transport in street canyons. *Atmospheric Environment*, Vol. 41, pp. 9030-9049.

- YAMARTINO and WIEGAND, 1986. Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence, and pollutant concentration fields within an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, Vol. 20, pp. 2137-2156.
- ZHANG, Y. Q., ARYA, S. P., SNYDER, W. H., 1996. A comparison of numerical and physical modeling of stable atmospheric flow and dispersion around a cubical building. *Atmospheric Environment*, Vol. 30, No. 8, pp. 1327-1345.
- ZHEN, H., JIASONG, W., ZHIJUN, W., ZHENG, X., 2002. Study of impact of street layout and thermal radiation on air quality by numerical simulation. *Better Air Quality in Asian and Pacific Rim Cities (BAQ 2002)*. 16 Dec 2002 – 18 Dec 2002, Hong Kong SAR, 6p.

Histoire

- BENYOUCEF, B., 1999. L'approche de l'espace socio-urbain. Problématique, tradition et modernité. Thèse de doctorat d'Etat. EPAU, Alger, 410p
- DONNADIEU, C. et P., DIDILLION, H et JM., 1977. Habiter le désert ; les maisons mozabites. Bruxelles : Pierre Mardaga,
- RAVEREAU, A., 1972. Le Mzab, une leçon d'architecture. Paris : Sindbad.
- ROCHE, M., 1973. Le M'zab, architecture ibadite en Algérie. Strasbourg : Arthaud.
- SELTZER, P., 1946. Le climat de l'Algérie. Alger : « La typo-Litho » & Jules Carbonel, 220p.

Santé urbaine.

- CDC: Center for Disease Control.,2005. Heat-related mortality— Arizona, 1993–2002, and United States, 1979–2002. *Morbidity & Mortality Weekly Report*, 54, 628–630.
- HARLAN, S., BRAZEL, A.J., PRASHAD, L., STEFANOV, W.L., LARSEN, L., 2006. Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Social Science & Medicine*, Vol. 63, pp. 2847–2863.
- IFRC: International Federation of Red Cross (2003). India: Heat wave. *Information Bulletin* 1/2003. Available at /www.ifrc.org.
- KOPPE, C., KOVATS, S., JENDRITZKY, G., MENNE, B., 2004. Heat-waves: risks and responses. *Health and Global Environmental Change*, Vol 2. WHO. Printed by: Colombo. 124p.
- PARSON, K., 2003. Human thermal environments. The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance. 2nd Edit. London, USA, CA: Taylor & Francis Editors.
- SCIENCE & VIE. 2003. Dossier spécial : La menace climatique. N°.1035.
- SMOYER, K.E., 1998. Putting risk in its place: Methodological considerations for investigating extreme event health risk. *Social Science and Medicine*, Vol. 47 (11), pp. 1809-1824.

Zones arides et climat urbain.

- ALSHUWAIKHAT, H.M., and NKWENTI, D.I. 2002. Developing sustainable cities in arid regions. *Cities*. Vol. 19 (2), pp. 85–94.

- BENNADJI, A., 1998. Building climatic performance in arid zones. In Proceedings of PLEA'98, Lisbon, Portugal, June 1998, pp. 225-228.
- BENNADJI, A., 1999. Adaptation climatique ou culturelle en zones arides. Cas du Sud-est algérien. Thèse de doctorat. Université Aix-Marseille I. Université de Provence. U.F.R. des Sciences Géographiques et de l'Aménagement.
- BONAN, G.B., 2000. The microclimates of a suburban Colorado (USA) landscape and implications for planning and design. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 49, pp. 97-114.
- BOUCHAIRA, A., and DUPAGNE, A., 2003. Building traditions of Mزاب facing the challenges of re-shaping of its built form and society. *Building and Environment*, Vol. 38, pp. 1345 – 1364.
- BOURBIA, F. and 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, pp. 249-262.
- BOURBIA F., AND AWBI, H.B., 2004. Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate. Part 2: Shading simulations. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 291-301.
- GOLANY, G.S., 1980. Subterranean settlements for arid zones, in: G.S. Golany (Ed.), *Housing in Arid Lands: Design and Planning*, Architectural Press, London, pp. 109-122.
- GOLANY, G.S., 1978. Planning urban sites in arid zones: the basic considerations. In *Urban Planning for Arid Regions: American Experiences and Directions*, G.S. Golany (Ed.), Wiley, New York.
- GOLDEN, J.S., 2003/2004. The Built environment induced urban heat island effect in rapidly urbanizing arid regions – A sustainable urban engineering complexity. *Environmental Sciences*, Vol. 1 (4), pp. 321–349.
- GOLDREICH, Y., 1995. Urban climate studies in Israel- A review. *Atmospheric Environment*, Vol. 29 (4), pp. 467-478.
- MEIR, I.A., PEARLMUTTER, D., ETZON, Y., 1995. On the microclimatic behavior of two semi-enclosed attached courtyards in a hot dry region. *Building and Environment*, Vol. 30 (4), pp. 563-572.
- PAPPARELLI, A., KURBAN, A., CUNSULO, M., 1996. Strategies for bioclimatic design in an urban area of an arid zone: San Juan (Argentina). *Landscape and Urban Planning*, Vol. 34 (1), pp. 19-25.
- PEARLMUTTER, D., BITAN, A., BERLINER, P., 1999. Microclimatic analysis of 'compact' urban canyons in an arid zone. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp.4143-4150.
- PORTNOV, B.A., and ERELL, E., 1998. Development peculiarities of peripheral desert settlements: The case of Israel. Joint Editors and Blackwell Publishers, Ltd, 1998. 17p.
- ROTH, M., 2007. Review of urban climate research in (sub) tropical regions. *International Journal of Climatology* , Vol.27; 1847-2015.
- SAARONI, H., BEN-DOR, E., BITAN, A., POTCHTER, O., 2000. Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 48, pp. 1-18.
- SOFER, M., and POTCHTER, O., 2006. The urban heat island of a city in an arid zone: the case of Eilat, Israel. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 85, pp. 81–88.

Site web :

Le grand dictionnaire terminologique :
http://granddictionnaire.com/btml/fra/r_motclef/index8001.asp

Publications personnelles.

DAOUDI, N., KITOUS, S., M., DJENANE, M., BOUSSOUALIM, A., BENSALÉM, R., ADOLPHE, L., 2005. Perception of climatic constraints in arid regions: the case study of the M'zab valley in the Algerian Sahara. In PLEA2005 - The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture. Beirut, Lebanon, 13-16 November 2005, pp. 167- 171.

DAOUDI, N., KITOUS, S., M., DJENANE, M., BOUSSOUALIM, A., BENSALÉM, R., ADOLPHE, L., 2005. Perceived indoor environment quality in a vernacular built form: the case study of the arid region of the M'zab valley, Algeria. In CISBAT 2005, CSFF Industry Day 2005. Renewables in a changing climate innovation in building envelopes and environmental systems. 28 septembre 2005, Lausanne, Switzerland, pp. 391-396.

KHELIFI, L., BENSALÉM, R., KITOUS, S., BRAHIMI, F., BOUSSOUALIM, A., EL-GHOBRINI, M., 2005. Generic models as climatic design tools for an environmental architecture. In PLEA2005 - The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture. Beirut, Lebanon, 13-16 November 2005, pp. 317-322.

KITOUS, S., BENSALÉM, R., ADOLPHE, L., 2005. Characteristics of airflow patterns in traditional desert cities: Case study of Ghardaïa in M'zab valley. In PLEA2005 - The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture. Beirut, Lebanon, 13-16 November 2005, pp. 227 – 232.

KITOUS, S., BENSALÉM, R., ADOLPHE, L., 2005. Characteristics of Airflow patterns in traditional desert cities: Case study of Ghardaïa in M'zab valley. In CISBAT 2005, CSFF Industry Day 2005. Renewables in a changing climate innovation in building envelopes and environmental systems. 28 septembre 2005, Lausanne, Switzerland, pp. 539-544.

KITOUS, S., DAOUDI, N., DJENANE, M., BENSALÉM, R., ADOLPHE, L., 2003. Pour un urbanisme climatique des villes : cas de la vallée du M'zab. Rapport intermédiaire CMEP.

KITOUS, S., DAOUDI, N., DJENANE, M., BENSALÉM, R., ADOLPHE, L., 2004. Pour un urbanisme climatique des villes : cas de la vallée du M'zab. Rapport intermédiaire CMEP.

KITOUS, S., DAOUDI, N., BENSALÉM, R., ADOLPHE, L., 2006. Pour un urbanisme climatique des villes : cas de la vallée du M'zab. Rapport intermédiaire CMEP.

KITOUS, S., DAOUDI, N., BOUSSOUALIM, A., BENSALÉM, R., ADOLPHE, L., 2006. Pour un urbanisme climatique des villes : cas de la vallée du M'zab. Investigations sur les principes d'intégration ancestraux et recommandations pour une planification future. In "living in Deserts: Is a sustainable urban design still possible in Arid and hot regions?". Séminaire international à Ghardaïa, Algérie, 9-12 Décembre 2006, pp 128-173.

KITOUS, S., DJENANE, M., DAOUDI, N., BOUSSOUALIM, A., BENSALÉM, R., ADOLPHE, L., 2004. Thermal behaviour of compact urban fabric in hot and dry climate: case study of M'zab Valley. Experimental results. In Plea2004 - The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, the Netherlands, 19 - 22 September 2004.

KITOUS, S., BENSALÉM, R., ADOLPHE, L., 2012. Airflow patterns within a complex urban topography under hot and dry climate in the Algerian Sahara. *Building and Environment*, Vol. 56, 162-175.

Liste des Figures

Fig. I- 1. Décès dus à la chaleur excessive en Arizona sur une période de 11 ans : 1992-2002. ...	2
Fig. I- 2. Les interrelations complexes entre le temps, le microclimat et les trois composantes d'un espace public.	4
Fig. I- 3. Phénomènes à différentes échelles liés au climat du vent (Murakami et al., 2000).	8
Fig. II- 1. Représentation des trois échelles utilisées dans la climatologie urbaine.	19
Fig. II- 2. La sous-couche de rugosité	20
Fig. II- 3. Le bilan radiatif au-dessus d'une ville.....	21
Fig. II- 4. Rôle de la géométrie de la surface dans l'échange radiatif.	24
Fig. II- 5. Le bilan d'énergie au-dessus d'une ville.....	25
Fig. II- 6. Section transversale généralisée de l'îlot de chaleur urbain type.....	27
Fig. II- 7. La fréquence de distribution de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain à Séoul en fonction de (a) la vitesse du vent et (c) de la couverture nuageuse.	28
Fig. II- 8. Représentation schématique de la géométrie d'une rue canyon simple.	30
Fig. II- 9. Facteur d'ouverture au ciel d'une rue canyon asymétrique.	31
Fig. II- 10. Schéma du bilan énergétique dans la rue canyon.	32
Fig. II- 11. Les bilans énergétiques diurnes de chaque surface basée sur les valeurs horaires moyennes pour une période trois jours.	33
Fig. II- 12. Les surfaces et les zones radiative et convectives définies pour la simulation thermique	34
Fig. II- 13. Évolution horaire du flux de chaleur total sur les surfaces 2 (fond du canyon) et 4(haut du canyon).	35
Fig. II- 14. Influence de la configuration urbaine sur la valeur de l'albédo.	36
Fig. II- 15. Distributions des isothermes à travers le canyon sur des intervalles de temps de 10 min..	38
Fig. II- 16. Différences de température (ΔT) entre les rues canyons et la station de référence.....	39
Fig. II- 17. Profils de température d'air et de surface à travers la partie nord du ventre ville de Göteborg.	40
Fig. II- 18. L'advection à l'intérieur ou à l'extérieur du volume d'air du canyon due a un transport par un vent moyen horizontal en combinaison avec le gradient de température horizontal moyen.....	42
Fig. III- 1. Les profils de vent à travers différentes rugosités de terrain	47
Fig. III- 2. Détermination de la hauteur de déplacement d_0 en fonction de la condition intégrale proposée par Jackson (1981)..	49

Fig. III- 3. L'écoulement autour d'un obstacle isolé..	50
Fig. III- 4. Caractéristiques géométriques des rues canyons.....	53
Fig. III- 5. Classification des angles d'incidence du vent ambiant.	54
Fig. III- 6. Les trois régimes d'écoulements dans les rues canyons pour différents prospects et pour un vent incident perpendiculaire.	55
Fig. III- 7. Présence d'un écoulement rasant dans une rue canyon de prospect H/W variant entre 0.5 et 2.....	56
Fig. III- 8. Illustration du concept de ventilation de la rue..	57
Fig. III- 9. Représentation schématique de l'écoulement dans la rue et au niveau du toit.....	58
Fig. III- 10. Structure de l'écoulement dans deux rues de prospects respectifs de 2 et 3.	59
Fig. III- 11. Représentation schématique de l'écoulement dans le canyon avec un vent incident de direction parallèle à l'axe de la rue	61
Fig. III- 12. Variation du niveau de réduction de l'écoulement d'air en fonction de la géométrie H/W de la rue canyon.	62
Fig. III- 13. Variation de la vitesse d'air en fonction de la hauteur dans une rue profonde	63
Fig. III- 14. Représentation schématique de l'écoulement dans le canyon avec un vent incident de direction oblique à l'axe de la rue.	64
Fig. III- 15. Conceptualisation de l'écoulement réfléchi à partir du mur face au vent.	64
Fig. III- 16. Représentation schématique d'un modèle simplifié de l'écoulement dans les rues urbaines au voisinage des angles des bâtiments..	65
Fig. III- 17. Les modèles de re-circulation dans les rues canyons pour une direction de vent incident perpendiculaire.	67
Fig. III- 18. Influence du rapport L/H sur le champ d'écoulement dans une configuration de rue canyon en 3D.....	68
Fig. III- 19. Le champ d'écoulement à l'intersection d'une rue.	69
Fig. III- 20. Vortex d'angles au niveau des intersections de rue.....	70
Fig. III- 21. Deux modèles de rue de configuration asymétrique utilisés dans l'étude de modélisation numérique par Baik et al.	71
Fig. III- 22. Le champ de vecteurs de vitesse de vent modélisé dans le cas d'un bâtiment asymétrique..	72
Fig. III- 23. Configuration de différentes combinaisons de forme de toiture.	73
Fig. III- 24. Influence de la forme de la toiture sur le modèle d'écoulement dans une configuration de rue canyon isolée en 2D..	74
Fig. III- 25. Effet de la surface urbaine sur la structure de l'écoulement d'air.	75
Fig. III- 26. Les champs de vecteurs de vent et de turbulence autour d'une ordonnance de bâtiments en 2-D dans une soufflerie atmosphérique..	75
Fig. III- 27. Vitesse verticale moyenne mesurée en cinq points dans une ordonnance de bâtiments en 2-D.	76

Fig. III- 28. Les profils moyens de la composante de vitesse horizontale dans un groupe de six rues canyons.....	77
Fig. III- 29. Les modèles d'écoulement dans différentes ordonnances urbaines.....	77
Fig. III- 30. Schéma de l'écoulement dans la rue en fonction de la surchauffe des parois.	79
Fig. III- 31. Les configurations des murs ensoleillés.....	80
Fig. III- 32. Différents modèles d'écoulement dans la rue canyon en fonction du prospect de la rue et de la surchauffe des parois.....	81
Fig. III- 33. Représentation du champ d'écoulement autour d'un large groupe d'obstacles.	84
Fig. III- 34. Paramètres morphométriques utilisés par Theurer pour décrire des ordonnances de bâtiments urbains.....	87
Fig. III- 35. Définition des dimensions de surface utilisées dans l'analyse morphométrique..	88
Fig. III- 36. Représentation schématique des ordonnances d'obstacles cubiques utilisés dans la modélisation numérique.....	91
Fig. III- 37. La rugosité $z_{0/h}$ de certaines configurations de groupes de bâtiments en fonction de la densité plane.....	92
Fig. III- 38. Comparaison des profils de vent moyen modélisés derrière les cubes et dans l'intervalle entre les bâtiments au niveau du 7ème rang dans les deux types de configuration alignée et en quiconque..	93
Fig. III- 39. Variation de la vitesse du vent dans l'ordonnance cubique alignée.....	94
Fig. III- 40. Les mesures de vitesses d'air dans une ordonnance d'obstacles de configuration alignée.....	95
Fig. III- 41. Vue en 3-D montrant la matrice de bâtiments cubiques (7x11) étudiés par simulation numérique et en soufflerie atmosphérique par Lien et Yee.	95
Fig. III- 42. Écoulements tridimensionnels complexes observés à l'intérieur des ordonnances urbaines régulières.	96
Fig. III- 43. Protocole de mesure de la campagne URBAN2003.	99
Fig. III- 44. Les mesures de température effectuées entre 11:35 pm et 12:36 am à travers des transverses dans la ville.....	100
Fig. III- 45. La simulation du bassin de Salt Lake Valley, dans la nuit.....	101
Fig. III- 46. Simulations des écoulements d'air aux échelles urbaine et architecturales dans le centre de Salt Lake City.....	102
Fig. III- 47. Les vecteurs vent prédits et les vitesses de vent sur un plan $z = 2m$ durant une journée d'observation intense, illustrant la complexité de l'écoulement dans le centre de OKC .	104
Fig. III- 48. La zone d'étude de MSG05 à Manhattan (NY, USA).	105
Fig. III- 49. Le plan du site d'étude montrant le déploiement de l'instrumentation.	107
Fig. III- 50. Bilan d'échange de masse exprimé en termes des flux sortants..	108
Fig. III- 51. Écoulement tridimensionnel autour du quartier central de Marylebone.....	109
Fig. IV- 1. Gains et pertes de chaleur dans un environnement chaud.....	115
Fig. IV- 2. Échelle de sensation thermique de l'ASHRAE (2001).	120

Fig. V- 1. Les composantes du bilan énergétique et la vitesse du vent dans le désert : 10-11 juin 1950, à El-Mirage, Californie (35°N).....	129
Fig. V- 2. Températures de l'air et de surface en deux profondeurs dans le sable du Sahara central à la mi-août.	130
Fig. V- 3. Le plan d'ensemble de l'étude à échelle réduite conduite par Pearlmutter et al.	133
Fig. V- 4. L'indice de contrainte thermique pour des rues E-O de prospects H/W variés.....	134
Fig. V- 5. L'indice de contrainte thermique selon le degré de ventilation des rues canyons	135
Fig. V- 6. Températures de l'air relevées dans les quartiers d'habitation de la ville de Fez ainsi qu'à l'aéroport au cours d'une journée d'hiver et d'été.	136
Fig. V- 7. Différence entre la température radiante moyenne (T _{mrt}) et la température de l'air (T _a) à 1.2 m au-dessus du sol durant une journée type d'été dans le ksar de Beni-Isguen.....	138
Fig. V- 8. La température physiologique équivalente (PET) à 1.2 m au-dessus du sol durant une journée type d'été dans le ksar de Beni-Isguen.	139
Fig. VI- 1. Inscription territoriale et géographique de la vallée du M'zab.	144
Fig. VI- 2. Illustration de la vallée du M'zab avec les cinq ksour implantés tout le long de l'oued M'Zab.....	145
Fig. VI- 3. Variation mensuelle des températures de l'air moyenne, maximale et minimale de la ville de Ghardaïa.	147
Fig. VI- 4. Graphe de la moyenne de l'humidité relative maximale, minimale et moyenne de la ville de Ghardaïa sur une période de dix ans.....	148
Fig. VI- 5. Pourcentage des vents selon leur intensité de la ville de Ghardaïa sur la base des données d'une période de 10 ans.....	149
Fig. VI- 6. Rose des vents de la ville de Ghardaïa établie sur la base des données d'une période de 10 ans.	149
Fig. VI- 7. Evolution mensuelle des vitesses du vent moyen de la ville de Ghardaïa sur la base des données d'une période de dix ans.	150
Fig. VI- 8. Nombre de jours avec chasse de sable de la ville de Ghardaïa sur une période de 10 ans.	152
Fig. VI- 9. Mise en œuvre d'un ensemble de principes bioclimatiques dans les ksour.....	153
Fig. VI- 10. Vues en 3 D du site d'implantation du Ksar de Ghardaïa.	155
Fig. VI- 11. Tracé organique du ksar de Ghardaïa : compacité et densité des formes bâties.	156
Fig. VI- 12. Vue en 3D sur le versant Sud du ksar de Ghardaïa montrant la rupture morphologique créée par la mosquée.	157
Fig. VI- 13. Le point de mesure de référence sur le plateau Khetala.	162
Fig. VI- 14. Illustration des points de mesure des campagnes de juin 03 et février 04.....	165
Fig. VI- 15. Instrumentation déployée lors des campagnes exploratoires de juin 03 et février 04... ..	170
Fig. VI- 16. Fragment urbain sélectionné en vue de l'étude de l'effet des PC sur les écoulements d'air.	176
Fig. VI- 17. Vues sur la rue concentrique comportant le PC d'une longueur de 15.50 m.	177

Fig. VI- 18. Vue sur la rue radiale comportant trois PC successifs.....	177
Fig. VI- 19. Micro-station Hobo 512 K utilisée dans les campagnes de mesure en continu.	178
Fig. VI- 20. Station de mesure Campbell.....	180
Fig. VI- 21. Vues sur les stations de mesure automatiques Hobo au-dessus des toits et dans les rues canyons.....	182
Fig. VI- 22. Protocole de mesure relatif à l'étude de l'effet des PC sur les écoulements d'air.....	183
Fig. VII- 1. La distribution des écoulements d'air au-dessus des toits du ksar de Ghardaïa : cas de vents de référence de direction Sud.	190
Fig. VII- 2. Comparaison des vitesses de vent au-dessus des toits dans le ksar de Ghardaïa.	191
Fig. VII- 3. La distribution des écoulements d'air au-dessus des toits du ksar de Ghardaïa : cas de vents de référence de direction Ouest.	192
Fig. VII- 4. La distribution des écoulements d'air au-dessus des toits du ksar de Ghardaïa : cas de vents de référence de direction Nord.	193
Fig. VII- 5. Variation de la vitesse d'air au-dessus des toits des versants Sud, Ouest et Est du Ksar de Ghardaïa : cas des vents incidents Sud.....	194
Fig. VII- 6. Variation de la direction de l'écoulement au-dessus des toits des versants Sud, Ouest et Est du Ksar de Ghardaïa : cas des vents incidents Sud.	195
Fig. VII- 7. Variation du comportement aérodynamique des versants Sud et Est selon la direction du vent de référence.....	196
Fig. VII- 8. La distribution des écoulements d'air dans les rues du ksar de Ghardaïa pour différentes directions de vent incident.	199
Fig. VII- 9. Caractéristiques géométriques des rues canyons de géométrie longue et courte.....	204
Fig. VII- 10. Rose des vents au-dessus du toit de la rue canyon longue (Pt.1) établie sur la base de 1598 données.	205
Fig. VII- 11. Corrélation entre les vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit pour tout angle d'incidence confondue.	206
Fig. VII- 12. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon longue (Pt.1) établie sur la base de 1598 données.	206
Fig. VII- 13. Classification des angles d'incidence du vent ambiant en parallèle, perpendiculaire et oblique par rapport à l'axe de la rue canyon longue.	207
Fig. VII- 14. Corrélation entre les vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit dans le cas d'une incidence parallèle à l'axe de la rue (Pt.1).	208
Fig. VII- 15. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon longue (Pt.1) établie sur la base de 369 données : cas d'une incidence parallèle à l'axe de la rue.	209
Fig. VII- 16. Corrélation entre les vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit dans le cas d'une incidence oblique de 22° à l'axe de la rue.	210
Fig. VII- 17. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon longue (Pt.1) établie sur la base de 449 données : cas d'une incidence oblique de 22° ($\pm 10^\circ$) à l'axe de la rue.	211
Fig. VII- 18. Corrélation entre les vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit dans le cas d'une incidence oblique de 44° à l'axe de la rue.	212

Fig. VII- 19. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon longue (Pt.1) établie sur la base de 449 données : cas d'une incidence oblique de 44° à l'axe de la rue.	212
Fig. VII- 20. Corrélation entre les vitesses d'air dans la rue et au-dessus du toit dans le cas d'une incidence oblique de 66° à l'axe de la rue.	214
Fig. VII- 21. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon longue (Pt.1) établie sur la base de 72 données : cas d'une incidence oblique de 66° à l'axe de la rue.	214
Fig. VII- 22. Rose des vents au-dessus du toit de la rue canyon courte (Ksar de Tafilalt) établie sur la base de 3477 données.	216
Fig. VII- 23. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon courte (Ksar de Tafilalt) établie sur la base de 3477 données.	217
Fig. VII- 24. Classification des angles d'incidence du vent ambiant en parallèle, perpendiculaire et oblique par rapport à l'axe de la rue canyon courte située dans le ksar de Tafilalt.	217
Fig. VII- 25. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue courte dans le cas d'une incidence perpendiculaire à l'axe de la rue.	218
Fig. VII- 26. Variation de l'intensité minimale, moyenne et maximale de l'écoulement horizontal dans la rue canyon en fonction de quatre classes de vitesses de vent incident perpendiculaire	219
Fig. VII- 27. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon courte (Ksar de Tafilalt) établie sur la base de 242 données : cas d'une incidence perpendiculaire à l'axe de la rue.	220
Fig. VII- 28. Les modèles de re-circulation dans les rues canyons pour une direction de vent incident perpendiculaire.	220
Fig. VII- 29. Comparaison des vitesses d'air dans la rue canyon et au-dessus du toit pour un vent incident parallèle de direction Est.	222
Fig. VII- 30. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue courte dans le cas d'une incidence parallèle à l'axe de la rue.	223
Fig. VII- 31. Variation de l'intensité minimale, moyenne et maximale de l'écoulement horizontal dans la rue canyon courte en fonction de quatre classes de vitesses de vent incident parallèle.	224
Fig. VII- 32. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon courte (Ksar de Tafilalt) établie sur la base de 1164 données : cas d'un vent incident parallèle de direction Est.	225
Fig. VII- 33. Rose des vents à l'intérieur de la rue canyon courte (Ksar de Tafilalt) établie sur la base de 141 données : cas d'un vent incident parallèle de direction Ouest.	225
Fig. VII- 34. Rose des vents dans la rue courte établie à partir de 1852 données, cas de vents incidents obliques à l'axe de la rue.	226
Fig. VII- 35. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue courte dans le cas d'une incidence oblique de $22^\circ \pm (10^\circ)$ à l'axe de la rue.	227
Fig. VII- 36. Variation de l'intensité minimale, moyenne et maximale de l'écoulement horizontal dans la rue canyon courte en fonction de quatre classes de vitesses de vent incident oblique de 22° à l'axe de la rue.	228
Fig. VII- 37. Rose des vents dans la rue canyon courte effectuée à partir de 328 données : cas d'une incidence oblique de $22^\circ \pm (10^\circ)$ à l'axe de la rue.	229

Fig. VII- 38. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue courte dans le cas d'une incidence oblique de 44° à l'axe de la rue.	230
Fig. VII- 39. Rose des vents dans la rue canyon courte effectuée à partir de 108 données : cas d'une incidence oblique de $44^\circ \pm (10^\circ)$ à l'axe de la rue.	231
Fig. VII- 40. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue courte dans le cas d'une incidence oblique de $66^\circ \pm (10^\circ)$ à l'axe de la rue.	232
Fig. VII- 41. Rose des vents dans la rue canyon courte effectuée à partir de 127 données : cas d'une incidence oblique de $66^\circ \pm (10^\circ)$ à l'axe de la rue.	233
Fig. VII- 42. Caractéristiques géométriques des rues canyons asymétrique et symétrique analysées.	237
Fig. VII- 43. Schéma d'une configuration de rue asymétrique ascendante et descendante.	239
Fig. VII- 44. Rose des vents au-dessus du toit de la rue asymétrique établie sur la base de 4860 données.	239
Fig. VII- 45. Rose des vents dans la rue asymétrique établie sur la base de 4860 données.	240
Fig. VII- 46. Classification des angles d'incidence du vent ambiant par rapport à l'axe de la rue canyon asymétrique (Pt.3).	241
Fig. VII- 47. Variation des écoulements d'air au-dessus du toit et dans la rue asymétrique : cas d'une incidence parallèle à l'axe de la rue.	241
Fig. VII- 48. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue asymétrique dans le cas d'une incidence parallèle à l'axe de la rue.	242
Fig. VII- 49. Rose des vents dans la rue asymétrique établie sur la base de 1361 données : cas d'un vent ambiant parallèle.	243
Fig. VII- 50. Rose des vents dans la rue asymétrique de configuration descendante établie sur la base de 2051 données : cas d'une incidence oblique de $22^\circ \pm 10^\circ$ à l'axe de la rue.	244
Fig. VII- 51. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue asymétrique de configuration descendante dans le cas d'une incidence oblique de $22 (\pm 10^\circ)$ à l'axe de la rue.	244
Fig. VII- 52. Rose des vents dans la rue asymétrique de configuration descendante établie sur la base de 465 données : cas d'une incidence oblique de $44^\circ (\pm 10^\circ)$ à l'axe de la rue.	245
Fig. VII- 53. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue asymétrique de configuration ascendante dans le cas d'une incidence oblique de $22^\circ (\pm 10^\circ)$ à l'axe de la rue.	246
Fig. VII- 54. Corrélation entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue asymétrique de configuration ascendante dans le cas d'une incidence oblique de $44^\circ (\pm 10^\circ)$ à l'axe de la rue.	247
Fig. VII- 55. Rose des vents dans la rue asymétrique de configuration ascendante établie sur la base de 112 données : cas d'une incidence de $44^\circ (\pm 10^\circ)$	249
Fig. VII- 56. Rose des vents dans la rue de forme courbe dans le cas d'un angle d'incidence perpendiculaire à l'axe de la rue (Pt.3).	251
Fig. VII- 57. Distribution horizontale des écoulements d'air le long du fragment urbain comportant des PC.	252

