

3. Etude du microclimat

« C'est d'âme qu'il faut changer, non de climat ». Sénèque.

Cette troisième partie aborde l'étude du microclimat. Après un court développement sur les différents types de climats et l'importance d'évaluer les paramètres climatiques locaux, cette section met en évidence les caractéristiques d'un site qui influencent son microclimat. Elle analyse ensuite les spécificités du microclimat urbain : la pollution de l'air en ville, l'effet d'îlot de chaleur urbain, la modification du rayonnement solaire en ville, la modification des mouvements d'air en milieu urbain et enfin la modification de l'humidité et des précipitations en ville. Elle décrit les méthodes d'évaluation des paramètres microclimatiques en milieu urbain.

3.1 Paramètres microclimatiques

Le climat a toujours été considéré comme un des éléments majeurs de la dynamique et de l'ambiance d'une ville. Dans son livre « Principles of Human Geography », Ellsworth Huntington nous explique que le climat est lié à l'héritage racial et au développement culturel de telle façon que c'est un des trois facteurs principaux pour déterminer les conditions d'une civilisation (Huntington 1951). Le problème de contrôler l'environnement et de créer un microclimat confortable pour les activités humaines est aussi vieux que l'homme lui-même. La conception d'un microclimat de qualité est un des éléments clés de tout projet d'aménagement de notre cadre bâti. Vitruve le disait déjà dans De Architectura. L'urbanisme et l'architecture vernaculaire en témoignent depuis longtemps (Escourrou 1991).

Cependant, bien que l'adaptation des villes au climat soit ancienne, les quartiers modernes ont rarement été conçus en tenant compte du microclimat. Souvent, les zones urbaines contemporaines créent des espaces publics très inconfortables pour les piétons et énergétivores du point de vue du transport (utilisation de la voiture à outrance,...) et des consommations d'énergie du bâti (maisons quatre façades,...).

De plus, la complexité du comportement climatique conduit de nombreux architectes contemporains à négliger les qualités intrinsèques du climat (lumière naturelle, vent, ...) au profit de technologies plus adaptables mais peu écologiques (éclairage artificiel, climatisation, chauffage,...), générant des problèmes globaux pour notre planète (pollution,...) et des problèmes locaux pour le bien-être et la santé des habitants. Ces espaces modernes inadaptés aux cycles naturels génèrent des problèmes microclimatiques importants, souvent visibles dans nos villes; citons, par exemple, les rafales de vent qui atteignent les piétons aux environs de nombreux immeubles-tours.

Tout espace construit, intérieur ou extérieur, concrétise un microcosme en rapport plus ou moins étroit avec le milieu auquel il appartient. Dans le cadre du développement durable, il est essentiel de concevoir des lieux en concordance avec leur environnement, ce qui inscrit le microclimat parmi les dimensions fondamentales de l'architecture.

Nous désirons valoriser la conception de villes qui intègrent un rapport au climat, c'est-à-dire au soleil, à la chaleur et au froid, à la lumière et à l'ombre, au vent et à la pluie. Ceci implique un travail de conception qui requiert la prise en compte des limitations et des opportunités générées par le jeu des paramètres naturels (course du soleil, vitesse du vent,...). Une bonne conception adaptée au climat local alliée au contrôle des technologies nécessaires en accord avec ces données naturelles, présente l'avantage de réaliser de substantielles économies d'énergie, tout en améliorant le confort des citoyens. Cette conception climatique se traduit également par une diminution des quantités de déchets produits par le bâtiment au cours de son fonctionnement ou lors de sa démolition.

L'organisation urbaine locale et son microclimat ont une influence sur la qualité de l'air, de l'eau et les ressources du sol. La prise en compte du microclimat urbain est donc un des facteurs importants pour favoriser le bien-être et la santé des citoyens. Or toute ville devrait placer les objectifs de santé et de qualité de vie au cœur même de son processus décisionnel et de son développement.

De la même manière que les performances énergétiques d'un bâtiment dépendent du climat, le microclimat urbain influence fortement les consommations énergétiques d'une ville. L'interaction du climat et de la ville permet de limiter directement et indirectement de nombreuses consommations d'énergie. Les données microclimatiques ont une influence majeure sur la consommation du bâti en ville. Or, l'utilisation d'énergie dans les bâtiments compte pour 41% de la totalité de l'énergie consommée par l'Union Européenne et une proportion équivalente de la pollution générée (Steemers 2003).

L'environnement physique qui est façonné par les décisions d'urbanisme peut soit faciliter soit être un frein à un mode de vie sain. Le penchant des citoyens à pratiquer la marche, la bicyclette ou des loisirs en plein air est affecté par la qualité des pistes cyclables et des allées piétonnes de même que par la disponibilité des espaces publics de proximité. Ainsi, le contrôle des sources d'inconfort à l'extérieur favorise la marche, le vélo et l'utilisation des moyens de transport en commun. Ceci est un enjeu important vu que le transport urbain est le second facteur de consommation énergétique des villes et qu'il crée en outre des gros problèmes de pollution de l'air, de bruit et d'encombrement (Steemers 2003). Une politique de valorisation de modes de transport plus écologiques que la voiture passe donc par la requalification de l'espace public pour le piéton et le cycliste, ce qui implique d'étudier le microclimat urbain.

La relation que nous entretenons par rapport à notre climat est aujourd'hui fortement conditionnée par une attitude dominante des êtres humains face à la nature. Cette volonté de contrôler le climat est un comportement propre à la modernité, sous-tendu par l'explosion des technologies. La notion de développement durable nous motive à sortir de ce schéma où l'homme s'oppose à la nature. Il est temps que l'humanité s'engage dans une nouvelle relation de respect par rapport à la Terre et aux éléments naturels.

La conception microclimatique de nos urbanisations est un des moyens par lesquels une société peut inscrire sa relation à la nature, à la Terre et à l'univers. S'intéresser au climat, c'est remettre en valeur les éléments naturels : la lumière, l'air, l'eau, le sol,... c'est se rappeler que ces ressources sont un patrimoine collectif, qu'il est indispensable de gérer et de conserver en conscience. Rappelons que les conséquences sociales d'un manque de relation à la nature sont bien connues (dépressions, stress, violence), même si les mécanismes en jeu sont

complexes et impliquent aussi d'autres paramètres corrélés (surdensité, pollutions diverses,...). Il est donc urgent de réapprendre à concevoir nos villes avec le climat.

Ainsi, une conception urbaine qui participe à la création de microclimats de qualité est un atout majeur pour favoriser le développement durable de nos villes.

3.1.1 Les différents types de climats

Les principaux paramètres climatiques sont la température, le vent, le rayonnement solaire, l'humidité et les précipitations. Le climat d'un lieu peut être défini à trois échelles :

- le **macroclimat** est représenté par les caractéristiques climatiques principales d'un pays ou d'une surface de grande ampleur.
- le **mésoclimat** représente les paramètres climatiques régionaux influencés par les conditions géographiques locales telles que la topographie, la présence de masses importantes d'eau (mer, lac de grande taille,...), de végétation (forêts,...) ou de bâtiments (zones urbaines,...).
- le **microclimat** définit les conditions climatiques locales d'un site particulier. Il se réfère à des espaces de petites dimensions tels qu'un terrain, une rue ou une place. Il est influencé par le volume des constructions voisines mais aussi par la nature, l'orientation et l'inclinaison des surfaces, la présence d'arbres, etc. Chaque site est donc caractérisé par son microclimat.

A l'échelle macroclimatique, on peut déterminer quatre grands types de climats, classés selon la température et l'humidité : le climat tropical, le climat chaud et sec, le climat tempéré et le climat froid.

Les climats tropicaux sont caractérisés par une faible fluctuation saisonnière des données climatiques. La température de l'air varie le plus souvent entre 27 et 32 °C le jour et entre 21 et 27 °C la nuit. L'humidité relative tourne autour de 75 % toute l'année. Le rayonnement solaire est important, même s'il est partiellement atténué par la couverture nuageuse; le vent est faible et les précipitations sont importantes.

Les climats secs correspondent aux zones géographiques des steppes ou aux régions désertiques; ils sont caractérisés par une saison très chaude et une saison moins chaude. Pendant la saison très chaude, la température de l'air varie entre 43 et 49 °C le jour et entre 24 et 30 °C la nuit. Pendant la saison moins chaude, la température de l'air varie entre 27 et 32 °C le jour et entre 10 et 18 °C la nuit. Le différentiel de température entre le jour et la nuit est important; l'humidité relative est faible (10 à 55 %) et le rayonnement solaire est intense; les vents sont souvent chauds et localisés, porteurs de sable et de poussières; les précipitations sont très faibles (50 à 155 mm/an).

Les climats froids correspondent aux zones géographiques dont l'altitude est élevée ainsi qu'aux zones de toundra et au climat polaire. Ce climat connaît un été très bref et humide et un hiver long, très froid, sec ou enneigé.

Les climats tempérés présentent une saison chaude et une saison froide. Le climat y est relativement doux toute l'année. Les paramètres climatiques y atteignent rarement des valeurs extrêmes.

Au niveau mésoclimatique, cette classification en quatre grands types de climats peut être affinée par l'identification de cycles saisonniers tels que la mousson ou de caractéristiques géographiques comme la proximité des océans, l'altitude, la présence de forêts, etc.

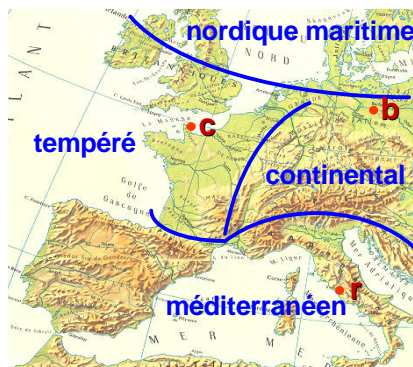
Les climats de mousson (appartenant aux climats tropicaux) sont par exemple caractérisés par une longue saison chaude et sèche et une courte saison chaude et humide. La température de l'air varie entre 32 et 43 °C le jour et entre 21 et 27 °C la nuit en période sèche. En saison humide, la température de l'air varie entre 27 et 32 °C le jour et entre 24 et 27 °C la nuit. Le différentiel de température jour/nuit est alors très réduit. L'humidité relative moyenne est faible pendant la saison sèche (20 à 55 %), mais augmente considérablement en saison humide (55 à 95 %). Le rayonnement solaire est intense. Les vents sont forts et continus essentiellement pendant la mousson. Les précipitations peuvent atteindre 200 à 250 mm pour les mois les plus pluvieux.

Un autre exemple serait celui d'un climat chaud et sec situé en bordure d'océan. Les paramètres climatiques subissent dans ce cas l'influence de l'évaporation de masses d'eau importantes. L'humidité remonte entre 50 et 90 %, ce qui réduit le différentiel de température entre le jour et la nuit.

L'Europe est bordée par des régions dont les caractéristiques géographiques sont très contrastées : l'océan Atlantique à l'ouest, la mer Arctique au nord, la masse continentale à l'est, la Méditerranée et les déserts nord-africains au sud. Ainsi, l'Europe, dont le climat macroclimatique est globalement un climat tempéré, offre des caractéristiques géographiques diverses qui induisent quatre grandes zones mésoclimatiques : le climat nordique maritime, le climat tempéré, le climat continental et le climat méditerranéen.

- Le climat nordique maritime est caractérisé par de longs hivers où les jours sont courts et le rayonnement solaire limité. Les étés y sont doux.
- La zone tempérée est caractérisée par des hivers et des étés doux ainsi qu'un rayonnement solaire limité. La Belgique a un climat tempéré : doux, humide et couvert. La composante diffuse du ciel est souvent très importante.
- La zone continentale est caractérisée par des hivers plus rigoureux mais bénéficiant d'une insolation plus importante. Les étés y sont chauds.
- La zone méditerranéenne correspond à la façade européenne du bassin méditerranéen. Les hivers y sont doux, les jours longs et l'insolation intense. Les étés y sont chauds.

Le schéma ci-dessous montre la répartition géographique des principales zones mésoclimatiques européennes. .



(Liébard & De Herde 2005).

Les paramètres microclimatiques correspondent aux conditions météorologiques réellement expérimentées sur un lieu particulier à l'échelle du bâtiment, de la place, de la rue, du terrain à bâtir,... Ces caractéristiques du microclimat local sont donc très dépendantes du contexte naturel et construit du site analysé.

3.1.2 Les données climatiques disponibles

Les données climatiques disponibles pour les concepteurs de projets architecturaux et urbains sont généralement relevées dans les stations météorologiques sur une période de 30 ans. Les températures moyennes horaires y sont mesurées sous abri à 1.5 m du sol ; elles sont donc indépendantes de l'influence du rayonnement solaire direct mais elles dépendent tout de même du type de ciel. Les relevés de vent effectués dans les stations météorologiques sont en revanche effectués à une hauteur standard de 10 m au-dessus d'un terrain plat et découvert.

Les données météorologiques représentent des valeurs moyennes pour la région locale dans laquelle cette station de mesure se situe. Ces données sont représentatives du mésoclimat local. Les différents paramètres mésoclimatiques moyens de la Belgique ont été précisés dans la seconde partie de ce doctorat et plus particulièrement dans la section traitant des critères quantitatifs du confort des personnes dans les espaces publics. Les paragraphes qui suivent sont centrés sur les paramètres microclimatiques, ce qui nécessite de tenir compte non seulement des données météorologiques régionales mais aussi des éléments spécifiques du site considéré.

Les programmes de calculs énergétiques des bâtiments se basent en général sur les données climatiques mesurées aux stations météorologiques. Cependant, le microclimat réel sur un site peut être significativement différent de celui mesuré à la station météorologique, ce qui implique que les simulations réalisées donneront des résultats substantiellement erronés, surtout si le projet est situé en milieu urbain où le microclimat est en général assez différent du terrain dégagé de la station météorologique.

De même, pour évaluer les probabilités du confort des personnes dans un espace public, il est indispensable de posséder les valeurs microclimatiques du site étudié et non les données météorologiques.

Si, à l'heure actuelle, les seules données climatiques dont nous disposons proviennent de stations météorologiques en site dégagé, comment tenir compte de l'effet de l'urbanisation dans notre conception architecturale et urbaine? Comment prédire et simuler ces effets? Il est indispensable de pouvoir évaluer le microclimat local d'un lieu, spécialement lorsqu'il s'agit d'un milieu urbain.

Peu d'études pour l'instant abordent la recherche de données microclimatiques réalistes pour la conception architecturale et urbaine. Dans cette thèse de doctorat, nous désirons offrir une méthode et des outils pour aider les concepteurs et les bureaux d'études à évaluer les paramètres microclimatiques qui interagissent avec leurs projets, à partir de la description du site et du projet ainsi que des données de la station météorologique la plus proche. Les outils d'analyse du microclimat d'un site sont de trois types :

- les mesures sur site,
- les simulations performantes,
- les outils simplifiés et les règles stratégiques d'aide à la conception.

Les outils simplifiés et les règles stratégiques d'aide à la conception sont les seules méthodes qui permettent de guider la conception architecturale avant même qu'un premier schéma ne soit dessiné et ils sont très pratiques lors de la première phase de conception. D'autre part, les contraintes financières et temporelles imposées à la majorité des projets ne permettent souvent pas d'utiliser des modes d'évaluation du microclimat plus sophistiqués, demandant un délai et un financement spécifique. Notre choix se porte donc dans cette thèse doctorale vers l'analyse et l'élaboration de méthodes simplifiées.

Une partie importante de cette thèse de doctorat consiste à élaborer des règles de conception à la fois quantitatives et qualitatives pour les différents paramètres microclimatiques. Ces outils et ces règles de conception ont pour objectif essentiel d'expliquer aux architectes l'influence des différents éléments en jeu sur le microclimat de leur projet.

L'hypothèse de travail choisie est que les observations moyennes horaires de la station météorologique peuvent être transformées pour approcher de manière approximative le microclimat du site, grâce à des relations générales liant les caractéristiques physiques du site et du projet au microclimat généré. Ces transformations doivent être faites successivement pour chaque élément climatique (rayonnement solaire, vent, température,...) pour passer de l'échelle climatique régionale à l'échelle microclimatique du site. Ces transformations sont définies de manière approximative par des abaques et des calculs réalisables manuellement (du genre de celui proposé pour le confort thermique quantitatif).

Nous pensons que, dans le contexte actuel, il est d'abord essentiel de sensibiliser les concepteurs à l'importance de l'étude du microclimat et de les familiariser avec les concepts de base d'une stratégie microclimatique. Cependant, dans des recherches futures, il serait judicieux de créer un logiciel permettant de réaliser ce genre de calculs automatiquement, ce qui permettrait aux architectes et aux urbanistes désireux d'utiliser un tel outil d'obtenir rapidement l'évaluation des paramètres microclimatiques une fois qu'un premier projet a déjà été élaboré.

Sur les cinq éléments microclimatiques importants qui affectent le bilan énergétique des bâtiments et des personnes, le rayonnement solaire et le vent sont les deux éléments qui sont les plus importants dans un climat tempéré, ce qui est le cas de la Belgique. Ce sont par ailleurs les paramètres climatiques les plus variables en fonction de la morphologie urbaine locale. En effet, la température et l'humidité peuvent être modifiées très localement par des aménagements appropriés mais restent le plus souvent constantes pour l'ensemble d'un quartier morphologique. Enfin, s'il est possible de se protéger localement des précipitations, il n'est pas envisageable de concevoir une morphologie urbaine dans le but d'en modifier les statistiques d'occurrence. Ainsi, le rayonnement solaire et le vent nous semblent les deux paramètres les plus importants à étudier en détail du point de vue microclimatique.

Vu que différents outils d'aide à la conception existent du point de vue du rayonnement solaire, nous nous contenterons de les résumer dans cette thèse. Par contre, l'étude de l'écoulement du vent autour des bâtiments semble être un sujet très peu étudié, malgré son importance significative sur le confort des personnes et les consommations énergétiques des bâtiments. C'est donc pour cette raison qu'une partie importante de ce doctorat sera dédiée à l'analyse des outils de simulation du vent et à l'élaboration d'outils quantitatifs simplifiés pour l'évaluation du vent autour des constructions.

3.1.3 Les éléments qui déterminent le microclimat d'un site

Chaque lieu spécifique développe sa propre identité microclimatique vis-à-vis de sa région et de son climat général. La topographie, la nature du sol, la végétation et l'urbanisme influencent entre autres les données microclimatiques d'un lieu. Dès lors, la conception des espaces publics nécessite de prendre en compte non seulement les données climatiques mesurées à la station météorologique la plus proche mais aussi les composantes de l'environnement construit et naturel du site étudié.

Lors de la conception d'un bâtiment ou d'un espace public, il est donc important d'évaluer l'impact de l'environnement existant sur le microclimat du site, afin de profiter au mieux des possibilités offertes par le terrain et de se protéger de ses inconvénients, ainsi qu'évaluer l'impact du nouveau projet sur ce microclimat, pour optimiser les avantages que le projet peut apporter au site et limiter les nuisances qu'il pourrait induire.

Au niveau local, les paramètres climatiques dépendent de:

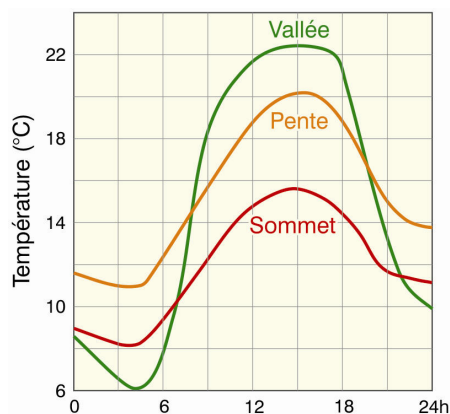
- **la topographie du site et de ses environs,**
- **la nature du sol sur le site et ses environs (mer, forêt, ville,...),**
- **l'aménagement du site et de ses environs (bâtiments, arbres, ...).**

Les points suivants vont analyser comment chacune des variables microclimatiques (la température, le rayonnement solaire, le vent, l'humidité et les précipitations) est influencée par ces trois éléments.

La température locale

Le relief influence la température par les variations qu'il induit de jour sur l'irradiation solaire des pentes en fonction de leurs orientations et de leurs inclinaisons ainsi que les variations qu'il crée au niveau du régime des vents.

La figure ci-dessous propose d'examiner l'évolution typique des températures extérieures sur 24 heures en trois points d'un relief montagneux, le premier étant situé dans la vallée, le second au milieu de la pente et le troisième au sommet.



(Architecture et Climat 1998).

On constate que de jour les vallées sont en général plus chaudes que les sommets. Par contre, de nuit, le soleil n'entrant plus en ligne de compte, l'air se refroidit. Or, l'air froid est plus lourd que l'air chaud. Pendant la nuit, l'air froid coule donc vers

la vallée, tout en remplissant les dépressions locales, et s'accumule au fond de la vallée. De nuit, ce sont donc les pentes qui sont les zones où la température est la plus élevée et les vallées où la température est la plus froide.

Le rayonnement solaire reçu par un espace public ou un bâtiment dépend de l'orientation et de l'inclinaison du terrain sur lequel il se trouve. Une superficie perpendiculaire aux rayons du soleil reçoit le maximum d'énergie solaire par unité de surface. C'est pourquoi les pentes orientées au sud (dans l'hémisphère nord) reçoivent plus de soleil que les autres orientations. Les pentes plus raides reçoivent généralement plus de soleil que les terrains plats sauf pour une pente orientée au nord, qui est la configuration qui reçoit le moins de rayonnement solaire.

Le sommet d'une colline est généralement l'endroit le plus venteux, ce qui refroidit la température de l'air à cet endroit. Les faces exposées au vent sont plus froides que les faces protégées du vent.

L'altitude a également une influence sur la température moyenne de l'air. La diminution de température est de l'ordre de 0,7°C par élévation de 100 m. Ceci explique qu'un même bâtiment situé dans la région de Spa aura une consommation de chauffage 60% plus élevée que s'il était situé à Bruxelles.

La température de l'air en un lieu dépend également de la nature des surfaces environnantes. En effet, la nature du sol est déterminante dans le phénomène de transfert de chaleur entre les surfaces du site et l'air, provoqué par la réémission sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde et par convection.

Les sols couverts de végétation (herbes, taillis,...) rafraîchissent l'air par évapotranspiration de l'eau. Les sols aménagés par l'homme et couverts par des matériaux à forte inertie (béton, pavés, briques,...) stockent la chaleur durant les journées ensoleillées et la rayonnent en début de soirée. Ils ont pour effet de retarder la chute de température nocturne. Les étendues d'eau stockent de grandes quantités de chaleur avec aisance. A l'inverse des sols urbanisés qui s'échauffent et restituent la chaleur rapidement, l'eau emmagasine et rend la chaleur lentement. L'eau agit comme tampon thermique en réémettant la chaleur par rayonnement et convection pendant la saison froide. Elle réduit donc les variations climatiques saisonnières. C'est pourquoi il fait plus chaud en bord de mer que dans une zone continentale en hiver, à l'inverse de l'été où il fait plus chaud à l'intérieur des terres qu'à la côte.

La température d'un lieu est aussi influencée par l'aménagement du sol à cet endroit : bâtiments, arbres,...

En ville, les apports gratuits provenant des activités humaines (véhicules, industries, chauffage, etc...) s'ajoutent à la présence de matériaux à forte inertie pour réchauffer l'atmosphère. La température de l'air en ville est en moyenne sur l'année de 0.5 à 3°C plus élevée qu'en site dégagé. C'est ce qu'on appelle l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Dans les régions fortement boisées, le feuillage des arbres intercepte de 60 à 90% de la radiation solaire, empêchant l'augmentation de température du sol en journée. Ainsi, l'air s'échauffe dans une moindre mesure qu'ailleurs. Par ailleurs, les arbres empêchent l'émission du rayonnement terrestre vers la voûte céleste pendant la nuit, limitant ainsi la chute de température nocturne. On constate ainsi que les écarts de température sont moins importants dans les régions boisées que dans les

zones dégagées. Cette influence des arbres est permanente ou saisonnière suivant qu'il s'agit d'arbres à feuillage persistantes ou caduques.

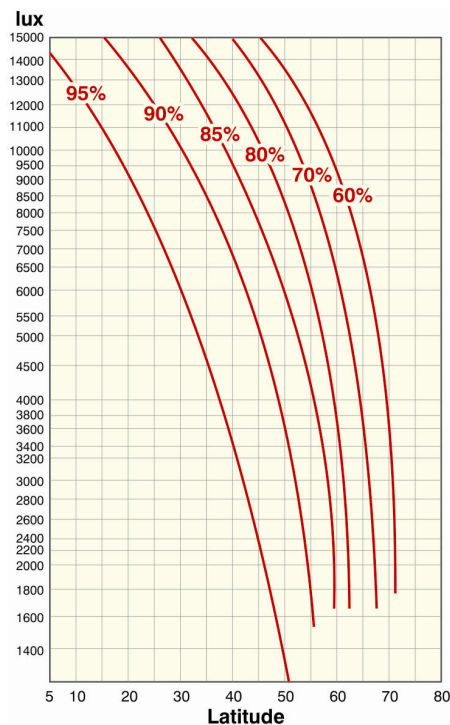


(CEE 1992)

Les sites dégagés sont fortement balayés par les vents et largement ouverts vers la voûte céleste. Il y fait donc en moyenne plus froid que dans les zones urbanisées ou plantées d'arbres. Les variations de température y sont plus importantes entre le jour et la nuit.

Le rayonnement solaire local

La lumière disponible en un lieu dépend d'abord de la latitude du site considéré. L'ensemble des courbes de la figure ci-dessous peut être utilisée pour déterminer la disponibilité de lumière naturelle d'un site en fonction de sa latitude. Pour une certaine latitude choisie sur l'axe horizontal, des pourcentages de temps (entre 9h et 17h) sont donnés qui représentent la période pendant laquelle une valeur d'éclairement extérieur horizontal (sur l'axe vertical) est dépassée (CEE 1996-b). Cette disponibilité lumineuse est basée sur un ciel couvert moyen adapté à chaque climat. Donc, les climats où le ciel est peu couvert sont défavorisés par ce type d'interprétation...



Disponibilité lumineuse à l'extérieur en fonction de la latitude (CEE 1992b, réalisé d'après C.I.E, n°16, 1970).

La ville de Bruxelles est située à une latitude de 50.8° (nord). Les valeurs d'éclairement par ciel serein et par ciel couvert pour la Belgique ont déjà été données dans la description des critères quantitatifs du confort visuel.

Outre l'influence de la latitude d'un site, le rayonnement solaire disponible dépend de l'environnement direct du site considéré, c'est-à-dire le relief du terrain, les obstacles (bâtiments et arbres), le coefficient de réflexion du sol, Ces éléments ne doivent pas être négligés : la présence d'un gratte-ciel, d'un lac ou d'un arbre peut radicalement transformer la lumière d'un espace.

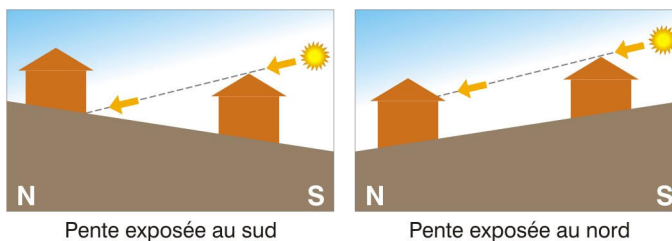
Le relief influence les possibilités d'ensoleillement ainsi que les phénomènes de nébulosité et le régime des vents. La topographie peut constituer un ombrage important à l'ensoleillement en hiver, où les vallées orientées est-ouest risquent d'être en permanence à l'ombre. En Belgique, on préfère situer les zones bâties suffisamment haut à flanc de colline pour bénéficier du soleil même en hiver.

L'éclairement d'un site en pente dépend de la géométrie solaire ainsi que de l'orientation et de l'inclinaison du terrain. Les pentes orientées vers l'est offrent de beaux levers de soleil et sa disparition rapide dans la soirée; les versants ouest montrent de superbes couchers mais un soleil qui se lève tard; le creux de la vallée reçoit une période d'ensoleillement direct plus courte que le sommet. Les pentes sud jouissent d'une meilleure insolation que les terrains plats. Il faut prendre en compte les caractéristiques naturelles du site et tirer profit du profil du terrain.

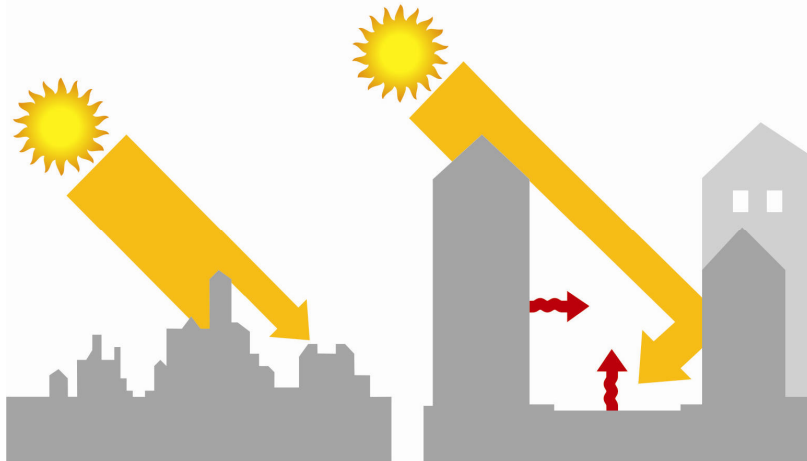


(Photo : S. Reiter).

Les bâtiments qui sont situés sur une pente orientée vers le sud peuvent être rapprochés les uns des autres par rapport à un terrain plat pour obtenir le même accès au soleil dans l'espace public. Inversement, une pente orientée au nord induit une perte d'ensoleillement surtout pour les latitudes élevées. Ainsi, les pentes fortes orientées vers le nord doivent à tout prix être évitées si on désire profiter de la lumière solaire dans les espaces publics. Les graphes ci-dessous permettent de comparer l'ensoleillement reçu par des bâtiments identiques pour une même hauteur solaire sur une pente orientée au sud et une pente orientée au nord.



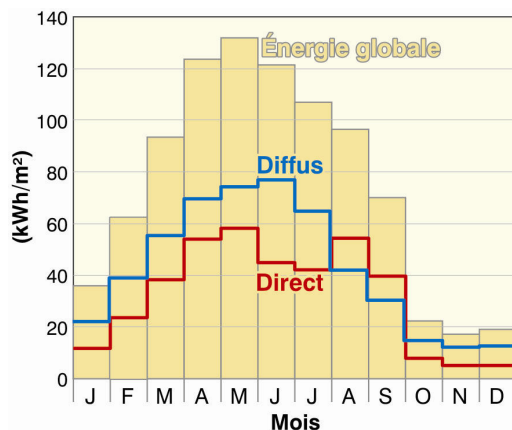
Les constructions constituent des écrans fixes pour leur voisinage. Leur rôle peut être positif si l'on recherche une protection contre le soleil : c'est le cas des villes méditerranéennes traditionnelles, où l'étroitesse des ruelles et la hauteur des bâtiments réduisent considérablement le rayonnement direct et fournissent un ombrage bienvenu. Par contre, ce rôle peut être négatif si les bâtiments voisins masquent le soleil alors qu'on souhaite bénéficier d'apports solaires. Dans les pays de latitude moyenne, durant les mois d'hiver, 90% environ des apports solaires interviennent entre 9h et 15h solaire. Tous les masques de l'environnement, immeubles ou grands arbres, qui interceptent le soleil pendant ces heures, gêneront grandement l'utilisation des gains solaires.



(CEE 1992)

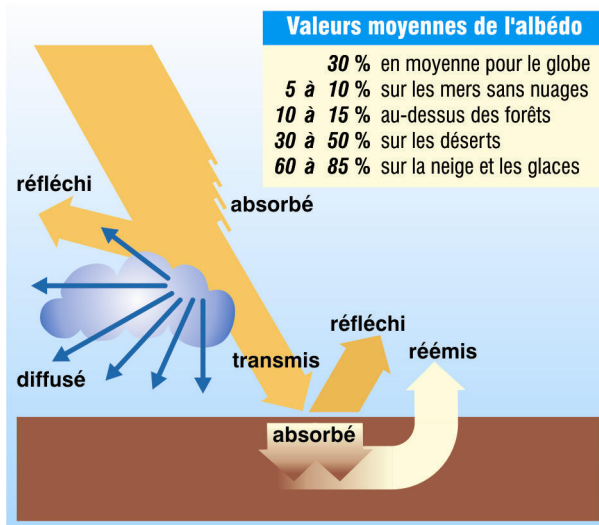
Une nébulosité artificielle telle que celle créée par la pollution urbaine peut également réduire le rayonnement solaire sur le site.

Le rayonnement solaire peut être reçu soit par un rayon direct du soleil, soit par un rayon diffusé par le ciel, soit par un rayon réfléchi par une surface terrestre. Le diagramme ci-dessous montre l'éclairement énergétique diffus, direct et global sur une surface horizontale à Bruxelles. Sur l'année, la part d'énergie solaire diffuse vaut environ 55% de l'énergie globale et elle est donc plus importante que la part du rayonnement direct. On constate qu'en Belgique, seuls les mois d'août et de septembre connaissent un ensoleillement direct plus important que l'ensoleillement diffus. La conception des espaces publics en Belgique nécessite dès lors de tenir compte des situations de ciel couvert et pas seulement de l'ensoleillement direct.



Energie moyenne reçue à Bruxelles sur une surface horizontale (Liébard & De Herde 2005).

L'albédo des surfaces détermine la quantité de rayonnement solaire reçue par les surfaces qui sera réfléchi vers l'espace. Le graphe ci-dessous donne les valeurs moyennes de l'albédo en fonction de la nature du sol.



(Architecture et Climat 1998).

Le rayonnement solaire reçu dans un espace public dépend du facteur de réflexion de toutes les surfaces qui le bordent : sol, façades,... L'emploi de matériaux réfléchissants peut augmenter l'exposition effective d'une surface.



(Gratia & De Herde 2002)

Le vent local

Les vitesses de vent au niveau microclimatique dépendent de différents facteurs :

- **la localisation**, en fonction de la proximité de la station météorologique de référence.
- **la topographie**, c'est-à-dire le type de paysage essentiellement défini par le relief. Les paramètres essentiels sont la hauteur et le contour de l'horizon. Lorsqu'un bâtiment est situé au sommet ou sur la face au vent d'une colline il faut en tenir compte. Pour la pente du terrain, la direction exacte de la pente et son inclinaison sont nécessaires.
- **la rugosité du terrain**, c'est-à-dire un paramètre qui rend compte du type de couverture du terrain : campagne, suburbain, urbain,....

- **les obstacles**, c'est-à-dire les obstructions au vent (bâtiments, arbres,...). Les paramètres à prendre en compte sont la position et les dimensions de ces éléments.
- **la hauteur** à laquelle on évalue la vitesse du vent. Cet élément est essentiel pour tenir compte du fait que les valeurs de vent aux stations météorologiques sont toujours évaluées à 10m de haut alors que pour le confort des piétons en ville on prend en compte les vitesses du vent à 1.5m du sol. De plus, on pourrait désirer étudier le microclimat d'un lieu plus élevé que le niveau piéton : par exemple, une terrasse qui surplombe une partie de la ville,...

Certains vents régionaux existent sur une échelle davantage mésoclimatique que microclimatique. Citons par exemple :

- le mistral, d'orientation nord, il souffle violemment sur les régions du Rhône et de la Provence.
- la tramontane, très irrégulière, est un vent d'origine nord-ouest qui souffle sur le Roussillon.
- le foehn, apparaît dans les Alpes perpendiculairement aux pentes montagneuses.
- le sirocco, d'orientation sud à sud-est est chaud et méditerranéen.

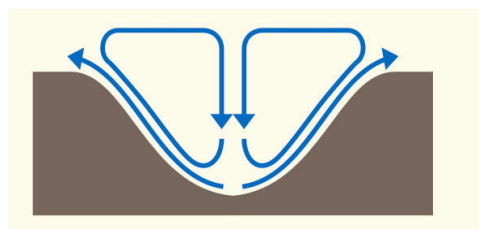
En Belgique, les vents provenant du sud-ouest sont les vents dominants au niveau mésoclimatique car ils soufflent pendant plus de 40% du temps.

Il existe différents types de vents locaux créés à une échelle microclimatique par la topographie et la nature du sol environnant :

- les brises de mer et brises de terre,
- les brises de vallées (ou de montagnes),
- les brises dues à l'urbanisation.

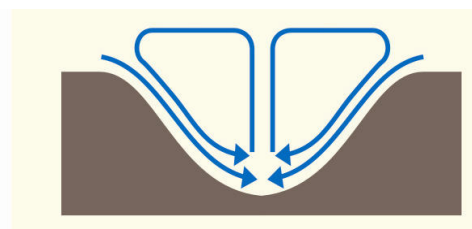
Ces courants d'air locaux font essentiellement intervenir des phénomènes journaliers. Il faut noter que ces mouvements d'air locaux peuvent accentuer, réduire les conditions de vent mésoclimatiques. Comme ils peuvent apparaître en période non venteuse du point de vue du mésoclimat, ils sont très utiles pour favoriser la ventilation naturelle des zones construites.

Sur les versants de vallées, le soleil favorise un gradient de température et donc des courants d'air durant la journée. De nuit, le gradient s'estompe et puis s'inverse légèrement, de telle sorte que l'air circule dans le sens opposé. Les brises remontent les vallées pendant la journée lorsque les sommets bénéficient d'un ensoleillement et d'un réchauffement supérieur à celui de la plaine. Par contre, l'air qui s'est refroidi descend pendant la nuit vers le fond des vallées.



Jour

(Architecture et Climat 1998).

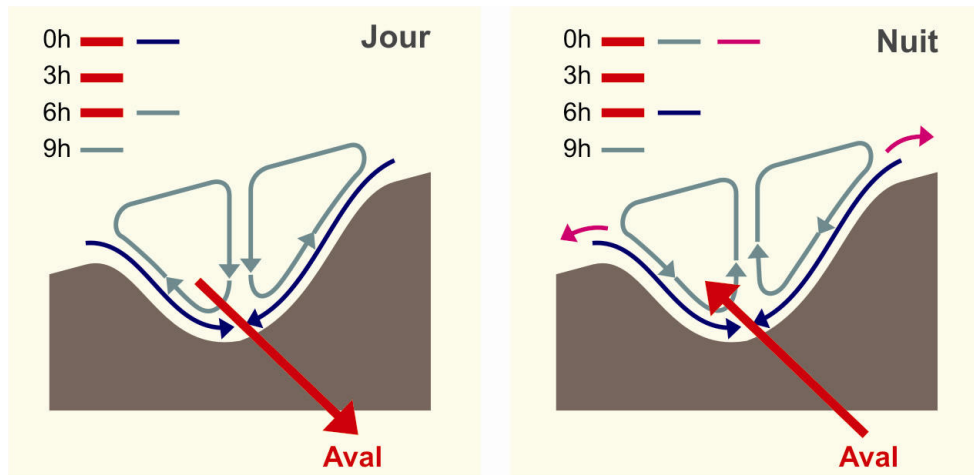


Nuit

(Architecture et Climat 1998).

Des valeurs typiques de la vitesse du vent dans ces configurations sont de 1 à 2 m/s, dépendant de l'inclinaison et de la longueur de la pente (Littlefair & al. 2000). Des vitesses de vent supérieures peuvent être générées par un relief montagneux. Les phénomènes de brise de montagne et de brise de vallée sont très sensibles aux variations d'insolation et sont beaucoup plus marqués sur les pentes exposées au sud.

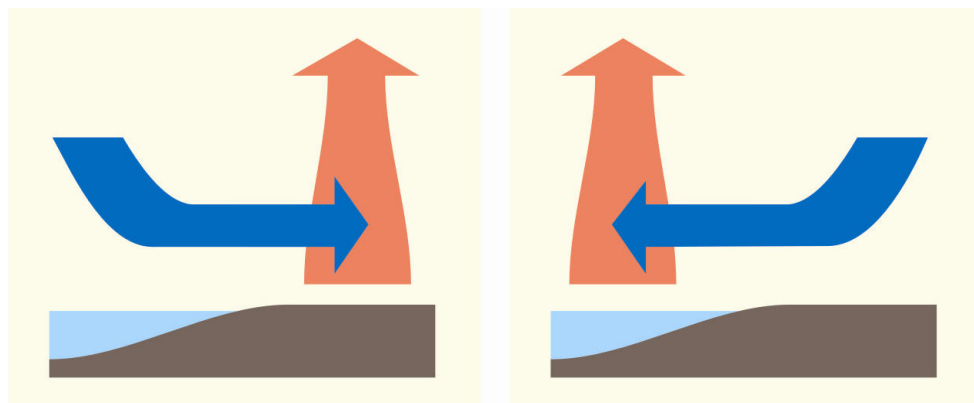
Dans les longues vallées, le phénomène expliqué ci-dessus tend à créer un mouvement d'air longitudinal d'autant plus puissant que la vallée est longue et que le gradient de température est élevé. Le dessin ci-contre illustre la complexité des mouvements d'air.



(Architecture et Climat 1998).

Le vent augmente lorsque la vallée se resserre. Si le vent mésoclimatique souffle dans la direction de la vallée, alors sa vitesse s'intensifie fortement. Cet effet de vallée se manifeste notamment pour le mistral de la vallée du Rhône. En Belgique, l'axe NE-SO favorise les courants de vallées puisqu'il est dans la direction des vents dominants, tandis qu'une vallée NO-SE perpendiculaire aux vents dominants est abritée dans le fond ainsi que sur la pente sous le vent.

Un phénomène similaire apparaît au niveau des grandes étendues d'eau. Les masses d'eau étant plus chaudes que l'atmosphère en hiver et plus fraîches en été, les courants d'air créés par le gradient thermique s'inversent au cours de l'année. Ainsi, en été, les masses d'air étant plus chaudes au-dessus de la terre qu'au-dessus des étendues d'eau, le vent souffle de la mer vers la terre; c'est l'inverse en hiver.

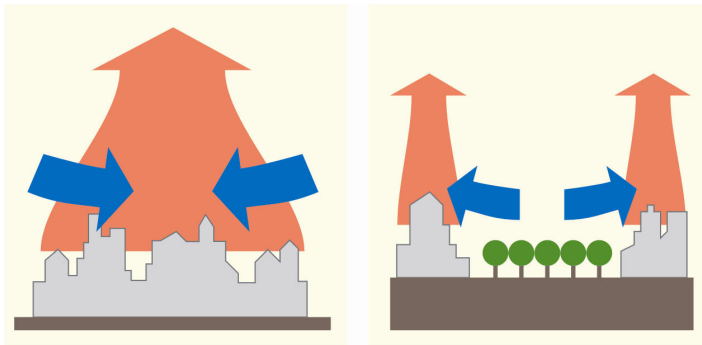


Brise de mer (en été)
(Architecture et Climat 1998).

Brise de terre (en hiver)
(Architecture et Climat 1998).

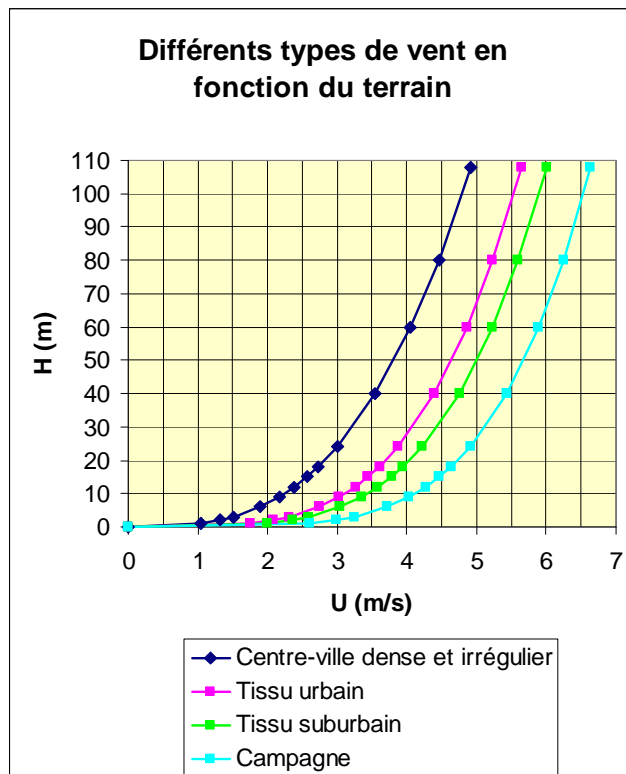
Lors des brusques variations de température, les courants d'air peuvent aussi s'inverser au cours d'une même journée. A proximité du littoral, on rencontre des vents réguliers, qui alternent selon un rythme journalier. Les brises de mer soufflent le jour et apportent les embruns marins, alors que les brises de terre, au contraire, apparaissent pendant la nuit. La brise de mer peut aller jusqu'à 40 km à l'intérieur des terres. Sa vitesse moyenne est de l'ordre de 4 à 5 m/s.. Les brises de terre sont plus faibles car la différence thermique est moins importante, leur vitesse moyenne est de 1 à 2m/s.

La température des villes étant supérieure à celle des campagnes, on y constate un mouvement d'air similaire à celui créé par les masses d'eau. L'appel d'air se dirige vers les villes dont la surface est plus chaude que la campagne. Au sein de la ville, de grands espaces dégagés permettent la création de courants d'air thermiques.

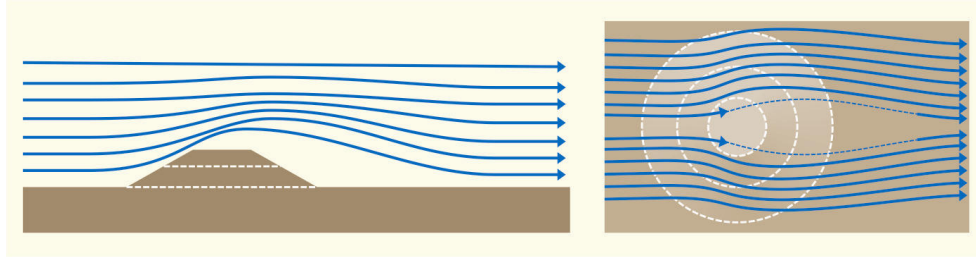


Brises urbaines (Architecture et Climat 1998).

La vitesse du vent en un lieu dépend de la longueur de rugosité du terrain et de la hauteur à laquelle la vitesse du vent est étudiée. Le graphe ci-dessous représente graphiquement les différents profils de vent en fonction de la hauteur au-dessus du sol et du type de terrain.



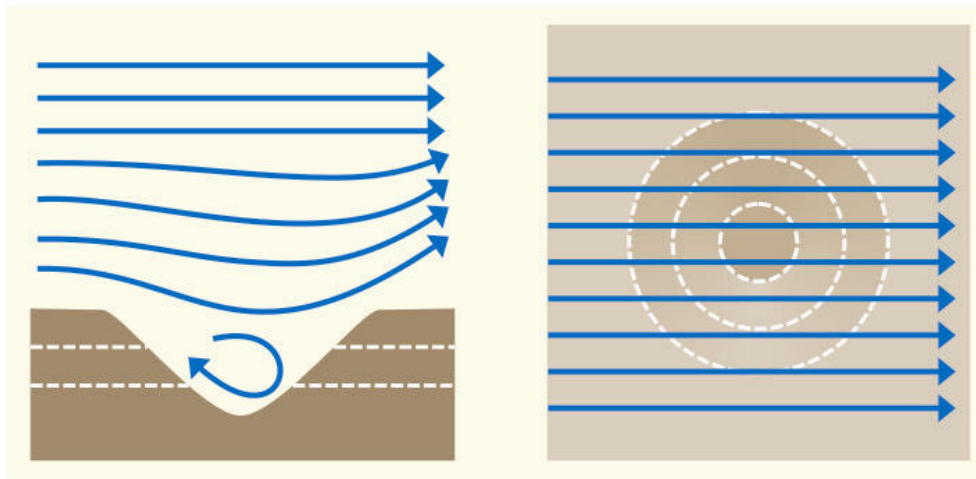
Les collines ne constituent pas à proprement parler un obstacle au vent mais elles engendrent éventuellement des modifications de son écoulement. Ces changements s'effectuent à moyenne ou grande échelle. Le relief a pour effet de protéger certains sites mais aussi d'en surexposer d'autres. Les graphes ci-dessous représentent l'écoulement du vent (en coupe et en plan) autour d'une colline. Le sommet présente généralement les vitesses de vent les plus élevées.



Coupe de la colline
(Hammoud 1986).

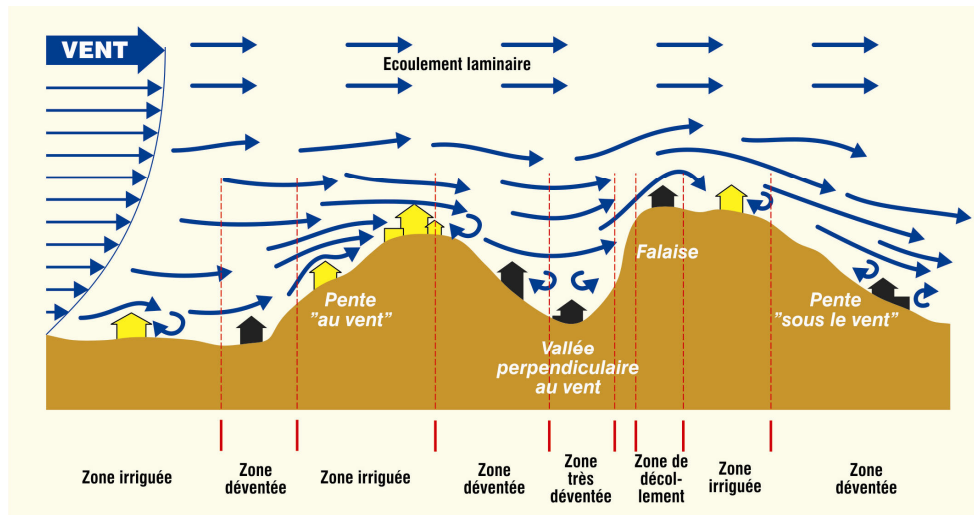
Plan de l'écoulement du vent

Les deux schémas ci-dessous illustrent le flux de vent rencontrant une dépression. L'écoulement du vent n'est pas modifié transversalement. On voit que le relief peut avoir un effet protecteur par rapport aux vents : par exemple, une vallée dont la pente est supérieure à 30% et qui perpendiculaire aux vents dominants est à l'abri de ceux-ci.



(Architecture et Climat 1998).

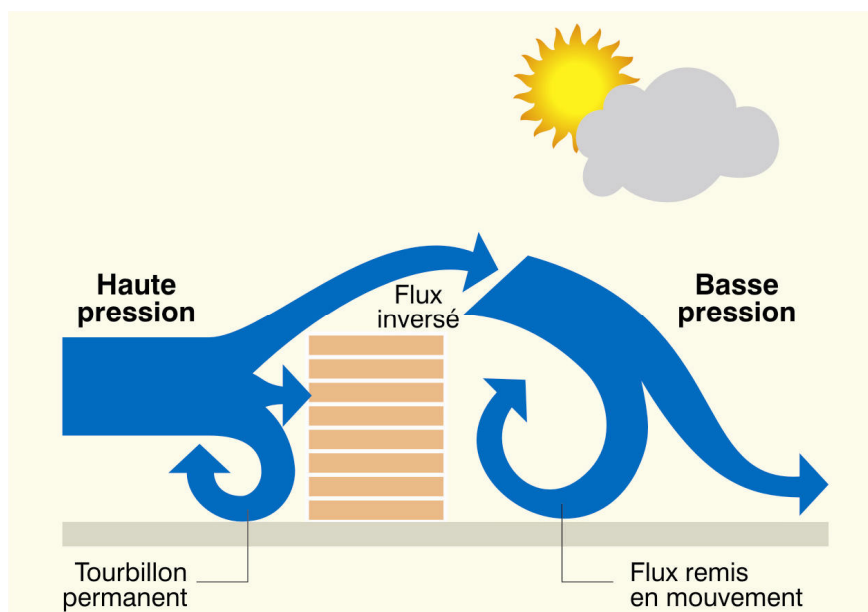
En terrain plat et dégagé de tout obstacle aéraulique, le potentiel de ventilation naturelle dépend de la fréquence des vents dominants. Une vallée parallèle aux vents dominants forme un véritable collecteur. Sur les pentes exposées au vent, le potentiel de ventilation est globalement meilleur qu'en terrain plat. La partie basse d'une pente face au vent est une zone déventée. Les pieds de collines sont donc souvent des zones déventées. En sommet de colline, il y a une accélération importante du vent ; cependant, une pente trop forte ou un effet local peut être à l'origine d'un décollement du vent induisant une zone déventée. Des zones très protégées au creux de vallées perpendiculaires aux vents peuvent aussi apparaître. Le schéma ci-dessous montre les zones fortement exposées au vent (maisons jaunes) et les zones protégées du vent (maisons noires), permettant de choisir la situation de construction en fonction du climat.



(Liébard & De Herde 2001)

Pour rappel, le vent étant freiné par les obstacles, lorsque la densité et la taille de ceux-ci sont importantes, ce qui est le cas en ville, la vitesse du vent est moindre qu'en site dégagé. Notons également que la vitesse du vent, nulle au niveau du sol, augmente avec la hauteur : c'est ce qui explique que les vitesses du vent au sommet d'un immeuble tour sont nettement plus élevées qu'au niveau du toit d'une maison qui ne comporte qu'un étage. Une formule simplifiée de calcul de la vitesse du vent en fonction du type de terrain et de la hauteur d'évaluation est donnée à la page 222 de cette thèse. Ce calcul simplifié ne prend pas en compte la présence d'obstacles (bâtiments, végétaux,...) qui peuvent freiner ou accélérer la vitesse du vent.

Lorsque le vent rencontre un obstacle, il est obligé de le contourner. La face d'un obstacle exposée au vent subit une surpression tandis que sa face opposée est soumise à une dépression. C'est pourquoi, outre la protection qu'ils offrent, les écrans peuvent également occasionner des effets secondaires tels que courants d'air et turbulences. Les mouvements d'air générés autour des bâtiments de grande hauteur sont généralement critiques pour les piétons. La zone d'influence d'un bâtiment est environ quatre fois plus longue à l'arrière d'un bâtiment qu'à l'avant.



Surpression à l'avant et dépression à l'arrière d'un bâtiment exposé au vent.

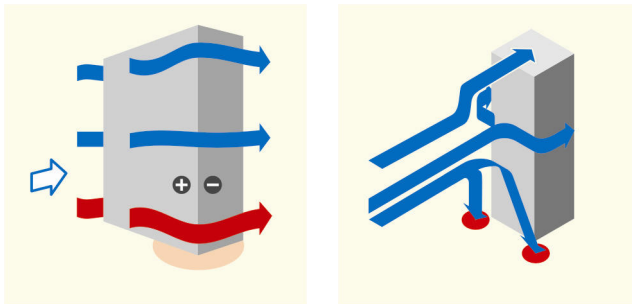
Deux catégories d'**obstacles** doivent être étudiées en fonction de leur impact sur la vitesse locale du vent : les éléments étanches à l'air (ex : les bâtiments) et les éléments poreux (ex : les arbres). Signalons que les constructions forment des écrans permanents tandis que la végétation peut présenter des variations de porosité en fonction de la saison.

Cinq mécanismes élémentaires de l'écoulement du vent autour de bâtiments isolés de formes simples ont été répertoriés (Gandemer 1975):

- l'effet de coin,
- l'effet de sillage,
- l'effet de passage sous immeuble,
- le rouleau tourbillonnaire,
- l'effet de barre.

Ces cinq mécanismes de base décrivent les zones critiques pour le confort des piétons. Ils sont explicités ci-dessous qualitativement et seront définis quantitativement dans le chapitre suivant. Pour chacun d'eux, des conseils pratiques de conception seront donnés pour réduire l'ampleur du problème.

L'**effet de coin** est un phénomène d'écoulement aux angles d'une construction qui met en relation des zones de surpression en amont et la zone de dépression latérale du bâtiment. Les zones critiques sont situées aux coins. La gêne due à cet effet est surtout liée à la survitesse engendrée. L'effet de coin est caractérisé principalement par un gradient de vitesse; les mesures de turbulence ne montrent pas d'importantes modifications.



Effet de coin (Gandemer 1975)

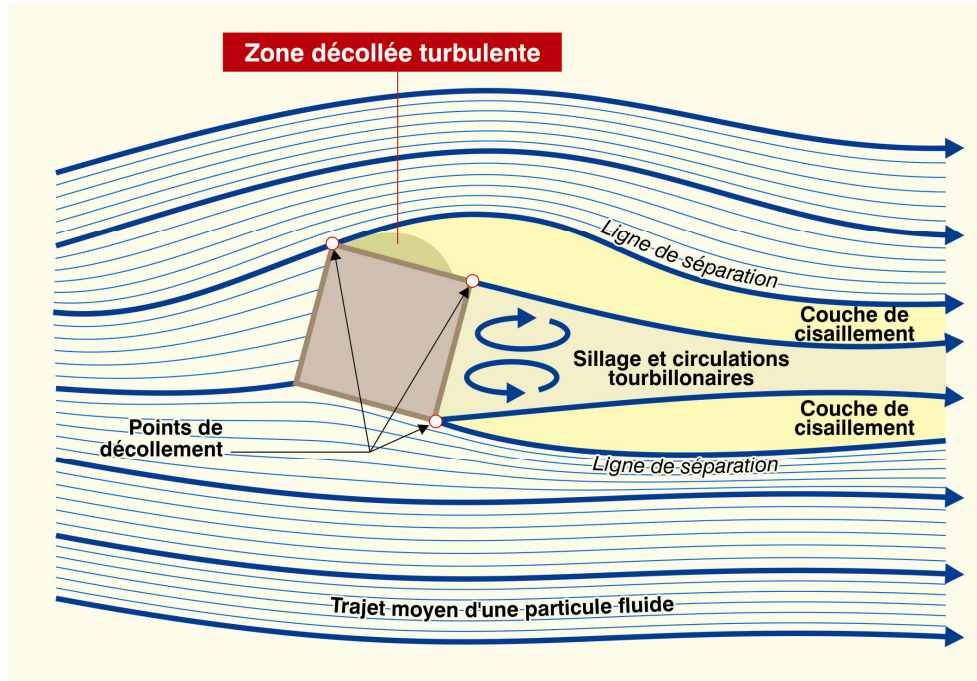
L'obstacle peut être une forme isolée (tour, parallélépipède rectangle) ou un ensemble compact de constructions. Les angles des hauts bâtiments sont souvent l'objet de vitesses de vent importantes. Il faut également faire attention aux balcons situés aux coins des bâtiments !



(Dessins : Glaumann & Westerberg 1988)

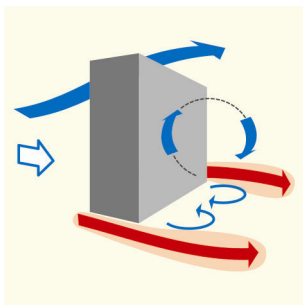
Une particularité aérodynamique induite par l'effet de coin est un gradient horizontal de vitesses très important aux environs du coin du bâtiment, ce qui est un facteur d'accroissement de l'inconfort pour les piétons.

L'**effet de sillage** couvre à la fois une zone de protection à l'arrière du bâtiment et la présence des couches de cisaillement inconfortables pour les piétons sur les côtés de celle-ci. La zone de protection au vent située dans le sillage d'un bâtiment est bordée par des zones où le gradient de vitesse du vent est important : ce sont les couches de cisaillement, qui prolongent l'effet de coin à l'arrière d'un bâtiment. Ces zones d'inconfort pour les piétons naissent aux points de séparation entre le flux d'air contournant le bâtiment et la zone protégée à l'arrière de celui-ci.



Ces zones de cisaillement, à l'arrière des bâtiments, sont plus ou moins stables et à très forts taux de turbulence ($I=0.4$) qui persistent longtemps en aval.

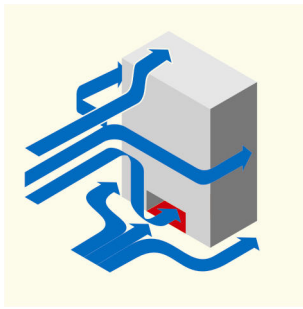
Pour les bâtiments très élevés, le sillage a une forme caractéristique de sabot de cheval. L'intérieur du sillage présente généralement des vitesses de l'air faibles mais des valeurs de turbulence élevées. Cependant, vu que les vitesses de l'air y restent très faibles, ce sont des zones qui peuvent être considérées comme très protégées et idéales pour le confort des personnes.



Couches de cisaillement en sabot de cheval à l'arrière des bâtiments très élevés. (Gandemer 1975)

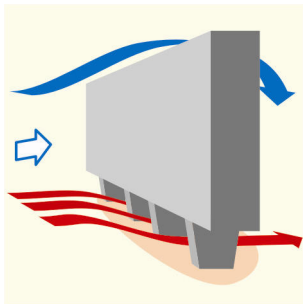
L'effet de passage sous immeuble apparaît lors de la création d'un trou sous le bâtiment ou la mise sur pilotis de l'édifice, reliant l'avant du bâtiment en surpression et son arrière en dépression. Le vent s'accélère alors en s'engouffrant au travers de ces ouvertures reliant la façade au vent et la façade sous le vent.

Des ouvertures à travers la base d'un bâtiment élevé peuvent induire de très hautes vitesses de vent à travers celles-ci. L'incidence du vent par rapport au trou joue un rôle capital sur cet effet.

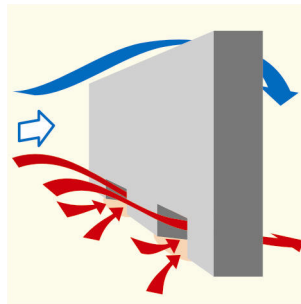


Effet de passage sous immeuble (Gandemer 1975).

Les pilotis se définissent par une porosité uniformément répartie sous la surface d'un corps de bâtiment alors que le passage sous immeuble est un trou creusé au sein d'une masse construite.



Pilotis.
(Gandemer 1975)

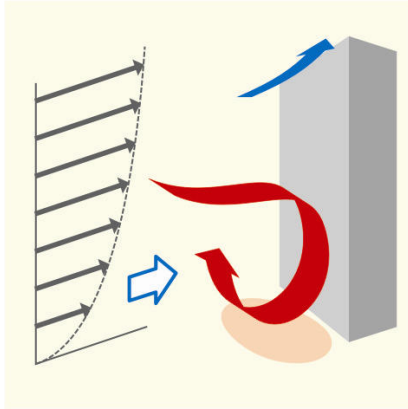


Passages.



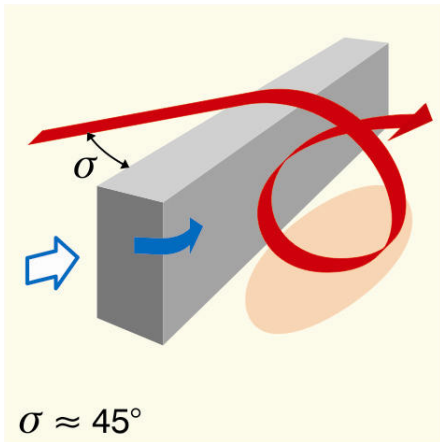
Trou sous immeuble à Louvain-la-neuve (à gauche) et pilotis de la Cité Radieuse de Le Corbusier à Marseille (au milieu et à droite). (Photos : S. Reiter).

Situé au pied du bâtiment, le **rouleau tourbillonnaire** est fonction de la hauteur du bâtiment et du profil vertical de vitesse du vent. Le tourbillon engendre une forte augmentation de la turbulence au sol.



Rouleau tourbillonnaire (Gandemer 1975)

L'**effet de barre** est une déviation en vrille de l'écoulement au passage d'un élément de type barre pour une incidence de vent de l'ordre de 45 degrés. La zone critique se situe au centre arrière de la barre. Il y a création d'une zone de turbulence verticale. Les dimensions du bâtiment, principalement sa hauteur et son épaisseur, sont liées à la quantification du phénomène.



$$\sigma \approx 45^\circ$$

Effet de barre (Gandemer 1975)

Nous définissons comme barre une construction ou une succession de constructions pratiquement dans le même axe longitudinal (le décrochement transversal par rapport à l'axe longitudinal doit rester inférieur à une épaisseur). Les espacements éventuels entre les différents bâtiments constituant la barre sont d'une largeur strictement inférieure à 2 fois la hauteur des bâtiments.

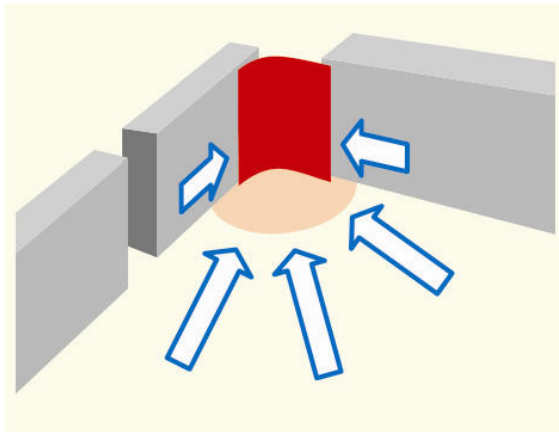
L'écoulement autour de groupes de bâtiments est le résultat de l'interaction des écoulements fondamentaux par rapport aux différents édifices. Citons quelques configurations connues de combinaisons des mécanismes de flux élémentaires sur des groupes de bâtiments (Givoni 1969 pour l'effet d'écran linéaire; Gandemer 1975 pour tous les autres effets):

- l'effet Venturi,
- l'effet Wise,
- l'effet de barre
- l'effet de double coin
- l'effet de bâtiments en quinconce (dû à un effet de liaison de zones de pression différente)
- l'effet de canalisation linéaire
- l'effet de maille

- **l'effet d'écran linéaire**
- **l'effet pyramide**

Chacun de ces mécanismes d'écoulement est explicité ci-dessous de manière qualitative. Quelques règles quantitatives et conseils pratiques seront donnés dans le chapitre suivant dans le but de limiter ou de favoriser ces effets en fonctions de leur caractéristique critique ou bénéfique du point de vue du confort au vent.

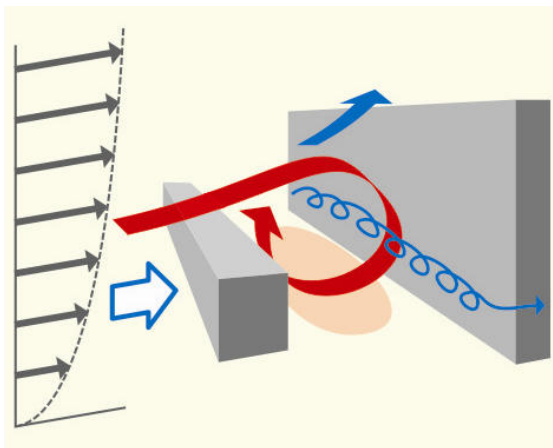
L'**effet Venturi** est un phénomène de collecteur formé par des constructions qui forment un angle ouvert au vent. La zone critique pour le confort se situe à l'étranglement, là où la vitesse du vent est maximale.



Effet Venturi (Gandemer 1975).

Le collecteur générant un effet Venturi peut aussi être constitué d'un ensemble de bâtiments non jointifs, dans la mesure où l'axe des bras est maintenu et où les ouvertures, dans les bras, ont une largeur nettement inférieure à la hauteur moyenne de ceux-ci.

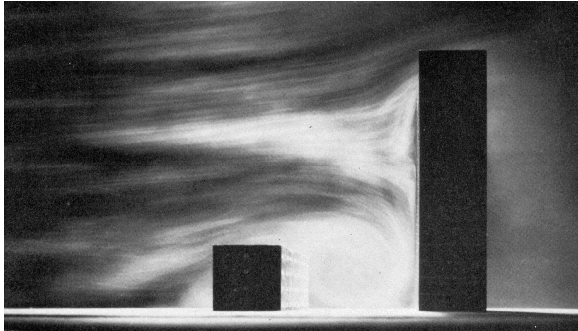
L'**effet Wise** est un effet de tourbillon au pied de tours lorsqu'une autre construction plus basse est placée parallèlement et en amont de la construction élevée.



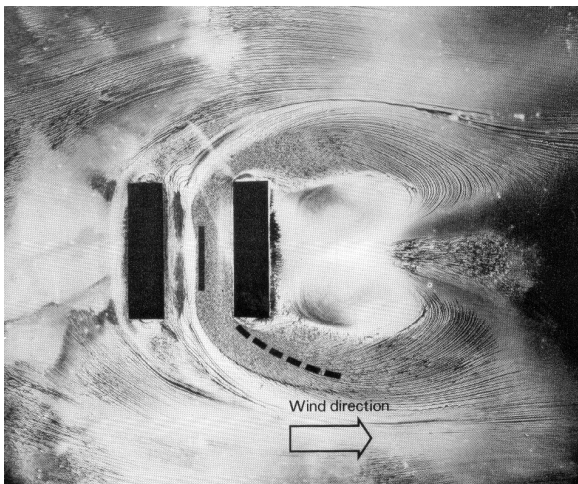
Effet Wise (Gandemer 1975).

Il faut aussi noter que cet effet tourbillonnaire est spécialement gênant pour les piétons en raison de la forte composante verticale de la vitesse du vent dans la zone critique.

Les photos ci-dessous ont été prises dans un tunnel à vent ; il s'agit d'un effet Wise typique. La fumée permet de visualiser le vent qui souffle de gauche à droite.



Effet Wise en coupe (Penwarden & Wise 1975)

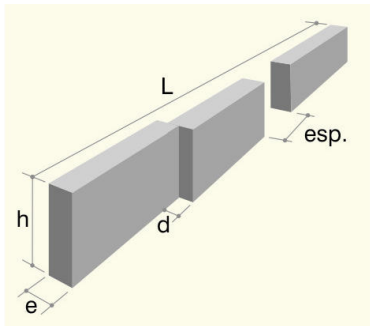


Effets Wise en plan (Penwarden & Wise 1975)

Sur la photo montrant l'effet Wise en plan, une ligne continue et une ligne en pointillés représentent les zones les plus critiques pour le confort des piétons dans cet ensemble de deux bâtiments ; il s'agit :

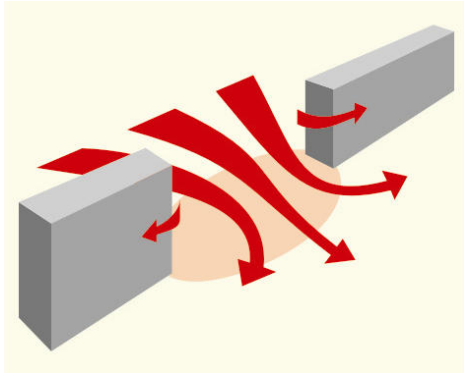
- de la survitesses due à l'effet Wise (ligne continue),
- de la survitesses maximale due à l'effet de coin au pied du bâtiment très élevé (pointillés).

L'effet de barre généré par un ensemble de bâtiments correspond au même principe que l'effet de barre pour un bâtiment isolé mais les dimensions de la barre sont déterminées par la juxtaposition de différents bâtiments.



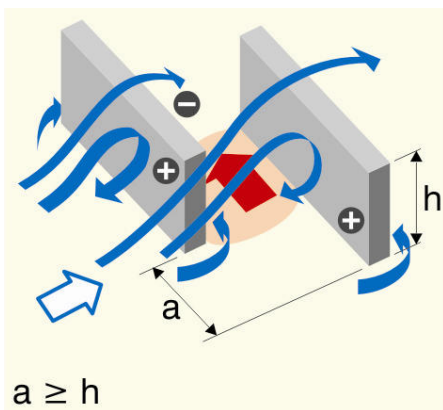
Ensemble de bâtiments pouvant générer un effet de barre (Gandemer 1975).

L'espacement entre deux barres peut engendrer un **effet de double coin**. Les espaces entre les bâtiments sont souvent des accélérateurs de vent.



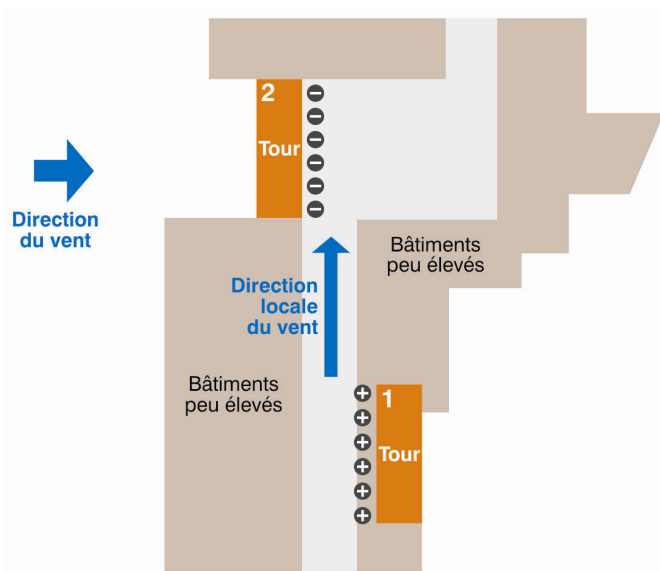
Effet de double coin (Gandemer 1975).

Si, au sein d'un plan masse, des bâtiments se trouvent placés en quinconce, sous une incidence du vent voisine de la normale, un phénomène d'écoulement entre les zones de pression différente (sens des pressions décroissantes) est formé. Cette anomalie, baptisée **effet de bâtiments en quinconce**, due à un effet de liaison de zones de pression différente, affecte tout le couloir de liaison.



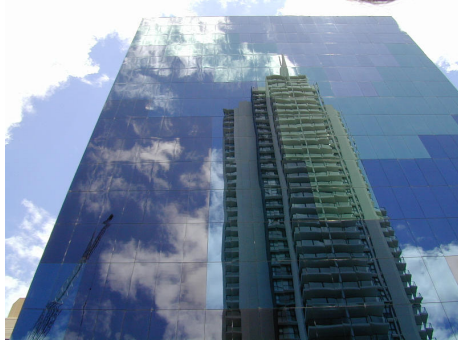
Effet de bâtiments en quinconce (Gandemer & Barnaud 1975).

Ainsi le plan ci-dessous formé de bâtiments peu élevés et de deux tours finement hachurées (bâtiments 1 et 2) verra se développer un mouvement d'air pouvant être fort allant de la zone au vent du bâtiment en surpression 1 à la zone sous le vent du bâtiment 2 en dépression.



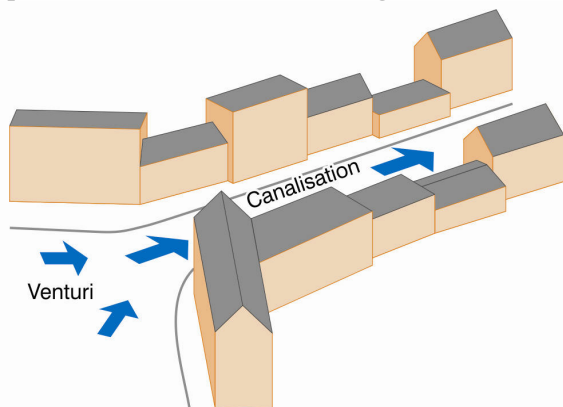
Effet de bâtiments en quinconce (Penwarden & Wise 1975).

Ainsi, les phénomènes d'interaction du vent dans les ensembles d'immeubles-tours sont fréquents. Les groupes de bâtiments de grande hauteur demandent un soin tout particulier de la part du concepteur si l'on veut atteindre un niveau de gêne tolérable (il ne nous paraît pas possible de faire mieux) aux pieds de ce type de constructions.