Fig. VII- 58. Rose des vents au-dessus du toit de la mosquée établie sur la base de 5456 données.	253
Fig. VII- 59. Comparaison de la vitesse moyenne horizontale le long du fragment urbain comportant le PC.	254
Fig. VII- 60. Comparaison des vitesses d'air horizontales moyenne et maximale au-dessus du toit et le long du fragment urbain comportant le PC sous conditions de vents faibles.	255
Fig. VII- 61. Corrélation entre les écoulements entrant et sortant du PC d'une longueur de 15.50 m : cas de vents ambiants de directions confondues.	256
Fig. VII- 62. Conditions thermiques et de vent dans le PC au cours de la nuit.	257
Fig. VIII- 1. Les éclairagements énergétiques incidents au-dessus des toits des versants Nord et Sud au cours d'une journée ensoleillée d'hiver, ciel clair et dégagé.	268
Fig. VIII- 2. Les éclairagements énergétiques incidents au-dessus des toits des versants Nord et Sud au cours d'une journée ensoleillée d'été, ciel clair et dégagé.	268
Fig. VIII- 3. Variation de Ta et de Eg sur les versants Nord et Sud du Ksar de Ghardaïa du 19 au 24 février 05.	269
Fig. VIII- 4. Variation de Ta au-dessus des toits des versants Nord et Sud du ksar de Ghardaïa en fonction de la vitesse du vent (v).	270
Fig. VIII- 5. Zoom sur les journées du 22 et 23 février caractérisées par des conditions thermiques et aérauliques différentes au-dessus des toits des versants Nord et Sud.	270
Fig. VIII- 6. Variations de Ta au-dessus des toits des versants Nord et Sud en fonction des conditions du vent du 09 au 13 août 06.	271
Fig. VIII- 7. Variations de Ta au-dessus des toits des versants Nord et Sud en fonction des conditions du vent au cours des journées du 12 et 13 août 06.	272
Fig. VIII- 8. La comparaison des éclairagements énergétiques incidents au-dessus du toit et dans les rues des versants Nord et Sud du ksar de Ghardaïa, en hiver et en été.	273
Fig. VIII- 9. Variations des températures de l'air dans les rues des versants Nord et Sud en fonction des conditions de vent.	275
Fig. VIII- 10. Zoom sur une journée caractérisée par des conditions de vent fortement contrastées	275
Fig. VIII- 11. Conditions thermiques contrastées dans les rues des versants Nord et Sud en fonction des conditions du vent.	276
Fig. VIII- 12. Zoom sur le comportement thermique des rues situées sur l'adret et l'ubac selon les conditions du vent.	277
Fig. VIII- 13. Variation des températures de l'air (Ta) dans la rue du ksar de Tafilalt en fonction de la vitesse du vent et sa direction.	278
Fig. VIII- 14. Variation de la température de l'air maximale en fonction de la vitesse d'air moyenne et son origine dans la rue du ksar de Tafilalt.	279
Fig. VIII- 15. Variation de la température de l'air en fonction de la direction du vent dans la rue située sur le versant Sud du Ksar.	280
Fig. VIII- 16. Variation de la température de l'air en fonction de l'orientation des rues	281

Fig. VIII- 17. Variation de la température de l'air dans deux rues situées sur le versant Est et d'orientation respective NE-SO et NO-SE.	282
Fig. VIII- 18. Distribution horizontale de Ta à travers les rues du ksar de profil compris entre 0.11 et 5.5.	283
Fig. VIII- 19. Variation de Ta en fonction du profil H/W dans deux rues situées sur le versant Ouest du ksar de Ghardaïa.	284
Fig. VIII- 20. Évolution des températures de l'air et de surface à travers les rues du Ksar à 6h00, 15h00 et 24h00.	286
Fig. VIII- 21. Évolution des températures de surface d'hiver dans les rues situées sur les versants Nord et Sud.	288
Fig. VIII- 22. Variation des températures de sol (Tsol) en fonction de l'orientation des canyons : 26 juin 03.	289
Fig. VIII- 23. Variation des températures de surface Tmur et Tsol en fonction de l'orientation des rues : 12 février 04.	290
Fig. VIII- 24. Variation des températures de surface en fonction de la géométrie urbaine : 26 juin 03.	291
Fig. VIII- 25. Variation des températures de surface en fonction de la géométrie urbaine : 12 février 04.	292
Fig. VIII- 26. Variations des températures de surface du PC au cours du cycle journalier en été. ...	293
Fig. VIII- 27. Variations des températures de surface du PC au cours du cycle journalier en hiver	293
Fig. VIII- 28. Variation de Tmrt à travers les rues du ksar au cours du cycle journalier. 26 juin 03.	295
Fig. VIII- 29. Variation de Tmrt en fonction de l'orientation de la rue : 26 juin 03.	296
Fig. VIII- 30. Variation de Tmrt en fonction du profil de la rue : 26 juin 03.	297
Fig. VIII- 31. Variation de PET dans les rues du Ksar au cours du cycle journalier. 26 juin 03.	298
Fig. VIII- 32. Variation de PET en fonction de l'orientation de la rue canyon : 26 juin 03.	299
Fig. VIII- 33. Variation de PET en fonction du profil de la rue : 26 juin 03.	300
Fig. VIII- 34. Effet du vent sur les conditions de confort thermique.	301
Fig. IX- 1. Orientation de la trame urbaine de 45° par rapport aux vents indésirables de direction Sud et Ouest.	313
Fig. IX- 2. Configuration urbaine descendante en vue d'une protection contre les vents d'Ouest et du Sud.	314
Fig. IX- 3. Recommandations en vue d'une protection des vents et du rayonnement solaire, tout en assurant la ventilation des rues canyons.	317
Fig. IX- 4. Schéma représentatif d'une voie mécanique selon un axe NE-SO.	317

Liste des Tableaux

Tableau II- 1. Classification des formes urbaines distinctes, arrangées dans l'ordre décroissant de leur capacité à agir sur le vent local, la température et l'humidité.	17
Tableau II- 2. Les échelles climatiques et leur extension spatiale.....	18
Tableau II- 3. Valeurs d'albédo de différentes surfaces urbaines et naturelles.	23
Tableau II- 4. Causes de l'îlot de chaleur urbain dans la canopée urbaine.....	29
Tableau III- 1. Cinq catégories de rugosité en fonction de la couverture du sol.	48
Tableau III- 2. La hauteur géostrophique et la turbulence pour trois types de surface.....	48
Tableau III- 3. Principaux effets des bâtiments isolés ou associés sur les écoulements d'air.	51
Tableau III- 4. Exemples d'observations sur site du vent et de la turbulence dans les canyons urbains, classés par ordre de croissance du prospect H/W..	52
Tableau IV- 1. Facteurs environnementaux agissant sur le bilan thermique de l'homme.	117
Tableau IV- 2. Effets du vent sur la perception du confort thermique en fonction des conditions de températures d'air.	119
Tableau IV- 3. Les indices de confort thermique pour les environnements intérieurs et extérieurs.	121
Tableau VI- 1. Tempêtes de sable sur une période de 10 ans (1995-2004) à Ghardaïa..	151
Tableau VI- 2. Caractéristiques morphologiques du ksar de Ghardaïa.....	156
Tableau VI- 3. Caractéristiques des points de mesure sélectionnés lors des campagnes de mesure de juin 03 et février 04.....	166
Tableau VI- 4. Vues sur les points de mesure.....	168
Tableau VI- 5. Récapitulatif du protocole de mesure des campagnes basées sur la méthode des parcours urbains.	171
Tableau VI- 6. Conditions météorologiques de la 1 ^{ère} campagne de mesure en continu (19- 24 février 2005).	173
Tableau VI- 7. Conditions météorologiques de la 2 nd campagne de mesure en continu (06-13 septembre 2005).	174
Tableau VI- 8. Conditions météorologiques de la 3 ^{ème} campagne de mesure en continu (06-15 août 2006).	175
Tableau VI- 9. Capteurs utilisés avec la station de mesure Hobo 512 K.....	179
Tableau VI- 10. Caractéristiques de l'instrument de mesure Testo 445.....	181
Tableau VI- 11. Récapitulatif des différents capteurs utilisés lors des campagnes de mesure à Ghardaïa.	184
Tableau VI- 12. Récapitulatif des campagnes de mesure effectuées dans le cadre de l'étude. .	186

Tableau VII- 1. Corrélations entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans les rues du ksar en fonction de l'angle d'incidence β .	202
Tableau VII- 2. Caractéristiques géométriques des points de mesure situés dans le ksar de Tafilalt et le ksar de Ghardaïa (Pt.1).	204
Tableau VII- 3. Récapitulatif des corrélations entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue canyon longue (Pt.1), cas de vents forts à moyens, de direction Sud..	215
Tableau VII- 4. Récapitulatif des corrélations entre les vitesses d'air au-dessus du toit et dans la rue canyon courte le cas de vents forts à moyens.	234
Tableau VII- 5. Caractéristiques des écoulements d'air dans les rues canyons de longueur L différente.	236
Tableau VII- 6. Caractéristiques géométriques de la rue canyon asymétrique et du canyon de référence.	238
Tableau VII- 7. Récapitulatif des corrélations entre les écoulements au-dessus du toit et dans la rue asymétrique (Pt.3), cas de vents forts à moyens, de direction Ouest..	248
Tableau VII- 8. Corrélation entre les écoulements entrant et sortant du PC en fonction de la direction du vent ambiant par rapport à l'axe du PC.	256
Tableau VII- 9. Intensité des écoulements d'air dans les rues canyons en fonction de l'angle d'incidence du vent ambiant avec l'axe de la rue.	259

Liste des symboles et abréviations

Lettres latines.

a : albédo qui caractérise la part du rayonnement solaire réfléchi par une surface.

ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.

C.S.T.B: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

CBD : Central Business District.

CCU : couche de la canopée urbaine.

CFD : Computational Fluid Dynamics.

CLA : couche limite atmosphérique.

CLU : couche limite urbaine.

CU : canyon urbain.

D : diamètre du globe (= 0.15 m).

d_0 : hauteur de déplacement zéro (m).

DAPPLE : Dispersion of Air Pollution and its Penetration into the Local Environment.

dd : direction du vent (°).

D_x : espacement inter-élément (m).

E: Est

E_A : rayonnement atmosphérique propre qui s'effectue dans les grandes longueurs d'onde (infrarouge) (W/m^2).

E_{cd} : flux de chaleur par conduction (W/m^2).

E_{cv} : flux de chaleur par convection (W/m^2).

E_d : flux de chaleur par diffusion de vapeur à travers la peau (W/m^2).

E_G : rayonnement global correspondant à la somme des rayonnements direct et diffus incident en courte longueur d'onde (W/m^2).

E_g : rayonnement global horizontal (W/m^2).

E_{hr} = flux de chaleur latente due à la respiration (W/m^2).

E_{res} = flux de chaleur sèche due à la respiration (W/m^2).

E_{ry} : flux de chaleur par rayonnement (W/m^2).

E_{sw} : flux de chaleur due à la transpiration (W/m^2).

E_T : rayonnement terrestre qui correspond à l'émission par la surface, en grande longueur d'onde (domaine infrarouge) (W/m^2).

H : hauteur du canyon (m).

H/W : prospect du canyon.

HR : humidité relative (%).

ICU : îlot de chaleur urbain (°C).

j : densité du bâtiment.

JUT : Joint Urban 2003

k : constante de Von Karman ($k=0.4$).

L : longueur du canyon ou distance séparant deux intersections (m).

M : métabolisme (W/m^2).

MSG05: Madison Square Garden-2005.

N: nord.

O : ouest.

OKC : Oklahoma City.

ONM : Office National de Météorologie.

p : facteur de réduction du vent.

PC : passage couvert.

Q^* : rayonnement net qui correspond à l'énergie radiative absorbée par la surface (W/m^2).

Q_A : transfert advectif (W/m^2)

Q_{cd} : flux de chaleur gagné ou perdu par la surface par transfert conductif sur le sol ou les murs (W/m^2).

Q_{cv} : flux de chaleur échangé par convection à l'air environnant (W/m^2).

Q_{dif} : flux de chaleur absorbé par la surface en raison du rayonnement solaire diffus et réfléchi par les surfaces (W/m^2).

Q_{dir} : flux de chaleur absorbé par la surface en raison de l'incidence directe du rayonnement solaire (W/m^2).

Q_E : flux de chaleur latente (W/m^2).

Q_F : énergie anthropique (W/m^2).

Q_H : flux de chaleur sensible (W/m^2).

Q_{rl} : flux de chaleur échangé par rayonnement de grande longueur d'onde avec le reste des murs et des surfaces externes (W/m^2).

Q_s : flux de chaleur stocké dans le sol et les bâtiments (W/m^2).

R^2 : coefficient de détermination d'une équation.

S: sud

SLC : Salt Lake City.

SLV : Salt Lake Valley

T_a : température de l'air (°C).

T_g : température globe (°C).

T_{mrt} : température radiante moyenne (°C).

T_{mur} : température de surface des murs (°C).

T_r : température rurale ($^{\circ}\text{C}$).

T_s : température de surface ($^{\circ}\text{C}$).

T_{sol} : températures de surface du sol ($^{\circ}\text{C}$).

T_u : température au centre de la ville ($^{\circ}\text{C}$).

$u(z)$: vitesse moyenne locale (m/s).

U : vitesse d'air au-dessus du toit (m/s).

u^* : vitesse moyenne de frottement à la surface (m/s).

U_G : "vitesse du gradient", vitesse indépendante du site rencontré par le vent et où les rugosités n'ont plus d'influence (m/s).

URAER : Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables.

v : vitesse d'air horizontale le long du canyon (m/s).

VTMX : Vertical Transport and Mixing

W : largeur du canyon ou espacement entre deux bâtiments formant les parois du canyon (m).

W_e : vitesse de mixage et mesure l'échange turbulent entre la rue et la couche d'air au-dessus des bâtiments.

z_* : hauteur de la sous-couche de rugosité (m).

z_0 : paramètre de rugosité.

z_G : épaisseur de la couche limite atmosphérique (m).

z_H : hauteur moyenne des éléments de rugosité (bâtiments et arbres) (m).

$z_{\text{réf}}$ vitesse de vent à un niveau de référence (Généralement égal à 10 m).

Les indices de confort thermique.

ET : température effective.

HOP: température opérative humide.

ICT : indice de contrainte thermique.

ICTH : indice de contrainte thermique humain.

OP : température opérative.

PET : indice de température physiologique équivalente.

SET*: indice de température standard effective.

TBH : température de bulbe humide.

TR : température résultante.

WBGT : indice de température Globe de bulbe humide.

WCI : Indice de refroidissement du vent.

Lettres grecques.

α : l'exposant de la loi en puissance qui réfléchit les conditions de rugosité de la surface en amont de la ville.

β : angle d'incidence du vent au-dessus du toit avec l'axe de la rue

ε : émissivité (0.95)

θ : angle défini par la largeur de la rue W et la hauteur du bâtiment H (°).

λ_C : aspect ratio total (ratio de l'aire de surface 3-D totale par l'aire du plan totale).

λ_f : densité de l'aire frontale.

λ_F : ratio de l'aspect frontal ou index de la zone frontale.

λ_p : densité de l'aire plane.

λ_P : ratio de l'aire du plan des bâtiments.

$\Psi_{\text{ciel.}} \text{ (SVF)}$: facteur d'ouverture au ciel du milieu du sol d'un canyon qui correspond à la fraction de l'hémisphère occupée par le ciel.

ANNEXES

Thermal behaviour of compact urban fabric in hot and dry climate: case study of M'zab Valley. Experimental results.

S. Kitous; M. Djenane, N. Daoudi, A. Boussoulaim, R. Bensalem⁽¹⁾, L. Adolphe⁽²⁾

(1) EPAU, school of Architecture and Urban Design- BP N°2, El Harrach, Algiers, Algeria
Tel/fax : 21 52 58 89 Email : bensalem@wissal.dz

(2) EAT-GRECO, 83, Rue A. Maillol BP 1329 F- 31106 Toulouse cedex 1
Tél.: +33 (0)5 62 11 49 03 Fax : +33 (0)5 62 11 50 49 Email : luc.adolphe@free.fr

ABSTRACT: This ongoing research aims to explore and understand the principles of climatic adaptation which are underestimated nowadays in order to implement them on urban scale for better human comfort conditions in cities and energy conservation. The case study of this research is the agglomeration of Ghardaïa situated in M'zab valley in northern part of Algerian Sahara. This urban settlement presents indeed exceptional examples of climatic adaptation from its traditional cities "Ksour", yet, contrasting with the current urban expansion, which was designed with no respect to climatic aspect. In these desert regions, disregarding climate integration in urban planning can indeed cause irreversible damages to life conditions, where night cooling of cities depends entirely on conditions imposed by building morphology and pattern.

In order to apprehend the urban climate of this region measurement campaigns were set during the summer 2003 and winter 2004, exploring the urban climate of the valley and the different traditional and contemporary settlements, in a comprehensive approach, taking into account the influence of site, ground cover and urban morphology. The main results obtained so far showed the significant influence of the site topography, and ground covered. Moreover, the compact urban morphology was found to provide thermal homogeneity at the ksour scale.

Conference Topic: 3

Keywords: Traditional cities, urban climate, thermal comfort, desert region.

INTRODUCTION

The traditional cities are often mentioned as model of climatic adaptation, particularly in hot and dry climates. Recently, scientific studies were undertaken to establish the veracity of this belief. Most of the authors underlined the importance of the layout compactness often expressed in terms of aspect ratio of streets as the key factor of the sheltering effect of the urban fabric [1],[2],[3],[4],[5]. They mentioned the existence of two urban phenomena; the "heat" and "cool" island, in comparison with exposed site, which occurs respectively night and day and are the asset of the compact traditional urban morphology. The aspect ratio (H/W) of the streets was found to control air and surfaces temperature as well as wind movement[6].

However, the majority of these findings were deduced from restricted urban cases (a street, a place or a neighbourhood). The larger scales of the city site (meso or sub-meso scales) and the global configuration of the city were in most cases ignored, even though they are known to be of significant importance.

This research is a cooperation project between the laboratory « Architecture and Environment » of school of architecture and urban planning of Algiers, Algeria, and the laboratory GRECO of Architecture at Toulouse, France, in collaboration with the National Meteorological Center, ONM, Algiers.

The aim of this ongoing research is to study the urban climate of traditional and contemporary settlements in arid climate in a comprehensive approach, taking into account the influence of site, ground cover and urban morphology.

The agglomeration of Ghardaïa, in the M'zab valley, was taken as the case study. This region classified as world heritage by the Unesco is praised for his traditional habitat suited to the arid climate. At the same time, recent extensions completely unaware of the climatic context make this case study particularly interesting for a comparison purpose.

The results of this study should help future urban planning in these regions, (which development is gaining momentum), to take into account the aspects of climate for comfort and energy savings. Indeed, to draw the scheme of new urbanisation, it is necessary to gain scientific knowledge on climate control, which can be further translated into contemporary design. The mere imitation of traditional layouts, which are in many aspects obsolete, is senseless.

The results presented in this article are deduced from two series of measurements on-site; the first in June 2003 was exploratory and the second was set up in winter (February 2004). Further campaigns are planned for July and December 2004.

2. PRESENTATION OF THE M'ZAB VALLEY

The valley of M'zab is located at the septentrional limit of the Algerian Sahara, between 32° and 33°20' northern latitude and 2°30' longitude east at an average altitude of 500m. It is 20 km long and 2 km broad. The climate is hot and dry in summer, with a large temperatures swings, intense solar radiation, and strong winds. The winter is cold and moderately wet.

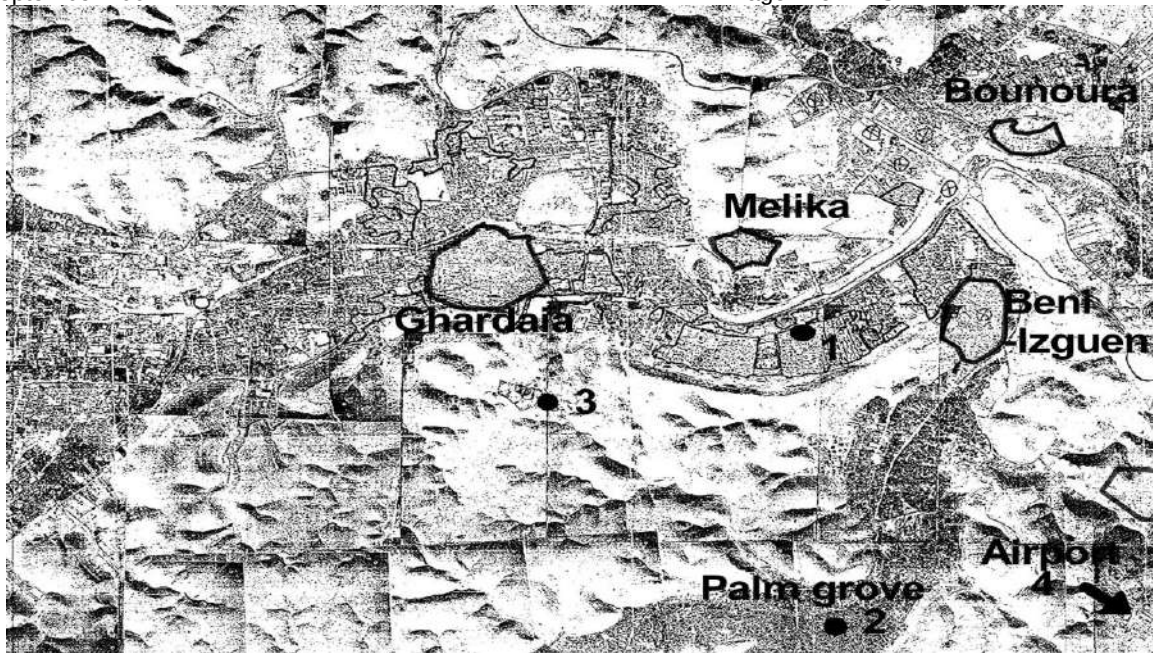


Figure 1: The M'zab valley, with the traditional ksour (Ghardaia, Melika, Bounoura, Beni-Izguen) and the reference sites for measurements. 1): the urban site of the valley, 2): the palm grove of Beni-Izguen, 3): the plateau of the valley, 4) the airport.

The foundation of the traditional cities of M'zab, named Ksour (single, Ksar, which means fortified city), goes up to the XIst century, when a persecuted tribe of Ibadiths (The Ibadhism is an Islamic doctrine) found refuge in this Valley[7]. The first city, El Atteuf, was built in 1012, and then came successively Bounoura (1046), Ghardaia (1053), Melika (1124) and Beni-Izguen (1347). The average distance between the cities is about 2 km, except for El-Atteuf, which is located apart, 6km from Bounoura (See figure 1). From a morphological point of view, the Ksour are characterised by a dense and compact layout, with the narrow and sinuous streets. Their profiles (the Height to Width ratio, H/W) vary generally between 2 and 6.5.

This original urban development through of multiplication of small autonomous cities (each one being linked to a palm grove) was a response to a fragile ecosystem that had to be preserved in this harsh region. The founders had to conserve the fertile lands at the bottom of the valley for the agriculture and built their cities on the rocky slopes or hills.

3. METHODOLOGY

Our research is based on in-site measurements. Three automatic weather stations were placed respectively on the plateau overhanging the valley, (out of the influence of the cities), in the centre of the urbanized part of the valley (on a prominent building roof), and in the palm grove of Beni-Izguen (on a old tower). These measurements were completed by those taken on the airport (at 20km of the valley) by the national meteorological center, ONM. Continuous measures were collected every hour. These data, used as reference to identify different

microclimates, were completed by instantaneous measurements in different urban configurations, using portable equipment. The data were collected along an urban path covering a broad range of representative urban typologies. In this purpose, sites of studies were selected through the entire valley according to criteria related to urban morphology, form of the slopes and their orientation, type of cover on the ground (vegetal or mineral).

3.1 Choice of sites and urban paths

The selected sites are the ksour of Beni-Izguen and Ghardaia, the new ksar of Thafilalt and the palm grove of Beni-Izguen (see figure 1). The Ksar of Beni-Izguen is built on an East slope. The streets have wide range of profiles from 3.5 to 6.5.

The Ksar of Ghardaia is built on a hill; its layout is radio-concentric and presents diversity in street orientations. The ksar of Thafilalt constitutes a case of a new participative habitat (of which climatic dimension was not taken into account by the designers). Its layout is more regular and conceived

by considering the vehicle traffic. Lastly, the palm grove of Beni-Izguen is characterized by a dense vegetable cover and the existence of water basins. The selected districts are primarily pedestrians' spaces and free of anthropogenic heat gain (motorized circulation or air conditioning units). The generated urban microclimates depend mainly on the urban geometry, of building materials and of the topoclimatic characteristics. In each site, points of measurements were selected along an urban path according to aspects of the districts slope orientation, street orientation, ratio H/W, as well as the position periphery/centre of the points.

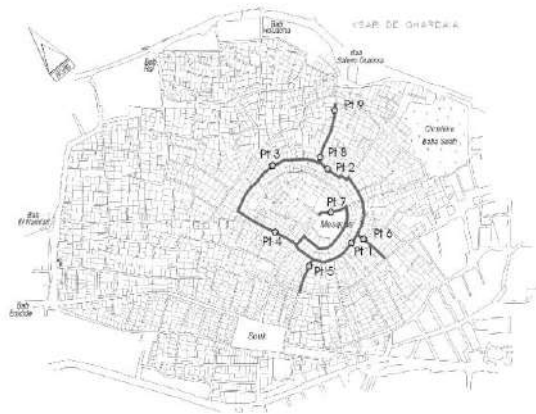


Figure 2: The urban path in the ksar of Ghardaïa.

3.2 Measurement procedure

The series of measurements were carried out during two periods of the year characteristic of the extreme conditions of comfort: hot period (July-August), cold period (January-February). The first campaign was set from 24 to 26 June 2003; the second was done during three uninterrupted days, from 11 to 13 February 2004. The two campaigns coincided with anticyclonic periods, with clear sky in most cases. The measures were gathered every three hours. The average duration measurement for each path was less than 80 minutes. The data acquisition for each point required an average of 5 minutes for the value of the instruments to stabilise.

The instruments used were multi measure portable devices (type TESTO 445 with thermohygrometer and wind speed sensors). The wind speed was measured either with sensitive vane anemometer (i.e. 0.2m/s threshold) or hot wire anemometer. The wind direction was sensed using incense. The air temperature sensors were protected from direct solar radiation by a ventilated shelter.

3.3 Measured climatic data

Measured climatic data were:

- The wind speed and direction (horizontal component).
- The relative humidity
- The air temperature (taken in the shade)
- The globe temperature
- The surface temperatures of the walls and ground

The wind speed and air temperature measures were taken in the middle of the street width at 1.30 m high.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 The local climate of the valley

The data collected by the automatic stations during winter time enabled to appreciate the local microclimate of the valley. (Unfortunately, all these data were not recorded during summertime and will not be discussed). From the superposition of the temperature curves for the three sites of reference, no clear evidence of the valley effect was recorded in the urban site.

Indeed, the air temperature monitored during several daily cycles showed close values between the plateaux and the urban site in the valley, varying from 8°C to 19°C. These findings can be justified by the fact that this measuring point was located in the shallowest part of the valley. On the other hand, in the site of the palm grove, situated in a deeper part of the valley, significant cooling effect was

observed during the night. The air temperatures decreased steeply from sunset, to reach, at 6 a.m., 5°C lower than the urban site, and under clear sky conditions (they were as low as 2.5°C). Yet, the differences were less pronounced under partly covered sky conditions, where the differences did not exceed 2°C.

This phenomenon can be explained by the drainage of cold air produced on the plateau that accumulates in the bottom of the valley. This is probably less effective in the urban area where constructions can hamper the flow. This hypothesis has to be further explored however.

The highest diurnal amplitude of air temperature was recorded in the palm grove, with values close to 18°C both in winter and summer. This can be explained by the small thermal inertia of the plants, the intense evaporate-perspiration which accelerates the process of night cooling and the katabatic cooling.

This swing offers very contrasted thermal ambiances, not very favourable for comfort.

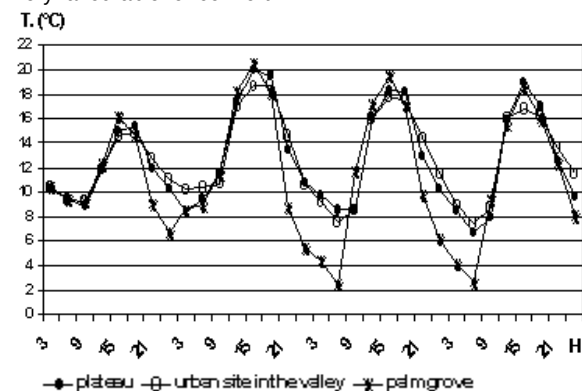


Figure 3: Air temperature monitored by automatic weather station (used as reference). 11 to 14 February 2004.

4.2 Microclimates of the ksour (average air temperature).

In winter, the mean air temperatures measured in the traditional ksour were significantly higher during the night (12.5°C to 13°C) when compared to the exposed site of the airport on the plateau (10°C). On the opposite, they were lower during midday; particularly for Ghardaïa where the difference was close to 1.5°C – 2°C. (The East exposure of Beni Izguen can explain the reduced effect for this case). These “heat” and cool island effects corroborate other research findings (J.F. Coronel, S.Alvarez, 2001; E.Johansson and al, 2001; D.Pearlmutter, 1998).

The strong thermal inertia of the compact structure and the low of radiative cooling rates (owing to the reduced sky view angle of the streets) explain this thermal lag as well as lower thermal swing. In the case of the new settlement of “Thafilalt” with less compact urban fabric, and situated in higher altitude, the thermal behaviour was in between that of the plateau and the traditional ksour.

These results should however be moderate when compared with the reference station on the urban site of the valley, particularly for the cool effect.

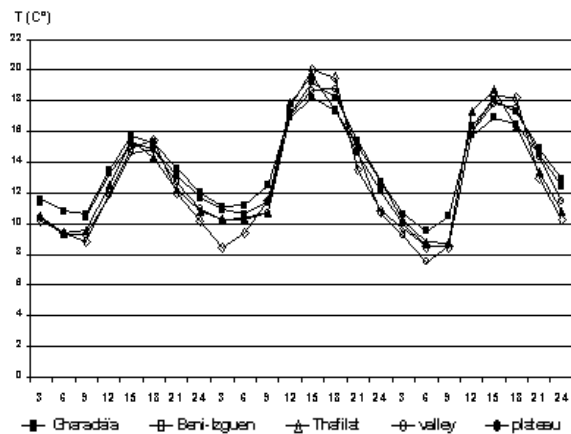


Figure 4 : The average air temperature in the different sites of studies. 11-13 February 2004.

4.3 Effects of terrain slopes and streets orientation.

4.3.1 Air temperature:

In summer, the orientation of the terrain slopes and the streets were found to have negligible effect on the air temperature, owing to the high altitude of the sun under this latitude (which strikes all the surfaces all the streets whatever their orientation). In winter, on the other hand, the orientation of the slopes has significant effect on air temperature. The streets located in the south facing slope exposed to the sun, the adret, were found to be in average 2.5°C higher than those located in the ubac (i.e. the north facing slope).

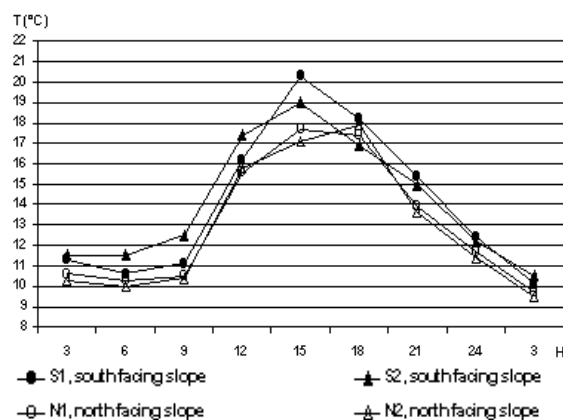


Figure 5 : The temperature variation of streets Ubac and Adret during the daily cycle. 12 February 2004.

On the contrary, the air temperature seemed not to be influenced by the street orientation. Indeed, the temperature recorded for streets oriented N-S, E-W or intermediate were almost the same, provided they had the same profile and located in the same slope of the hill. From these results, it appears that the natural topography of the site have a major influence on air temperature during wintertime, in opposition with the street orientation. During summertime, however, both site slope and street orientation have negligible effects.

4.3.2. Surface temperature:

During summertime, the temperature of the walls followed closely the air temperature (on average, they fluctuated between 30°C and 38.5 °C). Because of the high sun

altitude, the main heat gain of these surfaces was mostly from diffuse and reflected radiation. In these conditions, the ground was the most exposed surface and significantly higher surface temperature were recorded, i.e. about 14°C higher than vertical surfaces at noon or 3 p.m., (i.e. as high as 53°C).

Contrary, in winter, the majority of the streets were in shade. The temperatures were then practically identical on both façades and the ground of the same street (the difference never exceed 2°C). Nevertheless, there was a difference in the values recorded on different streets. In the streets of the adret, the walls temperatures were 2°C-3°C higher than those of the ubac and varied between 13.5°C and 16.5°C. Furthermore, in the north facing slope, the surface temperatures were 4°C lower than the air temperature (about 3 p.m.). This show that the slope orientation is important for both air and surface temperatures during winter.

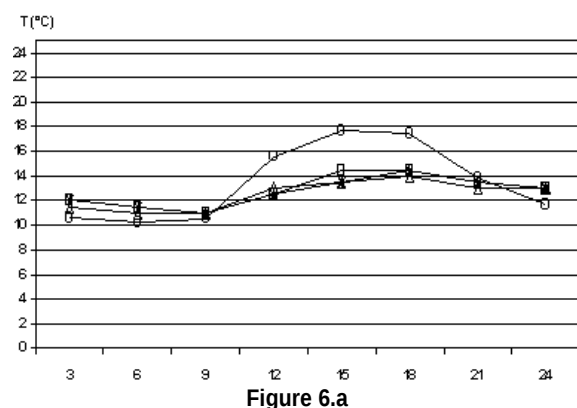


Figure 6.a

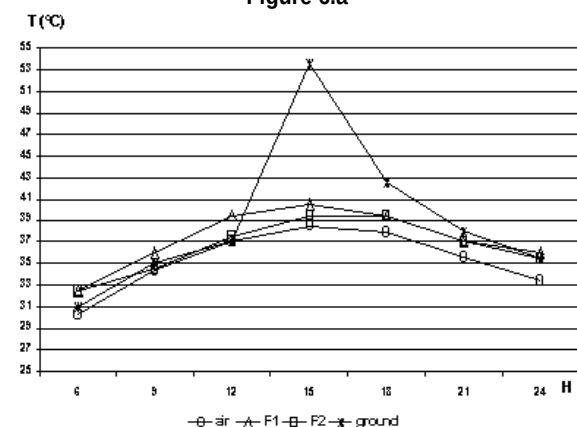


Figure 6.b.

Figures 6: The air and surface temperatures of north facing slope street in both summer and winter: a). 12 February 2004; b). 26 June 2003.

4.4 Effects of the streets geometry.

Although a large sample of street profiles (i.e. ratio H/W) were monitored, the variation on the air temperature was found to be small, both in winter and summer. Indeed, with streets located in the same slope, the difference recorded in the air temperature was at most 0.6°C for profiles varying between 3.8 and 6.2. Although, differences in surface temperatures were monitored (the lowest values in the deepest canyons). The thermal inertia of the ksours induced very slow rises and decreases of air temperature during a daily cycle.

The urban squares (with ratio $H/W = 0.34$ Beni-Izguen) behaved like larger exposed sites. The air temperature was found to fluctuate between 9.5°C and 20.5°C, which were closed to the airport values (8.5°C – 20°C). The diurnal average amplitude was about 11°C.

4.5 Effects of covered streets

In summertime, the covered streets recorded the lowest air temperature during the hottest hours of the day: 2.5°C to 3°C less were observed between this type of urban morphology and other streets of the Ksour. The horizontal and vertical surface temperatures were practically the same and varied between 30°C and 33.5°C.

4.6 Effect of points' position (Center/periphery)

The measuring points located in the periphery were compared with those situated in the center of the Ksour. The results showed that the nocturnal cooling rate was more important for the peripheral points than for the central ones at sunset. The difference between them was significant, in average of 1.0°C in summer (at 0.00. a.m). This was particularly marked for peripheral point facing the palm grove, where 1.8°C of difference was observed in winter, under clear sky conditions (case of Beni-Izguen). Though these results need to be further investigated, they point out in one part the fact that palm grove may play a significant role in urban nocturnal cooling and in the other the hypothesis of limited urban size for better cooling

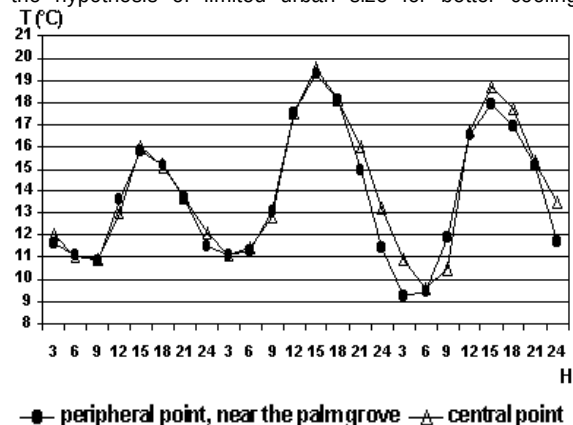


Figure 7: The comparison of rate nocturnal cooling between central and peripheral points.

Conclusion

The thermal behaviour of the Ksour is a function of the seasons, the terrain topography of establishment and its orientation, and the geometry of the streets. In summer, owing the compactness of the traditional fabric, the Ksour are characterized by a thermal homogeneity, independently of the various factors cited above. In winter, on the other hand, the mode of distribution of the temperatures is a function of the orientation of the slopes.

In winter, the ksour maintain higher temperature than the exposed sites of the plateaux and the palm grove. However, in summer, this type of urban configurations does not offer the best climate conditions for the well being of the inhabitants.

Indeed, climate control by adjusting the profile has limited effect. During summertime, they are not sufficient to reduce the heat. During the hottest hours of the day, only the covered streets manage to reduce the thermal stress to a significant value. The only refuges for the inhabitants are the underground rooms of their traditional houses.

The palm grove can be offering a comfortable climate during the summer nights. But in winter, it can be very uncomfortable for the inhabitants.

FUTURE STUDIES

Further investigations are planned to study the katabatic cooling in the valley (wind blowing down-slope at night due to cold air drainage) and the effect of the palm grove on nocturnal airflow.

ACKNOWLEDGEMENT

Great appreciation to the local associations of Beni-Izguen and local authorities to their help.

References

- [1] D.Pearlmutter. - Street canyon geometry and microclimate: Designing for urban comfort under arid conditions. In *Environmentally Friendly Cities*, Proceedings of PLEA'98, James & James Science Publishers Ltd, Lisbon, Portugal, June (1998), pp163-166.
- [2] A.Bennadji, J.L. Izard, M.Cote. - Adaptation micro climatique dans les zones arides. In *Actes, EPIC'98. 2ème Conférence Européenne Performance énergétique et qualité des ambiances dans le bâtiment et 3ème Conférence Internationale sur la qualité de l'air intérieur, ventilation et économies d'énergie dans les bâtiments*. G.GUARRACINO, Lyon, novembre (1998). pp.685-690.
- [3] J.F. Coronel, S.Alvarez. - Experimental work and analysis of confined urban spaces. In *Solar Energy*. Vol.70, n°3, (2001), pp.263-273.
- [4] E.Johansson and al. - Street canyon microclimate in traditional and modern neighbourhoods in a hot dry climate- A case study in Fez, Morocco. In *The 18th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Florianopolis, Brazil, 7-9 November (2001), pp.661-665.
- [5] F. Bourbia, H.B. Awbi. - Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate. Part 1: Air and surface temperature measurements. In *Renewable Energy* 29 (2004). PP. 249-262.
- [6] T.R.Oke. Street design and canopy layer climate. In *Energy and Buildings*. N°11, (1988), pp.103-113.
- [7] B.Benyousef. - L'approche de l'espace socio-urbain. Problématique, tradition et modernité. Thèse de doctorat d'Etat. EPAU, Alger, (1999), 410p.

Airflow patterns in traditional desert cities:

Case study of Ghardaïa in M'zab valley.

S. Kitous¹, R. Bensalem¹, L. Adolphe²

(1) EPAU, school of Architecture and Urban Design- BP N°2, El Harrach, Algiers, Algeria

Tel/fax : 21 52 58 89 Email : bensalem@wissal.dz

Samia_kitous@yahoo.fr

(2) EAT-GRECO, 83, Rue A. Maillol BP 1329 F- 31106 Toulouse cedex 1

Tél. +33 (0)5 62 11 49 03 Fax : +33 (0)5 62 11 50 49 Email : luc.adolphe@free.fr

ABSTRACT: This study presents an analysis of natural airflow patterns and driving forces in a traditional city of the Algerian desert based on site measurements. In these hot and dry regions, natural ventilation is of primarily importance for air cooling and intervenes in the thermal balance of urban spaces. However, few field studies investigated this research field, particularly at a scale of a whole city. In this research, the airflow patterns and driven forces are investigated in the city of Ghardaïa, in M'zab valley in northern part of Algerian Sahara.

Built on a rocky hill surrounded by a palm grove and recent urban extensions, the traditional city of Ghardaïa is characterised by circular street pattern of different aspect ratios and altitude. This original morphology is of particular interest for studying the influential parameters of urban wind flow.

Measurement campaign was set during winter 2005 at both roofs and streets levels in order to comprehend the airflow pattern in the whole ksar. It was taken into account the influence of topography, streets orientation and global urban geometry. The main results obtained show indeed significant air movement in the traditional "Ksar". The site form, the street orientation and the particular urban morphology can explain these findings.

Conference Topic: 2 Design strategies and tools

Keywords: topography effects, traditional cities, urban airflow, hot and dry climate.

[

INTRODUCTION

The knowledge of airflow field within urban environment is necessary in order to evaluate their effects on urban thermal ambient. The urban airflows influence strongly the spatial patterns of temperature at the scale of urban spaces [1], [2] and affect the well-being of citizens.

Due to the inherent difficulties of field experiments within urban spaces, most of knowledge result either from numerical studies or wind tunnels simulations. They were restricted to airflows analysis at scale of street "canyon", considered as the basis geometrical unity of urban structure [3].

Only a few number of these research works were validated by on site measurements and studies at scale of neighbourhood or urban fragment appeared rare. Furthermore, effects of topography remained not investigated and field studies have been essentially performed on flat sites.

Most of the research works have considered "ideal" symmetrical profiles of streets canyon and ignored the aerodynamic effects of asymmetrical profiles. They supposed the airflow at mid-canyon two-dimensional and neglected the induced channelling effect at the canyon ends. These latter played however an important role in the airflow distribution and must be included in any description of air circulation within streets [2], [4].

Paralleling to these studies carrying out on the relation between urban geometry and airflows, new researches, leaded by numerical simulation, are interested today on

influence of thermal forces on airflow patterns within street canyon [5]. Most of these research works, restricted at scale of street section, considered the buoyancy flow at mid-canyon two-dimensional and ignored the effect of horizontal thermal gradient within the same street or from one street to another within the same neighbourhood.

These phenomena of "very located" thermal breezes, favoured by the streets channelling, were however described by ESCOURROU [6]. In a field study, EMMANUEL ROSIER and XAVIER BERGER [7] were interested in such phenomena, nevertheless, the study results did not found any partial breezes.

It is evident that knowledge of airflows phenomena within real urban fabric is quite known.

The work presented in this article is part of wider research which is interested in urban climate of traditional and contemporary settlements in arid zone. The case study is the agglomeration of Ghardaïa, in the M'zab valley in northern part of Algerian Sahara [8]. In this part of study, the natural airflow patterns and driving forces will be investigated within the traditional urban fabric of Ghardaïa, called "ksar". Built on a rocky hill, surrounded by a palm grove and recent urban extensions, the traditional city of Ghardaïa is characterised by circular street pattern of different aspect ratios and altitude. From different orientations, the ksar presents diversity in the altitude and the streets profiles vary between 1.5 and 6.

The results presented in this article are derived from on site measurements carried out during winter 2005.

Another campaign of measurements is planned for July 2005.

2. PRESENTATION OF CASE STUDY

2.1 Characteristics of M'zab valley

The valley of M'zab is located at the septentrional limit of the Algerian Sahara, between 32° and 33°20' northern latitude and 2°30' longitude east at an average altitude of 500m. It is 20 km long and 2 km broad. The climate is hot and dry in summer, with a large temperatures swings, intense solar radiation, and strong winds. The winter is cold and moderately wet. Prevailing winds, of average value of 4m/s, are North-West direction in winter, Northeast in summer. They are strong, cold and relatively wet in winter, hot and dry in summer. The violent winds blow in spring or in the beginning of summer (March, April, may and June) (ONM).

2.2 Morphological characteristics of Ghardaïa ksar.

The ksar of Ghardaïa stands on a rocky peak. His surface is about 21 hectares. It is characterised by compact structure, strongly influenced by the site configuration. His layout is presented in the shape of egg, oriented northwest southeast (facing the Mecca). On the layout centre, highest point of the hillock is built the oriented southeast mosque. This latter constitutes the generator element of the city. It occupies a whole islet surrounded by a high wall. The minaret, of pyramidal shape, stands of 20 metres. By his scale and his exposed southern facade, the mosque constitutes the dominant element within the urban set. From the mosque and around it, were terraced the houses in stairs.

Two concentric streets surround this central part. Perpendicular streets that go towards to the rock bottom cut them. In the bottom and flat part of the city, the layout is more regular and serrated. The streets are narrow, of multiple orientations, partially covered, continually deviated and finished by blind alley. The streets widths vary between 1 to 3 metres. The houses alignment is respected and it is not allowed to facades to go beyond the height of 7 metres. The regulation height is dictated by a sunlight preoccupation: any house should not impede solar access to neighbouring dwellings.

In summer, the streets appear bad protected of solar radiation [8] mainly that the covered passages are not numerous. The streets are just crossing ways; the life withdraws within the houses courtyards. These latter, of cubic shape, are organised around central courtyard concentrating the ventilation and lighting of the house. They are provided with accessible and communicating terraces that contribute to give to the constructions set this regular and terraced aspect. The façades are blind, painted with light colour.

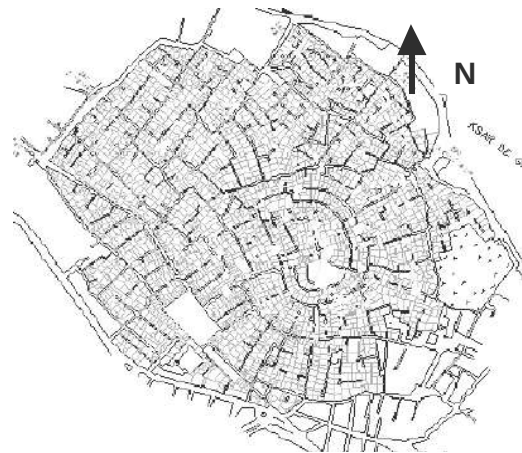


Figure 1: Plan of ghardaïa showing the irregular and compact layout of urban fabric of ksar.



Figure 2: view on the south slope of the ksar, showing the morphological breaking created by the mosque.

The topographical and morphological characteristics described above are of particular interest for studying the influential parameters of urban wind flow, that means:

- Existence of upwind and downwind slopes.
- Influence of streets geometry on the airflow regimes.
- Possibility to investigate aerodynamic phenomena linked to morphological characteristics of the mosque building.
- Possibility of horizontal airflow in winter linked to the horizontal thermal gradient between streets situated on the north and south slopes of ksar [8].
- Possibility of horizontal airflow in summer linked to the horizontal thermal gradient between the covered and exposed streets [8].

3. RESEARCH METHODOLOGY.

3.1 Instrumentation

Our research is based on in-site measurements. Continuous measures were collected over the whole ksar at both roofs and streets levels through HOBO automatic micro stations (i.e. 0.5 m/s threshold). The terrace station was placed at a distance of 2 m from the roof level, on high and open space. Within the street, measurement sensors were mounted in the middle of the canyon, at 4 m from the ground level.

The continuous data were completed by instantaneous measurements within the streets using portable instruments (type TESTO 445 with thermo hygrometer and wind speed sensors: sensitive vane anemometer (i.e. 0.2m/s threshold) or hot wire anemometer), according the urban paths method.

Two reference automatic weather stations (Miria, Cimmel) were placed respectively on the plateau overhanging the valley (out of the influence of the cities) and in the centre of the urbanized part of the valley (on a prominent building roof).

3.2 Choice of measurements points:

Measurements protocol was performed within the ksar according to criteria related to slopes and streets orientation, aspect ratio H/W, altitude as well as the position periphery/centre of the points. Two types of streets were selected:

- a concentric street, encircling the highest part of the hill (mosque), characterised by a part facing wind and another under shelter,
- Four radials of different orientations, converging towards the concentric street, exposed or under shelter of winds.

The brow of the hill, highest point of the ksar has not been integrated in the protocol owing to logistics problems. Eight measurements points were thus selected through the ksar. The streets profiles vary between 1.5 and 3.

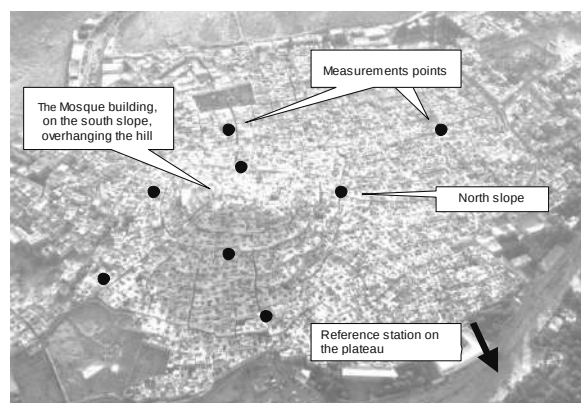


Figure 4: Aerial view of Ghardaïa, showing the measurements protocol.

3.3 Measurements proceeding:

The measurement campaign was performed during consecutive five days, from 19 to 24 February 2005. The measures were collected on mean minute value. The continuous measured climatic data were horizontal wind speed and his direction, air temperature, solar radiation collected only on the southern and northern measurements points.

The paralleling monitored instantaneous measures were gathered every three hours. The average measurements duration for each path was less than 60 minutes. The data acquisition for each point required an average of 8 minutes for the value of the instruments to stabilise.



Figure 5: HOBO micro station placed on the terrace

Figure 6: HOBO micro station mounted within street

The measured climatic data were air temperature at 1.30 m of ground level and surface temperatures within the street and above the roof.

4. RESULTS AND DISCUSSION:

4.1 Reference conditions :

The mean climatic conditions were relatively steady, characterised by anticyclonic period, with clear sky. The daily mean temperatures vary between 10.5°C et 12.80°C with maximal values between 14°C and 19°C according to the synoptic wind conditions as we will see it.

The wind conditions were characterised by two distinct periods: the former, spreading over four days (19-22 February), was marked by steady high winds conditions, of mean speed 2.7 m/s and maximal value 9 m/s; of western prevailing direction. The western slope of the ksar was consequently exposed to wind while the east slope occurred under shelter. The latter period, between 23 and 24 February, was characterised by weak and fluctuant winds, of East-southern prevailing direction, of average speed 0.33 m/s and did not exceed the maximal value 1.5 m/s. Thus, the western slope was upwind while the northern slope was downwind.

The mean weak winds conditions allow us to show up eventual thermal breezes as it is described in the literature.

4.2 Airflows analysis within the Ksar under High winds conditions

4.2.1 General characteristics

Above the roofs: the wind speeds comparison above the roofs shows an upwind slope characterised by the highest wind speeds and a downwind slope recording the lowest wind speeds. Indeed, for a reference wind of mean speed of 3 m/s, the average speed above the upwind roofs was 3 m/s while that observed on the downwind slope did not exceed 1.5 m/s.

When the recorded reference wind speed closed to 9 m/s, the maximal velocities observed on the upwind slope varied between 9.5 m/s et 7.5 m/s and were 6 m/s at downwind slope level.

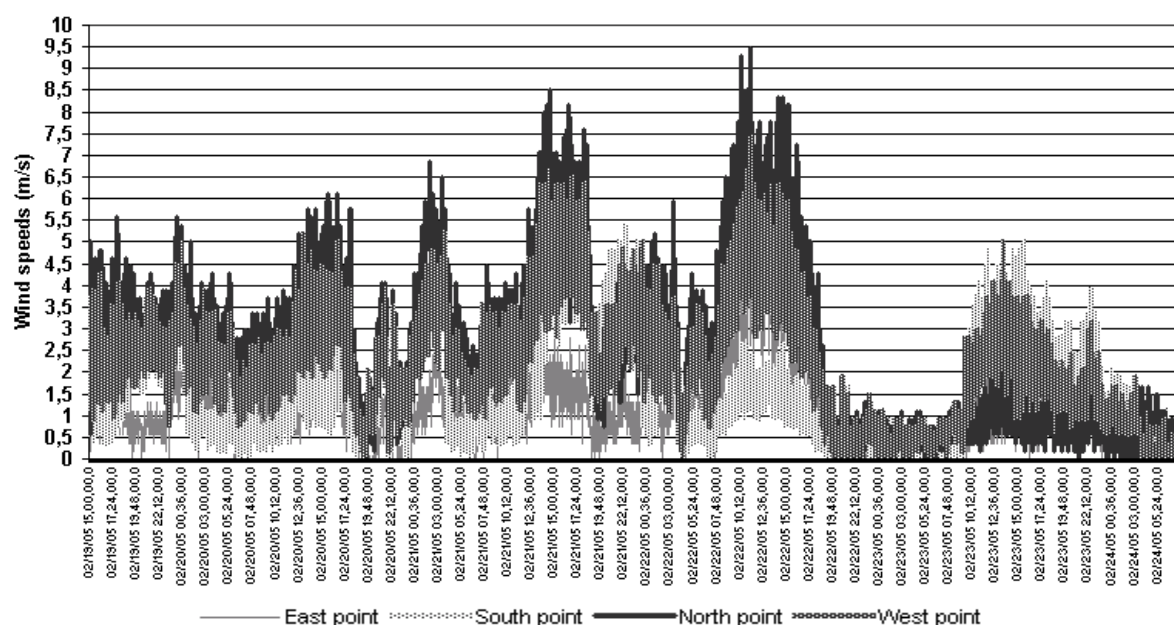


Figure 7: Comparison of wind speeds above the roofs (19 – 24 February 2005)

The comparison of wind directions shows an upwind slope characterised by directions in the same way that those of reference wind. On the other hand, the downwind points were characterised by strong fluctuations and wind directions opposed to those of reference wind.

The airflow characteristics described above agree with those of airflow around hill, characterised by a steep slope [9]. The site topography seems to dictate the overall flow of ksar. A more exhaustive analysis of airflow allows us to show however that the site configuration is not alone to model the general airflow of ksar: The particular mosque morphology seems to make complex the airflows. Thus, according to the incidence angle of synoptic wind with the mosque building (which is situated above southern measurements point), it was established on the southern slope either a recirculation zone or a wind "acceleration" zone. The former is characterised by fluctuating wind directions and weak wind speeds, while steady wind directions mark the latter, in the same way of ambient wind, and high wind speeds. These wind velocities were nevertheless lower to those observed on the downwind slope (East slope) and the wind acceleration zone (North Slope). However, they will have been both higher to those monitored on the upwind slope and similar of those collected on the North Slope, which is wind acceleration zone too. Under high wind conditions (reference wind speed: 5-8 m/s), 2 m/s of differences were gathered between the two north and south slopes of ksar. These differences can result of mosque aerodynamic effects.

Within the streets: in spite of the compactness of vernacular fabric, winds penetrate within the traditional city and reproduce the same airflow characteristics that those observed above urban canopy, that means:

- Upwind streets, with mean wind speeds of 0.8 m/s and maximal values of 3.5 m/s.
- Acceleration zone streets, of different flows behaviours owing the aerodynamic effect of the mosque building: in the north slope street, called "coolness street", were recorded the highest air velocities of ksar which reached the maximal value of 5 m/s (mean of 1.2 m/s). Nevertheless, the south slope street, of same orientation and of similar asymmetrical profile ($H/L = 3$), did not exceed 2 m/s of wind velocities.
- Downwind streets, characterised by the lowest air speeds of ksar : 0.40 m/s – 0.45 m/s in mean

It stands out of the analysis that yet within compact fabrics, the air speeds can be high and constitute discomfort factor for inhabitants, particularly in winter.

4.2.2 Relations between airflows above the roofs and within streets.

For this part of analysis, we shall be interested in the upwind slopes streets, characterised by steady airflows.

In the case of parallel winds, the observed airflow within streets was characterised by a direction in the same way that the ambient wind above the roof. For oblique winds to street axis, the airflow undergo an elongation movement [9] and is directed in the same way that the incident wind. For perpendicular winds, a normal direction, in the same way that ambient speed was observed.

4.2.2.1 Case of North Slope Street (winds acceleration zone):

The "coolness street" is oriented East-West (80°), characterised by an asymmetrical profile ($H/L = 3$).

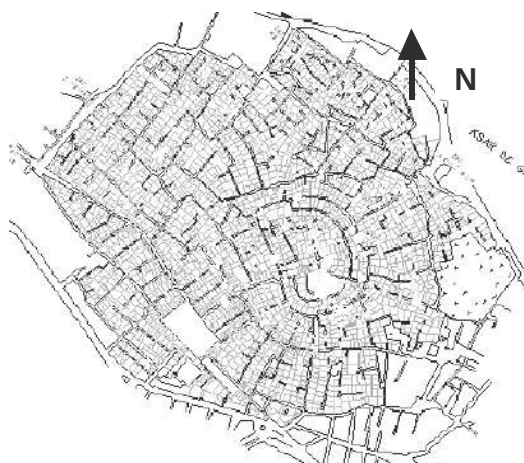


Figure 8.a: Wind distribution within the ksar: steady flow in the south slope.

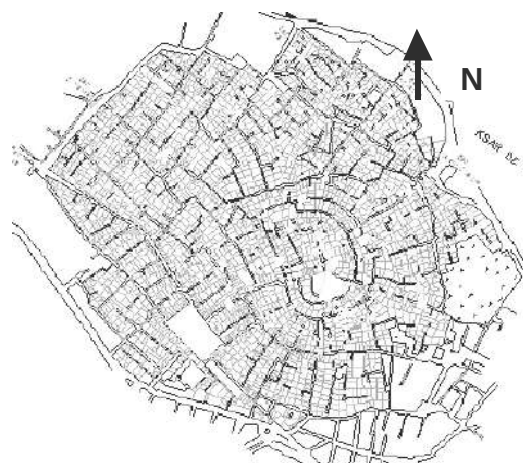


Figure 8.b: Wind distribution within the ksar: recirculation zone in the south slope.

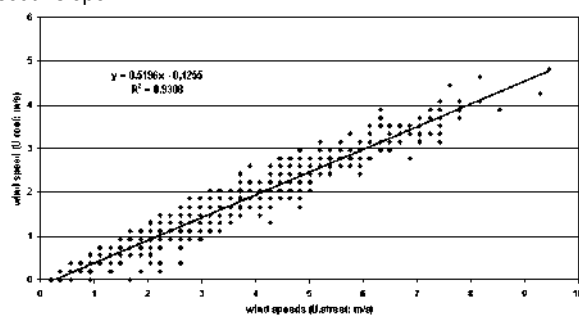


Figure 10: Relation between wind speeds above the roof and within coolness street (north slope street): case of parallel winds

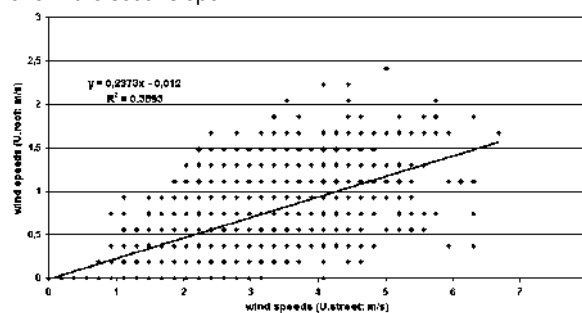


Figure 11: Relation between wind speeds above the roof and within upwind street (west slope street): case of oblique winds

For mean free winds of 2.5 m/s, with maximal values of 9 m/s, the comparison of two air speeds above the roof and within the street revealed a strong relation between the upper and secondary flows. The relation was of linear type and varied according to the incidence angle of ambient wind with street axis. Thus:

$$\begin{aligned} u_{\text{street}} &= 0.52 U_{\text{roof}} - 0.12, \text{ for an angle of } 0^\circ (\pm 10^\circ). \\ u_{\text{street}} &= 0.46 U_{\text{roof}} - 0.09, \text{ for an angle of } 22^\circ (\pm 10^\circ). \\ u_{\text{street}} &= 0.39 U_{\text{roof}} - 0.22, \text{ for an angle of } 44^\circ (\pm 10^\circ). \\ u_{\text{street}} &= 0.28 U_{\text{roof}} - 0.25, \text{ for an angle of } 68^\circ (\pm 10^\circ). \end{aligned}$$

As it was expected, the highest air speeds were observed within the street for wind directions near the parallel direction. Thus, the wind speed was reduced to 50% of free flow for parallel directions (0° - 20°), to 40% for oblique directions of 45° , and to 28% for oblique directions of 70° . A relation between "velocity ratio" or "diminution factor" (as it is respectively called by OKE and PEARLMUTTER) and incidence angle of ambient wind has been determined. The obtained equation is expressed such as:

$$P = -0.0034 \cdot \alpha + 0.5288$$

Where P: velocity ratio

α : Ambient wind direction (degrees).

These results were agreed with those obtained by PEARLMUTTER [10] in the field study of symmetrical canyon of aspect ratio close to unity, with placed sensor at 1.50 m at the ground level. The factor diminution obtained

by PEARLMUTTER was close to our results. It is written such as:

$$Y = -0.0038x + 0.66 \pm 0.10.$$

4.2.2.2 Case of western slope street: (upwind slope).

The street is oriented North East-South West (55°) and characterised by symmetrical profile ($H/L = 3$). For perpendicular and oblique wind directions, the air speeds comparison above the canyon and within the street shows considerable scatter independently of the wind speeds. Similar results are reported by SANTAMOURIS and al. [2] in a deep canyon ($H/L = 2.5$) at Athens. This is nevertheless in contradiction with previous studies, which have proved that for ambient wind speeds above a threshold value, the coupling between the upper and secondary flows is established. Lack of relation between the two flows can be explained by the fact that the airflow within street does not only result from ambient wind above the roof but can also be influenced by:

- Aerodynamic effect of the mosque: the building façade fronts the western slope.
- The end effects resulting of the layout geometry: a radial characterised by high air speeds (maximal speeds: 2.5 m/s) converges towards this street.
- The airflow issued from the south slope street, the two streets forming part of the circular street.

4.3 Airflows analysis within the Ksar under weak winds conditions

The airflow characteristics above the roofs and within streets were similar to those observed within the strong winds, the general airflow of ksar derived from site topography on the one hand and aerodynamic effects induced by the mosque morphology on the other. The observed average velocities on the upwind slope were 1.32 m/s above roofs and 0.30 m/s within streets. At the downwind slope, the mean velocities did not exceed 0.60 m/s above the roofs and were 0.16 m/s within the streets.

The relation between the wind speeds above the roof and within the street shows a considerable scatter, particularly for the oblique and perpendicular winds. This is agree with other results (NAKAMURA and OKE [1], SANTAMOURIS and *al.* [2] who reported that below a threshold value, the coupling between upper and secondary flows is lost.

4.4 "Very located" thermal breezes.