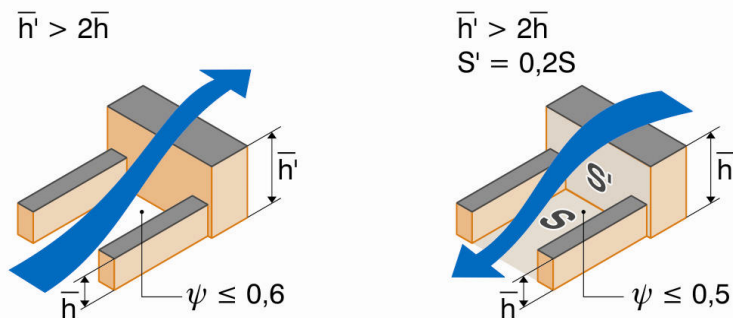
Tours à Brisbane. (Photo : K. de Myttenaere).

Lorsqu'un ensemble construit forme une canalisation à ciel ouvert, cette configuration de bâtiment peut former un effet critique du point de vue du vent : l'**effet de canalisation linéaire**, si les bâtiments ne sont pas suffisamment espacés. Une canalisation linéaire n'est pas une cause de gêne en soi. Elle n'agit que si elle est associée à une anomalie aérodynamique (comme par exemple un effet Venturi) qu'elle transmet sur toute sa longueur.



Effet de canalisation linéaire (Gandemer 1975).

L'**effet de maille** est une zone de protection par rapport au vent qui est créée par la juxtaposition de bâtiments qui forment une alvéole ou une poche. Les intérieurs d'îlots créent en général un creux au centre d'un bloc construit qui coïncide souvent avec l'effet de maille. L'écoulement du vent et le confort des piétons dans cette zone dépendent des dimensions toutefois du périmètre construit et de la hauteur des bâtiments qui constituent la maille.

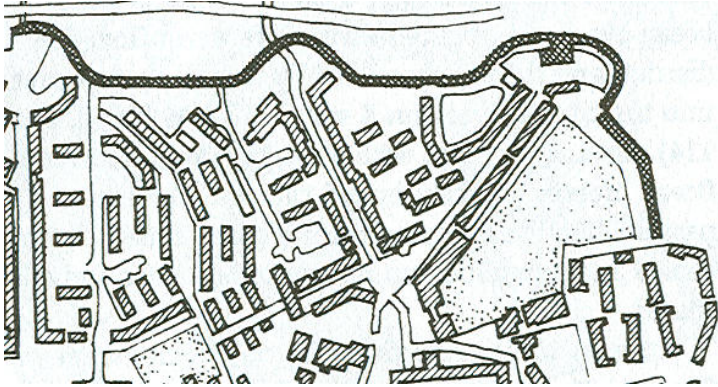


Effet de maille (Gandemer 1975).

L'**effet d'écran linéaire** est l'effet de protection généré dans le sillage de rubans construits de grande longueur placés perpendiculairement aux vents dominants. Il s'agit donc de l'agrandissement de l'effet de protection dans le sillage d'un bâtiment ou d'un brise-vent par la création d'un écran continu face au vent.

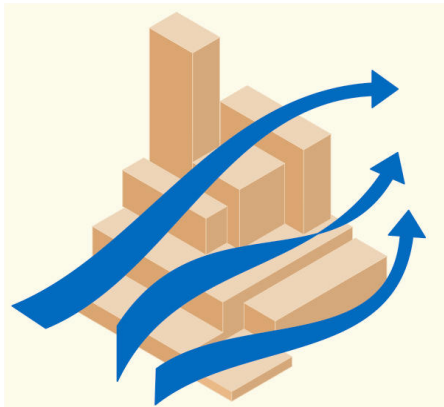
Les études ont montré qu'un bâtiment long et continu placé comme façade au vent par rapport à une zone urbaine peut réduire les vitesses de vent entre les bâtiments de ce quartier jusqu'à 15% dans la direction du vent obstruée. (Givoni 1969)

↓ Direction du vent.



Effet d'écran linéaire (Plan : Brown & Dekay 2001)

L'**effet de pyramide** est un effet aéraulique provoqué par un groupement de constructions à caractère pyramidal. Les formes pyramidales, par leur géométrie assez aérodynamique n'offrent pas de résistances brutales au vent (continuité dans les évolutions de hauteur) et associées à leur rugosité de surface, représentée par les décrochements de niveaux et terrasses, semblent dissiper le maximum d'énergie du vent dans tous les azimuts. Par suite, au niveau du sol, les flux sont relativement peu rapides et le niveau du confort est généralement bon.



Effet de pyramide (Gandemer & Barnaud 1975).

D'une façon générale, ce mode de construction rend acceptable des hauteurs de bâtiments qui seraient inconfortables sans l'utilisation de cet effet. Il est toutefois indispensable d'étagier le plus possible les niveaux, d'obtenir aux angles de la pyramide des niveaux très bas (voisins de 3m), de densifier l'environnement proche (constructions basses ou végétation) au niveau des coins globaux ainsi que de traiter avec soin les balcons au vent et au voisinage des crêtes: volumétrie aérodynamique ou garde-corps déflecteur,...

Les **effets spécifiques du vent en milieu urbain** dense sont développés dans le paragraphe 3.2.4 sur la modification des mouvements d'air en zone urbaine.

Il faut signaler que les effets que nous avons identifiés pour les bâtiments isolés et les groupes de bâtiments n'apparaissent souvent que pour certaines orientations de vent. Dans la réalité, le vent peut provenir de multiples orientations. Prenons l'exemple de deux bâtiments situés en parallèle l'un par rapport à l'autre; pour une orientation perpendiculaire, nous pouvons trouver un effet de type Wise ; sous une orientation parallèle, un effet de double coin et pour les orientations intermédiaires, on pourra trouver des combinaisons d'un effet de barre et d'un effet de double coin. La difficulté de la prédétermination du vent dans un milieu construit réel provient souvent de ces **combinaisons d'effets**. Il est dès lors important de passer en revue l'ensemble des possibilités de création de ces différents mécanismes de base, pour toutes les orientations de vent, pour chaque projet. Si le milieu est trop complexe, il est nécessaire de réaliser une simulation CFD détaillée ou un essai en soufflerie aérodynamique.

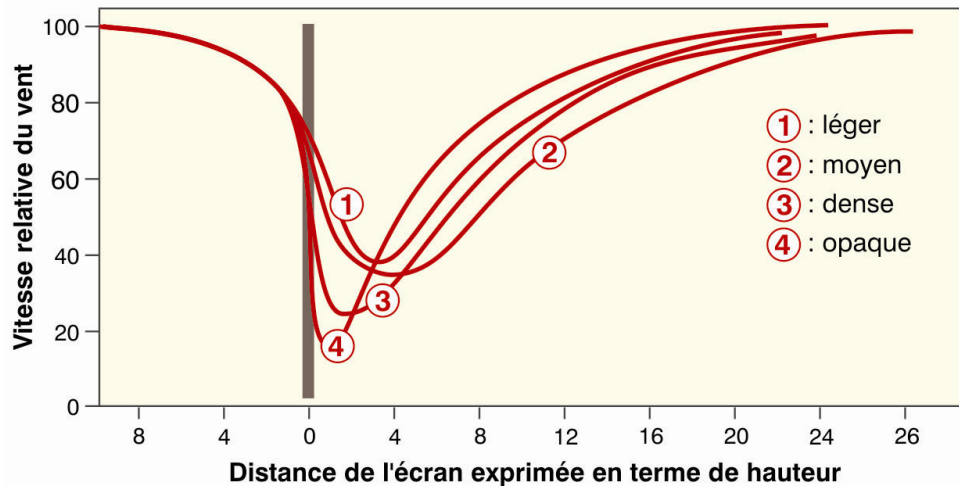
Les fonctions d'un **brise-vent** sont multiples (Gandemer & Guyot 1981):

- freiner les flux d'air en introduisant sur leur chemin une dissipation d'énergie cinétique en laminant, par exemple, les écoulements à travers des orifices ou encore en augmentant le frottement du sol par le jeu de la rugosité.
- casser la turbulence par réduction des dimensions des tourbillons. La viscosité de l'air introduit un amortissement d'autant plus rapide sur la turbulence que les tourbillons sont petits. Les toiles métalliques ou les filets remplissent remarquablement bien ce rôle.
- guider les écoulements au profit de secteurs non affectés par le vent grâce à un jeu de profilage des obstacles ou de mouvements de terrain.
- détruire par éclatement tridimensionnel (divergence du flux dans toutes les directions) toutes organisations et concentrations des écoulements. L'association de sculptures ou de mobilier urbain de grandes dimensions peuvent parfaitement remplir cette fonction.

Le brise-vent, par sa présence, modifie le cadre de son implantation. Une manière de réussir son intégration est de lui faire jouer en plus de son rôle de brise-vent un ou plusieurs rôles complémentaires. On peut citer par exemple les fonctions suivantes : écran acoustique, ombrage, sculpture plastique, mobilier urbain, écran visuel, structure de jeux, protection contre la pluie, division de l'espace,... De plus, une recherche multifonctionnelle permettra parfois de réduire son coût. Par conséquent, loin d'alourdir le cahier de contraintes que rencontrent les concepteurs, les brises-vent peuvent devenir le support d'une nouvelle expression architecturale et même un élément stimulateur de l'urbanisme bioclimatique.

Pour des brise-vents dont la longueur est supérieure à 12H, les deux seuls paramètres importants pour déterminer la réduction des vitesses du vent sont la hauteur du brise-vent et sa porosité.

Le graphique ci-dessous présente les réductions de la vitesse de l'air devant et derrière un brise-vent de longueur supérieure à 12 fois sa hauteur et compare l'efficacité de la protection générée par des obstacles de différentes porosité, regroupés en quatre catégories : obstacle léger, moyen, dense ou opaque. Les valeurs sont données pour une hauteur de 1.5m par rapport au sol. Les écrans denses provoquent une forte réduction de la vitesse du vent sur une faible profondeur tandis que les écrans perméables réduisent la vitesse du vent dans une moindre mesure mais sur une profondeur plus importante.



Effet d'un brise-vent en fonction de sa porosité (Gandemer & Guyot 1981).

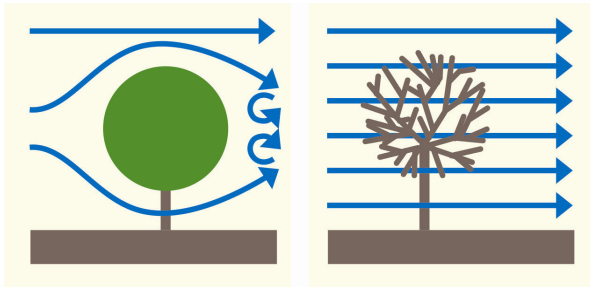
Généralement, on commence à percevoir l'effet de protection du brise-vent à environ une fois sa hauteur en amont mais surtout dans son sillage aval. Il faut attendre environ 20 fois la hauteur de la structure pour retrouver les caractéristiques de l'écoulement amont non perturbé (Gandemer & Guyot 1981). L'efficacité d'un écran est régie par ses dimensions et sa perméabilité. Les brise-vents doivent être évalués en fonction de leur hauteur, longueur, nature (porosité) et de la direction du vent. Il est toutefois important de vérifier qu'un élément de protection au vent ne crée pas des effets secondaires tels qu'une déviation du vent vers une localisation où il serait encore plus gênant.

Pour obtenir une forte réduction du vent sur une longueur suffisante, la porosité optimale des brise-vents est de 10 à 25% (Gandemer & Guyot 1981), ce qui correspond dans le graphe ci-dessus aux brise-vents denses et moyens. Si la préférence est donnée à une réduction maximale des vitesses du vent sur une courte distance, un écran dense est idéal. Par contre, si la préférence est donnée à la taille de la zone abritée, une perméabilité moyenne de l'écran est conseillée. En effet, une même réduction de la vitesse du vent de 10% est atteinte jusqu'à une distance égale à 12H si l'écran est opaque, 16H si le brise-vent est dense et 20H si l'obstacle est de densité moyenne. Les obstacles très légers (perméabilité de 70%) créent une protection réduite tant au niveau de la surface protégée que de l'amplitude de la réduction des vitesses de l'air.

En résumé, lorsque la zone à protéger est relativement réduite, la porosité est un paramètre essentiel et il faut privilégier les brise-vents légèrement poreux (< 15%). Par contre, pour ralentir le vent sur une grande superficie, la hauteur du brise-vent est l'élément prédominant. La porosité devient alors un paramètre moins important mais il faut de préférence choisir une perméabilité moyenne (15-25 %).

Pour les brise-vents minces, qu'ils soient artificiels ou naturels, la porosité optique du brise-vent correspond à sa porosité aérodynamique. Pour des barrières végétales très larges, la porosité aérodynamique est supérieure à la porosité optique et elle doit être évaluée spécifiquement. Toutefois, ce type de brise-vent est généralement utilisé pour l'agriculture et non dans le cadre d'un contexte urbain ou suburbain. En général, pour réduire les vitesses de vent autour des bâtiments, on recommande l'utilisation de barrières végétales d'une largeur de 0.2 à 0.3 fois leur hauteur, ce qui correspond bien à la haie traditionnelle. Pour les arbres, l'atlas éolien européen considère qu'une apparence très dense correspond à une porosité inférieure à 0.35, une apparence dense à une porosité comprise entre 0.35 et 0.5 et une apparence

dégagée à une porosité supérieure à 0.5. Un arbre qui a perdu ses feuilles présente une porosité de 70% et un arbre isolé avec feuilles de 50%.

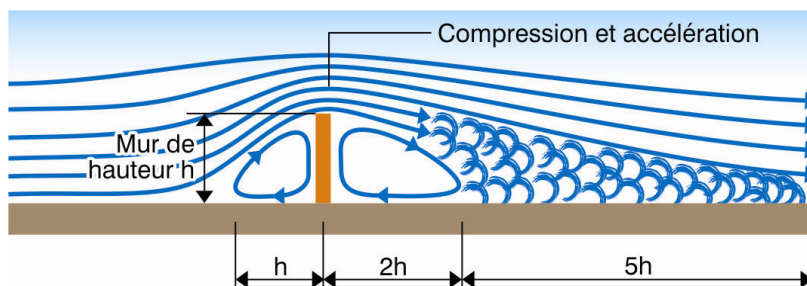


Influence du feuillage sur l'écoulement du vent.

Une légère diminution de la vitesse du vent a lieu jusqu'à une distance égale à environ 25 fois la hauteur du brise-vent. Par contre, la protection réelle couvre une distance plus courte. Pour un brise-vent dense, la vitesse du vent est réduite de 40% jusqu'à une distance égale à 8H et de 20% jusqu'à une distance de 12H.

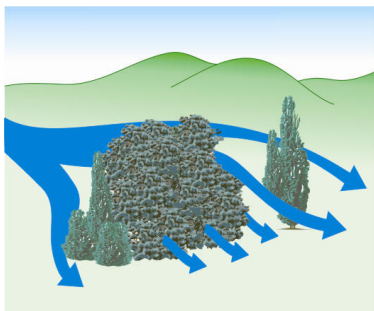
Différents types d'écrans végétaux et artificiels peuvent être mis en place pour dévier les mouvements d'air et servir de brise-vents. Nous passons en revue ci-dessous les différents types de brise-vents et leurs caractéristiques.

Qu'il s'agisse d'un mur, d'un talus ou d'une palissade jointive, un **obstacle plein** ne constitue pas un bon brise-vent. L'écoulement du vent autour d'un obstacle étanche à l'air est du même type que celui qui se produit autour des bâtiments. A l'avant, il y a une surpression qui fait s'élever l'écoulement d'air au-dessus de l'obstacle. A l'arrière, il y a une masse d'air relativement immobile en dépression sur une longueur environ égale à deux fois la hauteur de l'obstacle, derrière laquelle le vent redescend pour former des tourbillons qui s'étendent jusqu'à une distance égale à cinq fois la hauteur de l'obstacle.



Écoulement du vent autour d'un obstacle plein (Fontaine 1984).

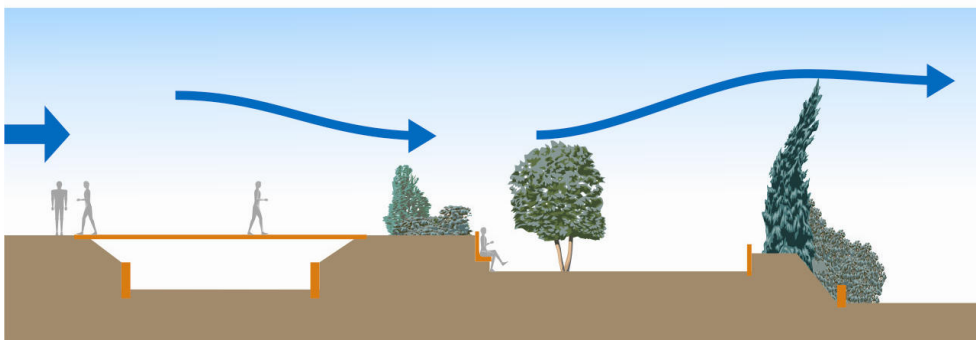
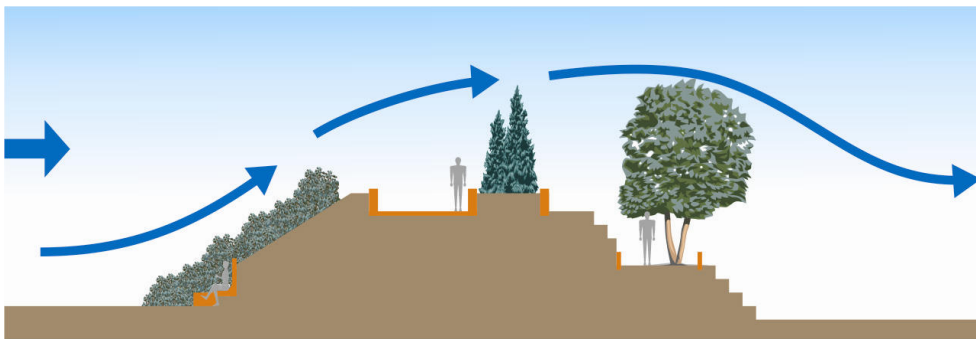
La **végétation** peut être utilisée comme une protection contre les vents. Haies, alignements d'arbres, essences grimpantes augmentent la rugosité à l'écoulement de l'air : la vitesse du vent est réduite et les déperditions par convection des bâtiments diminuent.



Écoulement du vent à travers un obstacle végétal (Izard & Guyot 1979).

Une grande variété de végétation (buissons, arbres et arbustes) peut être utilisée pour réaliser les écrans végétaux. Ce type d'écran au vent a du charme et permet une composition variée de l'espace et du paysage. En outre, la richesse de ses autres qualités bioclimatiques en font un élément de traitement privilégié pour les espaces extérieurs ; citons notamment l'ombrage et le dosage de la lumière, la limitation de l'échauffement des revêtements de surface, l'humidification et l'assainissement de l'air, la fixation des sols et le frein à son érosion, l'intimité visuelle, sa naturalité dans un contexte urbain, etc. Les principes aérodynamiques suivants doivent toutefois être respectés pour qu'un écran végétal serve réellement de brise-vent :

- Les écrans végétaux doivent présenter une perméabilité plus ou moins homogène sur toute leur hauteur. Ainsi, le pied des arbres ou des arbustes doit être garni par d'autres types de végétation (buissons, taillis,...) pour que l'ensemble forme un brise-vent efficace.
- La perméabilité optimale au vent correspond à un pourcentage de vide visuel nul ou faible. Par conséquent, la constitution des rideaux végétaux devra être dense.
- L'efficacité optimale est obtenue, comme dans le cas des écrans artificiels, pour une incidence orthogonale par rapport au vent. Il faut donc prendre en compte l'écoulement du vent critique le plus habituel sur le site considéré. D'autre part, dans le cas de brise-vent végétaux, il sera parfois nécessaire de prévoir un « bouclier » au vent permettant la croissance de l'écran végétal lors de sa plantation.
- Dans la pratique, le végétal voit son effet de protection contre le vent accru lorsqu'il est associé à d'autres interventions aérodynamiques telles que des mouvements de terre, des rocailles, des écrans artificiels (mobilier urbain, sculptures, écrans acoustiques,...).



Écoulement de l'air lié à la végétation et aux mouvements du terrain (Gandemer & Guyot 1981).

Il est très important de bien choisir la **porosité** des brise-vents végétaux. S'ils ne sont pas assez perméables à l'air, on revient au cas des obstacles pleins qui créent de la turbulence. Par contre, si on laisse passer trop d'air, le vent n'est pas ralenti et le brise-vent est inutile. Les plantations à feuilles caduques offrent une meilleure protection estivale qu'hivernale.

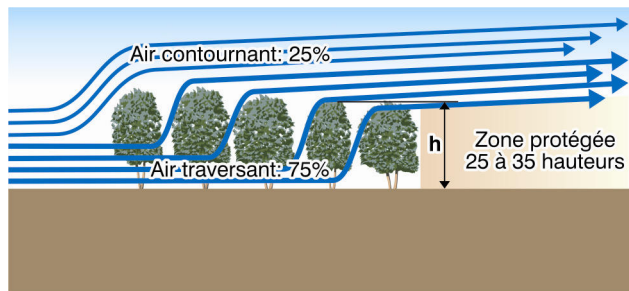


(Liébart & al. 1996)

Les différents types de **brise-vents végétaux** couramment utilisés sont :

- *La bande boisée, perméable et large .*

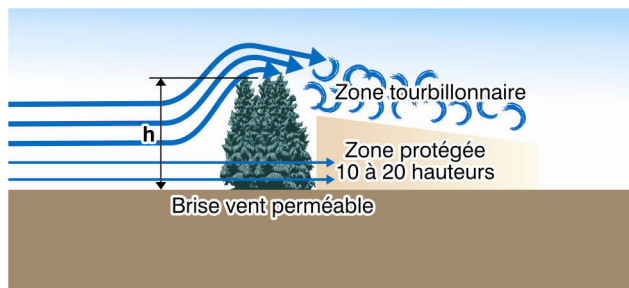
Une bande boisée, d'une épaisseur de 10 m de large au moins, dont la base est garnie (buissons, repousses, taillis, ...), est le brise-vent le plus efficace. L'air s'y engouffre presque totalement sans provoquer de turbulences, puis s'éliminera progressivement vers le haut. A l'arrière, aucune turbulence n'apparaît et la zone protégée s'étendra sur 25 à 35 fois la hauteur du bois.



Effet d'une bande boisée large et perméable sur l'écoulement du vent (Fonaine 1984).

- *Les haies :*

Plus simples à planter que les bandes boisées et tout de même très efficaces: zone protégée sur 10 à 20 hauteurs. Seul problème, les haies sont rarement très hautes et il est difficile de protéger une maison derrière, mais elles conviennent admirablement pour un jardin.



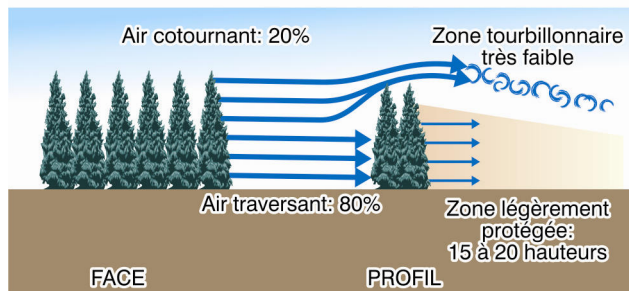
Effet d'une haie perméable sur l'écoulement du vent (Fontaine 1984).

Les haies dont le pourcentage de vide visuel est pratiquement nul donneront une protection identique à celle d'un écran mince de porosité géométrique $\Phi=0.2$. Pour un pourcentage de vide visuel de l'ordre de 1/3 (identification des formes derrière l'obstacle végétal), les haies donneront une protection identique à celle d'un écran

mince de porosité géométrique $\Phi=0.5$. Pour des haies de perméabilité visuelle de l'ordre de 50 à 60%, ce qui est le cas par exemple des haies à feuilles caduques en hiver, l'effet de protection est très limité et correspond environ à l'efficacité d'un écran mince de porosité géométrique $\Phi=0.7$. Pour une perméabilité visuelle supérieure à 60%, l'effet de protection au vent est quasiment inexistant (Gandemer & Guyot 1981).

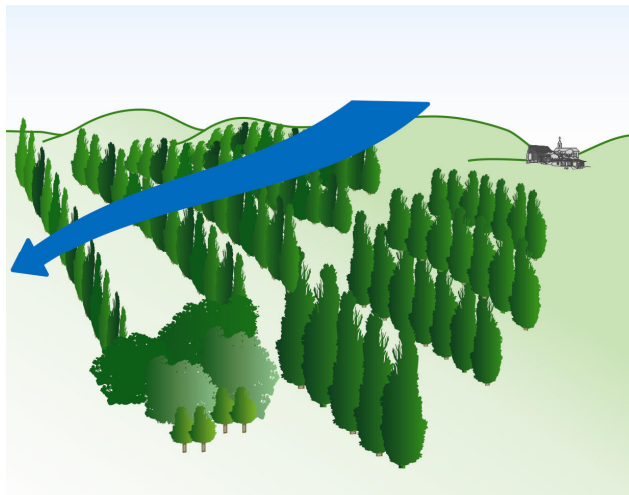
➤ *Les arbres en bande :*

L'efficacité d'un brise-vent dépend finalement de sa perméabilité qui s'exprime par le pourcentage de vides. Pour une perméabilité de 20 à 30% (correspondant à un perchis de feuillus en été), la zone protégée est de 15 à 20 hauteurs et la vitesse du vent est environ diminuée de moitié. Pour une perméabilité de 80% (correspondant à un perchis de feuillus en hiver), la vitesse du vent est seulement réduite de 20%.



Effet de rangée d'arbres (Fontaine 1984).

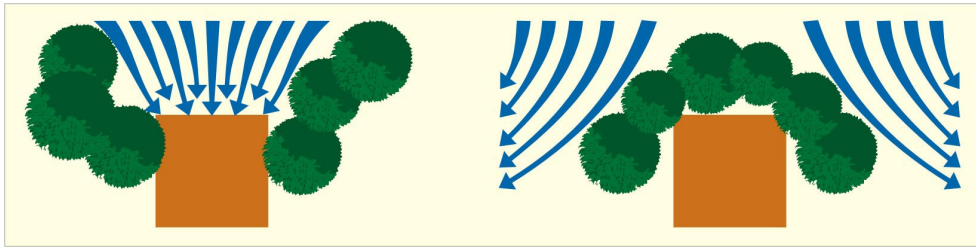
Le maillage agricole de la plaine de Crau en est un exemple. Des bandes végétales successives protègent les cultures du mistral. Leur orientation préférentielle est de l'axe est-ouest, l'espacement de ces barrières végétales varie en général de 5 à 10 fois leur hauteur.



Maillage végétal de la plaine de Crau pour protéger les cultures du mistral (Izard & Guyot 1979).

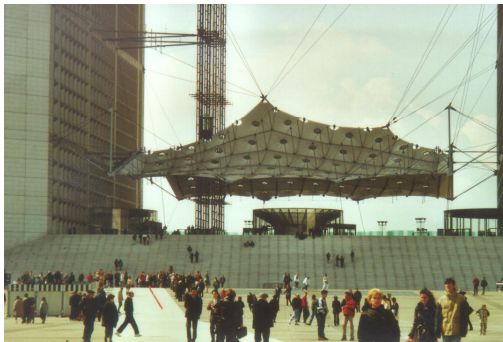
Lorsqu'il s'agit d'arbres à haute tige offrant une base dégarnie, une partie de l'écoulement d'air comprimé à l'avant passe en dessous de l'arbre provoquant même parfois une accélération du vent sous l'arbre et à l'arrière de celui-ci sur une distance de une à deux fois la hauteur du tronc dégarni. Ce type d'arbres mis en bande ne peut pas être considéré comme un brise-vent au niveau des piétons. Dans ce cas, il faut ajouter des arbustes, buissons ou haies au niveau de la tige des arbres pour compléter la protection au vent.

La végétation peut aussi servir à guider le vent dans la direction souhaitée...



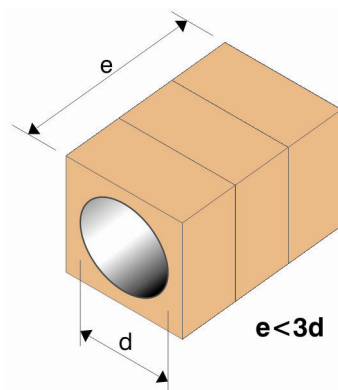
L'utilisation de la végétation comme guide aéraulique.

Des **brises-vents artificiels perméables** peuvent aussi être placés dans les espaces publics pour limiter la vitesse du vent, casser les turbulences de grande dimension ou guider le flux d'air.



L'arche de la Défense à Paris (Photo : S. Reiter).

D'une façon générale, la définition de la porosité géométrique d'un brise-vent artificiel gardera son sens physique tant que l'épaisseur du matériau restera inférieure à 3 fois le diamètre du trou, comme indiqué sur le dessin ci-dessous. Dans le cas de structures épaisses où les orifices ont une profondeur supérieure à 6 fois le diamètre du trou, la porosité géométrique effective du matériau devra être multipliée par un coefficient de forme de l'ordre de 0.6 pour retrouver la porosité équivalent à celle d'un écran plan mince (métallique ou filet). De plus, pour une porosité globale donnée, la répartition des orifices doit être la plus homogène possible. Il est conseillé de choisir le diamètre des orifices dans la gamme 2cm à 15cm. Pour assurer un meilleur confort des usagers, la perméabilité de la protection doit être aussi homogène que possible et avoir des orifices ou mailles de dimensions relativement petites (5 cm x 5 cm) vis-à-vis du corps humain. Pour des formes d'orifices particulières, il faudra avoir recours aux aérodynamiciens pour estimer la perméabilité effective. (Gandemer & Guyot 1981)



Dimensions permettant la définition de la porosité géométrique d'un brise-vent (Gandemer & Guyot 1981).

Des **brise-vents mobiles** peuvent être employés pour créer un barrage de l'air froid en hiver, tout en canalisant le vent en été et en offrant la possibilité de créer un ombrage adaptable.

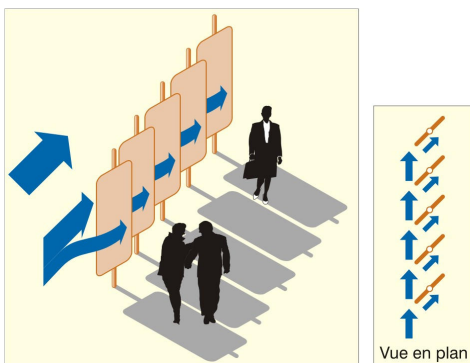
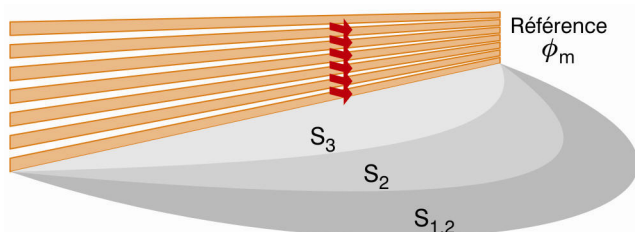


Illustration d'un brise-vent mobile.

Le graphique ci-dessous montre les différentes zones de protection au vent générées par la présence d'un brise-vent perméable. (Gandemer & Guyot 1981)



Zones de protection générées par un brise-vent perméable (Gandemer & Guyot 1981).

Nous pouvons dimensionner ces zones en fonction de la perméabilité du brise-vent et de ses dimensions (H et L). Les aires maximales de protection S1.2 ; S2 et S3 peuvent être déterminées pour une incidence du vent nulle par rapport au brise-vent et en fonction du type de vent (campagne ou ville).

Les expressions empiriques suivantes permettent d'évaluer les surfaces protégées du vent S1.2 et S2 en fonction de h (la hauteur du brise-vent), L (la longueur du brise-vent), Φ (la perméabilité du brise-vent), θ (l'incidence du vent par rapport à la normale au brise-vent) et K (le facteur de site selon le tableau ci-dessous). Rappelons que la surface S1.2 est bonne pour la marche mais qu'une surface S2 est nécessaire pour le confort des zones de détente avec station immobile prolongée. (Gandemer & Guyot 1981).

$$S_{1.2} = 16.5 h^{0.6} L (-2.7 \Phi^2 + 2.5 \Phi + 1) K$$

$$S_2 = 1.6 h^{0.7} L^{1.3} (-7 \Phi^2 + 3.6 \Phi + 1) \cos^2(\theta) K$$

Dans tous les cas, si $\Phi \geq 0.7$, alors $S_2 = 0$.

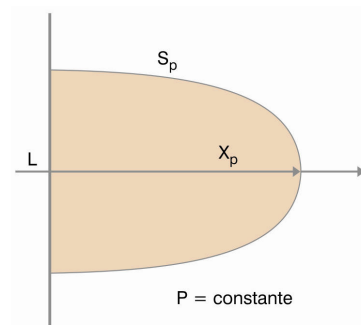
Le paramètre K prend en compte l'effet de la rugosité du terrain (et donc du profil de vent induit) et la perméabilité du brise-vent sur son effet de protection (Gandemer & Guyot 1981) :

Type de vent	Porosité moyenne de l'écran Φ	Facteur K
Vent de campagne	Toutes les porosités (entre 0 et 0.7)	1
Vent en zone urbanisée	0.2	0.8
	0.5	0.7

Ainsi, pour une perméabilité du brise-vent de 20%, la réduction des aires protégées en vent de ville par rapport au vent de campagne est de 20%. Par contre, pour une perméabilité de l'écran de 50%, cette réduction de l'effet de protection de l'écran atteint 30% en vent de ville par rapport à un vent de campagne.

Après avoir déterminé par ces formules les aires de protection au vent derrière un brise-vent en m^2 , on peut aussi obtenir la distance maximale de protection (x_p dans le schéma ci-dessous) pour un vent perpendiculaire au brise-vent. Ainsi, x_p peut être évalué comme étant le demi-axe d'une ellipse dont l'autre axe est le brise-vent. On obtient ainsi x_p à partir de la formule suivante et de la valeur S calculée par une des deux formules ci-dessus selon le critère de protection désiré. (Gandemer & Guyot 1981).

$$x_p \geq \frac{4S}{L\pi}$$



Définition graphique de x_p (Gandemer & Guyot 1981).

Cette approche est réaliste pour $L > 40m$. Pour des brise-vents plus courts, la ventilation transversale du sillage est très marquée, ce qui atténue l'effet de protection. Pour $L \leq 40m$, cette approche reste valable pour S_2 et x_2 par contre pour $S_{1,2}$, il faut alors réduire la valeur calculée de 30%, ce qui a aussi une répercussion sur $X_{1,2}$. (Gandemer & Guyot 1981).

Pour une incidence du vent θ entre 10 et 30°, l'aire de la surface protégée est plus petite et oblique, inscrite dans un triangle dont un des côtés est formé par le brise-vent et l'angle aigu qui le forme est déterminé en retirant 2θ de la normale à ce brise-vent du côté le plus proche du vent. Sous une forte incidence du vent ($\theta > 45^\circ$), bien qu'il subsiste encore une petite zone protégée (influence du frottement sur la rugosité notamment) on peut estimer que l'écran a perdu sa fonction de brise-vent (Gandemer & Guyot 1981).

Signalons que les brise-vents naturels conservent une efficacité supérieure par rapports à des écrans minces artificiels lorsque le vent vient de manière oblique par rapport au brise-vent (Heisler & Dewalle 1988).

Il faut enfin ajouter une remarque importante par rapport à l'influence de l'environnement bâti immédiat sur l'efficacité des brise-vents et plus particulièrement à leur application dans un contexte urbain. L'estimation des aires protégées selon les formules ci-dessus ont été élaborées dans le cas de brise-vents isolés, sans environnement proche, en présence d'un vent statique (campagne ou ville) ; c'est-à-dire qu'aucun sillage ou effet de masque particulier n'est venu altérer le fonctionnement du brise-vent. Au cœur d'un plan masse, les caractéristiques de l'écoulement alimentant le brise-vent vont être dépendantes du vent mais aussi de l'environnement immédiat qui se combine avec la présence de l'écran. Dans ce cas, nous vous renvoyons au paragraphe traitant des spécificités des mouvements d'air en milieu urbain (3.2.4).

Le vent est un facteur climatique important dans la détermination des besoins en énergie d'un bâtiment. Il influence le taux d'infiltration d'air du bâtiment, les possibilités de ventilation naturelle et les échanges de chaleur par convection à la surface de l'enveloppe des bâtiments peu isolés surtout s'ils comportent des vitrages simples ou même des vitrages doubles mais qui ne sont pas basse émissivité.

Nous nous posons la question de l'implantation idéale d'une construction pour limiter **les dépenses énergétiques liées aux mouvements d'air**. Faut-il se placer dans les parties les plus venteuses pour maximiser la ventilation naturelle ou garder une certaine couverture pour limiter les pertes par infiltration? La suite de ce paragraphe va tenter d'apporter des éléments de réponses à cette question.

La **pénétration de l'air** dans les bâtiments, qu'elle soit voulue et contrôlée (ventilation) ou involontaire (infiltration) représente une part importante de la consommation globale d'un bâtiment. Pour s'en convaincre, effectuons un rapide calcul comparant les déperditions annuelles par l'enveloppe et le renouvellement hygiénique de l'air pour un immeuble type.

Imaginons un bâtiment de bureau bien isolé de 15m * 50m au sol et de cinq niveaux en site ouvert. La surface de déperdition vaut $750 \text{ m}^2 + (750 \text{ m}^2 * 0.33) + (130\text{m} * 3\text{m} * 5) = 2950 \text{ m}^2$, en appliquant un coefficient 0.33 pour la surface en contact avec le sol, les déperdition y étant plus faibles. Supposons des pertes moyennes à travers la paroi de $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$, ce qui correspond à un bâtiment assez bien isolé. Pour les valeurs de température moyennes à Uccle, c'est-à-dire une température intérieure de 19°C et une température extérieure de 6.5°C , les déperditions seront de $0.6\text{W/m}^2\text{K} * 2950\text{m}^2 * 12.5\text{K} = 22.1\text{kW}$, ce qui représente, sur une saison de chauffe (5800 heures à Uccle), $22.1 \text{ kW} * 5800\text{h} = 128\,325 \text{ kWh}$.

Le simple renouvellement d'air hygiénique, s'il représente un taux de renouvellement de 0.75 volume d'air par heure, pour un volume d'air équivalent à 80% du volume total et une période d'occupation de 2500 heures, avec une différence de température de 10K (moyenne sur un an) demandera l'apport annuel de $0.75 * 1/\text{h} * 0.8 * 11250\text{m}^3 * 3.3 * 10^{-4} \text{ kWh/m}^3\text{K} * 2500\text{h} * 10\text{K} = 55\,687 \text{ kWh}$, ce qui correspond à plus de 40 pourcents des déperditions par l'enveloppe.

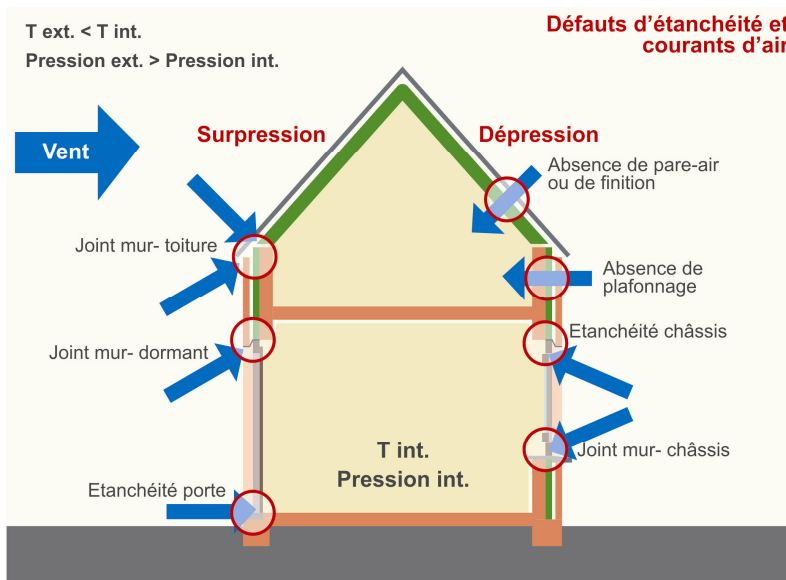
La prise en compte des gains solaires et internes, en diminuant le besoin de chauffage, et le développement d'un refroidissement par une ventilation naturelle iront encore davantage dans le sens d'une plus grande part relative de la demande énergétique liée à la ventilation par rapport au chauffage. A la lecture de ce calcul, nous ne pouvons douter du soin avec lequel la ventilation, qu'elle soit purement sanitaire ou qu'elle fasse activement partie de la régulation thermique du bâtiment, doit toujours être conçue et réglée. En outre, plus l'enveloppe est isolée, plus la part relative aux déperditions par renouvellement d'air augmente dans le bilan global.

Dans tous les bâtiments, il y a de l'air qui entre et qui sort d'un bâtiment de façon incontrôlée : il s'agit des **infiltrations** par les fissures, les trous et à travers les matériaux. Le taux d'infiltration dépend de la porosité du bâtiment et de la force du vent ainsi que des gradients de températures. Les infiltrations peuvent diminuer l'efficacité d'une ventilation, provoquer une surconsommation d'énergie, voir une incapacité à assurer des conditions de confort.

Un débit de $35 \text{ m}^3/\text{h}$ pour une simple fissure de 1m de long est une moyenne raisonnable. Ce débit représente à lui seul un besoin d'énergie annuel de $35\text{m}^3/\text{h} * 8760\text{h}/\text{an} * 10\text{K} * 3.3 * 10^{-4} \text{ kWh/m}^3\text{K} = 1012 \text{ kWh}/\text{an}$, soit l'énergie consommée par une ampoule de 100 watts pendant 14 mois.

La gestion de l'air intérieur et de ses mouvements peut aussi éviter une surconsommation de chauffage, par un meilleur contrôle des infiltrations. Celles-ci varient de 0.1 renouvellements d'air par heure pour un bâtiment étanche à 3 renouvellements pour un bâtiment peu étanche. Pour le bâtiment de bureau de 15m * 50m au sol et de cinq niveaux qui nous a déjà permis de donner des valeurs de consommations chiffrées, simplifions le calcul en prenant un volume d'air de 10 000 m³. Ce bâtiment induit donc sur un an (en prenant 10K de différence entre l'air intérieur et extérieur) une consommation de 10 000 kWh si les infiltrations sont limitées à 0.1 renouvellements d'air par heure (bâtiment étanche) et monte jusqu'à 300 000 kWh si le passage d'air à travers les infiltrations atteint 3 renouvellements d'air par heure (bâtiment peu étanche). L'impact du passage de l'air par infiltrations sur la consommation globale d'un bâtiment est donc loin d'être négligeable !

L'infiltration de l'air dans un bâtiment dépend de la qualité d'exécution de celui-ci. Ces infiltrations s'observent souvent dans certains détails de construction. Le graphe ci-dessous représente les défauts de construction typiques qui génèrent des pertes d'énergie par infiltration.



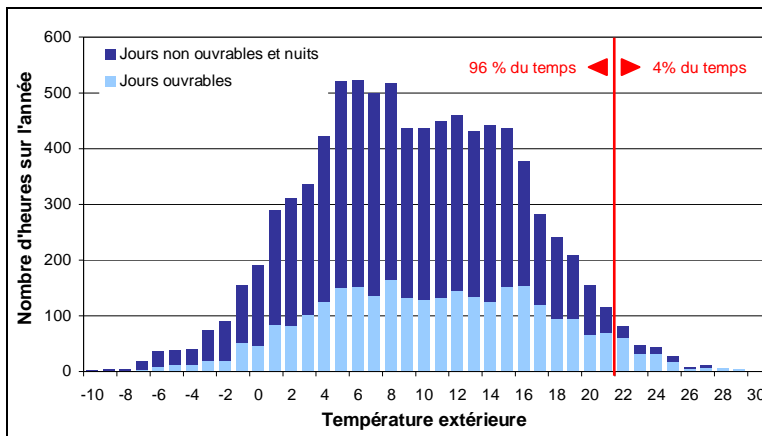
(Gratia & De Herde 2002).

La ventilation est le processus par lequel de l'air "propre" est intentionnellement amené dans un espace et de l'air vicié en est extrait. Qu'elle soit mécanique ou naturelle, la ventilation permet avant tout le contrôle de la qualité de l'air (par la dilution des polluants, des odeurs, etc.) et du confort thermique (par le contrôle de la température, du taux d'humidité et de la vitesse de déplacement de l'air dans un local). Le tableau ci-dessous montre les exigences en matière de débits d'air pour la ventilation de base (renouvellement d'air hygiénique) selon la norme belge NBN D50-001.

Tableau : Exigences de débit d'air selon la norme NBN D50-001.

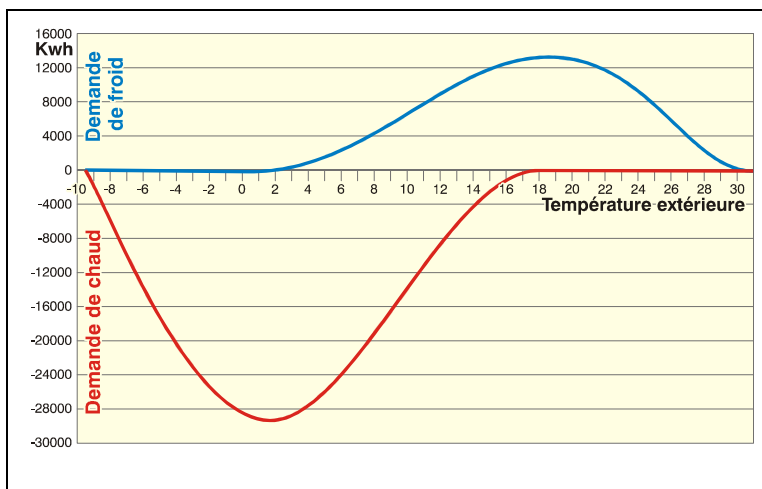
Exigence de base	3.6m ³ /hm ²	
Exigence complémentaire	minimum	maximum
Living	75m ³ /h	150m ³ /h
Chambre à coucher	25m ³ /h	36m ³ /h
Salle de bain, cuisine fermée	50m ³ /h	75m ³ /h
Cuisine ouverte	75m ³ /h	—
Toilettes	25m ³ /h	—

La ventilation naturelle peut être un moyen efficace de refroidissement des bâtiments. Différentes techniques sont développées en ce sens. Dans les pays tempérés, la climatisation (système HVAC) est surexploitée dans les bâtiments tertiaires (immeubles de bureaux, ...). Pour assurer le refroidissement des bâtiments par une ventilation naturelle nocturne, l'amplitude des variations de la température de l'air extérieur entre le jour et la nuit doit être importante c'est-à-dire d'au moins 5 degrés (Roulet 2004). En pratique, on estimera le confort comme satisfaisant si une simulation dynamique (basée sur une année climatique-type) prévoit au maximum 100 heures par an au-dessus de 25,5°C, dont 20 heures maximum au-dessus de 28°C. En Belgique, la température extérieure de l'air est inférieure à celle d'un bâtiment (entre 21 et 25°C) pendant la majorité de l'année. La température extérieure dépasse 22°C durant 300h/an, soit 4% du temps, et elle dépasse 24°C durant 150 h/an, soit 2 % du temps...



Occurrence des températures extérieures pendant une année type moyenne en Belgique (Architecture et Climat 2004).

Un bâtiment n'est pas refroidi uniquement lorsque la température extérieure est élevée. Suite aux apports internes (occupation, bureautique,...) et aux apports solaires, un bâtiment isolé est aussi refroidi alors qu'il fait frais dehors. C'est ce que montre le schéma suivant pour un bâtiment de bureau. Il reprend pour chaque niveau de température extérieure, la somme des demandes de chaud et de froid sur une année type. Sur l'ensemble des heures de l'année pendant lesquelles la température extérieure était de 12°C, le bâtiment de bureau étudié a eu besoin de 9.500 kWh de froid et de 8.000 kWh de chaud.



Demandes annuelles de chaleur et de froid d'un bâtiment de bureau en Belgique en fonction de la température extérieure. (Architecture et Climat 2004).

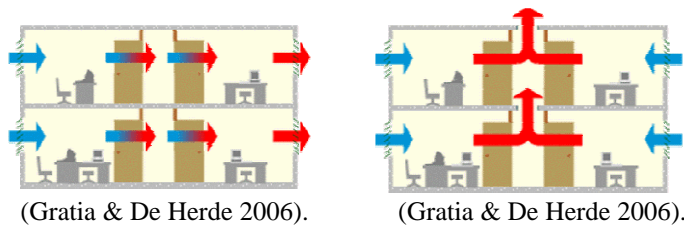
Une partie non négligeable de la demande de froid peut donc être satisfaite, en Belgique, en valorisant cet air frais extérieur, ce qui entraîne de considérables économies d'énergie. Le refroidissement actif peut même être totalement éliminé, remplacé par une ventilation naturelle de nuit, éventuellement complétée par une ventilation naturelle de jour. La ventilation naturelle est très appréciée par les occupants qui se plaignent parfois du bruit et des problèmes de santé liés au refroidissement mécanique. Ils apprécient tout particulièrement la possibilité d'ouvrir leurs fenêtres.



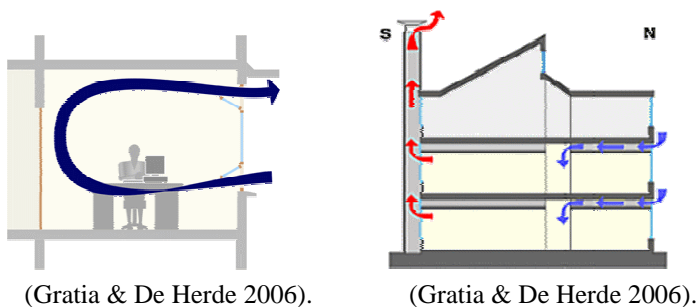
Ainsi, créer un microclimat plus proche des températures du confort humain place d'emblée le bâtiment dans une plage qui nécessite moins de consommations d'énergie car il offre la possibilité de valoriser la fraîcheur de l'air pendant les périodes de refroidissement du bâtiment et de limiter les déperditions dues à la ventilation et aux infiltrations pendant les périodes de chauffage du bâtiment.

Pour rester dans des limites du confort intérieur, le taux de renouvellement d'air généralement admis pour effectuer la ventilation diurne est de 4 volumes/heure, alors que durant la nuit, celui-ci est de 8 volumes/heure.

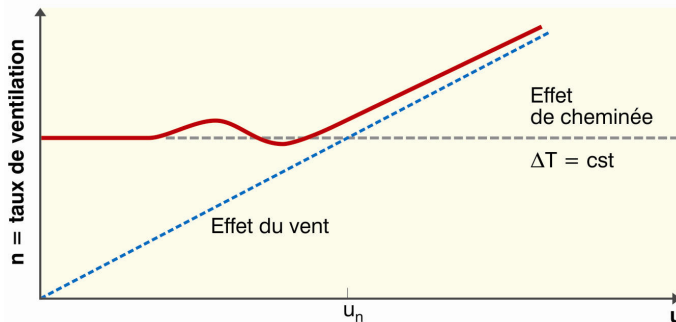
Le refroidissement naturel des bâtiments est assuré grâce à une combinaison entre l'effet du vent et le tirage thermique (effet de cheminée). Le vent tend à pousser l'air de la façade au vent à la façade sous le vent. Le tirage thermique tend (si l'intérieur est plus chaud que l'extérieur) à pousser l'air de bas en haut d'un bâtiment.



Le débit d'air de ventilation dû à l'effet de cheminée augmente avec la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur ainsi qu'avec la différence de hauteur des ouvertures. Cet effet peut donc être maximisé par l'ajout d'un conduit de cheminée qui permet de créer une ouverture au-dessus des toits, donc plus élevée.

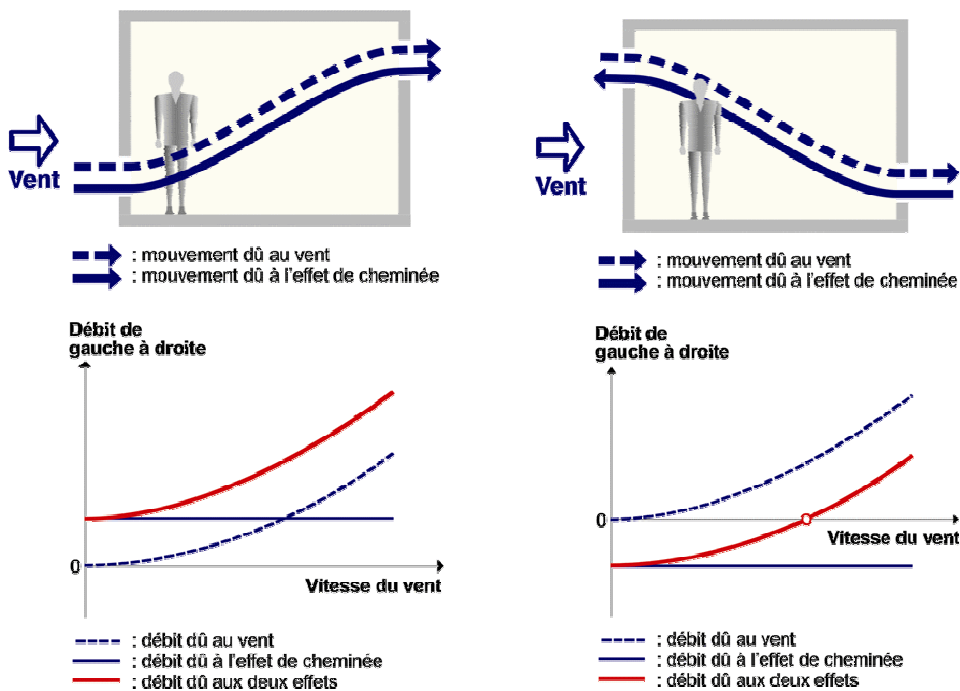


La comparaison de l'effet du vent et de l'effet de cheminée sur une fenêtre est représentée dans le graphe ci-dessous. Ce schéma montre qu'il existe une vitesse critique telle que les pressions dues au vent et à l'effet de cheminée sur une fenêtre soient identiques. Au-dessus de cette vitesse critique, le vent l'emporte ; en-dessous de cette vitesse limite, c'est l'effet de cheminée qui prédomine (Voos 1978).



(Voos 1978)

Parfois, l'effet de cheminée et l'effet du vent se renforcent ; parfois, ils sont en opposition. L'effet total ne se calcule pas simplement par une somme ou une différence algébrique des deux effets ; c'est ce que montrent les deux graphes ci-dessous. Si les ouvertures de ventilation sont placées de manière favorable l'effet du vent s'ajoute au tirage et la ventilation est renforcée. Si les ouvertures sont placées de manière défavorable ou si le vent souffle dans le mauvais sens, le vent contrarie le tirage et la ventilation est réduite, voire tombe à zéro pour une certaine vitesse de vent. Il convient donc de placer les ouvertures de ventilation des espaces traversants (en contact avec deux façades) face aux vents dominants. (Gratia & De Herde 2006)



A gauche : exemple où l'effet du vent et l'effet de cheminée se renforcent ; à droite : exemple d'opposition entre l'effet du vent et l'effet de cheminée. (Gratia & De Herde 2006)

Certaines formes de bâtiments favorisent le refroidissement naturel par rapport à d'autres. Citons par exemple le fait d'avoir une profondeur de bâtiment assez faible pour pouvoir créer une ventilation transversale.

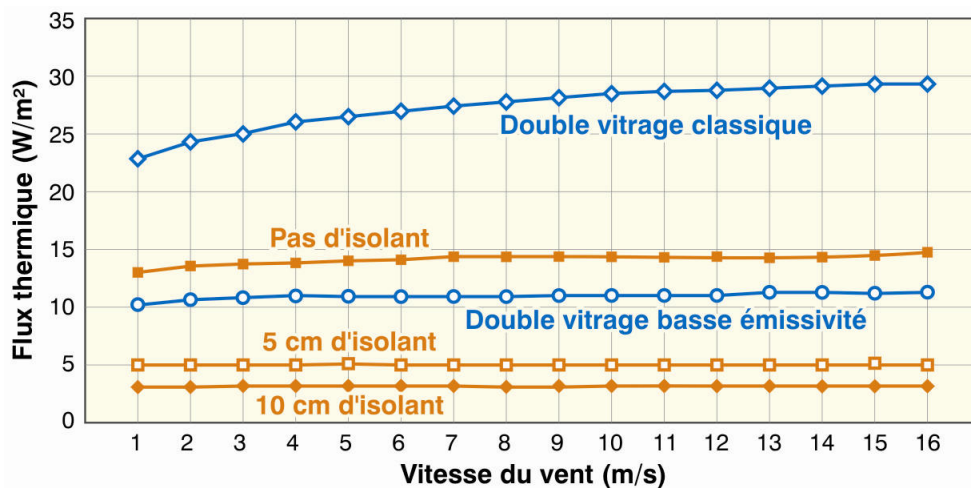
Si l'on veut accroître les possibilités de refroidissement naturel des bâtiments, l'orientation du vent devrait de préférence être oblique (30° à 60°) par rapport à leurs façades principales pour favoriser leur ventilation naturelle. En revanche, les infiltrations sont maximales pour un vent à 45° par rapport au bâtiment. Il y a donc un conflit d'intérêt entre la limitation des infiltrations et le refroidissement à l'aide de la ventilation naturelle des bâtiments. Pour des bâtiments isolés, il est donc important de veiller à ce qu'ils soient bien étanches si on les place à 45° des vents dominants; parfois, il sera même nécessaire d'implanter de la végétation pour ralentir la vitesse du vent. En revanche, dans un milieu urbain relativement dense, nous recommandons de favoriser la ventilation naturelle vu que le tissu urbain sert déjà de protection au vent et ralentit sa vitesse moyenne.

Le **transfert de chaleur par convection** entre une paroi et un écoulement d'air est exprimé par la formule suivante :

$$Q = h S (T_{\text{paroi}} - T_{\text{fluide}})$$

où h est le coefficient d'échange thermique par convection et S la surface d'échange.

La figure ci-dessous représente les déperditions thermiques d'un mur creux classique, d'un double vitrage classique et d'un double vitrage basse émissivité en fonction de la variation de la vitesse du vent et pour une différence constante de température entre l'intérieur et l'extérieur de 10°C. Ce graphe montre que les variations de la vitesse du vent n'ont quasiment pas d'influence sur les déperditions globales d'un mur creux isolé ou un vitrage basse-émissivité. Elles ont une légère influence sur la consommation des murs non isolés et une influence non négligeable sur les doubles vitrages classiques.

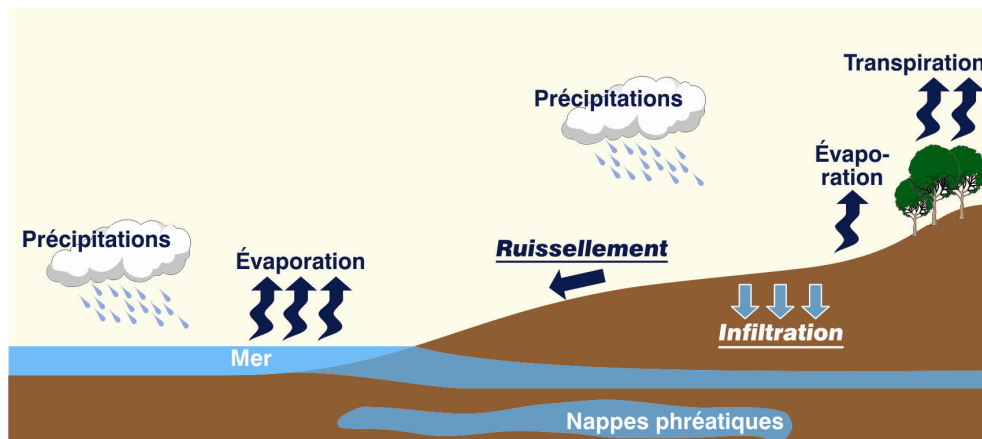


Flux thermique à travers un mur creux et un vitrage en Belgique selon la vitesse du vent. (van Moeseke 2004).

Nous constatons donc que le vent n'a que peu d'influence sur les déperditions thermiques par les murs en période de chauffe du bâtiment. En outre, cette influence est d'autant plus faible que la paroi est isolée. Concernant les fenêtres, la généralisation de vitrages basse-émissivité diminuerait encore plus l'influence du vent. C'est donc davantage dans ses effets sur la ventilation et les infiltrations que le vent influence les consommations d'énergie des bâtiments que par les pertes par convection des bâtiments.

L'humidité et les précipitations locales

Expliquons le cycle naturel de l'eau tel qu'il devrait toujours se produire. Le Soleil fournit à l'eau l'énergie nécessaire à son évaporation. L'eau des océans et des lacs s'évapore dans l'air, se condense en fines gouttelettes en suspension et forme les nuages. L'énergie solaire réchauffe l'atmosphère terrestre créant des pressions et dépressions capables de faire circuler ces énormes masses d'eau sous forme de nuages. Lorsque ces nuages rencontrent une dépression ou un refroidissement, les molécules d'eau changent de phase, se liquéfient et créent les précipitations. Ensuite, mue par la gravité, l'eau ruisselle, ravine le sol ou s'y infiltre en modelant tous les paysages de la Terre. La végétation absorbe une partie de l'eau de surface et de l'eau contenue dans le sol pour sa croissance. Cette eau absorbée est restituée à l'atmosphère par l'évapo-transpiration des végétaux. La majeure partie des eaux de pluie s'infilte dans le sol et alimente les nappes phréatiques. Une autre partie de ces eaux ruisselle vers les lacs, les mers et les océans. Le cycle est accompli.

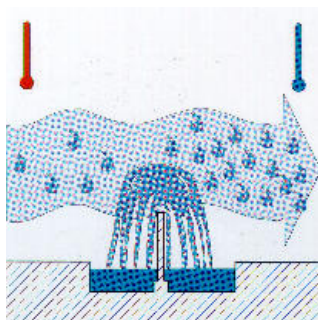


Le cycle naturel de l'eau.

Ainsi, le cycle naturel de l'eau régénère près de 600 000 km³ chaque année, soit 0.04% de la quantité globale d'eau du globe. L'eau douce des rivières se mêle donc à l'eau salée des mers et l'eau salée s'adoucit en s'évaporant grâce à l'énergie solaire. L'eau douce se recycle lentement mais ne disparaît jamais.

Des déséquilibres importants peuvent toutefois apparaître dans ce cycle naturel dès que l'homme perturbe l'une des phases de son développement. C'est malheureusement souvent le cas pour les urbanisations de grande taille.

L'humidité relative de l'air est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur à la température ambiante et la quantité maximale (niveau de saturation) qu'il peut contenir à cette même température. Les surfaces d'eau, les fontaines et la présence d'une végétation dense contribuent à l'évaporation et donc humidifient l'air.



Humidification de l'air par une fontaine

Il faut aussi noter que des sources de vapeur d'eau artificielles peuvent exister, telles que les tours de refroidissement des industries ou un usage extensif de refroidisseurs par évaporation.

Par contre, la concentration de vapeur d'eau diminue fortement avec l'altitude. Dans un relief montagneux, le versant au vent reçoit plus de pluie et le versant sous le vent beaucoup moins.

Le brouillard prévaut dans les vallées et les dépressions. Il apparaît souvent dans les zones côtières où un air très humide entre en contact avec les surfaces plus froides de la terre (Geiger 1980). En périphérie des grandes agglomérations, le brouillard et les précipitations sont plus importants qu'au centre des villes ou à la campagne (Merlin & Choay 1996).

3.2 Spécificités du microclimat urbain

Les grands centres urbains ont vu leur microclimat changer au rythme de l'activité humaine. Les millions de déplacements automobiles quotidiens, le chauffage et l'éclairage des édifices ou des lieux publics sont autant de sources de chaleur et de pollutions diverses qui modifient le microclimat urbain. Des éléments urbanistiques tels que la minéralisation généralisée des sols ou la présence de bâtiments élevés ont également un impact fondamental sur les modifications des différents paramètres climatiques en ville. En concentrant ses activités en ville, l'homme y modifie les différents paramètres de son microclimat : température moyenne plus élevée, vitesses de vent plus faibles mais turbulences plus élevées, modification des précipitations, nébulosité due à la pollution de l'air,...

Les modifications du climat urbain par rapport aux données climatiques moyennes provenant des stations météorologiques sont représentées dans le tableau ci-dessous. Les chiffres donnés sont basés sur une comparaison réalisée par Landsberg des valeurs mesurées en ville par rapport aux moyennes (sur 30 ans) hors milieu urbain sur un très grand nombre de villes autour du monde. (Landsberg 1981)

Paramètres du microclimat	Valeurs en ville par rapport aux zones rurales
Température (moyenne annuelle)	0.5 à 3°C en plus
Rayonnement solaire (total) sur un plan horizontal au niveau des toits	0-20% en moins
Vitesse du vent (moyenne annuelle) au niveau des toits	20-30% en moins
Humidité relative (moyenne annuelle)	6% en moins

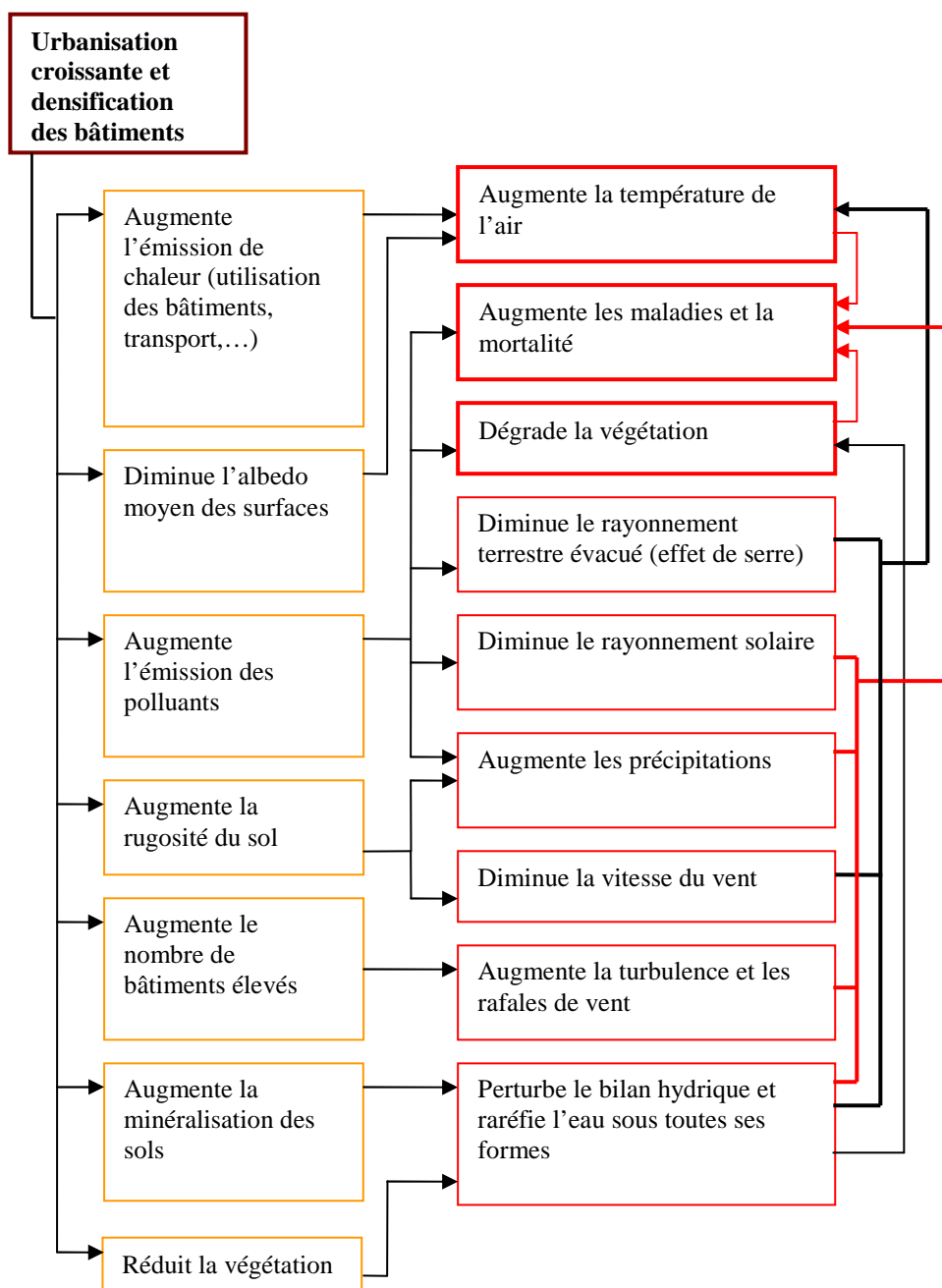
Cependant, les modifications les plus substantielles de microclimat urbain sont localisées au niveau des piétons. Les valeurs de réduction du rayonnement solaire total données par Landsberg correspondent à la réduction de la disponibilité du rayonnement solaire au niveau des toits ; il est toutefois évident que la réduction principale du rayonnement solaire en ville est provoquée par le degré d'obstruction dû aux bâtiments alentours.

Par ailleurs, au niveau des concentrations de polluants, les villes enregistrent des valeurs 5 à 25 fois plus élevées qu'à la campagne (Liébard & De Herde 1996).

Tout comme la vitesse moyenne du vent, la turbulence est modifiée par le tissu urbain. Par contre, contrairement à la vitesse moyenne du vent qui tend à être plus faible en zone urbaine, la turbulence et les effets de rafales de vent augmentent en ville par rapport à la campagne.

On peut aussi ajouter que la fréquence des brumes et brouillards augmente de 30% à 100% et que les hauteurs de précipitations augmentent de 5 à 10% (Merlin & Choay 1996). L'augmentation des jours de brouillard est due à la pollution et à la réduction de la vitesse du vent. Elle se manifeste sur les périphéries des grandes agglomérations. Dans le centre, en effet, l'îlot de chaleur tend à atténuer l'importance des brouillards.

Le dessin ci-dessous représente les facteurs qui entrent en jeu dans la formation d'un microclimat urbain ainsi que les conséquences négatives au niveau local d'une urbanisation du sol qui ne tient pas compte du microclimat.



Au niveau des enjeux globaux du développement durable, la volonté de densifier les zones urbaines a déjà été mise en évidence comme un élément positif pour l'environnement global de notre planète : réduction des consommations d'énergie grâce à la proximité des services et à la mitoyenneté, limitation de la quantité de pollution produite pour la planète, conservation du paysage naturel,... Il est toutefois évident que cela ne peut se faire sans tenir compte de la qualité de l'environnement local. La ville présente d'importants avantages au niveau global, mais par contre elle engendre de sérieux désagréments au niveau local: citons notamment la perte du contact à la nature, l'augmentation de la température pendant les périodes chaudes (rendues plus pénibles par la faiblesse des vents et la réduction de l'évaporation), l'augmentation de la pollution atmosphérique, etc.

Le climat urbain a des conséquences sur le confort et la santé des citoyens. Les troubles les plus graves de la santé sont observés lors de l'accentuation des fortes chaleurs et des grands froids. Les épisodes de forte pollution touchent avant tout les jeunes et les personnes âgées souffrant de troubles respiratoires (Escourrou 1991).

Les paramètres microclimatiques d'un site urbain peuvent donc présenter de substantielles modifications par rapport aux moyennes climatiques relevées aux stations météorologiques. **Le microclimat urbain suit une logique propre qui devrait enrichir tout projet urbain.**

Les paragraphes suivants décrivent en détail les différentes spécificités du microclimat urbain : la pollution de l'air en ville, l'effet d'îlot de chaleur urbain, la modification du rayonnement solaire en ville, la modification des mouvements d'air en milieu urbain et enfin la modification de l'humidité et des précipitations en ville.

3.2.1 La pollution urbaine

Les zones urbaines sont souvent les surfaces terrestres qui émettent le plus de polluants produits par l'homme et qui offrent les niveaux de concentrations de polluants les plus élevés. De plus, la pollution de l'air urbain est le facteur dominant dans l'exposition des êtres humains à la pollution. Vu que la plus grande partie de la population mondiale habite en ville, la qualité de l'air y devient un enjeu essentiel. La pollution de l'air affecte la santé des hommes et leur longévité, cause des dommages à la faune et la flore locale et cause une érosion excessive et une dégradation (habituellement par noircissement) des façades des bâtiments.

Lors de périodes de pollution intense, les admissions dans les services respiratoires des hôpitaux augmentent de 25 à 50% et les appels d'urgence pour crises d'asthmes se multiplient. A Bruxelles, l'Institut d'hygiène et d'Epidémiologie a publié un rapport liant le taux de pollution survenu en 1994 à une surmortalité importante : 1 226 décès supplémentaires par rapport à la moyenne prévisible.

Les problèmes de pollution de l'air en ville ne sont pas récents. Ils existaient déjà dans la Rome antique et ont pris une ampleur considérable depuis l'industrialisation de notre société. La photo ci-dessous montre une vue de Potteries (Stoke-on Trent) en Angleterre aux environs de 1910. Sur cette photo, la pollution est rendue visible par les fumées qui sortent des cheminées et qui vont former la pollution de fond de la ville à grande échelle. De nombreuses zones industrielles actuelles de par le monde ressemblent encore à cela. En Europe, actuellement, la plus grande différence est souvent qu'il n'y a plus de fumée et donc que le

processus de dispersion de la pollution n'est plus visible comme autrefois mais les émissions polluantes restent nombreuses.



Pollution de l'air (Littlefair & al. 2000)

Une partie de la pollution atmosphérique est créée au niveau des toits (anhydride sulfureux, poussières, oxyde de carbone, oxydes d'azote, composés organiques volatils): elle correspond aux émissions des cheminées d'habitations, des centrales thermiques, des usines. Du fait de la lutte contre la pollution industrielle, du développement de l'énergie atomique, de la baisse des chauffages individuels souvent mal contrôlés, les émissions d'anhydride sulfureux et d'oxydes d'azote ont fortement chuté dans les pays occidentaux depuis 1950. (Escourrou 1991)

Une autre partie de la pollution atmosphérique apparaît au niveau des rues. La source de pollution principale en est le trafic automobile. Les émissions polluantes dépendent de l'état des véhicules, de l'état des chaussées, du type de circulation (les émissions d'oxyde de carbone augmentent lors des démarrages et des ralentissements, celles d'oxydes d'azote lors de la vitesse accrue). Depuis le développement des essences sans plomb, les émissions de plomb diminuent. La circulation automobile engendre également des émissions de composés organiques volatils (particulièrement, de dérivés d'hydrocarbures). L'influence du climat sur ce type de pollution provoque des réactions chimiques (comme le brouillard photo-oxydant) et explique certaines pointes de pollution : les maxima se produisent à la périphérie des endroits de trafic intense, lors d'épisodes anticycloniques froids et sans vent. (Escourrou 1991)



(Liébard & al. 2004)



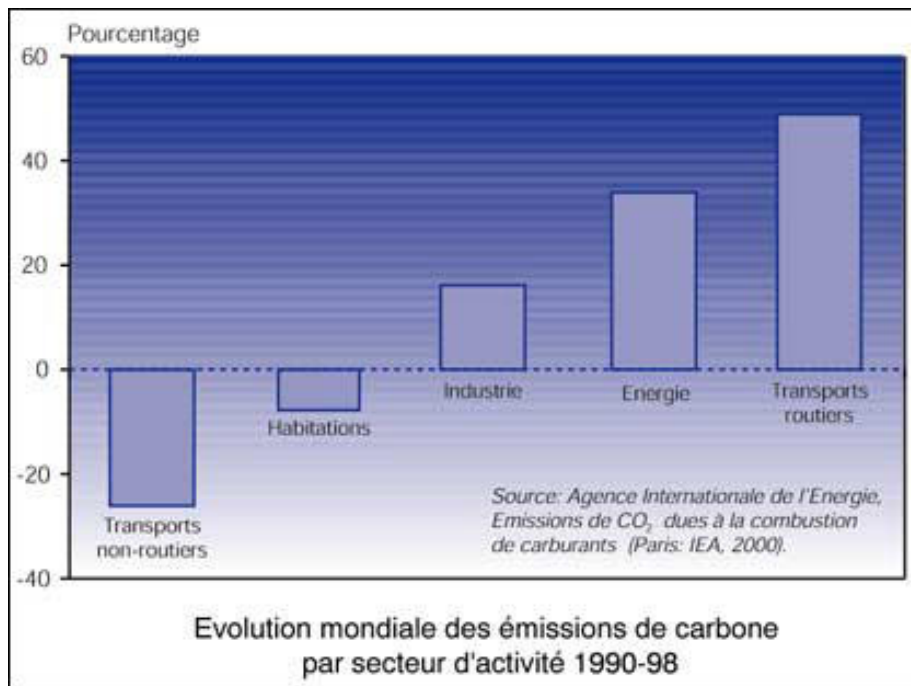
(Liébard & al. 2004).