The airflows observation within the circular street under weak winds conditions does not allow seeing any induced horizontal flow by thermal gradient between the north and south slopes. Indeed, during the hottest hours of the day, where 1.5°C of temperature differences were observed between north and south slopes [8], the airflow within circular street is characterised by weak velocities and directions in the same way of ambient wind above the roofs. This can be explained by the value of temperature differences, which may not be enough to induce a horizontal airflow. However, this result need to be further investigated.

4.5 Implications of wind conditions on thermal ambient of ksar:

Wind strongly influences the air temperatures regimes. It either can emphasize or reduced the air temperature differences between slopes. Thus, above roofs, for the same solar radiation values (700 – 720 w/m²), 2.5°C of temperature differences were observed between the upwind and downwind slopes under strong wind conditions. The coolest air temperatures (13°C) were monitored obviously on the north upwind slope characterised by the highest wind velocities (5 m/s). On the other hand, for weak wind speeds, air temperatures were very similar at different slopes level and resulted only from solar radiation.

Within streets, the air temperature differences observed between the north and south slopes (KITOUS and *al.*) varied according to the ambient wind speed: they were reduced under strong winds conditions (1°C) while they were slightly higher for weak winds (1.5°C).

Within the same street and for same values of solar radiation (60 w/m²), an increase of wind speed of 2 m/s causes a temperature drop of 4°C.

CONCLUSION

The airflow patterns seem to be dominated by mechanical forces. They depend of prevailing winds direction, site topography and ksar configuration (streets orientation, streets profile, prominent element) which promote the wind displacement or hamper the air penetration within ksar.

FUTURE STUDIES

Further investigations are planned to focus on particular airflows within a partial fragment of the city streets, exploring effects of solar radiation and several morphological characteristics (covered paths, winding streets) on the airflow.

ACKNOWLEDGEMENT

Great appreciation to the local associations of Beni-Izguen and Ghardaïa, local authorities and population to their help.

REFERENCES

- [1] Y. Nakamura, T. R. Oke. – Wind, temperature and stability conditions in an East-West oriented urban canyon. In *Atmospheric environment* Vol.22. N°12, (1988). pp.2691-2700.
- [2] M. Santamouris ad *al.* – Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. In *Atmospheric Environment*, 33, (1999), pp.4503-4521.
- [3] M. Nunez and T. R. Oke. – The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 16, n°1, January, 11-19.
- [4] G. Johnson and T ; L. J. Hunter.– Some insights into typical urban canyon airflows. In *Atmospheric Environment*, n°33, (1999), pp.3991-3999.
- [5] J. F. Sini and *al.* – Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 30 (1996), pp.2659-2677.
- [6] G. Escourrou. - *Le climat et la ville*. Edit Nathan, Paris, col Géographie d'aujourd'hui, (1991).
- [7] E. Rauzier – *Etude climatique du vieux Nice*. Contrat AFME n°0904004, (1997), 99.
- [8] KITOUS and *al.* 2004. – Thermal behaviour of compact urban fabric in hot and climate: case study of M'zab Valley. Experimental results. In *Environmentally Friendly Cities*, Proceedings of PLEA 2004, Eindhoven, The Netherlands, (September 2004). 6-425.
- [9] T.R.OKE. – *Boundary Layer Climates*. 2nd Edition, Routledge, New-York, USA, (1992), p.298.
- [10] D. Pearlmutter. - *Street canyon geometry and microclimate: Designing for urban comfort under arid conditions*. In *Environmentally Friendly Cities*, Proceedings of PLEA'98, Lisbon, Portugal, June

POUR UN URBANISME CLIMATIQUE DES VILLES : CAS DE LA VALLEE DU M'ZAB.

INVESTIGATIONS SUR LES PRINCIPES D'INTEGRATION ANCESTRAUX ET RECOMMANDATIONS POUR UNE PLANIFICATION FUTURE

S. Kitous¹, N. Daoudi², A.Boussoulalim¹, R. Bensalem¹, L. Adolphe².

¹ EPAU, École d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger-BP N°2, El Harrach, Alger, Algérie

Tel/Fax : (0) 21 52 8 89 ; E-mail : bensalem@wissal.dz.

² ENSAT-GRECAU, 83, Rue A. Maillol BP 1329 F- 31106 Toulouse cedex 1

Tél.: +33 (0)5 62 11 49 03 Fax : +33 (0)5 62 11 50 49 Email : luc.adolphe@free.fr

Résumé

Cette recherche vise à identifier les principes d'intégration climatiques dans les villes du désert. Elle retient pour cas d'étude la ville de Ghardaïa dans la vallée du M'zab, dans la limite septentrionale du sud algérien. Elle met en œuvre une série de campagnes de mesures des principaux paramètres climatiques, avec différentes résolutions spatiales et temporelles. Parallèlement aux mesures sur site, des enquêtes sur le terrain sont établies en vue de l'évaluation de la perception et représentation du climat et des stress environnementaux subis ainsi que des actions d'adaptation. Les résultats du questionnaire ont permis de corriger les a priori relatifs aux conditions de confort prévalant dans les zones arides, tandis que les campagnes de mesures révèlent l'importance de certains aspects topographiques dans la détermination du climat local de la vallée, la forte imbrication des échelles climatiques, la prégnance du phénomène vent ainsi que la présence de phénomènes climatiques propres en milieu désertique (îlots de chaleur et de fraîcheur, effet oasis).

À l'échelle microclimatique, certains aspects de la morphologie urbaine tel que le prospect, ont montré des effets limités sur la réduction des températures de l'air contrairement à d'autres (passage couvert, orientation des rues) qui constituent des moyens de contrôle climatique plus efficaces. La morphologie étagée des ksour de la vallée du M'zab génère par ailleurs des conditions de vent particulièrement importantes en dépit des prospects de rues étroits. En terme d'implications urbanistiques, la conception urbaine devrait porter une attention particulière sur les conditions d'implantation des sites, des moyens de protection contre le vent et tirer profit des attributs positifs de la végétation.

Mots-clés: **topo-climat, microclimats urbains, urbanisme traditionnel, zone aride, confort.**

INTRODUCTION.

Notre publication présente le résultat d'une recherche menée en partenariat entre les laboratoires Architecture et Environnement de l'École d'Architecture et d'urbanisme d'Alger (EPAU), Algérie, et le laboratoire Groupe de Recherche Environnement Conception (GRECAU) de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse, France, dans le cadre d'une coopération intergouvernementale algéro-française. Elle est conduite en collaboration avec l'Office National de Météorologie (ONM) d'Alger et vise la connaissance des principes d'intégration climatique, aujourd'hui particulièrement méconnus, pouvant être mis en œuvre à l'échelle urbaine, en vue d'offrir des conditions de confort améliorées pour nos villes.

L'ajustement climatique constitue aujourd'hui un des domaines d'études émergents de la recherche urbaine. Cette connaissance passe nécessairement par l'identification des propriétés physiques et formelles de milieux «adaptés» telles que les villes traditionnelles qui ont su maintenir des conditions de vie adéquates même dans les régions les plus rigoureuses.

Cela est particulièrement vrai pour la Pentapole du M'zab, dans la région septentrionale du Sahara algérien, qui constitue de par ses noyaux originels, un exemple reconnu d'adaptation climatique dans un milieu particulièrement difficile.

Située en milieu semi aride, à l'orée du Sahara algérien, la vallée du M'zab est l'exemple par

excellence d'un habitat vernaculaire intégré, comme il a été développé par des auteurs comme Mercier, (1932), Didillon et al, (1977) et Ravereau, (1981), Benyoucef, (1986). Ces derniers ont clamé l'a propos de l'adaptation de cette forme urbaine compacte et sa réponse à une intégration en milieu aride jusqu'à la comparer à « une leçon d'architecture ». Au-delà de cette présentation parfaite des caractéristiques humaines et physiques de la vallée du M'Zab, il a été souvent occulté la quantification scientifique des phénomènes physiques et climatiques par le biais d'une métrologie des caractéristiques climatiques, et la vérification environnementale des perception et représentation du climat et du confort induit par le biais d'enquêtes et de questionnaires. Aussi, notre recherche s'attèle à vérifier de manière objective la véracité de ces croyances et se propose d'identifier les principes d'adaptation climatiques propres à l'urbanisme ksourien de la vallée du M'zab. Ainsi, notre étude se propose d'identifier les variations climatiques locales associées aux conditions du site et aux différentes formes urbaines, et la définition et la compréhension des phénomènes climatiques engendrés à différentes échelles climatiques en milieu aride.

A travers cette recherche, et du cas d'étude proposé, nous visons la connaissance des paramètres naturels et du bâti conditionnant les ambiances climatiques locales, de manière à énoncer les orientations urbanistiques pouvant être mises en œuvre pour une planification climatique de nos villes. Les conclusions de ce travail devront pouvoir être appliquées à de nombreuses villes dans le monde. Cette étude permettra en outre d'élargir les connaissances scientifiques sur le climat urbain, particulièrement en zone aride.

Aussi le travail à développer sera organisé en quatre parties :

1. la présentation de la vallée du M'Zab, en terme de caractéristiques humaines et physiques,
2. l'évaluation de la perception et représentation du climat et des stress environnementaux subies ainsi que des actions d'adaptation,
3. la caractérisation des phénomènes aérauliques et thermiques induits et la détermination des paramètres influents en terme de topographie et morphologie urbaine,
4. l'élaboration de recommandations urbaines en vue d'une planification future.

1. LA VALLEE DU M'ZAB

1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA VALLEE

La Vallée du M'Zab se trouve dans le Sahara algérien à 600 km au sud d'Alger, capitale de l'Algérie. Elle est comprise entre 32° et 33°20' de latitude Nord et 2°30' de longitude Est. Elle est située sur le plateau de calcaire de la Hamada, d'une altitude variable entre 300 et 800 mètres environ, (Benyoucef, 1986). Des érosions subies, a surgi un ensemble de pitons et de monticules escarpées, formant ainsi la *chebka*, ou filet, du M'Zab. Au milieu de ce filet se trouve l'oued M'Zab. La vallée du M'Zab mesure 20km de long sur 2km de large, (Benyoucef, 1986). Elle est composée d'espace minéral, les ksour, et d'espace végétal, les palmeraies qui entourent ces derniers. Sept ksour forment la vallée du M'Zab. Cinq sont situés sur les berges de l'oued M'Zab et forment ainsi la Pentapole du M'Zab. Ceux sont Beni-Isguen, Bounoura, El Atteuf, Ghardaïa et finalement Melika. Les deux derniers, Guerrarra et Berriane, sont situés à quelques kilomètres de la Pentapole.



Figure 1 : La vallée du M'Zab, (Roche, 1973).

1.2. LE PARCOURS HUMAIN

Dans ses différents écrits sur la Vallée du M'Zab, Benyoucef (1986), en a parfaitement tracé le parcours humain de ses habitants. L'idéologie des mozabites, trouve ses racines dans la doctrine Kharidjite ; celle-ci est la conséquence d'un fait historique datant de la fin du VII^{ème} siècle. Celui-ci a pris place dans la péninsule arabique, quand un groupe de fidèles musulmans a proclamé sa désobéissance au pouvoir central concernant la question du khalifat ou légation du pouvoir. Pour eux, celui-ci ne devait pas être le fait d'une transmission familiale ou tribale mais d'un acte démocratique. Ce schisme a entraîné une répression sanglante par le pouvoir en place des fidèles kharidjites, qui furent ainsi contraints de quitter Médine et les régions de Basra et Djûkâ, en Irak et de s'implanter en Afrique du Nord pour y continuer leur lutte. C'est ainsi qu'à partir du début du VIII^{ème} siècle, nous assistons à l'édification de différents établissements humains qui furent soumis à différentes guerres et conquêtes. Parmi ces villes nous pouvons citer la ville de Tahert édifée en 757, puis détruite en 909. Elle était située aux abords de l'actuelle ville de Tiaret, sur les hauts plateaux Algériens. A la suite de l'effondrement de l'état de Tahert, ses habitants se sont réfugiés dans la province de Ouargla à 200 km au sud de la vallée du M'Zab. Ils y édifièrent la ville de Sedrata qui était décrite comme une ville faste et riche. Elle fut le siège de plusieurs batailles, ce qui poussa ses habitants à trouver refuge dans l'actuelle vallée du M'Zab.

Ainsi, il est important de souligner que le choix du site « dur et aride » de la vallée, répondait à une volonté des kharidjites, de sauvegarder leur religion et doctrine. Car « depuis 1012, période de croissance d'El Atteuf, premier ksar érigé, les Mozabites ou « Beni Mozab, ont choisi de vivre en autarcie pour sauvegarder leur idéologie et résister aux menaces de l'extérieur », Benyoucef, (1986). L'idéologie kharidjite et ses préceptes religieux strictes ont dicté la formalisation d'un ordre bâti serré qui reflète la cohésion de son corps social.

Ainsi l'aspect socio culturel a fortement influencé l'édification des ksour de la vallée comme il a été souligné par Cuperly, (1987). Les habitants de vallée du M'Zab, peuvent être qualifiés comme orthodoxes dans leur stricte application des préceptes de l'islam. La mosquée comme pouvoir culturel a dicté et continue de le faire, toutes les prescriptions de la vie sociale ainsi que les cahiers de charge de la production architecturale et urbaine.

La Vallée du M'ab ou pentapole est composée de cinq ksour érigés dans l'ordre chronologique suivant, (Benyoucef, 1986) :

- 1012 : El Atteuf
- 1046 : Bounoura
- 1053 : Ghardaia

- 1124 : Mélika
- 1347 : Beni Isguen

1.3. LES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES

Pour répondre à un objectif du travail, et qui est de déterminer l'impact des contraintes et stress climatique sur la conscience populaire collective, nous classons les paramètres climatiques sous deux formes:

- Caractéristiques climatiques régulières : Températures d'air, humidité, vents, irradiation solaire, précipitations et insolation solaire
- Caractéristiques climatiques épisodiques : Vents de sable, chasses - sable, inondations

1.3.1. Caractéristiques climatiques régulières.

Elles seront traitées suivant les saisons, hiver ou été.

Hiver.

Températures: En valeur moyenne, nous pouvons dire qu'en hiver les températures d'air minimales sont enregistrées en décembre avec 12,28°C et en janvier avec 11,01°C. Quelquefois, elles peuvent chuter jusqu'à 0°C, ce qui génère de la neige.



Figure 2 : Oasis sous la neige, (Source anonyme)

Insolation solaire : Les valeurs moyennes minimales sont enregistrées pendant le mois de novembre avec 238,56 heures, le mois de décembre avec 243,68 heures et janvier avec 241,22 heures.

Irradiation solaire : les valeurs enregistrées en hiver varient entre 510 w.h/m² et 700 w.h/m². La couverture du ciel est souvent claire sauf en période de vents de sable où le ciel est chargé de particules ocre jaune.

Humidité : En hiver les valeurs d'humidité relative moyenne sont de l'ordre de 58% Les taux minimaux sont compris entre 39% et 49%, les taux maximaux peuvent atteindre 85% voire 88%. Les hivers les plus secs sont caractérisés par des valeurs d'humidité relative n'excédant pas les 22% et 28%.

Précipitations : La saison des pluies est comprise entre septembre et janvier. Les valeurs moyennes sont de 50 mm à 70 mm. Quelquefois sur des périodes de pluies intenses nous pouvons enregistrer jusqu'à 120,5mm.

Vents : Les vents d'hiver sont froids et humides de direction préférentielle NW et WNW

Eté :

Températures : Une température moyenne de 38°C peut être atteinte en juillet. En valeur absolue, en été nous pouvons enregistrer des températures d'air moyennes maximales de 40°C et 42°C, avec des pics occasionnels de 46°C.

Courbes températures absolues

Insolation solaire : Les valeurs moyennes maximales enregistrées sont pour le mois de juin avec 329,46 heures et le mois de juillet avec 355,53 heures. Les variations sont brusques entre les mois de mars et avril avec une amplitude de 33,45 heures et entre le mois d'août et septembre avec 51,73 heures.

Irradiation solaire: L'irradiation solaire globale horizontale est importante. Elle peut atteindre en été 1040 w.h/m² entre juin et juillet.

Humidité : Le taux d'humidité relative enregistré en été est relativement faible; il varie entre 23% et 27%. Durant certaines périodes de sécheresse, il peut atteindre des taux minimaux compris entre 2 et 6 %.

Vents : Les vents d'été sont secs et chauds de direction préférentielle NE

1.3.2. Caractéristiques climatiques épisodiques.

Nous définissons par paramètres climatiques épisodiques, les caractéristiques environnementales qui engendrent des événements climatiques soudains et extrêmes; ces derniers survenant soudainement génèrent des stress climatiques voire un inconfort pour les populations locales. Elles peuvent quelquefois paralyser les activités journalières. Ceux sont des situations extrêmes. Parmi ces événements nous pouvons citer les vents de sables, les chasses - sable et les inondations.

Les vents de sable : Les vents de sable sont une des principales contraintes climatiques trouvées dans la vallée du M'Zab. Ils surviennent soudainement et se matérialisent par des particules de sable soulevées par un vent fort et turbulent donnant un effet de tempête. Ces particules peuvent former un mur haut réduisant la visibilité à 100m. En dix ans, 19 tempêtes de sable ont été recensées dans la vallée du M'Zab. La vitesse du vent peut atteindre 36 m/s. Selon l'office national de météorologie, une vitesse minimale égale à 15m/s peut déclencher une tempête de sable. Pour des vitesses supérieures ou égales à 16m/s, le ciel est invisible. La durée d'une tempête de sables varie entre 15 minutes et 3 heures mais exceptionnellement peut atteindre la durée de 8 heures. Ces tempêtes sont essentiellement de direction Ouest / Sud Ouest, Ouest / Nord Ouest et Ouest, et ce quelque soit la période de l'année. Ces vents de sable surviennent surtout au mois de février et de mai.

Chasses - sable : Les chasses – sable sont induits par des vents de sable assez importants et sont définis comme des particules soulevées par le vent pour voiler ou masquer les objets très bas mais sans réduire de façon appréciable la visibilité au niveau de l'œil.

Ce sont des phénomènes contraignants car ils sont élevés. Ils se caractérisent par une visibilité inférieure à 5 Km et une élévation par rapport au sol supérieur à 2 m tandis que les Chasse sable basses induisent une visibilité inférieure à 9 Km et une élévation par rapport au sol inférieur à 2 m. Sur une période de 10 ans, l'Office National de Météorologie a recensé 515 jours de chasse sable, soit en moyenne 50 jours par an.

Ce phénomène se produit essentiellement en avril et mai, il coïncide avec les périodes de vents forts caractéristiques de la vallée du M'zab. L'année 2002 est celle qui a enregistré le plus fort taux avec 80jours de chasses sable.

Inondations : Certaines années le taux de précipitations est tellement important que cela peut engendrer des inondations et des crues de l'oued M'Zab et Nfissa. Nous ne pouvons donner des valeurs mais elles correspondent à un taux pluviométrique supérieure à d'autres moyennes annuelles.



Figure 3: Crue De l'oued M'Zab, (Source anonyme)

1.4. LES CARACTERISTIQUES URBAINES ET ARCHITECTURALES

1.4.1. La forme Urbaine

D'une manière générale, l'habitat vernaculaire de la vallée du M'zab, appelé aussi oasis est composé de trois entités distinctes :

- Les ksour de la vallée du M'Zab : Ils présentent une forme urbaine très compacte. On y perçoit d'une part l'influence du climat et des pratiques sociales, d'autre part. La ville fortifiée ou le ksar, entité minérale, est généralement implantée sur un piton ou une colline d'orientation préférentielle sud afin d'éviter les vents dominants nord. La ville développe une adaptation régulière et radioconcentrique de maisons à patio, avec la mosquée au sommet. Le gabarit des maisons est régi par le droit à l'ensoleillement, aucune maison ne doit porter ombre à sa voisine. En réponse à un climat aride et rude, le rapport des surfaces exposées est réduit au seule terrasse et façade d'accès sur rues; ceci afin de diminuer l'influence de l'irradiation solaire. Les rues sont étroites et sinueuses, et présentent quelquefois la forme de passages protégés. Ceux-ci sont matérialisés soit en dur par des encorbellements ou extensions en étage de la maison sur la rue, soit légers par des matériaux tissés comme des treillis ou des bâches. Espaces d'ombre et de lumière, ils sont aussi des espaces de protection des situations extrêmes en été
- La palmeraie : Celle-ci se développe le long de l'oued M'zab et de l'oued N'Fissa ; Elle constitue l'entité végétale et agricole de l'oasis. Nous remarquons la présence d'un système élaboré d'irrigations dont les canaux sont intégrés dans les rues et ruelles de la palmeraie. La distribution de l'eau se fait d'une manière démocratique suivant la taille de la palmeraie et le nombre d'arbres à arroser. Le système combiné d'évaporation et d'évapotranspiration augmente l'humidité de l'air dans la palmeraie et offre ainsi un microclimat agréable, surtout en été. Ceci explique le mouvement migratoire saisonnier ksar palmeraie qui s'effectue durant cette saison. L'habitat dans la palmeraie est moins dense. La maison est similaire à celle du ksar ; entourée d'un jardin, elle présente plus d'ouvertures que celle du ksar.
- Les nouvelles extensions : Elles se développent sur les collines avoisinantes des anciens ksour, dans un souci de préservation de la palmeraie; Ces nouvelles extensions sont soumises aux mêmes cahiers de charges que les ksour originaux, que ce soit à l'échelle urbaine ou architecturale. Parmi ceux-ci nous pouvons citer les sites de Tafilalt et de Tinémérine. Le même système associatif nommé *touisa* a été utilisé lors de leur édification. En réponse à une exigence de la modernité et qui est la voiture, les rues sont carrossables. Elles sont plus larges et présentent ainsi des profils moins étroits.



Figure 4: Vue aérienne du ksar de la partie supérieure de Beni-Isguen, (Roche, 1977)



Figure 5 : Le ksar fortifié de Beni-Isguen, (Source anonyme)

1.4.2. La forme architecturale

La maison à patio est la forme architecturale trouvée. En réponse à un climat extrême, surtout en confort d'été, l'inertie thermique et la protection solaire sont les outils environnementaux trouvés. Cette maison est caractérisée par :

- une maison à deux niveaux, obéissant à un droit à l'ensoleillement très stricte, Ainsi il est défendu de porter préjudice à son voisin, *là darar wa là idrâr*, (Cuperly, 1987),
- un patio généralement central aéré par une ouverture, appelé *chebek*, de deux mètres de large. Ouverture zénithale, le chebek est la source d'air et de lumière de la maison; celle de forme introvertie ne présente aucune ouverture sur l'extérieur. La présence de patios superposés permet la diminution de la chaleur radiante à l'intérieur de la maison,
- une cave, remarquée surtout dans les maisons du ksar. Elle procure un espace frais produit par l'inertie thermique trouvée dans les espaces enterrés. Cette qualité microclimatique explique le mouvement migratoire journalier qui se réalise l'été entre les espaces bas de la cave et du patio, utilisé le jour et la terrasse, utilisée pour le sommeil de nuit,
- une terrasse, espace strictement féminin, qui demeure un espace agréable pour le sommeil d'été. Les dalles en terrasses sont planes et lourdes, diminuant ainsi la conduction thermique à l'intérieur de la maison, (Ali Toudert et al, 2005),
- une distribution de pièces autour du patio et en terrasse, celles-ci sont aérées et éclairées d'une part par la porte et des fentes dans les murs épais et par le chebek du patio d'autre part. En été, la différence thermique entre la rue fraîche, la maison et la terrasse chaude peut encourager la ventilation naturelle à l'intérieur de la maison, (Ali Toudert et al, 2005),
- des espaces couverts/ouverts sous forme de galeries à arcades, orientés généralement sud, pour profiter de la chaleur ambiante en hiver,
- l'existence d'espaces humides, cuisines et latrines. Ces dernières obéissent à un système de fosses sceptiques,
- des matériaux de constructions lourds adaptés au climat. La pierre est généralement le matériau de construction utilisée, elle est caractérisée par une capacité thermique élevée.



Figure 6: Vue sur le patio, (Source anonyme)



Figure 7 : Vue sur la première terrasse, (Source anonyme)

2. PARAMETRES CLIMATIQUES, STRESS ENVIRONNEMENTAUX ET REPONSES AU CONFORT.

Quand on aborde la question environnementale dans son ensemble, une relation évidente survient entre les paramètres physiques et climatiques influents et la perception de ces derniers par les usagers. Cette relation a été abordée dans différentes études que ce soit au travers de l'application d'indices de confort ou par la réalisation d'enquêtes et de questionnaires, (Ali Toudert et al, 2005).

Quand on se situe en milieu aride, les études sont généralement menées dans des contextes climatiques caractérisés par des paramètres climatiques réguliers et récurrents en terme de températures et vitesses d'air, humidité relative, irradiation solaire et précipitations. Les résultats obtenus corroborent les conclusions trouvées dans l'état de l'art en terme de phénomènes thermiques et aérauliques ainsi que des ambiances générées, ((Nikolopoulou et al. 2001, Spagnolo & de Dear 2003). Mais il existe aussi des évènements climatiques épisodiques et soudains, caractérisés par des paramètres climatiques particuliers, qui de par l'ampleur du stress environnemental induit, faussent les résultats attendus que ce soit lors d'exploitation de valeurs physiques de campagnes de mesures in situ ou de résultats d'études traitant de l'adaptation comportementale au climat.

Aussi, il est reconnu qu'il existe une forte interrelation entre l'homme, son environnement bâti, et le climat surtout en milieu aride. A Rapoport, (1972), dans son livre « Pour une anthropologie de la maison » a identifié les différents facteurs intervenant dans l'acte conscient de la production architecturale. Celui-ci est fortement influencé par l'effet combiné de facteurs dits « objectifs » comme le site et le climat et de facteurs dits « subjectifs » comme les coutumes, la culture et la tradition. S'appuyant sur cette catégorisation de ces facteurs influents, les études portant sur l'architecture vernaculaire développent deux approches, l'une objective et l'autre subjective ou la combinaison des deux. La première dite « objective » traite de l'explication des phénomènes climatiques au travers de l'exploitation de résultats de campagnes de mesure in situ et de calcul d'indices, (Ali Toudert et al, 2005). La seconde développe une approche dite « subjective », se basant sur les résultats d'enquêtes et de questionnaires auprès des habitants.

Mais tous concluent que face à des conditions climatiques particulières, l'utilisateur n'est plus vu comme un « réceptif » passif subissant des stimuli thermiques dans des chambres expérimentales mais comme un acteur actif qui développe des actions d'adaptation afin d'achever un confort intérieur surtout thermique, (Nicol et Humphreys, 2002). Ceci est résumé dans l'approche dite « adaptative » qui suggère que « si un changement pouvant produire le dis confort apparaît, les personnes réagissent de telle manière à restaurer le confort », Nichols, (2004).

Ce postulat vient contredire la démarche de l'approche dite « statique » des inconditionnels de l'application d'indices de confort tel que ASHRAE's Standard 55 - 1992 et l'ISO Standard 7730 (ISO 1994), (De Dear et al, 1997)

Aussi plusieurs définitions du confort thermique peuvent être données. Par exemple Givoni, (1976) le

considère comme étant « l'absence d'irritation ou d'inconfort quand l'homme est exposé aux différents états de froid ou de chaleur extrêmes ». ASHRAE 55-74 le définit comme « la condition mentale qui exprime une complète satisfaction de l'utilisateur avec son environnement ».

Aussi, dans un souci d'achever le confort, l'Homme performe le principe d'adaptation. Celui-ci prend plusieurs aspects comme De Dear et Brager (1998) l'ont si justement caractérisé. Ainsi il est le résultat, (1) d'ajustement comportemental, (2) d'adaptation physiologique et finalement (3) d'adaptation psychologique.

1 : Subséquemment, en terme d'ajustement comportemental l'utilisateur performe:

- l'ajustement personnel, où il modifie des variables personnelles, comme les effets vestimentaires, les activités ou l'occupation spatiale pour achever le confort,
- l'ajustement technologique: où il intervient sur son contexte en établissant un contrôle environnemental, par des actions régulières de forme passive, comme ouvrir / fermer les fenêtres, ou active, comme, allumer radiateurs et climatiseurs.....,
- l'ajustement culturel : où il développe des activités liées au mode de vie comme faire la sieste, ou prendre une douche.

2 : Concernant l'adaptation physiologique l'utilisateur est soumis à:

- l'adaptation génétique: Ceux sont là les changements qui sont acquis dans le capital génétique d'une population
- l'acclimatation : C'est le changement évolutif de son système physiologique quand il est confronté à une exposition régulière de stress environnementaux.

3 : Finalement en terme d'adaptation psychologique, l'utilisateur est influencé par des variables contextuelles et socioculturelles.

Parmi les trois catégories d'adaptation, il est reconnu que l'adaptation psychologique est celle qui joue un rôle primordial dans la perception du confort environnemental, quoique que ce soit la moins étudiée d'après Tablada de la Torre, (2006).

De ce fait, l'objet de ce travail est d'identifier la représentation et perception du climat et des différents paramètres climatiques, qu'ils soient réguliers ou épisodiques, dans la conscience collective d'un groupe déterminé ainsi que les actions d'adaptation entreprises pour achever le confort. Ces actions, tirées d'un savoir faire local, peuvent être ainsi assimilés à des recommandations d'architecture passive pour un développement futur.

2.1. METHODOLOGIE

Cette partie du travail est réalisée sur la base d'un questionnaire composé de questions ouvertes d'une part et de questions semi ouvertes d'autre part.

Dans l'absolu, les objectifs d'un questionnaire suivent les objectifs généraux du travail de recherche dans lequel il est intégré. Il est élaboré afin de vérifier les hypothèses et valider les résultats des autres axes du travail réalisé. Mais il y a quelquefois des impondérables qui nous mènent à reformuler le questionnaire. Un parmi ceux-ci est le sujet humain auquel il est administré. Celui-ci est fortement influencé par son contexte en terme d'environnement physique, contexte socio culturel, activités journalières et finalement son contexte environnemental passé déjà vécu. Souvent ces variables viennent modifier les « a priori » et les réponses attendues et nous mènent ainsi à reformuler les questions dispensées afin de mieux cerner les réponses imprévus.

2.1.1. Objectifs de l'enquête.

Les objectifs du questionnaire sont de :

- déterminer si le climat ressort comment élément prégnant dans les représentations, définition et évaluation de leur contexte naturel et bâti,
- savoir si il y a une prise de conscience des contraintes climatiques de la vallée du M'Zab,
- trouver si ces caractéristiques climatiques sont perçues, comme récurrentes ou épisodiques et déterminer le niveau de stress induit sur leur vie quotidienne.

- et finalement déterminer les actions conscientes d'adaptation que les usagers performant pour achever le confort dans leur vie quotidienne.

2.1.2. Hypothèses.

Les hypothèses du travail sont :

- Les concepteurs de l'habitat vernaculaire de la vallée du M'Zab ont consciemment appliqué des cahiers de charge d'architecture passive, en adaptant la forme architecturale et urbaine au climat local
- La population locale était et est encore consciente des stress environnementaux extrêmes
- La population locale réussit son ajustement aux contraintes climatiques et achève le confort, en développant des actions d'adaptation comportementales

2.1.3. L'enquête et le questionnaire

Les campagnes de questionnaires ont été réalisées en deux temps. Un premier questionnaire pilote administré en décembre 2003 a permis de reformuler le questionnaire définitif administré en février 2004. Le temps requis pour la dispense de chaque questionnaire était de 20 minutes ou moins. Les sites d'investigation sont les ksour de Beni Isguen et de Ghardaïa ainsi que les nouvelles extensions de Tafilalet.

Les sujets

Le nombre de sujets questionnés est de 102. Ces derniers sont représentatifs de la population locale en terme de genre, tranche d'âge et occupation. La tranche d'âge la plus importante est celle comprise entre 25 et 50 ans. Ceci n'a pas été voulu mais reste le fait du hasard. Les femmes interrogées sont surtout des femmes au foyer avec 43,14%, et les hommes, commerçants avec 25,43%.

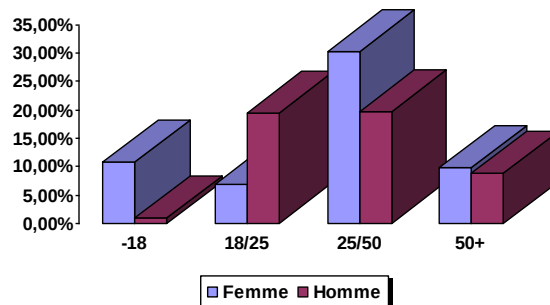


Figure 8: Classification des sujets interrogés en genre

2.2. PERCEPTION ET REPRESENTATION DES CONTRAINTES CLIMATIQUES

Comme développé dans la partie relative aux contraintes climatiques, celles-ci sont d'une part récurrentes et d'autre part épisodiques. Quoique le climat ne soit pas l'élément premier de la description de leur contexte physique comparé à l'intervention des traditions, il ne demeure pas moins que les sujets questionnés sont sensibilisés par l'impact de certaines caractéristiques climatiques sur leur vie quotidienne. Quelles que soient les situations climatiques subies, récurrentes, ou épisodiques, les usagers appliquent une adaptation environnementale qui puise ses enseignements dans un ajustement comportemental et culturel. A une situation d'inconfort environnemental donné les usagers apposent des actions, puisées dans leur savoir faire ancestral, déduits de leur mode de vie, et ce afin d'achever le confort.

De l'exploitation du questionnaire nous avons organisé la discussion des résultats suivant les objectifs élaborés en méthodologie. Comme il peut être vu ci-dessous

2.2.1. Traditions vs climat

Un des premiers objectifs du questionnaire était de déterminer si la population locale était consciente de l'influence du climat dans la production de la forme architecturale et urbaine. Ceci devait apparaître

dans la description de leur cadre de vie, naturel et bâti. Pourtant, malgré leurs absences dans la formulation de la question, les traditions et les coutumes sont citées comme caractéristiques majeures. Le climat est rarement cité, comme il apparaît dans les graphes et tableau ci dessous Le climat intervient avec 8% pour les femmes et 54,76% pour les hommes, tandis que les traditions totalisent 92% des voix chez les femmes et 45,24% chez les hommes

Ceci est surtout expliqué par le fait que la population mozabite applique les préceptes de l'islam de façon très stricte. Les femmes sont les garantes de la pérennité des traditions dans la cellule familiale et dans la société. Puisque les traditions sont citées dans 69,39% des éléments de réponse des femmes interrogées ; comme il peut être vu dans le graphe ci-dessous.

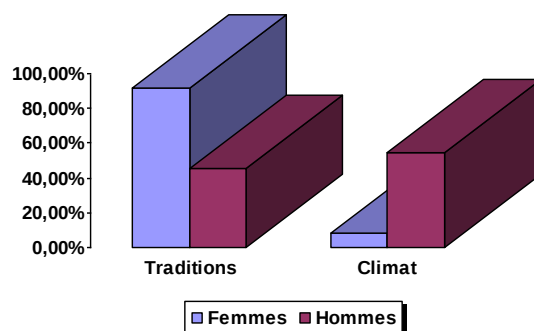


Figure 9 : Représentation du climat par les habitants

2.2.2. Perception des paramètres climatiques saisonniers.

A la question concernant les contraintes climatiques perçues et subies par saison, les personnes questionnées ont tout de suite identifiés les différentes contraintes comme suit :

Eté

- Vents de sable : 49.48%
- Températures d'air élevées: 49.48%
- Vents chauds ou sirocco : 14.43%
- Irradiation solaire : 10.31%

Hiver

- Températures d'air basses : 45%
- Vents de sable : 23.5%
- Inondations : 10%

Nous étions persuadée que les températures d'air comme source de confort ou d'inconfort saisonnier seraient citées, ce qui reste le cas. Mais ce qui est perturbant c'est que les vents de sable sont cités en été et aussi en hiver ; ce qui démontre leur caractère épisodique et non régulier. Ceci confirme aussi le stress qu'il engendre sur la population locale. Un commentaire similaire pourrait être fait pour les inondations. Lorsqu'ils surviennent, ces derniers occasionnent souvent des catastrophes naturelles et quelquefois aussi mort humaine.

2.2.3. Classification des contraintes climatiques

Une question posée demandait de classer, du plus stressant au moins stressant, des paramètres climatiques en terme de températures basses, températures élevées, vents de sable et vents froids. Avec l'objectif de déterminer comment ces contraintes sont perçues et si il y a une prise de conscience de leur importance et de leur effet. Ainsi intuitivement les différents paramètres furent classés premiers comme suit :

Tableau 1 : Classification des paramètres climatiques du plus stressant au moins stressant

Paramètres climatiques	Classement
Vents de sable	57,84%
Températures d'air élevées	17,64%
Vents froids	11,76%
Températures d'air basses	6,86%

Les éléments de réponse ont spontanément classé les vents de sable comme étant les plus perturbants. Ceci rejoint ce qui a été dit précédemment concernant la perception de ces paramètres par rapport à leur impact sur la vie quotidienne des populations locales.

2.2.4. Caractérisation des paramètres climatiques comme source de confort

La question fut posée comme suit :

« Quel est l'endroit préféré dans votre ville ? Pourquoi ? »

L'objectif était de déterminer la part qu'occupe le climat, si il existe, dans la description de leur cadre de vie.

Nous avouons que cette question fut posée d'une manière insidieuse puisque nous devons déterminer au travers des réponses, les facteurs climatiques qui caractérisent chaque entité citée. Souvent ceux sont les commodités en terme de commerces, réseaux sanitaires, voies carrossables, avec 50% pour les femmes et 35,71% qui furent souvent cités. L'aspect social n'est apparu qu'à 8,75% pour les premières et à 5,71% pour les seconds. Comme il peut être vu dans le graphe ci-dessous :

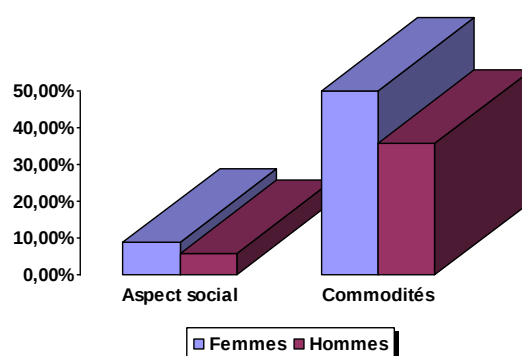


Figure 10 : Eléments influents du choix

Pourtant même si le climat n'intervient que dans 26,67% des éléments de réponse, les personnes interrogées ont expliqué leur choix en énonçant de manière exacte les facteurs climatiques qui caractérisent chaque entité, en terme d'air frais, fraîcheur et humidité.

Ainsi nous pouvons voir dans le tableau ci dessous que l'air frais est cité dans 73,33% des réponses tandis que la fraîcheur apparaît avec 20% et finalement l'humidité avec 6,67%. Comme il peut être lu dans le tableau ci dessous.

Tableau 2: Identification des facteurs climatiques intervenant dans le choix de chaque entité

		Facteurs climatiques		
Genre	Entité choisie	Air frais	Fraîcheur	Humidité
F	Ksar	13,33%	0,00%	0,00%
	Ksar/Palmeraie	6,67%	6,67%	0,00%
	Palmeraie	33,33%	0,00%	0,00%
M	Ksar/Palmeraie	6,67%	13,33%	6,67%
	Palmeraie	13,33%	0,00%	0,00%

Ces résultats montrent que la population locale est consciente de la particularité climatique de chaque entité et du confort induit par chaque paramètre climatique. Les personnes interrogées savent que l'air

frais peut être trouvé dans la palmeraie l'été d'où la pratique de la migration saisonnière.

2.2.5. AJUSTEMENT ET ADAPTATION

En adéquation avec les définitions développées en introduction, les mozabites font appel à :

L'ajustement comportemental en terme d'ajustement personnel, d'ajustement technologique et finalement d'ajustement culturel

L'adaptation physiologique puisque l'utilisateur est soumis à l'adaptation génétique et à l'acclimatation :

L'adaptation psychologique, où l'utilisateur est influencé par des variables contextuelles et socioculturelles.

A la question relative aux actions introduites pour achever le confort, les personnes interrogées ont spontanément et d'une manière récurrente cité des actions de forme passive qui font intervenir des moyens simples.

Les éléments de réponse ont démontré aussi une connaissance empirique des caractéristiques physiques des dispositifs architecturaux de la maison et de leur implication sur le confort thermique et lumineux achevé. Ils ont aussi démontré une connaissance des qualités d'inertie thermique des matériaux de construction.

Les questions étaient simplement posées afin d'obtenir des réponses courtes et concises. Les réponses étaient spontanées et démontraient d'un savoir faire ancestral et d'une connaissance intuitive des répercussions environnementales induites ainsi que du confort intérieur produit.

Concernant le confort d'hiver, la question fut posée comme suit :

« Quand le froid extrême quelles sont les actions prises pour achever un confort d'hiver ? »

Les actions menées sont d'une part mécaniques en couvrant le chebek, (26.23%), en posant des tentures sur les murs des espaces de vie, (21.95%), et enfin en accrochant un tapis à l'entrée du patio, (66.67%). Ces actions sont réalisées dans un souci de réchauffer d'une manière passive les espaces intérieurs de la maison.

Elles peuvent être fonctionnelles en adoptant le principe de la migration journalière, comme par exemple d'utiliser la cave pour le sommeil de nuit en hiver, (25%). Ceci démontre une connaissance des caractéristiques d'inertie thermique des espaces enterrés.

Par contre quand le froid est extrême un chauffage au gaz est allumé, (42.62%).

Concernant le confort d'été, une question similaire fut posée. En réponse les actions menées sont elles aussi mécaniques ou fonctionnelles. Ainsi le chebek du patio est couvert d'un matériau opaque de 10h à 17h, afin de diminuer voire empêcher le rayonnement solaire. Ainsi ceci apparaît dans 64,29% des éléments de réponse pour les femmes et 35,71% chez les hommes.



Figure 11: Couverture du chebek avec un matériau opaque pour achever le confort d'été

2.3. REPRODUCTION DES DISPOSITIFS ARCHITETURAUX

Une des caractéristiques des ksour de la vallée du M'Zab est la pérennité dans l'utilisation et ce depuis la première phase de leur construction, de dispositifs architecturaux originaux. Ceci est surtout expliqué par la formule d'édification, et qui est nommée « *touisa* ». Le groupe participe à la construction de la maison de l'individu en appliquant un cahier de charge très stricte, concernant le fonctionnement et les matériaux. Ainsi il en résulte une connaissance et une appréciation de chaque dispositif architectural, et ce malgré quelques limitations quand doit être introduits des signes de modernité, comme la voiture et les réseaux sanitaires.

Ainsi une question fut posée concernant les dispositifs architecturaux à reproduire dans une construction future. A l'unanimité, le patio ou *westedar* fut cité, que ce soit dans une nouvelle extension ou dans la palmeraie. Ainsi on retrouve le patio avec un total de 97,89% de oui et un total de 2,11% de non.

Par contre quand on arrive au choix de la cave, nous voyons qu'elle est plus recommandée dans le ksar que dans la palmeraie. Ceci démontre d'une connaissance des impacts de phénomènes épisodiques comme les inondations et crues d'oueds, qui dans la palmeraie génèrent souvent des caves inondées. Comme il peut être lu dans les deux graphes ci-dessous.

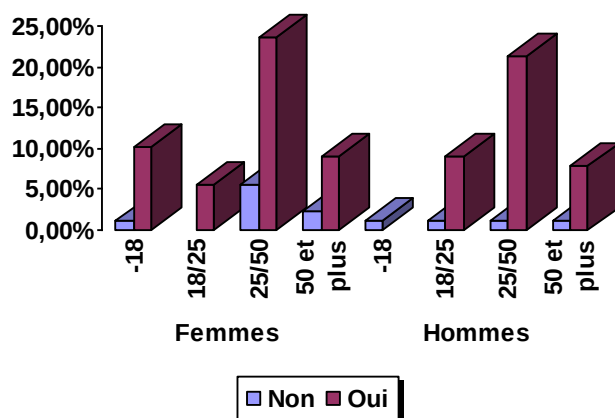


Figure 12: Reproduction de la cave dans un nouveau ksar

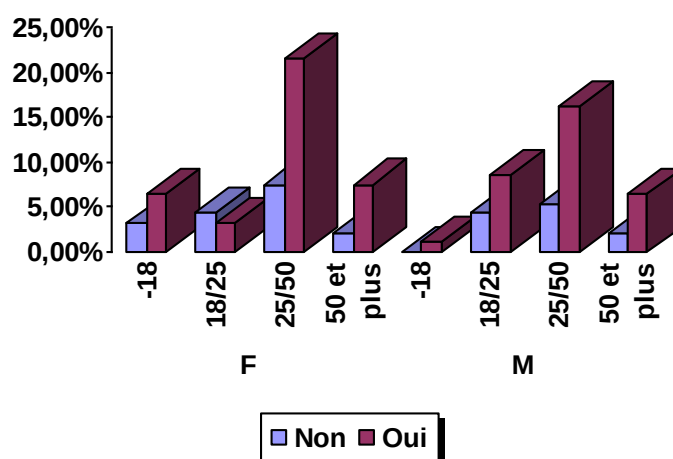


Figure 13: Reproduction de la cave dans la palmeraie

2.4. CONCLUSIONS SUR LES PERCEPTION ET REPRESENTATION DES CONTRAINTES CLIMATIQUES

Ce travail a permis de vérifier et même de corriger des a priori relatifs aux conditions de confort qui prévalent dans les zones arides. Il a été ainsi trouvé que ce que l'on pensait être les paramètres climatiques les plus contraignants en terme de confort comme les températures d'air élevées,

perceptibles en confort d'été, n'avaient pas un impact prégnant. Au contraire, les vents de sable et les inondations de par leur caractère épisodique et soudain, ont un impact plus « impressionnant » sur la conscience collective et conditionnent leur vie quotidienne en terme d'activités et d'actions d'adaptation.

D'autre part, il a permis de révéler la parfaite connaissance qu'ont les habitants de la vallée du M'Zab, des caractéristiques physiques et environnementaux par:

- La classification et caractérisations des paramètres climatiques, en réguliers et épisodiques
- La soudaineté de l'occurrence des paramètres climatiques épisodiques
- La quantification de ces derniers, en intensité et durée
- L'impact qu'ils occasionnent sur leur vie et activités quotidiennes

Ainsi, la perception de ces paramètres a même déterminé la pertinence de la localisation de futurs développements, que ce soit à l'échelle architecturale ou urbaine. En effet, à l'échelle urbaine, les inondations rares mais violentes déterminent souvent les choix d'implantation des nouvelles extensions sur des pitons ou promontoires. Ainsi sont déconseillées les implantations sur les berges d'oueds ou de cours d'eau.

D'une manière générale, il est souhaitable d'intégrer les différences dans le stress engendré par les paramètres climatiques identifiés en réguliers et épisodiques, et trouver les modèles architecturaux et urbains adaptés à chaque situation climatique.

A l'échelle architecturale, la cave, qui malgré sa qualité d'espace confortable pour le sommeil de nuit en hiver, est prohibée dans la palmeraie, et ceci de peur des remontées d'eau de l'oued et des inondations. De plus, le questionnaire a permis de mettre en évidence la connaissance par les habitants du M'Zab de la caractéristique environnementale de chaque dispositif architectural d'où l'exigence de sa reproduction dans les nouvelles extensions. Ceci peut être expliqué par l'influence forte des traditions et coutumes sur le mode de vie et la peur du changement.

Encore plus, les éléments de réponse ont révélé la caractérisation de chaque entité urbaine par des paramètres climatiques particuliers. Ainsi tandis que les parties hautes des ksour procurent fraîcheur et air pur, la palmeraie procure air frais et sensation d'humidité. Ce qui explique le mouvement migratoire saisonnier ksar –palmeraie en été.

Concernant les actions d'adaptation, elles relèvent d'une connaissance intuitive et empirique des répercussions thermiques qu'induirait des gestes simples et récurrents. Elles démontrent une expérimentation temporelle, avec certitude de résultats, dans la recherche du confort. De ce fait, il serait souhaitable d'encourager la pérennité dans l'utilisation de ces actions d'adaptation environnementale, surtout qu'elles sont de forme passive.

Cette première partie de travail a permis de conforter ce que développent certains auteurs concernant la parfaite intégration de l'architecture vernaculaire Mozabite, et ce par un phénomène d'habitation aux stress environnementaux. Une quantification scientifique des phénomènes physiques et climatiques demeure néanmoins nécessaire pour une meilleure appréhension de ces phénomènes. Elle fera l'objet de la seconde partie de notre étude.

3. CARACTERISATION DES PHENOMENES THERMIQUES ET AERAULIQUES

Dans le domaine de la microclimatologie urbaine, les recherches actuelles font appel à la modélisation numérique, les simulations en soufflerie et les mesures sur site. Les deux premières méthodes possèdent l'avantage de pouvoir comparer de nombreuses configurations de rue et notamment de rapport H/L mais demeurent caricaturaux vis à vis de la scène traitée (symétrie de bâtiments, géométrie en deux dimensions, longueur infinie des rues, façades planes, etc.). Les informations recueillies peuvent mettre en relation certains paramètres mais ne peuvent qu'approcher la réalité physique de la ville qui n'est pas un enchaînement de rues parallèles mais un environnement géométrique complexe. Les mesures sur site par contre ont l'avantage de rendre compte de la complexité des phénomènes physiques, notamment dans le cas des entités traditionnelles difficilement

modélisables.

3.1. Méthodologie.

La méthodologie est basée sur la collecte de données climatiques sur terrain. Des mesures en continu sont enregistrées toutes les minutes sur des sites de référence. Elles permettent l'identification de différents microclimats à l'échelle de toute la vallée.

Deux stations de référence sont placées respectivement sur le plateau dominant la vallée (en dehors de l'influence de la ville) et dans le centre de la partie urbanisée de la vallée (sur le toit d'un bâtiment proéminent). Ces mesures sont complétées par celles prises à l'aéroport par le Centre National de Météorologie, ONM, et l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables, URAER.

A ces données de référence, s'ajoutent des mesures en continu et instantanées dans différentes configurations urbaines à travers des parcours urbains couvrant des typologies représentatives variées et exhaustives. Leur métrologie permet de mettre en évidence des variations climatiques sur ces parcours urbains. Pour se faire, des sites d'études sont choisis à travers toute la vallée en fonction de critères liés à la morphologie urbaine, la forme des versants et leur orientation, le type de couverture au sol (végétal ou minéral). La prise de mesure s'effectue grâce à des mini stations automatiques (HOBO) et des instruments portables de type TESTO.

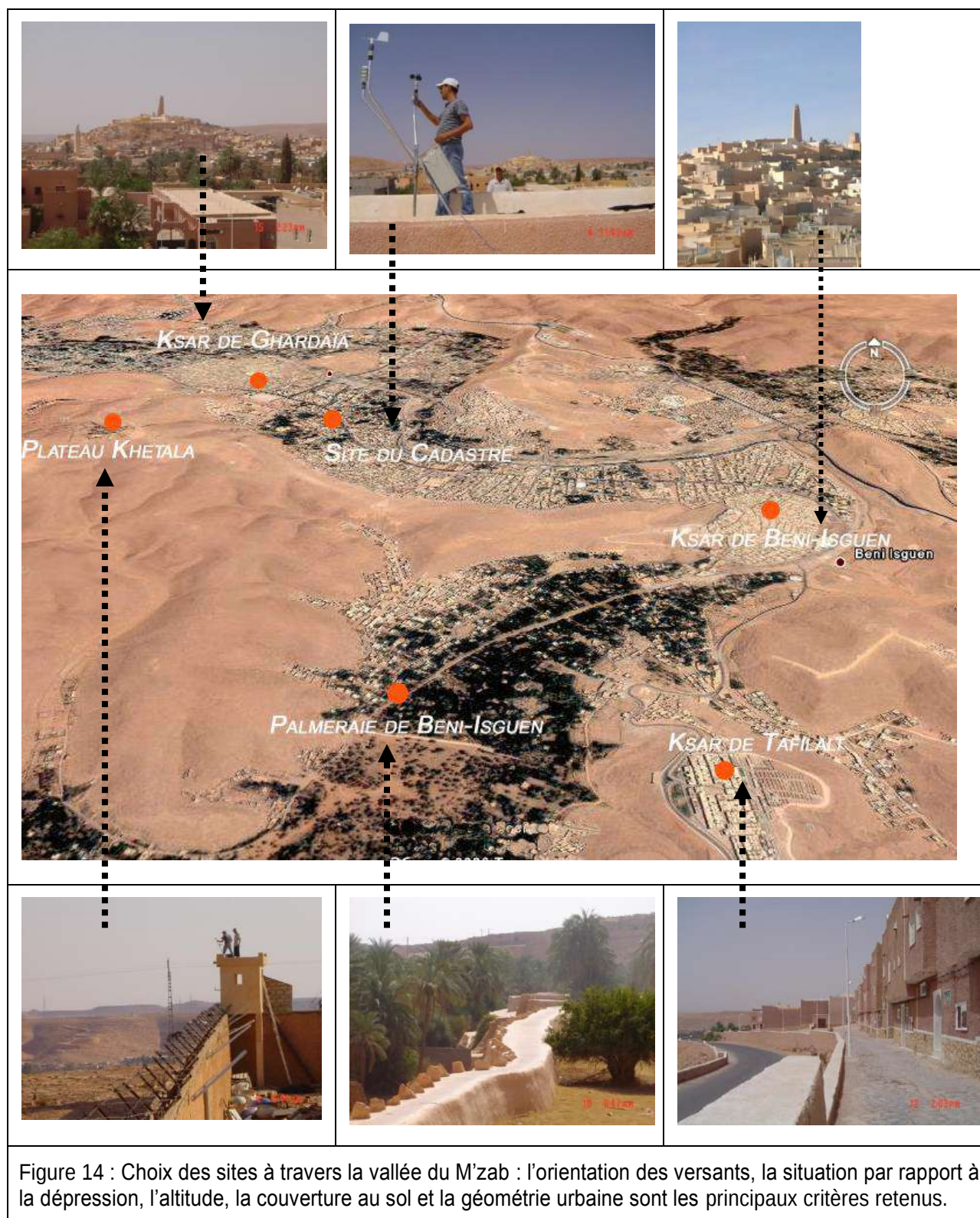
3.1.1. Choix des sites et parcours.

Les sites retenus sont les ksour traditionnels de Beni-Isguen et Ghardaïa, le nouveau ksar de Tafilalt, la nouvelle extension du ksar de Beni-Isguen et la palmeraie de Beni-Isguen. Les caractéristiques de chacun de ces sites se traduit comme suit :

- le Ksar de Beni-Isguen, édifié sur un versant orienté Est, se caractérise par une diversité dans les prospects urbains variant entre 3 et 6.2, et des altitudes différentes d'une rue à l'autre,
- le Ksar de Ghardaïa, implanté sur une colline, se caractérise par un tracé radioconcentrique et présente une diversité dans l'orientation des versants et des rues. Les prospects de rues sont compris entre 1.6 et 5.5, avec un développement des rues les plus larges dans la partie basse et plate du ksar,
- le nouveau ksar de Tafilalt, situé sur le plateau surplombant la vallée, constitue une expérience d'habitat participatif contemporaine. Son tracé est régulier et intègre la circulation motorisée. Les prospects de rues varient entre 1 et 3, les axes piétons étant caractérisés par les prospects les plus étroits ($H/L=3$). La nouvelle extension du ksar de Beni-Isguen se distingue par son tracé régulier et la présence de végétation. La géométrie urbaine est moins compacte, avec des prospects de rues compris entre 1 et 2,
- enfin, la palmeraie de Beni-Isguen, située dans la partie la plus encaissée de la vallée et qui se caractérise par une couverture végétale dense et la présence de points d'eau.

Les quartiers choisis sont des espaces essentiellement piétons et dénués de source de chaleur artificielle (circulation motorisée). Les microclimats urbains générés dépendent principalement des caractéristiques topo-climatiques, de la géométrie urbaine et des matériaux de construction utilisés.

Un parcours est établi dans chaque site en fonction des critères de l'orientation des versants et des rues, du rapport H/L et de l'altitude. Des parcours piétonniers sont ainsi obtenus intégrant des rues à orientation différente, à profils étroits et larges, horizontales et en pente, exposées et à l'ombre (passages couverts) et des espaces végétaux et minéraux.



3.1.2. Procédures de mesures.

Les campagnes de mesures s'établissent sur deux périodes de l'année caractéristiques des conditions extrêmes de confort : période chaude : juillet-août, période froide : janvier-février. Cinq campagnes de mesures ont été effectuées :

*"Living in Deserts: Is a sustainable urban design still possible in Arid and hot regions".
Ghardaïa, Algeria, 9-12 December 2006.*

Les deux premières campagnes de mesures, effectuées en juin 2003 et février 2004, sont basées sur des mesures instantanées selon la méthode des parcours urbains. Les mesures sont prises simultanément à travers les différents parcours selon un intervalle de temps régulier de trois heures. La durée moyenne de chaque parcours est de 80 minutes. La durée moyenne d'acquisition climatique pour chaque point urbain requiert 5 à 10 minutes pour la stabilisation des valeurs. Les campagnes de mesures, s'étalent sur une période de six jours et coïncident avec des périodes anticycloniques, sous des conditions de ciel clair dans la plupart des cas.

Les paramètres climatiques mesurés sont la vitesse moyenne et la direction du vent, l'humidité relative, les températures de l'air et de globe prises à 1.30 m du niveau du sol. La vitesse d'air moyenne est calculée sur un intervalle de temps de 60 secondes. Les températures de surface des murs et du sol sont prises à 0.50 m du niveau des surfaces. Les instruments de mesures sont protégés contre les rayonnements solaires directs par le moyen d'un abri ventilé confectionné en système de " brises soleil " à l'aide d'assiettes creuses en carton de couleur blanche.

Les trois dernières campagnes de mesures, réalisées en février et septembre 2005 ainsi qu'en août 2006, sont par contre basées sur des mesures en continu. Les données sont enregistrées automatiquement sur un intervalle de temps de 60 secondes. Les stations de mesures sont installées au-dessus des toits et dans les rues à une hauteur de 3 mètres au-dessus du niveau du sol. Deux protocoles de mesures différents sont établis :

- un premier protocole à l'échelle locale, couvrant toute la vallée du M'zab, qui intègre une étude des profils thermiques et de vent, effectués à différentes hauteurs grâce à des ballons gonflés à l'hélium sur lesquels sont fixés un instrument portable du type TESTO.
- un second protocole, à l'échelle micro climatique, limité au ksar de Ghardaïa et prenant en considération les particularités morphologiques des formes bâties (élément proéminent, passage couvert, asymétrie des profils, etc., ...).

Les campagnes de mesures coïncident avec des conditions de vents forts et des tempêtes de sables (septembre 2005 et août 2006).

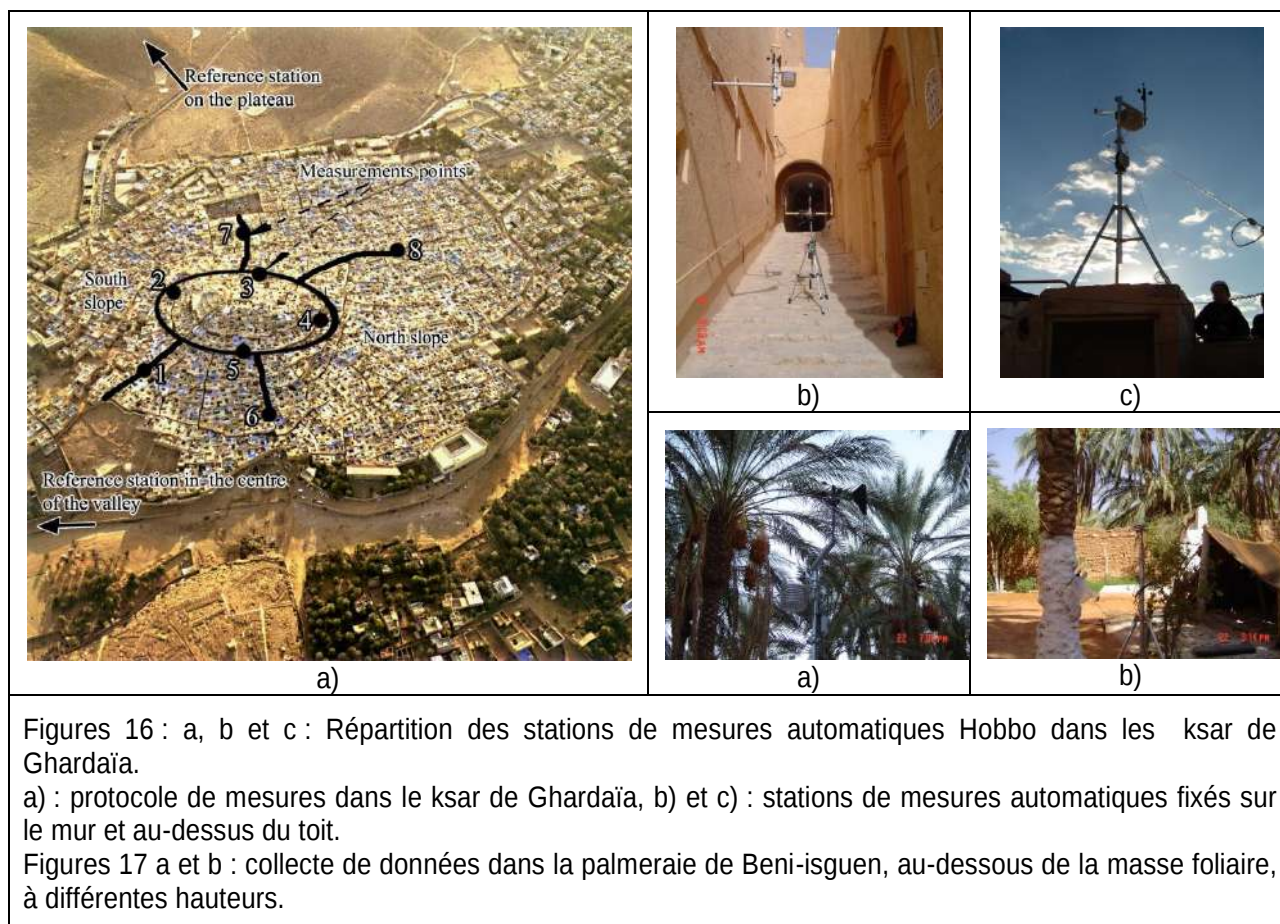


Figure 15 a : choix du point de mesures pour l'analyse du profil thermique et aérodynamique.



Figure 15 b: le dispositif utilisé pour les prises de mesures en hauteur : ballon météorologique

Protocole de mesures effectué en vue d'analyser d'éventuelles brises thermiques locales entre la palmeraie et le ksar de Beni-isguen.