Prenons Londres comme exemple : entre 1920 et 1950, les valeurs du rayonnement solaire d'hiver au niveau des toits de la ville avaient diminué de moitié par rapport à celles mesurées en dehors de la ville. La possibilité de profiter des gains solaires

et de la lumière naturelle en hiver était donc réduite de 50%. A Londres, en 1956, le Clean Air Act a été mis en place afin de limiter la pollution induite par les bâtiments et, en dix ans, les valeurs solaires d'hiver ont quasiment doublé, se rapprochant nettement des valeurs des alentours. Ces dernières années, la pollution de l'air à Londres s'est à nouveau fortement accrue à cause de l'augmentation importante du trafic automobile. Actuellement, des politiques de réduction de la voiture en ville y sont testées pour améliorer la qualité de l'air londonien.

Aujourd'hui, dans les villes européennes, l'utilisation de la voiture individuelle est souvent la source principale de la pollution de l'air. En dépit des réductions d'émissions des véhicules individuels, l'accroissement important du nombre de voitures en ville assure une augmentation constante de la pollution de l'air. A l'échelle de la rue, ce sont généralement les feux routiers, les tunnels et les parkings qui connaissent les plus fortes teneurs en oxydes de carbone (Escourrou 1991). A Bruxelles, par exemple, aux heures de pointe, la pollution présente des valeurs nettement trop élevées dans les tunnels par rapport aux critères énoncés par la World Health Organization (Santamouris & al. 2001). Les rues très étroites sont aussi des lieux d'accumulation des polluants émis au sol par les véhicules à moteurs et au niveau de la toiture par les cheminées industrielles et domestiques.

Le graphe ci-dessous synthétise les valeurs données par l'agence internationale de l'énergie (AIE) pour l'évolution mondiale des émissions de CO₂ dues à la combustion de carburants par secteur d'activité entre 1990 et 1998. Ce graphe montre que le transport routier est le secteur le plus critique du point de vue des émissions de CO₂.



Le tableau ci-dessous (CEE 1999) donne la comparaison des divers moyens de transport du point de vue écologique par rapport à la voiture individuelle pour un déplacement en personnes/ kilomètre identique. Dans ce tableau, deux voitures ont été prises en considération : une voiture avec catalyseur et sans catalyseur. Ce choix provient du fait que le pot catalytique n'est efficace que lorsque le moteur est chaud, ce qui signifie qu'on ne peut pas prendre en compte son effet bénéfique antipollution sur les petites distances parcourues en ville.

Moyen de transport	Voiture sans catalyseur	Voiture avec catalyseur	Bus	Vélo	Avion	Train
Consommation d'espace	100	100	10	8	1	6
Consommation d'énergie primaire	100	100	30	0	405	34
CO ₂	100	100	29	0	420	30
Oxyde d'azote	100	15	9	0	290	4
Hydrocarbures	100	15	9	0	140	2
CO	100	15	2	0	93	1
Pollution atmosphérique totale	100	15	9	0	250	3
Risque d'accident induit	100	100	9	2	12	3

(CEE 1999)

Les tendances actuelles de la mobilité en Belgique montrent également une croissance significative des déplacements motorisés individualisés. (STIB 2004)



Embouteillages aux heures de pointe à Bruxelles. (Photo : S. Rouche).

Le tableau ci-dessous provient d'enquêtes réalisées en Belgique. Il donne la répartition moyenne des déplacements sur une journée selon le mode de transport principal. (SFASTC 2001)

	Flandre	Bruxelles	Wallonie	Belgique
marche	13,5%	27,6%	15,9%	15,6%
deux-roues	12,9%	1,7%	2,9%	8,6%
transport public	4,7%	13,4%	5,2%	5,7%
voiture	67,9%	56,6%	74,5%	68,9%
autre	1,0%	,7%	1,5%	1,2%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

En Europe, 30% des trajets effectués en voiture couvrent des distances de moins de 3km et 50% sont inférieurs à 5 km : pour de telles distances, le vélo est plus rapide que la voiture en milieu urbain, même sans tenir compte des embouteillages aux

heures de pointe D'après la Commission européenne, un objectif de 14 à 17% de déplacements à vélo est réaliste. (CEE 1999)

Une bonne complémentarité entre le vélo et les transports publics doit être cherchée. On considère que la vitesse moyenne d'un piéton est de 5 km/h et d'un cycliste de 20 km/h, ce qui donne 0.9 km de distance parcourue en 10 minutes pour un trajet à pied et 3.2 km parcouru en 10 minutes pour un trajet à vélo.

A l'échelle du bâtiment, dans un immeuble de bureaux, la consommation journalière de 12 m² occupés par une personne correspond, en moyenne, à un parcours en voiture de 15 km. La consommation liée au transport des occupants du bâtiment est donc souvent plus élevée que la consommation du bâtiment lui-même ! Il est donc utile de veiller à limiter les déplacements des personnes qui seront amenées à utiliser chaque bâtiment, par exemple par l'implantation du bâtiment ou par le choix du traitement des emplacements de parking (Architecture et climat 2004).



(Architecture et Climat 2004)



(Photo : K. De Myttenaere)

L'explosion du parc automobile, au cours de ces dernières années, a signifié l'augmentation de la consommation d'énergie et des émissions toxiques pour la santé et l'environnement. Selon l'Organisation mondiale de la santé, la pollution liée aux transports provoque chaque année 500 000 morts et 4 à 5 millions de nouveaux cas de bronchites chroniques.

Ceci dit, la pollution globale urbaine reste encore fort liée aux autres types d'émissions : pollution industrielle, systèmes de combustion (chauffage des bâtiments, centrales énergétiques et incinérateurs de déchets), ...

Le bâtiment est un secteur non négligeable dans la lutte contre l'émission des gaz à effet de serre (GES) et ce, non seulement à cause de ce qu'il consomme en énergie (électricité et chauffage) en régime d'utilisation, mais aussi dès le processus de construction : plus de 10% des émissions de CO₂ et presque 20% de l'émission de dioxyde de soufre proviennent de la phase de construction du bâtiment (Liébard & al 2004). Ainsi, il est important de prendre en compte **le choix des matériaux de construction** pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les matériaux qui entreront dans le projet représenteront chacun un investissement énergétique spécifique en fonction de l'énergie nécessaire pour le produire, de sa localisation,.... On privilégiera donc le choix de matériaux de construction locaux et l'utilisation de matériaux recyclables ou recyclés,...

Un bâtiment écologique est souvent représenté comme une sympathique maison, économe en ressources et située en pleine nature, loin des concentrations urbaines et de leurs nuisances. Bien que cette image semble idéale, elle est trompeuse: en

effet, ce bâtiment aura besoin d'infrastructures et à prestations égales il nécessitera sensiblement plus d'énergie qu'un bâtiment banal implanté en ville (îlot de chaleur, mitoyens,...). Il est intéressant d'étudier la relation entre la forme d'un bâtiment et ses pertes de chaleur pour différentes typologies (appartement, semi-détaché, détaché, bungalow). La maison quatre façades dépense deux fois plus d'énergie par m² qu'un appartement dans un immeuble mitoyen.

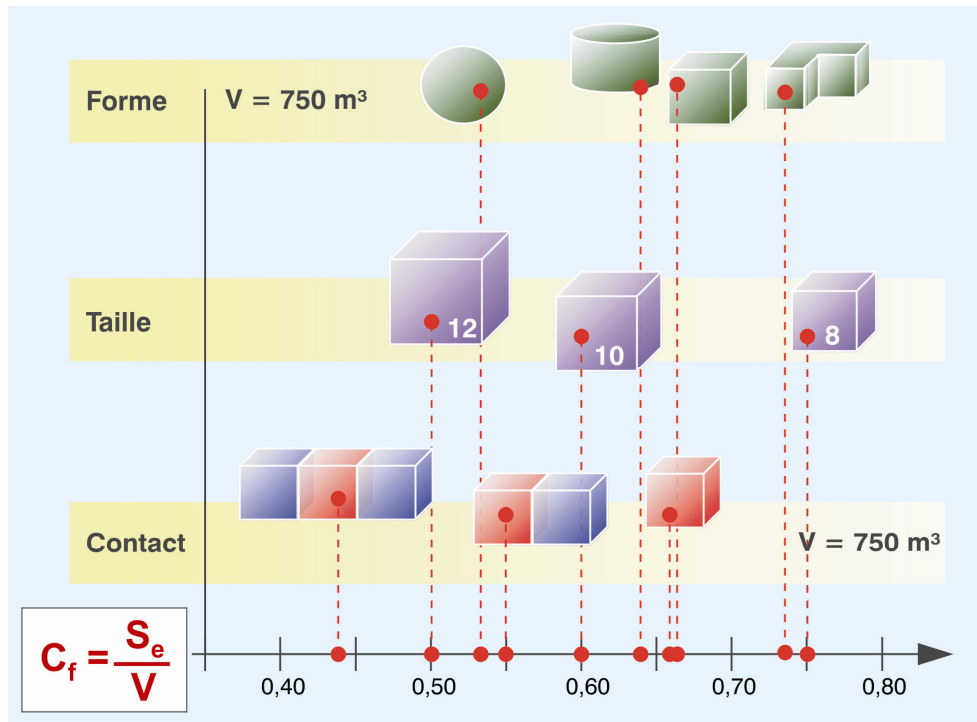
Le **coefficient de forme** d'un bâtiment mesure le rapport de la surface de l'enveloppe de déperdition au volume habitable (m²/m³). Il permet de qualifier les volumes construits en indiquant leur degré d'exposition aux conditions microclimatiques. Pour un même volume, les déperditions seront plus importantes à mesure qu'augmente la surface de l'enveloppe, dite surface de déperdition. Par conséquent, l'architecte doit chercher à minimiser la surface de déperdition tout en maximisant le volume intérieur, ce qui signifie réduire le coefficient de forme à son minimum. La compacité d'un bâtiment se définit par le rapport du volume habitable à la surface de déperdition de l'enveloppe, c'est-à-dire l'inverse du coefficient de forme. Donc, plus le coefficient de forme d'un bâtiment est faible, plus sa compacité (m³/m²) est élevée. Il s'agit évidemment d'augmenter la compacité d'un bâtiment pour limiter les consommations d'énergie et les émissions polluantes associées.

Si on se contente d'étudier l'influence de la forme sur la compacité, c'est la sphère qui apparaît comme la forme idéale. L'intérêt des formes sphériques a largement suscité l'imagination des architectes dans les années 70 : dômes, demi-sphères, structures polygonales complexes, visant toutes à économiser les matériaux et l'énergie en réduisant l'enveloppe. L'architecture vernaculaire, elle aussi, a toujours cherché à optimiser le rapport surface / volume, notamment par le travail de la toiture (à brisis, à deux ou quatre pans, etc.).



(Gratia & De Herde 2002)

Mais la compacité d'un bâtiment est un critère d'évaluation thermique complexe qui dépend non seulement de la forme volumique de l'édifice mais aussi de sa taille et des contacts qu'il entretient avec les bâtiments voisins. Le graphe ci-dessous classifie les coefficients de forme des bâtiments en fonction de la forme (à volume constant), de la taille (à forme constante) et du mode de contact entre bâtiments (à forme et volume constants).



Le coefficient de forme d'un bâtiment (Gratia & De Herde 2002)

Ce graphe permet de tirer la conclusion que le mode de contact entre volumes détermine de manière décisive leur compacité globale. Pour le même volume, le coefficient de forme d'une maison mitoyenne est inférieur à celui d'un bâtiment isolé car les deux murs mitoyens sont disposés entre deux espaces chauffés et ne doivent donc plus être comptés dans la surface de déperdition. Ainsi, la compacité d'une maison mitoyenne est encore supérieure à la compacité de la sphère. C'est pourquoi, la législation de nombreux pays encourage certaines typologies urbaines (rangées de maisons mitoyennes, immeubles collectifs) en abaissant les niveaux d'isolation globaux requis si la compacité du bâtiment est supérieure à un niveau de référence. Ainsi, tout bâtiment écologique devrait être partie prenante d'un habitat relativement dense.

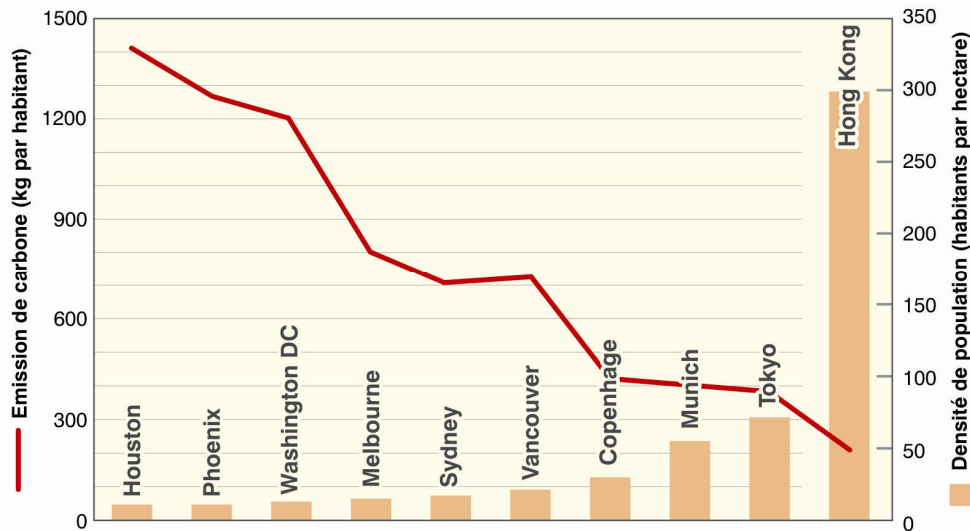
D'autres facteurs influencent les consommations d'énergie des bâtiments, tels que leur isolation, leur étanchéité à l'air, les obstacles environnants modifiant les conditions d'ensoleillement et de vent,...

A l'échelle de la ville, la dimension des îlots urbains et la dimension des voies jouent un rôle majeur dans l'efficacité énergétique des bâtiments qui les constituent. Il est donc judicieux de profiter de la compacité urbaine tout en créant des espaces publics urbains qui offrent un microclimat adéquat pour profiter des gains solaires, utiliser la ventilation naturelle, jouir d'un bon éclairage naturel,...

Pour des bâtiments très fortement isolés, l'impact du critère de compacité sur leur consommation est réduit mais la densité construite reste très importante de par ses implications sur la mobilité en milieu urbain.

La morphologie urbaine et son exploitation sont des critères importants dans l'évaluation des émissions polluantes en milieu urbain car ils influencent non seulement les consommations d'énergie des bâtiments (mitoyens,...) mais aussi celles dues au transport (opportunité d'utiliser des moyens de transport en commun, proximité des activités autour du domicile, ...). Ainsi, différentes études

ont porté sur le rapport entre la densité de la population urbaine et les émissions de CO₂ dues au transport routier. Elles arrivent toutes à la même conclusion que la **densité d'une ville** est un facteur important de la réduction des consommations d'énergie. Ces études montrent aussi que la diminution des dépenses d'énergie par habitant grâce à l'augmentation de la densité est très rentable pour une densité équivalente aux centres urbains européens traditionnels mais qu'elle devient minime pour des densités telles que celles de Hong Kong qui créent par ailleurs de nombreux désagréments locaux et vraisemblablement des surconsommations au niveau des bâtiments.

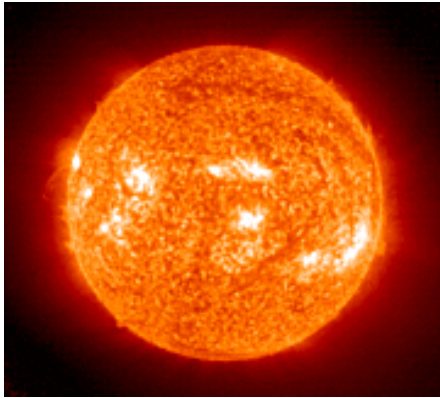


Rapport entre la densité de la population et les émissions de carbone dues aux transports en 1990 (Kenworthy et al. 1999).

On peut donc conclure que la densité des villes et l'efficacité de la distribution de son transport public sont des critères déterminants pour les consommations de CO₂.

Notons aussi que l'utilisation des **sources d'énergie renouvelable** permettrait de limiter l'utilisation de sources d'énergie polluantes. Toute combustion génère des fumées qui contiennent certaines substances nocives pour l'environnement, toxiques pour l'homme et nuisibles pour les matériaux de construction. Quoi qu'il en soit, il est indispensable d'arriver à une réduction de l'émission de ces substances dangereuses, ce qui peut être réalisé en partie par une utilisation rationnelle de l'énergie. Si la priorité est donnée à l'efficacité énergétique des bâtiments, à la réduction du trafic automobile individuel et à l'utilisation maximale des énergies renouvelables, les émissions de polluants pourraient être réduites à temps afin d'éviter une catastrophe mondiale.

Parmi les énergies alternatives, le nucléaire n'est pas considéré par le développement durable à cause des risques énormes liés à une erreur humaine toujours possible et aux déchets produits. En outre, doubler le nombre mondial de centrales, un investissement immense, ne diminuerait que de 3% l'émission de CO₂. Les sources d'énergies étudiées sont donc l'hydraulique, l'éolien, le solaire, la géothermie et la biomasse (bois, biogaz, déchets de l'agriculture). En Europe, 6% de la production d'énergie provient de ces énergies renouvelables. En fait, sur les bases des conditions techniques et économiques actuelles, ces énergies pourraient contribuer pour environ 40% de la consommation énergétique mondiale. (Liébard & De Herde 1996)



(Photo : Greenpeace)



(Photos : S. Rouche.)

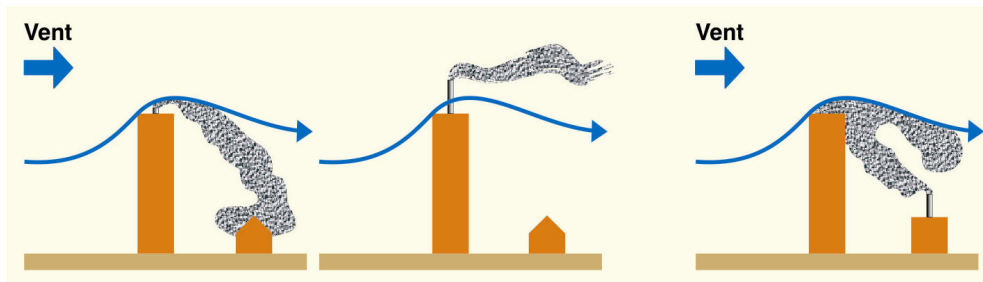
La pollution atmosphérique en ville dépend de facteurs météorologiques (la vitesse du vent, sa direction, la stratification de l'atmosphère) ainsi que des effets de la topographie locale et des obstacles locaux (densité construite, morphologie bâtie, variabilité des formes, hauteur et largeur).

Les vents faibles favorisent la formation de brume et de brouillard. Sous de telles conditions, les polluants ne sont pas entraînés ni dispersés, la pollution peut donc atteindre des valeurs particulièrement élevées au voisinage des sources. Ce fut le cas, par exemple, dans la vallée de la Meuse en décembre 1930 : on compta une soixantaine de décès dus à la pollution et de nombreux accidents pulmonaires graves. (Defrise 1973)

Les vents les plus polluants sont généralement les vents dont la vitesse est faible (Escourrou 1995). En Belgique, il est important de noter l'absence de corrélation nette entre la direction des vents dominants et la localisation du maximum de pollution provoquée par une source. Ceci est dû au fait que le vent provenant du secteur Sud-Ouest est le plus fréquent en Belgique mais qu'il s'agit d'un vent turbulent dont la vitesse moyenne est de 4m/s. Malheureusement, en Belgique, la rose des vents est très homogène lorsqu'on se concentre sur les vents de faible vitesse. On ne peut donc pas en tirer une règle précise pour l'implantation des sources de pollution par rapport aux agglomérations. (Godart 1971)

Les choix urbanistiques de base influencent fortement la capacité des villes à disperser la pollution produite. Certaines villes, comme Mexico ou Athènes sont célèbres pour leurs taux de pollution : encaissées dans une dépression, à l'écart des grands vents, tous les sous-produits de l'activité humaine s'y accumulent en quantités dangereuses sous forme solide, liquide et gazeuse. Les enjeux liés à la santé et au confort des citoyens y deviennent aigus.

Des petites cheminées sur un bâtiment élevé peuvent causer des zones de pollution intense dans le sillage à faible vitesse d'air qui prolonge le bâtiment. Par contre, si la cheminée est conçue suffisamment haute pour pénétrer dans la zone de séparation de l'air, la pollution locale est minimisée. Un autre problème peut apparaître au niveau des cheminées d'un bâtiment de petite hauteur situé à proximité d'un édifice nettement plus élevé : la fumée peut être redirigée vers le sol ou bien être envoyée vers le toit du bâtiment élevé, là où les bouches de ventilation sont généralement installées. Il est donc nécessaire dans ce cas de créer une cheminée spécialement élevée ou bien de placer le petit bâtiment à une distance suffisante du bâtiment élevé. Les schémas ci-dessous expliquent ces risques liés à l'influence du vent sur la propagation de la pollution.



(Bottema 1999)

Pour que l'augmentation des concentrations de polluants au niveau du sol due à la présence d'un bâtiment élevé soit inférieure à 30%, il faut respecter les règles suivantes (Bottema 1999 d'après EPA 1985):

1/ le sommet de la cheminée du bâtiment élevé doit atteindre au moins la hauteur suivante :

Hauteur de cheminée minimale = $H + 1.5 \min(W, H)$

où $\min(W, H)$ signifie la valeur la plus faible entre la hauteur et la largeur du bâtiment élevé

2/ cette hauteur de cheminée minimale doit être appliquée autour du bâtiment élevé dans un rayon égal à cinq fois la valeur la plus faible entre la hauteur et la largeur du bâtiment ($\min(W, H)$).

La morphologie du tissu urbain, sa mixité et la géométrie du bâti influencent la dispersion des polluants. La hauteur, l'espacement des bâtiments et leurs orientations déterminent la structure des mouvements d'air qui pourront disperser les polluants ou au contraire les concentrer au niveau des espaces publics. L'affection des bâtiments, des activités et l'organisation des circulations (routes, parkings, transports en commun) influencent l'intensité du trafic. Par exemple une zone d'activité mixte (habitat, travail) permet une diminution de la circulation pendulaire et une meilleure utilisation des infrastructures et de l'énergie, ce qui a pour conséquence de diminuer la pollution produite localement. La géométrie de l'enveloppe des bâtiments conditionne les échanges thermiques des bâtiments et donc leurs consommations d'énergie ainsi que la pollution qu'ils engendrent.

La ville compacte qui est le meilleur modèle urbain pour limiter les émissions de CO_2 crée malheureusement la dispersion la plus faible du point de vue de la pollution à grande distance (Manins & al. 1998); elle nécessite donc d'autant plus de contrôle des émissions polluantes.

La pollution locale d'un lieu est toujours la somme de la concentration très homogène qui vient de loin et des polluants produits dans un rayon proche du lieu considéré. Les concentrations de pollution peuvent varier fortement localement dans le tissu urbain car elles dépendent fortement des mouvements d'air qui sont stationnaires et qui sont fortement affectés par les bâtiments et la topographie.

Les paramètres urbanistiques influencent la dispersion des polluants émis sur une hauteur allant du sol à 2 ou 3 fois la hauteur des bâtiments, ce qui correspond à la majorité des émissions locales, à l'exception des très hautes cheminées industrielles. Par contre, la conception à petite échelle de la forme urbaine a peu d'influence sur la pollution qui est générée à une distance de plus de 1km.

La pollution produite localement doit être ventilée le plus rapidement possible pour éviter des fortes concentrations locales. La forme urbaine influence la dispersion des polluants par son influence sur la vitesse de l'air en milieu urbain, car les concentrations de polluants sont inversement proportionnelles à la vitesse de l'air, et par son influence sur la turbulence de l'air qui peut maximiser localement la vitesse de dispersion des polluants.

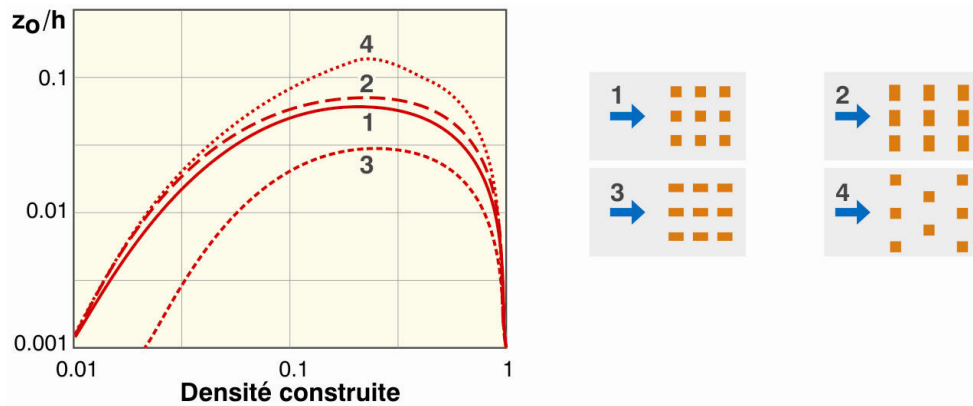
La géométrie urbaine affecte la capacité de la ville à disperser les polluants produits au niveau de la rue et des toitures car :

- la rugosité de surface de la ville affecte la turbulence mécanique produite et la forme du profil de vent vertical. La rugosité du milieu urbain dépend à la fois de sa densité et du type de groupement des bâtiments.
- la géométrie des rues détermine la profondeur de la zone de dispersion des polluants. Il s'agit non seulement de la hauteur moyenne des bâtiments et de leur espacement mais aussi de l'orientation des rues principales par rapport aux vents dominants.
- l'inhomogénéité des hauteurs du bâti influence l'écoulement du vent en milieu urbain. La hauteur et la largeur au vent des bâtiments qui sont supérieurs à deux fois la hauteur moyenne des bâtiments influencent la dispersion des polluants autour de ceux-ci.
- l'îlot de chaleur crée des brises thermiques entre la campagne et le centre-ville.

La densité urbaine est la surface construite divisée par la surface totale de la zone considérée. Plus la longueur de rugosité est grande, au plus l'intensité de turbulence est importante et au plus la profondeur de la zone de dispersion est grande. Pour des éléments identiques, la longueur de rugosité augmente avec l'accroissement de la hauteur des éléments et de leur densité jusqu'à un point critique, à partir duquel la rugosité diminue à cause de l'effet de masque urbain. La longueur de rugosité relative Z_0/h (où h est la hauteur moyenne des éléments) augmente avec la densité des éléments jusqu'à une pointe qui vaut typiquement 0.2 – 0.3 et se produit pour des densités d'environ 0.25, allant de 0.13 à 0.32 (Oke 1988). Bottema confirme ce résultat en montrant que la ventilation maximale espérée en liaison avec la rugosité du sol correspond en général à une densité construite d'environ 20-25%. (Bottema 1993)

Pour Littlefair & al, la densité urbaine influence seulement très légèrement la dispersion des polluants par l'intermédiaire du paramètre de rugosité du sol mais elle modifie fortement la vitesse de l'air dans les espaces publics et agit par cet effet sur la dispersion des polluants (Littlefair & al. 2000).

Le graphe ci-dessous montre l'évolution de la rugosité d'une urbanisation en fonction de l'augmentation de sa densité construite et du type de blocs construits. Les groupes de bâtiments avec une configuration en quinconce sont plus favorables à la dispersion des polluants qu'un quadrillage normal car ils présentent une rugosité supérieure à ce dernier. Des bâtiments implantés dans le sens du vent, rendent l'écoulement plus facile et diminuent donc la rugosité, même s'ils augmentent la vitesse de l'air et qu'ils sont donc préférables du point de vue de la ventilation que les bâtiments placés perpendiculairement au vent. Dans tous les cas, la rugosité maximale se produit pour une fraction construite d'environ 20% mais le maximum est relativement plat sur une large bande de densité urbaine (Bottema 1993).



(Bottema 1993)

La manière dont les bâtiments sont disposés les uns par rapport aux autres (en lignes, en îlots, répartis uniformément,...) influence fortement l'écoulement du vent et donc ses effets aérodynamiques qui sont prépondérants sur les concentrations de polluants. La largeur des bâtiments ou groupes de bâtiments a une influence maximale pour une densité urbaine de 20%. De manière générale, on peut dire que la dispersion des polluants est maximale quand les bâtiments sont relativement larges et bas, avec une densité basse à modérée. (Littlefair & al. 2000)

Oke décrit le développement de trois régimes de vent différents le long d'une rue délimitée par des bâtiments de même taille et forme, quand le vent est perpendiculaire à la rue. Ces régimes dépendent du rapport entre hauteur de bâtiments et largeur de la rue, H/W , avec un effet de séparation quand $H/W > 0.65$, un effet d'interférence quand H/w est compris entre 0.33 et 0.65, et un flux isolé quand $H/W < 0.33$. (Oke 1987)

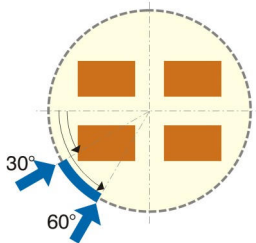
Pour des rapports H/W faible, la dispersion est bonne et elle est reliée directement à la vitesse du vent. Pour un rapport H/W compris entre 0.33 et 0.65, bien qu'il puisse y avoir des poches de pollution locales, globalement il y a un bon mélange d'air entre l'air de la rue et l'air propre de la couche limite au-dessus des toits. Ce mélange d'air est fortement réduit dès que la géométrie induit un flux d'air séparé c'est-à-dire pour un rapport $H/W > 0.65$. (Oke 1988)

Dans les rues très profondes (H/W élevé), deux boucles d'air se superposent et la dispersion des polluants due au vent est ineffective. Cette géométrie risque de créer de graves problèmes de pollution de l'air dans nos villes où les transports automobiles sont très fréquents, vu que pour ce type de géométrie la diffusion des polluants n'est possible que par effet thermique (différence de température).

De Pauw, Shieh, Nakamura, Oke, Mc Cormick, Yamartino et Wiegand, qui ont tous travaillé avec un rapport H/W entre 1 et 1.5, obtiennent des valeurs proches de 2m/s comme limite de la vitesse du vent au-dessus des toits pour créer une circulation qui en dépende. Dans ce cas, le mouvement d'air créé au niveau du sol est dans le sens inverse du sens du vent au-dessus des toits. Pour des vitesses de vent inférieures, les effets thermiques et mécaniques deviennent prépondérants. (Santamouris & al. 2001) Les données météorologiques de la Belgique associées à un profil de vent urbain nous donnent une vitesse moyenne sur l'année de 2m/s mais ce flux d'air n'est pas assuré à tout moment et les débits de polluants pouvant être éliminés ne sont pas encore déterminés.

Il serait nécessaire d'étudier de manière approfondie les débits de dispersion des polluants en fonction du vent et des effets thermiques pour différentes morphologies construites. Les bâtiments peuvent être regroupés en îlots géométriques formant de longues rues bien définies ou en un tissu moins ordonné (comme les centres médiévaux par exemple). Mais le comportement aérodynamique d'une zone urbaine dépend autant de son orientation que de sa forme car une géométrie très orthogonale présente de larges ouvertures sous certaines orientations mais bloque le vent dans les autres directions.

En milieu urbain, la dispersion des polluants est maximale pour une orientation du vent allant de 30° à 60° par rapport à l'axe des rues principales. Dans le cas, d'un vent parallèle à l'axe de la rue, les polluants sont propagés le long de la rue dans un premier temps avant d'être dispersés. L'orientation la plus critique est bien sûr celle où le vent est perpendiculaire au canyon, ce qui limite les possibilités de ventilation de la rue. Il est donc idéal de placer les rues importantes et très polluées sous un angle de 30 à 60° par rapport au vent dominant. Ainsi, en Belgique, où le vent dominant vient du SO, les rues orientées est-ouest sont idéales pour la dispersion des polluants en milieu urbain.



En conclusion, une géométrie de rue correspondant à $H/W \leq 0.65$ associé avec une densité construite d'environ 0.25 et une orientation préférentielle des axes majeurs de 30 à 60° par rapport aux vents dominants fournit la meilleure situation pour la dispersion des polluants locaux.

Certaines zones urbaines présentent des bâtiments de hauteur relativement homogène, tandis que d'autres proposent de larges variations de hauteur. Cette différence est d'autant plus importante que la densité urbaine est élevée (> 20%). En effet, de fortes variations de hauteur encouragent la pénétration de mouvements d'air à plus grande vitesse au niveau du sol urbain. Cette variation de hauteur semble avoir peu d'effet sur la vitesse de dispersion des polluants due à la turbulence de l'air par contre elle augmente fortement la vitesse moyenne de l'air au niveau du sol et donc réduit les concentrations de polluants grâce à cet effet.

L'amélioration de la ventilation naturelle et de la dispersion des polluants due à une plus grande variabilité de la hauteur du bâti peut même favoriser une zone de densité supérieure à un quartier de taille homogène dont la densité est plus faible. (Santamouris & Asimakopoulos 1996).

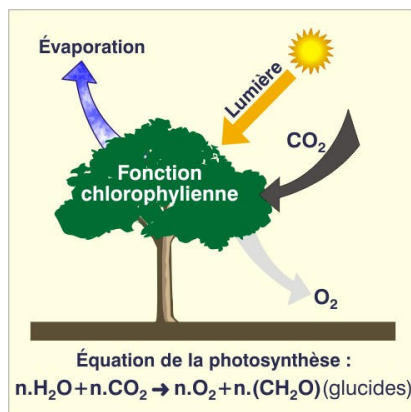
Ainsi, la présence d'un petit nombre de bâtiments plus élevés que la moyenne, répartis à travers des îlots de bâtiments homogènes, sont capables d'améliorer l'échange d'air entre la rue et la couche au-dessus des toits, favorisant une bonne qualité de l'air dans les rues au niveau piéton. Pour des bâtiments isolés ou nettement plus élevés que la hauteur moyenne, la dispersion des polluants augmente avec leur largeur et avec leur hauteur. L'augmentation de la largeur des bâtiments n'a toutefois une influence que jusqu'à huit fois sa hauteur. Si le bâtiment est encore plus large, cela n'a plus d'influence sur la dispersion des

polluants. Dans le cas de bâtiments élevés, il faut toutefois faire attention au confort au vent au niveau des piétons.

Nous proposons donc de créer des variations moyennes de la hauteur du bâti, comme par exemple surélever les coins d'une rue d'une hauteur égale à 1.5 ou 2 fois la hauteur moyenne des bâtiments, ce qui est très bon pour la ventilation et la dispersion des polluants, sans générer de problèmes pour le confort au vent des piétons. De plus, cela apporte de la diversité dans la ville, créant des rythmes et la possibilité de repères visuels tout en évitant des inconforts excessifs.

D'autres éléments morphologiques plus spécifiques pourraient être étudiés du point de vue de leur impact sur la pollution urbaine. Par exemple, lorsque les toits sont en pignon, l'intensité de turbulence est plus grande que pour des toits plats. D'autre part, dans les cours et intérieurs d'îlots, il est essentiel de minimiser au maximum la pollution produite car les polluants générés auront beaucoup de mal à être évacués.

Signalons que la **végétation** peut aussi aider à remédier au problème critique de la pollution de nos agglomérations. Les arbres ont un effet d'oxygénation sur leur entourage et ils sont capables de filtrer les poussières en suspension. La végétation absorbe également l'ozone, le dioxyde de soufre et d'autres polluants, réduisant leur concentration dans l'atmosphère. Les plantes survivent par un échange de lumière, d'eau et de gaz. Dans les zones où la qualité de l'air est pauvre, beaucoup d'espèces de végétation peuvent absorber des niveaux substantiels de polluants urbains courants. Les arbres à feuille caduque présentent l'avantage supplémentaire de renouveler leurs feuilles chaque année ce qui permet un meilleur filtrage de l'air.



Ainsi, les arbres plantés dans une rue améliorent la qualité de l'air de cette rue. Il est donc évident que les espaces verts devraient être répartis de manière équilibrée dans tous les quartiers plutôt que regroupés en quelques grandes zones. Il est également utile de placer des arbres près (ou sous le vent) des sources de pollution telles que les autoroutes, les carrefours à grand trafic,...



(Photo : S. Reiter).

Des zones vertes de grande taille peuvent générer des courants d'air thermiques entre leurs surfaces végétales et les zones urbanisées. Ces mouvements d'air participent à la diminution de la pollution urbaine.

Des sources de pollution situées à différentes distances du site étudié donneront des schémas d'exposition différents.

- Le champ de pollution éloigné correspond à des sources polluantes situées au-delà de 1km de distance ; sa répartition ne dépend plus des bâtiments et des structures individuelles mais uniquement de la turbulence atmosphérique.
- Le champ intermédiaire correspond à une distance de quelques centaines de mètres à environ 1 km ; les émissions polluantes s'étendent au-delà de quelques bâtiments et structures. La dispersion de ses polluants dépend de la densité construite (proportion de la surface au sol bâtie), de la hauteur moyenne des bâtiments et de leur largeur ainsi que de leur variabilité dans la zone environnante.
- Le champ de proximité correspond à des émissions polluantes qui restent localisées et s'étendent seulement jusqu'à quelques centaines de mètres.

Du point de vue de l'architecte, il est souvent impossible d'éviter le champ de pollution éloigné. Par contre, il est davantage possible de contrôler ou d'éviter les nuisances dues à des sources locales. La conception architecturale et urbanistique permet de réduire les effets du champ de pollution de proximité, surtout quand les données météorologiques locales sont prises en compte.

Evaluer la pollution en zone urbaine

La prédiction des niveaux de polluants en zone urbaine est importante car ce sont souvent dans les zones urbaines que se trouvent les plus hautes densités de sources d'émissions polluantes et donc de concentration de polluants dans l'air. Ces prédictions peuvent être faites pour évaluer des situations existantes, pour choisir l'emplacement d'une nouvelle source polluante (une industrie, par exemple) ou pour étudier l'influence des constructions et de la distribution du réseau routier sur la pollution urbaine.

De nombreuses villes européennes possèdent des stations de mesures de la pollution urbaine. Pour Bruxelles, les valeurs de concentrations de nombreux polluants sont mesurées en permanence par l'IBGE : le dioxyde de soufre, le monoxyde d'azote, le dioxyde d'azote, l'ozone, la teneur en plomb, BTX (benzène, toluène et xylènes) et HPA, ainsi que les particules en suspension. Ces mesures sont représentatives à l'échelle d'une zone urbaine. Cependant, ces monitorings ne permettent généralement pas d'évaluer la contribution d'une source de pollution spécifique sur la distribution locale des niveaux de pollution ni de tester les modifications locales à apporter pour améliorer la situation en jeu. En revanche, pour prédire les niveaux de pollution locaux, on peut utiliser des modèles de dispersion des polluants. Il existe trois sortes de modèles qui correspondent à l'échelle d'étude envisagée (Littlefair & al. 2000) :

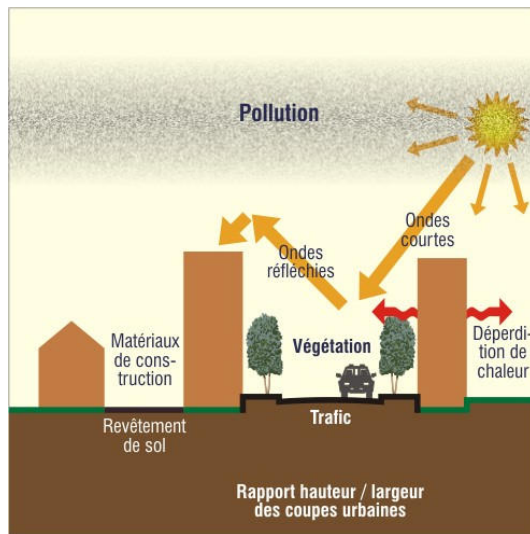
- le champ éloigné : des modèles récents tels que UKADMS par exemple fournissent une correction complète (verticalement et latéralement) des effets de la rugosité du sol sur la dispersion des polluants.
- le champ intermédiaire : à ce niveau, des recherches précises sur l'impact d'ensembles d'îlots urbains sur la dispersion des polluants sont encore

nécessaires pour améliorer les modèles de dispersion de Gauss conventionnels.

- le champ local : la dispersion des polluants au niveau local engendre des champs de concentration variable qui sont très difficiles à modéliser avec un grand degré de précision. Ce type d'étude nécessite en général l'utilisation de tests en tunnel à vent ou parfois de simulations CFD bien que dans ce cas elles restent relativement imprécises. En effet, la recirculation de l'air au niveau des rues est instationnaire, avec des fluctuations pouvant aller jusqu'à plus de deux fois la moyenne stationnaire qui reste souvent faible. Il est donc important de tenir compte de cet aspect instationnaire pour l'évacuation des polluants, ce qui complique très fortement son application par des méthodes CFD. Signalons également des règles simplifiées valables en première approximation qui sont données dans le chapitre 12 du ASHRAE handbook of Fundamentals. (ASHRAE 2001).

3.2.2 L'effet d'îlot de chaleur urbain

L'effet d'îlot de chaleur urbain représente la hausse de la température de l'air en milieu urbain par rapport à la température de l'air mesurée simultanément en site dégagé. Le schéma ci-dessous représente les paramètres qui influencent la température urbaine et donc l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.



La densification des urbanisations modifie les conditions du bilan radiatif des villes par rapport à leur environnement, favorisant l'effet d'îlot de chaleur urbain. Dans les villes :

- les bâtiments et les surfaces couvertes d'un matériau de revêtement s'échauffent assez fortement à la réception de la radiation solaire,
- les radiations d'ondes longues émises par les surfaces ont des trajets complexes ; elles sont renvoyées de surface en surface, si bien que, dans l'ensemble, elles sont en quelque sorte « prisonnières » de la ville, ce qui réduit les pertes radiatives de celle-ci ;
- l'atmosphère des villes étant en général polluée, les poussières en suspension réduisent la quantité de la radiation entrante, mais aussi celle de la radiation sortante : ce dernier effet tend à prédominer sur le premier, si bien que, dans les villes, « l'effet de serre » est augmenté.

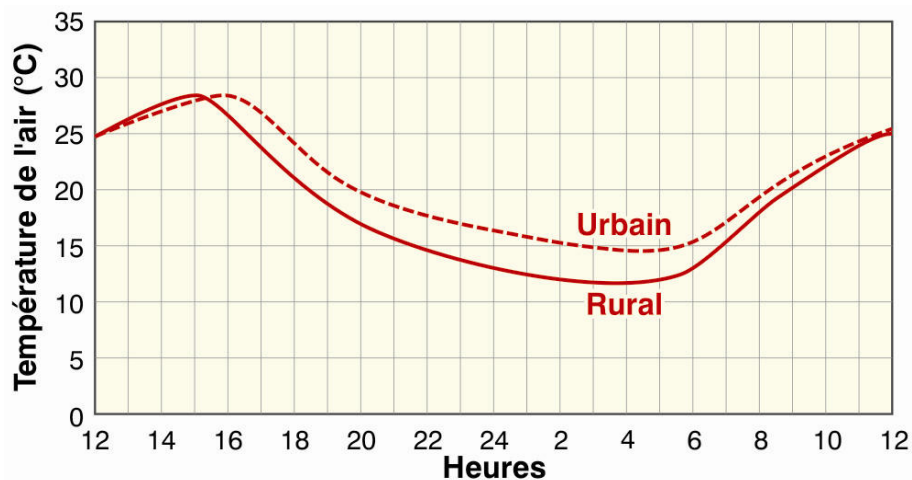
L'îlot de chaleur urbain est renforcé par la production de chaleur due aux activités humaines (chauffage des immeubles en hiver,...). L'utilisation des bâtiments (chauffage, éclairage,...) génère de la chaleur. La densité de trafic augmente cet effet. Un million d'habitants génère environ 100 MW de chaleur métabolique et les villes les plus larges du globe: 1 à 2 GW.

De plus, il y a généralement moins de refroidissement dû au vent et à l'évaporation en milieu urbain car la vitesse du vent y est réduite et qu'il y a en général moins de végétation et de plans d'eau en ville.

La quantification précise de l'effet d'îlot de chaleur est difficile à déterminer. Historiquement, la première étude scientifique qui prouve l'existence d'un îlot de chaleur urbain a été réalisée par Luke Howard en 1820 sur la ville de Londres. Il réalisa une analyse durant 10 ans de la température moyenne journalière et fournit la première constatation scientifique d'une variation à la fois saisonnière et journalière de la variation de température ville/campagne.

L'intensité de l'effet d'îlot de chaleur est généralement supérieur en été qu'en hiver, saison généralement plus venteuse et moins ensoleillée. Les différences de température moyenne annuelle entre une ville et la campagne sont généralement faibles : de l'ordre de 1 à 2°C. Cependant, dans certaines conditions climatiques, souvent par temps calme et ensoleillé, ces différences augmentent. Par ailleurs, les variations journalières et saisonnières peuvent être nettement plus importantes.

En général, l'environnement urbain est plus chaud juste avant le lever du soleil que les sites ruraux car la ville se refroidit plus lentement pendant la nuit. Après le lever du soleil, quand la rosée est évaporée, un site rural se réchauffe plus rapidement qu'un site urbain. Pendant la journée, les températures urbaines et rurales convergent et se croisent même lorsque les sources de chaleur internes à la ville ne sont pas trop importantes. Après le coucher du soleil, les surfaces se refroidissent rapidement à la campagne alors que la ville se refroidit plus lentement. A partir du moment où la rosée s'est formée sur les sites ruraux, leur refroidissement ralenti. La différence maximale de température se produit donc généralement la nuit, souvent quelques heures après le coucher du soleil. La figure ci-dessous reprend cette évolution habituelle de l'effet d'îlot de chaleur (basé sur Oke 1987).



(Schéma basé sur Oke 1987).

Toutefois ce schéma de déphasage temporel journalier n'est malheureusement pas applicable de manière universelle sur l'ensemble des agglomérations urbaines. De

nombreuses villes présentent des caractéristiques spécifiques quand à leur bilan thermique journalier, ceci étant dû à la multitude des facteurs qui contribuent à l'élaboration de la température de l'air en ville.

L'îlot de chaleur urbain dépend de l'orientation des bâtiments, leur hauteur, la densité construite, la proximité du centre ou de la périphérie de la ville et l'intensité des activités humaines qui s'y produisent. Ainsi les rues du centre ville subissent l'effet de l'îlot de chaleur de manière plus importante que la périphérie.

Cette hausse des températures de l'air varie également selon la densité d'espaces verts et la vitesse des vents, qui diminuent tous les deux la différence de température par rapport à un lieu dégagé. Plus le vent est fort, plus l'intensité de l'îlot de chaleur décroît. A partir des études de Oke et d'Escourrou, on peut dire de manière approximative que l'intensité de l'îlot de chaleur est double lorsque la vitesse moyenne du vent à 10m de haut à la station météorologique est de 1m/s par rapport à des conditions d'un vent de 5 m/s. Dans le cas d'un vent fort, la température dans l'agglomération urbaine tend vers la température de l'air à la station météorologique. A la périphérie d'une agglomération, les rues orientées dans la direction du vent dominant sont sujettes à une pénétration importante. Il est naturel qu'une ville placée dans une vallée protégée des vents a une plus grande différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la ville qu'une ville située sur un plateau exposé aux vents (Geiger 1980).

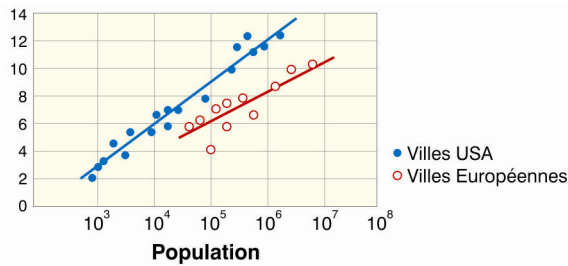
Dans « The Climate of London », Chandler montre que la température annuelle moyenne du centre de Londres est de 1.4°C supérieure à la campagne environnante. Les différences entre les températures moyennes mensuelles donnent un climat plus chaud de 1.6°C dans le centre de Londres en été et de 1.2°C en hiver. La moyenne annuelle des maxima journaliers de la température de l'air y est de 0.9°C supérieure. La différence entre les moyennes des maxima journaliers donne 1°C plus chaud en été et 0.7°C en hiver. Mais ces écarts sont également fluctuants. Ainsi, Chandler nous dit que pendant une journée d'été, le centre de Londres est plus chaud que la campagne pendant environ 60% du temps avec une différence de température qui varie entre 0.6°C et 2.2°C alors qu'il est plus froid que la campagne pendant environ 40% du temps avec une différence de température allant de 0 à 1.7°C. Il n'y a que pendant 1% du temps que la température urbaine en journée dépasse la température en plaine de 2.8 à 4.4°C.

Notons également la constatation de Rosenfeld réalisée pour des après-midi d'été ensoleillées : la température de l'air en ville est généralement supérieure de 2.5°C par rapport à la station météorologique (Rosenfeld 1995).

L'effet d'îlot de chaleur est en général maximal pendant la nuit, pour des conditions météorologiques sans vent et un ciel sans nuage. Pour Givoni, la différence de température moyenne nocturne pour les grandes villes atteint souvent 3 à 5°C de plus qu'à la campagne et peut même aller jusqu'à 8°C en plus dans les cas extrêmes. Il constate par contre une différence de température de seulement 1 à 2°C pendant les heures du jour et remarque que souvent la température maximale de jour est supérieure à la campagne par rapport à la ville (Givoni 1998).

L'îlot de chaleur nocturne est très dépendant de la densité de la population. Il résulte de l'apport d'énergie anthropique (chauffage, éclairage, ...) et du stockage de la chaleur solaire dans les matériaux de construction suivi de sa restitution lente. (Escourrou 1995). Oke a pu créer une corrélation entre l'intensité maximale de l'îlot de chaleur de nuit et la taille de la population urbaine. Il a proposé deux

régressions différentes pour le nord de l'Amérique et pour les villes européennes (figure ci-dessous). L'intensité maximale de l'îlot de chaleur attendu pour une ville d'un million d'habitants est proche de 8°C en Europe et de 12°C aux USA.

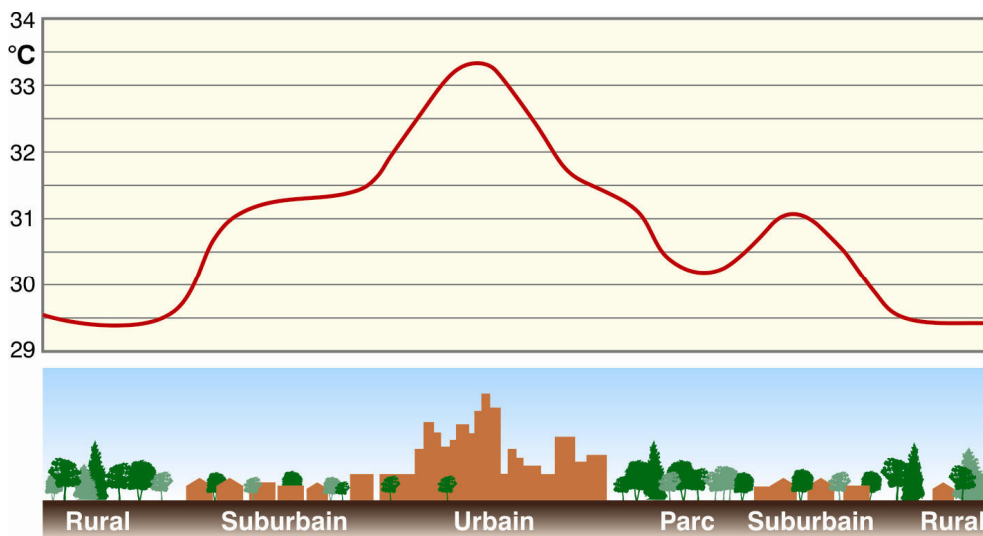


Intensité maximale de l'effet de chaleur en °C en fonction de la densité de population (Oke 1988).

Une étude de Jauregui a confirmé ces résultats. Il justifie la différence entre les comportements climatiques des villes d'Europe et des Etats-Unis par la morphologie différentes de nos villes (bâtiments moins élevés, densité moyenne,...).

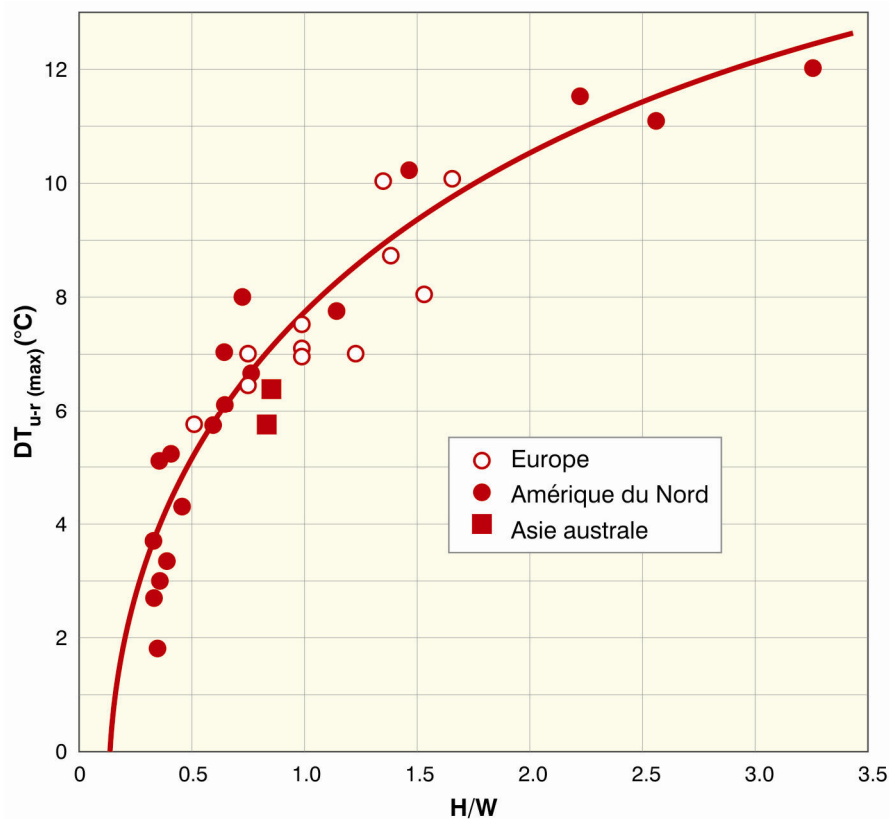
L'îlot de chaleur diurne est beaucoup plus irrégulier et plus faible en amplitude car il dépend également du rayonnement solaire qui est souvent plus faible en ville à cause de la pollution. L'îlot de chaleur urbain diurne existe toutefois dans la majorité des villes sauf dans le cas de quartiers de villes traditionnels méditerranéens où la pauvreté de la végétation à l'extérieur de la ville et la qualité d'un urbanisme construit pour créer un microclimat de fraîcheur inversent la tendance. (Escourrou 1995)

Un élément supplémentaire complexifie encore la question de l'îlot de chaleur urbain : cette différence de température entre la ville et la campagne varie spatialement au sein de l'urbanisation. Tout d'abord, la température est généralement plus élevée au centre de la ville et diminue vers la périphérie de l'urbanisation. Ensuite, des éléments d'aménagement locaux influencent la température d'un site spécifique comme la présence d'une zone végétale importante ou d'une grande surface d'eau (lac, ...). Le schéma ci-dessous montre comment la température de l'air varie en fonction de la nature du sol du centre d'une urbanisation vers sa périphérie, pour un jour ensoleillé en fin d'après-midi.



Il n'y a donc pas une différence de température entre la ville et la campagne mais plutôt un ensemble de microclimats différents à la fois spatialement et temporellement. C'est ce qui rend extrêmement difficile la quantification de l'effet d'îlot de chaleur urbain. Vu la complexité du problème, peu de publications se risquent à donner des valeurs quantitatives précises.

Les espaces urbains qui ont un angle de vue du ciel étroit, c'est-à-dire un rapport entre la hauteur des bâtiments et leur espacement H/W élevé, se refroidissent plus lentement à cause de leur faible potentiel à perdre de la chaleur par rayonnement de grande longueur d'onde vers la surface du ciel. Il a été démontré que cet effet est crucial dans l'augmentation de la température des espaces urbains, spécialement la nuit. Le graphe ci-dessous montre la relation empirique qui existe entre la géométrie des rues du centre-ville (H/W) et l'intensité maximale de l'effet d'îlot de chaleur (Oke 1988).



(Oke 1988).

En comparant 30 villes d'un million d'habitants situées à des latitudes moyennes, Oke a trouvé une corrélation entre l'intensité maximale de l'îlot de chaleur et la géométrie du canyon urbain. Il a exprimé cette adéquation par une formule qui inclut le rapport H/W entre la hauteur des bâtiments (H) et leur distance de séparation (W): $dT_{max} = 7.54 + 3.97 \ln(H/W)$ (Oke 1988). On obtient donc une valeur maximale de l'effet de l'îlot de chaleur égale à 7.54°C pour un profil de rue dont la hauteur et la largeur sont de même longueur, de 4.79°C lorsque les rues sont deux fois plus larges que la hauteur des bâtiments et de 10.29°C lorsque le canyon est deux fois plus haut que large. Ce maximum correspond aux valeurs nocturnes maximales pour un ciel sans nuage et sans vent.

Cependant, lorsque le facteur de vue du ciel est très réduit, c'est-à-dire pour H/W élevé, l'ombrage de l'espace public est assuré plus longtemps. Une diminution de la température urbaine journalière peut alors se produire.

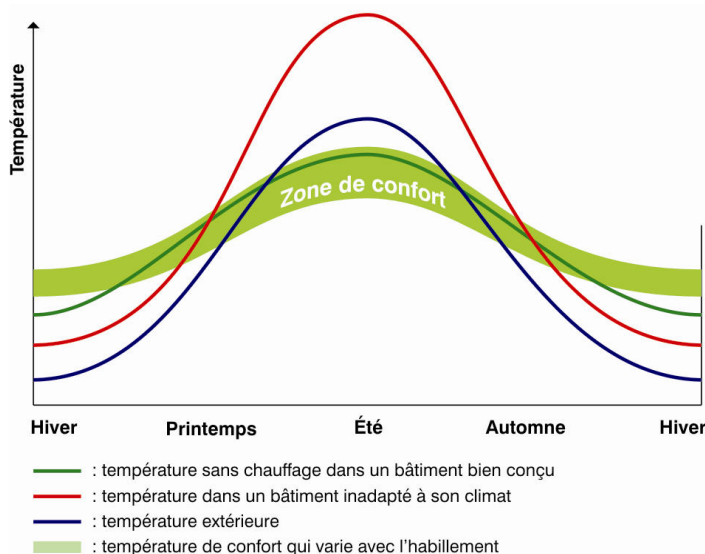
D'autre part, plus le facteur de vue du ciel est élevé ou le rapport H/W est faible, plus grande est la différence thermique entre la nuit et le jour ou entre l'été et l'hiver. Notons aussi que pour un rapport H/W inférieur à 0,4, l'effet d'îlot de chaleur annuel moyen est fortement réduit (Oke 1988).

Les valeurs du rapport H/W doivent être prises de manière moyenne pour l'ensemble d'un quartier. Les températures sont généralement assez homogènes à l'intérieur de chaque quartier morphologique (centre-ville, première périphérie, cité-jardin,...). Les grands espaces verts et les plans d'eau diminuent toutefois localement la température de l'air.

Bien que l'effet d'îlot de chaleur augmente les charges de refroidissement des bâtiments en été, il réduit la consommation énergétique de chauffage des bâtiments en hiver. Il doit donc être recherché ou limité en fonction du climat dans lequel on se trouve.

En Belgique, l'îlot de chaleur peut être considéré globalement comme un avantage pour limiter les consommations d'énergie des bâtiments en hiver, améliorer le confort des personnes à l'extérieur et favoriser la dispersion des polluants (grâce aux brises thermiques et à l'augmentation de la turbulence de l'air). Une différence de quelques degrés peut suffire à faire franchir un « seuil de confort ». Des études empiriques montrent qu'il est possible de gagner 5 à 7,5% du coût de l'énergie nécessaire pour chauffer les bâtiments pour 1°C d'augmentation de la température moyenne (Oke 1988).

Lorsque le microclimat est très différent de conditions intérieures demandées, une grande quantité d'énergie sera nécessaire alors que une conception urbanistique adaptée permet d'obtenir un microclimat plus proche des valeurs intérieures et donc de nécessiter moins d'énergie. Le graphe ci-dessous permet de comprendre qu'une conception urbaine et architecturale adaptée au climat réduit substantiellement les consommations d'énergie du bâtiment. L'urbanisme microclimatique est donc essentiel dans le but de limiter les consommations énergétiques des bâtiments.



En première approximation, la puissance des pertes thermiques d'un bâtiment à un instant donné est proportionnelle à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. En général, la température intérieure est relativement stable et bien connue, alors que la température extérieure varie fortement dans le temps. Pour la prévision des consommations d'énergie, il faut faire une intégrale dans le temps des pertes thermiques du bâtiment :

$$Q_p = H \int_{\text{saison}; \theta_i > \theta_e} (\theta_i - \theta_e) dt$$

où H [W/K] est le coefficient de déperditions thermiques du bâtiment, qui est aussi la puissance nécessaire pour maintenir la température de l'air à l'intérieur du bâtiment (θ_i) un degré au-dessus de la température extérieure (θ_e).

Pour une habitation domestique, l'expérience a appris que dans notre pays une température intérieure moyenne (moyenne sur l'ensemble des pièces et moyenne sur les 24 heures de la journée) de 18°C pouvait être considérée comme représentative de la température de confort désirée. Et les apports gratuits (gains internes et externes) sont estimés en moyenne à environ 3°C pour les habitations. Si bien que le système de chauffage ne doit plus chauffer que jusque 15°C (le soleil et l'occupation permettant la montée de la température jusque 18°C). De même, s'il fait 15°C dehors, le chauffage peut être interrompu : on est en dehors de la saison de chauffe.

Comme la température extérieure varie d'un lieu à l'autre, la notion de **degré-jour** a été introduite pour permettre la détermination de la quantité de chaleur consommée sur une période donnée et pour effectuer des comparaisons entre des bâtiments situés dans des zones climatiques différentes. Le principe consiste donc à additionner, jour après jour, les écarts de température existant entre l'intérieur et l'extérieur. Si donc, par exemple, il fait 19°C à l'intérieur en moyenne de la journée, et 5°C à l'extérieur, on parlera de 14 degrés-jours. De même 3 journées à 0°C extérieurs seront comptabilisées comme 57 Degrés-Jours.

Le nombre de degrés-jours dépend donc de la durée de la saison de chauffe, de la température extérieure à partir de laquelle on considère ne plus devoir chauffer et de la température intérieure souhaitée. Les deux premiers points sont directement liés au microclimat local et sont directement influencés par l'effet d'îlot de chaleur urbain. Ainsi, les consommations de chauffage sont réduites en ville par rapport à la campagne.

Le tableau ci-dessous montre la diminution du nombre de degrés jours de chauffage (base 18.3°C) pour différentes villes américaines par rapport aux valeurs données aux aéroports (Taha 1997).

Réduction des degrés-jours de chauffage grâce à l'effet d'îlot de chaleur urbain (Taha 1997)				
Ville	Degré-jours de chauffage			
	Urbain	Aéroport	Degrés-jours de chauffage gagnés	Différence en %
Los Angeles	384	562	178	-32
Washington DC	1300	1370	70	-6
St Louis	1384	1466	82	-6
New York	1496	1600	104	-7
Baltimore	1266	1459	193	-14
Seattle	2493	2881	288	-13
Chicago	3371	3609	238	-7
Denver	3058	3342	284	-8

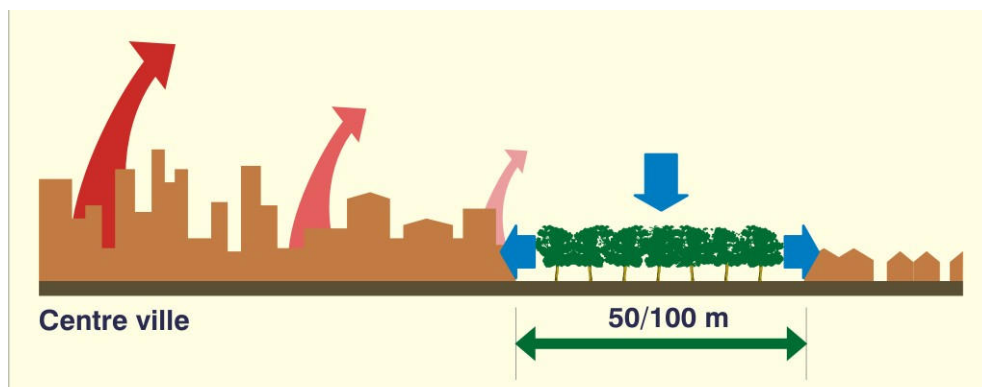
On voit que quelque soit le climat, l'effet d'îlot de chaleur urbain permet de limiter les consommations d'énergie dues au chauffage des bâtiments. Par contre, il intensifiera fortement l'inconfort généré par les surchauffes et augmentera les consommations d'énergie des systèmes éventuels de climatisation utilisés pour refroidir les bâtiments. L'effet d'îlot de chaleur est donc négatif pour les climats chauds et en périodes de surchauffes pour les autres climats.

Une conception adaptée de la ville permet de diminuer ou d'augmenter cet effet d'îlot de chaleur en fonction du résultat désiré. Ainsi, une conception microclimatique précise d'un quartier urbain dans les pays chauds peut contrebalancer l'effet d'îlot de chaleur et même générer un effet d'oasis, c'est-à-dire de fraîcheur par rapport à la température de l'air en dehors de la ville. C'est le cas du quartier Santa Cruz à Séville qui présente des températures moyennes de l'air en journée de 4 à 8°C inférieures à celles mesurées au niveau de l'aéroport de la ville. Cet effet d'îlot de fraîcheur est créé par la conception urbanistique de ce quartier traditionnel : rues très étroites (ombragées toute la journée), matériaux à fortes inertie, couleurs claires.

L'îlot de chaleur urbain engendre des températures minimales plus élevées (le nombre de jours de gel et de neige au sol diminue). Ainsi, ce phénomène modifie la moyenne des températures mais aussi l'écart des températures entre le jour et la nuit : l'amplitude des températures journalières est plus faible, ce qui diminue le potentiel de ventilation naturelle des bâtiments en ville.

Réintroduire de la végétation, des fontaines et des bassins en ville permet de réduire les périodes de surchauffes en milieu urbain. L'effet total du refroidissement dû à la végétation provient de l'effet combiné de son ombrage et de l'évapotranspiration.

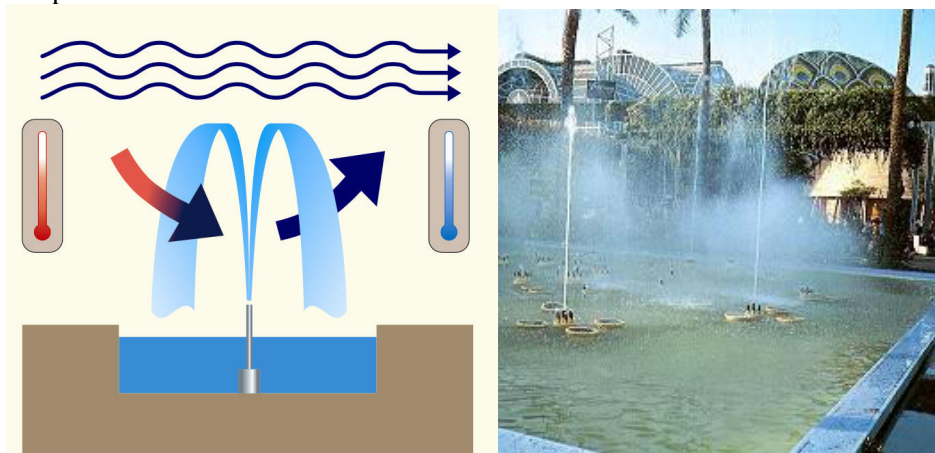
La végétation lorsqu'elle est regroupée en un bosquet dense réduit la température de l'air de 1 à 2°C pour un ciel clair en été (Nikolopoulou & al. 2004) On remarque une différence de température moyenne de 3.5°C entre un centre-ville et des quartiers longeant une bande de végétation d'une profondeur variant de 50 à 100 mètres. Une convection horizontale des masses froides (végétation) vers les masses plus chaudes (constructions voisines) permet ce rafraîchissement (Izard & Guyot 1979). On peut étendre cette conclusion par la règle suivante très approximative : pour une texture urbaine relativement dense, on a une diminution de 0,8 K de la température ambiante de l'air pour une augmentation de 10% de la surface de la zone verte. Cet effet est noté, non seulement à l'intérieur des limites de l'aire verte mais s'étend aussi au-delà du parc lui-même. En cas de forte densité construite, il est donc utile d'avoir aussi une forte densité végétale.



Des surfaces de végétation plus larges que 100m ne sont pas nécessaires du point de vue de leur effet thermique sur le vent qui les traverse. Cet effet de réduction de la température de l'air autour des zones vertes est limité à une surface large de 100 à 500 m autour du parc à cause des phénomènes de convection. Par contre, de larges surfaces végétales denses (forêts,...) peuvent créer des brises thermiques qui auront alors un effet à plus large échelle sur l'urbanisation.

Il faut toutefois préciser que la présence de plusieurs zones urbaines relativement petites est plus efficace pour réduire l'effet d'îlot de chaleur qu'une seule zone très large (plusieurs km).

Par son inertie thermique, l'eau joue le rôle de tampon et atténue les fluctuations de température. Toutes les surfaces d'eau (fontaines, murs d'eau, canaux,...) diminuent la température par évaporation. De plus, les surfaces d'eau combinées à des mouvements d'air les traversant peuvent aussi contribuer à un rafraîchissement de l'air par convection.



Exposition universelle à Séville en 1992.
(Photo : Grupo de termotecnia 1994).

L'influence des surfaces d'eau sur la température de l'air dépend de différents facteurs :

- la longueur de la masse d'eau dans la direction des vents dominants,
- la vitesse de l'air,
- la présence ou l'absence de jets d'eau,
- la densité construite de la zone sous le vent de la surface d'eau.

Lors du projet de l'expo'98 à Lisbonne, des études scientifiques ont été réalisées avec un logiciel CFD pour évaluer l'impact de la rivière Targus sur la température de l'air sur le site de l'exposition. La rivière Targus présente 14 km de longueur de refroidissement et le site de l'exposition s'étend sur 600m sous le vent de la rivière. Pour une vitesse de vent d'1 m/s, la température est de 6°C inférieure dans les 100 premiers mètres à partir de la rivière. Ensuite, il y a réchauffement progressif de l'air de telle façon que la température de l'air à l'extrémité du site de l'expo correspond à la température ambiante sans l'impact de la rivière.

Des plus petites surfaces d'eau ont bien entendu une influence réduite sur la température de l'air environnante. Selon l'université de Séville, pour un espace ouvert et pour une vitesse de vent de 1m/s, l'influence d'un lac de 100m de large dont la température de l'eau est de 20°C inférieure à celle de l'air ne diminuerait la température de l'air sur ses bords que de 1°C. Pour les mêmes hypothèses, un lac de 50m donnerait une réduction de 0.5°C, un lac de 200m une réduction de 1.5°C

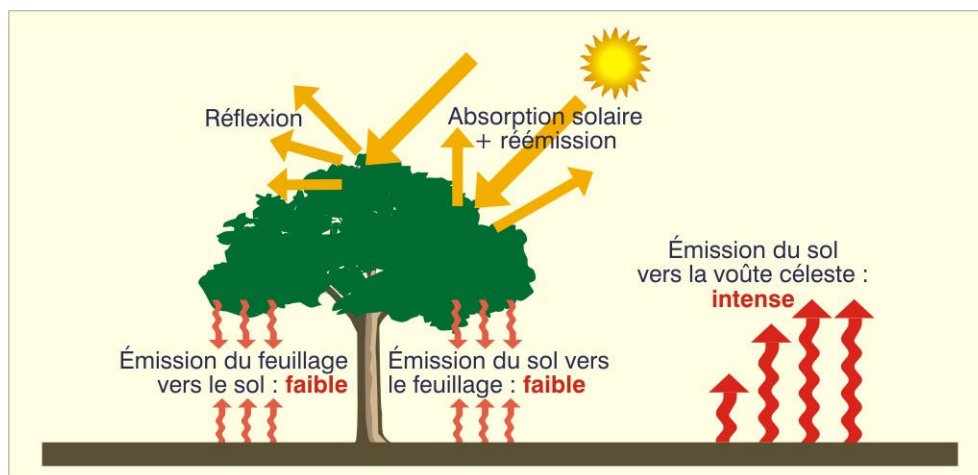
et un lac de 400 m une réduction de 2.5°C. Par contre, dans un environnement plus confiné, tel qu'une rue ou une cour, un bassin d'eau aura un impact beaucoup plus important, surtout s'il remplace des matériaux de construction de faible albedo qui se seraient échauffés au soleil.

La conclusion est donc que les surfaces d'eau n'ont qu'une faible influence sur la température de l'air en zone ouverte, sauf si ces surfaces deviennent de très grande dimension. Des bassins de petite dimension peuvent toutefois avoir une influence réelle sur la température de l'air d'espaces urbains fermés et protégés du vent, surtout si ces bassins sont agrémentés de jets d'eau ou accompagnés d'un système de pulvérisation d'eau dans cet espace public.