3.2. CARACTÉRISATION DES CLIMATS AUX ÉCHELLES LOCALE ET MICROCLIMATIQUES : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.

3.2.1. CLIMAT DE LA VALLÉE OU CLIMAT LOCAL.

Les effets d'emboîtement des échelles climatiques nécessitent la compréhension des phénomènes locaux avant ceux, microclimatiques, liés à la morphologie urbaine. Cette connaissance de l'échelle locale est également nécessaire dans le choix des sites favorables à l'urbanisation.

Dans la vallée du M'zab, le climat local dépend essentiellement :

- de sa position en latitude qui détermine l'intensité de la radiation solaire reçue.
- des conditions du site et de l'environnement qui sont à l'origine de modifications climatiques particulières.

Aussi, pour bien comprendre la manière dont le site et l'environnement interviennent en interaction sur le climat, nous étudierons dans ce qui suit l'influence du relief, de la couverture végétale et enfin, de la ville.

a. Influence du relief :

Dans les régions des hamadas (plateaux), les vallées peuvent avoir un climat différent, ou tout au moins des nuances originales. Pour mieux les saisir, nous examinerons les éléments climatiques caractéristiques des diverses parties de la vallée, en l'occurrence : fond de vallée, versants et bord de plateau.

Conditions d'écoulements.

Les fonds de vallée.

Le caractère le plus frappant est l'importance des vents circulant dans le fond de vallée. Dans la plupart des cas, les conditions dans la vallée peuvent être similaires à celles des plateaux. Ces conditions sont fonction de la direction des vents synoptiques. C'est surtout lorsque les vents dominants sont orientés dans l'axe de la vallée que la pénétration du vent est la plus forte : les vitesses de vents ne sont réduites que de 20% comparées aux plateaux. Ces conditions existent essentiellement pour des vents de direction Sud-est. Dans ces conditions, la vallée peut canaliser le vent dont l'intensité devient supérieure à celle enregistrée sur les plateaux (Escourrou; 1983, Oke, 1987, Guyot, 1997).

En revanche, l'effet de protection existe lorsque les vents, dirigés perpendiculairement à l'axe de la vallée, soufflent du Sud-ouest et de l'Ouest. Dans ces conditions, les taux de pénétration du vent sont plus faibles, les vitesses de vent sont réduites et n'excèdent pas les 40% de l'écoulement global enregistré sur le site dégagé des bords de plateaux.

La palmeraie demeure néanmoins le site le mieux protégé du vent en raison de ses effets aérodynamiques. Elle se comporte en effet comme un brise vent efficace qui réduit les vitesses de vents de 75%.

En fait, même avec des vents perpendiculaires à l'axe de la vallée, à l'exception de la palmeraie, les vitesses d'air demeurent relativement importantes, supérieures à 2 m/s. Ces conditions s'expliquent par l'encaissement peu profond de la dépression et sa largeur de deux kilomètres. La vallée du M'zab est en conséquence exposée au vent quelque soit la direction de ce dernier. Si ces conditions sont favorables à la ventilation et la dissipation des polluants, elles demeurent dans de nombreux cas de figures contraignantes, notamment dans les conditions de froid en hiver.

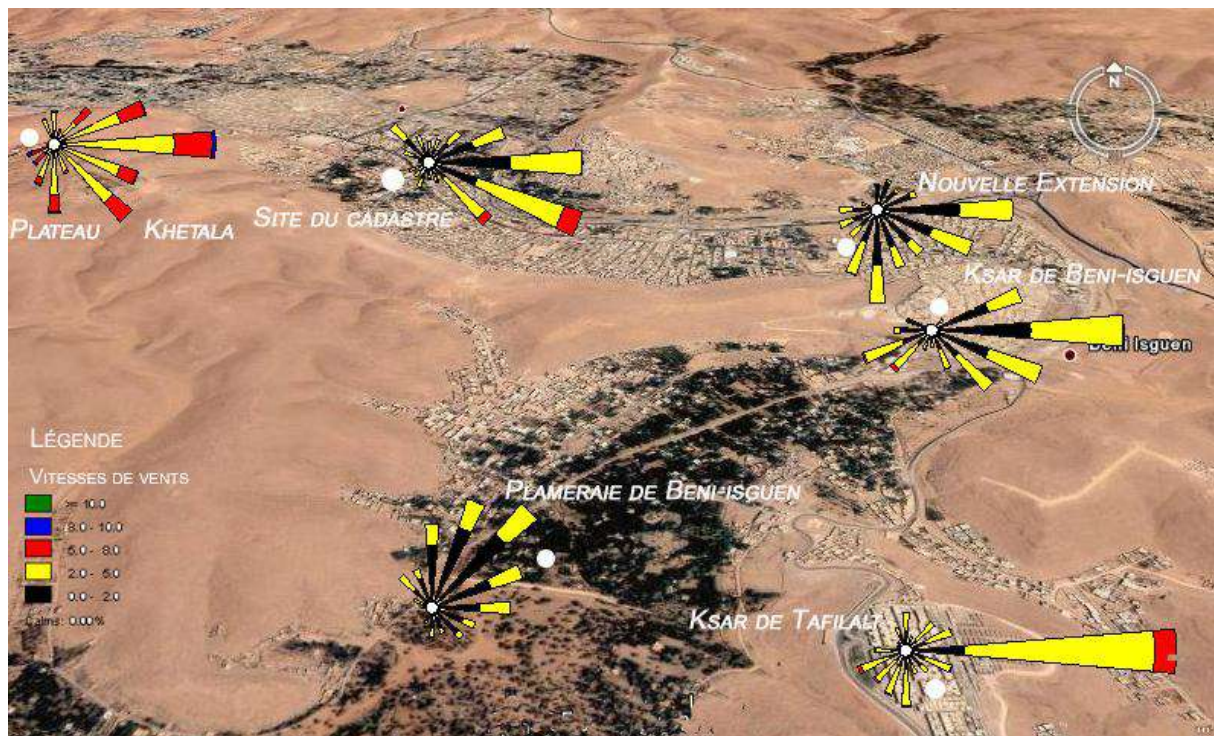


Figure 18 : Conditions aérauliques à l'échelle de la vallée du M'zab. Août 2006.

Les versants.

Sur les versants, les caractéristiques des écoulements d'air se manifestent différemment en fonction de la direction du vent. Si les versants face au vent enregistrent les valeurs les plus élevées, proches de celles enregistrées au centre de la vallée (70 à 80% du vent synoptique), sur les versants sous le vent en revanche, l'intensité des écoulements n'excède pas les 20 à 25 % du vent libre au-dessus des plateaux.

Les bords de plateaux.

Les conditions d'écoulements sur le plateau ne sont pas uniformes eu égard au relief ondulé des plateaux. En effet, les conditions aérauliques dépendent de l'emplacement du site par rapport aux reliefs environnants et la direction du vent. Ainsi, sur le site de Tafilalt, pour un vent Sud-est, la vitesse du vent peut être réduite de manière significative (65 % du vent). Toutefois, pour les autres directions de vent, les disparités enregistrées n'excèdent pas les 40 %. Les conditions aérauliques sont dans ce cas proches de celles d'un site dégagé sur le plateau.

Variation de l'humidité relative.

Hiver comme été, aux heures les plus chaudes de la journée, l'humidité relative tend à être homogène à travers toute la vallée, tant dans le couvert végétal que sur les plateaux rocheux, dénués de toute végétation. L'homogénéité de l'humidité relative et son faible taux s'explique par la très faible évaporation du milieu aride (importance des sols nus et des terrains rocheux) et la restriction de la transpiration foliaire dans la palmeraie, mécanisme qui permet aux plantes d'éviter le dessèchement.

En revanche, au cours de la nuit, et sous des conditions de vents faibles (vents inférieurs à 1 m/s dans la palmeraie), d'importants contrastes, de l'ordre de 16%, se produisent en hiver et en été, avec les taux d'humidité les plus élevés enregistrés dans la palmeraie en raison de la présence de plans d'eau et des mécanismes d'évapotranspiration (phénomène combiné de perte en eau par transpiration et par évaporation directe de l'eau du sol et par transpiration d'un couvert végétal dense, bien développé et surtout bien alimenté en eau).

Les écarts d'humidité observés sont néanmoins fortement réduits sous des conditions de vents d'une moyenne de 2 à 4 m/s dans la vallée.

Rayonnement solaire incident.

Hiver comme été, l'irradiation solaire globale est similaire dans les sites du fond de la vallée et des plateaux. Les éclairissements énergétiques instantanés sont intenses et varient entre 690 w.h/m² et 750 w.h/m² en hiver tandis qu'elles atteignent des valeurs maximales de 895 w/m²-910 w/m² en été.

Ces conditions impliquent des températures d'air élevées et similaires dans toute la vallée sous des conditions de vents faibles.

Températures de l'air.

D'une manière générale, les températures de l'air résultent du bilan radiatif au voisinage du sol. Au cours du cycle journalier, elles présentent de larges fluctuations en fonction de celles des différentes composantes du bilan d'énergie. Les plus grandes variations sont observées dans les régions désertiques où les amplitudes thermiques sous un abri météorologique peuvent atteindre ou dépasser 40°C (Guyot, 1997). Dans la vallée du M'zab, les amplitudes journalières observées entre les différents sites des plateaux et de la vallée varient entre 12 et 18°C selon les conditions de vent et la couverture nuageuse. Les plus grandes fluctuations sont observées en été, en l'absence de vent, sur le site dégagé des plateaux. En hiver, l'amplitude thermique est plus faible, de l'ordre de 12°C.

Au cours de la journée, la distribution des températures d'air au-dessus du plateau et dans le fond de la vallée est homogène et s'explique par les conditions aérauliques et de rayonnement proches. Des écarts de températures d'air ne sont enregistrés que sous des conditions de vents contrastées entre les deux sites des plateaux et du fond de la vallée. En effet, lorsque la vallée est à l'abri du vent (vitesses d'air moyenne de 1.7 m/s) et qu'en revanche, le plateau est fortement exposé (vitesses d'air moyennes de 3 m/s), les températures de l'air sont plus chaudes dans le fond de la vallée de 1.5 à 2.5°C, quelque soit la saison.

En revanche, le régime des températures d'air nocturnes est plus complexe. En effet, sous des conditions de vents faibles (vents dans la vallée inférieurs à 1 m/s), le fond de vallée se caractérise par des températures d'air inférieures à celles des plateaux. Ce phénomène d' "inversion thermique", caractéristique des climats de vallées (Escourrou, 1983, Oke, 1987, Guyot, 1997), se manifeste par un écoulement catabatique et une accumulation de l'air froid dans le fond de la vallée au cours de la nuit. L'intensité de l'inversion thermique est caractérisée par le gradient thermique vertical entre le fond de la vallée et les bords de plateaux. Elle dépend en partie de la largeur des dépressions. Dans la vallée du M'zab, l'inversion thermique n'est pas importante : 1.7°C en hiver pour des vitesses de vents moyens de 0.28 m/s. En été, les contrastes thermiques sont légèrement plus importants et sont estimés à 2.5°C

avec des valeurs maximales de 3.5°C, et des vents moyens de 0.8 m/s dans la vallée. Des mesures de profils thermiques effectuées en même temps que les mesures au-dessus des toits ont permis de montrer que cette inversion, de 4°C, s'observait jusqu'à une altitude de 140 mètres (hauteur limitée par notre appareillage de mesures).

Si la fraîcheur induite par ce phénomène (écoulement catabatique) est favorable au confort thermique d'été, il accentue par contre le stress climatique en hiver et augmente les risques de pollution (Escourrou, 1983).

Lorsque les vents sont forts, la couche d'inversion thermique ne peut se former et les températures d'air nocturnes tendent à être voisines.

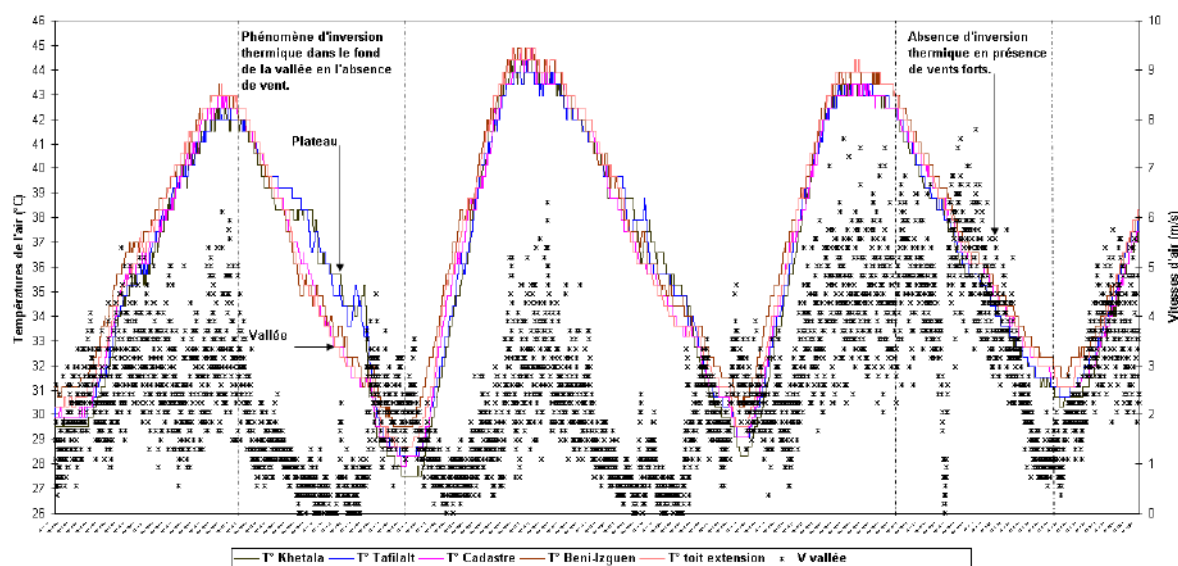


Figure 19 : Condition thermiques locales dans le fond de vallée et sur le plateau. Août 2006.

Dans les ksour de Beni-Isguen et Ghardaïa, les conditions thermiques prévalant sur les versants de différentes orientations, peuvent être très contrastées en fonction des conditions de vent. Les écarts les plus importants, de l'ordre de 2.5°C, sont enregistrés en hiver sous des conditions de vents forts, les versants face au vent étant plus froids. En été, les différences thermiques sont moins marquées et n'excèdent pas les 1°C pour des conditions de vent au-dessus des toits similaires. En l'absence de vents, les écarts de températures d'air sont en revanche insignifiants, les conditions thermiques étant similaires sur tous les versants.

En résumé, l'étude du climat local de la vallée de Ghardaïa met en exergue l'importance du facteur vent qui est à l'origine des contrastes climatiques les plus prégnants. Les principales conclusions que l'on peut retenir sont :

- une forte pénétration du vent qui prévaut dans la vallée, avec des versants face aux vents fortement exposés. Seuls la palmeraie et les versants sous le vent offrent des conditions de protection importantes,
- la modification des conditions aérauliques en présence sur les plateaux par des reliefs locaux,
- l'action du vent sur le régime de distribution des températures de l'air. Le vent constitue un facteur aggravant du confort en hiver. Son effet devrait par conséquent conditionner les choix d'implantation des sites. L'exigence principale est la protection contre les vents dominants, d'une moyenne de 4 m/s sur le plateau.
- enfin, la présence de phénomènes d'écoulements d'air catabatiques, phénomènes caractéristiques des vallées, et enregistrés en l'absence de vent. Ils sont favorables en été mais contraignants en hiver.

Parallèlement aux effets du relief, des phénomènes caractéristiques, étroitement corrélés au climat saharien, méritent d'être développés, notamment l'influence du couvert végétal.

b. Influence de la végétation :

La couverture végétale de la palmeraie va exercer une action sur le climat de la vallée par :

- sa rugosité qui a des effets sur la réduction de la vitesse du vent,
- son pouvoir d'absorption ou de réflexion de la radiation solaire, en grande partie lié à l'albédo. Il affecte directement les températures de l'air,
- sa capacité de stocker ou même de restituer l'eau, ce qui modifie l'humidité et la température de l'air.

Effet "Oasis".

L'effet "oasis" constitue un phénomène caractéristique qui résulte du contraste existant entre une zone humide ou irriguée et la zone sèche qui l'entoure (Oke, 1987). Cet effet est souvent recherché en vue de réduire le stress thermique en été. Selon plusieurs auteurs, l'effet "oasis" est maximum dans les zones désertiques (OKE, 1987, Guyot, 1997), mais il se manifeste également dès lors que l'on a un contraste entre les possibilités d'évaporation d'une zone donnée et la zone qui l'entoure.

Dans la vallée du M'zab, sous conditions de vents faibles (vitesses de vents dans la palmeraie inférieures à 0.5 m/s), les températures d'air nocturnes observées dans la palmeraie sont de 4 à 8°C inférieures à celle des plateaux et des sites urbanisés dans le fond de vallée. L'effet oasis du couvert végétal découle ainsi de l'évapotranspiration qui consomme une importante quantité d'énergie et refroidit l'air (Guyot, 1997, Escourrou, 1996). Par ailleurs, pour que l'effet oasis soit important, le couvert végétal doit être dense comme c'est le cas pour la palmeraie, l'analyse du tissu urbain mixte n'indique en effet aucune réduction du stress thermique, ni de jour ni de nuit.

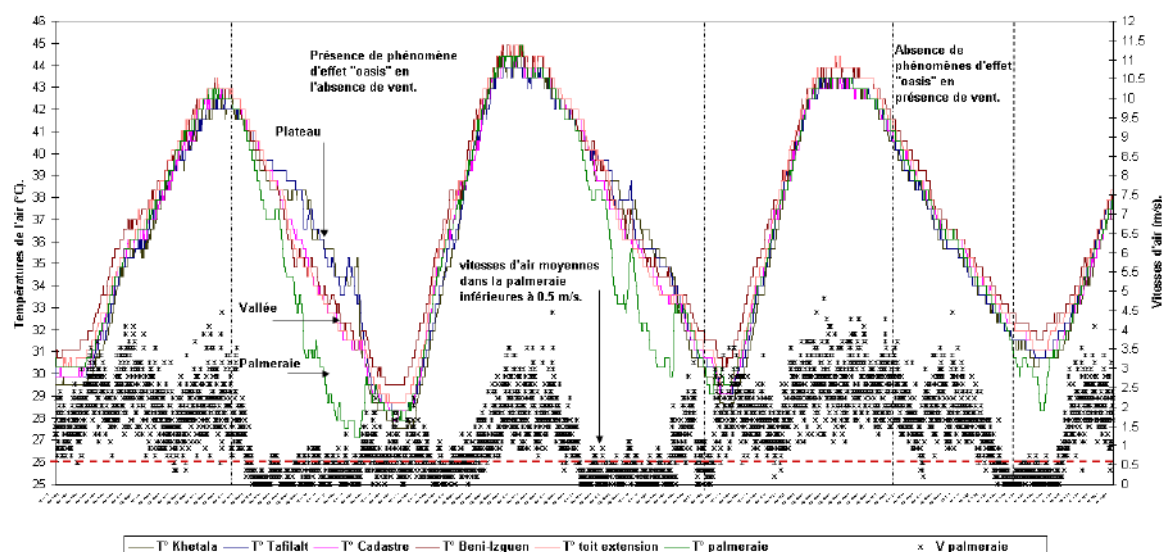


Figure 20 : Phénomène d'effet "oasis" dans la palmeraie au cours de la nuit.

En outre, si l'effet oasis est important au cours de la nuit, il est fortement réduit aux heures les plus chaudes la journée et dépend largement des conditions de vent. Lorsque les vents sont nuls, l'effet oasis est même inversé puisqu'on enregistre des températures de l'air dans la palmeraie supérieures de 1.5°C-2°C en moyenne. Certains auteurs expliquent ce phénomène par la sécheresse des sols et la restriction de la transpiration foliaire d'une part, les faibles vitesses de vent d'autre part (inférieures à 0.5 m/s dans la palmeraie) (Escourrou, 1997). En réalité, une oasis dans le désert correspond à une forte diminution de l'albédo qui passe de 0.4 pour un sable sec à 0.1 pour une palmeraie avec un sous-étage de végétation. Les feuilles de palmiers ne forment pas une couverture continue, les zones d'ombre sont nombreuses et absorbent au maximum la radiation. Un tel couvert végétal joue le rôle de piège à lumière. La fraction du rayonnement global qui est captée est ainsi accrue de 50 %. Ce supplément d'énergie solaire captée fait que la température de l'air à l'intérieur d'une oasis n'est généralement pas plus basse que celle que l'on a dans le désert environnant, elle lui est même parfois supérieure (Guyot, 1997). Ces résultats concordent avec d'autres recherches (Saaroni & al. 2004) qui

enregistrent une surchauffe de 1.3°C aux environs de midi dans un site végétal situé en plein désert du Néguev (kibbutz).

Ainsi, en zone aride, hiver comme été, l'effet de la palmeraie ou effet "oasis" est un phénomène essentiellement nocturne, plus important sous des conditions de vents faibles. Il est estimé à 3-8°C selon les caractéristiques des sites (plateau, fond de vallée). Aux heures les plus chaudes de la journée, l'effet oasis est minime sinon négatif et varie entre 0.5 et 2°C.

Brise thermique locale :

L'effet oasis, par gradient thermique horizontal, a souvent été associé à des vents thermiques locaux. Ces phénomènes ont souvent été décrits dans la littérature mais peu d'études systématiques ont en fait été réalisées. Selon Escourrou (1983), les mouvements de brises locales peuvent exister entre types de quartiers différents, entre espaces verts et quartiers bâtis. Ils se produisent en toute saison, lorsque les vents sont faibles, mais n'apparaissent pas de façon continue. Leur extension est limitée : quelques centaines de mètres.

A Ghardaïa, des brises locales, de faible extension spatiale et d'intensité moyenne comprise entre 0.5 et 1 m/s, sont observées au cours de la nuit. Ces brises soufflent de la palmeraie vers les sites urbanisés, plus chauds. Des mesures de profils de vent effectuées dans le lit d'oued séparant le ksar de Beni-Isguen de la palmeraie, permettent de mettre en évidence des mouvements d'air au voisinage du sol, de direction différente des vents en altitude. Ces mesures indiquent en effet qu'au dessus de 50 m du niveau de l'oued, le vent, de 2 m/s, est dans la même direction Ouest que celui des plateaux, alors que l'écoulement observé dans la palmeraie est orienté SSE, dans la direction du ksar.

Bien qu'il ne nous ait pas été permis d'effectuer des mesures sur une longue période, ces vents locaux semblent particulièrement sensibles aux vents synoptiques qui conditionnent les écoulements lorsqu'ils dépassent une valeur de 2.5 m/s (mesurés à 10 m du sol sur les plateaux). Nous retrouvons ainsi les conclusions d'Escourrou (1983) qui rapporte que les brises thermiques surviennent lorsque les vents en altitude sont inférieurs ou égaux à 2 m/s.

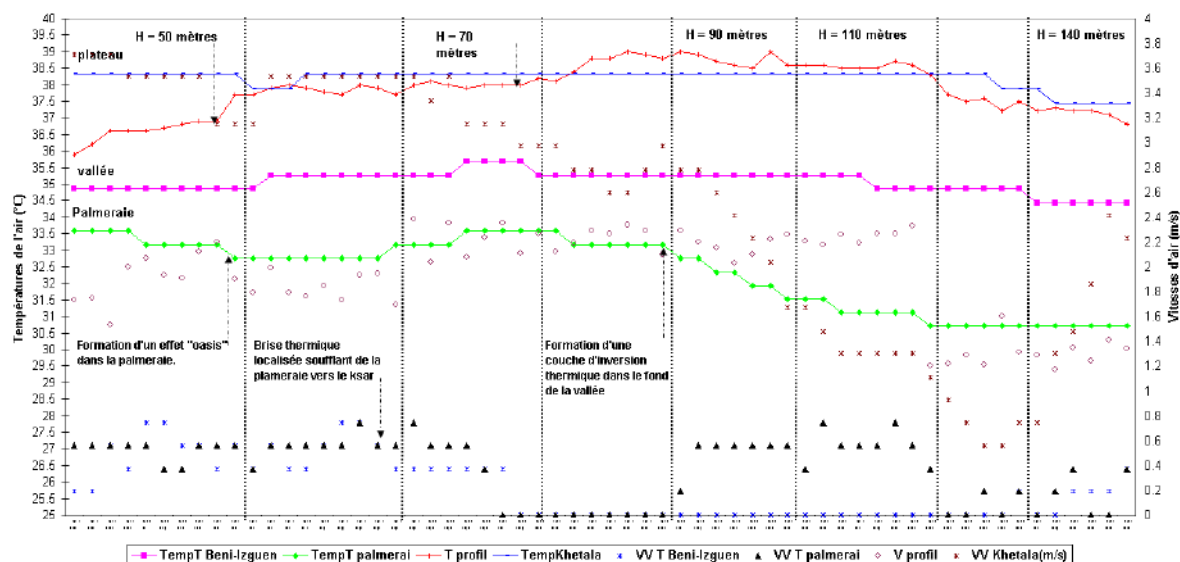


Figure 21 : Profil thermique et aéraulique mesuré dans le lit d'oued séparant la palmeraie du ksar de Beni-Isguen (nuit du 17 au 18 août 2006).

Contrairement au pouvoir de climatisation naturelle que l'on attribue souvent aux surfaces végétales, les résultats obtenus ne permettent pas de conclure à un quelconque effet de refroidissement étendu à l'échelle de la vallée. Nous pensons au vu des résultats obtenus qu'en milieu aride, l'effet oasis est un phénomène très local et ne permet pas de climatiser la vallée.

c. Influence de l'urbanisation.

D'une manière générale, la principale conséquence de l'urbanisation sur le climat est la modification du bilan radiatif et l'apport d'énergie lié aux activités humaines. Ces deux facteurs agissent sur les

températures de l'air et contribuent à la constitution d'un îlot de chaleur urbain. En zone aride, l'îlot de chaleur est souvent accompagné d'un îlot de fraîcheur (Givoni, 1989; Escourrou, 1991; Pearlmutter, 1998).

À Ghardaïa, l'énergie anthropique provient essentiellement du chauffage, mais également de la circulation urbaine. En été, elle est essentiellement due à la climatisation électrique.

Dans ce qui suit, nous examinerons en premier lieu les différences entre les rayonnements solaires de la ville et du site dégagé de l'aéroport. L'analyse des phénomènes d'îlots de chaleur et de fraîcheur urbains viendra en second lieu.

Rayonnement solaire.

Dans la vallée, site urbanisé où les véhicules sont les seules sources de pollution, le rayonnement horizontal global est altéré en comparaison avec le site dégagé de l'aéroport. Le taux de réduction dépend de la variation saisonnière. Il est plus important en hiver qu'en été. En hiver, sous un ciel clair et dégagé, le rayonnement global dans la vallée diminue de 15% tandis qu'il est réduit de 10 % en été. Lorsque le ciel est chargé de particules de sables (tempêtes de sable, vents violents), le taux de réduction n'excède pas les 4%. Dans ces conditions, le rayonnement direct est réduit et l'on observe une relative augmentation du rayonnement diffus.

Îlot de chaleur, îlot de fraîcheur.

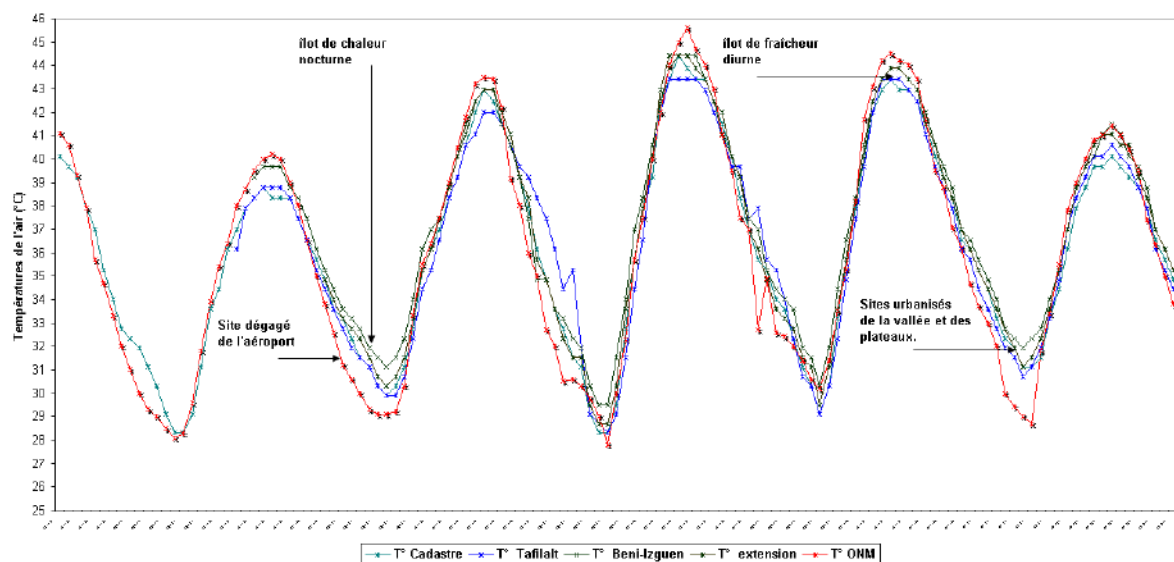


Figure 22 : Identification des phénomènes d'îlot de chaleur et de fraîcheur urbains dans la vallée du M'zab. Août 2006.

La comparaison des températures de l'air au-dessus des toits des sites urbanisées de la vallée avec le site dégagé de l'aéroport, montre des températures de l'air dans la ville supérieures au cours de la nuit et inférieures durant une partie de la journée. Ces résultats, représentatifs des villes du désert d'une manière générale, permettent d'identifier l'existence de deux phénomènes urbains que sont l'îlot de chaleur nocturne et l'îlot de fraîcheur diurne.

L'îlot de chaleur urbain s'explique par le stockage de la chaleur dans la masse bâtie au cours de la journée et sa restitution progressive au cours de la nuit (Oke, 1981). Il est plus important en été et varie

entre 2°C et 4°C dans la vallée. En hiver, il de l'ordre de 2°C environ.

Plus importante sous des conditions de vents faibles, l'intensité de l'îlot de chaleur urbain dépend également de la géométrie urbaine. En effet, dans les sites urbanisés de la vallée, les températures de l'air au-dessus des toits sont assez voisines. Une légère surchauffe est néanmoins observée au cours de la nuit dans le ksar traditionnel. Ce dernier, dense et compact, favorise un effet rayonnant nocturne plus important en raison de sa forte densité spatiale et sa compacité. "L'îlot de chaleur urbain" identifié en comparaison avec les nouvelles extensions, varie entre 0.8°C et 1.6°C et persiste tard dans la matinée (11h00 du matin). Il peut même se prolonger tout le long de la journée lorsque les conditions de vent sont faibles : vitesses moyennes dans le fond de vallée inférieures à 2 m/s.

Sous ces mêmes conditions aérauliques, la nouvelle extension, tissu moyennement dense, présente un comportement thermique intermédiaire entre le ksar traditionnel et le site du cadastre, caractérisé par un tracé géométrique moins compacte : le lotissement nouveau est de 0.4°C à 0.8°C plus chaud que le cadastre.

En opposition au dôme de chaleur nocturne, l'îlot de fraîcheur diurne résulte d'un effet de protection du rayonnement solaire dû à la combinaison de deux facteurs que sont la compacité du tissu urbain d'une part et l'albédo moyen d'autre part (Givoni, 1983, Escourrou, 1991). La forte densité des constructions laisse supposer en effet que la plupart des échanges radiatifs prennent place au niveau des surfaces des toits et non au niveau du sol et des murs. D'un autre côté, et en raison de la couleur claire des toits terrasses, l'albédo moyen peut être plus élevé qu'à la périphérie et peut réduire de manière significative l'irradiation solaire absorbée dans le tissu urbain. L'échauffement du substratum de la ville peut être par conséquent moindre que dans la campagne quasi-désertique. L'îlot de fraîcheur est plus marqué en hiver qu'en été et plus important en périodes de vents calmes. Il est estimé à 0.8°C-1.6°C en été mais peut atteindre les 2.5°C en hiver. À partir d'une vitesse d'air de 4 m/s dans la vallée, ces effets s'estompent, les différences induites par la compacité urbaine sont insignifiantes, les températures d'air tendent à s'homogénéiser.

Les modifications du climat dans la vallée du M'zab résultent à la fois de la topographie du lieu, du couvert végétal et de l'urbanisation. Tous ces facteurs se combinent pour donner un caractère original aux conditions climatiques de la vallée du M'zab.

d. Conclusion sur le climat local de la vallée du M'zab :

La compréhension des variations climatiques dans l'espace et dans le temps est absolument indispensable pour une meilleure adaptation de l'Homme à son environnement. À l'échelle locale, la nécessité consiste à créer un climat urbain global favorable, l'attention est à porter principalement sur le choix du site, l'affectation des espaces et la végétation. Dans la vallée du M'zab, la connaissance du climat local est d'abord subordonnée à l'étude du vent (intensité, direction et fréquence), qui est à l'origine des contrastes climatiques les plus prégnants. Les vents, d'une moyenne de 4 m/s, peuvent constituer un facteur de gêne important pour le confort humain. Ils peuvent atteindre 20 m/s et dans des cas extrêmes, 36 m/s, provoquant des tempêtes de sables qui constituent une des principales contraintes climatiques dans la vallée du M'Zab. La protection contre les vents forts, froids et humides en hiver, chauds et secs en été, constitue de ce fait la priorité dans l'aménagement urbain. Le rayonnement solaire, dans une moindre mesure, est également important, particulièrement pour le confort d'hiver.

En terme d'aménagement, le choix du site d'implantation, à niveau de végétation équivalente, n'est pas important eu égard aux conditions aérauliques similaires entre le plateau et le fond de vallée. Le site des plateaux est tout a fait viable moyennant des protections. Ces dernières peuvent être bâties ou végétales.

Les versants à l'abri des vents violents peuvent constituer cependant une alternative. Il est recommandé dans ce cas de s'implanter sur les versants Sud et les versants Est, à l'abri des vents d'hiver. Les versants nord, dans l'axe des vents froids et humides d'hiver (Nord-ouest et Nord Nord ouest), sont à éviter en raison des chutes de températures observés sur ces versants en hiver.

La protection des vents violents peut se traduire par la création de brise vent. Les couverts végétaux peuvent servir alors d'obstacle contre ces vents.

Pour préserver la palmeraie, il est en outre recommandé de s'implanter soit sur les pitons rocheux, soit sur les plateaux. Le contrôle du facteur vent interviendra alors au niveau de l'échelle de la conception urbaine.

La ville crée un climat local, à la fois du fait de sa position, du site qu'elle occupe, de la masse de ses constructions et des activités humaines qui s'y déroulent. Mais la ville crée aussi des microclimats qui dépendent davantage d'un effet de l'environnement immédiat que d'un effet général.

3.2.2. ÉCHELLE MICROCLIMATIQUE.

Il est parfois difficile de situer les effets du climat local par rapport à ceux attribués aux microclimats. Pour les distinguer, on peut définir le climat local comme un climat qui s'impose au-dessus de la ville à l'inverse des microclimats qui se créent par contre sur une partie très réduite du tissu urbain, sous la canopée, à l'échelle des espaces publics et des bâtiments. Le microclimat urbain varie d'un lieu à un autre essentiellement en fonction de la morphologie urbaine (forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments ainsi que les espaces qu'ils créent entre eux).

Dans la vallée du M'zab, la caractérisation des microclimats urbains est liée à deux caractéristiques physiques importantes que sont :

- l'orientation des versants sur lesquels sont édifiés les établissements urbains,
- le degré de compacité urbaine des différents quartiers de la ville, identifié par la relation entre la hauteur des bâtiments et la largeur qui les sépare.

Nous analyserons l'influence de chacun de ces facteurs sur les principaux paramètres climatiques qui ont un impact sur le confort extérieur.

a. Conditions de vent.

Effet de la morphologie urbaine sur le vent.

Les écoulements d'air sont très variables en fonction des différents quartiers considérés mais aussi d'une rue à l'autre au sein d'un même quartier. Ainsi, dans les tissus traditionnels, il existe de nombreuses zones de confinement mais également des parties fortement ventilées avec des conditions aérauliques proches de celles préexistantes au-dessus des toits. En fait, contrairement à ce qui est largement répandu dans la littérature (Coronel and al. 2001; Grundström et al. 2003) les écoulements d'air peuvent être importants dans les structures urbaines denses et compactes, du moins dans les ksour de la vallée du M'zab. Ils dépendent essentiellement de la direction de la trame des rues par rapport aux vents dominants.

Dans la vallée du M'zab, la distribution des vents dans les rues relève d'abord du climat local en accord avec les phénomènes d'exposition au vent des versants. En effet, dans les rues, la circulation de l'air est étroitement liée aux conditions aérauliques au dessus des toits qui, elles-mêmes sont tributaires des conditions à l'échelle de la vallée. Ainsi, les rues situées sur les versants face au vent se caractérisent par des vitesses de vent élevées et des directions stables, dans le même sens que le vent incident. Les rues des versants sous le vent enregistrent en revanche des vitesses d'air faibles et sont caractérisées par de fortes fluctuations liées à la turbulence du flux dans le sillage des obstacles urbains. De même, sur un même versant face au vent, les rues situées dans la partie basse de la ville, sur un relief plat, sont moins exposées au vent que celles qui sont situées au sommet, de manière étagée.

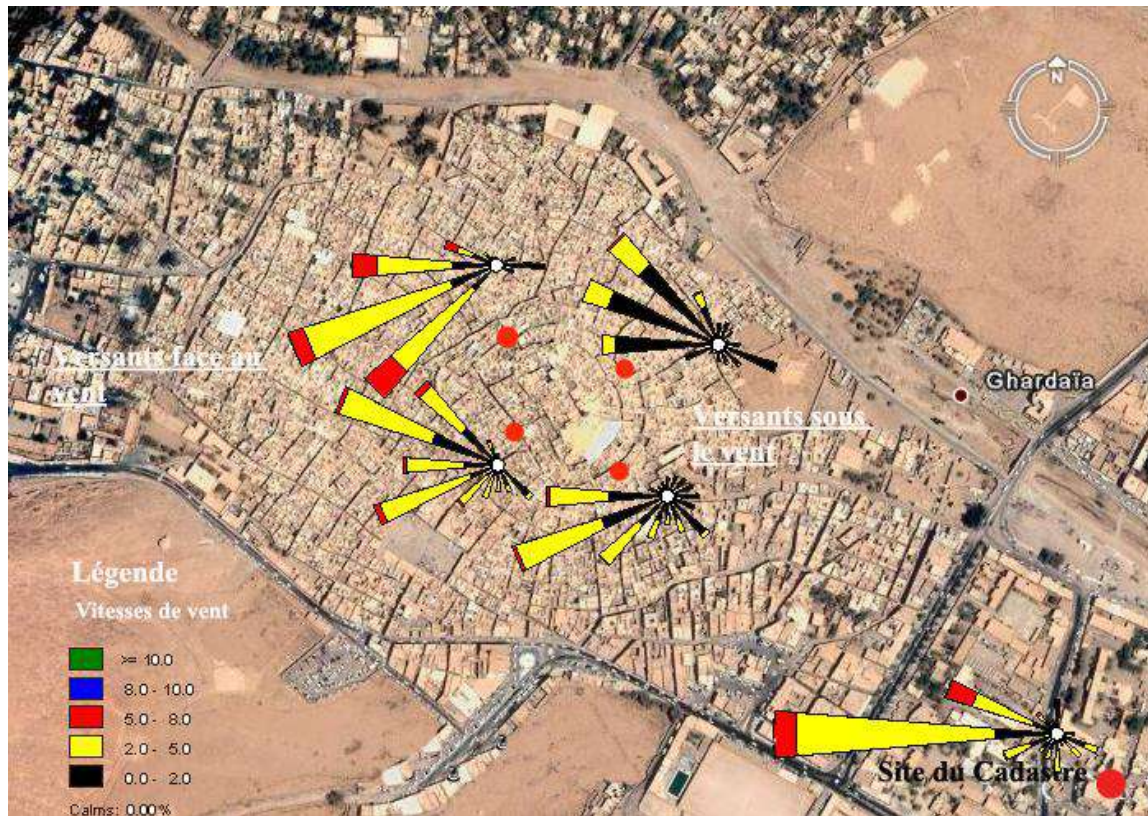


Figure 23 : La distribution des écoulements d'air au-dessus des toits, dans le ksar de Ghardaïa : la topographie du site semble dicter l'écoulement général dans le ksar.

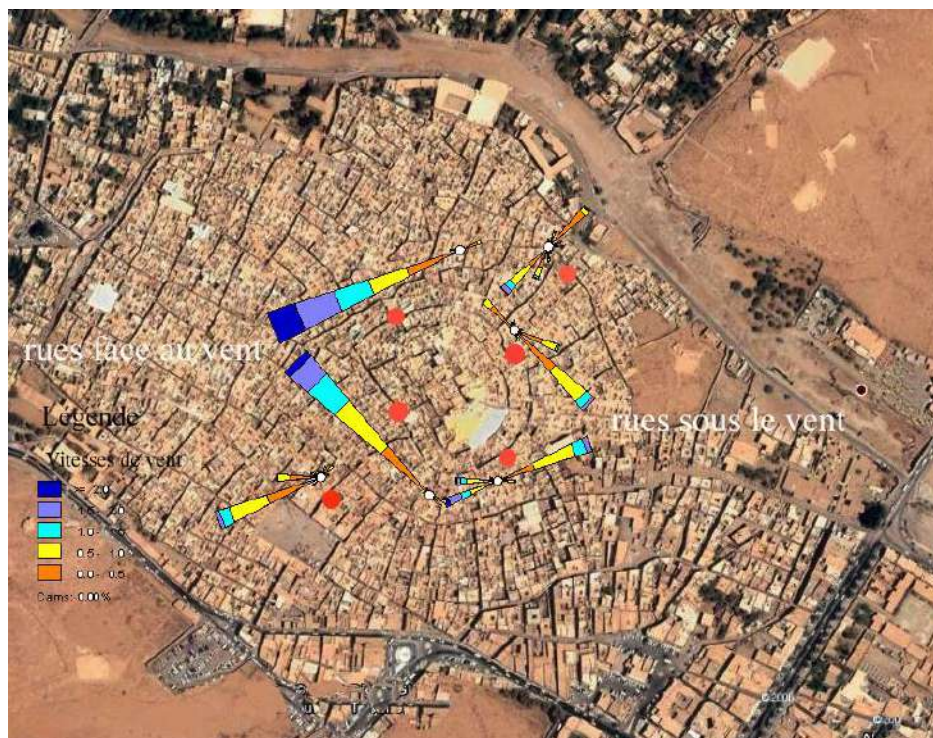


Figure 24 : La distribution des écoulements d'air dans les rues du ksar de Ghardaïa :

Les conditions locales, observées au-dessus des toits, préfigurent du comportement aérodynamique dans les rues. L'orientation des rues par rapport à l'axe des vents est néanmoins tout aussi importante que la topographie du lieu.

En ce qui concerne les sites des plateaux et du fond de la vallée, et pour des conditions aérauliques similaires au-dessus des toits, les écoulements d'air dans les rues varient en fonction de la direction des vents incidents par rapport à la trame viaire.

En effet, à une échelle plus fine, l'écoulement de l'air va se modifier d'une rue "canyon" à une autre rue d'un même site, en fonction de l'orientation des rues par rapport aux vents dominants. Cette orientation est déterminante dans la caractérisation de l'environnement aéraulique puisqu'elle favorise le déplacement des vents ou encore freine la pénétration de l'air à l'intérieur des rues (et a par conséquent un effet sur les températures de l'air). De nombreuses études se sont intéressées à de tels phénomènes à l'échelle d'une section de rue et ont déterminé différents modèles d'écoulements en fonction du prospect de la rue H/L et de l'angle d'incidence du vent ambiant sur l'axe du canyon (Hussain and Lee, 1980 ; Oke, 1988). Trois types d'écoulements ont été identifiés pour des directions de vents perpendiculaires : écoulements rasants, de sillages interférents et de rugosité isolée. D'autres recherches suggèrent encore que des facteurs additionnels à la géométrie relative du canyon sont mis en jeu dans les mécanismes d'écoulement d'air en milieu urbain. Elles soulignent en outre l'importance des effets de canalisation induits par les effets de coin. Elles démontrent en effet que des mécanismes d'advection se créent à partir des angles des bâtiments jusqu'au milieu du bloc, créant une zone de convergence au milieu du canyon (Yamartino et Wiegand. 1986 ; Hoydsh et Dabberdt.1988 ; Kovar-Panskus. 1999 ; Santamouris et al. 1999 ; G.T.Johson, L.J.Hunter, 1999).

Un facteur de "réduction" du vent de l'ordre de 2/3 a été défini par Nakamura et Oke (1988) dans une rue canyon de prospect égal à l'unité, sans tenir compte de la direction de la rue par rapport aux vents incidents. En opposition, des recherches plus récentes (Pearlmutter, 1998), démontrent que la réduction des vitesses de vent dans les rues dépend essentiellement de la direction de la rue par rapport aux vents incidents. Les réductions de vitesses de vent les plus importantes sont obtenues pour des directions de vents obliques par rapport à l'axe des rues tandis que pour une direction de vent parallèle, la vitesse du vent est moins réduite et peut être même plus élevée dans une rue profonde que dans une rue plus large.

Dans le ksar de Ghardaïa, pour des rues de prospect H/L égal à 3, les réductions les plus fortes, de l'ordre de 75% par rapport aux valeurs mesurées au-dessus du toit, sont observées pour des directions de vents obliques et perpendiculaires tandis que les plus faibles, comprises entre 44 et 50%, sont enregistrées pour des directions de vents tangentes. Dans certaines rues du Ksar, les vitesses d'air les plus importantes sont observées, non pas pour des directions de vent parallèles, mais des directions légèrement obliques, faisant un angle de 20° avec l'axe de la rue. Dans ces conditions, les vitesses d'air ne sont réduites que de 30 à 25%. Elles peuvent atteindre des valeurs moyennes de 2 m/s et des vitesses maximales instantanées de 6 m/s pour des vents au-dessus des toits d'une moyenne de 9 à 11 m/s.

Ces valeurs très fortes de vitesses d'air pour des profils étroits, s'expliquent essentiellement par la morphologie étagée du site interceptant les vents au-dessus des toits et redirigeant les vents au-dessus des toits dans les rues. En effet, sur tous les sites plats, de Tafilalt, de l'extension et de la partie basse des ksour, les réductions de vitesses d'air sont plus significatives et dépassent les 50%.

Ainsi, les mouvements d'air sont favorisés par le jeu des écoulements d'air induits par la topographie du site, l'étroitesse des rues et leur orientation par rapport aux vents dominants. Mais, d'une rue à l'autre d'un même quartier, et au sein d'une même rue, des phénomènes aérodynamiques, très localisés, existent également (effet de coin, effet de venturi, effet de sillage). Ils sont générés par des morphologies urbaines particulières. Le passage couvert, dispositif urbain représentatif des ksour du Sahara, constitue une ces particularités urbaines qui nécessitent une étude plus exhaustive.

Effet du passage couvert sur le vent.

L'influence du passage couvert se manifeste par une forte accélération de l'air. Ce phénomène, très local, se produit même lorsque les vents sont faibles, moins de 1 m/s en moyenne au-dessus des toits. Dans ces conditions, à la différence des rues ouvertes où les écoulements d'air moyens n'excèdent pas les 0.3 m/s, des mouvements d'air, d'une intensité moyenne de 0.6 à 0.7 m/s et d'une valeur instantanée maximale de 1.5 m/s, sont observés dans le ksar de Ghardaïa sous un passage couvert d'une longueur de 15 mètres. Ces vents légers, fortement appréciés en été, participent de manière non

négligeable à la ventilation de la rue.

Les survitesses engendrées dans ce genre de passage peuvent créer cependant un environnement déplaisant lorsque les vents synoptiques sont élevés. L'effet peut être radicalement aggravé lorsque la rue couverte est dans l'axe des vents forts et violents. Des survitesses instantanées de 8 m/s et d'une valeur moyenne de 2 m/s, peuvent alors se produire pour des vitesses de vent au-dessus des toits de même ordre de grandeur (11 m/s au-dessus du toit). Ces survitesses ne se manifestent néanmoins qu'au voisinage immédiat du passage couvert. À une distance de quelques mètres de la sortie du passage couvert, une décélération du vent se produit et les vitesses d'air moyennes n'excèdent plus les 1.3 m/s, pour des valeurs instantanées maximales de 4 m/s.

Grâce à ses effets aérodynamiques, le passage couvert peut constituer un moyen de ventilation des rues, en plus de l'effet d'ombre qu'il procure. Il faut qu'il soit dans un axe oblique ou perpendiculaire aux vents forts qui sont alors une source de gêne mécanique et thermique.

b. Rayonnement solaire.

Effet du prospect H/L sur le rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire incident dans les rues est fonction de la hauteur du soleil, donc de la variation saisonnière. En été, à Ghardaïa, le soleil, haut sur l'horizon, permet une pénétration maximale du rayonnement solaire même dans les rues les plus étroites (Arnfield, 1990). Ainsi, pour des prospects variant entre 2.7 et 6.2, l'éclairement énergétique incident dans les rues représente 70 % de celui reçu sur le toit. En hiver en revanche, le rayonnement solaire incident dépend du profil de la rue mais également de l'orientation des versants et des rues.

Effet de pente sur le rayonnement solaire.

L'effet d'orientation des pentes sur le rayonnement solaire est maximum au niveau des rues canyons. Il est cependant plus sensible en hiver lorsque le soleil est plus bas sur l'horizon. Dans ces conditions, dans le ksar de Ghardaïa, la rue du versant nord reçoit au plus 24 % du rayonnement solaire incident dans la rue du versant sud. À l'inverse, en raison de la hauteur du soleil, l'effet d'orientation des pentes est négligeable en été. Les éclairagements énergétiques reçus dans les deux rues sont identiques et relativement importants.

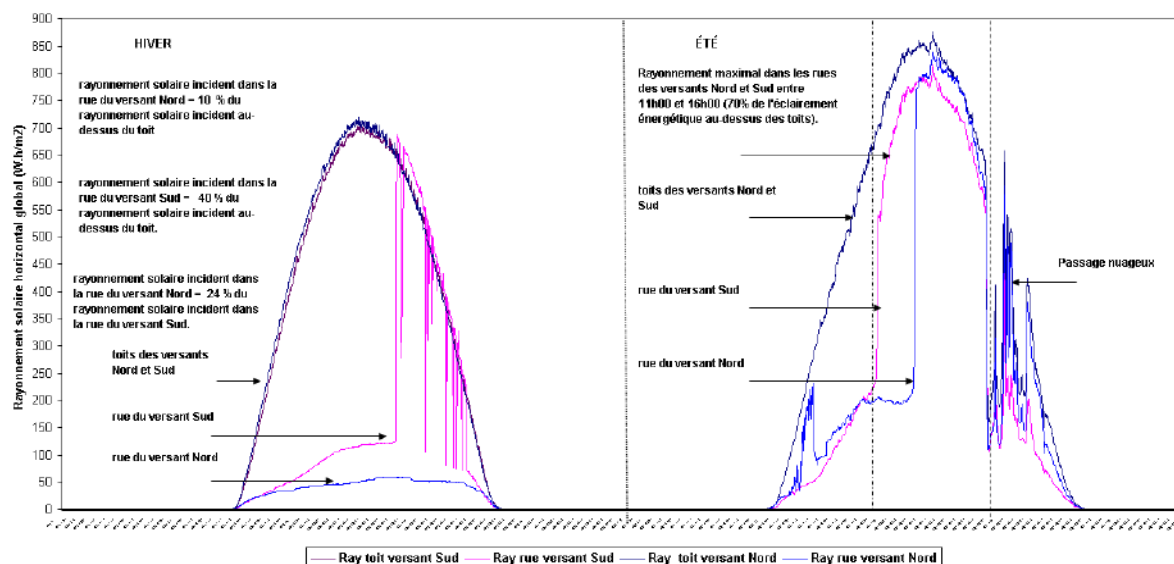


Figure 25 : La comparaison des éclairagements énergétiques incidents au-dessus du toit et dans les rues des versants Nord et Sud du ksar de Ghardaïa, en hiver et en été.

Selon la variation saisonnière, l'effet de pente peut être très important dans la caractérisation des microclimats propres aux rues et quartiers de la vallée du M'zab. Le régime de distribution des températures d'air et de surfaces en dépend.

c. Températures de l'air et de surfaces :

À l'échelle microclimatique, la morphologie urbaine commande deux phénomènes thermiques inéluctables que sont:

- la répartition des zones ombrées et ensoleillées,
- les champs radiatifs solaire et thermique qui en découlent.

Ces effets, liés à la géométrie des rues et leur orientation, peuvent être cependant amplifiés ou au contraire réduits selon la latitude (Arnfield, 1990) et l'environnement. À Ghardaïa, dans les rues canyons, les apports radiatifs sont fortement imprégnés des conditions locales et dépendent de :

- l'exposition du site d'implantation par rapport au soleil et aux vents dominants,
- l'orientation des rues par rapport au soleil et aux vents dominants,
- la géométrie des rues.

Dans ce qui suit, seront analysés en détail chacun de ces paramètres topographiques et morphologiques influents.

Effet du relief :

Au cours de la journée, lorsque la vallée est à l'abri des vents et que le plateau est fortement exposé, des contrastes thermiques apparaissent entre les rues du plateau et celles de la vallée, avec les valeurs de températures d'air les plus fraîches enregistrées dans les rues situées sur le plateau. Ainsi, en hiver, pour des vitesses d'air moyennes de 1.7 m/s et des vitesses instantanées maximales de 7.5 m/s dans la rue, les températures d'air à Tafilalt sont de 2.5 à 4°C plus froides que celles du ksar traditionnel, à l'abri des vents (vitesses moyenne de 0.6 m/s). Ces écarts sont moins marqués en été et varient entre 2 et 3°C pour des conditions d'écoulements similaires dans les rues.

Par ailleurs, au cours de la nuit et en présence de phénomène d'inversion thermique, la stagnation de l'air froid dans la vallée induit un refroidissement des températures de l'air beaucoup plus rapide au niveau des rues situées dans le fond de la vallée, indépendamment de leur facteur d'ouverture au ciel. Les rues situées sur le plateau présentent alors des températures de l'air plus élevées. En effet, la rue située sur le plateau, caractérisée pourtant par un facteur d'ouverture au ciel plus grand, est plus chaude que la rue du ksar traditionnel de 1 à 3°C. Les phénomènes topographiques l'emportent ainsi sur les effets de la morphologie urbaine.

Effet des versants sur les températures de l'air dans les rues.

En été, l'orientation des versants par rapport au soleil est négligeable sur la distribution des températures de l'air en raison de la géométrie solaire caractéristique de ces latitudes (32° N, hauteur maximale du soleil : 81°). Dans les rues des ksour, les températures de l'air sont relativement homogènes eu égard aux conditions de rayonnement solaire identiques sur les versants. L'orientation par rapport aux vents dominants est néanmoins importante dans la mesure où les rues face au vent, mieux ventilées sous des conditions de vents forts, sont plus fraîches de 1 à 1.7°C.

En hiver par contre, l'inclinaison et l'orientation des pentes a un très grand effet sur les températures de l'air diurnes, le rayonnement solaire capté dans les rues des versants nord et sud étant fortement contrastés. La rue du versant sud (l'adret), soumise à un éclairage énergétique trois fois supérieur, présente des températures de l'air supérieures de 1.5 à 2°C. Les contrastes thermiques les plus grands sont observés en l'absence de vents, leur présence ayant tendance à homogénéiser les températures de l'air.

Effet des versants sur les températures de surfaces.

L'effet de pente sur les températures de surfaces est identique à celui observé sur les températures de l'air : négligeable en été mais plus marqué en hiver lorsque le soleil est plus bas sur l'horizon : dans ces conditions, les rues situées sur l'adret présentent des températures de surface (façades et sol) plus chaudes de 2 à 4°C.

Hiver comme été, les températures de surface sont en outre influencées par l'exposition des versants par rapport aux vents dominants. Sous conditions de vents forts, les rues face aux vents présentent des températures de surface relativement homogènes alors que des contrastes plus ou moins importants existent entre les températures de surfaces dans les rues sous le vent. Les écarts thermiques entre différentes surfaces de rues sont liés cependant à d'autres facteurs que sont la

géométrie des rues et leur orientation.

Ces résultats mettent en exergue l'importance de l'exposition des versants par rapport aux vents et au soleil. En terme d'implication urbanistique, il est recommandé de s'implanter sur les versants sud afin d'assurer un maximum de confort thermique en hiver.

Effet de l'orientation des rues.

Effet de l'orientation des rues sur les températures de l'air.

En été, la distribution de la température de l'air en fonction de l'orientation ne révèle aucune influence de cette dernière. Les températures de l'air sont identiques entre les rues d'orientation différente. En hiver, en revanche, l'effet de l'orientation est non négligeable puisque les rues orientées Est-ouest présentent des températures de l'air supérieures de 1 à 2°C en comparaison avec celles des rues Nord Sud.

Effet de l'orientation des rues sur les températures de surfaces.

En été, en raison de la hauteur du soleil, le principal gain de chaleur des surfaces verticales provient du rayonnement solaire diffus et réfléchi. A l'inverse, les parois horizontales sont fortement exposées à l'irradiation solaire directe et enregistrent les valeurs de températures les plus élevées.

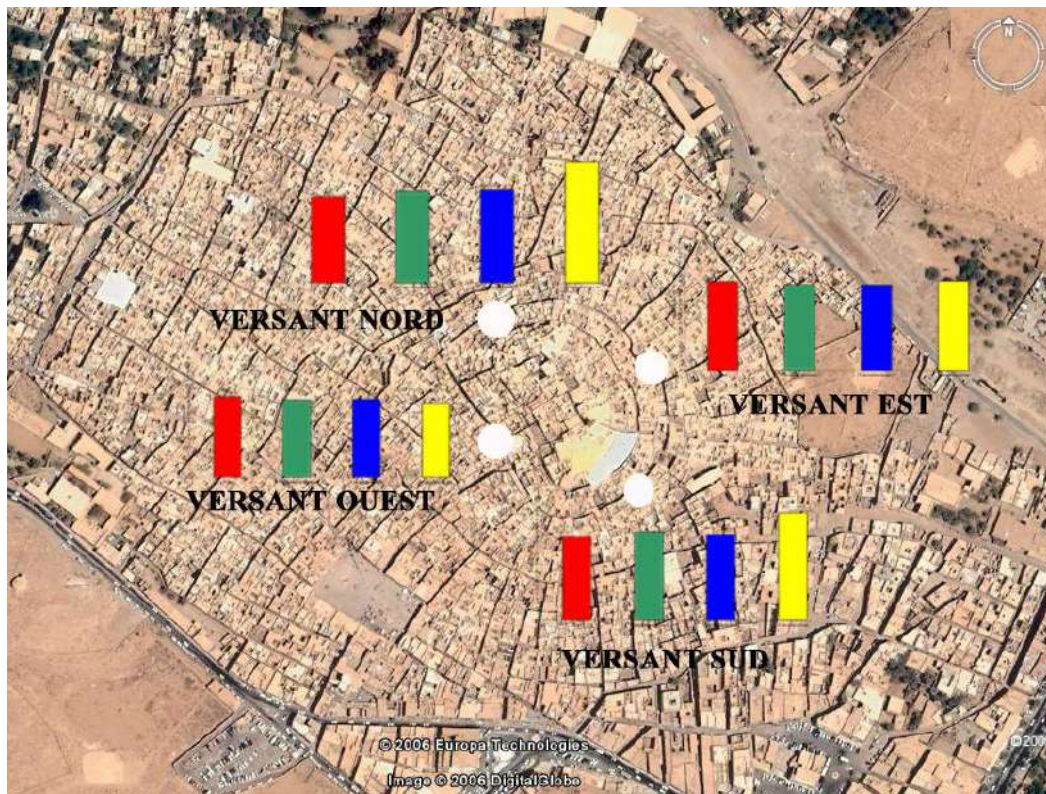


Figure 26 : Distribution des températures de l'air et de surfaces dans les rues du ksar de Ghardaïa en été : effet de pente négligeable, importance de l'orientation des rues.

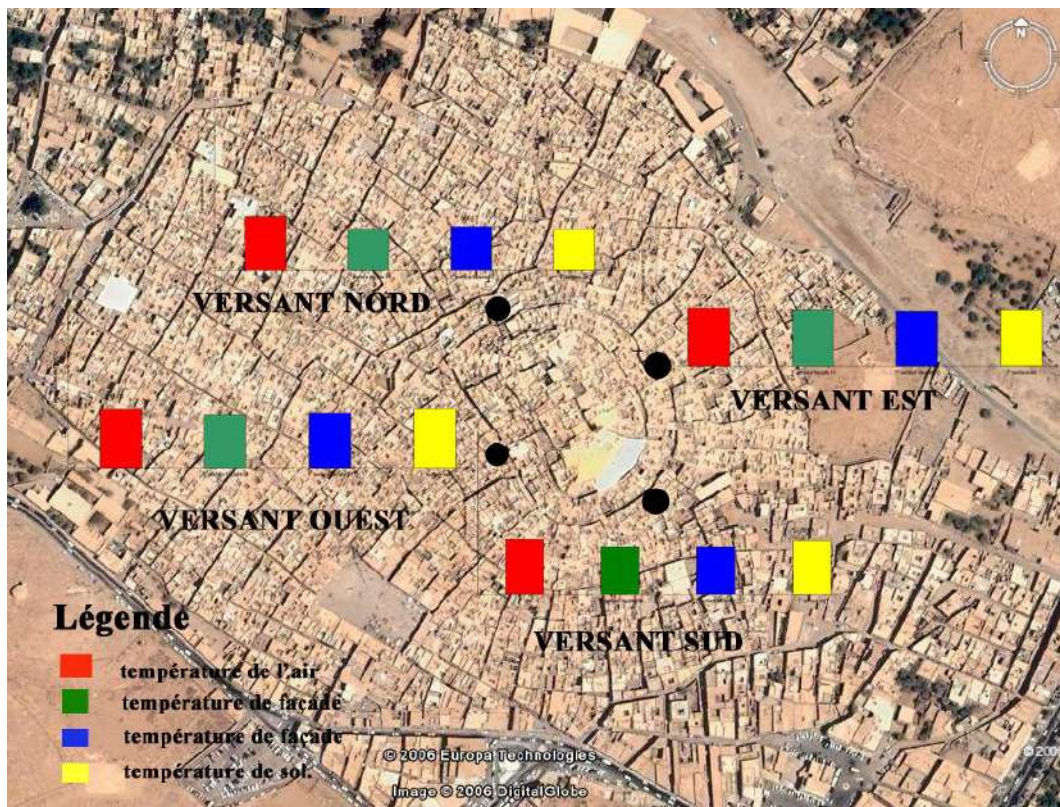


Figure 27 : Distribution des températures de l'air et de surfaces dans le ksar de Ghardaïa : effet de pente maximal en hiver.