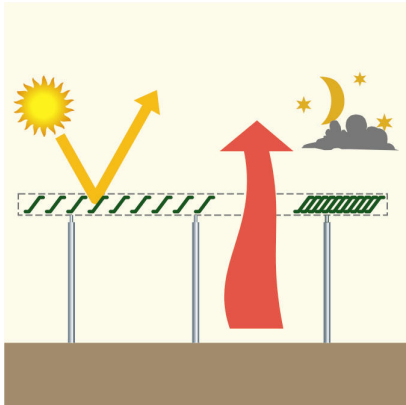
Pour déterminer précisément la température de l'air en ville, il faut donc tenir compte à la fois des températures extérieures en zone rurale, de la force du vent et de la morphologie des constructions mais aussi des matériaux utilisés, de la présence de végétation ou de bassins d'eau. L'interaction de ces différents éléments est un phénomène très complexe qui rend très difficile l'évaluation précise de la température de l'air en milieu urbain.

Même si on a dit que la température de l'air en ville est généralement homogène par quartier morphologique, il est possible d'avoir des poches de surchauffes ou de fraîcheur dans les endroits dits confinés, c'est-à-dire dans les lieux où l'échange entre l'air de ce site et l'air extérieur est réduit. Ces lieux confinés peuvent donc devenir par exemple des poches de fraîcheur dans les pays chauds s'ils sont ombragés, qu'ils contiennent de la végétation ou des fontaines. L'aspect confiné d'un lieu dépend surtout de son rapport H/W ainsi que la position des ouvertures de l'espace par rapport au vent.

Ainsi, les pergolas ou des plantations dont le feuillage couvre la presque totalité de l'espace d'une cour ou d'une place relativement confinée servent de séparation entre l'air au-dessus et en dessous de son feuillage. Cette séparation permet de conserver la fraîcheur à l'intérieur d'un espace urbain. La température est plus faible de jour à cause de leur effet d'ombrage. Par contre, la nuit, la végétation empêche l'émission du rayonnement terrestre vers la voûte céleste, limitant ainsi la chute de température nocturne. Ainsi, les écarts de température entre la nuit et le jour sont moins importants dans un espace couvert de végétation que pour un espace public ouvert au ciel.



Des auvents peuvent également jouer ce rôle de séparateur de l'air pour favoriser un microclimat spécifique. Dans les pays chauds, il est alors conseillé de placer des auvents amovibles qu'on peut retirer la nuit pour profiter en plus d'un refroidissement nocturne de l'espace par rayonnement vers le ciel.



Ainsi, les espaces confinés permettent de créer des ambiances thermiques spécifiques alors que les grands espaces ouverts restent très dépendants de la température du vent. Des espaces de transition, tels que des galeries couvertes, sont par exemple très favorables pour diminuer les différences de température trop importantes entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments.



(Photos : S. Reiter).

La température de l'air peut également être influencée localement par la température des surfaces environnantes. Les caractéristiques des matériaux de construction des bâtiments, du revêtement de sol et du mobilier urbain jouent un rôle par rapport à l'équilibre thermique local des piétons.

D'un point de vue urbanistique, les gabarits des bâtiments, l'orientation des rues et le profil hauteur/largeur interagissent avec les matériaux utilisés (albédo et inertie) pour déterminer leurs températures de surfaces.

L'albédo est la mesure de la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire. Cette caractéristique est essentiellement dépendante de la couleur du matériau : un corps clair réfléchit une grande partie de l'énergie solaire reçue alors qu'un corps foncé en absorbe la plus grande part. L'albédo des matériaux influence seulement les températures de surfaces des matériaux exposés au soleil. A partir du moment où une surface est ombragée, sa couleur a peu d'effets sur sa température.

L'inertie des matériaux caractérise leur capacité à accumuler de la chaleur, puis à la restituer avec un déphasage temporel. Elle permet donc de répartir les apports de chaleur dans le temps, notamment en atténuant les différences de température entre le jour et la nuit ; elle permet aussi d'éviter les surchauffes d'un espace en été. Si on désire profiter de l'inertie des matériaux pour le confort des personnes dans les espaces publics, il importe de favoriser le stockage direct : en plaçant des masses de fortes inerties là où le soleil frappe directement c'est-à-dire essentiellement les façades sud et les planchers. Lorsque l'ensoleillement a cessé, toute la chaleur emmagasinée par les parois est progressivement restituée. L'inertie des matériaux est donc particulièrement intéressante dans les climats où la différence de température diurne et nocturne est importante. Pour jouer sur l'inertie d'une surface, on peut choisir le type de matériau ainsi que la forme de la surface (par exemple, une surface ondulée, offre une surface d'accumulation supérieure à celle d'une paroi droite...).

Une caractérisation quantitative de l'albédo et de l'inertie des matériaux a été donnée dans cette thèse lors de l'élaboration de critères quantitatifs pour le confort thermique extérieur.

Evaluer l'îlot de chaleur urbain

Vu la complexité du comportement thermique urbain, il n'est pas possible à l'heure actuelle de prendre en compte de manière simple et très précise la température réelle en milieu urbain. **Nous avons créé un algorithme pour évaluer de manière très simplifiée quelques températures types pour l'air en milieu urbain à partir de la température de l'air à la station météorologique.** Cet algorithme a été élaboré à partir d'une étude bibliographique étendue. Cette méthode d'évaluation de la température de l'air en milieu urbain doit toutefois être considérée comme une approximation moyenne simplifiée de ce phénomène très variable.

Nous avons créé l'algorithme ci-dessous pour des urbanisations européennes (ou de morphologie semblable) situées dans un climat tempéré froid. Les données trouvées dans la littérature ne permettent pas de déterminer un algorithme précis pour l'ensemble des climats.

Soit T_m , la température de l'air à la station météorologique le jour et l'heure considéré, avec ou sans soleil

T_a la température ambiante sur le site au moment considéré,

T_c , l'influence d'une couverture de l'espace public (pergola,...)

T_u , l'influence de l'urbanisation

T_q , l'influence du quartier

T_v , l'influence de la végétation

T_e l'influence de l'eau

F_v est l'influence de la vitesse du vent

$$T_a = T_m + T_c + (T_u + T_q + T_v + T_e) * F_v$$

1/ T_c

Si l'espace présente une couverture en dur (pierre,...), une pergola ou une couverture végétale quasiment continue (arbres denses,...), $T_c = T_{mc} - T_m$.

On obtient alors, $T_a = T_{mc} + (T_u + T_q + T_v + T_e) * F_v$, où T_{mc} est la température de l'air à la station météorologique par ciel couvert le même jour et à la même heure.

Si l'espace est ouvert sur le ciel, $T_c = 0$.
On obtient alors : $T_a = T_m + (T_u + T_q + T_v + T_e) \cdot F_v$.

2/ T_u

La valeur de T_u peut être choisie dans le tableau ci-dessous en fonction de la taille de la ville (supérieure ou inférieure à 1 million d'habitants), de la saison et de la période de la journée.

Valeur de T_u en °C						
Heure	Grande ville ($\geq 1\ 000\ 000$ habitants)			Petite ville ($< 1\ 000\ 000$ habitants)		
	Ete	Printemps/ automne	Hiver	Ete	Printemps/ automne	Hiver
6 à 12h	0.8	0.7	0.6	0.5	0.45	0.4
12 à 16h	0	0	0	0	0	0
16 à 22h	2	1.75	1.5	1.5	1.35	1.2
22 à 6 h	3	2.6	2.2	2	1.75	1.5

3/ T_q

La valeur de T_q peut être choisie dans le tableau ci-dessous en fonction du quartier dans lequel est situé l'espace public considéré. T_u est le facteur d'influence dû à l'urbanisation, la saison et le moment de la journée, calculé au point ci-dessus.

Valeur de T_q en °C	
Quartier d'un centre-ville très dense ($H/W \cong 2$)	0.25 T_u
Quartier urbain dense ($H/W \cong 1$)	0
Quartier urbain périphérique et aéré ($H/W \cong 0.5$)	- 0.5 T_u
Quartier suburbain : les maisons ne sont pas mitoyennes	- (2 T_u) / 3

4/ T_v

Si le site est situé à une distance inférieure ou égale à 500m par rapport à un espace présentant une végétation dense (d'une longueur supérieure à 50m), $T_v = - 1.5^\circ\text{C}$; autrement, $T_v = 0$.

5/ T_e

La valeur de T_e peut être choisie dans le tableau ci-dessous en fonction du type de surface d'eau présente dans l'espace public ou sur un de ses bords et de l'aspect ouvert ou confiné de l'espace public. Un espace est confiné quand il est de petite dimension et qu'il est fermé par des constructions sur tous ses côtés ; citons par exemple une cour, une place étroite,...

Valeur de T_e en °C		
Espace public ouvert ou de grande taille	Surface d'eau $\geq 100\text{m}$ de large	- 1
	Surface d'eau $\cong 50\text{ m}$ de large	-0.5
	Surface d'eau $\cong 10\text{m}$ de large	-0.1
Espace public confiné	Bassin d'eau	-0.5
	Fontaine ou bassin avec jets d'eau	-1

6/ Fv

La valeur de Fv dépend de V, la vitesse du vent à la station météorologique (à 10m de haut) ainsi que du type de quartier.

Valeur de Fv		
Quartier urbain dense (H/W ≅ 1) à très dense (H/W ≅ 2)		1
Quartier urbain périphérique et aéré (H/W ≅ 0.5) ou quartier suburbain	V ≤ 2m/s	1
	2 < V ≤ 5m/s	0.5
	V > 5m/s	0

7/ Ta

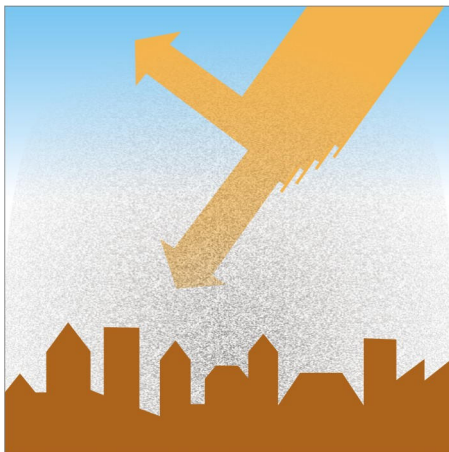
Ta peut alors être calculé à partir de la formule :

$$T_a = T_m + T_c + (T_u + T_q + T_v + T_e) * F_v$$

Cet algorithme a été élaboré de manière théorique à partir des publications lues sur le sujet pour un climat tempéré froid et une urbanisation européenne mais il serait intéressant de pouvoir le valider ou l'améliorer à partir de mesures réalisées dans des sites réels en Belgique.

3.2.3 La modification du rayonnement solaire en ville

Lors de la traversée de l'atmosphère, les radiations solaires sont absorbées et diffusées par les molécules d'air et les aérosols; elles sont également absorbées et réfléchies par les poussières et microgouttelettes en suspension. De manière générale, ces troubles sont plus importants en ville qu'à la campagne. En effet, au-dessus des villes, la concentration en CO, CO₂ et SO₂ est de 5 à 25 fois plus importante qu'en milieu rural créant ainsi un dôme de pollution qui limite la disponibilité de la lumière naturelle en milieu urbain.



Une étude réalisée par l'IRM (Joukoff 1996) analyse les effets de la pollution de l'air sur la disponibilité de l'énergie solaire dans la zone de Bruxelles, dans le cadre de l'action de la Commission Européenne : « European solar microclimates ». Sur une période de 35 mois, de juillet 87 à mai 90, il apparaît que le rayonnement solaire global varie entre 93 et 98% de la valeur de référence donnée à la station météorologique. La valeur la plus faible correspond à la situation industrielle du nord de la ville. Les valeurs peuvent fluctuer fortement d'un jour à l'autre mais

mensuellement on peut voir que l'environnement atmosphérique n'affecte pas dramatiquement l'énergie solaire disponible. (Joukoff 1996).

Ainsi, l'influence de la pollution d'une agglomération de la taille de Bruxelles en terrain plat sur le rayonnement solaire global disponible au-dessus des toits est de l'ordre de 5% (Joukoff 1996). Pour des applications nécessitant des niveaux d'éclairage précis, on peut donc minorer les valeurs météorologiques d'environ 5%. Pour des agglomérations très polluées, la réduction du rayonnement solaire global en ville au niveau des toits par rapport à la campagne peut toutefois atteindre 20% (Landsberg 1981).

De nombreuses études ont montré également que la durée d'ensoleillement est réduite par l'atmosphère urbaine. Dans le centre de Londres, la durée d'ensoleillement est plus faible d'environ 16% que dans la campagne environnante. A Liège, en Belgique, une perte de 55 minutes d'ensoleillement par jour est signalée à cause de la pollution. (Santamouris & al. 2001)

Par ailleurs, la quantité de rayonnement solaire reçue par une surface en ville est généralement nettement inférieure à celle captée par une surface équivalente en zone rurale à cause de l'effet d'obstruction des bâtiments. Cependant, la lumière naturelle est une des qualités les plus essentielles qui influencent l'ambiance d'une ville ou d'un espace public. La lumière solaire disponible dans les espaces publics, rues, places, parcs est un élément très important pour le confort des piétons. Une attention spéciale doit être portée à la conception solaire urbaine de manière à créer des espaces publics attirants. La pénétration de la lumière naturelle à l'intérieur du tissu urbain nécessite une attention particulière, surtout dans les villes très denses.



(Photo : M. Bodart).



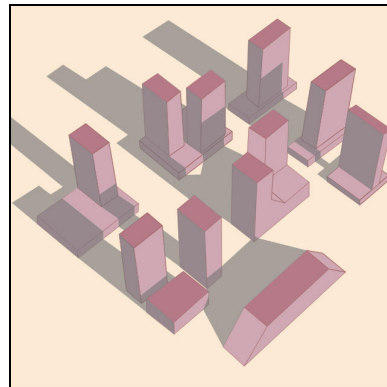
(Photo : S. Reiter).

Dans le contexte urbain, le potentiel d'ensoleillement disponible et donc les gains solaires possibles dépendent fortement de la présence du gabarit des bâtiments proches ainsi que des contraintes d'orientation des façades pour conserver l'alignement des rues et des bordures de places. Ce sont les dimensions de l'espace public, son orientation et la hauteur des bâtiments qui produisent l'impact le plus important sur la pénétration du rayonnement solaire direct en milieu urbain.

Un masque solaire est un corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface que l'on désire ensoleillée. En ville, il peut être difficile de capter le rayonnement solaire dans un espace à cause de l'ombrage créé par les bâtiments qui le jouxtent.

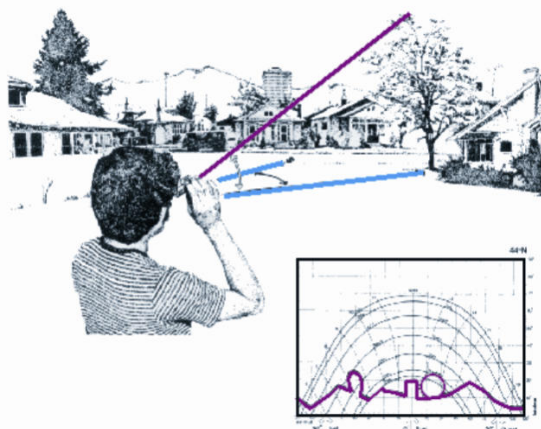
En Belgique, les immeubles qui masquent le soleil sont globalement considérés comme désagréables. Généralement, ils apportent un peu d'ombrage en été mais deviennent, par contre, de réels obstacles à l'ensoleillement en hiver puisque le soleil est plus bas dans le ciel à cette période. Tous les masques de l'environnement, immeubles ou grands arbres, qui interceptent le soleil d'hiver entre 9h et 15h, réduiront considérablement le bénéfice des gains solaires pour les bâtiments et l'utilisation des espaces publics pendant cette saison. De plus, l'ombrage fourni par les constructions voisines durant l'été n'est généralement possible que lorsque le soleil n'est pas trop haut dans le ciel; elle est donc surtout valable pour les orientations est et ouest.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer précisément les périodes pendant lesquelles le rayonnement solaire se trouve intercepté par un obstacle avant d'atteindre le sol d'un espace public. C'est la géométrie solaire qui détermine l'ombrage créé par les masques solaires. Cet ombrage varie heure par heure, jour par jour et peut se calculer à partir des diagrammes solaires. Il existe également des logiciels qui calculent les ombrages pour un site défini. S'il est essentiel de tenir compte des ombrages provoqués par les obstacles avoisinant le terrain considéré, il faut également prendre en considération l'évolution de ce site dans l'avenir (bâtiments futurs,...).



(Photo : S. Reiter).

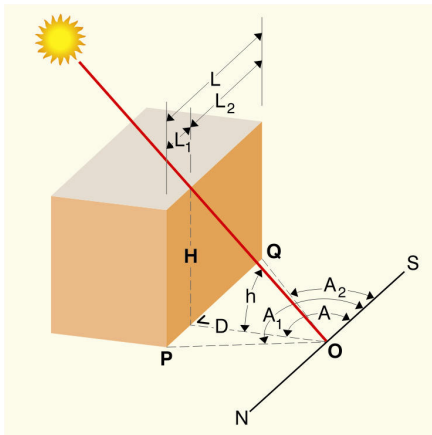
La méthode des projections solaires cylindriques détermine les masques solaires, que subit un point de l'espace, par la transcription de son panorama sud sur le diagramme solaire relatif à la latitude du lieu considéré. On repère ainsi facilement les périodes où l'ensoleillement est disponible et on peut calculer les facteurs de réduction de l'ensoleillement dus à la présence des obstacles environnants.



(Reiter & De Herde 2001).

L'exemple ci-dessous permet de mieux comprendre cette technique: il s'agit d'analyser l'impact d'un bâtiment sur l'ensoleillement d'un point. Soit le point O situé à une certaine distance D à l'ouest d'un bâtiment. Pour que le point O soit ombragé, il faut que :

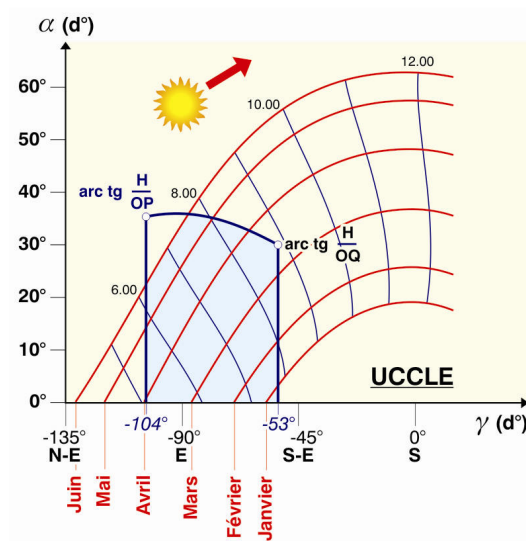
- l'azimut du soleil (A) soit compris entre l'azimut de la droite OP ($A_1 = A + (-\text{arc tg}(L_1/D))$) et l'azimut de la droite OQ ($A_2 = A - (\text{arc tg}(L_2/D))$), ces deux segments de droite joignant O aux extrémités du bâtiment.
- la hauteur du soleil (h) soit inférieure à la hauteur angulaire du point au sommet du bâtiment situé dans le même plan vertical que le soleil. Les hauteurs angulaires des différents points de façade du bâtiment, vu du point O, sont donnés par une relation du type $h = \text{arctg}(H/D)$.



Si on donne une valeur de 20m à la distance D et les dimensions suivantes au bâtiment: L=20m, L₁=5m, L₂=15m, H=30m, le point O sera ombragé par les azimuths du soleil compris entre -104° et -53° et pour les hauteurs du soleil inférieures aux hauteurs angulaires données par la formule.

La figure ci-contre donne une représentation des résultats pour un bâtiment situé à Uccle. La représentation sur le diagramme solaire de Uccle de l'ombrage du point O par le bâtiment montre entre autres que le point O est ensoleillé:

- toute l'année, à partir de 9h du matin jusqu'au coucher du soleil.
- en janvier, à partir du lever du soleil au coucher du soleil.
- en juin, du lever du soleil à 5h45' et de 7h45' au coucher du soleil.



L'effet de rue est caractérisé par le masque solaire que créent les bâtiments situés de l'autre côté de la rue. Il dépend de la hauteur de ces constructions et de la distance qui sépare les deux côtés de la rue. Une morphologie de rues dont le rapport hauteur/largeur (H/W) est élevé réduit fortement l'exposition directe des surfaces de la rue. La forme bâtie et sa densité sont donc des éléments critiques pour l'ensoleillement des espaces publics urbains. Ci-dessous, la rue de la photo de gauche sera plus lumineuse et plus souvent ensoleillée que la rue de la photo de droite.



(Photo : Architecture et Climat)



(Photo : S. Reiter).

La question qui se pose est quel est l'angle d'obstruction maximal afin de fournir une disponibilité solaire suffisante dans les espaces publics urbains? Le grand avantage d'une règle de disponibilité solaire basée sur un angle d'obstruction vertical est sa grande simplicité. Son inconvénient est que le critère fixé risque souvent d'être difficile à appliquer en zone urbaine du fait de la grande variété des hauteurs de bâtiments et de la densité du bâti.

Pour les espaces publics de détente, tels que les places ou les rues commerçantes, nous estimons en première approximation qu'il est important d'assurer un ensoleillement du sol de l'espace public à 12h le 21 décembre, à 16h le 21 septembre et le 21 mars et à 18h le 21 juin. Ces critères correspondent à un angle d'obstruction maximal de 15.2° pour la Belgique, ce qui impose que le rapport entre la hauteur moyenne des bâtiments et la largeur de la place soit inférieur à 0.27 ($H/W < 0.27$).

Bien sûr, ceci est une règle simpliste. Il est fondamental d'étudier les zones d'ombre et d'ensoleillement sur une place avant de l'aménager. Par exemple la position d'une terrasse de café sur l'espace public peut dépendre de la position du soleil.

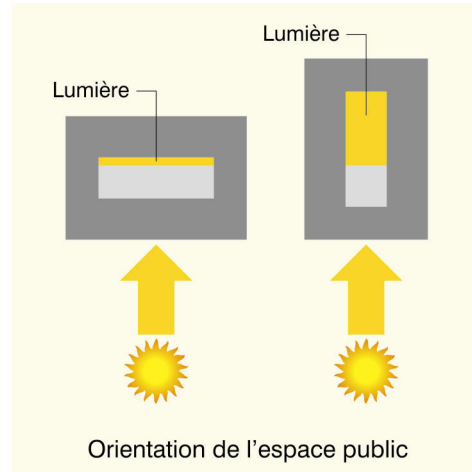


(Photo : S. Reiter).

L'orientation d'un espace public est également essentielle pour déterminer sa disponibilité à l'ensoleillement. Pour les places rectangulaires, l'orientation du grand axe peut jouer un rôle important dans la pénétration des rayons solaires. Si la place est longue et étroite, le soleil d'hiver va la pénétrer plus profondément pour une orientation nord-sud

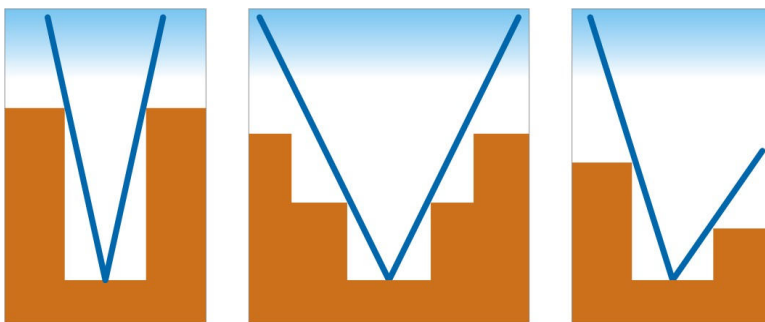


(Photo : S. Reiter).



Les rues et les îlots urbains auront en revanche une orientation préférentielle en fonction de l'ensoleillement désiré sur les façades des bâtiments. En Belgique, une orientation E-O des rues est donc à privilégier pour assurer un bon ensoleillement des façades tournées vers le sud.

Par ciel couvert, l'orientation de l'espace public n'a pas d'influence sur son ambiance lumineuse. C'est uniquement l'angle de vue du ciel qui définit la possibilité de pénétration du rayonnement solaire diffus et donc la disponibilité sous ciel couvert de la lumière naturelle. Une rue dont la hauteur est faible sera toujours mieux éclairée au niveau du sol qu'une rue de même largeur mais dont les bâtiments sont plus élevés. Le graphe ci-dessous montre les différents angles de vue du ciel au niveau du sol pour trois types de morphologies urbaines différentes. Notons que dans le cas de bâtiments présentant un décalage au niveau des étages supérieurs, le facteur de vue du ciel est fortement augmenté.

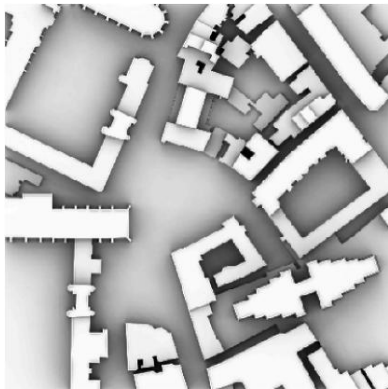


Le facteur de vue du ciel (sky view factor – SVF) de 1 signifie que la vue du ciel est dépourvue de toute obstruction – par exemple depuis un champ isolé. Un SVF de 0 signifie que la vue du ciel est totalement obstruée. Ainsi, dans une ville médiévale avec des rues étroites on s'attend à un SVF faible – autour de 0.2 – alors que dans un environnement urbain plus ouvert avec des rues et des espaces larges, le SVF sera plus près de 0.8. Dans une ville donnée, il peut y avoir des valeurs de SVF typiques d'une zone urbaine mais il peut aussi y avoir des variations significatives du SVF à l'intérieur du tissu urbain.

Le tableau ci-dessous compare le pourcentage d'ouverture du ciel de trois places célèbres (Littlefair & al. 2000).

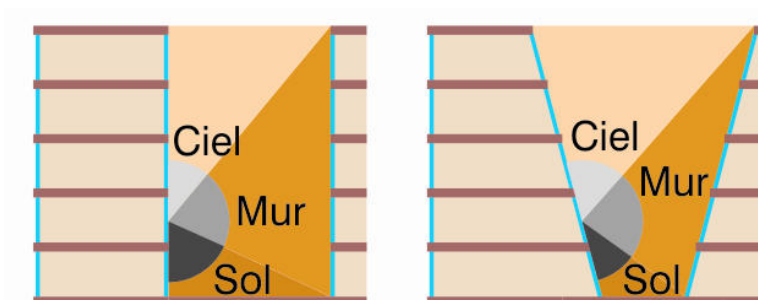
Place	Surface	Hauteur construite	Facteur de vue du ciel
Place de l'amphithéâtre à Lucca	75m x 50m	14m	0.66
Grand Place à Arras	190m x 100m	10m	0.88
Place des Vosges à Paris	140m x 140m	20m	0.76

L'image ci-dessous montre la répartition du facteur de vue du ciel pour le All Saint's Garden à Cambridge. Les tons clairs correspondent aux facteurs de vue du ciel élevés (Steemers & al. 2004).



(Steemers & al. 2004).

L'inclinaison des murs de la place ou de la rue représente un paramètre essentiel pour le facteur de vue du ciel. Par exemple, des murs inclinés à 10° , pour une place carrée construite de manière à ce que la surface totale des constructions soit identique au cas où les murs seraient droits, apportent considérablement plus de lumière au niveau du sol. En effet, la variation des composantes directe et réfléchie de la lumière naturelle dans un espace public varie lorsque l'inclinaison des murs augmente. En Belgique, il est fortement conseillé d'adopter une forme évasée dès que la hauteur des bâtiments atteint le double de la largeur de la rue. Les murs ne doivent pas être obliques pour autant, il suffit de décaler le mur de façade à chaque étage.



Modification de la distribution lumineuse en fonction de l'inclinaison des parois qui bordent un espace public.

Les facteurs de réflexion des surfaces ont également un impact sur l'ambiance lumineuse d'un lieu. Au plus les facteurs de réflexion des matériaux de construction, du sol et du mobilier urbain sont élevés, au plus l'ambiance sera

lumineuse. Ainsi, l'eau, en réfléchissant le ciel et l'environnement, intensifie l'impression lumineuse d'un lieu.



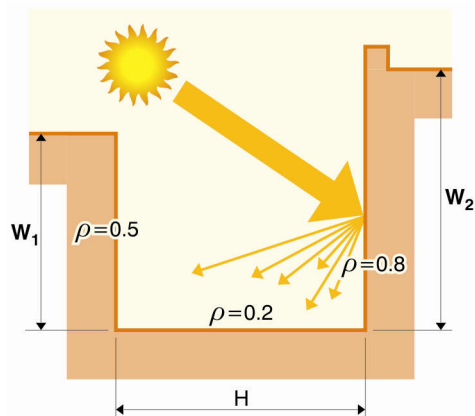
(Photos : S. Reiter).

Par ciel serein, c'est le facteur de réflexion des surfaces verticales ensoleillées qui est le plus important pour les niveaux d'éclairage de l'espace public. Les façades exposées au sud renvoient la lumière vers l'espace public et les bâtiments d'en face : leur coefficient de réflexion devrait donc être élevé. En revanche, par ciel couvert, c'est le facteur de réflexion du sol qui devient le facteur important du point de vue de la quantité de lumière dans l'espace public. Donc, en Belgique, le facteur de réflexion du sol est très important du point de vue visuel car le ciel y est souvent couvert. Des surfaces réfléchissantes placées au sol telles qu'un dallage brillant ou des couleurs claires peuvent contribuer à diffuser davantage de lumière.



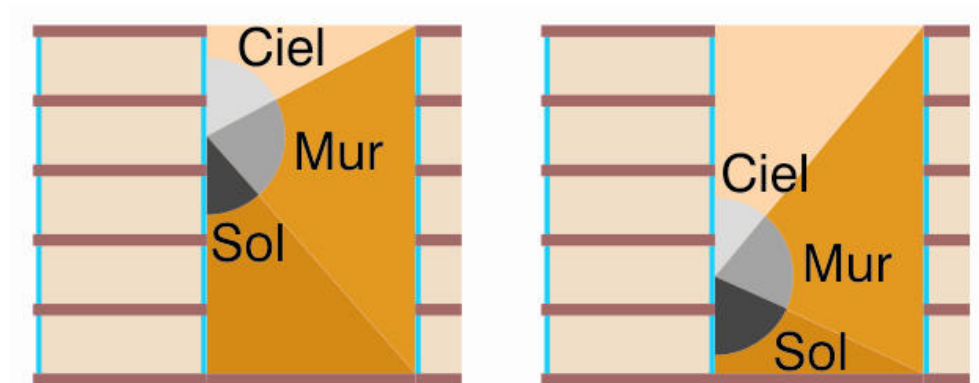
(Photos : S. Reiter).

Le graphe ci-dessous montre un espace public dont les **coefficients de réflexions** sont choisis pour favoriser l'éclairage naturel ; la surface W2 est orientée vers le sud alors que la surface W1 est orientée vers le nord. La surface W2 réfléchit donc la lumière vers la surface W1 et l'espace public. Le bâtiment W1, situé au sud du bâtiment W2, permet un bon ensoleillement de W2 grâce à sa petite taille.



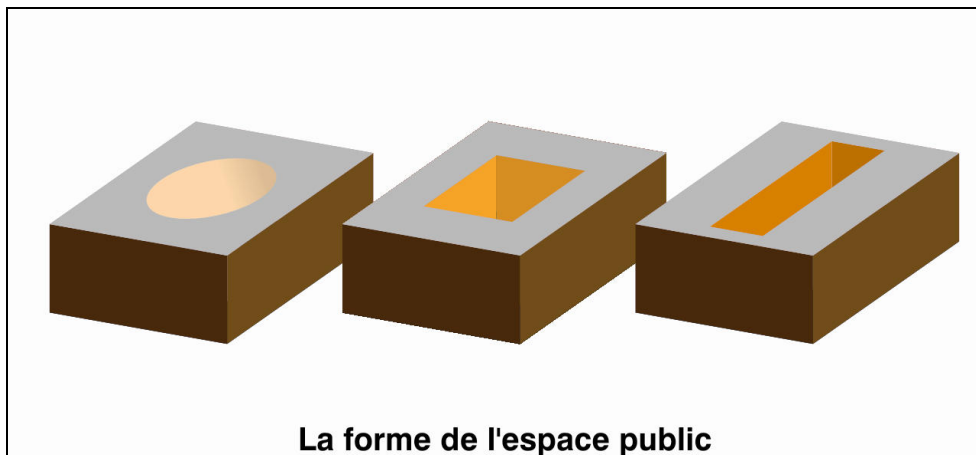
Il faut encore indiquer que lorsque l'espace public est de petite dimension et que la hauteur des bâtiments est importante, c'est-à-dire pour un rapport H/W élevé, la luminosité est davantage influencée par le facteur de réflexion des murs. Notons également que les plantes réfléchissent en général peu de lumière. Elles ont toutefois un effet positif sur l'agrément visuel de l'espace.

Notons que pour des espaces publics étroits, la lumière qui atteint les niveaux supérieurs des bâtiments est plus importante que celle qui pénètre jusqu'au sol. Vu que le facteur de réflexion des murs est normalement supérieur à celui des vitrages, l'augmentation de la surface des murs dans la partie supérieure des bâtiments améliore la luminosité de l'ensemble de la rue et accroît la lumière disponible aux étages inférieurs de ces bâtiments. Adapter la taille des ouvertures à l'étage auquel elles appartiennent est donc également un élément essentiel de l'efficacité de la distribution lumineuse en ville. Ainsi, nous recommandons que les surfaces vitrées des étages supérieurs soient plus petites que celles des étages inférieurs.



Modification de la distribution lumineuse entre les différents étages des bâtiments qui bordent un espace public.

Pour les places de petites dimensions, on peut aussi noter que plus le périmètre d'une place est petit, pour une même surface d'ouverture en toiture, au plus elle est lumineuse. En effet, lorsque le périmètre est réduit, il y a moins de surfaces pour absorber la lumière qui pénètre dans cet espace. C'est ainsi qu'on peut affirmer que la meilleure forme pour une très petite place est un cercle et qu'un carré est plus avantageux qu'un rectangle.

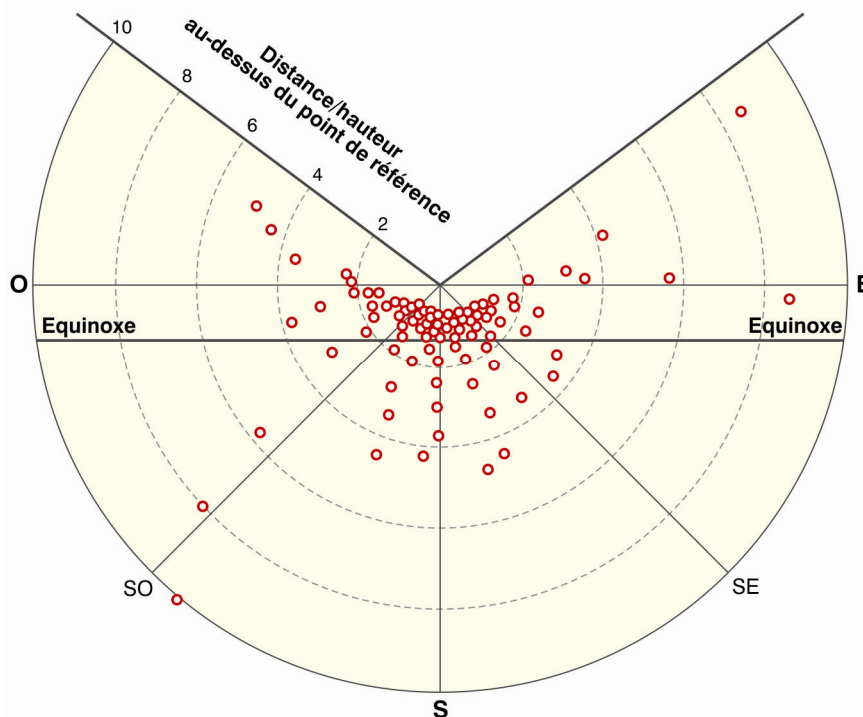


Du point de vue de la consommation énergétique des bâtiments, le critère idéal pour une façade orientée au sud est d'assurer son ensoleillement à midi le 21 décembre, ce qui n'est pas souvent réalisable pour des bâtiments situés en ville dans le nord de l'Europe. Pour Bruxelles, ce critère idéal correspond à un angle d'obstruction de 15.8° , ce qui est pratiquement égal à l'angle d'obstruction nécessaire pour assurer un ensoleillement de l'espace public pour les piétons.

De plus, il faut souligner, qu'en zone urbaine, les obstructions peuvent être inégales. On doit tenir compte des bâtiments situés juste en face de l'édifice étudié mais aussi des bâtiments qui interceptent une partie du rayonnement solaire direct ou diffus même s'ils sont décentrés. Dans ces conditions, il y a de fortes chances pour qu'une partie du bâtiment analysé soit située de telle façon que l'angle d'obstruction soit dépassé. Pour résoudre ce problème, il est utile de se donner une règle plus réaliste et plus souple, ce qui nécessite de :

- définir une zone angulaire en plan à l'intérieur de laquelle l'angle d'obstruction doit impérativement être limité, alors que les obstructions venant des autres directions sont acceptées.
- choisir un angle d'obstruction plus réaliste par rapport aux configurations urbaines.

Une zone angulaire de préférence est facile à déterminer : la zone du ciel qui va du sud-est au sud-ouest comprend la majorité du rayonnement solaire direct utile en hiver. Le graphe ci-dessous est un indicateur de la disponibilité solaire pour Manchester (53.5°N). Chacun des 100 points représente 1% des heures d'ensoleillement probable. On peut estimer que ce graphe peut s'appliquer à la Belgique (Bruxelles est à 50.8°N).



Indicateur de la disponibilité solaire à Manchester (Littlefair & al. 2000).

Ce schéma nous permet de conclure qu'il est spécialement important de limiter l'angle d'obstruction vertical dans la zone allant du SE au SO. Les bâtiments les plus élevés devraient donc être placés au nord.

Choisir un angle d'obstruction réaliste en milieu urbain est plus délicat. Pour un bon ensoleillement des façades, on peut prendre les règles suivantes :

- pour une latitude supérieure à 50°N, une surface sud doit être ensoleillée à midi pour les 21 janvier et le 21 novembre, ce qui correspond approximativement à un angle d'obstruction maximal égal à «70°-latitude du site».
- pour une latitude comprise entre 46.5°N et 50°N, un angle d'obstruction maximal de 20° peut être choisi.
- pour une latitude inférieure à 46.5°N, une surface sud doit être ensoleillée à midi pour le 21 décembre, ce qui correspond approximativement à un angle d'obstruction maximal égal à «66.5° - latitude du site ».

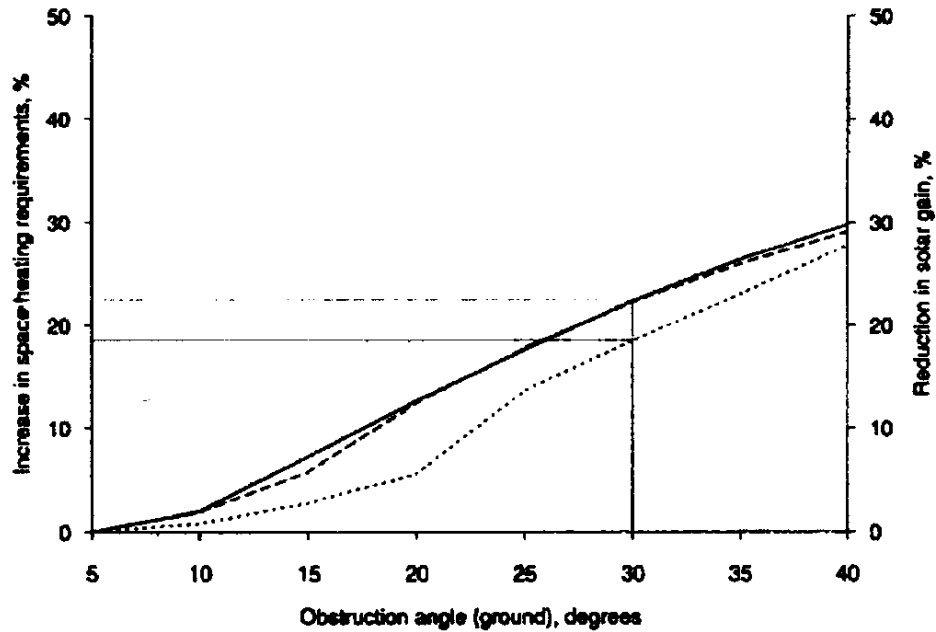
Ces angles d'obstruction maximaux sont synthétisés dans le tableau ci-dessous (Littlefair & al. 2000).

Latitude (°N)	Angle d'obstruction vertical maximal d'une façade solaire pour les orientations allant du SE au SO pour assurer une possibilité raisonnable de profiter des gains solaires en hiver
50° ou plus	70 - latitude
46.5 à 50°	20
< 46.5°	66.5 - latitude

En Belgique, cela nous conduit à limiter les angles d'obstructions verticaux à 19.2° pour les orientations allant du sud-est au sud-ouest. Pour un bâtiment situé dans un tissu dense, on peut toutefois conseiller de mesurer l'angle d'obstruction vertical à partir de 2m de haut plutôt qu'à partir du sol.

Si l'angle d'obstruction à l'ensoleillement reste inférieur à la valeur de référence pour l'ensemble de l'angle allant du sud-est au sud-ouest, une conception solaire passive du bâtiment est vraiment conseillée. Lorsque l'ensemble de la zone sud-est-sud-ouest est coupée de l'ensoleillée au-delà des limites fixées, la création d'une architecture qui prenne en compte les gains solaires est à abandonner ou bien il faut changer de site. Entre les deux, une étude plus poussée est nécessaire pour évaluer les gains solaires disponibles. Si ce critère n'est pas respecté sur une partie du champ allant du SO au SE, ou par évaluer l'impact d'une nouvelle construction sur une situation existante, on peut calculer les gains solaires probables durant la saison de chauffe avec et sans l'obstruction. Si la situation avec obstruction ne descend pas en-dessous de 0.9 fois la situation sans cet obstacle, une nouvelle construction n'est pas gênante pour son voisinage. Pour un nouveau projet, si la situation avec une obstruction pour les orientations entre le SE et le SO ne descend pas en-dessous de 0.9 fois la situation sans cet obstacle, une conception solaire passive est appropriée.

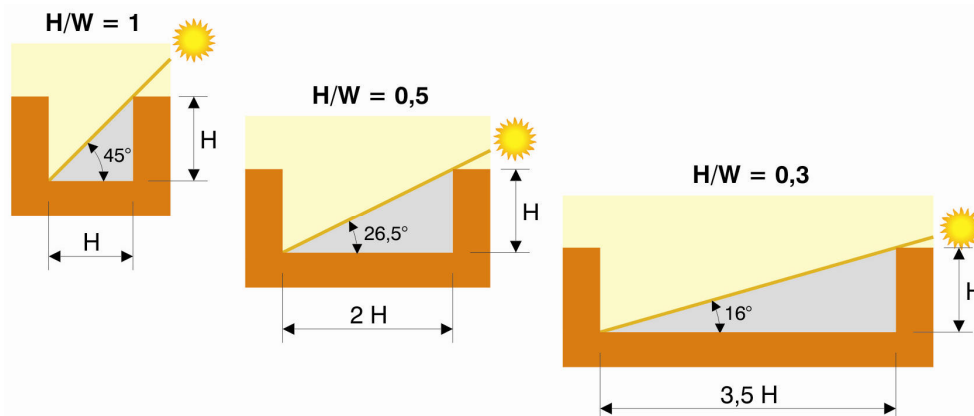
Simos Yannas a établi le graphe ci-dessous à partir de simulations réalisées à l'aide du logiciel SERI-RES. Ce diagramme (Yannas 1996) donne l'accroissement de l'énergie de chauffage nécessaire et la réduction en terme de gains solaires, exprimés en pourcents, en fonction de l'angle d'obstruction solaire pour des maisons dont les principales ouvertures sont orientées vers le sud et pour trois localisations différentes en Angleterre : Dundee 57N (ligne solide), Sheffield 53N (ligne en tirets) et Plymouth 50N (ligne pointillée).



(Yannas 1996).

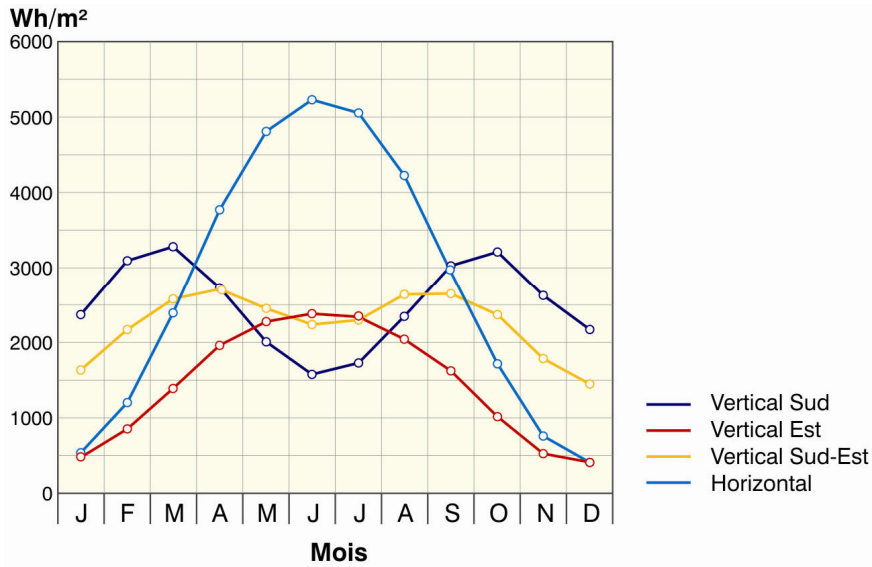
De plus, une étude réalisée en grande Bretagne montre que tant que l'angle d'obstruction solaire moyen reste inférieur à 30°, la consommation énergétique d'une maison située en ville est plus faible que celle d'une habitation fortement isolée mais en site totalement dégagé, quelque soit l'orientation. Par contre, si l'angle d'obstruction solaire moyen dépasse les 30°, la consommation énergétique des bâtiments sera supérieure dans le cas urbain (Steemers 2003).

Vu que la latitude de la Belgique est proche de celle de la grande Bretagne, nous pouvons affirmer qu'il est souhaitable en Belgique que les angles d'obstruction verticaux ne dépassent pas 25° à 30°, c'est-à-dire $H/W \leq 0.5$. Mais l'idéal reste d'avoir au moins la distance entre bâtiments égale à la hauteur solaire pour le 21 décembre afin de permettre au soleil d'hiver d'éclairer les bâtiments, ce qui correspond à un angle de 15.8° à Bruxelles, soit $H/W = 0.3$. **Nous pouvons donc conclure que l'accès au soleil est un critère critique au niveau de l'urbanisme en Belgique.**



Pour profiter des gains solaires et de la lumière naturelle dans les bâtiments, l'orientation des façades est importante. Le graphe ci-dessous montre les gains solaires reçus par ciel serein en Belgique à travers un double vitrage vertical, sans obstruction du contexte, orienté :

- au sud (courbe bleu foncé),
- à l'est/ouest (courbe rose),
- au sud-est /sud-ouest (courbe jaune),
- et pour un double vitrage horizontal, ce qui correspond à un éclairage zénithal (courbe turquoise) et approximativement à l'ensoleillement du sol de l'espace public urbain.

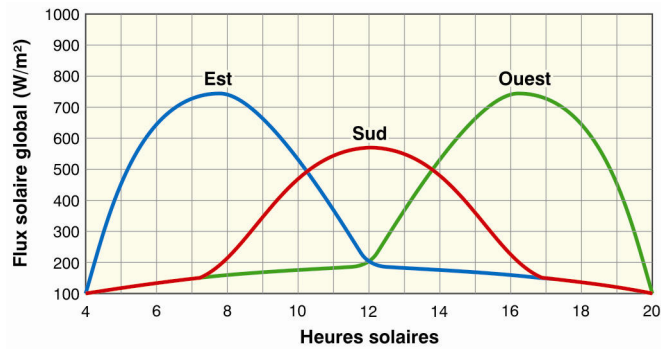


Eclairagements énergétiques d'une surface pour différentes orientations. (Architecture et Climat 2004).

Ainsi, une fenêtre orientée à l'est reçoit très peu de soleil en hiver, un peu plus en mi-saison et un maximum en été. Une fenêtre orientée au sud reçoit globalement plus de soleil qu'une fenêtre orientée à l'est. De plus cette énergie solaire reçue est mieux répartie, avec un maximum en mi-saison, un peu moins en hiver, et encore moins en été.

L'orientation des façades induit également le cycle journalier d'ensoleillement direct possible à l'intérieur des bâtiments. Les pièces orientées au nord bénéficient toute l'année d'une lumière égale et du rayonnement solaire diffus. Les pièces orientées à l'est bénéficient du soleil le matin mais la lumière est difficile à maîtriser car les rayons sont bas sur l'horizon. L'exposition solaire y est faible en hiver et moyenne en mi-saison mais, en été, elle est supérieure à l'orientation sud, ce qui est peu intéressant. Les pièces orientées à l'ouest bénéficient du soleil en fin d'après-midi. Les rayons bas sur l'horizon y créent une possibilité d'inconfort visuel par éblouissement et une exposition aux surchauffes en été. Les surfaces sud reçoivent globalement un plus grand ensoleillement que les surfaces est et ouest mais surtout cet ensoleillement est mieux réparti sur l'année. Les pièces orientées au sud bénéficient d'une lumière plus facile à contrôler et d'un ensoleillement maximal en hiver et minimal en été. En effet, en hiver, le soleil bas ($\pm 17^\circ$) pénètre profondément dans la maison tandis qu'en été, la hauteur solaire est plus élevée ($\pm 60^\circ$) et la pénétration du soleil est donc moins profonde. Le sud est l'orientation qui permet le meilleur contrôle passif de l'ensoleillement. La figure ci-dessous représente le flux solaire instantané traversant un double vitrage par une journée

ensoleillée du mois de juillet, en fonction de l'orientation de la fenêtre, en Watts par m² de vitrage, sans obstruction du contexte construit.

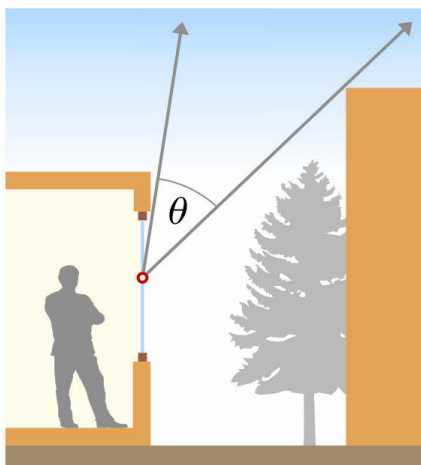


(Architecture et Climat 1998).

En climat tempéré, il faut offrir la possibilité aux façades orientées au sud d'être ensoleillées pendant l'hiver pour profiter des gains solaires et diminuer les consommations d'énergie tout en apportant de la lumière naturelle dans les bâtiments. Il est donc judicieux de concevoir des bâtiments qui maximisent leurs surfaces d'exposition au sud, tout en ne limitant pas l'accès au soleil des autres. Il est parfois possible de profiter de la topographie pour assurer un meilleur accès au soleil de tous les bâtiments. Quand c'est possible, il est conseillé de placer les bâtiments les plus élevés au nord. Si les rues se développent selon l'axe E-O, il est possible de maximiser la longueur des façades sud, tant au niveau des rues que des intérieurs d'îlots.

En plus de la disponibilité à l'ensoleillement qui détermine les gains solaires potentiels, la lumière naturelle est aussi une source d'énergie de par sa fonction d'éclairage naturel. Elle permet de réduire les besoins en éclairage artificiels des bâtiments pendant la journée.

L'éclairage naturel des bâtiments dépend en grande partie de sa conception architecturale : taille et position des fenêtres, facteurs de réflexion des matériaux intérieurs, choix du type de vitrage,... mais il dépend en premier lieu des obstructions extérieures de l'environnement qui permettent de profiter de la lumière naturelle ou limitent son usage. Ainsi, par ciel couvert, la quantité de lumière naturelle qui traverse une fenêtre est proportionnelle à l'angle de vue du ciel depuis le centre de cette fenêtre dans un plan vertical.



L'angle de vue du ciel. (Littlefair & al. 2000).

Pour profiter au maximum de la lumière naturelle à l'intérieur des bâtiments, il importe de ne pas négliger le facteur de réflexion des surfaces extérieures environnant le bâtiment. En effet, des surfaces claires et réfléchissantes augmentent la quantité de lumière qui peut pénétrer dans le bâtiment. Des surfaces réfléchissantes au sol contribuent à capter davantage de lumière par ciel couvert. Les façades sud, qui présentent la meilleure disponibilité au soleil, pourraient être de préférence blanches ou de couleur claire pour renvoyer la lumière en face puisque les surfaces nord sont souvent en manque de soleil.



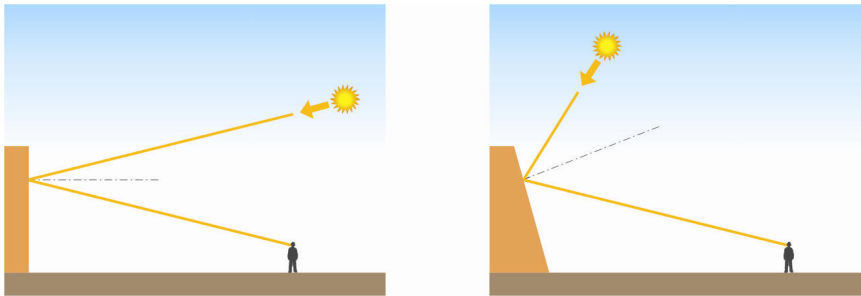
(Photo : S. Reiter).

Il faut toutefois faire attention aux surfaces très réfléchissantes orientées au sud : elles peuvent causer de **l'éblouissement**. Des problèmes peuvent donc apparaître lorsqu'un bâtiment sud est couvert de vitrage réfléchissant. L'emploi de matériaux réfléchissants peut également influencer **l'exposition effective d'un bâtiment**. Un édifice orienté au nord et doté de larges vitrages clairs pour tirer parti de la lumière naturelle peut se trouver dans une situation sud si on construit en face de lui un bâtiment équipé de vitrages réfléchissants, précisément pour se protéger de l'ensoleillement. A l'évidence, les conditions de confort du premier bâtiment sont profondément modifiées par la construction du second.



(Photo : S. Reiter).

Les surfaces vitrées verticales avec un vitrage clair ne causent un problème d'éblouissement que lorsque le soleil est très bas (lever et coucher du soleil). Par contre, lorsque la façade est inclinée, des problèmes peuvent se produire même lorsque le soleil est haut dans le ciel. Les façades vitrées qui sont inclinées de plus de 35° par rapport à la verticale devraient faire l'objet d'une attention particulière par rapport aux risques d'éblouissement.

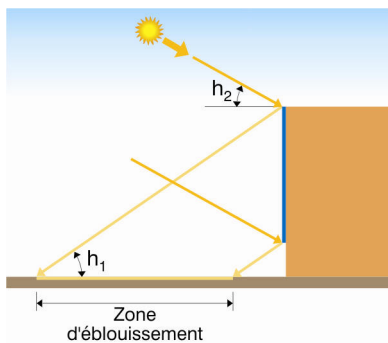


Risques d'éblouissement en fonction de l'inclinaison d'un vitrage (Littlefair & al. 2000).

Si la hauteur du soleil est h_2 et son azimut pour une façade verticale est ϕ_2 , les rayons réfléchis auront une altitude h_1 et l'azimut ϕ_1 qui sont donnés par les équations suivantes et représentés dans le graphe ci-dessous (Littlefair & al. 2000).

$$h_1 = -h_2$$

$$\phi_1 = -\phi_2$$



Zone d'éblouissement (Littlefair & al. 2000).

Si on incline la façade vers l'arrière depuis la verticale, d'un angle égal à s , alors les équations ci-dessus se réécrivent :

$$\sin(h_2) = (\sin(2s) \cos(h_1) \cos(\phi_1)) - (\cos(2s) \sin(h_1))$$

$$\tan \phi_2 = -\phi_1 / (\cos(2s) \cos(\phi_1) + (\cos(2s) \cos(\phi_1) + \sin(2s) \tan(h_1))$$

Si ces équations sont appliquées pour un certain nombre de points d'une hauteur et d'azimut connus h_1 et ϕ_1 à partir de la façade, alors les points h_2 et ϕ_2 peuvent être calculés pour déterminer les limites de l'effet d'éblouissement. Ces points peuvent être alors dessinés sur un diagramme solaire pour donner les moments de la journée et de l'année pour lesquels les rayons lumineux poseront des problèmes.

Ainsi, les vitrages réfléchissants limitent la pénétration de gains solaires à l'intérieur des bâtiments mais souvent au détriment des conditions de confort extérieur... Il est donc important de rappeler que l'architecture durable tient compte du contexte dans lequel elle s'inscrit.

Se protéger de la lumière naturelle consiste à arrêter partiellement ou totalement le rayonnement solaire lorsqu'il présente des caractéristiques néfastes. Pour le confort visuel des citoyens, il s'agit essentiellement de se protéger de l'éblouissement. Pour leur confort thermique, il peut être utile de créer des zones d'ombres sur les places en été. Ainsi, l'ensoleillement des espaces publics devrait être maximal en hiver mais il est indispensable d'ombrager partiellement les places en été. Pendant la saison chaude, les surfaces ensoleillées ne devraient pas dépasser 80% de la superficie totale des espaces publics de détente.

On appelle protection solaire tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface qu'on souhaite ne pas voir ensoleillée; citons, par exemple, la végétation, les auvents et les écrans mobiles.

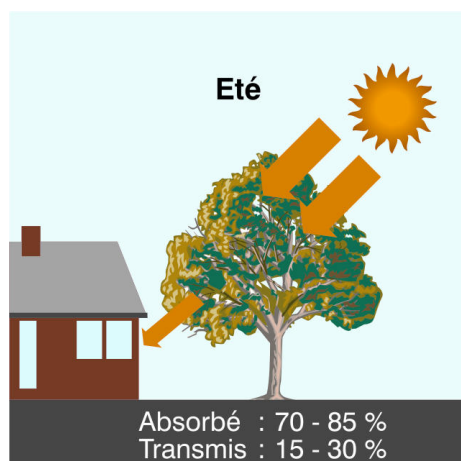
La végétation se distingue des autres écrans parce qu'elle peut être saisonnière, ce qui est le cas des arbres à feuilles caduques, et que par ailleurs elle ne possède qu'une opacité partielle. Elle se contente de filtrer la radiation lumineuse plutôt que de l'arrêter.



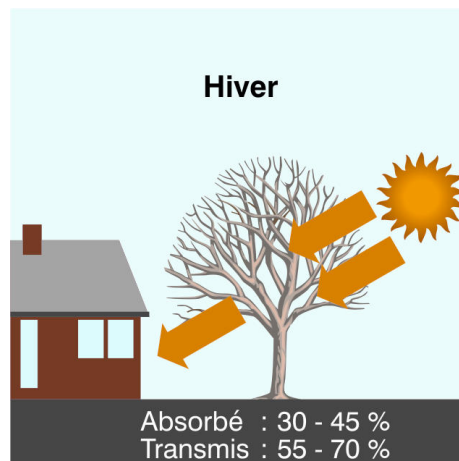
(Photo : S. Reiter).

Les plantes à feuilles caduques apportent une protection naturellement variable. En été, le feuillage fournit un ombrage; en hiver, la chute des feuilles fait profiter les bâtiments des apports gratuits du soleil. En général, on recherchera des essences à feuilles caduques qui présentent peu de branchage pour avoir un ombrage minimum en hiver mais avec un feuillage dense en été. Les arbres à feuilles caduques sont un très bon système de protection solaire pour les orientations est et sud-est ainsi que pour les orientations ouest et sud-ouest. En effet, pour ces orientations, le soleil est bas en début de matinée et en fin d'après-midi.

Notons que tous les arbres laissent passer une certaine partie du rayonnement solaire à travers leur feuillage. Et tous les arbres donnent un certain ombrage, même sans feuilles, de par leur tronc et leurs branches. Par contre, les différentes espèces d'arbres interceptent le rayonnement solaire selon différentes intensités, et différentes temporalités sur l'année.



(Reiter & De Herde 2001).



(Reiter & De Herde 2001).

Les considérations principales dans la conception de plantations sont le type d'espèce, la vitesse de croissance et la localisation. Les espèces locales ont généralement une résistance plus forte aux conditions climatiques locales, nécessitant une maintenance plus faible que les espèces exotiques. Les caractéristiques de plantes qui peuvent significativement affecter leur contribution à l'ombrage sont :

- le temps mis pour atteindre une taille suffisante
- son diamètre et sa hauteur, qui influencent la distance entre arbres ou entre un arbre et un bâtiment
- la durée de la feuillaison
- la résistance à la pollution: des espèces durables sont nécessaires en zone urbaine pour éviter la mort prématurée des plantes.

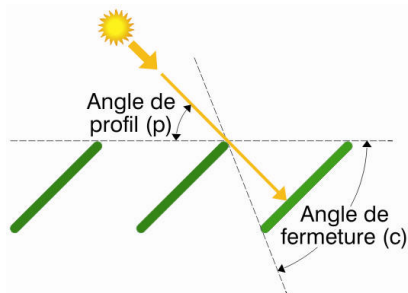
Les arbres à moyenne ou haute tige permettent la vue durant toute l'année, l'ombre obtenue est fonction de la distance entre la plantation et l'élément à ombrer, de la hauteur de la tige et de la hauteur de l'arbre. Cependant, il faut attendre un grand nombre d'années avant qu'ils n'atteignent la taille souhaitée. Dans le cas des arbustes, des arbres à basse tige ou des plantes retombantes, la vue est pratiquement inexistante durant la période estivale mais l'ombrage est facilement réalisé et son efficacité est rapide.

Une alternative efficace de protection végétale est la réalisation de pergolas ou de tonnelles. Celles-ci peuvent être créées avec des plantes grimpantes à feuilles caduques, comme par exemple la vigne, la vigne vierge, le chèvrefeuille et la glycine, ou avec des plantes annuelles à croissance rapide telles que les pois de senteur ou les capucines.



Anacapri (Architecture et Climat 2004).

Pour fournir de l'ombrage à partir d'un auvent formé de lattes, il faut respecter les angles indiqués dans le schéma ci-dessous. Une protection dont les lattes sont orientées vers le sud et s'allongent d'est en ouest fournit un ombrage tout au long de la journée alors que cette protection tournée vers l'est ou vers l'ouest ne fournit qu'un ombrage temporaire d'une demi-journée (Brown & DeKay 2001).



(Brown & DeKay 2001).

Les **arcades** sont aussi un dispositif qui permet de se protéger du soleil quand cela est nécessaire. Ainsi, elles peuvent être orientées et dimensionnées de façon à recevoir le soleil d'hiver tout en créant un ombrage bienvenu en été.



(Littlefair et al. 2000)

Evaluer le rayonnement solaire en zone urbaine

Il y a trois types de méthodes d'évaluation du rayonnement solaire en zone urbaine :

- les méthodes simplifiées,
- les simulations informatiques,
- les mesures sur modèle réduit, sous ciel réel ou sous ciel artificiel.

1/ Les méthodes simplifiées

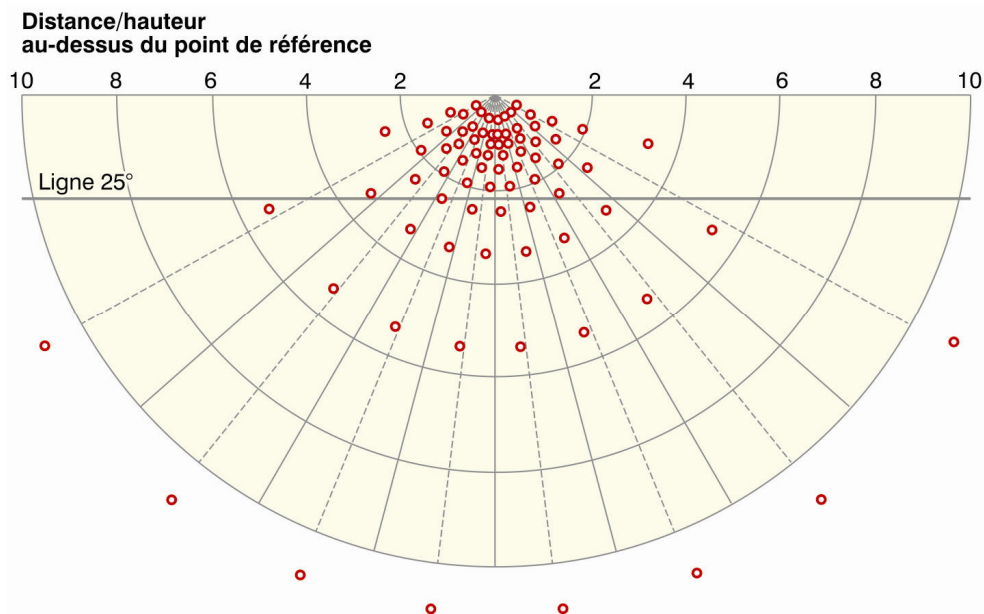
L'avantage des méthodes simplifiées est la grande rapidité avec laquelle on peut obtenir des résultats. Toutefois, les logiciels permettant de visualiser et d'évaluer le rayonnement solaire en milieu urbain sont assez faciles d'accès et peuvent eux aussi donner des résultats assez rapidement. Citons toutefois quelques méthodes simplifiées qui nous semblent intéressantes.

Le BRE a produit un ensemble de graphes simples et pratiques pour aider les concepteurs à évaluer l'accès au soleil et à la lumière naturelle dans les zones urbaines construites. L'outil de conception complet comprend des indicateurs localisés pour huit latitudes réparties à travers toute l'Europe et un texte explicatif (Littlefair & Aizlewood 1999). Ces outils sont très pratiques pour évaluer le potentiel d'un site du point de vue du rayonnement solaire ainsi que pour comparer différentes options de conception. Les différents lieux de référence pour ces indicateurs sont repris dans le tableau ci-dessous.

Latitude (°N)	Lieu de référence
60	Bergen
56	Edinburgh
53.5	Manchester
51	Londres
48	Weihenstephan
45	Lyon
42	Rome
38	Athènes

Ces outils sont au nombre de quatre : l'indicateur de lumière du ciel, l'indicateur de la disponibilité à l'ensoleillement, l'indicateur de la course du soleil et l'indicateur des gains solaires. Ces indicateurs forment une méthode manuelle relativement rapide pour déterminer l'impact de constructions et obstacles divers sur la lumière naturelle, l'ensoleillement et les gains solaires d'un bâtiment ou d'un espace public. L'utilisation de ces indicateurs nécessite une mise à l'échelle du plan du site analysé mais cette transformation est identique pour tous les indicateurs et le même plan peut donc être réutilisé.

L'indicateur de lumière du ciel sert à trouver la composante verticale du ciel (%), c'est-à-dire le rapport entre l'éclairement direct du ciel tombant sur un mur vertical à un point de référence et l'éclairement horizontal simultané sous un ciel non obstrué par des bâtiments. La valeur maximale est d'environ 40% pour un mur vertical sans obstruction. Cet indicateur de lumière du ciel présente 80 croix dont chacune correspond à 0.5% de la composante verticale du ciel. Cet indicateur est donné graphiquement ci-dessous ; il est valable pour toutes les latitudes et peut donc être utilisé n'importe où. Cet indicateur est utilisé en plaçant la partie droite le long de la façade à analyser et le centre au niveau du point de référence.



Indicateur de la lumière du ciel (Littlefair & al. 2000).

L'indicateur de la disponibilité à l'ensoleillement conçu par le BRE permet de calculer les heures d'ensoleillement reçues sur une façade. Cet indicateur dépend de la latitude.

L'indicateur de la course du soleil sert à trouver les moments de la journée et de l'année pendant lesquelles la lumière solaire est disponible sur une fenêtre. Les courbes de cet indicateur sont les courses du soleil pour le 21^{ème} jour de chaque mois. Chaque ligne représentant la course du soleil est divisée en heures solaires. Cet indicateur dépend de la latitude.

L'indicateur de gains solaires sert à trouver le rayonnement solaire incident sur une fenêtre verticale orientée au sud ou dans un angle de 30° par rapport au sud, pendant la saison de chauffage (octobre à avril), avec et sans obstruction. Chaque

point sur cet indicateur représente 1% des gains solaires obtenus pendant la période de chauffage des bâtiments. Cet indicateur dépend de la latitude.

Comme outil d'évaluation couramment employé pour évaluer les ombrages dans un espace public, on peut utiliser des diagrammes de la course solaire superposés avec des projections stéréographiques des obstructions environnantes qui évaluent l'accès au soleil en des points déterminés de l'espace public (Littlefair & al. 2000).

La projection stéréographique est une représentation de l'hémisphère entière de la voûte du ciel sous forme d'un disque circulaire avec son centre qui correspond au zénith (soit la verticale au-dessus du lieu), et son périmètre qui représente l'horizon. La vue résultante correspond à photographie fish-eye à 180° prise par un photographe couché sur son dos. En conception bioclimatique, la projection stéréographique est souvent employée comme un outil commode pour évaluer les effets d'ombrage. Ceci se fait en superposant le diagramme de la course solaire avec les obstructions dues aux bâtiments environnants. Toutefois, pour étudier l'intégralité d'un espace ouvert, ces projections ont le grand désavantage de varier considérablement d'un point à l'autre de cet espace urbain.

Le diagramme stéréographique de la course du soleil pour la Belgique est donné dans le schéma ci-dessous.

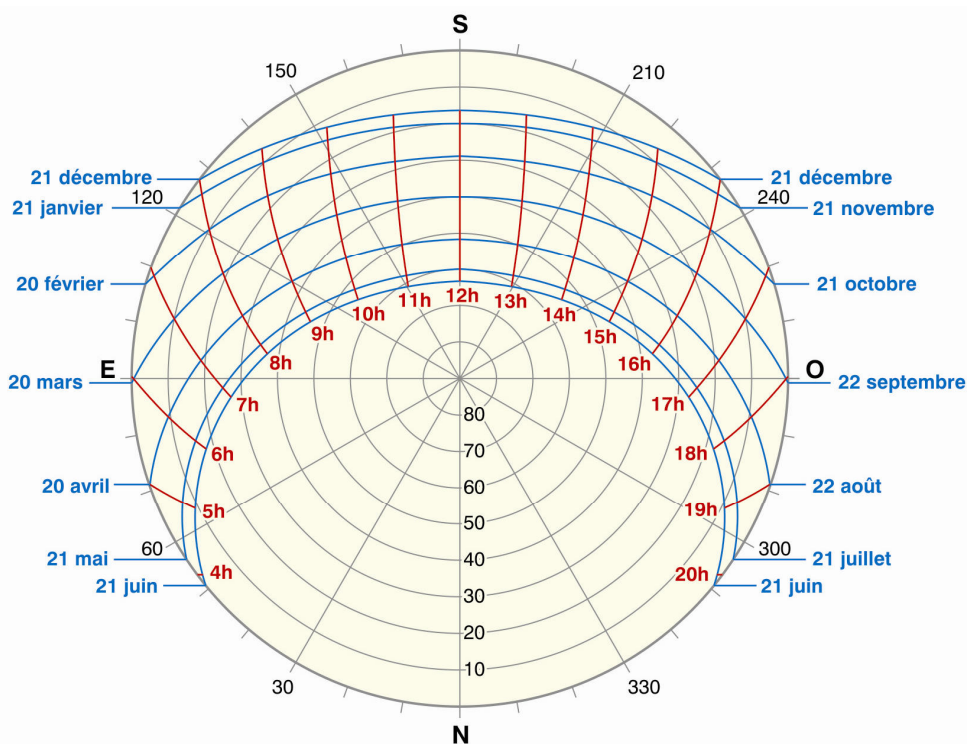


Diagramme stéréographique de la course solaire à Bruxelles (Lat :50.2 ; long :4.53)

Les figures ci-dessous montrent à gauche le plan de l'espace public considéré (en vert) et à droite une projection stéréographique depuis un point de vue unique situé dans l'espace ouvert. Les éléments noirs correspondent aux obstructions par rapport à l'éclairage naturel créées par les bâtiments entourant la place. Cette image correspond donc à une évaluation locale à partir d'un point de vue spécifique.



(Compagnon & Goyette-Pernot 2004).



(Compagnon & Goyette-Pernot 2004).

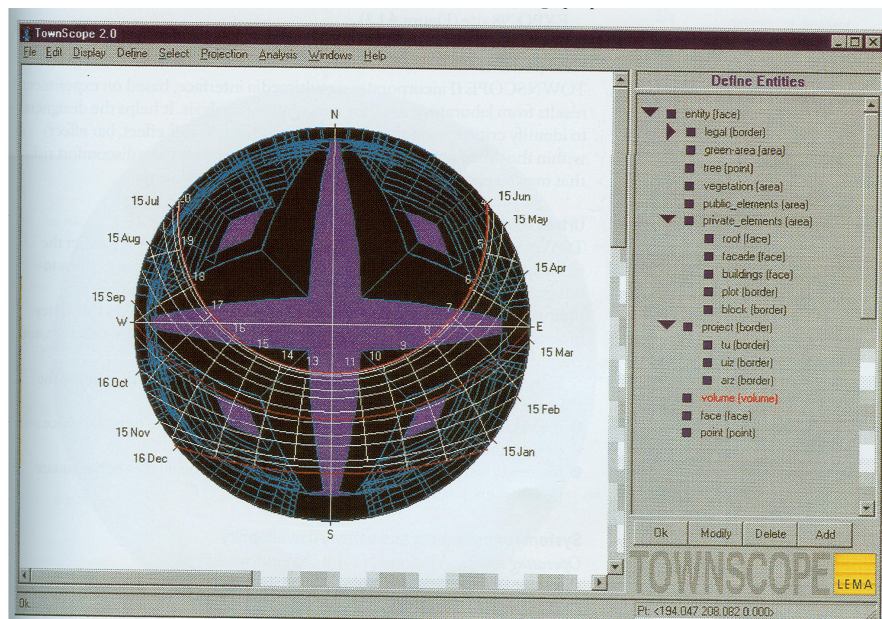
Cependant, les logiciels habituellement utilisés par les architectes tels que Autocad permettent déjà d'analyser facilement les zones d'ombrage en fonction de la course du soleil.

2/ Les simulations informatiques

Pour évaluer le rayonnement solaire en milieu urbain, il est nécessaire d'utiliser un logiciel qui tienne compte des composantes directes et diffuse du rayonnement solaire.

TOWNSCOPE et SOLENE sont deux logiciels qui permettent d'étudier le rayonnement solaire énergétique et lumineux en milieu urbain. SHADOWPACK et ECOTECT permettent aussi d'évaluer l'ensoleillement énergétique des façades et les ombres générées dans les espaces publics.

Nous recommandons TOWNSCOPE, qui est un outil d'analyse précis et rapide du rayonnement solaire en milieu urbain, dans ses aspects thermiques (rayonnement solaire et rayonnement de grande longueur d'onde) et visuels (éclairage naturel, projections stéréographiques, facteur de vue du ciel, ...) Il permet de comparer facilement différentes options de conception. Ce logiciel a été développé par le LEMA de l'université de Liège (Belgique).



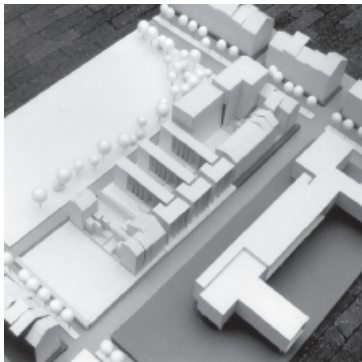
(Littlefair & al. 2000).