Dans les ksour traditionnels, le régime de distribution des températures de surface est hétérogène et montre l'influence de l'orientation des rues, particulièrement sur les températures de surfaces horizontales : ces dernières sont soumises à une importante surchauffe du sol lorsqu'elles sont orientées dans la direction Est-ouest. L'amplitude thermique journalière est maximum au niveau d'une surface de sol d'une rue Est-ouest, elle peut atteindre 25°C.

Par ailleurs, des contrastes thermiques, de l'ordre de 20°C, peuvent être enregistrées aux heures les plus chaudes de la journée entre les surfaces de sol des rues Est-ouest et celles des rues Nord-sud. Une étude effectuée par simulation numérique confirme ces résultats. Elle montre que sous les latitudes moyennes, le sol d'une rue canyon ($H/L=4$), orientée Est-ouest, reçoit approximativement 50% du rayonnement incident sur une surface horizontale non obstruée (Arnfield, 1990). Les parois verticales reçoivent en revanche moins de rayonnements solaires mais semblent également influencées par l'orientation des rues. Les températures de façades bordant les rues Est-ouest sont de 3°C supérieures à celles des rues Nord-sud.

Les différences observées en été entre les éclaircissements incidents sur les façades et le sol d'une même rue induisent des contrastes thermiques entre les températures de façades et de sol. Ces écarts peuvent atteindre 14 °C dans les rues d'orientation Est-ouest mais n'excèdent pas les 3-4°C dans les rues Nord-sud. Ces dernières rues sont caractérisées par une plus grande homogénéité des températures de surfaces et offrent de meilleures conditions de confort en été.

En hiver par contre, la plupart des rues sont à l'ombre, l'influence de l'orientation des rues n'est pas significative. Les températures de façades et de sol d'une même rue sont pratiquement identiques. La différence de températures maximale n'excède pas 2°C. Effet de la géométrie des rues.

Influence du prospect sur la température de l'air :

De nombreuses études ont été consacrées à la variation des températures de l'air en fonction de la géométrie des rues (Oke, 1988, Arnfield, 1990, Eliasson, 1990/91, Rauzier et Berger, 1991, Santamouris and al. 1999). Les résultats ont démontré l'importance du prospect H/L , les

"Living in Deserts: Is a sustainable urban design still possible in Arid and hot regions".
Ghardaïa, Algeria, 9-12December 2006.

températures de l'air moyennes les plus faibles étant enregistrées dans les rues canyons les plus étroites. Rares, cependant, sont les recherches qui se sont intéressées à de tels phénomènes en milieu aride, notamment par des mesures sur site.

A Ghardaïa, l'étude de la variation de la température de l'air diurne en fonction du profil des rues montre des fluctuations de températures de l'air très faibles pour des prospects de rues compris entre 2.7 et 6.2 (Kitous et al., 2004). La différence de température de l'air n'excède pas les 1°C, hiver comme été. En revanche, les écarts thermiques peuvent être beaucoup plus importants, de l'ordre de 3°C, entre ces rues et un canyon de prospect égal à 1.7. Ces résultats concordent avec d'autres recherches qui ont démontré par simulation numérique que le prospect H/L doit être égal ou supérieur à 2, c'est à dire relativement important, pour qu'une baisse de température se fasse sentir dans un canyon au cours des mois les plus chauds (Grundström et al. 2003).

Ainsi, si la compacité urbaine est réellement efficace dans la réduction des températures de l'air, elle demeure néanmoins limitée à partir d'un certain seuil de prospect compris entre 1.7 et 2.7.

Par ailleurs, au cours de la nuit (en l'absence de phénomène d'inversion thermique dans le fond de vallée), la répartition des températures de l'air nocturnes laisse entrevoir une surchauffe de 0.5 à 1.6°C dans la rue du quartier traditionnel. Cet effet "canyon" s'explique par trois facteurs essentiels que sont :

- le faible niveau de ventilation naturelle caractéristique des configurations étroites d'une manière générale. L'air s'écoule au-dessus du secteur urbain sans le rafraîchir,
- la diminution du refroidissement radiatif de grande longueur d'onde dans la rue en raison du faible facteur d'ouverture au ciel (Oke, 1988, Grundström et al. 2003, Coronel and al. 2001),
- dans les "canyons", le rayonnement infrarouge est émis par diverses surfaces de bâtiment et de rue (surface horizontale du sol, surfaces verticales des façades). Les structures urbaines lâches, de profils de rues plus faibles et de facteurs d'ouverture au ciel plus grands, sont soumises à une plus forte perte de rayonnement de grande longueur d'ondes vers la voûte céleste et se refroidissent par conséquent plus rapidement,
- les propriétés thermiques des matériaux qui augmentent le stockage de chaleur sensible dans la rue pendant la journée et relâchent la chaleur stockée au cours de la nuit.

Influence du profil sur les températures de surface :

Les effets du prospect sur les températures de sol sont semblables à ceux qui sont observés sur les températures de l'air. Pour des rues de même orientation et de prospects variant entre 2.7 et 6.2, la différence de température de surfaces de sol n'excède pas les 4°C en été. Des différences plus significatives, de l'ordre de 15°C, apparaissent néanmoins entre ces rues et un canyon plus large, de prospect égal à 1.7.

L'effet du prospect agit en outre au sein même des rues, les écarts de températures de surfaces entre la façade ensoleillée et celle qui est à l'ombre varient en fonction du prospect : ils sont insignifiants, n'excédant pas les 2 à 2.5° dans des rues de prospects compris entre 2.7 et 6.2, tandis qu'ils atteignent les 8°C dans des rues plus larges de prospect de 1.7.

En conséquence, sous les latitudes moyennes, l'effet du prospect sur les températures semble limité en été. Dans ces conditions, seules les protections solaires horizontales permettent une réduction du stress thermique dans les espaces extérieurs. Le passage couvert, dispositif urbain local, constitue une de ces protections efficaces.

Le passage couvert : dispositif urbain performant.

Hiver comme été, les températures d'air les plus basses sont enregistrées au niveau du passage couvert. La différence de température de l'air entre le passage couvert et les rues exposées au rayonnement solaire est de 1°C en hiver tandis qu'elle varie entre 2 et 5°C en été selon les prospects des rues. De même, les températures de surface de sol, à l'abri de l'irradiation solaire directe, sont respectivement de 14 à 20°C plus basses que celles des rues ouvertes.

En plus de l'effet d'ombre qu'il procure, le passage couvert est à l'origine d'une accélération des vents qui peut être recherchée en été, lorsque les écoulements d'air sont faibles.

Conclusion sur les microclimats caractéristiques de la vallée du M'zab.

Dans la vallée du M'zab, le comportement des espaces extérieurs vis-à-vis du climat dépend de
"Living in Deserts: Is a sustainable urban design still possible in Arid and hot regions".
Ghardaïa, Algeria, 9-12 December 2006.

deux facteurs bien distincts que sont le relief d'une part et la morphologie urbaine d'autre part.

La topographie du lieu :

L'exposition des versants aux vents dominants détermine les conditions d'écoulements d'air dans les rues : les rues situées face au vent et disposées de manière étagée, enregistrent les vitesses d'air les plus élevées alors que celles qui sont à l'abri des vents sont caractérisées par des vitesses de vent très faibles. En terme d'implications urbanistiques, il est donc conseillé de s'implanter sur des versants à l'abri des vents dominants.

L'orientation des versants par rapport au soleil détermine le niveau d'ensoleillement des rues en hiver. Les rues des versants nord sont celles qui sont le moins bien exposées au rayonnement solaire direct. À l'inverse, les rues des versants sud sont soumises à un meilleur ensoleillement et enregistrent les températures de l'air les plus élevées. En terme d'implications urbanistiques, il est donc préférable d'éviter de s'implanter sur des versants nord.

Les phénomènes d'inversion thermique observés dans le fond de la vallée peuvent générer un refroidissement des températures de l'air dans le fond de vallée. Cet effet peut être favorable en été mais il est fortement contraignant en hiver.

La morphologie urbaine :

Les éléments morphologiques les plus influents dans la caractérisation microclimatique sont essentiellement la géométrie des rues et leur orientation.

Les écoulements d'air sont fortement corrélés à la direction des rues par rapport aux vents incidents. Les vitesses d'air les plus élevées sont observées pour des directions de vents parallèles à l'axe de la rue tandis que les plus faibles sont enregistrées pour un vent normal à l'axe de la rue. Une protection contre les vents consiste par conséquent à orienter la trame urbaine perpendiculairement à la direction des vents incidents.

Le contrôle thermique par l'ajustement des prospects présente un effet limité. Durant l'été, aux heures les plus chaudes de journée, la géométrie des rues n'est pas suffisante pour réduire l'intensité du rayonnement solaire direct. Seuls les passages couverts permettent une importante réduction du stress thermique dans les espaces extérieurs. Néanmoins, au courant de la nuit, le refroidissement nocturne est plus important dans les rues les moins profondes.

À l'inverse de l'effet du prospect, l'orientation des rues a une action directe sur le confort dans la mesure où elle agit sur les températures de surfaces des rues. Le choix de l'orientation des rues par rapport au vent et au soleil peut apporter des corrections importantes. Les rues Nord-sud sont à privilégier pour le confort d'été alors que les rues Est-ouest sont plus favorables pour l'accès au soleil en hiver.

4. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS GENERALES SUR LES CAS DES ZONES DESERTIQUES.

A partir de ce diagnostic sur les conditions climatiques dans la pentapole du M'zab, nous pouvons déduire un certain nombre de recommandations pour les aménagements urbains à venir ou la réhabilitation de bâtiments existants, nous avons structuré ces propositions selon quatre thématiques : topographie et végétation, morphologie urbaine, orientation et aménagement végétal.

Les résultats de l'enquête menée auprès des populations locales a montré l'importance et la primauté de certains phénomènes épisodiques tels que les vents de sable et inondations, rares mais violents, qui marquent le plus la conscience collective des populations vis-à-vis des paramètres climatiques. Souvent, ils conditionnent même les choix des implantations.

Parmi les différents paramètres climatiques, le vent apparaît comme la principale contrainte contre laquelle des mesures de protection devraient s'imposer dans les nouveaux quartiers.

1. Topographie et végétation : choix du site.

À Ghardaïa, le fond de la vallée est autant exposé aux vents que les plateaux. Le choix des plateaux comme site d'implantation de nouveaux quartiers comme Tafilalt n'est donc pas plus contraignant. Toutefois, la protection contre le vent est recommandée. Elle peut être obtenue en agissant sur la morphologie urbaine par la création de brises vents bâtis ou d'écrans végétaux.

Les sites les mieux protégés sont les versants sous le vent. Comme les vents dominants d'hiver sont associés aux conditions de froid, il est préférable d'éviter l'orientation Nord et Nord-ouest des versants. Pour un ajustement thermique, il est en outre recommandé de s'implanter sur les versants Sud afin d'assurer un maximum de confort thermique en hiver, les conditions thermiques d'été étant similaires sur tous les versants.

La palmeraie génère un réservoir de fraîcheur au courant de nuit. Elle constitue de ce fait une contrainte pour le confort thermique d'hiver mais procure des conditions extrêmement favorables au confort d'été. La migration saisonnière pratiquée par la population constitue le meilleur compromis entre le confort d'hiver et d'été, toutefois une situation intermédiaire peut constituer une alternative intéressante qui nécessite une exploration plus profonde.

Les propriétés de rafraîchissement thermique de la palmeraie sont fortement liées à la densité de la végétation. Elles sont insignifiantes pour un type de végétation éparse tandis que ses effets sont accentués pour des couverts végétaux denses. De tels couverts végétaux jouent néanmoins le rôle de piège à lumière pendant le jour et induisent des températures de l'air à l'intérieur de la palmeraie supérieures à celles du milieu naturel environnant. Les conditions prévalant sous le couvert végétal peuvent être alors plus gênantes qu'à l'extérieur. L'aménagement végétal doit tenir compte de cet aspect.

Enfin, la préservation de la palmeraie oriente un développement sur les sites des plateaux plutôt que dans les fonds de la vallée.

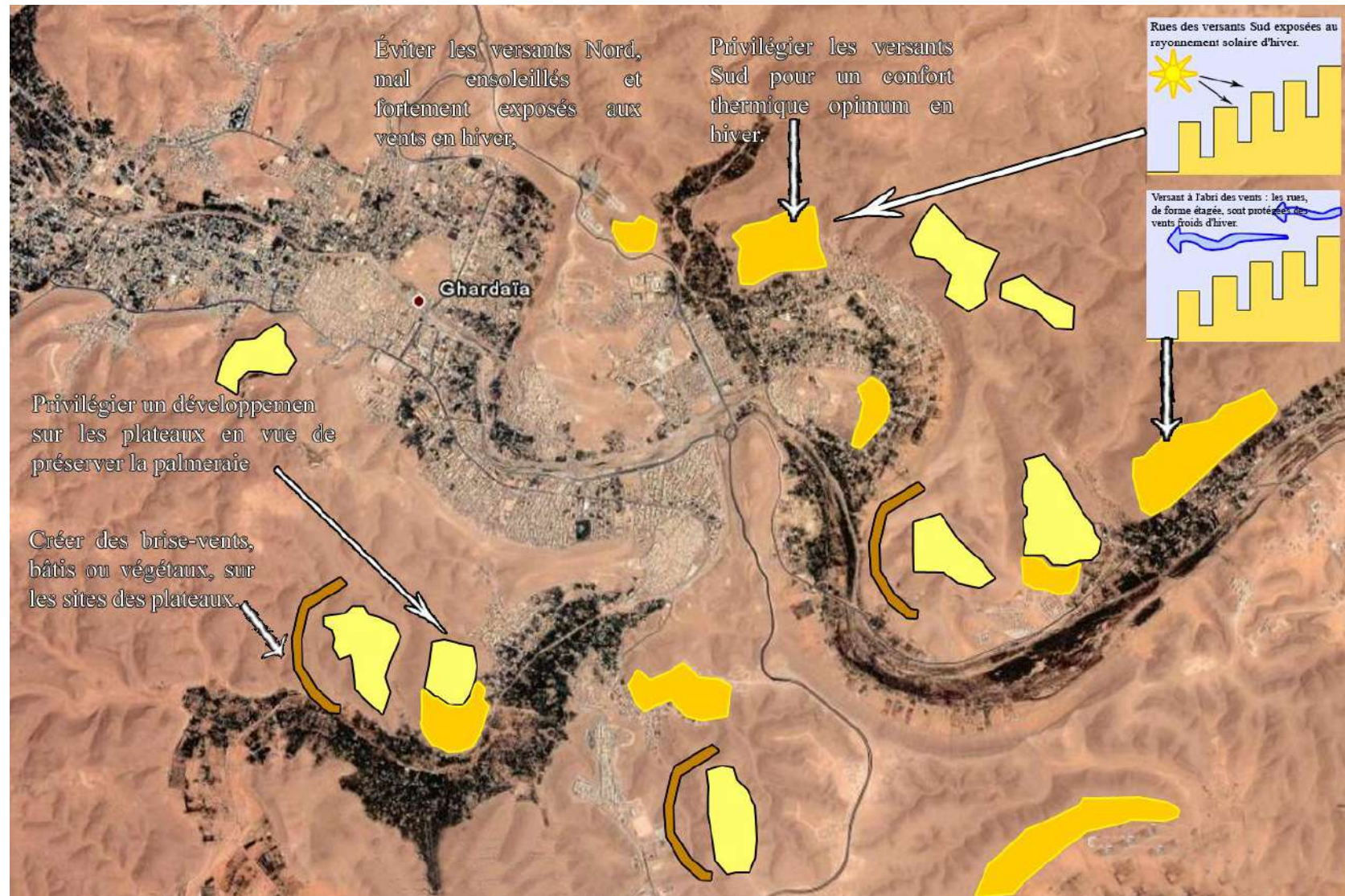


Figure 28 : Quelques recommandations pour le site de la vallée du M'zab.

2. Morphologie urbaine.

Compte tenu de l'aspect défavorable du vent en général, la morphologie urbaine devra aller dans le sens de la protection.

Recommandations par rapport au vent.

Les rues les plus profondes sont celles qui sont le mieux protégées des vents. Toutefois, lorsque ces rues sont soumises à certaines conditions (profil asymétrique face au vent, rue de contournement sur une colline, orientation dans l'axe des vents), elles enregistrent des vitesses d'air importantes.

Une disposition étagée (suivant un versant exposé aux vents) est à éviter en raison de la forte pénétration du vent même dans les rues les plus profondes.

Pour éviter des dispositions étagées, les rues de prospect symétrique sont à privilégier (le bâti doit compenser la topographie).

Recommandations par rapport à l'ensoleillement.

L'ensoleillement constitue un besoin qui peut être conditionné par les prospects de rues en hiver et par le biais de protections horizontales de différentes natures (minérales et végétales : (passage couvert, pergolas, espaces tampons, etc.) en été.

Pour des prospects de rues variant entre 2.6 et 6.2, le choix doit porter sur les moins profonds de telle sorte à assurer un bon ensoleillement des rues en hiver et refroidissement nocturne optimum en été.

3. Orientation.

Orientation des rues par rapport aux vents.

Afin de se protéger des vents, l'orientation des rues doit être perpendiculaire à la direction des vents dominants. Une direction parallèle à l'axe des vents est à éviter eu égard aux phénomènes de canalisation induits. Dans ces conditions, une orientation oblique de 20 à 40° par rapport à la perpendiculaire à l'axe de la rue peut constituer une alternative aux deux exigences conflictuelles que sont la protection contre les vents violents d'une part et la ventilation des espaces extérieurs d'autre part.

Orientation par rapport à l'ensoleillement.

L'orientation Est-ouest est à éviter pour le confort d'été en raison des surchauffes observées dans les températures de surfaces horizontales. Les rues Nord-sud offrent de meilleures conditions de confort en été. En hiver en revanche, pour un meilleur accès au soleil, il faut privilégier une orientation Est-ouest. Entre se protéger de la radiation solaire d'été et assurer un bon ensoleillement en hiver, l'alternative peut consister en :

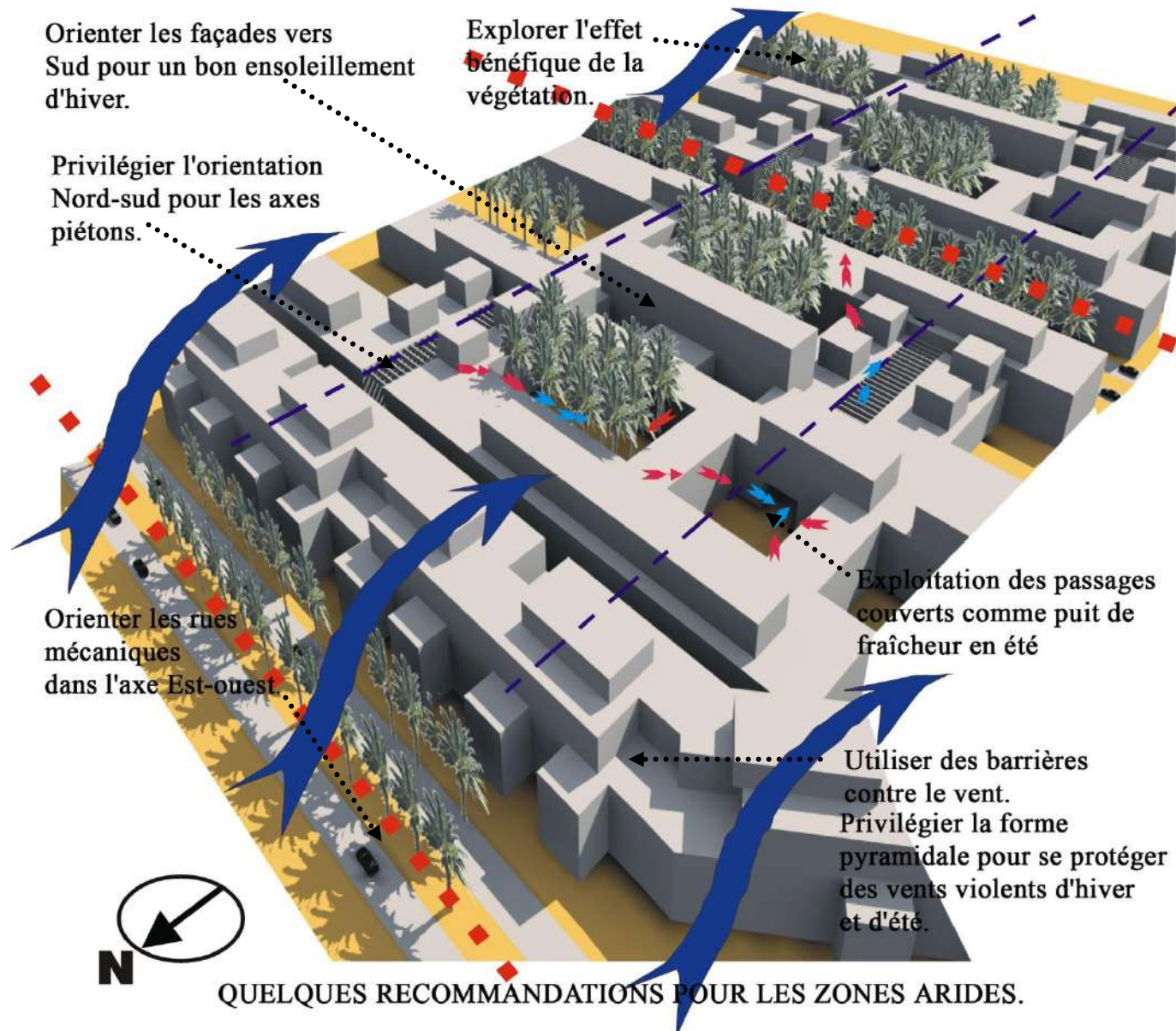
- une orientation des espaces de circulation en fonction de leur usage, ce qui revient à :
 - privilégier l'orientation des axes piétons principalement dans l'axe Nord-sud, en multipliant les protections horizontales : passages couverts, pergolas recouvertes de plantes grimpantes (vignes, chèvrefeuille, lierre, etc., ...). Les prospects de ces passages pourront être relativement profonds.
 - orienter les axes mécaniques selon un axe Est-ouest. Les prospects de ces rues seront plus larges, les façades sud bordants ces rues pourront profiter de la sorte du rayonnement d'hiver.
- une orientation intermédiaire de la trame viaire (Nord.est - sud.ouest) peut être également envisagée.

4. Aménagement végétal.

L'urbanisme saharien se caractérise par une juxtaposition spatiale des entités minérales (les ksour) et végétale (la palmeraie). Ce mode d'implantation a des attributs reconnus et prouvés quantitativement par notre étude, néanmoins, d'autres formes d'établissements peuvent être proposées. Elles consistent à intégrer le végétal dans les différents quartiers de la ville. La densité de la végétation doit être cependant assez importante pour pouvoir créer des effets de rafraîchissement thermique durant les nuits d'été. Par ailleurs, pour éviter les surchauffes constatées à l'intérieur du couvert végétal aux heures les plus chaudes de la journée, il faut éviter les effets de piégeage en créant :

- soit des couverts réguliers (non étagés) qui bloquent la pénétration du rayonnement solaire incident,
- soit une disposition des arbres selon des rangées relativement espacées qui permette la réflexion des rayonnements solaires.

À l'échelle de locale, des phénomènes d'effet "oasis" accompagnés de brises thermiques, se manifestent localement au cours de la nuit. Ces phénomènes sont tributaires des conditions de vents et ne se développent qu'en leur absence. Forts intéressants pour le rafraîchissement nocturne, leurs conditions d'existence sont toutefois rares et leurs effets demeurent très limités. C'est pourquoi, les conditions de contrôle climatique doivent être recherchés surtout au niveau microclimatique, aux échelles fines des fragments urbains (rue, quartiers) par le jeu des formes bâties et de l'aménagement végétal.



Perspectives :

Ce travail a été fondé méthodologiquement sur deux travaux de thèse de doctorat, Mme N.Daoudi et Mme S.Kitous, "Forme urbaine et environnement thermo-aéraulique en climat chaud et sec : Cas du ksar de Ghardaïa dans le Sahara algérien.", co-encadrées par deux structures de recherche, le LAE de l'École d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger et le GRECAU de l'école d'Architecture de Toulouse.

Il s'inscrit dans le cadre d'un projet de coopération interuniversitaire, financé par le CMEP (Comité Mixte d'Évaluation et de Prospective de la coopération interuniversitaire de la coopération franco-algérienne). Ce projet prendra fin au courant de l'année 2007. À ce titre, l'exploitation de l'ensemble des données disponibles n'est pas achevée.

Ce travail a nécessité un investissement important dans la métrologie climatique in-situ, investissement que nous comptons exploiter dans d'autres contextes, de plus nous souhaitons utiliser la simulation numérique pour compléter cette information, notamment à des échelles géographiques très fines.

Remerciements.

Ce travail n'aurait pu se faire sans le soutien des Ministères de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique algérien et français ainsi que du comité intergouvernemental algéro-français. Nous les en remercions profondément.

Nous tenons à exprimer notre immense gratitude à Mr le wali de Ghardaïa qui a facilité le bon déroulement de ce travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements aux :

- autorités locales de la wilaya de Ghardaïa,
- directeur du Cadastre de la commune de Ghardaïa,
- directeur de la station hertzienne de Khetala,
- directeur du l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables, URAER,
- association de protection de l'environnement de Beni-Isguen,
- association des quartiers de Ghardaïa,
- populations locales dont le sens de l'hospitalité est sans égale,
- étudiants de post-graduation de l'EPAU.

BIBLIOGRAPHIE.

1. Ali Toudert et al, outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni Isguen Algeria, 2005, CLIMATE RESEARCH, Vol. 28: pp 243-256,
2. A.J. Arnfield. – Street design and urban canyon solar access. In Energy and Buildings. 1990, n°14, pp.117-131.
3. ASHRAE 55-74 Standards, 1974; thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
4. G.S Brager, R.de Dear,.1998, thermal adaptation in the built environment: a literature review, pp 85-86
5. J.F. Coronel, S. Alvarez. – Experimental work and analysis of confined urban spaces. In Solar Energy. Vol.70, n°3, pp.263-273, 2001.
6. R. De Dear, 1999, adaptive Thermal Comfort in Natural and Hybrid Ventilation, ANNEX 35 HYBVENT
7. R de Dear et al, 1997, developing an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE RP- 884
8. C et P Donnadiou / H et J M Didillion, 1977, habiter le désert ; les maisons mozabites, Edition Pierre Mardaga, Bruxelles
9. N S Daoudi et al, 2005,, perceived indoor environment quality in a vernacular built form: The case study of the arid region of the M'Zab Valley, Algeria, CISBAT
10. N S Daoudi et al, 2005, perception of climatic constraints in arid regions. The case study of the M'Zab Valley in the Algerian Sahara, PLEA,

11. N.S.Daoudi. – thèse en cours.
12. Eliasson. - Urban geometry, surface temperature and air temperature. In *Energy and Buildings*, n°15-16, 1990/91, pp. 141-145.
13. G. Escourrou. - Le climat et l'environnement. Les facteurs locaux du climat. Edit Masson, Paris, 1983.
14. G. Escourrou. – Climat et microclimat urbains. pollutions atmosphériques et nuisances météorologiques localisées. institut d'aménagement et d'urbanisme de la région d'île de france,
15. G. Escourrou. - Le climat et la ville. Edit Nathan, Paris, col Géographie d'aujourd'hui, 1991
16. B Givoni,. 1976, man, climate and architecture,
17. B. Givoni. – Urban design in different climates. World Meteorological Organisation, 1989.
18. (Grundström et al. - Climat & Urbanisme. La relation entre le confort thermique et la forme du cadre bâti. Université de Suède, 2003.
19. G. Guyot. – Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes. Edit Masson, Paris, 1997, 505p.
20. G.W. Hoydysh, W.F. Dabberdt. – Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons. In *Atmospheric Environment*, Volume 22, 1988, pp.2677-2689.
21. G.T. Johnson, L.J. Hunter. – Some insights into typical urban canyon airflows. In *Atmospheric Environment*, 1999, n°33, pp.3991-3999.
22. S. Kitous et al. - Thermal behaviour of compact urban fabric in hot and dry climate: case study of M'zab Valley. Experimental results. In *Plea2004 - The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Eindhoven, The Netherlands, 19 - 22 September 2004.
23. S. Kitous. – Thèse en cours.
24. Kovar-Panskus & al. – Influence of geometry on the flow and turbulence characteristics within urban street canyons – Intercomparaison of wind tunnel experiments and numerical simulations.WWW.
25. M Mercier, 1932, a civilisation urbaine au Mzab, Ghardaïa la mystérieuse, Edition P et G Soubiron 391 p, Alger
26. Y. Nakamura. T.R.Oke – Wind, temperature and stability conditions in an East-West oriented urban canyon. In *Atmospheric environment* Vol.22. N°12, pp.2691-2700. 1988.
27. F. Nicol, 2004, fitting buildings to people: comfort and health, London Metropolitan University
28. T.R. Oke – Boundary layer climates. London and New-York: Methuen, second edition, 1987 (first edition 1978), 435p.
29. T.R. Oke. – Street design and canopy layer climate. In *Energy and Buildings*. N°11, pp.103-113, 1988.
30. T.R. Oke – Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. In *Journal of Climatology*, 1981, Vol. 1, pp.237-254.
31. D. Pearlmutter. - Street canyon geometry and microclimate: Designing for urban comfort under arid conditions. In *Environmentally Friendly Cities, Proceedings of PLEA'98*, James & James Science Publishers Ltd, Lisbon, Portugal, June 1998, pp163-166.
32. Rapport intermédiaire de recherche, 2004, projet CMEP, LAE/EPAU, GRECAU/EAT
33. A Rapoport, Pour une anthropologie de la maison, 1972, BORDAS, Paris.
34. A Ravérau, 1972, le Mzab, une leçon d'architecture, 1981, Sindbad, Paris
35. E. Rauzier and X. Berger. – Urban conception of the old city of Nice to provide summer thermal comfort. In *Proceedings of PLEA 1991*, Seville, Spain.
36. M. Roche, 1973, le M'zab, architecture ibadite en Algérie, Arthaud, Strasbourg
37. Saaroni & al. - The mixed results concerning the 'oasis effect' in a rural settlement in the Negev Desert, Israel. In *Journal of Arid Environments* 58, 2004, pp.235–248M.
38. Santamouris and al. – Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. In *Atmospheric Environment*, 33, 1999, pp.4503-4521.
39. J C Spagnolo et R De Dear, A human climatology of subtropical Sydney, 2003, International journal of climatology,
40. A Tablada, 2005, shape of new residential buildings in the historical centre of old Havana to favour natural ventilation and thermal comfort, PhD thes