3/Les maquettes sous ciel réel ou sous ciel et soleil artificiels

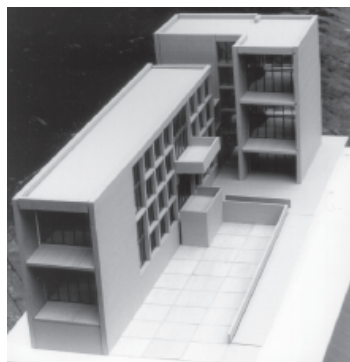
Une des manières d'évaluer précisément l'éclairage et l'ensoleillement qui atteint un site est de construire une maquette et de la tester sous le ciel réel ou sous un ciel et un soleil artificiels. La maquette elle-même devrait comporter tous les bâtiments qui créent une obstruction par rapport au soleil sur le site évalué.

Contrairement aux modèles thermiques et acoustiques, les modèles physiques étudiant la lumière ne nécessitent aucune correction d'échelle et peuvent donner des résultats très précis. En effet, la longueur d'onde de la lumière visible est si courte en comparaison des dimensions d'un modèle réduit que son comportement en est très peu affecté. En tenant compte de la perception visuelle humaine, on ne discerne aucune différence visuelle entre la réalité et un modèle réduit idéal.

La maquette d'une pièce ayant exactement la même géométrie et des surfaces de coefficients de réflexion et de transmission lumineuse identiques à ceux des surfaces réelles fournira la même quantité et la même qualité de lumière que celle réellement présente dans un lieu. Si, en plus, les couleurs utilisées dans le modèle correspondent aux vraies couleurs de la pièce, l'impression visuelle du modèle sera très proche de la perception du local réel.

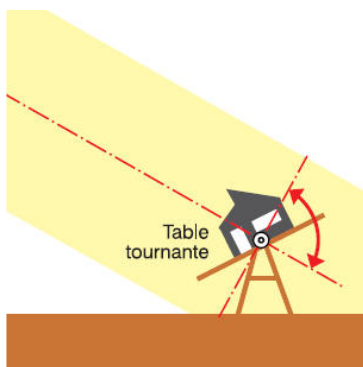


(Reiter & De Herde 2001).



(Reiter & De Herde 2001).

Pour l'analyse du comportement d'un bâtiment sous le rayonnement soleil direct, les différentes inclinaisons du soleil peuvent être obtenues par une modification de l'orientation et de l'inclinaison du bâtiment de manière à ce que l'incidence des rayons solaires corresponde à la hauteur et à l'azimut du soleil du moment de l'année à étudier. La figure ci-contre montre un exemple d'une table inclinable qui permet d'atteindre ce but. Il faut toutefois remarquer qu'une telle inclinaison de la maquette expose celle-ci à des surfaces de ciel et de sol différentes par rapport à sa position horizontale. En pratique, cette différence influence peu l'éclairage à l'intérieur du modèle réduit car les luminances du ciel clair et du sol éclairé directement par le soleil sont fort proches.



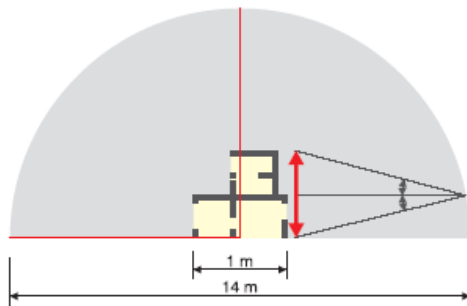
(Reiter & De Herde 2001).

L'inconvénient de tester un modèle réduit sous ciel réel est de dépendre des conditions météorologiques et de ne pas connaître les conditions exactes sous lesquelles la maquette est testée. Toutefois, les résultats sont généralement largement assez précis pour évaluer la qualité lumineuse des espaces publics urbains.

Le ciel artificiel est un dispositif qui a pour but de reproduire la distribution des luminances de la voûte céleste. L'avantage majeur d'un ciel artificiel réside dans son environnement lumineux très stable, ce qui assure des conditions lumineuses identiques pendant les différentes mesures et permet donc de les comparer très facilement entre elles. De plus, vu que la distribution lumineuse du ciel artificiel est connue et contrôlée, il est possible de tirer des conclusions plus précises que sous le ciel réel.

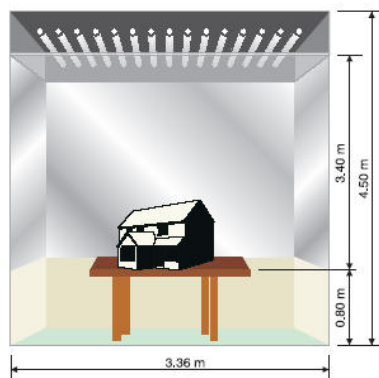
Le ciel artificiel est utilisé pour tester uniquement les contributions lumineuses de la voûte céleste. Pour déterminer l'impact du rayonnement solaire direct, il faut se servir d'un soleil artificiel.

Lorsque l'étude du modèle réduit est réalisée sous un ciel artificiel, les dimensions de la maquette doivent tenir compte de la taille du ciel afin d'éviter des erreurs de parallaxe. Signalons également que les photographies couleurs exécutées dans une maquette sous ciel artificiel ne reproduisent pas précisément les couleurs vues sous ciel réel car les lampes utilisées pour simuler le ciel influencent la perception des couleurs. Néanmoins, le ciel artificiel est un outil remarquable pour la prédétermination quantitative de la lumière naturelle.

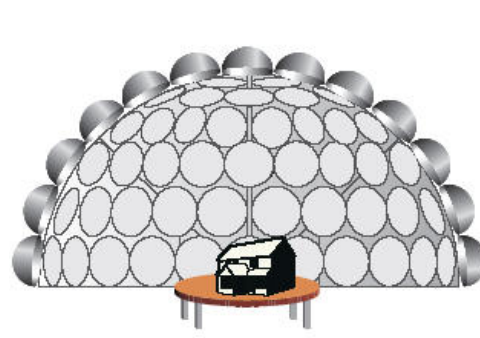


(Reiter & De Herde 2001).

Il existe plusieurs types de ciels artificiels: les configurations principales sont le ciel à miroirs (dessin de gauche) et le ciel de type dôme (dessin de droite).



Ciel à miroirs
(Reiter & De Herde 2001).



Ciel de type dôme
(Reiter & De Herde 2001).

Le ciel à miroirs est constitué d'une boîte dont les murs sont recouverts de miroirs et dont le plafond est un diffuseur de lumière. Il crée donc un ciel dont l'horizon 'infini' provient de multiples interrélflexions de la lumière sur les miroirs. Comme une partie de la lumière est absorbée à chaque réflexion, cette configuration tend à approximer la lumière naturelle d'un ciel couvert puisque celui-ci est plus lumineux au zénith qu'à l'horizon. La distribution lumineuse précise du ciel est déterminée par le rapport de la largeur sur la hauteur de la boîte. Le ciel à miroirs ne peut malheureusement simuler qu'un seul type de ciel: le ciel couvert. Il n'est pas possible d'intégrer l'étude du rayonnement solaire direct dans un ciel à miroirs. Les photos ci-dessous montrent l'extérieur (à gauche) et l'intérieur (à droite) du ciel à miroirs du Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) à Limelette (Belgique).

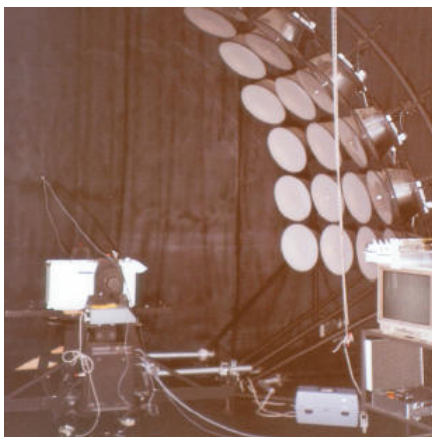


(Reiter & De Herde 2001).



(Photo : M. Bodart).

Il existe un grand nombre de ciels de type dôme. Le diamètre des différents ciels artificiels hémisphériques varie entre 3m et 14m. Certains d'entre eux sont constitués par des lampes situées au pied d'un hémisphère en matériau réfléchissant. D'autres sont formés d'un ensemble de lampes positionnées sur la totalité de la voûte. Leurs inconvénients sont généralement leur consommation électrique importante, le prix de réalisation souvent élevé, les problèmes de maintenance et la difficulté de calibration du fait du grand nombre de sources lumineuses.



Ciel artificiel de l'EPFL (Lausanne)
(Reiter & De Herde 2001).

Au Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) à Limelette (Belgique), un ciel de type hémisphérique formé d'une seule lampe a été réalisé. Les avantages de ce type de ciel hémisphérique à une lampe par rapport aux autres ciels de type dôme sont: la calibration de la lampe très facile, rapide et précise

puisqu'il suffit de mesurer une lampe et son prix nettement moins coûteux que celui de la majorité des ciels à dôme. L'inconvénient est son impossibilité de visualiser ou de mesurer la luminosité instantanément dans la maquette. Les résultats visuels, si précieux pour les architectes, sont difficiles à obtenir. Le dessin ci-dessous montre le fonctionnement de ce ciel artificiel.

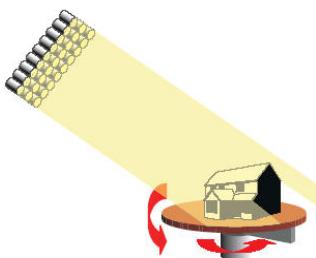


(Reiter & De Herde 2001).

Le ciel à miroirs est conçu pour les architectes et spécialement pour les étudiants en architecture. Il donne rapidement une impression de la lumière naturelle à l'intérieur d'un bâtiment, sous un ciel couvert CIE. Il est donc aisé de comparer différentes alternatives du point de vue de la lumière naturelle sous ce ciel artificiel. C'est le type de ciel artificiel le meilleur marché et il est, en outre, facile à construire. Le ciel de type dôme à une lampe est le plus précis du point de vue scientifique. Il sera davantage utilisé dans un but de recherche. Il peut reproduire tous les types de ciels standards ou statistiques pour des coûts de construction, de maintenance et de fonctionnement faibles. Il est idéal pour obtenir des résultats très précis du comportement de la lumière sous n'importe quel type de ciel.

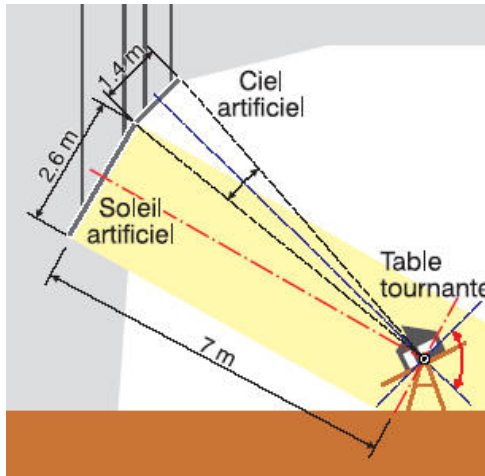
Un soleil artificiel est un dispositif destiné à simuler les caractéristiques des rayons lumineux provenant directement du soleil. La spécificité de l'éclairage naturel est sa variabilité, liée à la modification permanente de la position du soleil et de la nébulosité. L'utilité d'un soleil artificiel est évidente: la lumière naturelle directe est responsable de la plupart des situations critiques observées sur le plan du confort visuel (éblouissement, effet de protections solaires, ...). L'étude de la composante directe de la lumière se révèle donc indispensable. Enfin, le soleil artificiel permet aussi d'étudier la dynamique de la lumière solaire à l'intérieur du projet. Il offre donc la possibilité de visualiser, par une observation directe, l'impact du rayonnement solaire direct.

En Belgique, au CSTC, il y a un soleil artificiel, formé à partir d'un ensemble de lampes halogènes de faible angle d'ouverture. Ce soleil artificiel peut reproduire toutes les positions du soleil grâce à une table tournante. Il permet de faire des mesures précises et de déduire une évaluation des prestations annuelles de l'éclairage solaire direct sur un modèle réduit. L'image ci-dessous montre le fonctionnement du soleil artificiel du CSTC.



(Reiter & De Herde 2001).

Le grand intérêt du soleil artificiel est qu'on peut le combiner avec le ciel hémisphérique à une lampe pour obtenir l'éclairage et l'ensoleillement pour tout type de ciel (serein, couvert,...). L'image et les photos ci-dessous représentent la combinaison du ciel artificiel à une lampe et du soleil artificiel qui se trouvent au CSTC.



(Reiter & De Herde 2001).



Ciel et soleil artificiels
(Photo : M. Bodart)

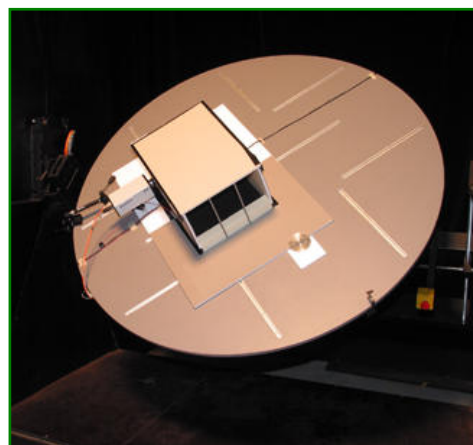


Table tournante
(Photo : M. Bodart)

Le ciel à miroirs, le ciel hémisphérique à une lampe et le soleil artificiel qui se trouvent au CSTC ont été développés au cours du projet Zoeklicht dans le cadre du programme de recherche VLIET-bis, qui a rassemblé les équipes de recherche du CSTC (Division Physique du Bâtiment et Climat Intérieur), de WenK (Département Architectuur St-Lucas-Campus Gent) et de l'UCL (Architecture et Climat).

Le CSTC possède un quatrième outil pour évaluer l'éclairage naturel sur modèle réduit sous ciel artificiel : le soleil mécanique. Le soleil mécanique offre une observation directe de l'ensoleillement sur une maquette. Il s'agit d'un outil didactique permettant une vision immédiate de la situation par rapport au rayonnement solaire direct. Ce nouvel outil de simulation de l'ensoleillement direct sur modèle réduit, le soleil mécanique, reflète fidèlement notre perception du mouvement du soleil autour d'un site construit. Il met donc en évidence les cycles journaliers et saisonniers de l'ensoleillement d'un espace public ou d'un bâtiment testé en modèle réduit.

Afin d'évaluer ce mouvement, une installation mécanique permettant de déplacer une source lumineuse autour d'un modèle réduit en respectant exactement le mouvement du soleil a été mise au point. Une simulation de l'ensoleillement direct peut être effectuée pour toute latitude et pour toute date choisie par simple déplacement d'éléments mécaniques (deux chariots le long d'un arc de cercle). Cette adaptation nécessite moins d'une minute, ce qui permet d'évaluer rapidement le comportement d'une morphologie construite en fonction des modifications journalières et saisonnières. L'emploi de ce simulateur permet de visualiser les éclaircissements et les ombrages sur un modèle réduit de masse (échelle 1/200) ou de détail (échelle 1/20) de manière pratiquement instantanée et dynamique (mouvement du soleil sur une journée).

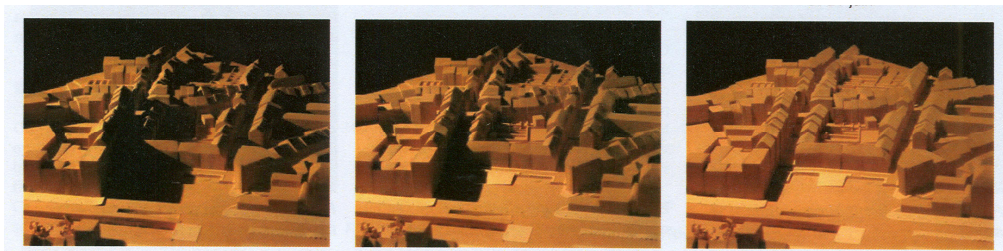
Les éléments principaux constituant le soleil mécanique, numérotés sur la photo ci-dessous, sont :

- 1/ une source lumineuse simulant le soleil,
 - 2/ un premier arc de cercle, fixe, sur lequel coulisse un petit chariot dont on peut maintenir la position par un système d'arrêt, permettant ainsi de fixer la latitude considérée pour la simulation,
 - 3/ un deuxième arc de cercle, mobile, sur lequel se déplace un deuxième chariot muni d'une source lumineuse simulant le soleil
 - 4/ une structure de soutien sur laquelle repose le bras mobile
 - 5/ un axe pivot permettant la rotation du bras mobile par rapport à la structure de soutien
 - 6/ un câble reliant le premier chariot au second et dont on peut régler la longueur, afin de fixer la date (saison) pour laquelle la simulation est réalisée
- Un contrepoids permettant d'alléger le poids apparent de la source lumineuse.



(Bodart 2007)

Les photos ci-dessous présentent les vues de l'ensoleillement et des ombrages à midi (solaire) sur un modèle réduit de masse situé à Uccle (Bruxelles) le 21 décembre (à gauche), le 21 mars (au milieu) et le 21 juin (à droite).



21/12

21/03

21/06

(Photos : Bodart 2007)

3.2.4 La modification des mouvements d'air en milieu urbain

Les villes modifient fortement les conditions de la circulation de l'air. Les espaces urbanisés constituent des surfaces de forte rugosité. Celle-ci réduit, globalement, la vitesse du vent.



(Photo : S. Reiter).

La couche limite atmosphérique est la couche d'air proche du sol dans laquelle le flux du vent est affecté par les propriétés du terrain. Cette couche limite augmente au dessus des villes. Dans la couche limite, le vent est ralenti par les forces de friction créées par le terrain. Plus la rugosité de la surface du sol est importante, plus le vent est ralenti dans la couche limite qui le couvre. La couche limite atmosphérique située au-dessus d'une urbanisation peut être définie en trois zones :

- la canopée urbaine, qui s'étend de la surface du sol jusqu'à la hauteur moyenne des bâtiments,
- le dôme urbain qui s'étend du toit des bâtiments jusqu'à deux ou trois fois la hauteur des bâtiments.
- Le reste de la couche limite atmosphérique où le vent n'est plus affecté par les détails de la surface mais seulement par sa longueur de rugosité.

L'augmentation de la rugosité, due à la présence d'une densité de bâti et de bâtiments élevés, cause inversement une augmentation de la turbulence. La direction des vents régionaux peut aussi être altérée.

En outre, localement, il peut se produire des effets d'accélération du vent ou de fortes turbulences liées à certaines configurations du bâti plus habituelles en milieu urbain, telles que les bâtiments très élevés. Il faut signaler que la présence de bâtiments de grande hauteur est le facteur principal d'inconfort lié au vent pour les piétons. L'étude du confort lié au vent en site urbain est un sujet complexe mais extrêmement important pour la qualité des espaces publics.

Les villes modernes présentent de plus en plus souvent des constructions très élevées et des formes audacieuses qui peuvent entraîner des problèmes importants liés au vent autour de ces édifices. Ainsi, de nouvelles législations concernant l'impact des bâtiments sur les mouvements d'air en site urbain commencent à apparaître dans différents pays, dans le but de garantir le confort et la sécurité des piétons dans les espaces publics.

Un bâtiment substantiellement plus grand que son entourage crée une déflexion du vent à la fois horizontalement et verticalement. Un effet important de cette déflexion est de causer un accroissement important de la vitesse moyenne du vent au niveau piéton autour de ce bâtiment.



(Photo : S. Reiter).

Le vent influence la dispersion des polluants et la consommation d'énergie des bâtiments. L'estimation de la vitesse du vent en ville est vitale pour la conception de bâtiments refroidis naturellement. La diminution de la vitesse du vent peut aggraver les inconvénients de l'îlot de chaleur en période de surchauffes. En outre, le vent affecte la température, la vitesse d'évaporation et la transpiration des plantes. C'est un facteur essentiel au niveau du microclimat.

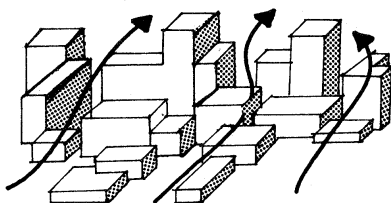
L'action de l'urbanisation sur les vents est complexe. La ville modifie la vitesse des vents et leur direction par sa rugosité, par la canalisation des vents dans les rues, mais aussi par l'influence de l'îlot de chaleur urbain qui donne naissance à des vents thermiques. Les brises thermiques, dues à la convection de l'air, apparaissent sur l'ensemble d'une ville ou d'un quartier, plus particulièrement quand les vents sont faibles. Ce phénomène s'accroît lorsque l'îlot de chaleur augmente.

Nous présentons ci-dessous les principaux mécanismes de l'écoulement de l'air autour des bâtiments en milieu urbain dense. Les mécanismes de l'écoulement de l'air autour de bâtiments isolés et de groupes de bâtiments ont été développés au point 3.1.3 de cette thèse sur les paramètres qui influencent le vent local.

L'écoulement du vent en milieu urbain est défini à partir des effets suivants :

- **l'effet de masque urbain,**
- **l'effet canyon,**
- **l'implantation d'un bâtiment de grande hauteur dans un tissu urbain, homogène de faible hauteur,**
- **les ensembles de bâtiments élevés.**

L'**effet de masque urbain** n'est autre qu'un effet de brise-vent à l'échelle du plan masse : les constructions par leurs actions sur le vent, peuvent se protéger mutuellement et, par là même, réduire considérablement le niveau des anomalies aérodynamiques.



Effet de masque urbain (Gandemer & Barnaud 1975).

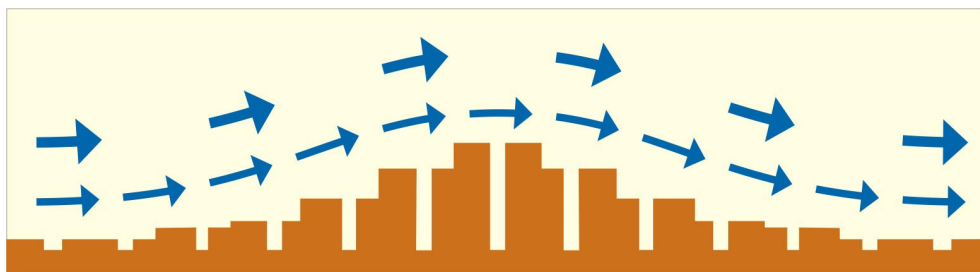
Nous pouvons toutefois énoncer globalement des conclusions pour les **ensembles construits qui sont à la fois denses et de hauteur relativement homogène et peu élevée** :

- Lorsque le vent pénètre dans ce type de plan masse et s'y enfonce, il y a une décroissance notable des niveaux moyens des survitesses et, parallèlement, une augmentation de l'intensité de turbulence. En général, les niveaux de confort requis au niveau piéton sont atteints sur l'ensemble de la zone urbaine.
- Dans ce type de plan masse, la zone de probabilité d'accidents aérodynamiques la plus forte est une bande de l'ordre de 200 mètres d'épaisseur située en périphérie de l'urbanisation ou du quartier. En bordure de ville, placer les îlots en quinconce réduit la vitesse du vent.
- A l'intérieur d'un tissu de ce type, les seuls problèmes aérodynamiques apparaissent autour des constructions dont la hauteur est au moins du double de celle de la hauteur moyenne du bâti.
- Si des espaces découverts (ou libres) avec des superficies de l'ordre de 160 000 m² (400 m x 400 m) apparaissent dans un plan masse de hauteur homogène, le vent va "retomber" dans de tels espaces et les bâtiments périphériques seront à nouveau exposés. Il faudra atteindre alors une pénétration de 200 mètres pour retrouver un effet de protection global dans le milieu construit.

Les tissus des villes anciennes, par leur densité élevée et leurs hauteurs relativement homogènes (hauteur moyenne R+4), forcent donc une grande partie du vent à les franchir par-dessus les toits. L'effet de protection dans ce type de plan masse est considérable.

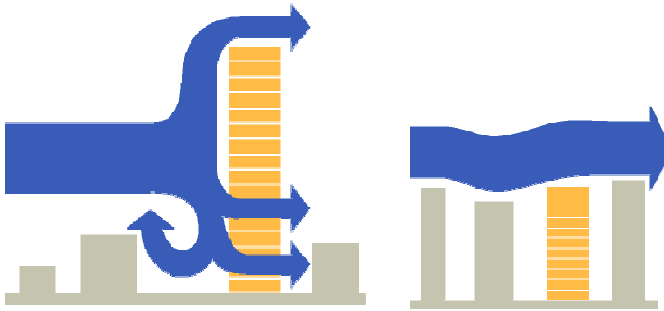
En conclusion, si seules les contingences de protection vis-à-vis du vent étaient en cause, on pourrait vivement recommander un urbanisme à hauteur homogène et de forte densité. Les espaces ouverts devraient de préférence être de taille moyenne. Les parcs ou les zones ouvertes de très grande dimension ont intérêt à être fortement plantés de manière à recréer un effet de masque dû à la végétation. Bien entendu, la disponibilité de la lumière naturelle et la ventilation nécessaire pour limiter la pollution sont également des éléments de conception à prendre en compte.

Dans les villes, le centre présente en général des hauteurs de bâtiments supérieures à celles des constructions périphériques. Pour que le vent soit dévié globalement au-dessus de la ville, les modifications de la hauteur des édifices doivent évoluer progressivement.



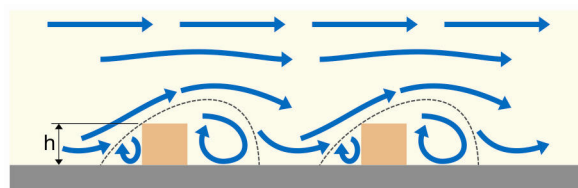
Evolution des hauteurs progressive.

Les changements de hauteur abrupts créent toujours des problèmes au niveau piéton. Ainsi, des zones de transition doivent être créées pour éviter des changements de hauteur qui dépassent 100% de la hauteur de la zone précédente.

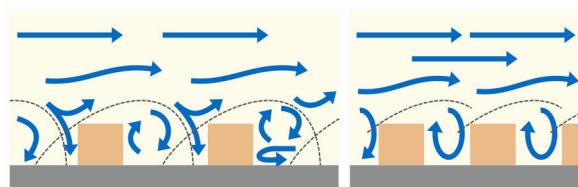


Lorsque les bâtiments sont construits en mitoyens, ils forment des rues qui créent un effet de masque supplémentaire: l'**effet canyon**. Pour que cet effet existe, il faut toutefois que la distance entre les deux côtés de la rue ne soit pas trop élevée.

Quand le vent est plus ou moins perpendiculaire au grand axe des rues (disons à 30° près dans chaque sens), trois types de régimes sont observés en fonction des bâtiments (L/H) et de la rue (H/W). Lorsque les bâtiments sont très distants ($H/W < 0.3$), ils n'interagissent pas au niveau de l'écoulement de l'air : on parle de « flux isolé » (isolated roughness flow). L'air extérieur pénètre donc largement dans l'espace qui est bien ventilé. Lorsque cet espace diminue ($0.3 < H/W < 1$), le flux se modifie et forme un « effet d'interférence » (wake interference flow). Ce flux se caractérise par des mouvements secondaires dans l'espace de la rue, là où l'effet de sillage de la face sous le vent est renforcé par l'effet de rabattement de la face au vent du bâtiment suivant. L'air extérieur pénètre moins dans le canyon que dans le cas précédent. Lorsque W diminue encore ($H/W > 1$), une circulation faible mais stable s'établit dans le canyon ; on parle d'« effet de séparation » (skimming flow). L'air extérieur entre faiblement dans le canyon et l'air intérieur crée une boucle de recirculation. L'entrée d'air neuf et la circulation de l'air intérieur sont d'autant plus réduites que le rapport H/W sera élevé. (Oke 1988)



Flux isolé

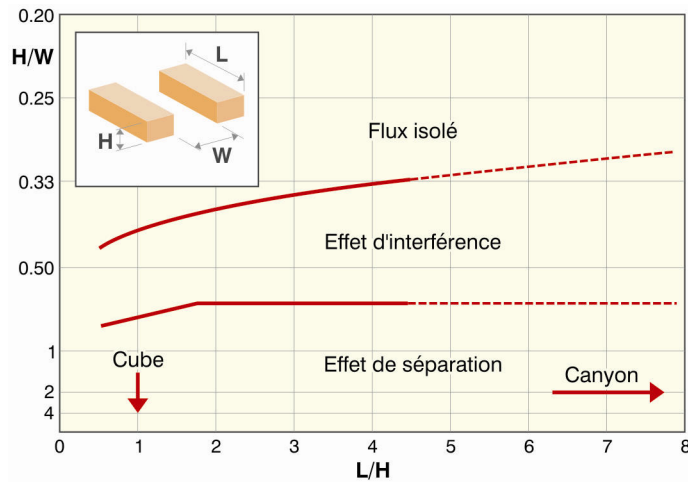


Effet d'interférence

Effet de séparation

(Oke 1988)

Oke a défini les limites qui déterminent les transitions entre ces trois régimes d'écoulement, en fonction de la géométrie de la rue (Oke 1988). Le schéma ci-dessous permet d'évaluer quel type d'effet est présent en fonction de la morphologie urbaine.

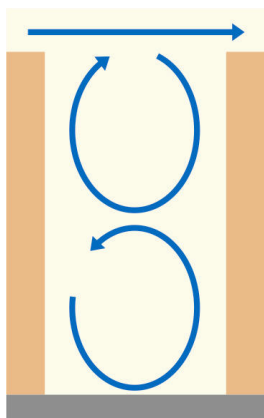


(Oke 1988).

En général, la longueur des rues (L) est assez large. Le passage entre le flux de type isolé et le régime basé sur des interférences entre bâtiments correspond donc à une rue d'une largeur égale à environ 3 hauteurs de bâtiments ($H/W=1/3$ ou $W/H=3$). Le passage entre le régime d'interférences entre bâtiments et le flux qui passe au-dessus de tout l'espace public est situé à une limite qui correspond environ à une rue dont la largeur est égale à 1.5 hauteurs de bâtiments ($H/W= 2/3$ ou $W/H=1.5$). Dans le cas de l' « effet de séparation », le flux d'air dans la rue peut être interprété comme un flux secondaire créé par le flux au-dessus des toits. Lorsque la vitesse du vent au-dessus des toits n'est pas suffisante, le couplage entre le flux du dessus et du dessous est perdu.

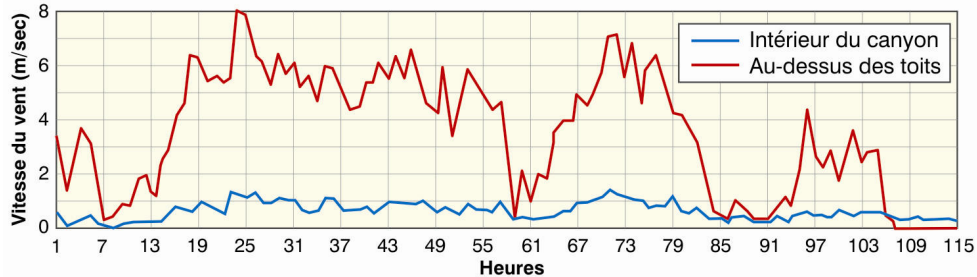
De Pauw, Shieh, Nakamura, Oke, Mc Cormick, Yamartino et Wiegand qui ont tous travaillé avec un rapport H/W entre 1 et 1.5, obtiennent des valeurs proches de **2m/s** comme limite de la vitesse du vent au-dessus des toits pour créer une circulation qui en dépend. Dans ce cas, le mouvement d'air créé au niveau du sol est dans le sens inverse du sens du vent au-dessus des toits. Pour des vitesses de vent inférieures, les effets thermiques et mécaniques deviennent prépondérants. (Santamouris & al. 2001)

Dans les canyons profonds (par exemple $H/W=2.5$), des tests en tunnel à vent ont montré que deux circulations apparaissent sur la hauteur du canyon. Cependant, les vitesses à l'intérieur du canyon deviennent alors très faibles. Dans ce genre de cas, trois phénomènes peuvent interagir : la circulation secondaire liée au flux en toiture, le gradient de température sur la hauteur important dans une rue très étroite et les effets de bords pour des rues relativement courtes ($L < 20H$).



(Santamouris & al. 2001)

Des expériences réalisées sur 10 canyons profonds pendant l'été 1997 à Athènes montrent que la vitesse moyenne de l'air à l'intérieur des canyons dépasse rarement 1m/s, quelque soit la vitesse du vent au-dessus des toits. La figure ci-dessous montre un exemple de la variation de l'air à l'intérieur du canyon (ligne grise) et au-dessus des toits (ligne noire) pour un canyon de rapport H/W=1 (Santamouris & al. 2001).



(Santamouris & al. 2001).

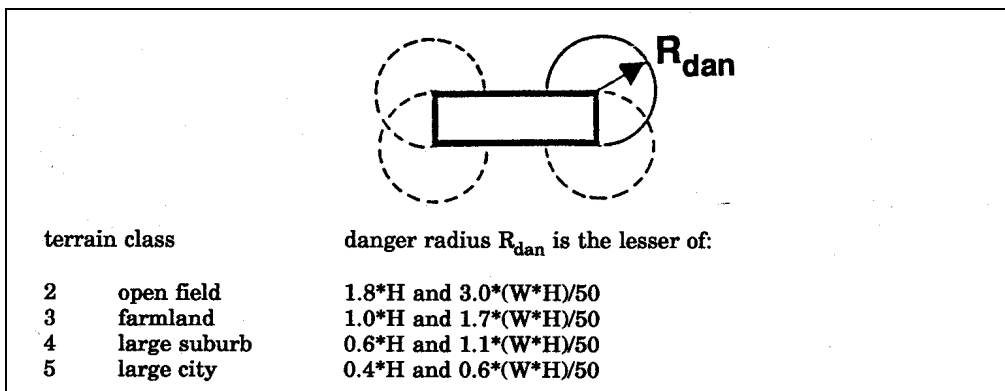
L'implantation d'un bâtiment de grande hauteur dans un tissu de hauteur homogène et relativement faible, dont un exemple type est le tissu ancien de nos centres villes, perturbe de manière violente le pied immédiat de la tour sur un rayon de l'ordre du diamètre de la base. De plus, sa présence accroît nettement l'inconfort jusqu'à un rayon de l'ordre de la hauteur de ce bâtiment élevé.

Toutefois, les bâtiments de petite hauteur entourant un bâtiment élevé diminuent légèrement l'impact inconfortable du vent autour du bâtiment élevé par rapport à un bâtiment de même hauteur en site dégagé.



Effet d'un bâtiment de grande hauteur dans un tissu de hauteur homogène et relativement faible (Gandemer & Barnaud 1975).

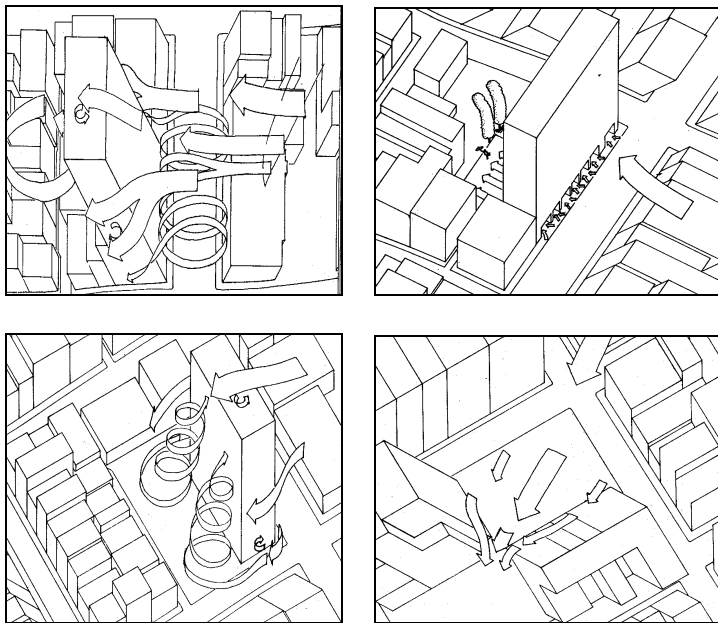
Le schéma ci-dessous permet d'évaluer le rayon critique autour des coins d'un bâtiment élevé en fonction de la densité construite. (Bottema 1993)



(Bottema 1993)

L'ensemble des effets critiques présentés pour des bâtiments isolés ou des groupes de bâtiments sont également présents lorsqu'un bâtiment de grande hauteur est implanté dans un tissu urbain homogène de faible hauteur :

- l'effet de coin,
- l'effet de sillage,
- l'effet de trou sous immeubles,
- le rouleau tourbillonnaire,
- l'effet de barre.
- l'effet Venturi,
- l'effet Wise,
- l'effet de double coin
- l'effet de bâtiments en quinconce (dû à un effet de liaison de zones de pression différente)
- l'effet de canalisation linéaire
- l'effet pyramide



(Bosselmann & al 1988)

Dans les **ensembles de bâtiments élevés**, l'effet de masque urbain et l'effet canyon disparaissent. Les flux de vent autour de bâtiments élevés ont un haut degré de complexité. Les effets d'interaction peuvent décroître les vitesses de vent mais en général elles ont plutôt tendance à l'accroître. Les risques d'inconfort pour les piétons y sont élevés.

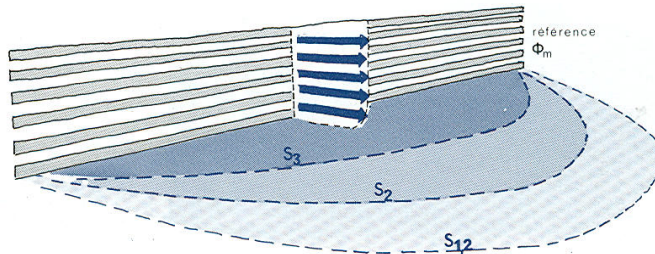


Tours à Brisbane. (Photo : K de Myttenaere).

Ce type de plan masse devrait être considéré avec une très grande prudence. Dans ce cas, nous conseillons fortement de réaliser des essais en soufflerie aérodynamique ou des simulations CFD spécifiques.

Il faut enfin souligner que la prédiction de l'effet **des brise-vents** devient assez imprécise quand on intègre ce type de structures dans des environnements où l'air est très turbulent, ce qui est le cas de nombreuses zones résidentielles et urbaines à cause de l'impact des constructions sur l'écoulement de l'air.

Le graphique ci-dessous montre les différentes zones de protection générées par la présence d'un brise-vent perméable. (Gandemer & Guyot 1981)



(Gandemer & Guyot 1981)

On constate que la protection derrière un brise-vent placé en champ de vitesse et de turbulence très hétérogène (ce qui est le cas en ville) voit son efficacité diminuer. Ainsi, le sillage immédiat S3, peut-être réduit de 70%, le sillage S2 de 55% et le sillage S1.2 de 45% par rapport aux résultats obtenus derrière le même obstacle en vent de type campagne. Or, dans cette perte d'efficacité, on ne peut expliquer qu'une perte de 20% (coefficient K) par la nature du vent devenue statistiquement du type ville (Gandemer & Guyot 1981).

En conséquence, la réduction des aires protégées derrière un brise-vent en zone urbaine est fortement marquée par l'environnement immédiat. Ainsi, on obtient de nouvelles formules de définition des zones S1.2 et S2 pour des brise-vent situés en milieu urbain :

$$S_{1.2} = 16.5 h^{0.6} L (-2.7 \Phi^2 + 2.5 \Phi + 1) K 0.55$$

$$S_2 = 1.6 h^{0.7} L^{1.3} (-7 \Phi^2 + 3.6 \Phi + 1) \cos^2(\theta) K 0.45$$

$$x_p \geq \frac{4S}{L\pi}$$

Ces expressions empiriques déterminent les zones de protection des brise-vents en milieu urbain à partir des paramètres suivants : h (la hauteur du brise-vent), L (la longueur du brise-vent), Φ (la perméabilité du brise-vent), θ (l'incidence du vent par rapport à la normale au brise-vent) et K (le facteur de site selon le tableau ci-dessous). Rappelons que la surface S1.2 est bonne pour la marche mais qu'une surface S2 est nécessaire pour le confort des zones de détente avec station immobile prolongée. (Gandemer & Guyot 1981).

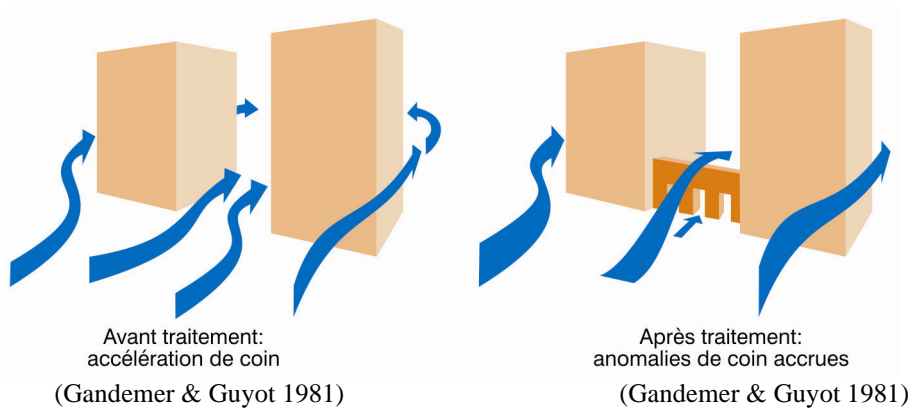
Le paramètre K prend en compte l'effet de la rugosité du terrain (et donc du profil de vent induit) et la perméabilité du brise-vent sur son effet de protection (Gandemer & Guyot 1981) :

Type de vent	Porosité moyenne de l'écran Φ	Facteur K
Vent de campagne	Toutes les porosités (entre 0 et 0.7)	1
Vent en zone urbanisée	0.2	0.8
	0.5	0.7

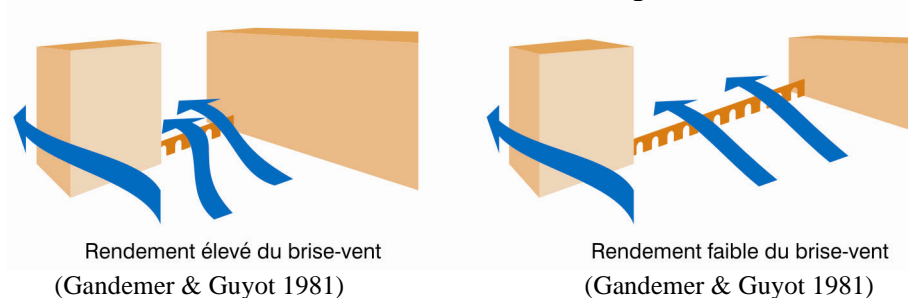
Ceci reste toutefois une approximation très grossière car la perte d'efficacité de l'écran brise-vent en milieu urbain n'est pas uniforme. Ainsi, vu les difficultés d'évaluation de l'efficacité du brise-vent en milieu urbain, si une optimisation poussée d'une situation urbaine est envisagée ou si une forte protection est recherchée ou encore si la résolution efficace d'un accident aérodynamique est demandée, il est indispensable de travailler sur un prototype en vraie grandeur dans le milieu urbain en question ou bien d'avoir recours à une étude spécifique en soufflerie aérodynamique ou encore de réaliser une modélisation CFD très précise (Gandemer & Guyot 1981).

Gardons toutefois en mémoire deux conseils généraux par rapport à l'application des brise-vent en milieu bâti (Gandemer & Guyot 1981):

- privilégier la protection d'un secteur conduit généralement à la détérioration d'un autre. Il est donc important de choisir les zones où le confort au vent est le plus indispensable et reporter le vent vers les zones où les critères de confort ne sont pas aussi importants.



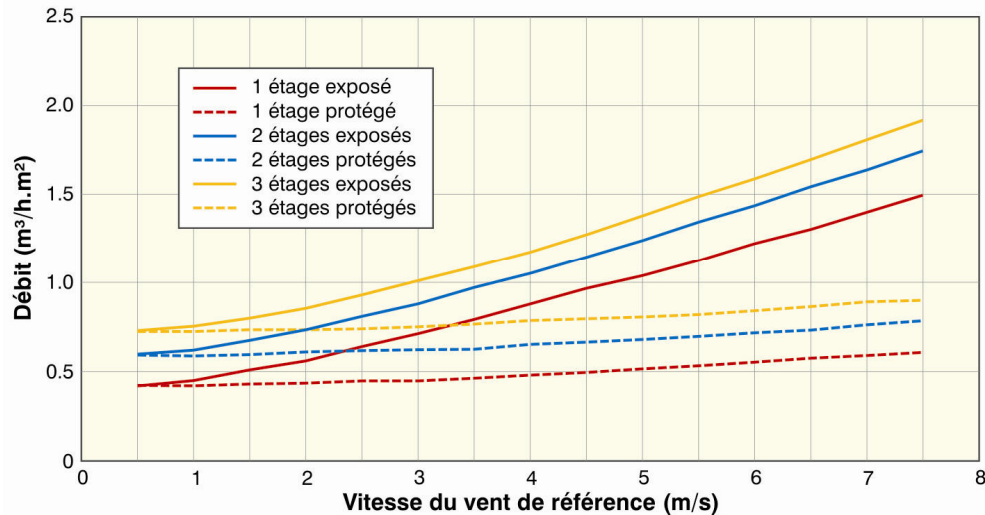
- Plus la zone est exposée ou l'anomalie aérodynamique est élevée, plus l'efficacité relative de l'action du brise-vent sera grande.



En milieu urbain, on peut répertorier trois types de zones microclimatiques du point de vue de la combinaison entre le confort respiratoire et le confort au vent :

- les zones pour lesquelles les vitesses de vent sont entre 0 et 0.4 m/s. Ces zones est considérées comme très négatives pour la qualité de l'air.
- les zones pour lesquelles le vent varie entre 0.4 et 4m/s au niveau du sol qui permettent une certaine ventilation et offrent un confort optimal. Ces zones sont à privilégier pour les espaces publics de détente.
- les zones avec un vent dont la vitesse effective vaut 3 à 6m/s qui assurent une ventilation optimale et sont donc à favoriser pour les zones à risque de pollution, comme par exemple les artères à fort trafic automobile, mais qui sont moins agréable pour un long séjour immobile.

La densité construite, en modifiant sensiblement les valeurs moyennes de pression sur les façades, influence fortement les consommations d'énergie des bâtiments et en particulier ses pertes par infiltration. Le graphe ci-dessous donne le débit d'air entrant dans des locaux par infiltration en fonction de la vitesse du vent, suivant la méthode ASHRAE et de l'exposition des façades, pour une différence de température intérieur-extérieur de 10°C (van Moeseke 2004).



Débits d'infiltration selon la méthode ASHRAE pour différentes vitesses de vent et différentes expositions (van Moeseke 2004).

Nous voyons une influence du nombre d'étages (augmentation de l'effet cheminée), mais surtout le rôle prépondérant du contexte construit autour du bâtiment. Si nous considérons un taux d'infiltration de 0.7 m³/hm² pour un bâtiment de deux étages abrité pour un vent de 4 m/s, et que nous voyons ce taux passer à 1.1 m³/hm² si le bâtiment est exposé au vent, nous avons vite fait de conclure que la demande d'énergie liée aux pertes par infiltrations peut être augmentée de 60% ou diminuée de 40% selon le type d'environnement.

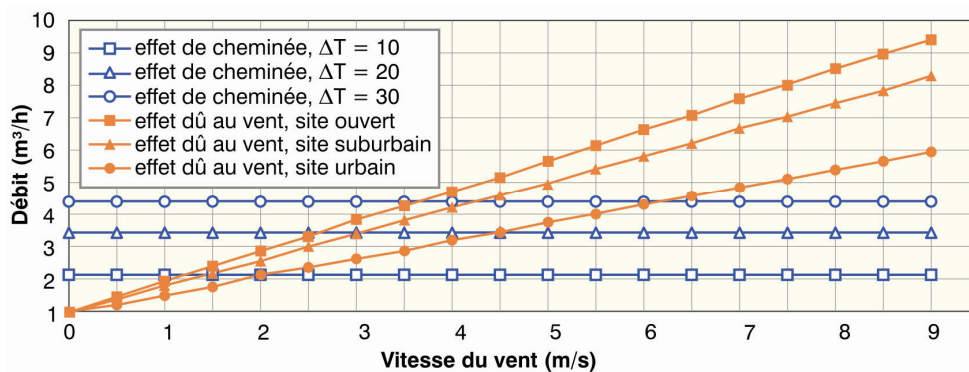
Les valeurs de consommation pour un bâtiment de bureau contemporain en site ouvert, de 15m * 50m au sol et de cinq niveaux, bien isolé et présentant une bonne étanchéité sont typiquement de l'ordre de 10 000 kWh. En supposant que ce bâtiment se trouve en fait en site urbain, le besoin d'énergie ne serait plus que de 6 000 kWh. La différence n'est pas négligeable, vu que les autres besoins de ce bâtiment type seraient de 128 000 kWh pour les pertes par transmission et 56 000 kWh pour la ventilation naturelle. Ainsi, le fait de placer ce bâtiment de bureau type dans un environnement urbain permet de gagner 4000 kWh sur les infiltrations, ce qui correspond à 2 % du besoin global d'énergie de chauffage de ce bâtiment. Pour un bâtiment peu étanche à l'air, ce calcul montre que le contexte urbain permet de gagner 120 000 kWh, ce qui est évidemment énorme et représente dans ce cas 25% du besoin global d'énergie de chauffage de cet immeuble peut étanche à l'air.

La ventilation naturelle des bâtiments dépend à la fois de la vitesse du vent et de la différence de température entre l'environnement intérieur et extérieur. Concevoir des bâtiments ventilés naturellement en ville nécessite donc de prendre en compte précisément les vitesses de vent dans les canyons urbains (et pas les valeurs météorologiques habituelles collectées en espace ouvert) ainsi que les différences de température réelle de l'air à l'extérieur entre le jour et la nuit, également moins favorables en ville qu'à la campagne.

Le graphe suivant permet de comparer les débits de ventilation naturelle induits par l'effet de cheminée et par le vent pour différentes vitesses de vent et pour trois types d'environnements bâtis : un site ouvert, un site suburbain et un site urbain. En utilisant différentes valeurs de différences de pressions (1, 0.75, 0.35 pour les environnements ouvert, suburbain et urbain), nous pouvons dessiner le graphe ci-dessous, pour une ouverture de fenêtre de 2m, en supposant que le débit à travers l'ouverture est donné par la relation empirique simple :

$$q = 0.6A\Delta p^{0.5}$$

Les hypothèses de calcul sont la présence d'ouvertures sur des façades opposées, ces façades ouvrantes sont perpendiculaire à l'orientation du vent et aucune perte de charges ne se produit à l'intérieur du bâtiment.



Comparaison des débits intérieurs induits par l'effet cheminée et l'effet du vent pour différentes vitesses de vent extérieur (Gratia & De Herde 2006)

Pour des vitesses de vent faible, la différence de température est le moteur principal de la ventilation naturelle. Par contre, lorsque la vitesse du vent augmente, celle-ci devient très rapidement prioritaire. Nous observons que l'effet du vent sera supérieur à celui de l'effet de cheminée au-delà d'une vitesse dépendant de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment et de l'environnement construit. Cette vitesse est comprise entre 1 et 6 m/s. Les deux effets pourraient donc avoir sous le climat belge une influence du même ordre, selon les circonstances.

Notons que la moyenne annuelle de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur en Belgique est de 10K. Pour cette valeur, en milieu urbain, l'effet du vent prédomine sur l'effet de cheminée à partir d'une vitesse de vent supérieure à 2m/s, ce qui est largement en-dessous de la vitesse moyenne du vent en Belgique. Toutefois, vu les hypothèses prises et le fait que les vitesses de l'air dans les rues urbaines sont généralement inférieures à 1m/s, on peut estimer qu'il est probable que l'effet de cheminée soit prépondérant en milieu urbain.

Notons au passage que ce graphe a été élaboré pour des différences de températures et non pour des températures moyennes extérieures. Ce choix est très important parce que les villes offrent généralement un effet d'îlot de chaleur qui ne permettrait pas de représenter simultanément sur le même graphe les environnements ouverts et urbains avec une même échelle absolue de température.

E. Gratia et I. Bruyère ont analysé, à l'aide de simulations thermiques réalisées avec le logiciel TAS, les potentialités d'un refroidissement naturel efficace pour un bâtiment de bureau situé en milieu urbain, pour les conditions climatiques d'une journée chaude type en Belgique. Les résultats de cette étude sont les suivants (Gratia & al. 2004):

- pour un bâtiment abrité du vent, une ventilation unilatérale s'établit. Elle atteint le niveau recherché de 4 renouvellements d'air par heure (suffisant pour un refroidissement, sans être dérangent pour l'occupant) avec une ouverture de la fenêtre extérieure de 60 dm² et une ouverture intérieure (porte ou fenêtre haute) vers les locaux de la façade d'en face de 132 dm².
- pour un bâtiment non abrité avec une incidence de 0°, une ventilation traversante s'établit. Avec une ouverture de la fenêtre extérieure de 3.6 dm², le taux de renouvellement d'air vaut 5 à 6 volumes/heure.
- pour un bâtiment non abrité avec une incidence du vent de 90°, une ventilation unilatérale apparaît. Une ouverture de la fenêtre supérieure de 60 dm² est nécessaire pour obtenir des taux de renouvellement allant de 3.5 volumes/heure au 5ème niveau jusqu'à 6.5 volumes / heure pour le rez-de-chaussée.

Pour éviter les influences des variations météorologiques d'un jour à l'autre, ces simulations sont basées sur une journée chaude type où la température extérieure évolue entre 11.4°C et 23.3°C, la radiation solaire globale est importante et le vent est fixé constant toute la journée à 4 m/s.

La facilité avec laquelle, en Belgique, une ventilation traversante peut s'installer même en ville a été confirmée par Geoffrey van Moeseke qui a approfondi l'étude de Gratia et Bruyère en se basant sur des répartitions de pressions plus réalistes sur les différentes façades d'un bâtiment en milieu urbain (van Moeseke & al. 2005). Il faut toutefois rappeler que les conditions de densité et de proximité telles que les conclusions de cette recherche restent applicables correspondent à des sites urbains où un rapport entre la largeur et la hauteur des rues vaut $W/H = 1.5$.

Par ailleurs, les effets de l'orientation du vent et de la densité du bâti sur la ventilation naturelle d'un bâtiment ne sont pas du même ordre. Par rapport à une situation de départ en terrain ouvert, un changement de densité va globalement réduire les débits mais ne modifiera pas les flux de manière qualitative. Inversement, un changement d'orientation du vent va avoir des effets considérables sur les mouvements de l'air, mais ne modifiera que peu les taux moyens de renouvellement de l'air. (van Moeseke & al. 2005)

Une quantification de cette réduction des débits de renouvellement de l'air en fonction du type de rugosité du terrain a été réalisée par le Florida Solar Energy Center (Chandra & al. 1983). Cette équipe de recherche propose deux facteurs de correction pour tenir compte du changement de débit en fonction de la localisation du bâtiment. Le premier facteur est le « Terrain Correction Factor (TCF) » qui prend en compte la rugosité du terrain. Le second facteur est le « Neighbourhood Correction Factor (NCF) » qui permet de tenir compte de l'influence des bâtiments voisins dans le cas d'un site suburbain ou urbain. Ce deuxième facteur est donné en fonction du rapport W/H où H est la hauteur moyenne des bâtiments situés du côté au vent du bâtiment analysé.

Dans le cas d'un site ouvert ou rural, le taux de renouvellement de l'air peut-être calculé en multipliant le débit d'air nécessaire pour un même bâtiment situé à la station météorologique par le facteur TCF, en fonction du type de ventilation choisi (nocturne ou sur 24h.). Dans le cas d'un site urbain ou suburbain, le taux de renouvellement de l'air peut être calculé en multipliant le débit d'air nécessaire pour un même bâtiment situé à la station météorologique par les facteurs TCF et NCF. Les valeurs chiffrées de ces facteurs sont donnés dans les tableaux ci-dessous (Chandra & al. 1983).

Terrain Correction Factor (TCF)		
Type de terrain	TCF pour 24h. de ventilation	TCF pour une ventilation uniquement nocturne
Mer ou grande étendue d'eau	1.3	0.98
Etendue dégagée avec peu d'obstacles, aéroports	1	0.75
Terrain rural	0.85	0.64
Terrain suburbain ou industriel	0.67	0.5
Centre d'une grande ville	0.47	0.35

Neighbourhood Correction Factor (NCF)	
Rapport W/H	NCF
1	0.41
2	0.63
3	0.77
4	0.85
5	0.93
6	1

Des expériences ont été réalisées in situ dans deux rues très étroites à Athènes pendant l'été 2002. Ces expériences montrent que malgré l'effet de canyon étroit, la ventilation naturelle des bâtiments reste un outil très utile, spécialement lorsqu'il est possible de créer une ventilation transversale. Le rapport H/W des rues étudiées est de 1.4 et 2.6. Les débits d'infiltration varient de 0.25 h^{-1} à 0.5 h^{-1} . Une ventilation naturelle assurée par une seule fenêtre est comprise entre 1.4 h^{-1} et 6.3 h^{-1} pour tous les appartements avec une valeur moyenne de 3 à 4 h^{-1} . Une ventilation unilatérale mais avec deux fenêtres ouvertes du même côté donne un débit d'environ 6 h^{-1} . Dans le cas d'une ventilation naturelle traversante par deux fenêtres ou plus, le débit moyen atteint $11-12 \text{ h}^{-1}$, même pour des périodes où la vitesse de l'air ambiant était faible (de l'ordre de 0.5 m/s ou moins). La ventilation mécanique se situe entre 3 h^{-1} et 9 h^{-1} pour tous les bâtiments. (Niachou & al. 2005)

De cette étude, on peut tirer les conséquences suivantes (Niachou & al. 2005) :

- La ventilation naturelle reste un moyen de refroidissement des bâtiments très efficace malgré l'effet de canyon urbain.
- Même sous des conditions de vent très faibles (inférieures à 0.2 m/s dans le canyon), la ventilation naturelle n'est pas inexistante à cause de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.
- La ventilation naturelle est nettement plus efficace quand on peut ouvrir deux fenêtres plutôt qu'une. La ventilation traversante qui relie deux façades opposées est encore plus efficace que la ventilation transversale entre deux fenêtres situées sur la même façade.
- La ventilation hybride offre des débits plus faibles que la ventilation naturelle traversante mais supérieurs à ceux d'une ventilation naturelle par une fenêtre ou sous des conditions sans vent.

Pour améliorer la ventilation naturelle dans des centres urbains très denses, les techniques des cheminées solaires (ex : le bâtiment du BRE) et des tours de ventilation (ex : IVEG) peuvent contribuer à accroître significativement le flux d'air naturel à travers les bâtiments.



Cheminées solaire du BRE
(Photos : S. Reiter).



Tours de ventilation du bâtiment IVEG

Vu la facilité avec laquelle, en climat tempéré, une ventilation traversante peut s'installer même en ville et le rôle non négligeable du vent sur l'augmentation des déperditions par infiltration. Nous en concluons qu'il n'est pas utile sous notre climat de rechercher à tout pris les implantations les plus venteuses pour assurer une bonne ventilation naturelle des bâtiments, d'autant plus que la ventilation naturelle des bâtiments peut fonctionner même sans vent par effet thermique. Ainsi, une implantation des bâtiments en zone urbaine réduit de manière évidente les déperditions par infiltrations sans compromettre l'utilisation du refroidissement naturel.

Il existe toutefois deux bémols à l'utilisation de la ventilation naturelle des bâtiments en ville : la pollution de l'air extérieur et les niveaux de bruit importants dans les espaces publics urbains. Afin de pouvoir refroidir un bâtiment à l'aide d'une ventilation naturelle intensive, le bruit extérieur ne peut pas être gênant et la pollution extérieure doit être réduite. Lorsque les niveaux de pollution atmosphérique ou sonore sont trop importants, il s'avère généralement nécessaire de ventiler le bâtiment en utilisant un système de ventilation mécanique qui prend l'air à l'extérieur et le traite avant de l'envoyer vers les locaux et même parfois d'utiliser un système de climatisation additionnel pour refroidir les locaux. Une ventilation naturelle de nuit peut éventuellement éviter le problème de l'acoustique mais ne supprime pas la nécessité d'une qualité de l'air suffisante.

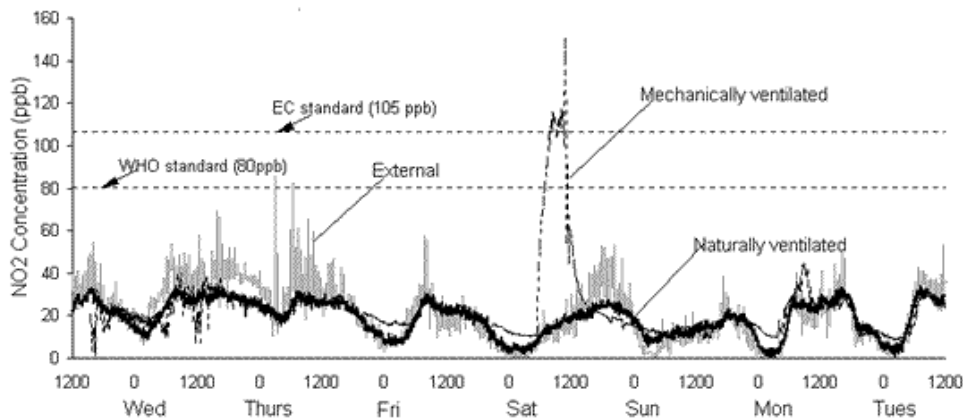
Réduire la pollution (atmosphérique et sonore) de nos urbanisations est un des éléments indispensable pour développer des systèmes de ventilation et de refroidissement naturels efficaces pour des bâtiments situés en site urbain. Toutefois, la pollution atmosphérique urbaine sert souvent, à tort, d'argument pour choisir un système HVAC plutôt qu'un refroidissement naturel des bâtiments situés en site urbain.

Le BRE a réalisé une étude pilote d'une semaine pour tester les niveaux de pollution intérieur et extérieur d'un bâtiment ventilé naturellement et d'un bâtiment ventilé mécaniquement, situés l'un près de l'autre le long d'une route à fort trafic au centre de Birmingham en Angleterre (Kukadia 1997). Les deux bâtiments étudiés sont des immeubles de bureaux présentant une occupation variable et des

activités de bureau classiques, avec une réglementation non fumeur en vigueur et aucune source interne de pollution significative.

Les observations suivantes ont été tirées de cette étude du BRE (Kukadia 1997):

- La qualité de l'air intérieur des deux bâtiments suit la tendance définie par la qualité de l'air extérieur auquel ils sont exposés. Cependant, les concentrations de polluants sont atténuées à l'intérieur des bâtiments et les pics des niveaux de concentration instationnaires mesurés à l'extérieur sont environ le double de celles mesurées à l'intérieur.
- La concentration moyenne journalière des polluants mesurée dans les deux bâtiments sur la même période d'occupation d'une semaine n'a jamais dépassé les normes établies pour la santé des occupants. Cependant, en ce qui concerne le NO₂, les valeurs guides ont été dépassées pendant le week-end pour le bâtiment ventilé mécaniquement. Cet incident illustre les dangers potentiels d'une contamination entre les prises d'air pour la ventilation d'un bâtiment et les sorties d'air vicié. Le schéma ci-dessous (Kukadia 1997) montre l'évolution des concentrations de NO₂ pendant cette semaine, à l'extérieur et à l'intérieur de chacun des deux bâtiments.



(Kukadia 1997).

Un autre type de problème est la protection par rapport à la pollution sonore. Le niveau sonore, tant au niveau des rues qu'en intérieur d'îlot, influence la possibilité de ventilation naturelle en milieu urbain. Il est donc important de placer les entrées d'air du côté le plus calme du bâtiment ou bien placer les zones les plus sensibles du point de vue sonore de ce côté.

Le niveau d'atténuation du bruit à travers une fenêtre ouverte est de 10 à 15 dB ; 3 à 5 dB supplémentaires peuvent être gagnés en utilisant des ouvertures spécialement adaptées (Nicol & Wilson 2004). Une grille de ventilation réduit généralement la performance acoustique d'un double-vitrage à celle d'un vitrage simple (Littlefair & al. 2000). En général, on considère qu'un niveau de 50dB est acceptable pour un bureau. Donc, un niveau sonore extérieur de 60-65 dB maximum devrait être favorisé afin de pouvoir assurer le confort acoustique nécessaire pour utiliser et favoriser le refroidissement naturel en ville. Notons enfin que l'atténuation du niveau sonore augmente avec la hauteur de la fenêtre par rapport au niveau de la rue mais diminue lorsque la largeur de la rue augmente (Nicol & Wilson 2004).

Evaluer les mouvements d'air en zone urbaine

Il est tout de suite évident qu'une évaluation quantitative du vent en un site est une tâche très complexe. On ne peut jamais négliger le type de contexte local. Dans certains cas, comme au pied d'un bâtiment élevé, une situation locale peut être totalement différente du macroclimat de la région.

En général, toutes les méthodes d'évaluation du vent au niveau local consistent à déterminer un rapport de recalage entre les statistiques du vent à la station météorologique la plus proche et le vent qui aura lieu en moyenne sur le site considéré. Il s'agit donc d'un facteur propre à chaque site qui dépend à la fois de la topographie locale, de la rugosité du sol, de la présence et des dimensions des obstacles (bâtiments, arbres,...) ainsi que de la hauteur d'évaluation de la vitesse du vent au niveau du site étudié. En réalité, il est souvent nécessaire d'établir différents rapports de recalage entre les données statistiques météorologiques et les caractéristiques du vent en un endroit spécifique en fonction des différents types de terrains et des obstacles qui entourent le lieu considéré. En général, on définit un certain nombre de secteurs angulaires qui présentent des caractéristiques similaires et on détermine ensuite un rapport de recalage basé sur les valeurs moyennes pour les hauteurs d'obstacles, la rugosité du terrain et sa pente sur chacun de ces secteurs d'orientation. Quand l'environnement est trop complexe, on peut choisir une division théorique en seize orientations (N, NNE, NE,...). Dans le cas d'un espace très homogène, bien entendu, ces secteurs doivent être regroupés pour le calcul. Ainsi, le cas d'un terrain bordé d'un seul bâtiment isolé peut être divisé en deux secteurs : le terrain dégagé d'un côté et le bâtiment de l'autre.

Ces méthodes sont de quatre types :

- les mesures sur site,
- les tests en tunnel à vent,
- les simulations CFD (Computational Fluid Dynamics),
- Les outils simplifiés.

1/ Les mesures sur site

Les mesures sur site servent à procéder à un 'recalage' des données météorologiques d'une station par rapport aux valeurs attendues sur le site du projet. En comparant les valeurs mesurées en un moment donné à la station météorologique et les valeurs mesurées simultanément sur le site, on établit une relation entre les données météorologiques et les caractéristiques du vent sur le site en termes de vitesses et de directions du vent.

Les mesures peuvent être réalisées à l'aide d'un anémomètre à ultrasons qui donnera les valeurs de vitesse et de direction du vent dans les trois dimensions. De tels appareils sont assez simples à utiliser et connectables à un modem ou à un ordinateur à distance. On peut aussi, si le site est plus complexe, disposer plusieurs anémomètres classiques munis d'une girouette pour un faible coût.

Une étude de recalage suffisamment précise nécessite en général deux mois de mesures. Un recalage complet prendrait beaucoup plus longtemps puisqu'il faut attendre d'avoir parcouru tous les types de vents en termes d'orientation. Mais même incomplet, le recalage est d'une grande utilité, car il permet d'approcher de manière plus juste la réalité physique du site.

Les valeurs mesurées par le recalage peuvent judicieusement confirmer ou affiner les mesures théoriques du profil de vitesse ; de plus, le recalage donne aussi des informations sur les variations de direction du vent dues à l'influence de la topographie et de l'environnement du site.

Les mesures sur le site ont l'avantage que les résultats obtenus sont ceux d'une situation réelle, où l'influence de tous les immeubles et des obstacles présents sont inclus. Cette méthode d'évaluation permet d'obtenir les valeurs du vent sur un site déjà construit mais ne suffit malheureusement pas à évaluer l'impact d'un projet non encore construit ou la transformation d'une configuration existante sur les caractéristiques de vent locales ni de juger des qualités liées au vent au sein d'un projet d'espace public ou de quartier en phase de conception. Les mesures sur site sont donc peu utiles aux concepteurs de projets d'architecture et d'urbanisme et leur servent uniquement en cas d'intervention de petite dimension dans un tissu déjà construit ou bien pour faciliter la précision d'évaluation des autres méthodes décrites ci-dessous.

2/ Les tests en tunnel à vent

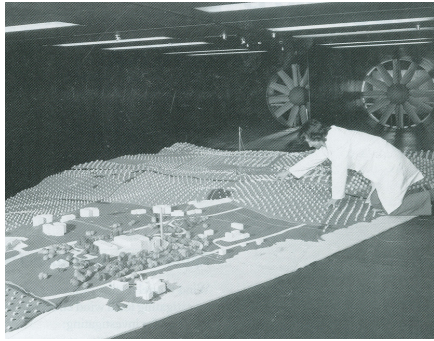
Les études en soufflerie sont les plus courantes. Les tests en soufflerie ont l'avantage que des résultats fiables peuvent être obtenus pour un grand nombre de combinaisons de vitesses et de directions du vent pour la même maquette. Il est également possible de tester en soufflerie aérodynamique le confort au vent généré dans un projet en stade de la planification. Mais les essais en soufflerie sont très onéreux et représentent donc un coût important s'il faut en réaliser plusieurs. La complexité de l'essai et le traitement des données d'un test en soufflerie nécessitent l'intervention d'un spécialiste et l'accès à une soufflerie. De plus, ils demandent un temps important. C'est pourquoi, les concepteurs de projets les utilisent généralement uniquement en dernière phase du projet dans les cas de risques importants liés au vent. Ainsi, les souffleries aérodynamiques ne servent pas en pratique d'outils d'aide à la conception pendant le processus d'élaboration du projet mais plutôt d'instrument de recherche et de méthode d'étude du vent par rapport à un projet finalisé ou une situation existante problématique.

Les photos ci-dessous montrent une soufflerie aérodynamique.

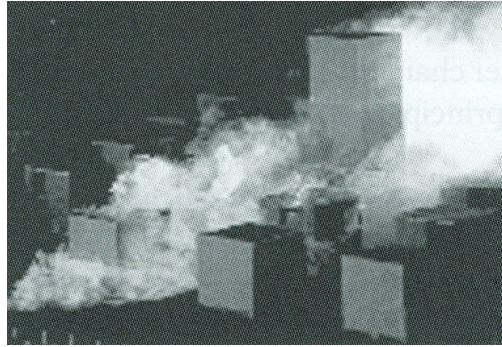


Les résultats des tests en soufflerie sont validés depuis longtemps par rapport à des cas réels et sont donc considérés comme donnant des valeurs quantitatives très représentatives des situations réelles.

Les photos ci-dessous montrent un modèle réduit placé en tunnel à vent (à gauche) et la visualisation de l'écoulement du vent dans un contexte construit à l'aide d'un test de fumée (à droite).



(Littlefair & al. 2000).



(Littlefair & al. 2000).

3/ Les simulations CFD (Computational Fluid Dynamics)

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 que n'importe laquelle des combinaisons de vitesses et de directions du vent et de configuration de l'espace et des environs peuvent être évaluées.

Cependant, les calculs impliquent des ressources informatiques importantes et il est nécessaire que l'utilisateur de ces logiciels soit expérimenté et qu'il comprenne bien cette problématique complexe de la circulation d'air. L'utilisation de logiciels de mécanique des fluides est impossible pour un architecte non initié à la mécanique des fluides et nécessite donc l'intervention de spécialistes. De plus, la validation de ces logiciels par rapport à l'étude des mouvements d'air autour des bâtiments doit encore être réalisée car il s'agit d'outils développés au départ pour l'industrie spatiale. Ainsi, la nécessaire discrétisation spatiale, l'imposition des conditions aux limites et le choix de la méthode de résolution nécessitent une étude préalable avant de se lancer dans les simulations CFD. Rappelons que ces outils informatiques de modélisation du vent sont des technologies récentes : c'est seulement depuis une décennie que les modèles informatiques permettent d'envisager des modélisations du vent autour des bâtiments par CFD.

Les éléments les plus limitatifs des simulations CFD sont les suivants :

- la précision nécessaire cause parfois problème lorsque le cas étudié est géométriquement complexe. En effet, pour pouvoir capter efficacement l'influence de certains détails architecturaux, un raffinement important du maillage est nécessaire, ce qui alourdit rapidement le calcul et le rend parfois impossible à réaliser avec nos ordinateurs actuels. Le même problème s'impose lorsqu'on désire modéliser l'ensemble d'un quartier.
- les mouvements d'air autour des bâtiments génèrent des flux d'air turbulent complexes. Il n'y a malheureusement pas pour l'instant de modèle de turbulence universellement admis qui réponde de manière optimale à toutes les conditions aérauliques présentes autour des bâtiments.
- les conditions aux limites pour l'étude du confort au vent sont généralement considérées comme stationnaires, ce qui facilite largement les simulations CFD. Malheureusement, pour l'étude de la dispersion des polluants il est idéalement nécessaire d'évaluer les concentrations moyennes et fluctuantes en fonction du temps. Les calculs CFD instationnaires sont encore très lourds à l'heure actuelle.

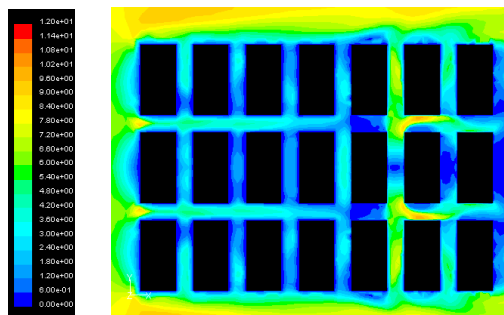
Les avantages des simulations CFD par rapport aux résultats de tests en tunnel à vent sont :

- la relative rapidité des simulations numériques par rapports à des essais en soufflerie aérodynamique,
- le traitement des résultats sur l'ensemble du domaine simulé. En effet, le modèle CFD fournit des données détaillées sur le flux de vent à chaque localisation, alors que dans des tunnels à vent, les données mesurées sont limitées en général à 20 points. De plus, un inconvénient supplémentaire des tests en tunnel à vent est qu'on doit donc déterminer au préalable quelles grandeurs doivent être mesurées à quel endroit de la maquette.
- la clarté de la visualisation des mouvements d'air qui en font un outil de compréhension et de présentation des résultats remarquable. Bien sûr, on peut aussi visualiser l'écoulement du vent par le biais d'un essai d'érosion de grain ou au moyen de fumée dans les essais en tunnel à vent. Mais les photos qui en sont tirées sont beaucoup moins précises et compréhensibles qu'une simulation CFD. En effet, les simulations CFD offrent des images complètes de tous les aspects de l'écoulement (pressions, vitesses,...) aussi bien en coupe qu'en plan et à n'importe quel endroit du champ d'écoulement.
- la CFD est un outil de pointe récent mais qui s'améliore d'année en année.
- contrairement aux tests en tunnel à vent, les simulations CFD ne nécessitent aucune réduction d'échelle, ce qui élimine donc certaines erreurs due à la réduction des géométries complexes ou aux facteurs d'échelle employés.

Selon Bottema, de nombreux tunnels à vent prédisent les vitesses de vent moyennes avec une erreur standard relative de 10 à 15%, alors que les simulations informatiques donnent une précision de 20% sur les vitesses moyennes du vent. D'autre part, il faut souligner que les simulations des vitesses de vent maximales (c'est-à-dire les plus critiques pour le confort humain) sont toujours plus proches de la réalité que celles des valeurs moyennes parce que ces zones sont moins sensibles à la complexité de l'environnement bâti.

Au vu de ces conclusions, nous avons estimé que l'outil informatique s'avère être l'instrument de recherche le plus judicieux pour développer des outils simplifiés d'aide à la conception architecturale et urbaine en rapport au vent. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser les modèles de simulation CFD pour l'étude paramétrique des mouvements d'air autour des bâtiments qui sera réalisée dans le cadre de cette thèse doctorale.

Le graphe ci-dessous montre le résultat d'une simulation réalisée à l'aide du logiciel FLUENT de l'écoulement du vent autour d'un bâtiment élevé au milieu d'un tissu homogène de hauteur peu élevée. La gamme des vitesses de l'air sont présentées du bleu (vitesses très faibles) au rouge (vitesses très élevées).



4/ Les outils simplifiés

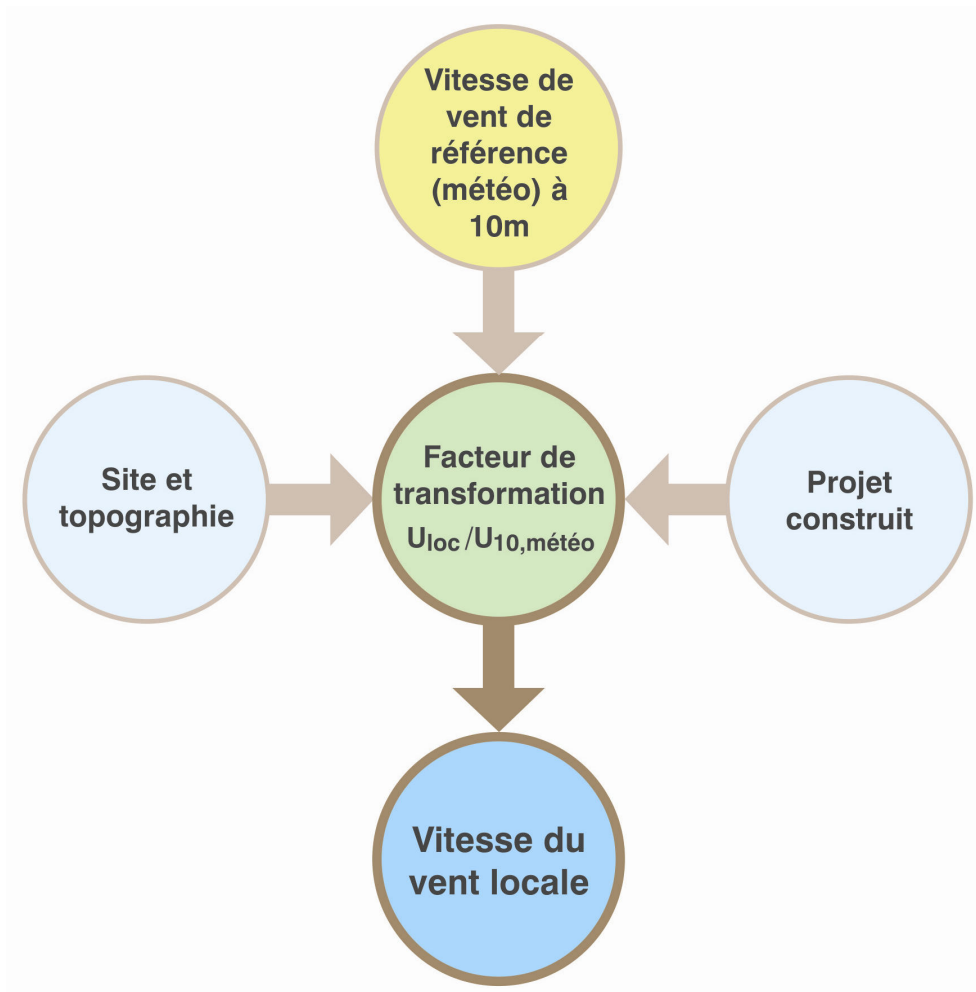
Nous constatons que la prise en compte du phénomène vent pour les projets architecturaux et urbains est possible en termes de simulations ou de tests sur modèles réduits mais que de telles études sont rarement réalisées, en raison de leur coût et du temps d'investissement qu'elles demandent. De plus, ces outils sont encore moins utilisés dans la première phase de conception, alors que les décisions prises à ce premier stade (volumes, implantation) sont de la plus haute importance pour l'influence du vent au niveau piéton. C'est donc à ce stade de conception que nous désirons proposer une nouvelle alternative.

L'architecte qui dessine son plan masse prend un grand nombre de décisions successives. Les mesures sur site, les essais en soufflerie et les simulations à l'aide de logiciels de mécanique des fluides n'apportent pas une aide applicable durant les premiers stades du projet. Les premières esquisses et les premiers volumes dessinés, les architectes ont besoin d'un outil pour évaluer les choix de base de leurs projets, afin d'aboutir à des avant-projets de haute qualité environnementale. Un outil de prédétermination du comportement du vent en site urbain est donc nécessaire dans une première phase du projet.

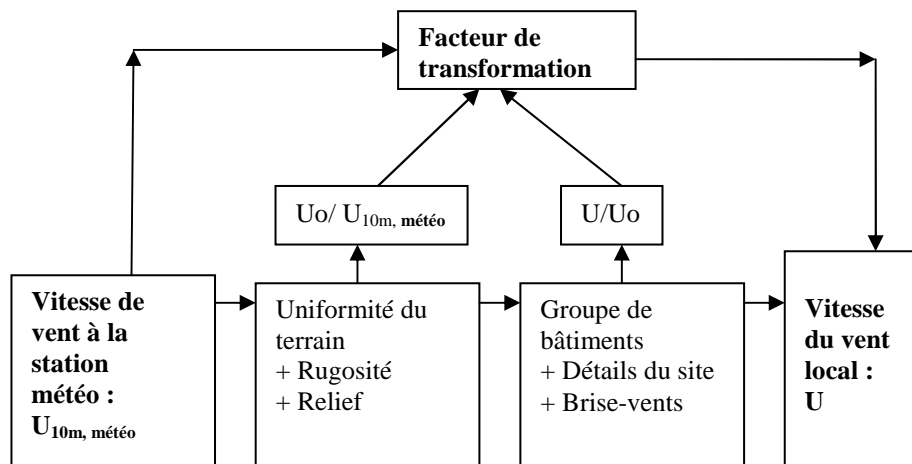
Des outils simplifiés pour évaluer rapidement les caractéristiques du vent sur un site construit à partir des statistiques météorologiques et des caractéristiques géométriques du projet sont pratiquement inexistantes. Citons toutefois des précurseurs dans ce domaine : J. Gandemer, A D. Penwarden, A. F. E. Wise qui ont posé les bases de la classification des écoulements du vent autour des bâtiments (Gandemer 1975 ; Penwarden & Wise 1975) et T. R. Oke, qui a déterminé les trois types de flux d'air rencontrés dans les milieux urbains denses pour des bâtiments de petites hauteurs relativement homogènes (Oke 1988). Ces études élaborées à partir de tests en tunnel à vent ont permis d'avoir une meilleure compréhension globale des mouvements d'air autour des bâtiments mais les valeurs quantitatives qui sont données pour évaluer les vitesses du vent sont très approximatives et ne permettent pas de réaliser un calcul des risques d'inconfort au niveau des piétons de manière suffisamment précise.

Nous avons donc décidé d'élaborer dans cette thèse doctorale des outils quantitatifs pour permettre aux concepteurs de prendre en compte les implications mutuelles des paramètres locaux du vent et des caractéristiques géométriques de leur projet architectural ou urbain, pour évaluer les conditions de confort au vent des piétons dans les espaces publics. Ces outils ont été développés à partir de simulations réalisées à l'aide du logiciel FLUENT, après avoir validé cet outil par rapport à différents tests en tunnel à vent trouvés dans la littérature. La validation du logiciel FLUENT ainsi que le développement de ces outils graphiques quantitatifs et leur explication sont donnés dans le chapitre suivant. Toutefois, la méthode générale d'évaluation du vent au niveau piéton est détaillée ci-dessous.

La méthode proposée pour évaluer les vitesses du vent est synthétisée dans le schéma ci-dessous. Un facteur de transformation permet d'obtenir les vitesses locales du vent à partir des vitesses de l'air à la station météorologique la plus proche. Ce facteur de transformation dépend à la fois de la rugosité du terrain et de la topographie environnante ainsi que du contexte construit



Le schéma ci-dessous explique la décomposition de ce facteur de transformation en fonction des différentes échelles.



La **méthode d'évaluation du vent au niveau piéton** nécessite d'évaluer dans un premier temps l'influence de la rugosité du terrain et de la hauteur à laquelle le vent est étudié par rapport aux données de la station météorologique la plus proche.

Chaque terrain peut être décrit par une longueur de rugosité aérodynamique Z_0 et une longueur de déplacement Z_d . Ce dernier peut être interprété comme le déplacement vertical du flux d'air dû à la présence d'obstacles et de leurs sillages. La longueur de rugosité Z_0 représente une mesure de la taille des turbulences à la surface. Les valeurs de Z_0 et Z_d ne sont pas seulement dépendantes de la hauteur des obstacles mais aussi de leur espacement. Les valeurs de Z_0 intègrent les effets des caractéristiques aérodynamiques de l'environnement du site dans un rayon de l'ordre de 3km, parfois plus. Le profil vertical de la vitesse de vent en atmosphère thermiquement neutre n'est véritablement logarithmique qu'au-dessus d'une hauteur supérieure à $20 Z_0$.

Il convient cependant d'ajouter que si les obstacles disposés sur le site sont rapprochés les uns des autres, s'ils y occupent une surface supérieure à 25% de la surface totale et s'ils ont des hauteurs du même ordre, la valeur de la longueur de rugosité n'est plus z_0 mais $z = d + z_0$ où d est une hauteur de déplacement dont la valeur vaut 0.7 à 0.8 fois la hauteur des obstacles en question (ville ou végétation dense).

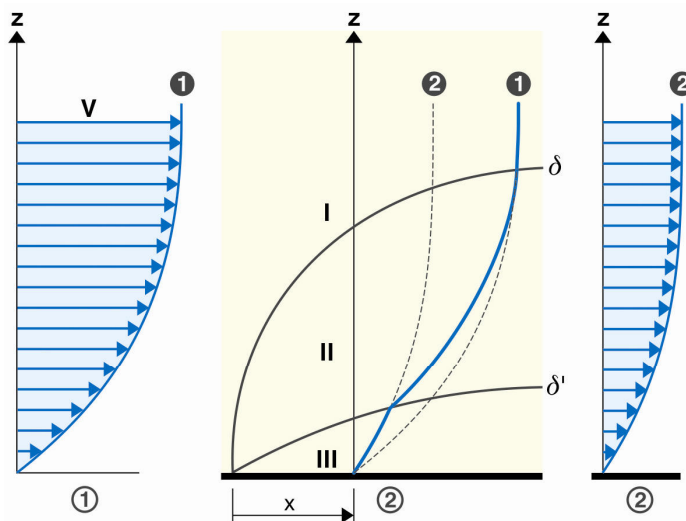
Après une analyse des valeurs de rugosité des terrains donnés dans la norme belge NBN B 03-002-1, par l'atlas européen du vent et par différentes publications scientifiques (Davenport 1960 ; Oke 1987 ; Wieringa 1992 ; Santamouris 1998), notre choix se porte sur la formule et le tableau ci-dessous afin de déterminer la vitesse du vent (U) en fonction du type de terrain (paramètres K et a) et de sa hauteur d'évaluation (Z) ainsi que de la vitesse du vent à la station météorologique la plus proche ($U_{10, \text{météo}}$). Toutes les simulations réalisées dans ce doctorat ont été effectuées avec le profil de vent urbain (bâti continu) sauf pour la validation de FLUENT où les profils utilisés dépendent des études par rapport auxquelles mes simulations sont comparées.

$$U = K z^a U_{10\text{m,météo}}$$

Terrain	K	α	Z_0	d
Mer	0.7	0.14	0.005	0
Station météo ; terrain totalement dégagé	0.68	0.17	0.03	0
Campagne avec brise-vents	0.52	0.2	0.1	0.7h
Tissu suburbain	0.4	0.235	0.5	0.8h
Tissu urbain (bâti continu)	0.35	0.25	1	0.8h
Centre-ville très dense avec bâtiments très irréguliers	0.21	0.33	2.5	0.8h

La classe de rugosité à considérer est la classe la plus défavorable, correspondant au terrain le plus exposé au vent (c'est-à-dire le terrain décrit le plus haut dans le tableau ci-dessus) dans un rayon de 1 km autour de la construction, en négligeant toute zone ne couvrant pas plus de 10% du secteur angulaire (c.à.d. environ 80 000 m²). Toutefois, si dans un secteur angulaire, le bord de mer est situé à moins de 2km de la construction, on considère qu'on est dans un terrain de type « mer ». Des classes de rugosité différentes peuvent être définies pour différents secteurs angulaires si l'on désire une plus grande précision. Idéalement, la rugosité du terrain est prise en compte pour chaque secteur du site défini, ce qui modifie les valeurs de vent pour ces directions spécifiques.

S'il y a un changement de rugosité de terrain à un certain point, une nouvelle couche limite est initiée à ce point transitoire. Il y a des possibilités théoriques de traitement de ce phénomène mais qui sont très compliqués en pratique à appliquer. Les limites de rugosité sont habituellement graduelles ou intermittentes et donc difficiles à définir. Le graphe ci-dessous montre l'évolution du profil de vent qui passe d'une zone à rugosité faible vers une zone à rugosité forte.



① ② : profil vertical établi de la vitesse, avant et après le changement de rugosité

① ② : régions à faible et à forte rugosité

I, II, III : structure à trois couches de l'atmosphère après le changement de rugosité

Modification du profil de vent au passage d'une discontinuité de rugosité (Folcher 1990)

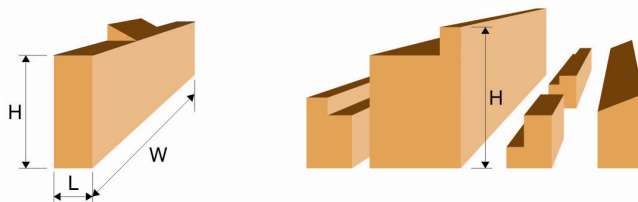
Pour simplifier cette difficulté dans nos calculs du vent, nous adoptons les trois hypothèses suivantes qui correspondent relativement bien aux modifications de profils de rugosité :

1/ A une distance inférieure ou égale à 500m par rapport à la zone de changement de rugosité, on estime que le profil de vent est identique à celui qui arrive juste avant la zone de changement.

2/ Au-delà de 500m après la modification de la rugosité de terrain, pour des bâtiments de hauteur raisonnable ($h \leq 40m$), le profil du vent correspond à la nouvelle rugosité rencontrée.

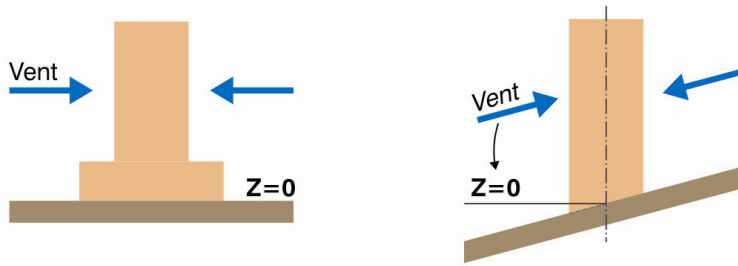
3/ Pour des bâtiments élevés : la rugosité de terrain considérée doit être celle qui se trouve à une distance égale à au moins 10 fois la hauteur de ce bâtiment dans la direction dont vient le vent.

Les bâtiments élevés sont définis par une hauteur H qui est au moins 50% supérieure à son entourage. Des détails tels que de petits penthouses ne sont pas pris en compte de la hauteur H générale.



(NBN B 03-002-1)

Le niveau de référence à considérer pour la détermination de la hauteur d'évaluation de la vitesse du vent est compté à partir du niveau moyen du sol ($z=0$) à l'emplacement de la construction (première figure ci-dessous).



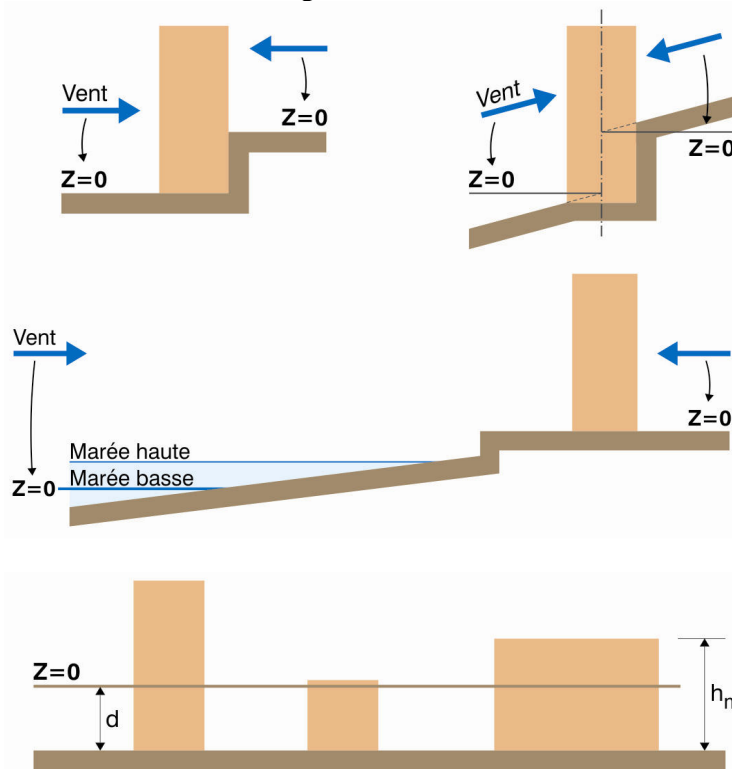
(NBN B 03-002-1)

Il y a toutefois trois exceptions à cette règle (figures suivantes) :

- une construction située au droit d'une discontinuité de la surface du terrain : pour chaque direction du vent, on détermine le niveau moyen du terrain dans le prolongement du secteur angulaire considéré.
- une construction située en bord de mer : si le niveau $z=0$ déterminé est le niveau de la mer, on considère celui de la marée basse.
- une construction située en zone de rugosité élevée (urbain): le niveau $z=0$ est situé à la hauteur d au-dessus du sol définie par la relation :

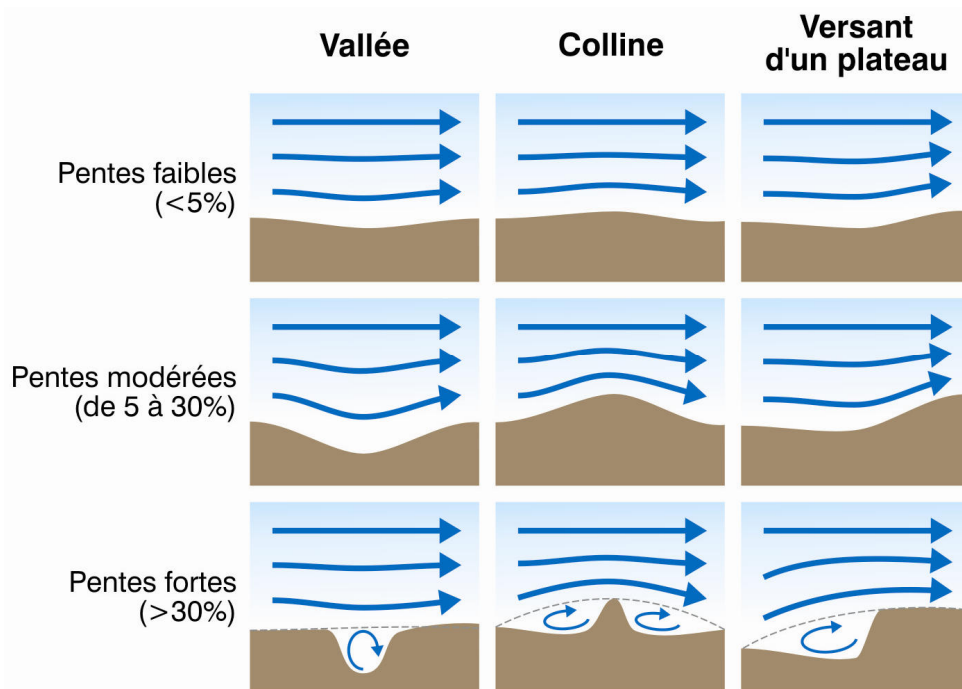
$$d = h - 4.3 Z_0 (1-a)$$

où h est la hauteur moyenne des constructions dans le secteur angulaire, Z_0 est le paramètre de rugosité du terrain et a est le rapport entre la surface construite et la surface totale du secteur angulaire. De manière simplifiée, le paramètre d est donné dans le tableau de la page précédente en fonction de la classe de rugosité du terrain.



(NBN B 03-002-1)

Pour évaluer l'influence de la **topographie** sur la vitesse du vent au niveau piéton, il faut suivre le calcul décrit ci-dessous. Si à proximité de la construction (à une distance inférieure à 500m), le terrain présente un relief accidenté (colline, versant d'un plateau, vallée), son influence doit être prise en compte par un facteur de site k_s . En effet, au voisinage de la crête d'une colline ou du versant d'un plateau, la vitesse du vent subit une accélération. Au fond d'une vallée ou au pied d'un versant escarpé, elle peut subir une décélération et, dans le cas de fortes pentes (>30%), une inversion de sens. Les graphes ci-dessous montrent le type d'écoulement du vent qui se produit lorsque le vent rencontre une colline ou une dépression du terrain.



(Hammoud 1986).

En Belgique, c'est essentiellement la présence des collines qui doit être prise en compte. La norme belge NBN B 03-002-1 donne une méthode simplifiée intéressante pour prendre en compte les effets de relief sur la vitesse du vent de manière précise. Nous décrivons ci-dessous cette méthode de calcul du facteur k_s qui détermine l'effet du relief sur la vitesse du vent.

Il y a trois cas différents à analyser différemment :

- la colline et le versant d'un plateau
- le fond d'une vallée
- les reliefs complexes

Signalons que la turbulence atmosphérique est aussi affectée par son passage au-dessus d'une colline ; mais que cet effet reste très faible et est donc généralement négligé.

1/La colline et le versant d'un plateau

Le facteur k_s se détermine en considérant la direction de la provenance du vent qui correspond à la plus grande pente (H/L) du versant au vent dans chaque secteur angulaire, H étant la hauteur de la crête par rapport au niveau bas et L la largeur du versant au vent. Lorsque le terrain en amont est accidenté, on considère que le

niveau bas est le niveau moyen du terrain sur une distance de 5km en amont de la crête de la colline en question.

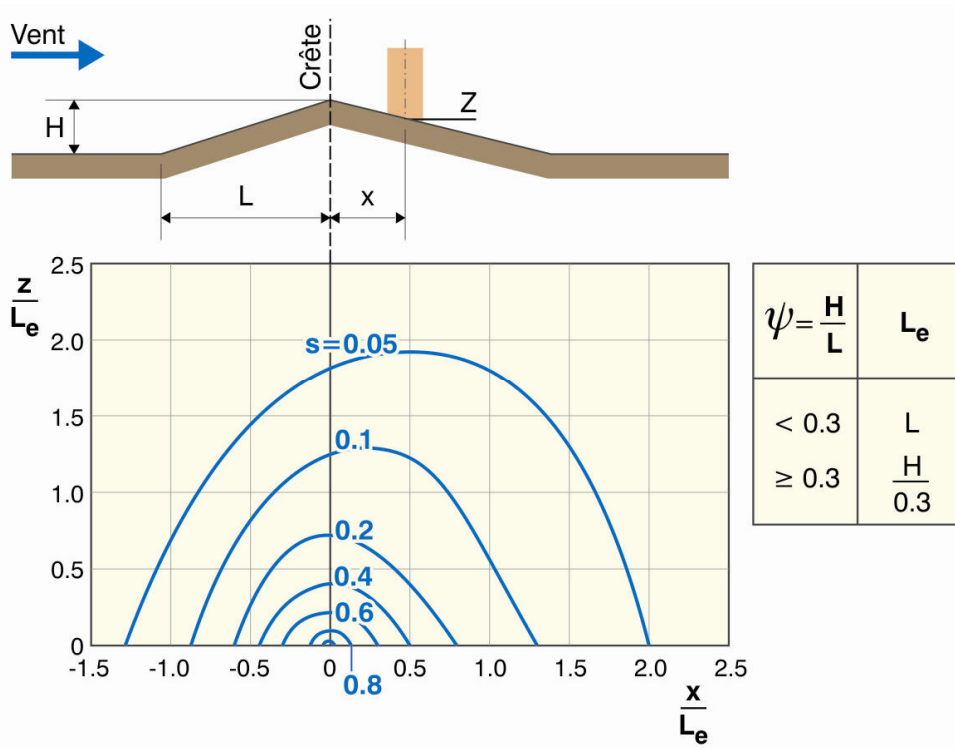
Le facteur k_s se définit alors comme suit :

- Si $H/L < 0.05$, $k_s=1$,
- Si H/L est compris entre 0.05 et 0.3, $k_s= 1+ (1.2 \times S \times H/L)$
- Si $H/L \geq 0.3$, $k_s= 1+ (0.36 \times S)$

Où S est un facteur dépendant de la localisation du point considéré en amont ou en aval de la crête. Il est donné dans les deux figures suivantes pour une colline et pour un versant de plateau respectivement. Le plateau est défini comme étant un relief dont la pente sous le vent est inférieure à 5% sur une distance supérieure à L et à $H/0.3$.

Notons que les survitesses sont plus fortes au-dessus des collines mais qu'elles se propagent sur une distance plus importante au-dessus des plateaux.

1a/ facteur k_s d'une colline

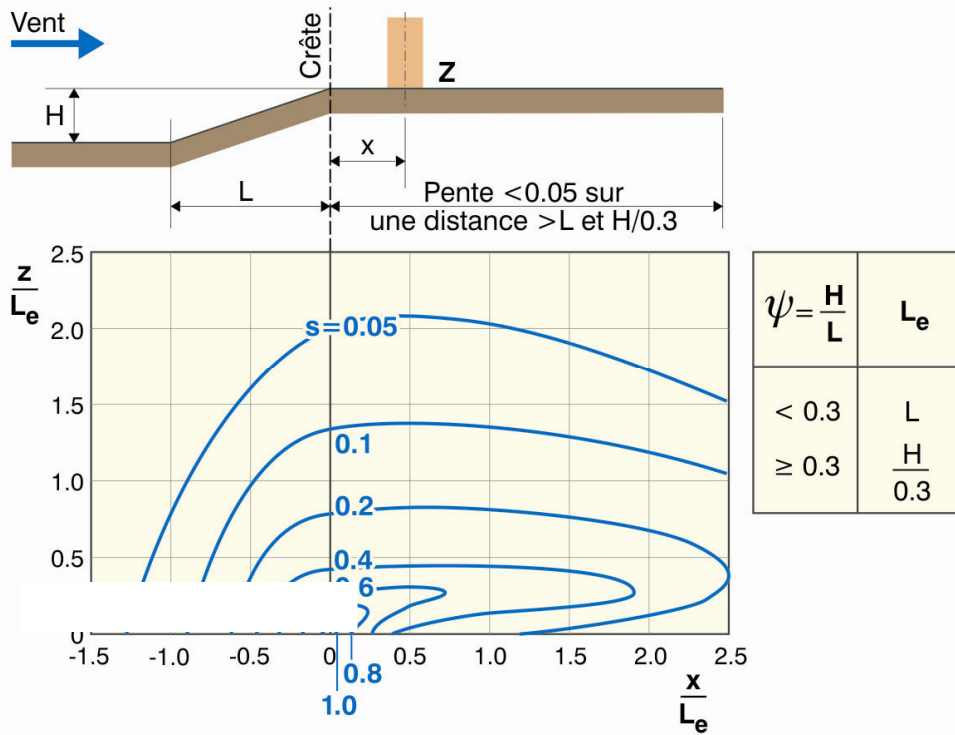


(NBN B 03-002-1)

Dans ce graphe, x et z définissent la distance horizontale et la distance verticale entre le point d'évaluation du vent et le sommet de la crête de la colline. L_e est un paramètre qui dépend du facteur H/L :

- Si $H/L < 0.3$, $L_e = L$
- Si $H/L \geq 0.3$, $L_e = H/0.3$.

1b/ facteur s d'un versant de plateau



(NBN B 03-002-1)

Dans ce graphe, x est la distance horizontale par rapport au sommet du versant du plateau et z est la distance verticale entre le point dévaluation du vent et la hauteur du sommet du versant du plateau. Le est un paramètre qui dépend du facteur H/L :

- Si $H/L < 0.3$, $L_e = L$
- Si $H/L \geq 0.3$, $L_e = H/0.3$.

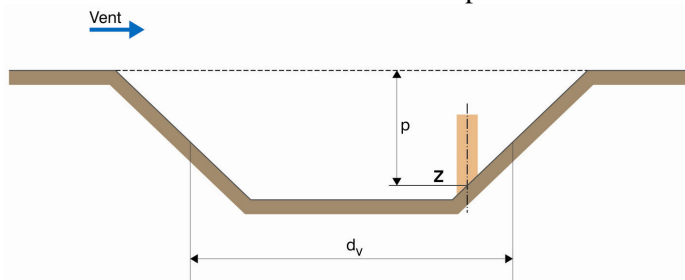
2/Le fond d'une vallée

Si la construction est située dans un **rétrécissement de vallée**, le vent soufflant dans l'axe de la vallée subit une accélération par effet Venturi et le facteur de site à considérer dans cette direction peut s'élever localement jusqu'à $ks=1.5$ dans les cas les plus défavorables en Belgique.

Dans tous les autres cas, au fond d'une vallée, le facteur de site ks se détermine comme suit en considérant la plus faible pente de chaque secteur angulaire :

- si $P-Z \geq 0.05 \times d_v$, $ks=0.9$
- si $P-Z < 0.05 \times d_v$, $ks=1$

où P est la profondeur de la vallée au point où le vent est évalué, Z est la hauteur du point considéré au-dessus du sol (à partir de la profondeur P) et d_v est la largeur de la vallée dans la direction du vent à mi-pente des versants.



(NBN B 03-002-1)

3/ Les reliefs complexes

Si le relief est complexe, il convient de recourir à l'avis de spécialistes et, au besoin, à des mesures anémométriques sur le terrain.

Pour évaluer l'**influence des bâtiments** sur la vitesse du vent au niveau piéton, il est nécessaire de se référer au chapitre suivant. Nous avons élaboré des outils quantitatifs simplifiés qui donnent le rapport U/U_0 pour différents types de bâtiments.

Pour une première approximation de l'**influence de la hauteur d'évaluation sur la vitesse du vent en milieu urbain en dessous des toits**, on peut se baser sur les outils quantitatifs développés dans cette thèse pour connaître le vent au niveau piéton, puis appliquer la formule ci-dessous. Dans la couche obstruée par des bâtiments ou de la végétation dense, les variations du vent avec la hauteur sont décrites par une loi exponentielle (Santamouris & al. 2001):

$$u = U_0 e^{\frac{z}{Z_0}}$$

où U_0 est la vitesse de vent de référence au niveau piéton (1.5m de haut), Z_0 est la longueur de rugosité dans la couche d'obstacles et z est la hauteur où la vitesse de vent U est définie.

Cette loi est cependant un modèle mathématique idéalisé et qui ne peut pas donner les valeurs exactes de la vitesse en un point de la ville due à la complexité du tissu urbain. Dans une recherche ultérieure, il serait intéressant de vérifier cette formule et de la compléter pour mieux prendre en compte la complexité du vent en milieu urbain.

Pour une plus grande précision, la rugosité aérodynamique Z_0 peut être calculée par l'expression proposée par Lettau et reprise par Santamouris : $z_0 = 0.5h(A/A')$, où h est la hauteur moyenne des bâtiments, A est la surface construite verticale (en profil), A' est la surface moyenne d'un îlot (surface de la zone urbaine divisée par le nombre d'îlots).

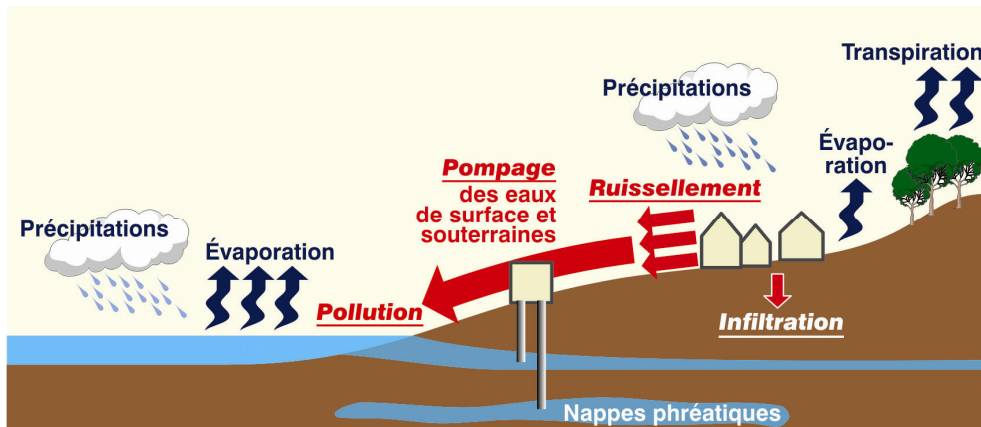
3.2.5 La modification des précipitations et de l'humidité en milieu urbain

Signalons d'abord que les surfaces imperméables réalisées par l'homme (toitures, asphalte, ...) réduisent l'infiltration des eaux de pluie dans le sol, limitent l'alimentation des nappes phréatiques et augmentent considérablement le ruissellement de surface et les risques d'inondations des surfaces situées en aval. Les agglomérations importantes qui ne tiennent pas compte du cycle de l'eau vont inévitablement subir les conséquences de leur manque de respect par rapport à la nature (inondations, crues,...).

D'autre part, la pollution de l'eau par les rejets fécaux et les rejets d'eaux usées domestiques ou industrielles transforme qualitativement le cycle hydrologique. Les molécules d'eau des nuages et des pluies traversant l'atmosphère se chargent également de la pollution de l'air. L'eau qui s'infiltré dans les sols entre en contact avec la pollution du sous-sol. L'eau est donc de plus en plus polluée. Ces pollutions attaquent irrémédiablement l'écosystème et la biodiversité locale et mondiale.

L'urbanisation étalée, qui caractérise notre mode de bâtir contemporain, augmente fortement les surfaces imperméables telles que les routes, les toitures, les parkings,... Cette imperméabilisation à outrance des sols naturels réduit encore, par rapport à une ville dense, la part de l'eau qui s'infiltrate dans le sol, amoindrit encore l'alimentation des précieuses nappes phréatiques, augmente l'érosion des sols naturels, accroît la fréquence et l'amplitude des inondations ainsi que le volume d'eau douce déversé dans les mers. L'eau douce mêlée à l'eau salée diminue la concentration en sel des océans, perturbe les courants marins et participe ainsi à la modification du climat global de la planète. **Il est donc indispensable de tenter de réduire les eaux de ruissellement dans tout environnement construit.**

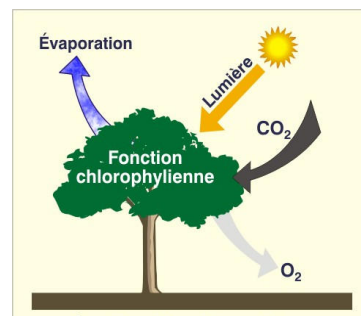
Le schéma ci-dessous donne le cycle réel de l'eau quand les hommes ont transformé et pollué l'environnement naturel.



La minéralisation des surfaces et la canalisation de l'eau souterraine ont également pour conséquence la diminution de l'humidité de l'air en ville. Ainsi, l'humidité est généralement inférieure dans les villes que dans les campagnes. L'humidité relative en milieu urbain est en moyenne de six pourcents inférieure aux données climatiques moyennes provenant des stations météorologiques (Landsberg 1981). Les plans d'eau et la végétation peuvent contribuer à accroître l'humidité localement.



Expo'92 à Séville (Littlefair & al. 2000)



On note une différence de 5% d'humidité relative entre un centre-ville et des quartiers longeant une bande de végétation d'une profondeur variant de 50 à 100 mètres (Izard & Guyot 1979). On voit donc qu'une surface de végétation dense d'au moins 50m de large permet de compenser l'effet de l'urbanisation du point de vue de l'humidité de l'air. De nombreuses zones vertes de taille moyenne sont donc plus efficaces qu'une seule très grande surface verte pour accroître l'humidité relative de l'air en milieu urbain.

Pour compenser une forte humidité de l'air, il est par contre nécessaire de ventiler les espaces publics. Dans ce cas, la densité urbaine ne doit pas être trop forte afin de ne pas trop ralentir l'écoulement du vent.

Les agglomérations urbaines et les bâtiments élevés augmentent les précipitations parce qu'ils augmentent la rugosité de la zone en question. De plus, l'effet d'îlot de chaleur urbain accroît l'intensité des averses (Escourrou 1995). Les hauteurs de précipitations augmentent de 5 à 10% en ville par rapport à la campagne (Merlin & Choay 1996). Les protections contre les précipitations sont à prévoir en zone urbaine dans les climats pluvieux.

On peut aussi ajouter que la fréquence des brumes et brouillards augmente de 30% à 100% en périphérie de ville par rapport à la campagne (Merlin & Choay 1996). L'augmentation des jours de brouillard est due à la pollution et à la réduction de la vitesse du vent. Il s'agit donc de limiter les émissions de polluants en zone urbaine ainsi que de favoriser leur dispersion grâce à une conception urbaine qui tient compte du vent.

Evaluer l'humidité et les précipitations en zone urbaine

Les modifications de l'humidité relative ainsi que de l'intensité et la fréquence des précipitations en ville par rapport à la station météorologiques ne sont pas encore connues avec assez de précision sur un échantillon de villes suffisant pour pouvoir en tirer des règles simplifiées à adapter à tout contexte. A l'heure actuelle, il nous semble donc qu'il est préférable d'utiliser les valeurs moyennes de la station météorologique la plus proche du site.

Pour l'évaluation du confort des piétons dans les espaces publics ainsi que pour les consommations d'énergie des bâtiments, ces modifications ne devraient pas avoir un impact significatif dans le climat tempéré froid qui est le nôtre. Développer des recherches pour préciser ce point de manière détaillée ne nous semble donc pas urgent.

En revanche, des statistiques plus réalistes concernant les précipitations et l'humidité en milieu urbain deviennent de plus en plus nécessaires pour l'évaluation et la conception du milieu urbain afin de limiter les risques d'inondations. Ce point est toutefois trop spécifique pour pouvoir être davantage développé dans ce doctorat.

4. Analyse et quantification de l'influence des bâtiments sur l'écoulement du vent

« L'oeuvre de la nature est bien plus difficile à comprendre que le livre d'un poète » Léonard de Vinci.

Cette quatrième partie aborde l'étude du vent autour des bâtiments à partir de simulations numériques CFD. Après une analyse théorique des modèles de turbulence existants, une validation du logiciel FLUENT a été réalisée à partir de tests en tunnel à vent trouvés dans la littérature. Cette validation porte sur l'écoulement du vent dans trois types de contextes construits : un bâtiment isolé, un groupe de bâtiments et un milieu urbain dense. Cette étude nous a permis de définir des règles d'élaboration des simulations CFD. Enfin, ce chapitre présente la description d'outils quantitatifs simplifiés pour l'évaluation des vitesses du vent autour de bâtiments de formes simples. La méthodologie développée dans le chapitre de cette thèse peut être utilisée dans l'avenir pour continuer de produire des outils quantitatifs simplifiés pour l'ensemble des mécanismes critiques du vent, y compris au sein d'un milieu urbain dense, ou pour réaliser des études plus complexes d'un contexte particulier à l'aide de simulations CFD.

4.1 Simulations CFD

Durant la conception d'un projet architectural ou urbanistique, le concepteur a besoin d'informations significatives et utiles qui lui permettent d'ajuster ses projets, dès la première phase de conception, en fonction de leur influence sur le microclimat et en particulier sur l'écoulement du vent. C'est pourquoi nous réalisons dans ce chapitre une étude de faisabilité de la création d'un outil d'aide à l'intégration du vent dans le processus de conception des bâtiments pour assurer le confort des piétons dans les espaces publics.

Le choix des simulations numériques et plus particulièrement d'un logiciel de CFD pour réaliser notre étude paramétrique du vent autour des bâtiments a déjà été expliqué au chapitre précédent, lors de la présentation des différentes méthodes d'évaluation du vent dans un contexte construit. Les paragraphes suivants se concentrent sur les paramètres des simulations CFD et l'analyse théorique des différents modèles de turbulence.

4.1.1 Les paramètres de simulation

L'écoulement du vent autour des bâtiments est un phénomène très complexe à simuler. En effet, les mouvements de fluides habituellement pris en compte en CFD impliquent souvent des objets profilés (ailes d'avions,...) ou des flux laminaires. Les mouvements d'air autour d'objets non profilés, ce qui est le cas habituel des bâtiments, dans un environnement turbulent sont nettement plus compliqués.

Le fait que la plupart du temps les bâtiments présentent des arêtes vives signifie que les écoulements d'air autour de ceux-ci présentent souvent les caractéristiques suivantes par endroits:

- stagnation de l'écoulement,
- accélération rapide,
- détachement de l'écoulement (aux angles,...),
- zones de recirculation,
- couches de cisaillement,
- rattachement de l'écoulement sur la surface.

Ces éléments sont malheureusement très difficiles à reproduire.

Nos études bibliographiques ont montré que peu d'études ont été réalisées sur les simulations numériques du vent autour de bâtiments. Les seules études courantes sont celles de l'écoulement de l'air autour d'une forme géométrique simplifiée : un cube, un cylindre, ... avec un vent perpendiculaire à cet objet. Des études commencent à apparaître sur l'étude des mouvements d'air à l'intérieur des bâtiments, ce qui est plus facile à simuler également.

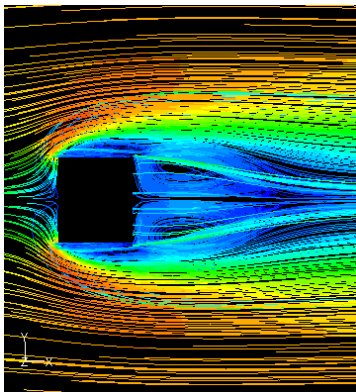
Il est donc important de prendre le temps d'analyser les différents paramètres de simulations à introduire et de choisir les modèles de calculs et les conditions aux limites les plus adaptés pour l'étude du vent autour des bâtiments.

FLUENT est un logiciel basé sur la méthode des volumes finis qui résout par itérations successives le système des équations de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de la continuité sur chacune des cellules d'un maillage tridimensionnel, en proposant différents modèles de turbulence.

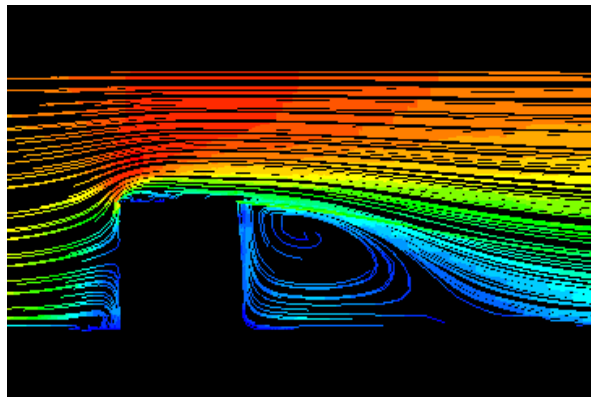
La démarche d'utilisation de FLUENT se décompose en quatre étapes :

- une description du domaine au moyen d'un maillage tridimensionnel,
- une discrétisation des équations sur chaque volume du maillage, en travaillant avec des paramètres de contrôle, en fonction d'un modèle de turbulence déterminé.
- une optimisation de la résolution avec ajustements optionnels des paramètres de contrôle ou du maillage,
- un rendu des résultats par graphiques et/ou par sorties alphanumériques.

Les deux graphes ci-dessous montrent le type de résultats graphiques produits avec FLUENT. Il s'agit de l'écoulement de l'air autour d'un cube montré en plan et en coupe.



Écoulement de l'air en plan.



Écoulement de l'air en coupe.

Différentes limites du domaine de simulations sont recommandées dans la littérature, citons les limites suivantes :

- Le rapport de blocage ne doit pas dépasser 3% (Baetke et al. 1990). Le rapport de blocage est le rapport entre la surface au vent des obstacles modélisés et la surface formée par le produit de la hauteur et de la largeur du domaine simulé, qui correspond généralement au plan d'introduction de l'air dans la simulation
- Un rapport de blocage de 3% est conseillé, même pour les grands ensembles de bâtiments. La forme de la section du domaine doit de préférence suivre celle du bâtiment. (Franke & al. 2004)
- La longueur minimale du domaine est de $5 \cdot \min(L, 2H)$ en amont du bâtiment et de $8 \cdot \min(L, 2H)$ en aval de celui-ci, en prenant L égal à la longueur au vent du bâtiment et H à sa hauteur. (Blocken & al. 2003)
- La longueur minimale du domaine est de 5H en amont du bâtiment, de chaque côté du bâtiment et au-dessus de celui-ci mais de 15 H en aval du bâtiment. Pour un ensemble de bâtiments, la hauteur H doit correspondre à la hauteur Hmax du bâtiment le plus élevé. (Hall 1997)
- Une règle utilisée fréquemment pour les tests en tunnel à vent peut également servir pour définir le domaine d'une simulation CFD : le domaine doit s'étendre dans toutes les directions autour du bâtiment sur une longueur de 6 à 10H (Franke & al. 2004).

Il nous semble judicieux de choisir les valeurs les plus larges pour éviter que les frontières du domaine de simulation influencent les valeurs des vitesses du vent autour des bâtiments. Mais d'autre part, notre domaine de simulation est limité par la taille du maillage nécessaire et le temps de calcul qui en découle. Nous optons pour les limites suivantes :

- Pour le choix de la hauteur et de la largeur du domaine à simuler, le rapport de blocage ne doit pas dépasser 3%.
- La forme de la section du domaine à simuler (hauteur x largeur) doit de préférence s'approcher de la coupe au vent de la configuration bâtie.
- La longueur du domaine s'étend en amont des bâtiments sur une distance de 10H et en aval sur une distance de 16H.

Généralement, dans un ensemble construit, c'est le volume des bâtiments qui détermine principalement l'écoulement du vent, surtout lorsque les bâtiments ont une forme parallélépipédique avec des coins marqués. Le niveau de détail à simuler sur les bâtiments dépend de leur distance par rapport à l'espace public pour lequel la simulation est réalisée. Le bâtiment principal ou les bâtiments qui entourent une place sont ceux qui doivent être modélisés le plus précisément : pour ces bâtiments, tout élément de plus d'1m de large devrait idéalement être représenté dans la simulation. Les bâtiments plus éloignés peuvent par contre être représentés par de simples blocs (Franke & al. 2004).

Un maillage de qualité nécessite une grande précision. Le maillage doit être fortement raffiné au niveau piéton et dans les zones où de forts gradients de vent sont prévus. Adapter le maillage est une manière efficace de reproduire les détails des flux de séparation et de rattachement sur la surface du modèle sans trop de calculs surnuméraires (Meroney & al. 1999, Kim & Boysan 1999).

Des maillages de très grande précision sont donc nécessaires, en raffinant le long des surfaces. Les maillages utilisés dans cette étude sont formés de cellules « hexahédres-wedge » dont le nombre varie entre un et deux millions.

Faire varier la vitesse du vent au niveau piéton tout en gardant le même profil de vent a peu d'influences sur la distribution de l'écoulement. Nous utiliserons donc une seule vitesse de vent au niveau piéton par type de profil de vent utilisé. Lors de la validation du logiciel FLUENT, les profils de vent utilisés dépendront des études réalisées en soufflerie aérodynamique auxquelles nos simulations seront comparées. En revanche, pour l'élaboration de nos outils quantitatifs d'évaluation du vent autour des bâtiments, les profils suivants seront utilisés :

- profil de campagne : $U = 0.52 z^{0.2} U_{10m,météo}$
- profil de vent suburbain : $U = 0.4 z^{0.235} U_{10m,météo}$
- **profil de vent urbain : $U = 0.35 z^{0.25} U_{10m,météo}$**

où U est la vitesse du vent (en m/s) à la hauteur z (en m) et $U_{10m,météo}$ vaut 12.9 m/s. La majorité de nos simulations seront basées sur le profil de vent urbain et nous indiquerons chaque fois que nous avons pris un autre profil de base.

Pour que nos résultats de simulations puissent être utilisés quelque soit la vitesse de vent moyenne à la station météorologique la plus proche, nous présenterons les résultats quantitatifs de nos simulations sous la forme du **rapport U/U_0** qui correspond au rapport entre la vitesse du vent simulée à 1.5 m de haut dans une configuration bâtie et la vitesse du vent qui serait mesurée dans un terrain totalement dégagé à cette même hauteur. Le rapport U/U_0 est donc représentatif de l'effet d'accélération ou de décélération du vent produit par le contexte construit.

Par ailleurs, lorsque nous présenterons les mouvements d'air autour des bâtiments, nous donnerons à chaque fois l'échelle des vitesses de vent considérée. En connaissant le profil de vent utilisé pour la simulation (en général un vent urbain avec $U_0=5m/s$), il est possible d'en déduire d'autres rapports U/U_0 si nécessaire.

De nombreuses sources dans la littérature recommandent les conditions aux limites suivantes pour les parois extérieures du domaine (Baetke et al. 1990 ; Hall 1997 ; Blocken & al 2003 ; Franke & al. 2004) :

- des symétries sur les bords et la surface supérieure du domaine,
- une limite « outflow » pour la surface de sortie de l'air ou parfois une condition de pression nulle pour cette surface,
- un profil de vitesse du vent variable avec la hauteur en entrée.

Le bord « outflow » impose une sortie de l'air qui correspond à un flux totalement développé ; il est donc important que la distance entre le bâtiment et la sortie soit assez importante.

Pour le traitement des zones proches des surfaces de type « mur » (sol, bâtiments,...), il existe plusieurs modèles de calcul spécifiques. Nous retiendrons :

- le modèle « wall function » pour lequel la couche visqueuse n'est pas résolue mais simulée. Le premier point de la grille doit être localisé en dehors de cette couche.
- le modèle « two-layer approach » qui calcule la couche visqueuse totalement mais nécessite un maillage très fin à la proximité des parois.

Vu la complexité de nos simulations, le choix du modèle wall function semble le plus adéquat.

Pour des études du confort au vent au niveau piéton, il est nécessaire d'utiliser des surfaces lisses (c'est-à-dire dont la hauteur de rugosité est nulle) pour les bâtiments et le sol, afin de pouvoir suffisamment densifier le maillage à proximité du sol. Franke & al. recommandent de placer au moins deux nœuds entre la limite du domaine (sol, bâtiment,...) et le point d'évaluation de la vitesse de l'air. (Franke & al. 2004)

Lorsque la vitesse du vent est faible, des effets thermiques (température de l'atmosphère, surfaces chaudes,...) peuvent influencer les mouvements d'air. Il ne sera pas tenu compte de ces effets thermiques dans la suite de notre étude pour trois raisons :

- ces effets n'influencent que les faibles mouvements d'air et ils n'ont donc pas vraiment d'impact sur le confort au vent des personnes.
- c'est une pratique habituelle pour l'ingénierie aéronautique de faire cette hypothèse.
- prendre en compte ces mouvements thermiques alourdirait fortement des simulations déjà extrêmement complexes.

Il serait toutefois intéressant de pouvoir analyser dans une recherche ultérieure certains de ces effets thermiques, tels que les brises générées par l'effet d'îlot de chaleur urbain ou les mouvements d'air qui relient les parcs urbains à leur entourage construit.

4.1.2 Les différents modèles de turbulence

Les écoulements turbulents sont caractérisés par un champ de vitesse fluctuant. En pratique, ces fluctuations peuvent être de très petite échelle et de grande fréquence et sont donc impossibles à modéliser directement avec les ordinateurs actuels. Par contre, les équations de la mécanique des fluides peuvent être moyennées ou manipulées pour retirer les fluctuations de petites échelles, en utilisant un ensemble d'équations modifiées qui peut être résolu numériquement. Ces équations modifiées présentent toutefois des variables supplémentaires qui doivent être déterminées en fonction d'un modèle de turbulence déterminé.

Signalons enfin que les simulations numériques DNS qui consistent à résoudre les équations totalement sur l'ensemble du flux ne sont possibles actuellement que pour de relativement faibles nombres de Reynolds ($Re < 10^4$). Une solution complète d'une situation variable dans le temps des équations exactes de Navier-Stokes pour les flux turbulents à grands nombres de Reynolds (comme le vent) dans des géométries compliquées ne pourront vraisemblablement pas être obtenues avant longtemps. Deux méthodes alternatives existent pour transformer les équations de Navier-Stokes de manière à ce que les fluctuations turbulentes de petite échelle ne soient pas simulées directement : la moyenne temporelle et le filtrage.

Ces deux méthodes ont donné naissance à deux groupes de modèles de turbulence :

- les méthodes RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes)
- les méthodes LES (Large Eddy Simulation).

Les équations des méthodes RANS calculent les équations de transport pour les quantités moyennes de l'écoulement uniquement, pour lesquelles toutes les échelles de turbulence sont simulées. Le fait de limiter la recherche de solutions aux valeurs moyennes des variables de l'écoulement d'air réduit fortement les calculs. Lorsque l'écoulement est très stable, la solution donnée par une méthode RANS est la plus appropriée car la plus rapide. Citons les modèles k- ϵ standard et ces variantes ainsi que les méthodes RSM (Reynolds Stress Model). Jusqu'à présent, c'est essentiellement le modèle de turbulence k- ϵ standard qui est utilisé dans les simulations CFD. Malheureusement, ce modèle de turbulence semble peu approprié au calcul des mouvements d'air d'un bâtiment.

Décrivons les deux groupes de modèles de turbulence de type RANS :

- les méthodes RANS avec modèles de turbulence statistique. Il a été prouvé de nombreuses fois que le modèle k- ϵ standard donne de faibles résultats pour des flux présentant une forte anisotropie en turbulence, ce qui est notre cas. Le modèle k- ϵ standard est connu pour créer des productions peu réalistes des effets de turbulence autour des objets non profilés. Certains modèles k- ϵ améliorés ont été inventés par différents auteurs : citons celui de Kato et Launder ou le realizable k- ϵ model de Shih et al.
- les méthodes RSM (Reynolds-stress model), parfois aussi appelés DSM (Differential stress model), pour lesquels les équations de transport sont résolues pour des contraintes de Reynolds individuelles. Ces modèles donnent généralement des meilleurs résultats que les précédents pour un grand nombre de complexités de l'écoulement autour des bâtiments : zones de stagnation, gradients de pression importants, séparations du flux, zones de recirculation avec un mouvement de l'écoulement très incurvé. Mais à cause de l'équation de transport additionnelle à résoudre, ce modèle nécessite un plus long temps de calcul et un meilleur maillage pour assurer une bonne convergence du calcul.

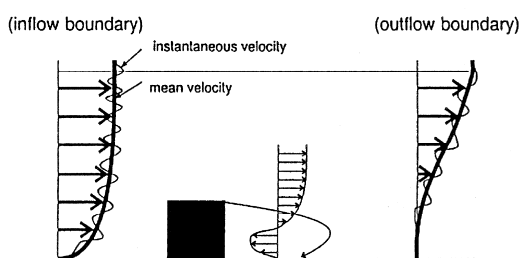
Les méthodes LES fournissent une approche alternative dans laquelle les mouvements d'air turbulents supérieurs à une maille de la simulation sont calculés par une solution variable dans le temps grâce à un ensemble d'équations qui filtrent les petites turbulences. L'avantage de cette méthode est que les mouvements essentiels du vent pour la stabilité des personnes peuvent être résolus précisément et que ce ne sont que les petites échelles de turbulence qui sont simulées. C'est donc un modèle de turbulence plus proche de la réalité.

Conceptuellement, les simulations LES (Large-eddy simulation) sont plus souhaitables que les méthodes RANS pour l'étude du vent autour des bâtiments parce qu'elles résolvent les mouvements instables de large échelle et ne simulent que les plus petites échelles de turbulence. Cependant, il faut signaler que les applications LES sont encore à leur début et que des conditions aux limites réalistes sont difficiles à établir. De plus, cette méthode nécessite de très grandes puissances de calcul et une précision de maillage spécialement importante. L'approche LES nécessite donc des calculs nettement plus lourds.

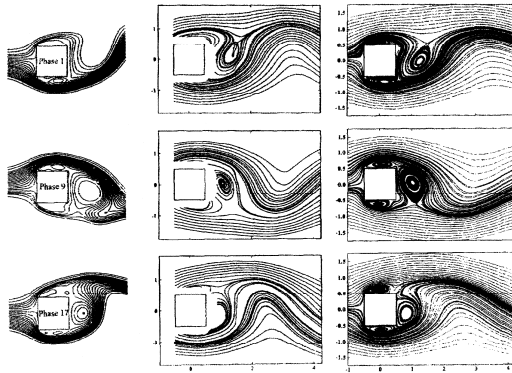
Les principales difficultés du LES sont :

- le traitement du flux turbulent à l'entrée.
- les conditions aux limites de sortie.
- l'influence du maillage sur les résultats et donc la difficulté d'utiliser des maillages graduels. Les modèles de grilles composées en LES doivent être pris avec beaucoup de précautions.
- le traitement de la zone proche des parois.
- le temps nécessaire par simulation.

Le graphe ci-dessous montre l'effet d'un obstacle sur les limites de flux de sortie, qui est une des limites actuelles des simulations LES.



Rodi a comparé les résultats d'un test en tunnel à vent, d'une simulation CFD à l'aide du modèle RMS en deux dimensions et d'une simulation CFD à l'aide d'un modèle LES en trois dimensions de l'écoulement de l'air autour d'un parallélépipède de tranche carrée. Cette étude montre que les mécanismes de base du mouvement d'air sont bien reproduits pour les trois méthodes à trois phases différentes de l'écoulement.



(Rodi 1997).

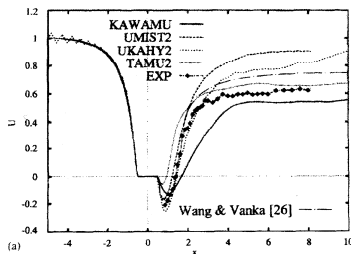
Les différentes caractéristiques suivantes de l'écoulement de l'air sont utiles pour comparer les valeurs quantitatives des méthodes de simulations: St (nombre de Strouhal : $St = fD / U_0$, dimensionless shedding frequency) , C_D le coefficient moyen de traînée et l_R la longueur de réattachement, indiquant la longueur de la région de séparation moyenne temporelle. Ces trois facteurs sont repris ici pour différentes méthodes de calcul et de maillages. (Rodi 1997)

Modèles	St	C_D	l_R	maillage
LES divers	0.09 à 0.15	2.02 à 2.58	0.94 à 1.68	125 x 78 x 20 à 192 x 160 x 48
Std k- ϵ WF	0.134	1.64	2.8	100 x 76
TL KL k- ϵ	0.143	2.0	1.25	170 x 170
RSM WF	0.136	2.15	0.98	70 x 64
RSM TL	0.159	2.43	1.0	186 x 156
Test en soufflerie	0.132	1.9 à 2.2	1.38	/

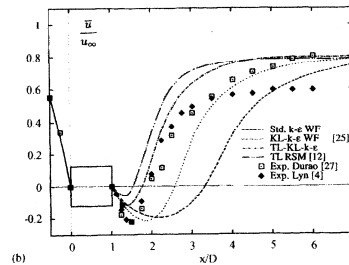
De ces résultats on peut tirer que le modèle RSM wall function donne d'excellents résultats, bien que la longueur de réattachement soit un peu trop faible, pour une représentation en deux dimensions qui comprend nettement moins de cellules (70 x 64 points) que tous les autres modèles.

Le nombre de Strouhal est prédit correctement par les modèles RANS avec wall function alors que les modèles two-layer prédisent un St trop élevé (20% trop élevé dans le cas du modèle RSM). La plupart des modèles LES prédisent bien la valeur de St . Le modèle k- ϵ standard prédit un C_D trop faible associé à une région de séparation trop longue. Les améliorations de Kato-Launder associées à un two-layer model permettent toutefois d'atteindre environ la bonne valeur. RSM avec wall function produit le C_D correct, alors qu'avec un two-layer model il surévalue cette valeur. La plupart des modèles LES donnent des valeurs trop élevées de C_D par rapport aux expériences ; cependant, pour les modèles LES, il n'y a pas de liaison claire entre C_D et la longueur de réattachement.

Les figures ci-dessous donnent une comparaison de différentes simulations numériques et de tests en tunnel à vent réalisés par Lyn et al ainsi que Duraao et al. Ces schémas donnent la distribution de la moyenne temporelle de la vitesse U le long de la ligne centrale des simulations. La figure de gauche présente plusieurs modèles LES alors que la figure de droite permet de comparer différentes méthodes RANS. Notons tout d'abord que dans la partie avant l'obstacle, les résultats des différentes simulations sont identiques alors que les différences se marquent dans la zone de sillage. Notons aussi que pour le RSM, contrairement au k-ε standard, les résultats de U donnés sont surestimés par rapport aux expériences, ce qui nous place du côté de la sécurité. Ces résultats reflètent la discussion précédente sur la longueur de rattachement. Le modèle k-ε standard surestime largement la zone de séparation ainsi que la zone de sillage derrière l'obstacle. Les modèles RSM sous-estiment ce sillage mais nous placent donc du côté de la sécurité. Les différents résultats LES montrent des différences surprenantes entre les différents modèles. On peut donc situer le modèle RSM comme aussi valable que de nombreuses simulations LES. D'autre part, les études réalisées pour ce carré à l'aide de modèles LES ont pris un temps 10 x supérieur à celles utilisant une méthode RANS perfectionnée, sur un même ordinateur très performant.

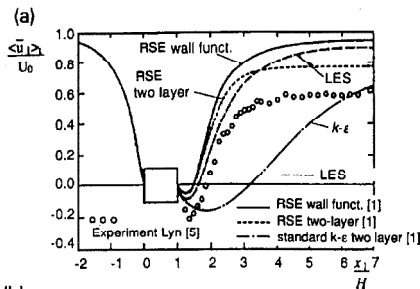


(Rodi 1997).

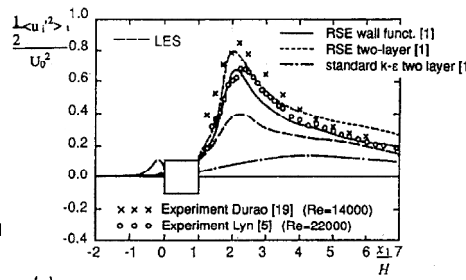


(Rodi 1997).

La même expérience (parallépipède rectangle identique) a été également réalisée par Murakami à partir de différents modèles de turbulence dont un modèle LES. Ces résultats sont présentés ci-dessous.



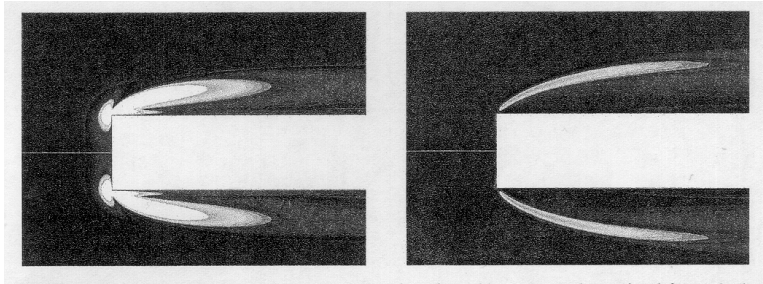
(Murakami & al. 1990).



(Murakami & al. 1990).

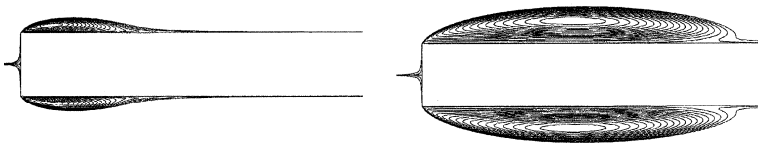
Le graphe de gauche donne la moyenne temporelle des vitesses sur la ligne centrale. Le second graphe rend compte de la moyenne temporelle de la fluctuation totale de l'énergie cinétique (k) le long de la ligne centrale. Dans ce second graphe, on voit clairement que le modèle k-ε surévalue largement la valeur de k avant l'obstacle et qu'il ne rend pas du tout compte de la distribution du k après l'obstacle ni de l'endroit où il est le plus important. Étonnamment, dans cet article, le modèle RSE est supérieur à la simulation LES pour l'évaluation du k . Rappelons toutefois qu'en théorie, le modèle LES devrait donner de bien meilleurs résultats. Cependant, les résultats du modèle LES varient très fort en fonction de l'utilisateur et ne devraient donc être produits que par des spécialistes confirmés en mécanique des fluides. En tout cas, le modèle RSE apparaît comme excellent pour rendre compte de la distribution du k autour d'un tel obstacle.

Les simulations ci-dessous montrent la production d'énergie turbulente cinétique k sur la face avant d'une section rectangulaire selon les modèles $k-\epsilon$ et RSM du logiciel FLUENT (Kim & Boysan 1999). Le premier surestime largement k , tandis que le second donne des valeurs correctes. En conclusion, tous les modèles qui utilisent l'eddy-viscosity-based $k-\epsilon$ surestiment la valeur de k , ce qui peut amener à la réduction ou la complète suppression de la séparation de l'écoulement.



(Kim & Boysan 1999).

Les lignes de séparation prédites par les modèles $k-\epsilon$ et RSM du logiciel FLUENT (Kim & Boysan 1999) le long d'une section rectangulaire sont données ci-dessous. Un essai en tunnel à vent de ce cas a montré que le flux se détache au coin et que le réattachement se fait sur la surface à une longueur égale à 4.7 fois la hauteur du rectangle. Le modèle $k-\epsilon$ sous-estime donc largement cette zone de recirculation et prédit le réattachement à 2 fois la hauteur du corps. Le modèle RSM donne une valeur de réattachement très proche de l'expérience : 4.3 x la hauteur de l'obstacle. Les modèles RNG $k-\epsilon$ et Realizable $k-\epsilon$ ont été testés dans cette étude mais il s'avère qu'ils n'améliorent pas les erreurs introduites par une surévaluation du k .



(Kim & Boysan 1999).

Cette analyse bibliographique a montré que la simulation numérique est un outil très intéressant et qu'il peut nous apporter beaucoup dans l'étude du vent autour des bâtiments. A la lumière de ces différentes études, il semble que les méthodes LES ne sont pas encore matures bien que prometteuses pour le futur. En effet, les résultats obtenus avec différents types de modèles LES sont parfois très variés. Toutefois, lorsque la simulation est vraiment réussie les résultats sont en général très proches de la réalité. Vu que les méthodes LES sont encore à leur enfance et que le modèle RANS $k-\epsilon$ donne des résultats trop éloignés de la réalité pour des géométries non profilées autour d'un objet isolé, le modèle de simulation le plus approprié pour notre étude semble être le modèle RSM.

Il faut aussi signaler que l'étude des mouvements d'air globaux et des vitesses moyennes de vent ne demande pas la même précision de modèle numérique que l'analyse des caractéristiques de turbulence du flux d'air. Enfin les seules simulations trouvées dans la littérature sur des cas urbains utilisent un modèle $k-\epsilon$ (standard ou realizable) et affirment que les résultats sont valables pour l'étude du confort des piétons (Gadilhe 1993, Takakura S & al. 1993, Murakami S. 1997, Blocken & al. 2004). En utilisant un modèle RSM, nous devrions déjà obtenir des résultats plus précis que ceux qui sont publiés à l'heure actuelle.

C'est donc un modèle RSM qui est choisi pour commencer notre étude des survitesses du vent autour des bâtiments. Ce choix sera toutefois vérifié par une validation du logiciel FLUENT par rapport à des essais en soufflerie aérodynamique.

4.2 Validation de FLUENT comme outil d'étude du vent autour des bâtiments

Vu que les logiciels de mécanique des fluides n'ont pas été conçus au départ pour les écoulements d'air autour des bâtiments, il est indispensable de valider le logiciel que nous allons utiliser (FLUENT) pour l'étude du vent autour des constructions.

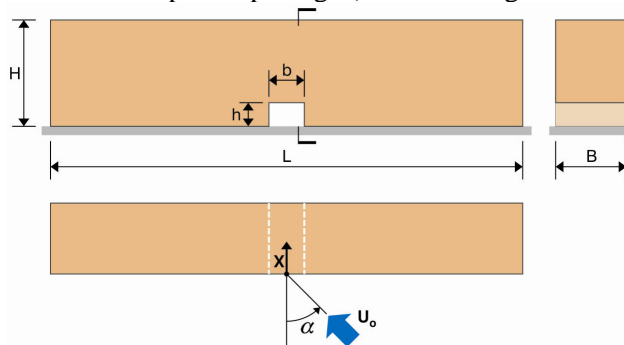
Les données fournies par des expériences sur un site réel sont peu pratiques pour servir de base à une validation car ces données sont généralement mesurées sur des moyennes de 10 minutes et qu'elles ne peuvent pas dépasser 30 minutes vu que les conditions météorologiques réelles restent rarement constantes plus de 30 minutes. Or, les simulations CFD basées sur des modèles de turbulence de type RANS donnent des moyennes de l'écoulement d'air sur des temps théoriquement infiniment longs. D'autre part, il est difficile de réaliser des mesures expérimentales sur un site avec une grande résolution spatiale vu que cela impliquerait un matériel de mesure considérable. Ainsi, les logiciels de simulations CFD doivent être validés à partir de résultats de tests en tunnel à vent, qui donnent plus de résultats pour une même configuration que les mesures sur site et partent également de l'hypothèse de conditions aux limites statiques. Enfin, rappelons que le tunnel à vent est une technologie utilisée depuis des dizaines d'années avec beaucoup de succès pour évaluer précisément les problèmes du vent autour des bâtiments.

Nous avons donc réalisé une validation de FLUENT comme outil de simulation du vent autour des bâtiments en comparant nos résultats par rapport à des tests en tunnel à vent trouvés dans la littérature. Cette validation s'est faite en trois étapes :

- la validation de FLUENT pour l'étude du vent autour d'un bâtiment isolé.
- la validation de FLUENT pour l'étude du vent autour d'un groupe de bâtiments.
- la validation de FLUENT pour l'étude du vent dans un tissu urbain dense.

4.2.1 Validation de FLUENT pour l'étude du vent autour d'un bâtiment isolé

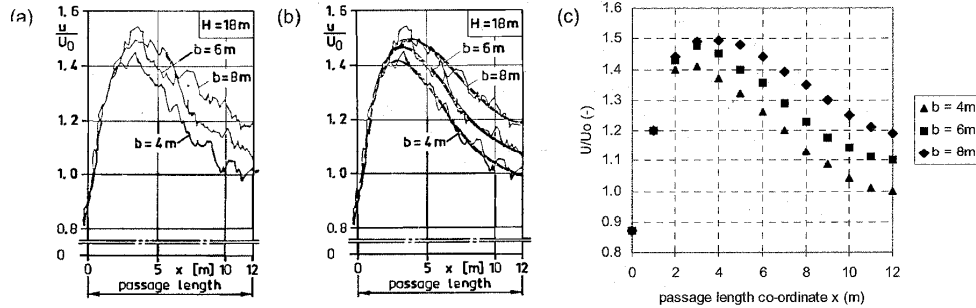
Notre choix pour la configuration de validation se porte sur le bâtiment ci-dessous : un bâtiment parallélépipédique de 80m de long, 12m de large et 18m de haut, percé en son centre par un passage (de 6m de large et 4m de haut) au niveau piéton.



(Blocken & al. 2003).

Cette configuration a été choisie car elle permet de comparer de manière précise et quantitative l'effet d'inconfort généré au niveau piéton (à 2 m de haut) à l'intérieur de ce passage sous immeuble avec des essais en tunnel à vent et des simulations à l'aide du modèle k-ε réalisable de FLUENT (Wiren 1975 ; Blocken & al. 2003).

La figure ci-dessous représente les résultats de tests en tunnel à vent donnés par Wiren et la représentation simplifiée que Blocken & al en ont tirée. Nos simulations seront comparées avec la courbe du milieu, celle qui a été établie pour une largeur du passage de six mètres (b=6m).

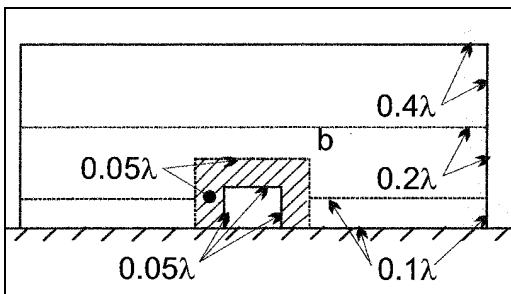


(Blocken & al. 2003).

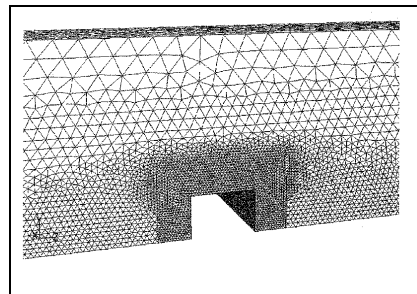
La section totale de notre simulation couvre 108m en hauteur et 480m de large, ce qui implique un rapport de blocage de 2.8%. Nous avons donc bien un domaine dont le rapport de blocage est inférieur à 3%, ce qui a été choisi comme limite au point 4.1.1. De plus, la forme de la section du domaine correspond à la forme de la façade au vent du bâtiment simulé.

La profondeur de notre domaine de simulation est fixée à 480m, dont 180m avant le bâtiment. C'est un domaine très long, qui correspond aux limites les plus strictes trouvées dans la littérature, à savoir une longueur de 10 H en amont du bâtiment et une longueur de 16 H en aval.

Les valeurs de maillage recommandées par Blocken & al. sont représentées dans le schéma ci-dessous, où le paramètre λ est égal à $(b+h)/2$, ce qui pour notre simulation signifie que $\lambda=5m$. Les simulations de Blocken & al. présentent donc des mailles dans le passage sous l'immeuble d'une dimension égale à $0.05\lambda=0.25m$. Des mailles de même taille sont appliquées sur la façade au vent du bâtiment autour du passage parce que de forts gradients de vitesse devraient y apparaître. Blocken & al. montrent que ce raffinement du maillage dans les zones sensibles d'écoulement de l'air est extrêmement important et que les valeurs données ici semblent suffisantes pour capturer le phénomène. (Blocken & al. 2003)



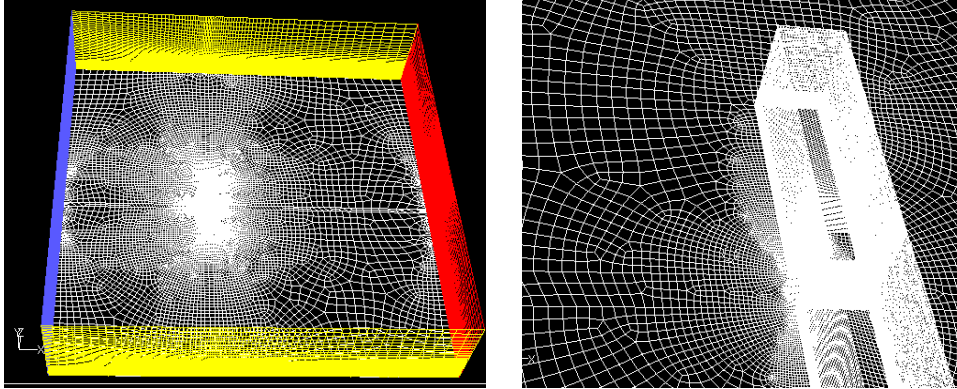
(Blocken & al. 2003).



(Blocken & al. 2003).

Dans nos simulations, la précision du maillage est poussée à 0.2m sur l'ensemble de la face au vent du bâtiment ainsi qu'à l'intérieur du passage sous immeuble.

Notre maillage compte 1 384 836 cellules de type « hexahédres-wedge » à la place du maillage tétraédrique choisi par Blocken & al. Le dessin ci-dessous à gauche montre la répartition des mailles de notre simulation le long des surfaces extérieures du domaine de simulation. Celui de droite montre un agrandissement des surfaces de notre maillage au niveau du bâtiment. On voit que ce maillage est fortement raffiné à proximité du bâtiment.

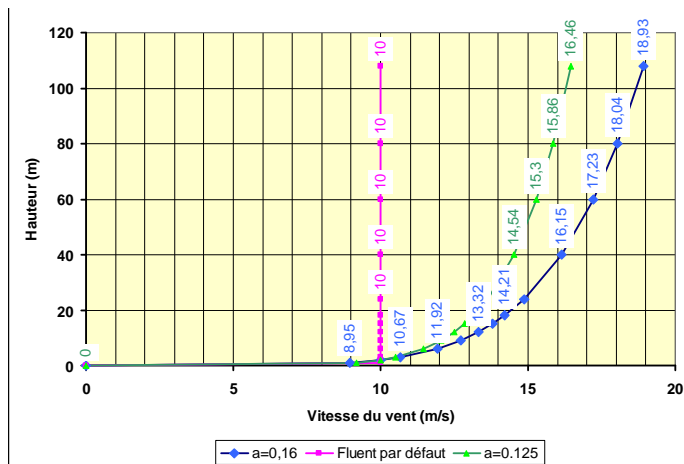


Les conditions aux limites de ma simulation sont les suivantes :

- Ciel= symétrie
- Bords= symétrie
- Sortie= outflow

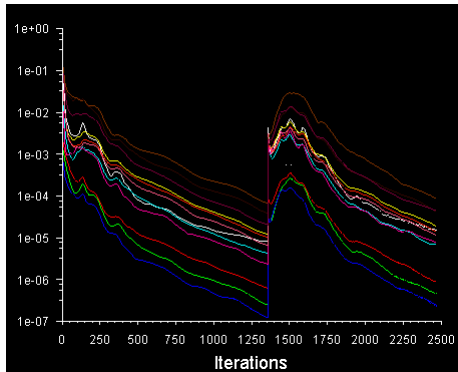
Le profil de vent utilisé est un élément majeur pour obtenir des résultats de qualité. La vitesse du vent à l'entrée du domaine doit correspondre dans ce cas au profil de vent utilisé dans les essais en tunnel à vent de Wieren pour que la comparaison soit exacte. Le profil de vent injecté est donc celui que Wieren annonce dans son article : $U = 10 (z/2)^{0.125}$ avec une intensité de turbulence de 14% au niveau piéton. Il s'agit d'un vent très fort, puisqu'il correspond à une vitesse de vent de 10m/s au niveau piéton. Le graphe ci-dessous montre trois profils de vent différents :

- en rose, le profil standard de Fluent : un vent constant sur la hauteur (sauf dans la couche limite jointive aux parois).
- en vert, le profil de vent choisi pour notre simulation car il correspond au profil des essais en tunnel de Wieren et des premières simulations de Blocken & al sur la même configuration (Wieren 1975 ; Blocken & al. 2003).
- en bleu, le profil de vent que Blocken & al utilisent pour faire coïncider leurs résultats avec ceux de Wieren et dont la justification ne me paraît pas valable.

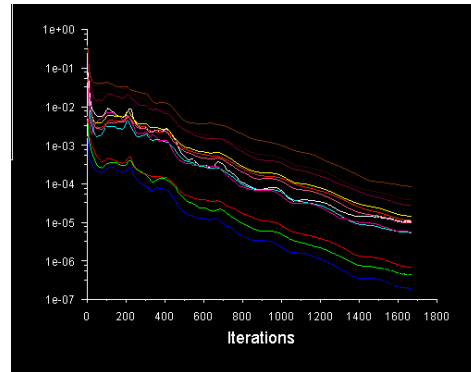


En se rappelant que le bâtiment a une hauteur de 18m, il est évident au vu de ce schéma que les résultats obtenus avec différents profils de vent donneront des niveaux différents d'inconfort au vent.

Différents essais ont été réalisés pour optimiser la rapidité de la convergence de nos simulations. Ces tests montrent par exemple qu'un même maillage converge plus rapidement s'il est lancé directement au 2d ordre que s'il est d'abord convergé au premier ordre avant d'être affiné au second ordre. La méthode en deux temps facilite pourtant la convergence d'autres types de simulations numériques, comme par exemple la convection naturelle à l'intérieur d'un local.



Convergence en 2 temps : 2500 itérations.

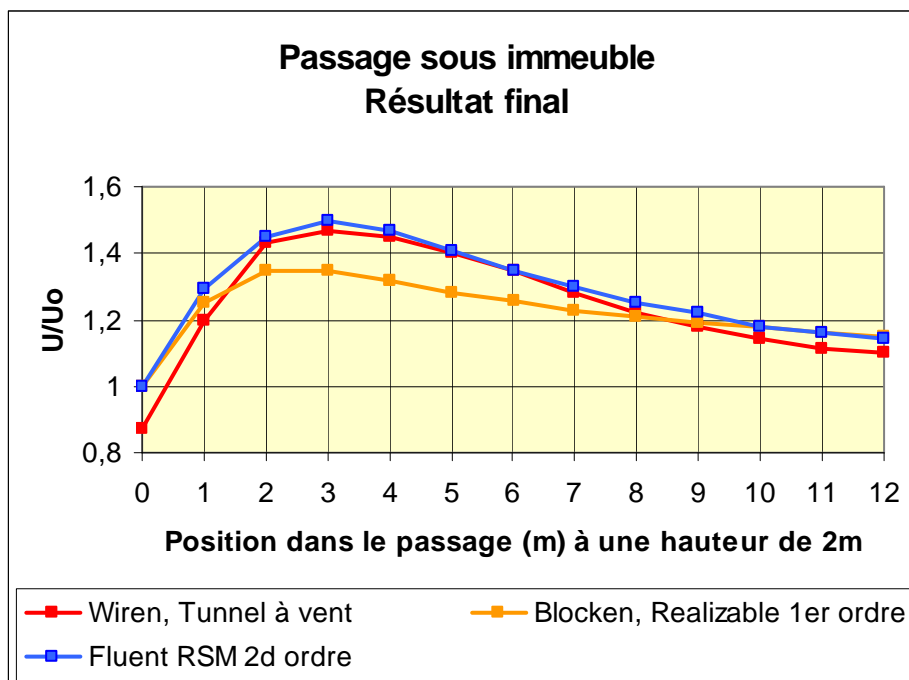


Convergence directe : 1700 itérations

Le graphe ci-dessous présente les valeurs obtenues par :

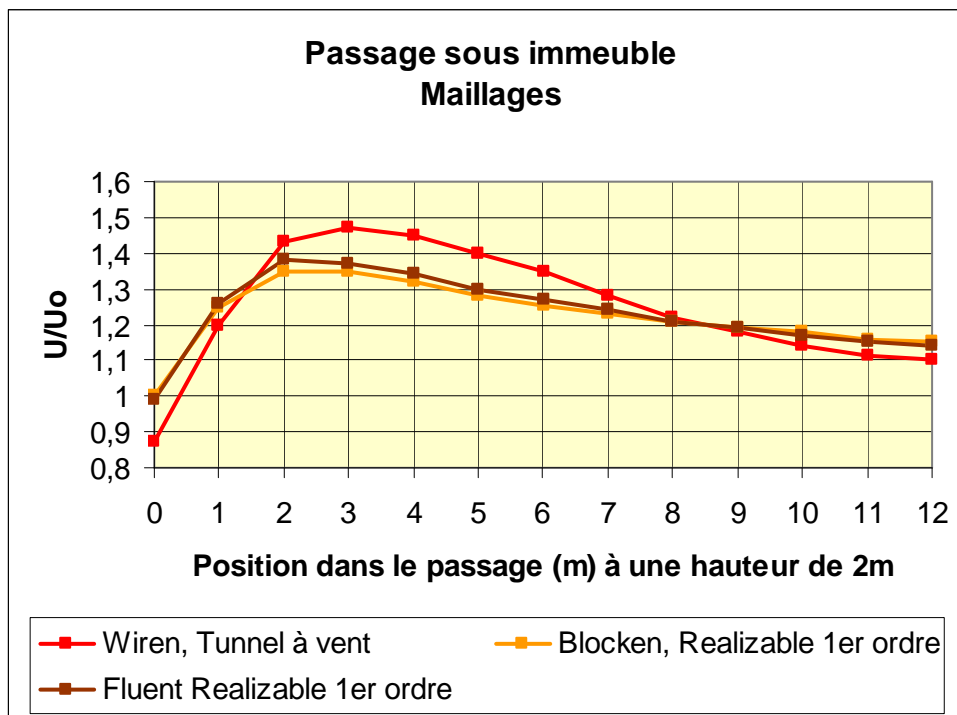
- Wiren, grâce à des essais en tunnel à vent : en rouge.
- Blocken & al, pour une simulation FLUENT réalisée avec un maillage tétraédrique, le même profil de vent que Wiren et le modèle k-ε réalisable convergé au 1^{er} ordre : en orange.

Les résultats de notre simulation sont présentés en bleu. Ils ont été obtenus grâce à une simulation FLUENT réalisée avec un maillage dont les cellules sont du type « hexahédres-wedge » et le modèle Reynolds Stress (RMS) convergé au 2d ordre.



Ce graphe montre que nos résultats de simulation sont très proches de ceux obtenus par Wiren en tunnel à vent et qu'ils sont meilleurs que ceux obtenus par Blocken & al. Les paragraphes ci-dessous vont analyser quels sont les paramètres qui ont le plus influencé l'amélioration du résultat simulé.

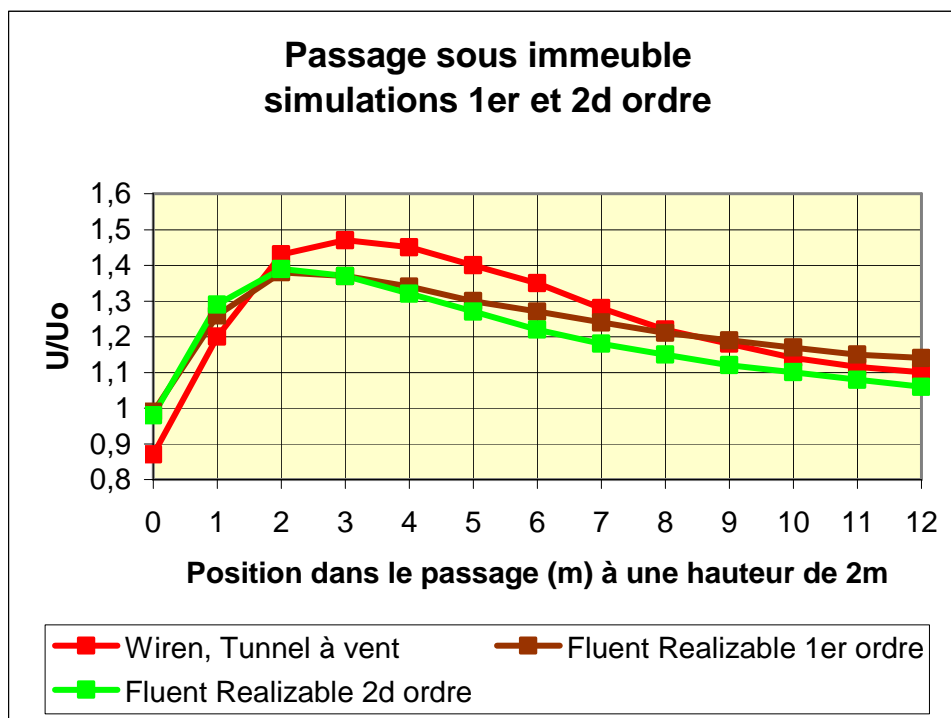
Une simulation a été réalisée pour se rapprocher au maximum des paramètres utilisés par Blocken & al afin de vérifier si les résultats obtenus sont plus ou moins reproductibles. Le graphe ci-dessous compare nos résultats et ceux de Blocken & al pour un même modèle de turbulence k-ε réalisable convergé au premier ordre et utilisant la fonction « non equilibrium wall function » au niveau des murs. Notre maillage a été basé sur le même ordre de grandeur de cellules que celui de l'étude de Blocken et al. Les deux simulations utilisent un maillage non-structuré afin de pouvoir avoir des zones très raffinées d'autres zones beaucoup moins denses. On voit que les résultats de notre simulation et de celle de Blocken & al sont quasiment identiques, ce qui permet d'assurer la reproductibilité de ces résultats.



La très faible différence de résultats entre nos deux simulations s'explique parce que Blocken a utilisé un maillage tétraédrique alors que nous utilisons un maillage hexahédrique, qui limite la diffusion des erreurs numériques. Lorsque c'est possible, il est donc préférable d'utiliser un maillage hexahédrique mais le test ci-dessus montre que la très faible différence entre les résultats quantitatifs permet de négliger l'erreur de diffusion numérique d'un maillage tétraédrique lorsque seul ce cas peut être appliqué. En effet, les maillages tétraédriques restent très utiles pour des géométries complexes où la taille du maillage devient une limitation car ils permettent une grande précision du maillage dans certaines zones avec un ensemble de cellules limité par rapport au même cas réalisé avec un maillage hexahédrique. Vu que notre travail se porte sur des géométries relativement simples pour tirer des règles de conception par rapport à la volumétrie générale du bâti, nous utiliserons des maillages hexahédriques.

Les deux graphes suivants comparent les résultats de nos simulations réalisées au premier et au second ordre avec le test en tunnel à vent de Wiren.

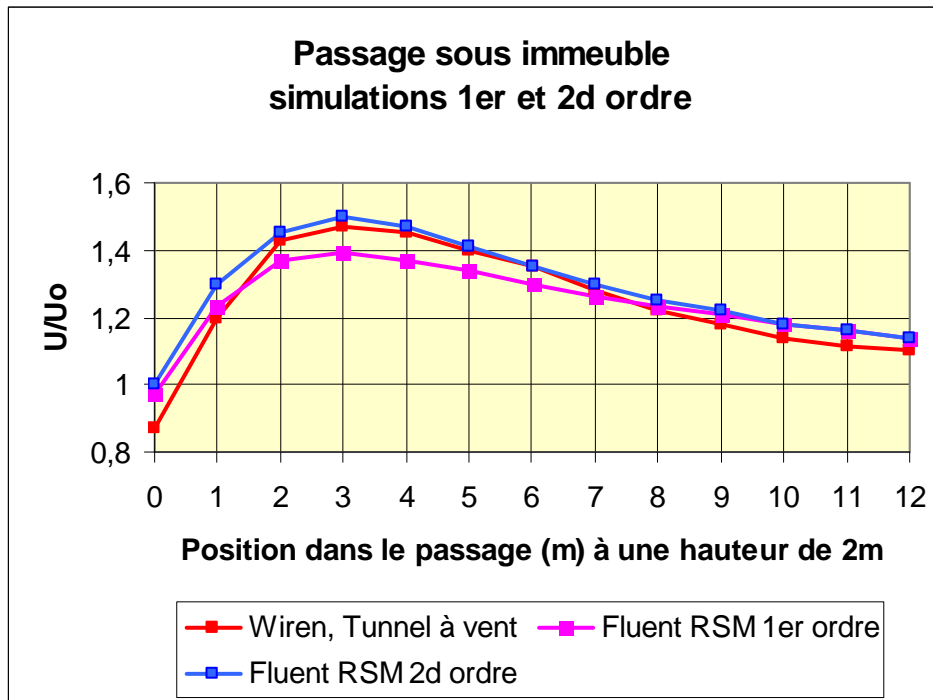
Dans le graphe ci-dessous, il s'agit d'analyser les performances d'une simulation réalisée avec le modèle de turbulence k-epsilon réalisable au 1^{er} ordre et d'une simulation k-epsilon réalisable au 2d ordre.



Les résultats de cette comparaison correspondent à ceux décrits par Blocken & al mais notre conclusion est différente. On remarque que le niveau d'inconfort maximal est situé au même endroit et présente une même valeur quelque soit l'ordre de calcul utilisé avec ce modèle de turbulence. Blocken & al se basent sur le fait que les simulations du second ordre sont plus difficiles à faire converger pour conseiller l'utilisation de simulations du premier ordre. Nous estimons que c'est un choix un peu rapide. En effet, la simulation de second ordre offre le même résultat pour la pointe d'inconfort maximal qu'un calcul au premier ordre mais elle permet d'améliorer substantiellement l'estimation du facteur d'inconfort dans la seconde moitié du passage sous l'immeuble. Ainsi, la pente descendante de cette courbe du facteur de confort dans le passage pour piétons est nettement mieux simulée par un modèle k-epsilon réalisable du second ordre que du premier.

Ajoutons toutefois que le modèle converge plus lentement au second ordre, ce qui est vraisemblablement encore plus difficile dans le cas d'un maillage tétraédrique comme celui de Blocken & al.

Ensuite, nous comparons ci-dessous les résultats de simulations réalisées à l'aide du modèle de turbulence RSM convergé respectivement au premier ordre et au second ordre. Il est intéressant de noter que le modèle RSM converge très bien pour ce type de géométrie et le maillage testé. Les résultats présentés ci-dessous proviennent de simulations dont tous les paramètres ont totalement convergé jusqu'à 10^{-5} .



On remarque à nouveau que la pente de la courbe du facteur d'inconfort dans le passage est bien mieux simulée par le second ordre que par le premier ordre. De plus, dans ce cas-ci, le modèle de second ordre donne également une valeur de l'inconfort maximale différente de celle prédite par un calcul au premier ordre et nettement plus proche du résultat de référence donné par le test en tunnel à vent de Wiren. Enfin, il faut également noter que pour le modèle Reynolds Stress, l'utilisation du schéma de calcul du second ordre permet de faire passer les résultats d'une sous-estimation de l'inconfort à une très légère surestimation de l'inconfort, ce qui nous place du côté de la sécurité.

Les deux graphiques présentés ci-dessus montrent ostensiblement que les modèles de turbulence donnent des résultats nettement supérieurs lorsqu'on les fait converger au 2d ordre plutôt qu'au 1^{er} ordre. Il faut mentionner que les problèmes de convergence proviennent en général d'un maillage trop inhomogène. Avec un maillage hexahédrique fortement raffiné au niveau piéton et autour du bâtiment mais beaucoup plus grossier dans les zones écartées du modèle, des simulations de second ordre peuvent converger sans problème.

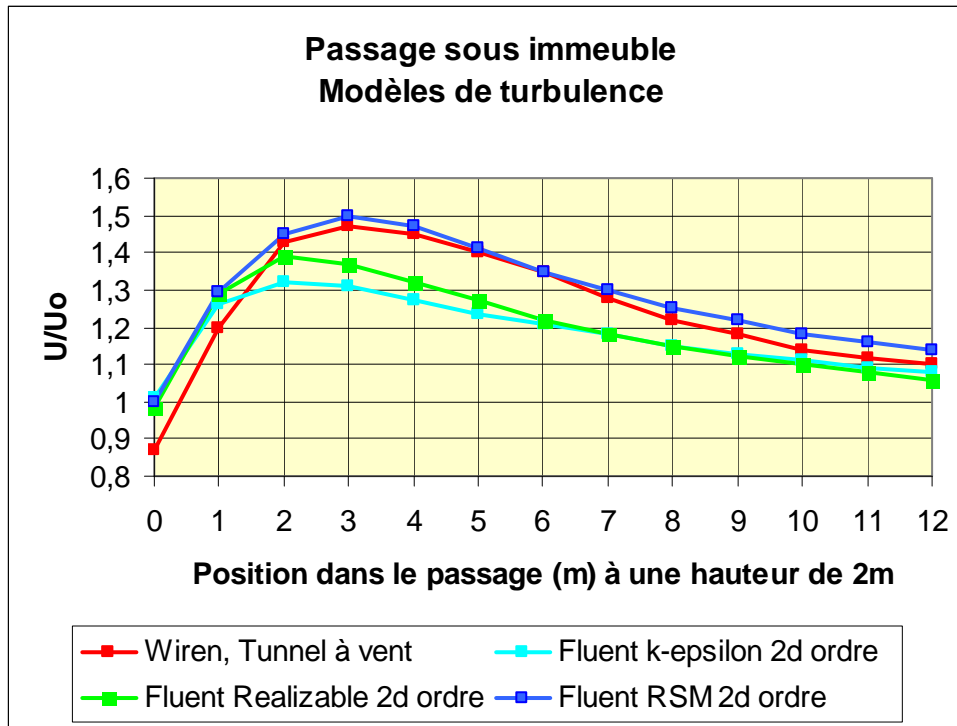
Le graphe suivant compare des simulations réalisées avec les différents modèles de turbulence (convergés au 2d ordre) et le test en tunnel à vent de Wiren.

Le modèle de turbulence k-epsilon standard ne donne pas un mauvais résultat dans ce cas, dans le sens où il permet de constater que le passage est un endroit inconfortable et que l'intensité maximale d'inconfort se situe dans le premier tiers du passage. L'estimation de la position de l'inconfort maximale est toutefois déplacée d'un mètre par rapport aux mesures en tunnel à vent et la valeur quantitative de l'inconfort est sous-estimée par rapport à l'inconfort réel. Cependant, ce modèle permet une première approximation des zones critiques de vent, en se rappelant qu'il a tendance à sous-estimer les accélérations du vent.

Le modèle k-epsilon Realizable améliore quantitativement l'estimation de l'inconfort par rapport au modèle k-epsilon standard. Toutefois ce modèle prédit la

position maximale d'inconfort avec la même erreur que le modèle k-epsilon standard et sous-estime également l'inconfort de manière générale.

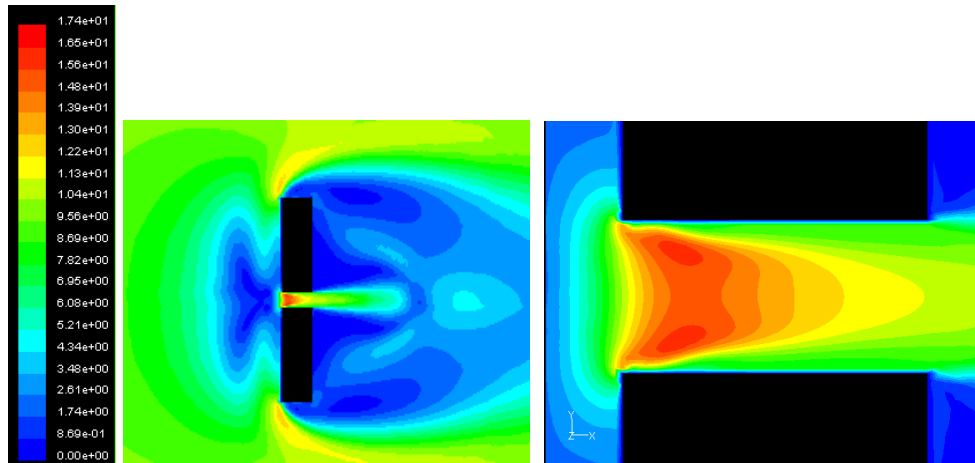
En revanche, le modèle Reynolds Stress (RMS) donne des résultats quantitatifs remarquables au niveau du confort des piétons dans les passages sous immeuble. Ce modèle permet non seulement d'identifier les zones critiques mais aussi d'observer précisément quelles sont les positions critiques et quelles sont les amplitudes d'inconfort probables.



Le modèle de turbulence RSM devrait donc être utilisé dans toutes les études du confort des piétons pour les zones critiques du vent car il donne de très bon résultat pour l'évaluation des distributions moyennes du vent. Cette conclusion vient valider le choix théorique que nous avons fait d'utiliser le modèle RSM dans toutes nos simulations du vent autour des bâtiments.

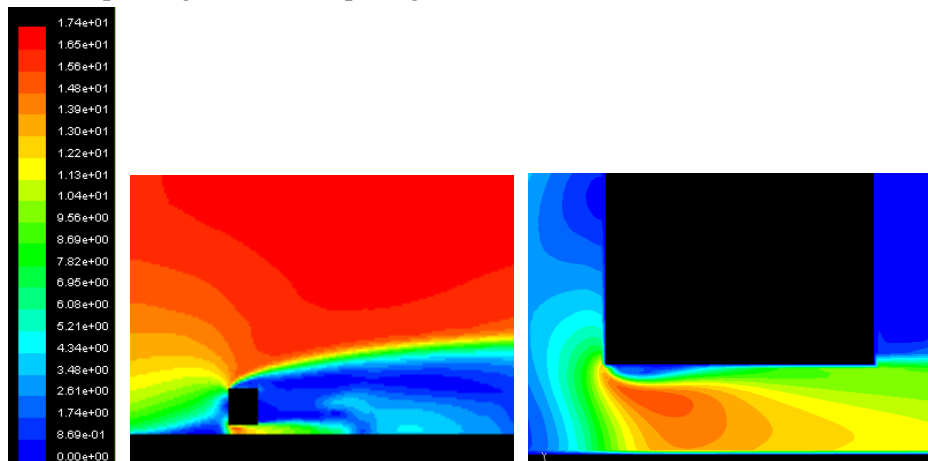
Il faut préciser que toutes nos simulations sont réalisées de manière stationnaire, c'est-à-dire sans tenir compte des fluctuations temporelles du vent. Pour prendre en compte la turbulence de manière plus précise, il faut utiliser un modèle instationnaire, idéalement un modèle de turbulence LES. De plus, signalons que des simulations temporelles permettraient d'évaluer l'amplitude spatiale des mouvements d'air autour de la solution moyenne donnée par le modèle stationnaire.

Les graphiques colorés ci-dessous donnent la répartition des vitesses de l'air à 2m du sol autour de ce bâtiment de 18m de haut avec trou sous immeuble, en fonction du profil de vent choisi par Wiren. Ils proviennent de nos simulations FLUENT réalisées à l'aide du modèle de turbulence RSM au second ordre. Le graphe de gauche présente l'écoulement général du vent autour du bâtiment et le graphe de droite est un agrandissement du passage sous le bâtiment. On voit bien les zones à faible vitesse de vent et les trois points critiques pour le confort des piétons à savoir les deux coins et le trou sous immeuble.



Plan : vitesses de l'air à 2m du sol et agrandissement au niveau du passage

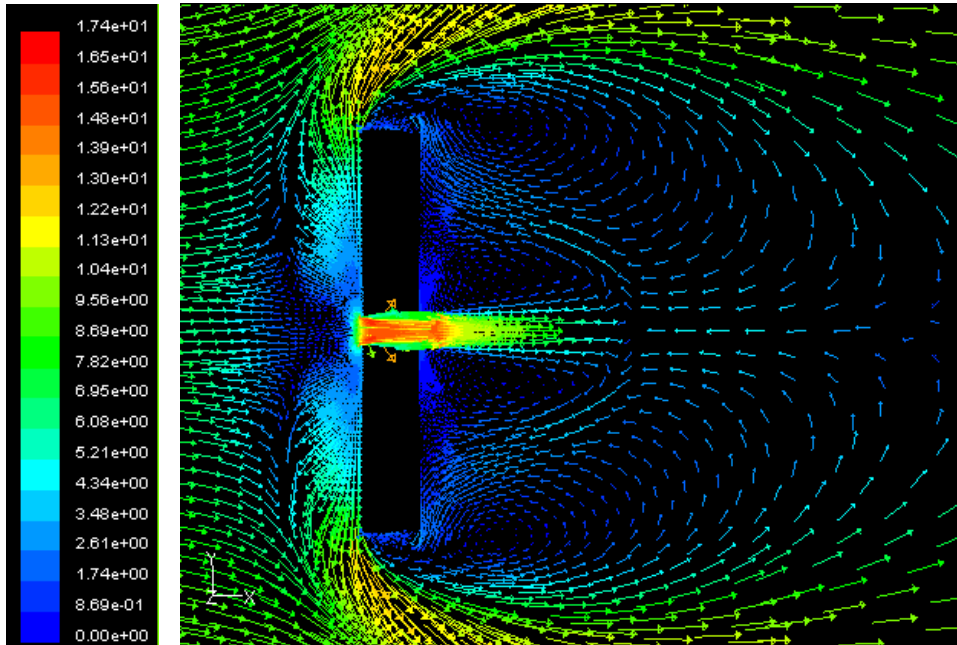
Le graphe suivant présente les répartitions des vitesses de l'air autour de ce bâtiment en coupe, au niveau du passage sous le bâtiment. On observe que le jet d'air se prolonge au-delà du passage.



Coupe : vitesses de l'air et agrandissement au niveau du passage

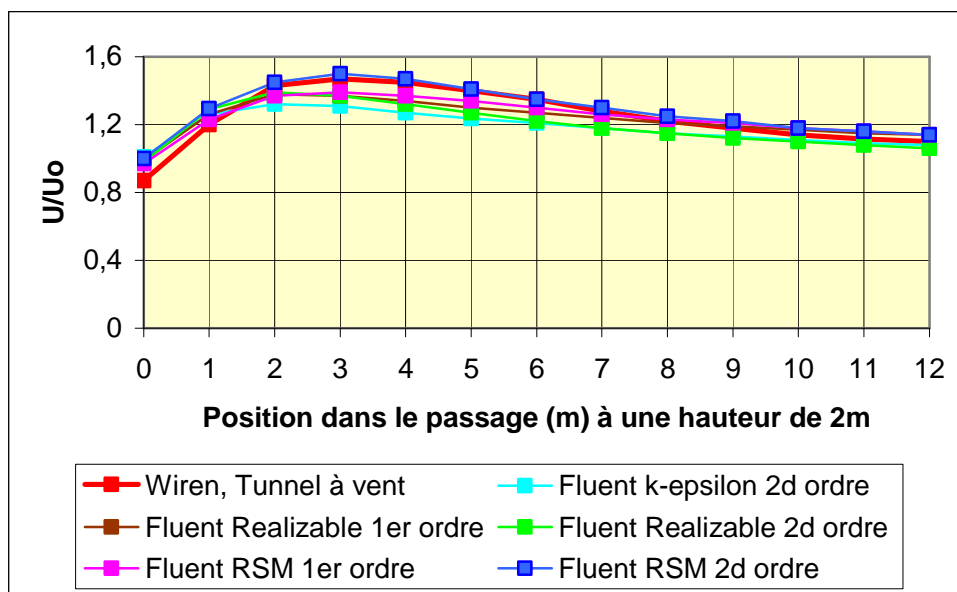
Les agrandissements au niveau du passage du plan et de la coupe donnés ci-dessus sont importants parce qu'ils montrent l'intérêt principal d'utiliser les simulations numériques pour comprendre les mouvements d'air autour des bâtiments, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. En effet, les simulations CFD donnent des résultats quantitatifs en chaque point du domaine simulé alors que les essais en tunnel à vent se limitent à la mesure d'un certain nombre de points prédéfinis. Ainsi, l'étude en tunnel à vent de Wiren portait sur le critère d'inconfort au vent au centre du passage sous immeuble et à une hauteur de 2m par rapport au sol. Mais les résultats de simulation présentés ci-dessus montrent qu'il ne s'agit pas de l'emplacement le plus critique au niveau du vent puisque les deux zones d'accélération maximale de la vitesse de l'air sont décentrées : l'endroit le plus critique est situé à 3m de l'entrée en longueur et 1.4m du centre en largeur. Bien sûr dans ce cas-ci les conclusions de l'étude ne seront pas très différentes, mais cela pourrait s'avérer crucial dans des situations géométriques complexes ou pour une orientation du vent non perpendiculaire au bâtiment. Cette remarque souligne l'avantage réel qu'offrent les simulations CFD au niveau de l'étendue des résultats quantitatifs générés par une seule simulation et de la compréhension des mécanismes des mouvements d'air autour des formes complexes.

Le graphe ci-dessous montre quant à lui une représentation graphique de l'écoulement de l'air autour de ce bâtiment à une hauteur de 2m du sol grâce aux vecteurs-vitesse. Il s'agit d'une représentation à la fois qualitative et quantitative des résultats de simulation CFD, éclairant la dynamique du processus de l'écoulement de l'air autour des bâtiments. Les simulations CFD sont donc véritablement un outil de compréhension des mouvements d'air.



Vecteurs vitesse

Si on représente l'ensemble de nos résultats de simulations pour ce premier cas test, sur une même échelle du rapport U/U_0 allant de 0 à 1.6, on voit que l'ensemble de ces résultats de simulation permettent de déterminer les zones d'inconfort pour les piétons avec une précision quantitative de la survitesse maximale de 15%, ce qui est largement suffisant pour estimer les zones critiques autour d'un bâtiment.

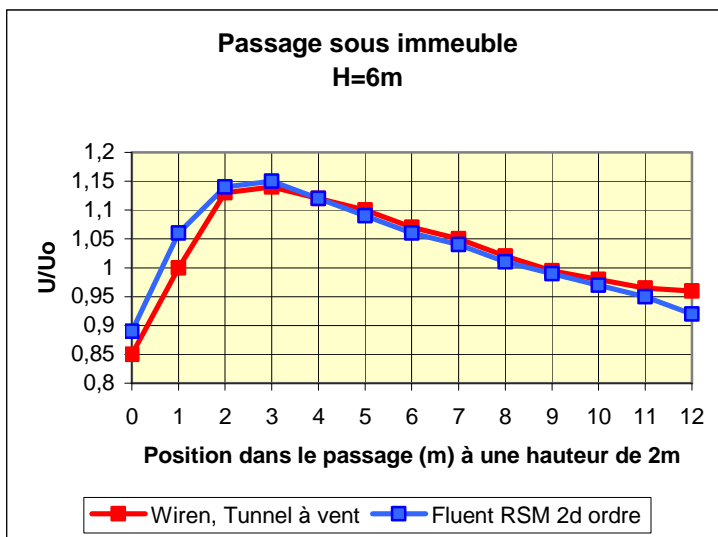


Tous les résultats de simulation sont bons à 15% près dans les passages sous immeuble.

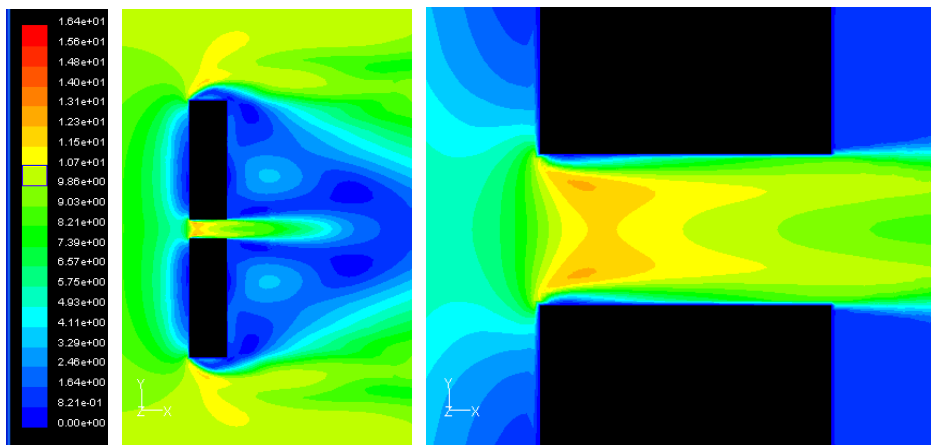
Cependant, pour une analyse poussée du comportement du vent au niveau piéton, de la position précise des zones de survitesses et d'une évaluation quantitative des risques d'inconfort rencontrés, certains modèles sont mieux adaptés. Nous recommandons l'utilisation du modèle de turbulence RSM au second ordre.

La même simulation a été réalisée pour un bâtiment de petite hauteur. Les valeurs quantitatives des survitesses du vent dans le passage sous un bâtiment de 6m de haut que nous avons obtenues à partir d'une simulation FLUENT à l'aide du modèle RSM au second ordre sont à nouveau comparées avec les résultats d'un test en tunnel à vent de Wiren. Les valeurs du test en tunnel à vent ont été simplifiées selon une courbe moyenne. Ces résultats présentent une équivalence tout aussi frappante que pour le bâtiment de 18m de haut.

Du point de vue quantitatif, le graphe ci-dessous montre que la simulation numérique donne des résultats remarquables par rapport à l'essai en tunnel à vent pour des mailles d'une précision de 0.2m au niveau du passage et de la face au vent du bâtiment. Ce maillage a été réalisé avec l'utilisation d'une symétrie, ce qui fonctionne très bien.



Les graphes suivants montrent que les mouvements d'air autour du bâtiment de 6 m de haut sont du même type que ceux autour du bâtiment de 18m de haut mais que le rapport U/U_0 a bien sûr fortement diminué et ne cause donc plus vraiment de zone critique au niveau des piétons.



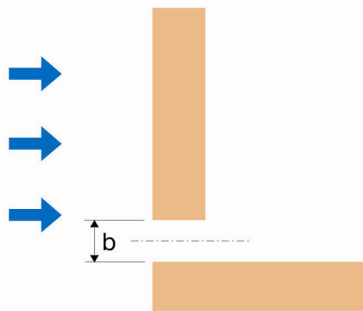
Plan des vitesses du vent à 2m du sol et agrandissement au niveau du passage.

Cette étude nous permet d'affirmer que le logiciel FLUENT est validé pour l'évaluation des mouvements d'air dans les passages sous immeuble. Vu qu'il s'agit d'un cas relativement complexe, au niveau géométrique et au niveau des flux d'air engendrés, nous estimons que la même méthodologie (domaine de simulation large, maillage important et raffiné au sol et le long du bâtiment, modèle de turbulence RSM au second ordre) restera a priori valable pour l'étude des différents effets critiques du vent autour de bâtiments isolés. De plus, ces simulations nous ont convaincu que le logiciel FLUENT est un outil remarquable pour la compréhension des mouvements d'air autour des bâtiments.

4.2.2 Validation de FLUENT pour l'étude du vent autour d'un groupe de bâtiments

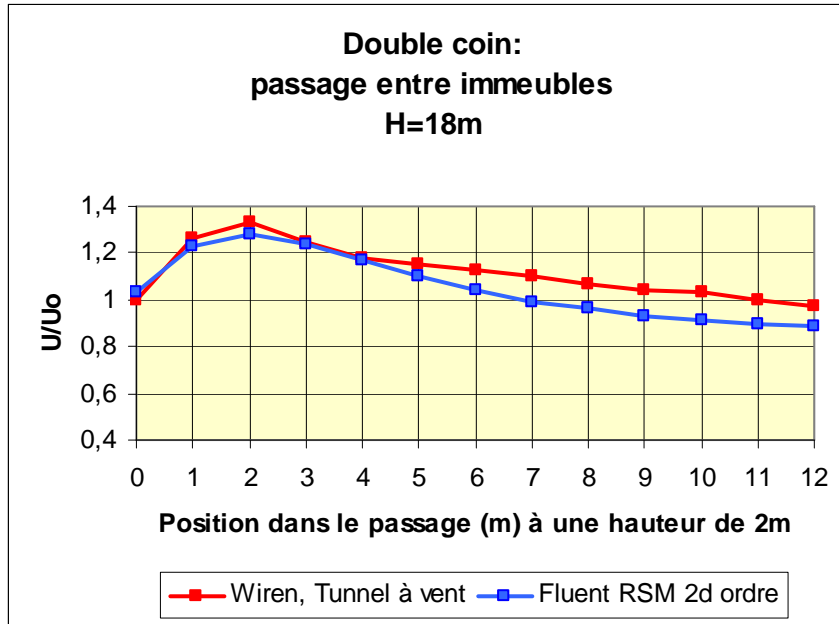
Les simulations suivantes étudient les mouvements d'air autour de **deux bâtiments** afin d'analyser si l'interaction entre bâtiments est également modélisée avec succès. Le choix porte sur des configurations qui ont été modélisées en tunnel à vent par Wiren afin d'avoir une base de comparaison.

La première configuration simulée consiste en deux bâtiments de 18m de haut perpendiculaires et séparés par un passage de 4m entre eux pour un vent perpendiculaire au front linéaire formé par les deux bâtiments. Les niveaux d'inconfort seront évalués au centre de l'espacement entre les deux bâtiments à l'aide du modèle RSM 2d ordre de Fluent et comparés avec les valeurs obtenues par Wiren par essai en tunnel à vent (Wiren 1975).

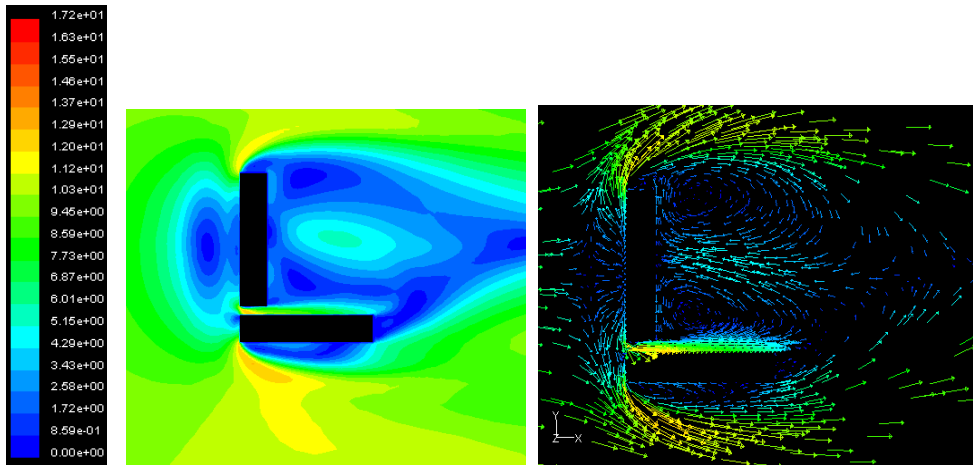


En nous basant sur les résultats obtenus pour l'analyse de l'écoulement du vent autour d'un bâtiment isolé, nous avons directement comparé une simulation réalisée avec le modèle de turbulence RSM au 2d ordre et le test en tunnel à vent de Wiren. Par contre, pour obtenir un maillage aussi homogène que pour les simulations autour d'un seul bâtiment, il est nécessaire d'agrandir les mailles les plus fines. La dimension minimale des mailles le long des façades au vent et du passage entre bâtiments correspond dans ce cas-ci à 0.5m de large. Ainsi, nous avons huit mailles sur la largeur du passage entre bâtiments. Cela semble a priori suffisant en fonction des recommandations de Franke & al. qui conseillent de placer au moins deux nœuds entre la limite du domaine (sol, bâtiment,...) et le point d'évaluation de la vitesse de l'air. (Franke & al. 2004)

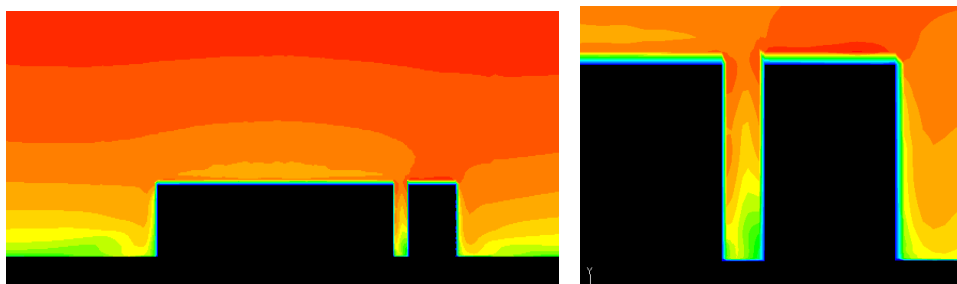
Le graphe ci-dessous donne les résultats respectifs de notre simulation et du test en tunnel à vent à 2 m de haut le long de la ligne médiane du passage entre bâtiments. Les résultats quantitatifs et qualitatifs de l'évaluation du rapport U/U_0 dans le passage sont de très bonnes qualités : la pointe de survitesse maximale est prédite avec une grande précision tant au niveau de son intensité que de sa position dans le passage et l'erreur entre les résultats simulés avec FLUENT et les valeurs du test en tunnel à vent reste comprise dans un intervalle de 15% maximum pour l'ensemble des vitesses situées dans le passage entre bâtiments.



Les schémas ci-dessous donnent l'écoulement horizontal du vent à 2m du sol à l'aide des courbes iso-vitesses et avec des vecteurs-vitesses montrant le mouvement du vent ainsi qu'une coupe et ses agrandissements au niveau du passage. Les plans et les coupes sont représentés avec la même échelle de vitesses du vent. Qualitativement, on peut voir que les simulations numériques offrent des vues rapides, intéressantes et très complètes des phénomènes d'écoulement d'air autour des bâtiments.

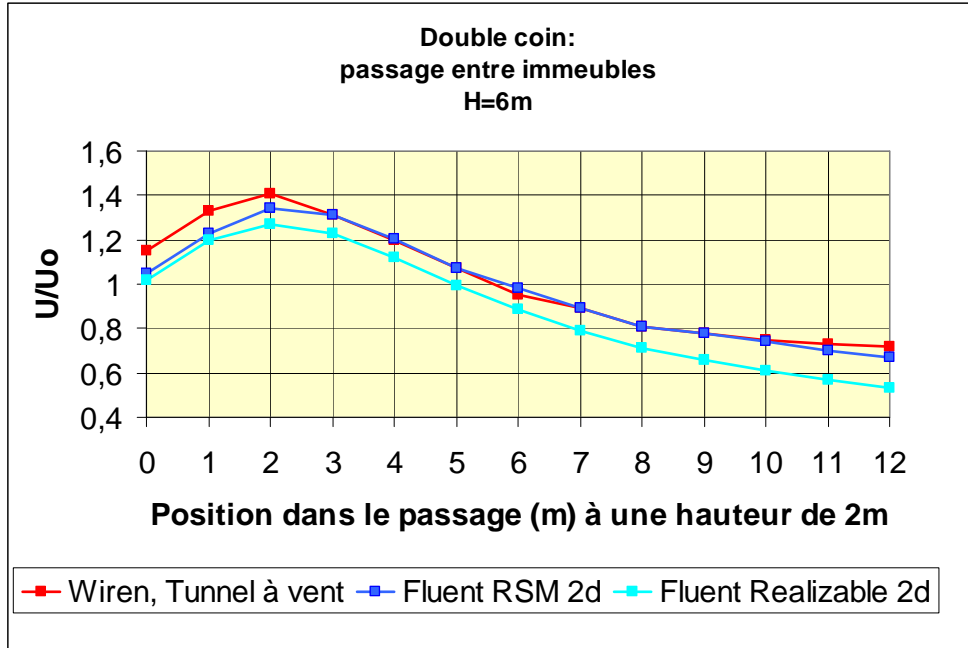


Vitesses de l'air en plan à 2m du sol : courbes iso-vitesses et vecteurs-vitesses.



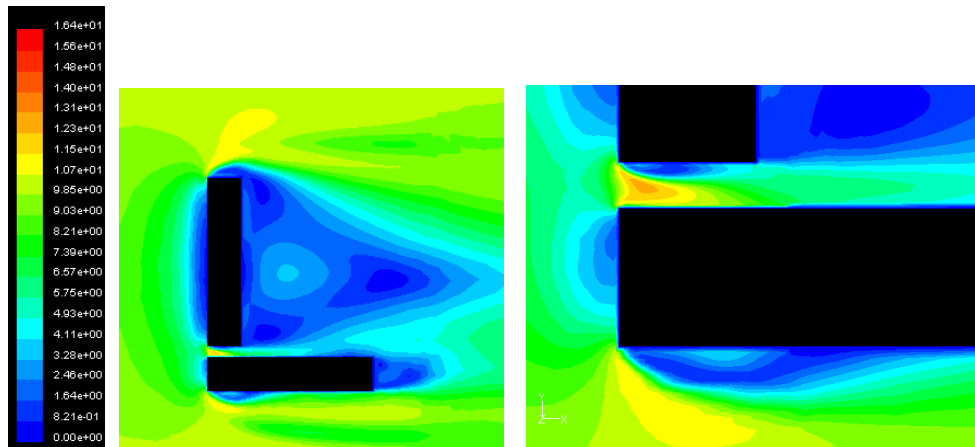
Coupe de la façade au vent des bâtiments et son agrandissement au niveau du passage.

Une seconde simulation est réalisée pour la même configuration de bâtiments et le même maillage (cellules de 0.5m de large) mais pour une hauteur des bâtiments de 6 m. Pour ce cas, nous avons à nouveau comparé une simulation RSM du 2d ordre avec une simulation k-epsilon réalisable du 2d ordre. Les résultats présentés dans le graphique ci-dessous montrent que la différence de résultats entre les deux modèles de turbulence est plus faible que pour un bâtiment isolé. Toutefois, les résultats restent meilleurs avec le modèle de turbulence RSM. Notre choix est donc réellement fixé au modèle RSM 2d ordre.



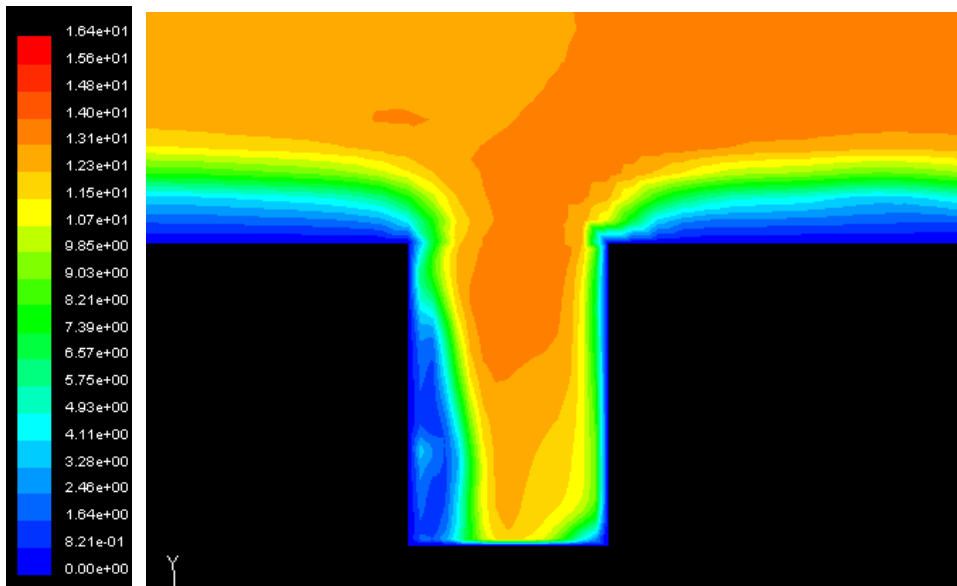
Dans ce cas-ci, on remarque à nouveau une excellente précision quantitative de l'évaluation des survitesses au niveau de la pointe de vitesse maximale et une erreur globale qui reste inférieure à 15% sur l'ensemble du passage pour le modèle k-ε réalisable et à 10% pour le modèle RSM. De plus, la position de la pointe des survitesses est localisée à l'endroit exact où elle se produit.

Les graphes ci-dessous montrent les résultats qualitatifs de la simulation du vent autour de bâtiments de 6m de haut, avec les mailles de 0.5m de large, pour le modèle RSM 2d ordre.



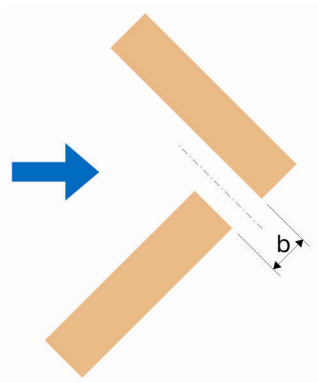
Vitesses de l'air à 2m du sol et agrandissement du plan au niveau du passage.

La coupe ci-dessous réalisée dans le passage à 2m de l'entrée montre qu'il s'y produit un gradient de vitesses très élevé et nettement plus marqué au niveau piéton que pour des bâtiments de 18m de haut. Cette constatation est très importante car elle induit un inconfort accru pour les piétons.

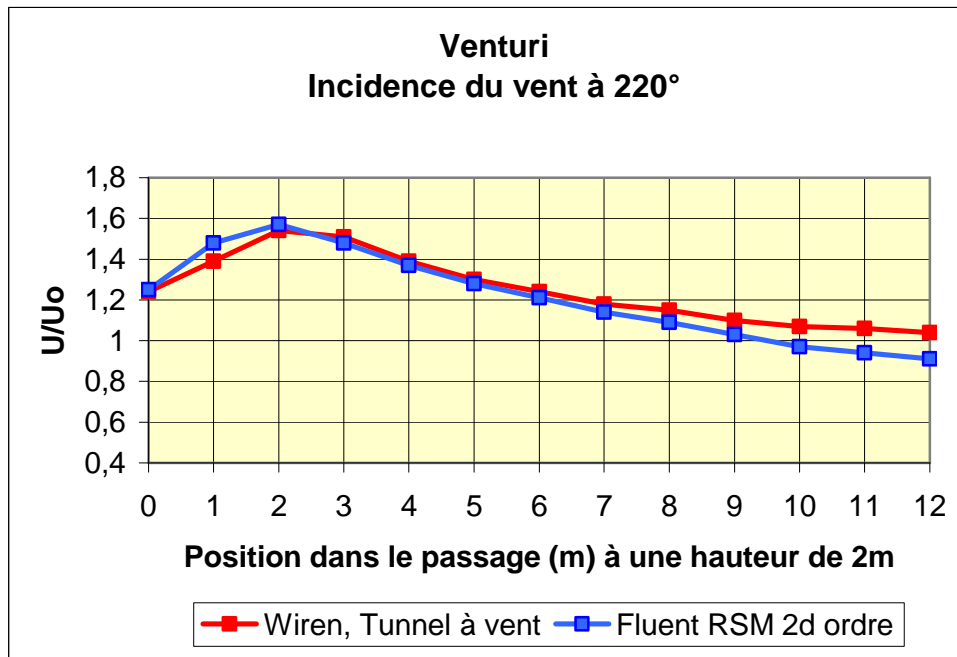


Vitesses du vent en coupe à l'intérieur du passage entre bâtiments (à 2m de l'entrée).

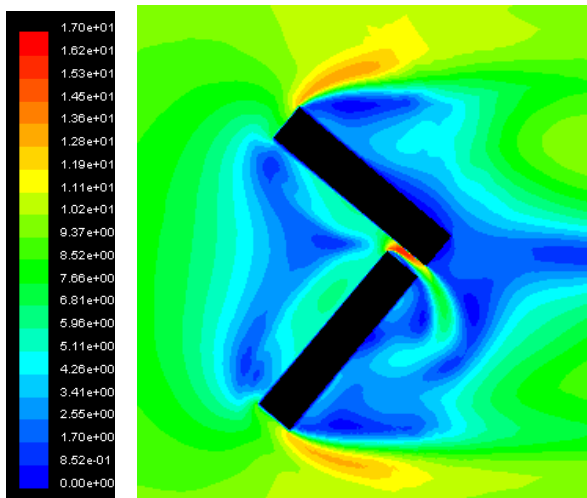
Une seconde configuration a été testée pour la validation de FLUENT comme outil d'évaluation du vent autour de groupes de bâtiments ; il s'agit de l'effet Venturi, représenté ci-dessous. Les bâtiments ont une hauteur de 18m et le passage une largeur de 4m. Il s'agit en fait de la même configuration que précédemment mais pour une incidence de vent de 220°.



Les résultats sont remarquables pour l'effet Venturi, simulé avec le modèle de turbulence RSM 2d ordre et un maillage de 0.5m de côté autour des bâtiments et dans le passage.



Le graphique ci-dessous présente les vitesses de l'air en plan à 2m du sol dans le cas de cette configuration connue pour créer l'effet Venturi. On voit bien que la zone du passage est bien la zone la plus critique mais que les effets de coin de part et d'autre de l'ensemble construit ne doivent pas être négligés pour autant.



En résumé, l'erreur maximale atteinte entre les tests en tunnel à vent et les simulations numériques de groupes de bâtiments est inférieure à 15% en tout point des passages entre bâtiments quelque soit leur hauteur et elle n'est que de quelques pourcents pour la pointe maximale des survitesses. De plus, la position de la survitesse maximale est très bien simulée.

Les simulations réalisées dans cette section nous permettent donc d'affirmer que FLUENT est un bon outil d'évaluation des effets critiques du vent autour d'un groupe de bâtiments. Nous estimons que le logiciel a été validé pour l'évaluation tant quantitative que qualitative des survitesses autour des ensembles de quelques bâtiments.

Cette étude a également montré qu'une taille des cellules du maillage de 0.5m de large au niveau des façades au vent et des zones critiques de l'écoulement est suffisante pour évaluer le confort des personnes autour de groupes de bâtiments.

Ces simulations ont également confirmé que le modèle RSM convergé au second ordre est le modèle de turbulence idéal pour l'étude du vent autour des constructions.

Enfin, ces simulations nous ont convaincu que le logiciel FLUENT est un outil remarquable pour la compréhension des mouvements d'air autour des bâtiments et qu'il est particulièrement utile plus pour l'analyse en trois dimensions des zones où le flux est instable, présente de forts gradients ou des décrochements.

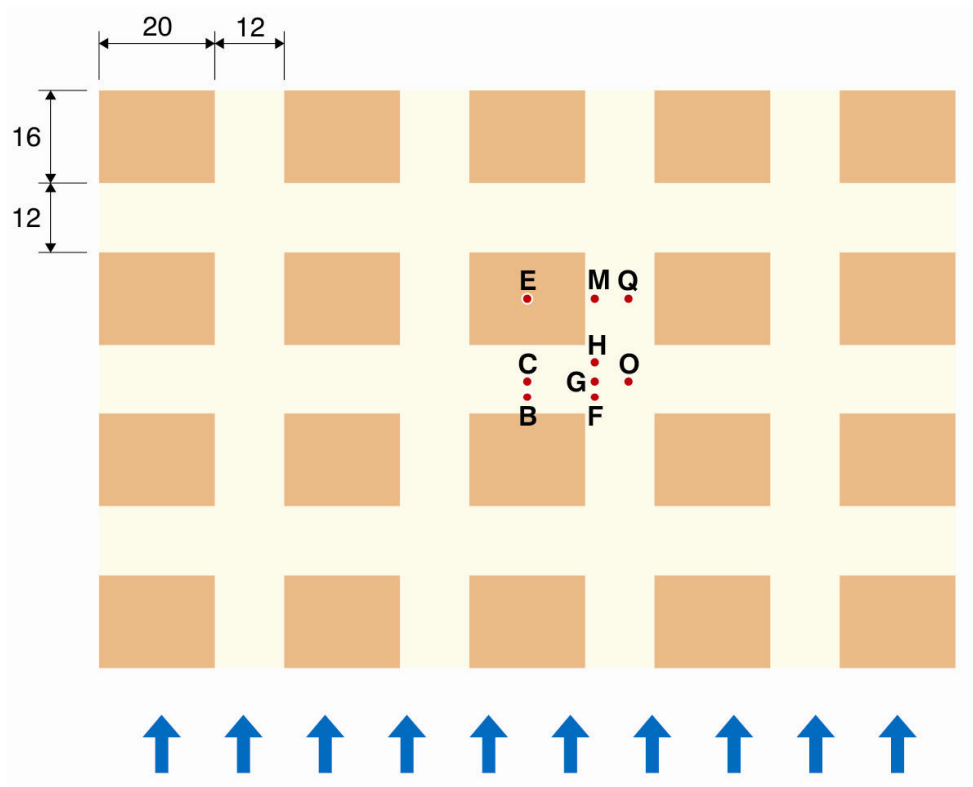
4.2.3 Validation de FLUENT pour l'étude du vent dans un tissu urbain dense

Cette partie consiste à tester la validation des simulations CFD avec Fluent au calcul d'un ensemble urbain. Il s'agit de vérifier le domaine d'application et la précision des évaluations du logiciel FLUENT comme outil de simulations de l'écoulement du vent en ville.

Malgré l'importance fondamentale de l'étude des mouvements d'air en milieu urbain dense, les profils de vent y ont été très peu étudiés jusqu'à présent. Nous nous concentrons dans cette section sur la validation des simulations FLUENT par rapport à une situation urbaine afin de pouvoir juger de l'utilité concrète de cet outil numérique pour l'analyse des vitesses moyennes du vent dans un milieu urbain dense.

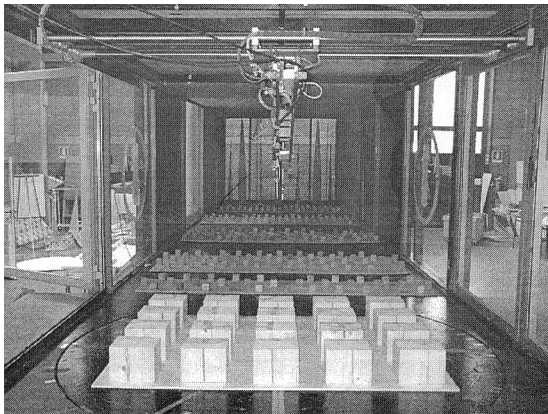
Notre validation est basée dans un premier temps sur une comparaison entre nos simulations numériques réalisées à l'aide de FLUENT et les essais en tunnel à vent de Ricciardelli et Polimeno sur vingt blocs de bâtiments de hauteur homogène et dont le rapport H/W vaut 1.25 (Ricciardelli & Polimeno 2004). Il s'agit donc typiquement d'une situation où les rues perpendiculaires au vent induiront un flux séparé (« skimming flow »), ce qui est le cas de nombreux centre-villes traditionnels.

Mes simulations numériques reprennent la géométrie et le profil de vent utilisés pour les tests en tunnel à vent de Ricciardelli et Polimeno. Les schémas ci-dessous montrent la disposition des vingt blocs de bâtiments et les points de référence pour l'étude quantitative des mouvements d'air. Les bâtiments ont une largeur au vent de 20m, une hauteur de 15m et une profondeur de 16m ; ils sont séparés les uns des autres par des rues de 12m de large dans les deux directions. Les points de référence étudiés quantitativement sont le point C au centre d'une rue perpendiculaire au vent, le point O au centre du carrefour et le point Q au centre d'une rue parallèle au vent. Les points C et O sont situés entre la deuxième et la troisième rangée de bâtiments alors que le point Q est placé au niveau de la moitié de la profondeur de la troisième rangée de bâtiments. Le profil de vent utilisé est le suivant : $U_z = 7.5 (z/15)^{0.28}$ avec une intensité de turbulence de 13% à 15m de haut.



(Ricciardelli & Polimeno 2004).

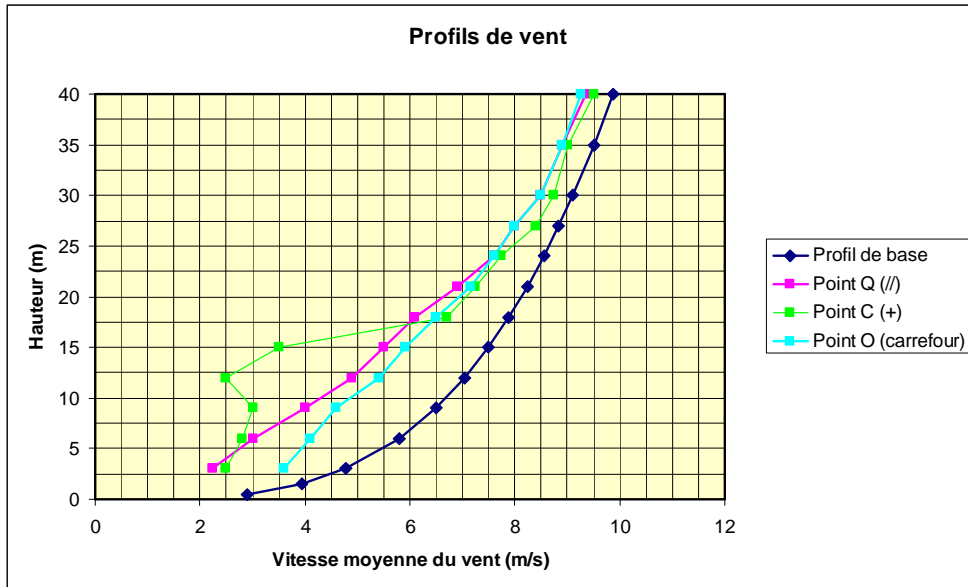
La photo ci-dessous montre la maquette testée et le tunnel à vent CRIACIV d'où ont été tirés les résultats par rapport auxquels nous comparons nos simulations numériques.



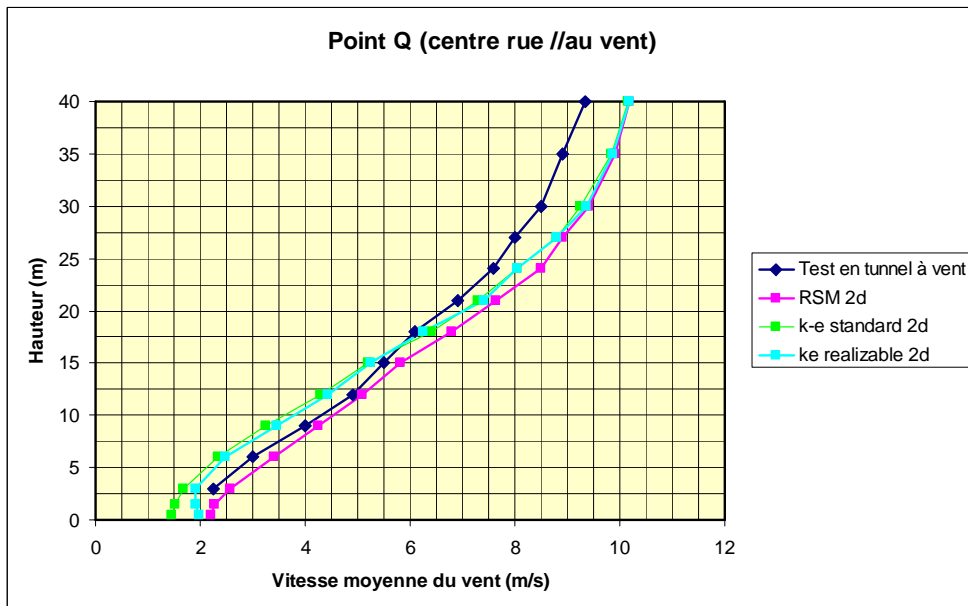
(Ricciardelli & Polimeno 2004).

Les tests en tunnel à vent montrent qu'il y a deux types de profils du vent très différents : le premier se trouve dans les rues parallèles au vent et le second dans les rues perpendiculaires au vent. Les rues parallèles au vent (y compris au niveau du carrefour) présentent un profil qui varie de manière pratiquement linéaire avec la hauteur. Les profils de vent correspondant aux rues perpendiculaires au vent présentent une coupure importante juste en-dessous des toits et des vitesses de l'air plus lentes et assez constantes sur toute la hauteur du canyon. En revanche, l'amplitude de la vitesse du vent au niveau piéton semble relativement homogène sur l'ensemble du tissu urbain. Le rapport U/U_0 reste inférieur à 0.8 à une hauteur de 3m au-dessus du sol pour l'ensemble des points étudiés, ce qui démontre l'effet de protection de ce tissu urbain par rapport au vent.

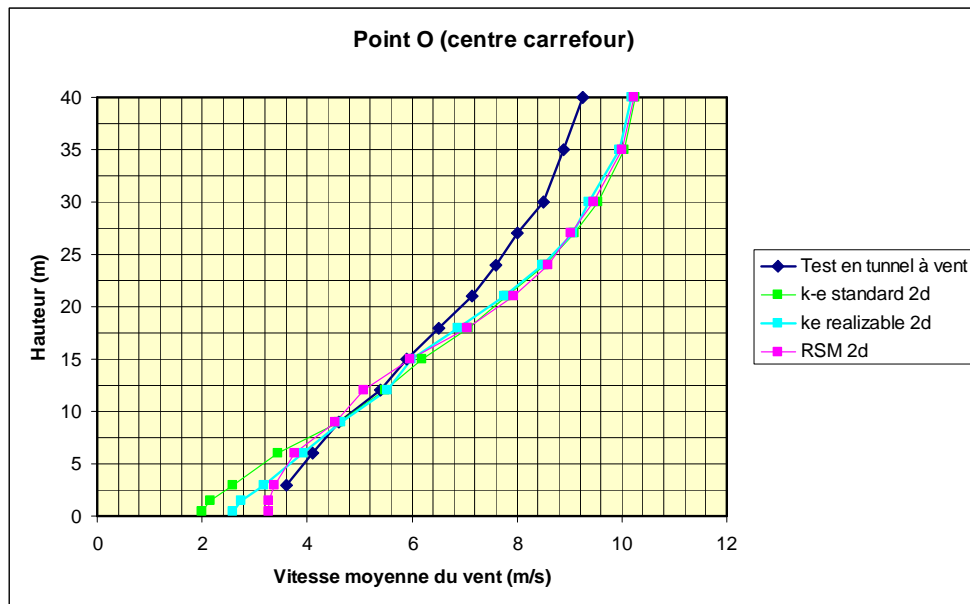
Les résultats des profils de vent mesurés en tunnel à vent sont présentés dans le graphe ci-dessous.



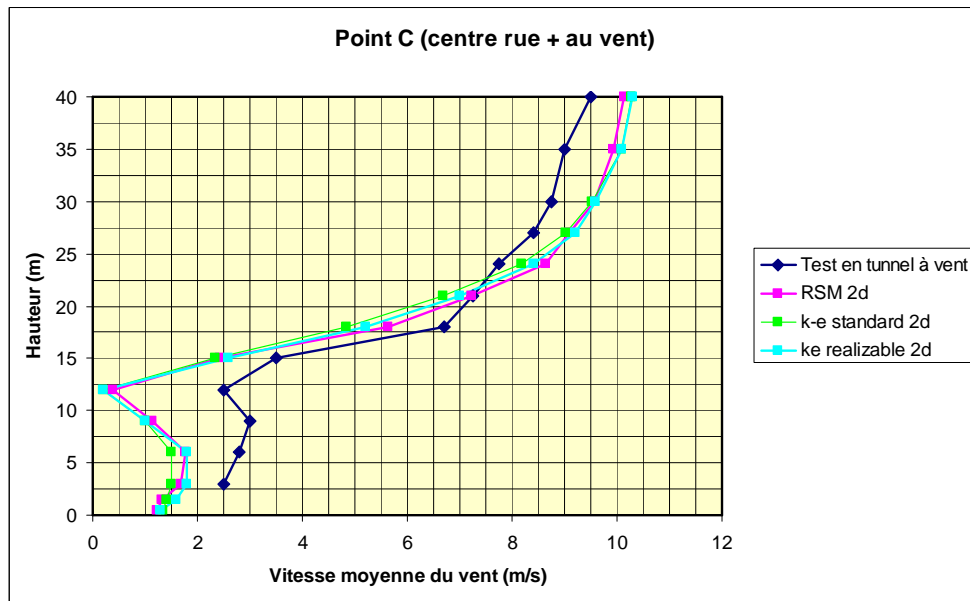
Le graphe ci-dessous permet de comparer les résultats de nos simulations avec ceux des tests en tunnel à vent pour le point Q, situé au centre de la rue parallèle au vent.



Le graphe ci-dessous permet de comparer les résultats de nos simulations avec ceux des tests en tunnel à vent pour le point O, situé au centre du carrefour.



Le graphe ci-dessous permet de comparer les résultats de nos simulations avec ceux des tests en tunnel à vent pour le point C, situé au centre de la rue perpendiculaire au vent.



Nos simulations numériques convergées au 2d ordre montrent que tous les modèles, même le k-ε standard permettent de prédire la forme générale du profil de vent pour les rues parallèles au vent ainsi que la coupure à une hauteur de 12.5m pour des bâtiments de 15m de haut dans le profil de vent des rues transversales. Par contre, la diminution de la vitesse de l'air au niveau des toits à l'endroit de l'inversion du flux d'air est fortement surestimée dans les trois modèles standards.

Au niveau de l'évaluation quantitative des vitesses de l'air à 3m de haut, le modèle RSM standard semble donner des résultats un tout petit peu plus proches des tests en tunnel à vent que le modèle k-ε réalisable mais nettement supérieurs à ceux du modèle k-ε standard.

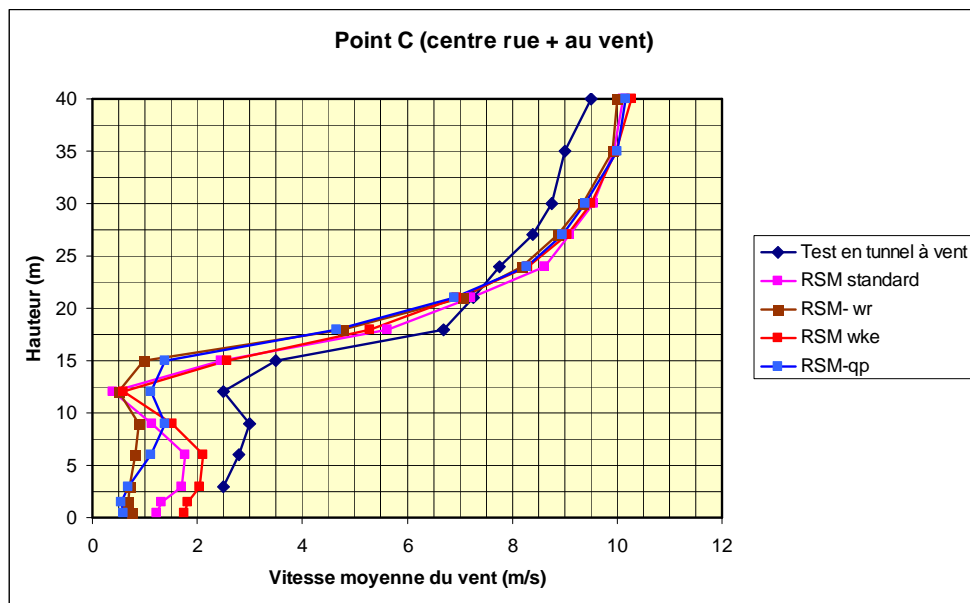
Selon les tests en tunnel à vent, les vitesses du vent mesurées à 3 m de haut dans ce tissu urbain sont comprises entre 1.5m/s et 4m/s et pour les trois points étudiés plus spécifiquement dans cette thèse (Q, O et C) on a 2.25 m/s, 3.75 m/s et 2.5 m/s. Nos simulations numériques donnent les valeurs suivantes à 3m du sol pour ces trois points d'évaluation (Q, O et C) :

- 1.65 m/s, 2.6 m/s et 1.5 m/s pour le modèle k-ε standard, au 2d ordre
- 1.85 m/s, 3.2 m/s et 1.85 m/s pour le modèle k-ε réalisable, au 2d ordre
- 2.55 m/s, 3.35 et 1.75 m/s pour le modèle RSM standard au 2d ordre.

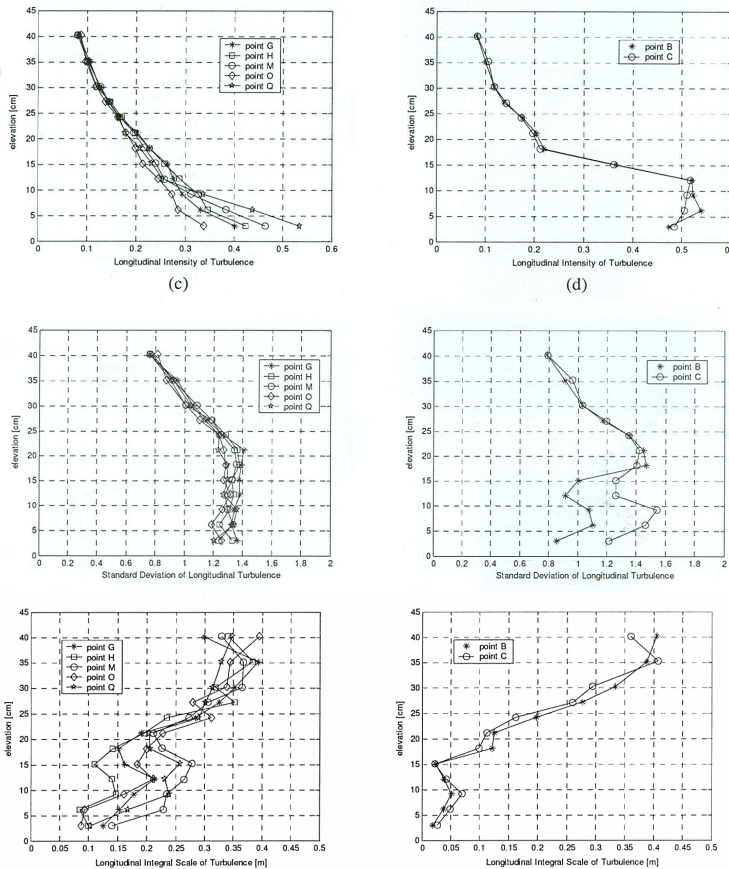
On peut en conclure que d'un point de vue quantitatif à 3m de haut le modèle k-ε réalisable et le modèle RSM semblent donner des résultats plus ou moins équivalents pour ce type de tissu urbain. L'erreur commise par nos simulations sur les vitesses de l'air au niveau de 3m de haut varie :

- pour les profils de vent dans les rues parallèles au vent entre 13% pour le modèle RSM standard et 18 % pour le modèle k-ε réalisable, tous deux convergés au 2d ordre.
- pour les profils de vent dans les rues perpendiculaires au vent (sauf les carrefours) entre 26 % pour le modèle k-ε réalisable et 30% pour le modèle RSM standard.

Pour le dernier cas (point C, au centre de la rue perpendiculaire au vent), les résultats ont également été comparés entre le test en tunnel à vent et les différents paramètres du modèle RSM 2d. On voit qu'il est possible de légèrement améliorer la vitesse de l'air au niveau piéton en utilisant le paramètre « Wall B.C. from k Equation » (c.à.d. wall boundary conditions for the Reynolds stresses from de k equation) mais ce résultat ne concerne qu'un point spécifique ce qui ne nous permet pas d'en assurer la validité sur l'ensemble du tissu urbain. Par ailleurs, les paramètres « wall reflection effects » et « Quadratic pressure-strain model » améliorent la verticalité du profil de vent à l'intérieur du canyon mais y soustiment fortement la vitesse moyenne de l'air à ce point spécifique.



Cet article de Ricciardelli et Polimeno étudie également la turbulence dans les rues en milieu urbain dense. (Ricciardelli & Polimeno 2004).



(Ricciardelli & Polimeno 2004).

Malheureusement ce type de profils de turbulence ne peut pas être obtenu avec une simulation CFD avec assez de précision... En effet, le modèle RSM ne permet pas d'évaluer précisément la structure de turbulence car il a été créé pour valoriser la vitesse moyenne. Nous allons donc résumer les résultats de Ricciardelli et Polimeno.

Dans le canyon parallèle au vent, l'intensité de turbulence est maximale à proximité du sol. Pour une hauteur de 3m, l'intensité de turbulence est comprise entre 0.34 et 0.54 alors qu'elle vaut 0.17 sans les bâtiments. Cet intervalle assez large ne provient pas de la variabilité du paramètre σ mais bien des modifications de la vitesse moyenne du vent. Dans les rues parallèles au vent, la variabilité de la vitesse RMS n'est que de 15%, alors que la variabilité de l'intensité de turbulence est de 50%. Dans les rues perpendiculaires au vent, l'intensité de turbulence est plus élevée mais plus constante que dans les rues parallèles au vent. On y trouve en général des valeurs d'intensité de turbulence de 0.47 à 0.54. On pourrait donc choisir une intensité de turbulence moyenne de 0.45 pour les rues parallèles au vent et de 0.5 pour les rues perpendiculaires au vent, dans ce type de tissu urbain dense.

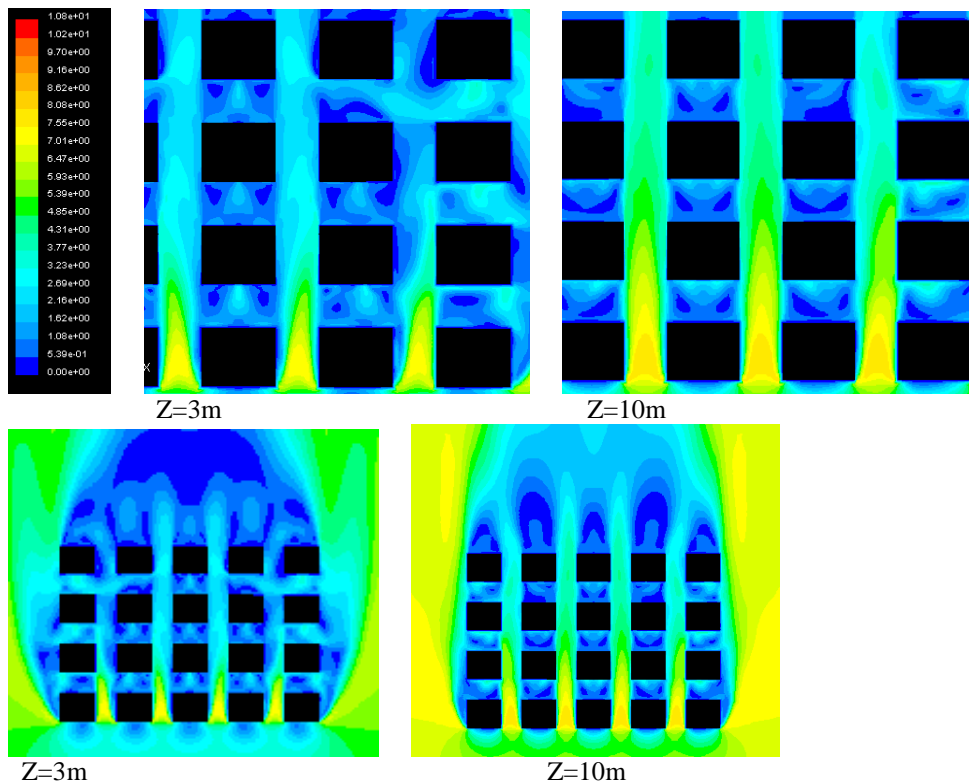
Même si la comparaison détaillée des critères de confort par rapport au vent montre que théoriquement il serait idéal de prendre en compte la turbulence, le manque de données accessibles sur les niveaux de turbulence autour des bâtiments et la grande difficulté à modéliser ou à mesurer précisément ce type de paramètres pour un très grand nombre de cas variés, nous incite actuellement à promouvoir en première approche un critère de confort simplifié basé uniquement sur la vitesse moyenne du

vent ($U \leq 5\text{m/s}$), ce qui simplifie son évaluation et donne des résultats plus uniformes pour les différents utilisateurs et plus facilement compréhensibles pour les différents acteurs intervenant dans les projets urbains. A long terme, bien entendu, il serait idéal de développer une connaissance précise de la turbulence locale en milieu urbain mais elle reste encore difficilement modélisable à l'heure actuelle.

Pour les rues perpendiculaires au vent, le flux d'air intérieur au canyon interagit relativement peu avec l'air au-dessus des toits, ce qui ne permet pas d'évacuer de manière significative la pollution générée (voitures,...) dans ce type de rues.

Cependant, une étude réalisée en comparant des tests en tunnel à vent et des mesures sur site réel a investigué l'influence du trafic sur la vitesse moyenne de l'air et sur ses composantes de turbulence. Une conclusion essentielle de cette étude est qu'on trouve une concentration de polluants plus faible dans le cas d'un trafic sur deux bandes en sens inverse que si la même pollution était générée sans le mouvement des voitures. En fait la composante de vitesse de l'air dans le sens du canyon est fortement dépendante du trafic, alors que la composante de vitesse perpendiculairement à l'axe de la rue reste inchangée. Le cas d'un trafic à deux bandes induit une intensité de turbulence nettement plus élevée que dans un canyon vide (Kastner-Klein & al. 2001).

Les graphiques ci-dessous présentent la distribution des vitesses du vent à 3 m et à 10m de haut selon nos simulations FLUENT avec le modèle RSM standard convergé au second ordre. La même échelle des vitesses est valable pour tous les graphiques. Le vent provient du bas de la feuille. Signalons toutefois que ces simulations donnent des résultats moyens qui ne rendent donc pas compte de l'amplitude dynamique des mouvements d'air réels. Il serait donc extrêmement intéressant de réaliser dans le futur des simulations dynamiques afin de pouvoir mettre en évidence les cycles temporels des écoulements qui se produisent autour des bâtiments.



Ici encore, la perception de la répartition des vitesses sur l'ensemble du domaine de simulation nous semble un grand avantage par rapport à la mesure limitée à des points précis pour les tests en tunnel à vent.

Cette section de notre thèse montre que l'effet de protection du vent au niveau piéton dans un tissu urbain dense est bien modélisé par le logiciel FLUENT. Même si les valeurs quantitatives de la vitesse moyenne de l'air à 3m de haut sont plus éloignées des résultats du test en tunnel à vent (différence de 20 à 30% pour un modèle RSM convergé au 2d ordre selon les paramètres de simulation utilisés) que dans le cas de la simulation du vent autour d'un bâtiment isolé et d'un groupe de bâtiments (erreur inférieure à 15%), cette incertitude concerne de faibles vitesses de vent, ce qui n'est pas gênant pour l'étude du confort des personnes à l'extérieur.

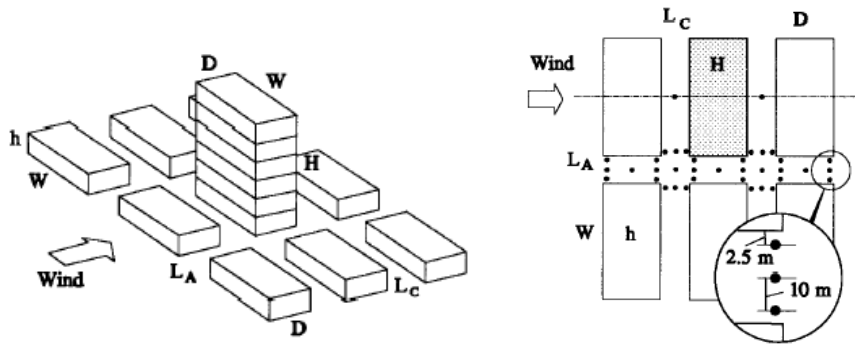
Ce n'est pas une équivalence parfaite de la vitesse de l'air point par point qui nous intéresse mais la possibilité de prévoir, dans le tissu urbain, les zones où telle ou telle activité est possible et les impacts que la morphologie urbaine induit sur la possibilité de créer des espaces publics confortables. C'est donc du point de vue des architectes que nous estimons que les simulations numériques CFD sont bien validées pour évaluer le confort piéton lié au vent et analyser les conséquences de leurs choix de conception sur le microclimat local.

Par contre, cette validation de FLUENT pour l'étude du vent autour des bâtiments montre qu'il est très difficile d'obtenir une bonne modélisation du profil exact de l'air dans les rues perpendiculaires au vent associé à une évaluation correcte de la vitesse du vent au niveau piéton. Pour des études telles que la ventilation naturelle des bâtiments nous conseillons de garder une vitesse de l'air constante sur toute la hauteur du canyon, tout en modélisant la vitesse de l'air au niveau piéton à l'aide du modèle RSM standard. Signalons toutefois que cette étude s'est basée sur trois points ponctuels. Une seconde étude sera donc réalisée pour analyser la répartition des vitesses de l'air de manière moyenne sur l'ensemble de plusieurs rues à une hauteur plus proche du sol. Nous pourrions donc tester de manière plus globale l'utilisation des paramètres « wall reflection effects » et « Quadratic pressure-strain model » qui améliorent la verticalité du profil de vent à l'intérieur du canyon.

Une **seconde étude de validation** a été réalisée pour comparer les résultats de nos simulations FLUENT au sein d'un morceau de **tissu urbain** avec des essais réalisés en soufflerie aérodynamique sur la même configuration bâtie. Cette étude analyse la répartition des vitesses dans un milieu urbain dense dans un plan horizontal situé à 2m du sol.

Cette seconde vérification est basée sur les tests en tunnel à vent de Stathopoulos et Wu. Ces expériences en tunnel à vent ont été réalisées avec un profil de vent moyen de type urbain ($a=0.25$) qui est également utilisé dans nos simulations. Nous avons choisi la référence $U_{10\text{météo}} = 5\text{m/s}$ et 14% d'intensité de turbulence au sol. La vitesse de référence à 2m du sol est $U=2.08\text{m/s}$.

Les dessins ci-dessous montrent la configuration étudiée pour cette seconde validation et la position des différents points de mesure dans le test en tunnel à vent (Stathopoulos & Wu 1995). Le bâtiment central a été modélisé selon deux hauteurs différentes : la même hauteur que l'ensemble du tissu urbain (19m) et une hauteur égale à quatre fois la hauteur des bâtiments environnants (76m). Les rues présentent une largeur de 25m et les bâtiments périphériques une hauteur de 19m, une largeur (face au vent) de 100m et une profondeur (parallèlement au vent) de 50m.

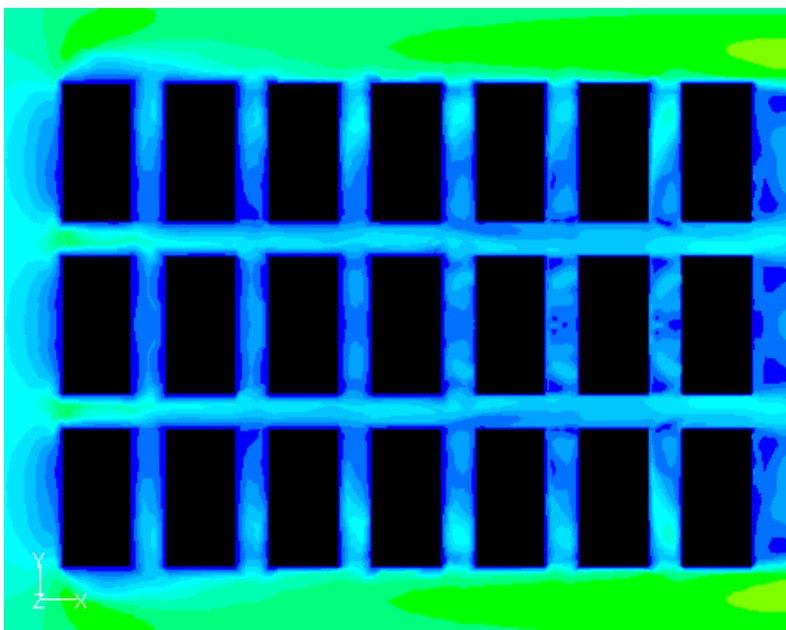


Arrangement des bâtiments et distribution des points de mesure. (Stathopoulos & Wu 1995)

Nous avons réalisé des simulations numériques de cet ensemble urbain avec FLUENT. Le domaine de nos simulations a été déterminé à partir des règles découvertes précédemment dans cette thèse :

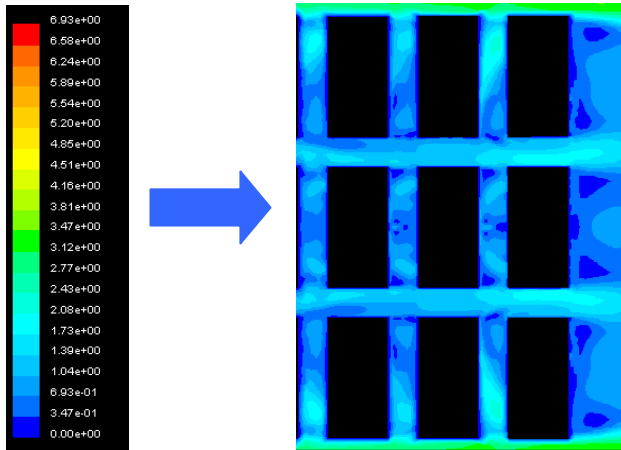
- utilisation de la symétrie pour limiter le domaine de moitié. Le domaine est donc constitué de 1.5 blocs en largeur et 3 blocs en longueur.
- rapport de blocage = 2.5%, ce qui est bien inférieur à 3%. De plus, la forme de la surface d'entrée de l'air respecte la forme de la face au vent du tissu urbain pour des hauteurs de bâtiments identiques.
- espace libre avant le groupe de bâtiment d'une longueur égale à $10h$ où h est la hauteur des bâtiments du tissu urbain ($h=19\text{m}$).
- espace libre après l'ensemble de bâtiments d'une longueur égale à $16h$.
- hauteur du domaine égale à $5H$ où H est le bâtiment élevé, qui vaut dans ce cas-ci $4h$ (où h est la hauteur des bâtiments peu élevés).

Attention ces simulations présentent 4 blocs supplémentaires dans la direction du vent en amont des trois blocs étudiés. Ceci a été réalisé afin de définir un milieu urbain ainsi que de correspondre au mieux à l'essai en tunnel à vent de Stathopoulos et Wu puisque ceux-ci l'ont également fait dans leur essai en tunnel à vent bien qu'ils n'aient pas représenté ces blocs dans les résultats graphiques qu'ils rapportent. Il y a donc 300m de terrain urbanisé (4x un bâtiment de 50m de profondeur + 4 fois une rue de 25m de large) avant les bâtiments analysés. Le graphe ci-dessous montre l'ensemble des bâtiments simulés.

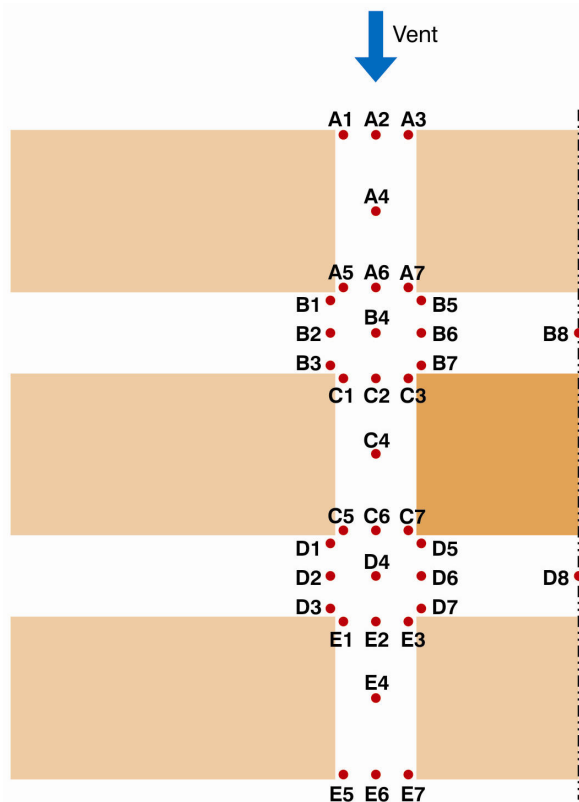


Au niveau du maillage, une hauteur de 0.5 m a été choisie du sol jusqu'à 40m de haut. Par contre, le maillage est nettement moins précis dans le plan horizontal où les mailles sont de 2mx2m dans la zone d'analyse des vitesses de vent. Le maillage comprend environ deux millions de cellules.

Le graphe ci-dessous montre la répartition des vitesses de vent simulées par FLUENT dans ce complexe urbain à 2m du sol. Le vent provient de la gauche. On voit que les vitesses de l'air sont faibles sur l'ensemble du domaine analysé.



Les résultats quantitatifs du rapport U/U_0 ont été regroupés dans un tableau ci-dessous afin de comparer les résultats obtenus par le modèle ke-realizable 2d et par le modèle RSM 2d. Les points étudiés sont situés, au centre des rues ou à 2.5m des façades et à 1m par rapport au coin des bâtiments, tous les points étant à une hauteur de 2m par rapport au sol. L'ensemble des points évalués quantitativement dans nos simulations et dans le test en tunnel à vent sont dessinés sur le schéma ci-dessous.



Les tableaux ci-dessous comparent les valeurs moyennes du rapport U/U_0 à 2m du sol dans les tests en tunnel à vent de Stathopoulos & Wu et dans nos simulations réalisées avec le logiciel FLUENT à l'aide de différents modèles de turbulence et de paramètres associés, à savoir le modèle k-epsilon realizable convergé au second ordre, le modèle RSM standard convergé au second ordre, le modèle RSM convergé au second ordre avec le paramètre « Wall B.C. from k Equation » activé, le modèle RSM convergé au second ordre avec le paramètre « wall reflection effects ». Le modèle RSM avec le paramètre « Quadratic pressure-strain model » n'a pas pu converger dans ce cas-ci.

Outil de simulation utilisé	Moyenne du rapport U/U_0 calculée sur l'ensemble du tissu urbain à 2m (37 points : A1 à A7 + B1 à B8 + C1 à C7 + D1 à D8 + E1 à E7)	Moyenne du rapport U/U_0 calculée dans les rues exposées au vent à 2m (23 points : A1 à A7 + B4 + C1 à C7 + D4 + E1 à E7)	Moyenne du rapport U/U_0 calculée dans les rues abritées du vent à 2m (14 points : B1 à B3 + B5 à B8 + D1 à D3 + D5 à D8).
Test en soufflerie	0.52	0.63	0.33
k-ε realizable (2d ordre)	0.39	0.46	0.27
RSM standard (2d ordre)	0.46	0.58	0.28
RSM-Wr (2d ordre)	0.55	0.7	0.27
RSM-wke (2d ordre)	0.4	0.45	0.3
RSM-qp (2d ordre)	/	/	/

Les conclusions sont les suivantes :

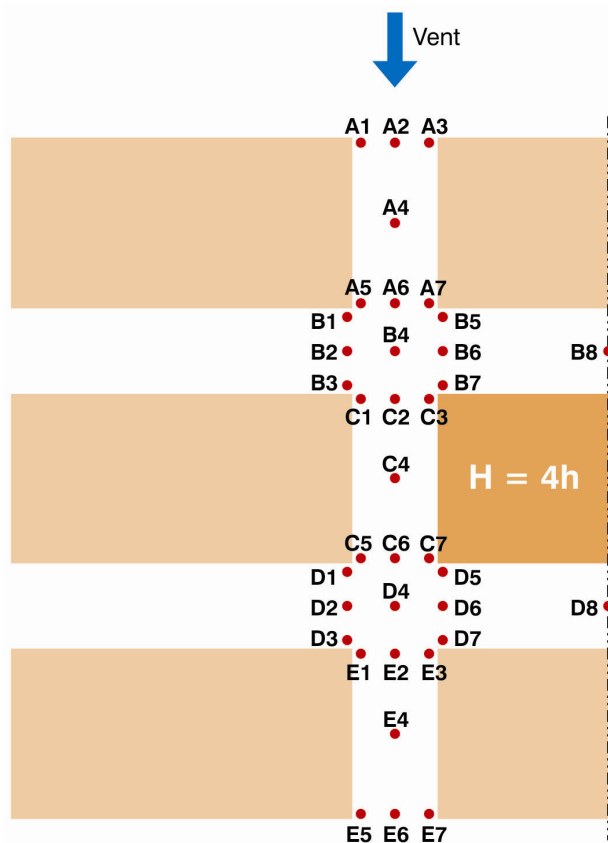
- d'un point de vue qualitatif, l'ensemble des modèles simulent bien le grand effet de protection au vent que constitue une telle morphologie bâtie.
- d'un point de vue quantitatif :
 - pour les rues exposées au vent, le modèle RSM standard prédit nettement mieux le rapport U/U_0 moyen que le modèle k-ε realizable. En effet, l'erreur relative par rapport aux résultats du test en tunnel à vent est de 27% pour le modèle k-ε realizable alors qu'elle n'est plus que de 8% pour le modèle RSM standard. Le paramètre « Wall B.C. from k Equation » est vraiment mauvais pour l'évaluation des rues exposées au vent puisqu'il donne une erreur environ égale à celle du modèle k-ε realizable. En revanche, le modèle RSM avec le paramètre « wall reflection effects » donne de bons résultats avec une erreur relative par rapport au test en tunnel à vent de 11%.
 - pour les sections de rues abritées du vent, l'ensemble des modèles donnent des résultats plus proches, avec une erreur d'estimation sur le rapport U/U_0 moyen de 18% pour le modèle k-ε realizable et le modèle RSM-wr, de 15% pour le modèle RSM standard et de 9% pour le modèle RSM-wke.

Pour l'ensemble du tissu urbain, il devient évident que le modèle RSM standard ou le modèle RSM-wr sont à privilégier par rapport au modèle k-ε réalisable ou au modèle RSM-wke. En effet, l'erreur relative par rapport au test en tunnel à vent est de 25% pour le modèle k-ε réalisable et 23% pour le modèle RSM-wke alors qu'elle n'est plus que de 11.5 % pour le modèle RSM standard et de 6% pour le modèle RSM-wr. La comparaison des différents paramètres utilisés pour le modèle RSM montre que la moyenne totale est légèrement meilleure avec le paramètre « wall reflection effects ». Le modèle RSM-standard reste toutefois un choix de qualité.

C'est donc le modèle RSM (standard ou avec le paramètre « wall reflection effects ») convergé au second ordre que nous gardons comme modèle idéal pour la simulation du vent en milieu urbain dense de hauteur homogène et relativement faible. Il faut toutefois préciser que des erreurs de l'ordre de 40% peuvent toutefois se produire très localement (sur quelques points du domaine simulé).

Cette étude nous permet de conclure que les simulations CFD réalisées à l'aide du logiciel FLUENT en utilisant le modèle RSM standard au second ordre évaluent les rapports U/U_0 moyens au niveau de l'ensemble d'un tissu urbain dense de hauteur homogène ainsi que dans les sections abritées du vent et les rues directement exposées au vent avec une précision supérieure ou égale à 15%. Il est toutefois important de considérer ce type de simulations comme un outil d'aide pour l'évaluation des moyennes de vitesses du vent sur des morceaux d'espaces publics mais pas comme un outil de détermination précise de la vitesse du vent en un point déterminé, à l'intérieur du milieu urbain.

Le même exercice a été réalisé pour le même groupe de bâtiments mais avec un bâtiment central d'une hauteur égale à 4 fois la hauteur des autres bâtiments : $H = 4h$ avec $h=19m$ et $H=76m$.



Un premier maillage a été réalisé pour ce cas d'un milieu dense avec un bâtiment élevé. Le domaine a été agrandi longitudinalement pour correspondre aux critères suivants :

- espace libre avant le groupe de bâtiment d'une longueur égale à 10H où H est la hauteur du bâtiment élevé (H=76 m).
- espace libre après l'ensemble de bâtiments d'une longueur égale à 16H.

Les limites latérales, la hauteur du domaine et la précision du maillage sur la zone d'analyse sont restés identiques. Ainsi, le maillage comprend des cellules d'une hauteur de 0.5 m jusqu'à 40m de haut puis elles s'accroissent rapidement avec la hauteur. Dans le plan horizontal, les mailles sont de 2mx2m dans la zone d'analyse des vitesses de vent. Le maillage comprend environ deux millions de cellules.

Les tableaux ci-dessous comparent les valeurs moyennes du rapport U/U_0 à 2m du sol dans les tests en tunnel à vent de Stathopoulos & Wu et dans nos simulations réalisées avec le logiciel FLUENT à l'aide de différents modèles de turbulence et de paramètres associés, à savoir le modèle k-epsilon realizable convergé au second ordre, le modèle RSM standard convergé au second ordre, le modèle RSM convergé au second ordre avec le paramètre « wall reflection effects ». Vu que l'effet du bâtiment élevé perturbe l'écoulement du vent dans les rues, nous avons choisi de comparer nos résultats avec ceux du test en tunnel à vent à partir des cinq groupes de points suivants : A1 à A7, B1 à B8, C1 à C7, D1 à D8, E1 à E8.

Outil de simulation utilisé	U/U_0 à 2m dans la zone A1 à A7	U/U_0 à 2m dans la zone B1 à B8	U/U_0 à 2m dans la zone C1 à C7	U/U_0 à 2m dans la zone D1 à D8	U/U_0 à 2m dans la zone E1 à E8	U/U_0 sur l'ensemble du tissu urbain
Test en soufflerie	0.37	1.19	1.27	0.5	0.68	0.8
k-ε realizable (2d ordre)	0.57	1.52	1.43	0.57	1.22	1.06
RSM standard (2d ordre)	0.34	1.32	1.3	0.57	1.17	0.94
RSM-Wr (2d ordre)	0.41	0.99	1.07	0.49	0.78	0.75

Il faut noter que la répartition des vitesses de l'air dans ce tissu urbain montre que globalement il s'agit d'une zone protégée du vent ($U/U_0 = 0.8$) mais que les vitesses de l'air deviennent inconfortables pour les piétons dans les zones B et C.

Notons aussi que la survitesse maximale mesurée sur ces 37 points vaut 1.7 pour le test en tunnel à vent, 1.8 pour le modèle k-ε realizable, 1.77 pour le modèle RSM standard et 1.76 pour le modèle RSM-Wr. L'évaluation de la survitesse maximale est donc bien modélisée.

En revanche, les simulations réalisées à l'aide de Fluent ne semblent pas assez précises pour évaluer la répartition des vitesses de l'air dans un milieu urbain dense de faible hauteur comprenant un bâtiment élevé. Le modèle RSM standard s'avère encore une fois nettement supérieur au modèle k-ε realizable mais ses performances ne sont pas suffisantes pour une évaluation précise du confort aux points situés dans le domaine B (surévaluation de 11% des survitesses) et surtout totalement fausses pour le domaine E. La différence moyenne entre le modèle

RSM standard et le test en tunnel à vent pour l'ensemble du tissu urbain est de 17.5%, ce qui est relativement élevé. Le modèle RSM-Wr améliore nettement l'évaluation des zones à faible vitesse et présente une erreur sur l'ensemble du domaine qui est inférieure à 10% mais par contre il donne encore une erreur approchant les 17% pour les zones B et C qui n'apparaissent plus réellement comme des zones à risque pour le confort des piétons.

Nous avons essayé un second maillage plus raffiné en hauteur pour cette configuration construite. En effet, les cellules présentaient une hauteur de 0.5m uniquement jusqu'à 40m de haut alors que le bâtiment mesure 76m de haut. Nous avons donc réalisé un maillage pour lequel les cellules présentent une hauteur de 0.5m de haut jusqu'à 120m, tout en conservant des mailles horizontales de 2mx2m dans la zone d'étude.

Les tableaux ci-dessous comparent les valeurs moyennes du rapport U/Uo à 2m du sol dans les tests en tunnel à vent de Stathopoulos & Wu et dans nos simulations FLUENT réalisées avec ce second maillage, à partir des cinq groupes de points suivants : A1 à A7, B1 à B8, C1 à C7, D1 à D8, E1 à E8.

Outil de simulation utilisé	U/Uo à 2m dans la zone A1 à A7	U/Uo à 2m dans la zone B1 à B8	U/Uo à 2m dans la zone C1 à C7	U/Uo à 2m dans la zone D1 à D8	U/Uo à 2m dans la zone E1 à E8	U/Uo sur l'ensemble du tissu urbain
Test en soufflerie	0.37	1.19	1.27	0.5	0.68	0.8
k-ε réalisable (2d ordre)	0.43	1.54	1.46	0.66	1.17	1.05
RSM standard (2d ordre)	0.3	1.33	1.37	0.63	1.08	0.85
RSM-Wr (2d ordre)	0.32	1.25	1.28	0.51	0.81	0.84

Notons aussi que la survitesse maximale mesurée sur ces 37 points vaut 1.7 pour le test en tunnel à vent, 1.77 pour le modèle k-ε réalisable, 1.78 pour le modèle RSM standard et 1.95 pour le modèle RSM-wr. L'évaluation de la survitesse maximale est donc bien modélisée. La pointe maximale est simulée plus précisément avec le modèle RSM standard (erreur de 5%) qu'avec le modèle RSM-wr (erreur de 15%).

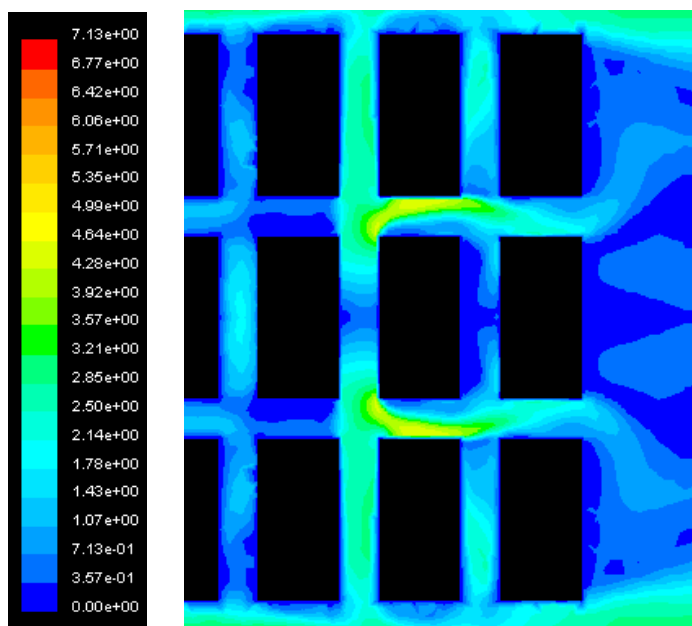
Cette amélioration du maillage sur la hauteur du grand bâtiment crée une amélioration très légère et largement insuffisante pour les résultats donnés par le modèle k-ε réalisable. Pour le modèle RSM standard, les valeurs moyennes sur l'ensemble du tissu urbain sont nettement meilleures que pour le maillage précédent : l'erreur relative par rapport aux tests en tunnel à vent est passée de 17.5% à 6%. Le modèle RSM-Wr donne toujours d'aussi bons résultats pour la vitesse moyenne sur l'ensemble du tissu urbain simulé et donne grâce à ce maillage raffiné une excellente évaluation des survitesses dans les zones B et C. Les survitesses maximales sont bien localisées pour les deux versions du modèle RSM. Toutefois, le modèle RSM standard présente toujours des survitesses inexplicables dans la zone E.

Le modèle RSM-wr s'avère spécialement adapté à ce type d'écoulement d'air en milieu urbain. Ce modèle RSM-wr utilisé avec ce maillage raffiné sur la hauteur du grand bâtiment donne de bons résultats pour les vitesses moyennes de l'air dans chaque zone et sur l'ensemble du tissu urbain. L'erreur relative entre les valeurs du test en tunnel à vent et les résultats de cette simulation reste inférieure à 20% pour l'ensemble des zones étudiées, y compris la zone E, dont la modélisation est plus délicate vu sa position dans le sillage du bâtiment élevé. Pour les vitesses élevées (zones B et C) ainsi que pour la moyenne générale des vitesses du vent sur la totalité du tissu urbain, cette erreur est limitée à 5%. La pointe de survitesse simulée par ce modèle au sein des 37 points spécifiés est toutefois supérieure de 15% à celle du test en tunnel à vent.

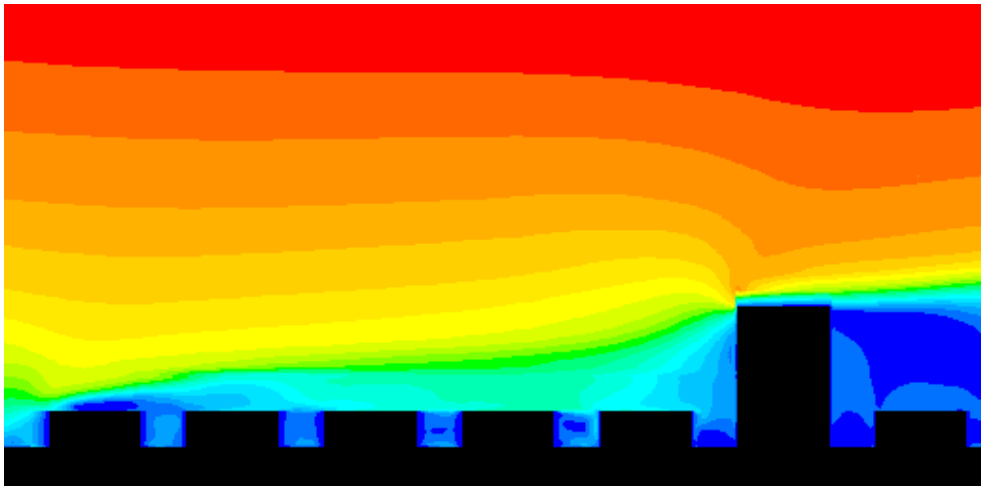
Notre conclusion est donc que ce type de morphologie bâtie peut être analysée avec succès à l'aide du logiciel FLUENT à condition d'utiliser les meilleurs paramètres de calcul et d'assurer une excellente répartition du maillage sur toute la hauteur du bâtiment élevé. A partir de cette simulation, nous pouvons recommander le modèle RSM avec le paramètre « wall reflection effects » convergé au second ordre pour les situations urbaines avec des hauteurs bâties variées. Nous avons prouvé que l'utilisation d'un maillage de 0.5m de haut sur une hauteur égale à 1.5 fois la hauteur du bâtiment élevé permet de donner de bons résultats au niveau piéton.

Il est toutefois important de considérer ce type de simulations comme un outil d'aide pour l'évaluation des moyennes de vitesses du vent sur des morceaux d'espaces publics mais pas comme un outil de détermination précise de la vitesse du vent en un point déterminé, à l'intérieur du milieu urbain. Les zones de survitesses importantes sont bien localisées mais la pointe des survitesses peut être décentrée localement.

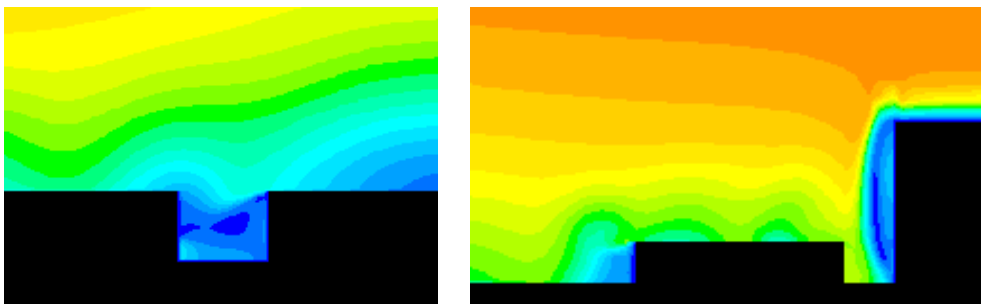
Les graphes ci-dessous montrent les résultats qualitatifs de nos simulations FLUENT pour ce cas complexe d'un milieu urbain de hauteur homogène comprenant un bâtiment élevé. L'échelle des vitesses est la même en plan et en coupes.



Distribution des vitesses de l'air en plan à 2m du sol



Coupe longitudinale passant par B8 et D8.



Coupes transversales passant par le point A4 (à gauche) et par le point C4 (à droite).

Un dernier test a été réalisé avec un maillage identique en hauteur mais raffiné horizontalement selon un quadrillage de 1.5mx1.5m dans la zone étudiée. Les résultats de cette simulation réalisée avec le modèle RSM-wr est donnée ci-dessous.

Outil de simulation utilisé	U/Uo à 2m dans la zone A1 à A7	U/Uo à 2m dans la zone B1 à B8	U/Uo à 2m dans la zone C1 à C7	U/Uo à 2m dans la zone D1 à D8	U/Uo à 2m dans la zone E1 à E8	U/Uo sur l'ensemble du tissu urbain
Test en soufflerie	0.37	1.19	1.27	0.5	0.68	0.8
RSM standard (2d ordre)	0.34	1.17	1.33	0.6	1.02	0.89
RSM-Wr (2d ordre)	0.37	1.27	1.31	0.55	0.7	0.84

Pour ce maillage raffiné horizontalement par des mailles de 1.5x1.5m², l'ensemble des valeurs du modèle RSM-Wr reste dans un intervalle de 10% par rapport au test en tunnel à vent, pour l'ensemble des cinq zones considérées ainsi que l'ensemble du tissu urbain. La pointe de survitesse simulée par ce modèle au sein des 37 points spécifiés reste cependant supérieure de 15% par rapport à celle du test en tunnel à vent.

Le modèle RSM standard convergé sur ce maillage raffiné donne d'excellents résultats pour les zones B et C comprenant les survitesses importantes mais il

surestime toujours fortement les vitesses dans la zone E. C'est donc le modèle RSM-Wr que nous choisissons définitivement pour les simulations réalisées en milieu urbain dense.

Il faut encore noter que la survitesse maximale vaut 1.7 pour les 37 points mesurés par test en tunnel à vent, ce qui correspond à une survitesse maximale de 1.95 pour ces 37 points au sein de notre simulation FLUENT avec le modèle RSM-wr et un maillage raffiné, mais qu'elle s'élève à 2.15 si on tient compte la totalité du domaine simulé à une hauteur de 2m au-dessus du sol. Ainsi, la valeur des survitesses maximales dans notre domaine de simulation dépasse de 10 % la valeur comprise dans les 37 points choisis pour l'étude du test en tunnel à vent. Cette remarque permet de souligner une grande faiblesse des essais en tunnel à vent par rapport aux simulations numériques : il est nécessaire d'y prédéfinir les endroits critiques avant d'en connaître la position avec certitude. Ainsi, la majorité des essais en tunnel à vent ne donnent pas des résultats plus précis au niveau des survitesses critiques dans un milieu urbain dense que les simulations numériques puisque l'incertitude du résultat dépend dans le premier cas de la position exacte du capteur placé dans le modèle réduit et dans le second des erreurs numériques générées par les imprécisions du maillage et des modèles de turbulence utilisés.

4.3 Règles d'élaboration d'une simulation CFD pour l'étude du vent autour des bâtiments

Le plus grand problème actuel concernant l'utilisation des simulations CFD pour l'étude du vent autour des bâtiments est le manque d'informations précises sur les paramètres physiques et numériques du modèle à simuler. C'est pourquoi, nous avons pris le temps de réaliser une étude de validation sérieuse de l'outil FLUENT et une étude des différents paramètres des simulations qu'il offre afin de pouvoir en tirer des règles précises pour la création de simulations ultérieures pour l'étude du confort au vent en milieu bâti.

Nous pouvons déclarer que le logiciel FLUENT est validé pour l'évaluation des vitesses moyennes du vent autour des constructions à condition de répondre aux règles de construction des simulations développées ci-dessous. Ces règles ne correspondent pas à une optimisation de chacun des paramètres décrits mais elles sont suffisantes pour assurer la qualité d'une simulation CFD du point de vue quantitatif et qualitatif.

Les taille du domaine de simulations que nous recommandons doit correspondre aux règles suivantes:

- pour le choix de la hauteur et de la largeur du domaine à simuler, le rapport de blocage ne doit pas dépasser 3%. Le rapport de blocage est le rapport entre la surface au vent des obstacles modélisés et la surface formée par le produit de la hauteur et de la largeur du domaine simulé, qui correspond généralement au plan d'introduction de l'air dans la simulation.
- la forme de la section du domaine à simuler (hauteur x largeur) doit de préférence s'approcher de la coupe de la configuration bâtie modélisée.
- la longueur du domaine s'étend en amont des bâtiments sur une distance de 10H et en aval sur une distance de 16H, où H est la hauteur du bâtiment le plus élevé.

Le domaine modélisé doit comprendre tout obstacle de taille supérieure à 1m dans un rayon de 10H. Le niveau de détail à simuler sur les bâtiments dépend de leur distance par rapport à l'espace public pour lequel la simulation est réalisée. Le bâtiment principal ou les bâtiments qui entourent une place sont ceux qui doivent être modélisés le plus précisément : pour ces bâtiments, tout élément de plus d'1m de large devrait idéalement être représenté dans la simulation. Les bâtiments plus éloignés peuvent par contre être représentés par de simples blocs.

Quand il est possible d'utiliser une condition de symétrie, il faut en profiter pour diminuer le domaine simulé de moitié.

Un maillage de qualité nécessite une grande précision. Le maillage sera non-structuré afin de pouvoir avoir des zones où les mailles sont très raffinées et d'autres zones où elles sont beaucoup moins denses. Le maillage doit être fortement raffiné au niveau piéton et dans les zones où de forts gradients de vent sont prévus. La taille des maillages utilisés pour notre validation de Fluent sur les trois contextes bâtis analysés (un bâtiment isolé, un groupe de bâtiments isolés et un milieu urbain dense) tourne entre un million et deux millions de cellules. Ces maillages sont généralement très peu uniformes avec des mailles de l'ordre 0.5m près des bâtiments et de 10 à 20 m loin des obstacles.

Nous recommandons une dimension minimale des mailles le long des façades au vent et des zones critiques, telles que les passages sous des bâtiments ou entre deux bâtiments très proches l'un de l'autre, de 0.5m de large. Pour la modélisation d'un milieu urbain dense de hauteur relativement faible, une hauteur de maille de 0.5m devrait être appliquée sur l'ensemble du milieu urbain, jusqu'à une hauteur équivalent à deux fois la hauteur moyenne des bâtiments. Pour un milieu urbain dense de hauteur relativement faible comprenant un ou plusieurs bâtiments élevés, cette recommandation devrait être suivie sur l'ensemble du milieu urbain, jusqu'à une hauteur équivalent à 1.5 fois la hauteur du bâtiment le plus élevé. Pour un milieu urbain, le maillage devrait au minimum comprendre des mailles de 2m x 2m de large mais un maillage plus fin est toujours préférable.

Un maillage hexahédrique limite légèrement la diffusion des erreurs numériques par rapport à un maillage tétraédrique et, en général, il facilite la convergence du calcul au second ordre. Cependant, les maillages tétraédriques restent très utiles pour des géométries complexes où la taille du maillage devient une limitation car ils permettent une grande précision du maillage dans certaines zones avec un ensemble de cellules limité par rapport au même cas réalisé avec un maillage hexahédrique.

Le profil de vent utilisé est un élément majeur pour obtenir des résultats de qualité. Un profil de vent de campagne, de vent suburbain ou de vent urbain doit être choisi en fonction du type de tissu environnant le bâtiment étudié. Il est toutefois possible de tirer des conclusions approximatives des résultats escomptés pour n'importe quel type de vent à partir du moment où on possède le résultat pour l'un de ces trois types de vent standards.

Faire varier la vitesse du vent au niveau piéton tout en gardant le même profil de vent a peu d'influences sur la distribution de l'écoulement. Il suffit donc, pour chaque orientation du vent, de faire une simulation à l'aide d'un profil type de vent correspondant à la rugosité générale de la zone.

Nous recommandons les conditions aux limites suivantes pour les parois extérieures du domaine :

- des symétries sur les bords et la surface supérieure du domaine, ce qui force le flux d'air à être parallèle à ces surfaces. Cela implique donc que les dimensions du domaine précitées sont importantes.
- une limite « outflow » pour la surface de sortie de l'air ou parfois une condition de pression nulle pour cette surface. Le bord « outflow » impose une sortie de l'air qui correspond à un flux totalement développé ; il est donc important que la distance entre le bâtiment et la sortie corresponde aux valeurs citées ci-dessus.
- un profil de vitesse du vent variable avec la hauteur pour la surface d'entrée.
- Les bâtiments et le sol présentent une hauteur de rugosité nulle. Il s'agit donc de surfaces lisses, ce qui est nécessaire pour pouvoir suffisamment densifier le maillage au niveau des piétons.

Pour le traitement des zones proches des surfaces de type « mur » (sol, bâtiments,...), nous pouvons dès lors utiliser avec succès le modèle « wall function » pour lequel la couche visqueuse n'est pas résolue mais simulée.

D'un point de vue qualitatif, l'ensemble des modèles de turbulence proposés par FLUENT simulent bien la présence de zones de survitesses autour d'un bâtiment isolé ou d'un groupe de bâtiment ainsi que l'effet de protection au vent que constitue un milieu urbain dense de hauteur homogène et peu élevée.

Tous les modèles de turbulence donnent des résultats nettement supérieurs lorsqu'on les fait converger au 2d ordre plutôt qu'au 1^{er} ordre. Il faut mentionner que les problèmes de convergence proviennent en général d'un maillage trop inhomogène.

D'un point de vue quantitatif, le modèle de turbulence RSM devrait toujours être utilisé dans les études du confort des piétons pour les zones critiques du vent car il donne de très bons résultats pour l'évaluation des distributions moyennes du vent dans les trois contextes étudiés (bâtiments isolés, groupes de bâtiments, milieu urbain dense) quelques soient les hauteurs de bâtiments testées. Ce modèle permet non seulement d'identifier les zones critiques mais aussi de quantifier les amplitudes d'inconfort probables.

Pour les simulations de bâtiments isolés ou de groupes de bâtiments, le modèle RSM standard donne d'excellents résultats. En revanche, pour toutes les simulations d'un milieu urbain dense, il est préférable d'utiliser le modèle RSM de FLUENT avec le seul paramètre « wall reflection effects » activé. Ce modèle RSM utilisé avec le paramètre « wall reflection effects » permet de modéliser de manière très réaliste les profils de vent à l'intérieur du milieu urbain, que les rues soient exposées au vent ou qu'elles soient protégées du vent. De plus ce paramètre améliore fortement la qualité de la distribution des vitesses moyennes au niveau piéton lorsque le milieu urbain comprend des bâtiments aux hauteurs inhomogènes. Il faut vérifier la qualité de la convergence d'une simulation par le monitoring d'une ou plusieurs valeurs clefs dans la région d'intérêt la plus importante pour cette simulation, par exemple la pression sur une façade du bâtiment principal, en plus de l'évolution générale des paramètres de vitesse et de turbulence donnés par le logiciel.

Pour les bâtiments isolés et les groupes de bâtiments, nous avons montré que l'utilisation des règles de conception d'une simulation présentées ci-dessus et l'utilisation du modèle de turbulence RSM de FLUENT convergé au second ordre donnent des valeurs de vitesses moyennes au niveau piéton avec une précision quantitative de 15% pour l'ensemble des survitesses locales du vent et de quelques pourcents (<5%) pour la pointe de survitesse maximale. Les zones critiques par rapport au vent sont localisées très précisément à l'aide de ce type de simulations.

Vu la complexité de l'écoulement du vent en milieu urbain dense, les méthodes CFD ne donnent pas une équivalence parfaite de la vitesse de l'air point par point dans un tel contexte construit. Il faut signaler que des erreurs de l'ordre de 40% ou même plus peuvent se produire très localement. En revanche, en suivant les règles ci-dessus pour la construction d'une simulation dans un milieu urbain dense, nous obtiendrons :

- pour les rues exposées au vent dans un tissu de hauteur homogène, une erreur relative inférieure à 15% par rapport à la moyenne des vitesses mesurées sur l'ensemble de la rue dans un tunnel à vent.
- pour les sections de rues abritées du vent dans un tissu de hauteur homogène, une erreur relative inférieure à 20% par rapport à la moyenne des vitesses mesurées sur l'ensemble de ces sections de rues protégées. Cette erreur est légèrement plus élevée que les autres limites acquises jusqu'à présent mais il est important de se souvenir qu'elle concerne des vitesses de vent très faibles où le confort des personnes n'est pas mis en cause.
- une erreur relative inférieure à 15% par rapport à la moyenne des vitesses mesurées sur l'ensemble du tissu urbain de hauteur homogène.
- une erreur relative inférieure à 20% par rapport à la moyenne des vitesses mesurées pour les différentes zones d'écoulement à l'intérieur d'un tissu urbain de hauteur homogène comprenant un bâtiment élevé, y compris dans la zone de sillage du bâtiment élevé. Cette limite peut être abaissée à 10% en utilisant des mailles mesurant horizontalement 1.5m x 1.5m sur l'ensemble de la zone à quantifier.
- une erreur relative limitée à 5% par rapport à la moyenne des vitesses pour les zones présentant des survitesses du vent à l'intérieur d'un tissu urbain de hauteur homogène comprenant un bâtiment élevé ainsi que pour la moyenne générale des vitesses du vent sur la totalité du tissu urbain.
- une précision de 15% pour la pointe maximale des survitesses générées au pied d'un bâtiment élevé situé au sein d'un milieu urbain dense de petite hauteur.
- une bonne localisation des zones de survitesses importantes en milieu urbain dense bien que les pointes de survitesses peuvent être décentrées localement.

Il est donc important de considérer les simulations CFD de milieux urbains denses comme un outil d'aide pour l'évaluation des moyennes de vitesses du vent sur des morceaux d'espaces publics mais pas comme un outil de détermination précise de la vitesse du vent en un point déterminé, à l'intérieur du milieu urbain. Des résultats encore plus précis peuvent toutefois être obtenus si les maillages sont fortement densifiés, ce qui n'était pas possible dans cette thèse en fonction des moyens de calcul dont nous disposions.

Enfin, ces simulations nous ont convaincu que le logiciel FLUENT est un outil remarquable pour la compréhension des mouvements d'air autour des bâtiments grâce aux résultats obtenus sur l'ensemble du domaine simulé, qui peuvent être présentés en couleur et de manière détaillée en plans, en coupes et en trois dimensions. Cette remarque permet de souligner une grande faiblesse des essais en tunnel à vent par rapport aux simulations numériques : il est nécessaire d'y prédéfinir les endroits critiques avant d'en connaître la position avec certitude. Ainsi, la majorité des essais en tunnel à vent ne donnent pas des résultats plus précis au niveau des survitesses critiques que les simulations numériques puisque l'incertitude du résultat dépend dans le premier cas de la position exacte du capteur placé dans le modèle réduit et dans le second des erreurs numériques générées par les imprécisions du maillage et des modèles de turbulence utilisés.

Pour les essais en tunnel à vent comme pour les simulations CFD, les résultats obtenus correspondent aux vitesses de vent générées par un profil de vent type sur un modèle réduit (physique ou numérique) et ils sont généralement analysés à l'aide des statistiques du vent à la station météorologique la plus proche. Il faut toutefois ajouter que ces résultats comprennent une incertitude liée à la modélisation du site et à la précision de l'outil de simulation choisi (type d'appareils de mesures pour un essai en tunnel à vent, choix du modèle de turbulence pour une simulation CFD,...) mais aussi au choix du vent de référence et à l'écart entre les statistiques du vent à la station météorologique et les données réelles sur le site à un moment donné.

Willemsen et Wisse affirment à partir d'une étude réalisée sur les tunnels à vent des Pays Bas qu'une erreur standard de l'évaluation du vent au niveau piéton pour des tests en tunnel à vent sur un environnement construit en tenant compte des valeurs météorologiques statistiques est de 20% par rapport aux valeurs du vent mesurées sur un site réel (Willemsen & Wisse 2002). Il ne sert donc à rien de se focaliser sur une précision de quelques pourcents pour essayer de prédire avec certitude la vitesse du vent en un endroit d'une place. Par contre, notre étude prouve que nos simulations FLUENT sont bien assez précises pour analyser les zones critiques du point de vue du confort au vent et comparer différents tissus urbains entre eux.

Les simulations réalisées dans cette section nous permettent donc d'affirmer que FLUENT est un bon outil d'évaluation des effets critiques du vent autour des bâtiments. Nous estimons que le logiciel a été validé pour l'évaluation tant quantitative que qualitative des survitesses autour d'un bâtiment isolé, autour d'un petit groupe de bâtiments, en milieu urbain dense de hauteur homogène et relativement faible ainsi qu'en milieu urbain dense de hauteur faible comprenant un bâtiment élevé.

4.4 Outils quantitatifs simplifiés pour l'évaluation du vent autour des bâtiments

L'impact des bâtiments sur la vitesse du vent au niveau piéton est un domaine très complexe que nous avons commencé à étudier à l'aide de simulations CFD et pour lequel des outils quantitatifs simplifiés ont été élaborés.

Les conclusions et graphiques présentés dans cette section proviennent en grande partie de l'analyse des simulations réalisées dans le cadre de cette thèse de doctorat, sur base des règles élaborées au point 4.3 et à l'aide du logiciel FLUENT, qui a été validé pour l'étude du confort au vent des piétons au point 4.2. Ces résultats sont complétés par des références bibliographiques chaque fois que cela s'est avéré utile.

Nos simulations de l'écoulement du vent autour de bâtiments isolés, autour de groupes de bâtiments isolés et au sein d'un milieu urbain dense constituent un réservoir d'informations quantitatives et qualitatives pour la compréhension de l'écoulement du vent autour des bâtiments. Cette étude longue et complexe a abouti à l'élaboration d'abaques pour l'évaluation des survitesses du vent autour de bâtiments. Ces outils graphiques permettent d'évaluer rapidement les risques d'inconfort dû au vent au niveau piéton dans les configurations bâties étudiées.

Ce chapitre consiste à présenter les résultats quantitatifs et qualitatifs de nos simulations CFD en fonction des différents effets critiques du vent autour des bâtiments. Les résultats que nous présentons sont basés sur une étude paramétrique des dimensions des bâtiments pour quantifier plus précisément différents effets critiques du vent au niveau piéton. **Il est important de souligner que nous avons fait le choix de baser nos simulations et nos outils quantitatifs sur une analyse du projet en fonction des mécanismes d'écoulement du vent plutôt qu'une analyse basée uniquement sur la forme des bâtiments. Ce choix permet en effet de diminuer le nombre de simulations à réaliser et en même temps de faciliter la compréhension des phénomènes aérodynamiques.**

Les outils quantitatifs simplifiés qui sont élaborés dans cette thèse de doctorat doivent être considérés comme une première approche d'un phénomène très complexe. Leurs résultats ne donnent des valeurs exactes que pour les conditions prises comme hypothèses dans nos simulations. Vu la complexité des profils de vent réels (rugosité des terrains environnants, relief,...) et les statistiques météorologiques variables, ces outils doivent donc être utilisés avec prudence. Ils sont en revanche très utiles pour prendre conscience des risques liés au vent susceptibles d'apparaître dans un plan masse ou pour comparer l'influence de plusieurs configurations ou de différentes options d'un projet les unes par rapport aux autres. Ils permettront de prédire de manière précise les zones les plus sensibles où les survitesses de vent risquent de se produire régulièrement.

Ainsi, les outils de quantification de l'inconfort au vent présentés ci-dessous sont des outils simplifiés dont le but est à la fois de permettre une évaluation des risques d'inconfort dû au vent dans un premier stade de conception et également de comparer différentes options urbanistiques ou architecturales du point de vue de leur effet sur l'écoulement du vent. L'étude précise de projets spécifiques dans un contexte complexe nécessite de passer par des simulations CFD du projet en question ou des tests en tunnel aérodynamique.

La méthode qui permet de combiner un calcul simplifié de l'influence de la topographie, de la rugosité des terrains environnants et de l'influence des bâtiments est expliquée dans le chapitre précédent pages 397 et 398. Cette partie permet de déterminer le rapport U/U_0 dépendant du contexte construit autour de configurations simples.

La vitesse U est la vitesse simulée sur le site défini à la hauteur de 1.5m (pour correspondre à la zone de confort des piétons) et la vitesse U_0 est la vitesse de référence de ce terrain, c'est-à-dire une vitesse prise également à la hauteur de 1.5m mais dans un contexte sans bâtiment avec le même profil de vent que la valeur U_0 . Les rapports U/U_0 correspondent donc au rapport entre la vitesse de vent sur le site et la vitesse qui serait atteinte si le site n'était pas construit localement (mais dont la rugosité générale serait la même). Ainsi, quand le rapport U/U_0 est supérieur à 1 cela signifie que le contexte construit accélère la vitesse du vent au niveau piéton alors que lorsque le rapport U/U_0 est inférieur à 1 cela signifie que le vent est freiné par les bâtiments et donc que le microclimat local présente des vitesses de vent inférieures à celles qu'on aurait sans ces constructions.

Toutes les simulations réalisées dans cette thèse se basent sur le profil de vent suivant :

$$U = K z^\alpha U_{10, \text{météo}}$$

Où U est la vitesse sur le site, K et α sont donnés dans le tableau ci-dessous, z est la hauteur à laquelle on désire obtenir le résultat et $U_{10, \text{météo}}$ est la vitesse météo à 10m du sol.

Terrain	K	α	Z_0	d
Mer	0.7	0.14	0.005	0
Station météo ; terrain totalement dégagé	0.68	0.17	0.03	0
Campagne avec brise-vents	0.52	0.2	0.1	0.7h
Tissu suburbain	0.4	0.235	0.5	0.8h
Tissu urbain (bâti continu)	0.35	0.25	1	0.8h
Centre-ville très dense avec hauteurs de bâtiments très irréguliers	0.21	0.33	2.5	0.8h

Le profil de base utilisé dans nos simulations correspond aux paramètres du tissu urbain (bâti continu). Notre vitesse de vent de référence pour un tissu urbain est de 5m/s à une hauteur de 1.5m de haut ($U_0 = 5\text{m/s}$ à 1.5m de haut), ce qui correspond à une vitesse de 12.91 m/s à 10m de haut à la station météorologique.

En fonction des statistiques du vent à Uccle (Bruxelles), on peut conclure qu'un bâtiment ou un groupe de bâtiments ne créant qu'un effet critique du vent dans une seule direction particulière peut être considéré comme confortable en Belgique (sauf à la Côte où les vitesses de vent sont plus élevées) si le rapport U/U_0 généré dans cette orientation reste inférieur ou égal à 1.4. Cette valeur correspond à l'hypothèse que, dans les espaces publics de détente, la fréquence maximale de dépassement de la limite de confort vaut 5%. Evidemment si plusieurs effets critiques se cumulent pour un même ensemble bâti, la limite du rapport U/U_0 acceptable doit être diminuée en conséquence.

Des outils quantitatifs ont été élaborés à partir de nos simulations numériques réalisées à l'aide de FLUENT pour différentes paramètres du vent et un grand nombre de géométries de bâtiments. Pour chaque type d'effet du vent autour des bâtiments, des conseils pratiques de conception sont donnés par rapport au problème considéré.

Les outils d'évaluation des survitesses de vent autour des bâtiments que nous avons élaborés à l'aide de nos simulations FLUENT permettent de quantifier et de comprendre les effets suivants :

- tous les mécanismes critiques de l'écoulement du vent autour de bâtiments isolés de formes simples :
 - l'effet de coin,
 - l'effet de cisaillement,
 - l'effet de passage sous immeuble,
 - le rouleau tourbillonnaire,
 - l'effet de barre.
- l'effet de protection dans le sillage d'un bâtiment isolé.
- trois mécanismes critiques du vent autour de groupes de bâtiments :
 - l'effet Venturi,
 - l'effet Wise,
 - l'effet de double coin.
- trois types d'écoulement du vent dans un milieu urbain dense :
 - l'effet de masque urbain,
 - l'effet canyon
 - l'implantation d'un bâtiment élevé dans un milieu urbain de faible hauteur.

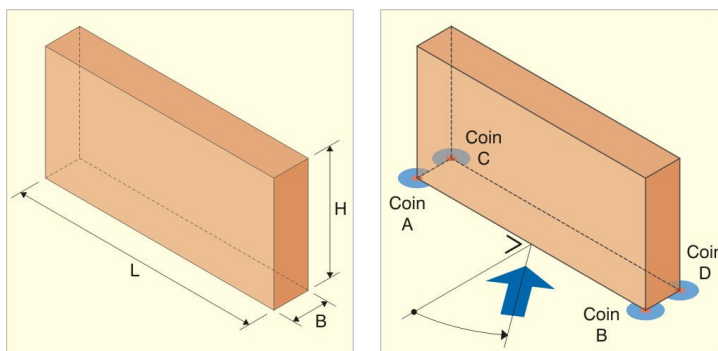
Les autres mécanismes critiques de l'écoulement du vent autour de groupes de bâtiments (effet de bâtiments en quinconce, effet de canalisation, effet de maille, effet d'écran linéaire et effet de pyramide), l'effet de la végétation et les autres mécanismes spécifiques de l'écoulement du vent en milieu urbain dense (ensembles de bâtiments élevés) sont expliqués et quantifiés à partir de résultats trouvés dans la littérature.

La méthodologie développée dans cette thèse peut être utilisée dans l'avenir pour continuer de produire des outils quantitatifs simplifiés pour l'ensemble des mécanismes critiques du vent autour des groupes de bâtiments ainsi que pour les phénomènes d'écoulement du vent au sein d'un tissu urbain dense.

Rappelons qu'un étage fait environ 3m de haut. Le bâtiment le plus haut de Belgique est la tour du midi (149m). Le palais de justice de Bruxelles atteint 103m grâce à sa coupole mais les bords s'élèvent à 36m.

4.4.1 L'effet de coin

La **première configuration** de l'effet de coin est simulée pour un bâtiment élevé isolé de hauteur H , de longueur L et de largeur B . Les coins de la façade au vent du bâtiment ont été baptisés « coin A » et « coin B », les deux coins de la façade sous le vent « coin C » et « coin D ».



Une comparaison de cet effet de coin au pied d'un bâtiment perpendiculaire au vent, de 48m de long, 48m de haut et 12m de large a été réalisée pour un profil de vent de campagne, un profil de vent suburbain et un profil de vent urbain. Les profils de vent utilisés suivent les formules suivantes.

Vent de campagne :

$0.52 Z^{0.2} U_{10, \text{météo}}$ où $U_{10, \text{météo}} = 12.91$ m/s soit 7.28m/s à 1.5m du sol.

Vent suburbain :

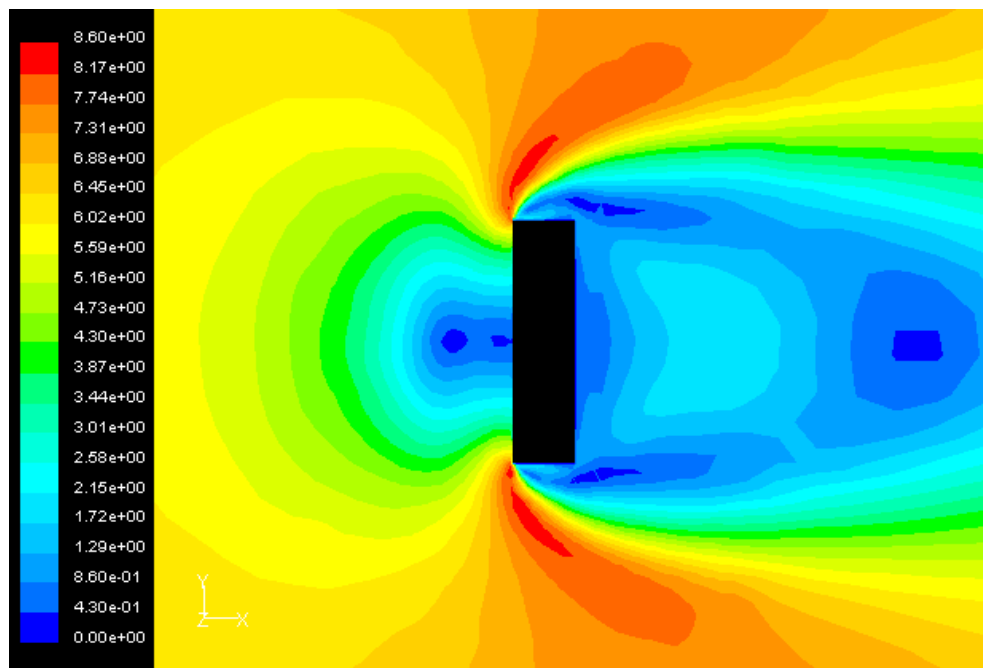
$0.4 Z^{0.235} U_{10, \text{météo}}$ où $U_{10, \text{météo}} = 12.91$ m/s soit 5.68m/s à 1.5m du sol.

Vent urbain :

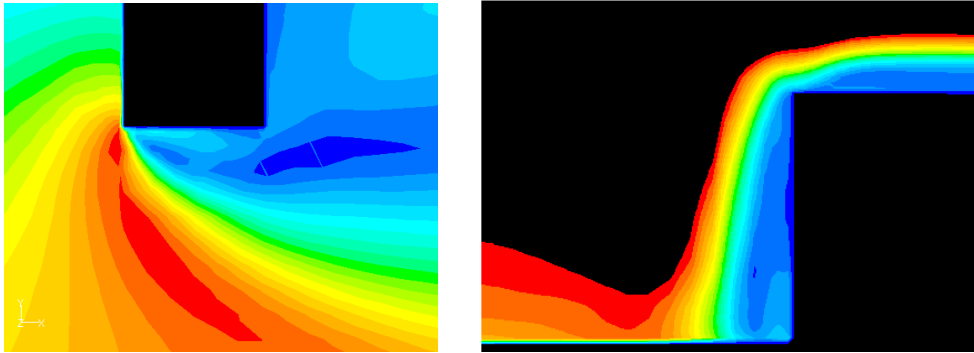
$0.35 Z^{0.25} U_{10, \text{météo}}$ où $U_{10, \text{météo}} = 12.91$ m/s soit 5m/s à 1.5m du sol.

La vitesse de l'air maximale au coin du bâtiment simulé vaut 12.1 m/s pour un vent de campagne, 10.4m/s pour un vent suburbain et 9.7 m/s pour un vent urbain, ce qui donne un rapport $U/U_0 = 1.66$ pour un vent de campagne, $U/U_0 = 1.83$ pour un vent suburbain et $U/U_0 = 1.94$ pour un vent urbain. Il est important de signaler que l'ensemble des outils graphiques décrits ci-dessous ont été élaborés à partir d'un profil de vent urbain. En première approximation, on peut obtenir les résultats pour un profil de vent suburbain ou un profil de vent de campagne en multipliant les valeurs présentées ci-dessous par 0.945 pour un vent suburbain et par 0.855 pour un vent de campagne.

Le graphique ci-dessous montre l'effet de coin autour d'un bâtiment de 24m de haut, 48m de long et 12m de large, pour un angle d'incidence du vent de 0°. Il s'agit de la distribution des vitesses moyennes du vent en plan à 1.5m de haut et en coupe 3m après la façade au vent du bâtiment. L'échelle sur le côté gauche, qui est valable pour les trois graphes présentés, donne la vitesse moyenne du vent en m/s au niveau piéton. On voit bien les survitesses engendrées au niveau des coins au vent du bâtiment et leur prolongement dans un sillage à vitesse élevée.



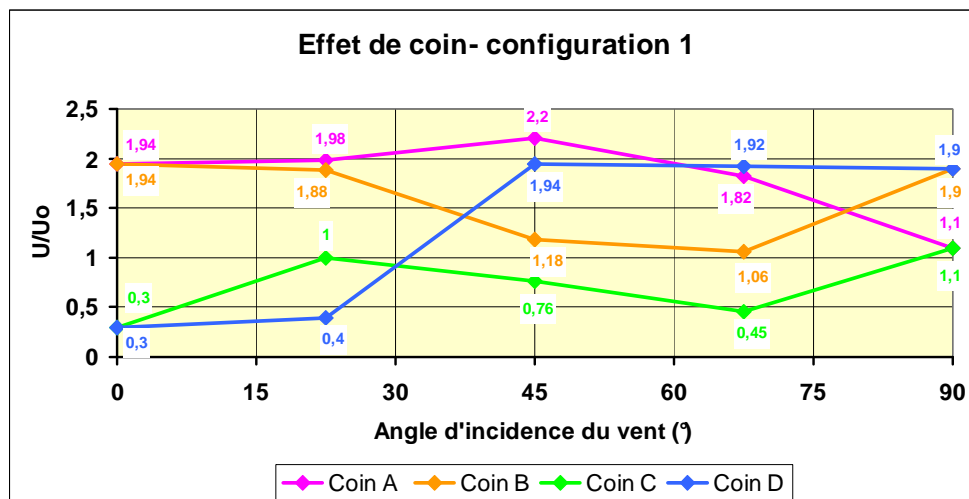
Plan : Survitesses à 1.5m de haut pour un effet de coin (L=48m, H=24m, B= 12m)



Plan (à gauche) et coupe (à droite) des survitesses du vent au coin du bâtiment.

Les dessins ci-dessus montrent qu'en plus de la zone de survitesses, l'effet de coin conduit à un gradient horizontal de vitesses très important, ce qui est particulièrement inconfortable pour les piétons.

Le graphe ci-dessous donne une évaluation quantitative des survitesses générées au niveau piéton par un bâtiment de 48m de haut, de 48m de long et de 12m de large aux quatre coins du bâtiment lorsque l'angle d'incidence α varie de 0° à 90° dans le sens antihorlogique.

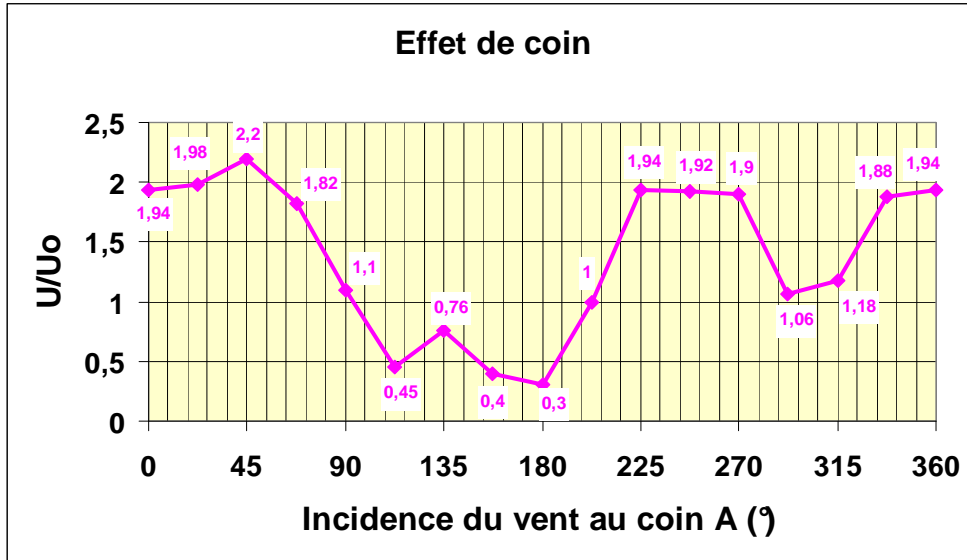


Pour un angle d'incidence du vent de 0° par rapport à la normale, les deux coins de la longue façade au vent sont les zones où l'inconfort au vent sera maximal. Lorsque l'incidence du vent est de 90° , ce sont à nouveau les coins de la façade au vent qui seront les plus critiques mais cette fois il s'agit de la petite façade latérale. Enfin, pour des angles intermédiaires, les zones les plus critiques dépendent de l'angle d'incidence du vent selon le schéma ci-dessus.

La moyenne des valeurs du rapport U/U_0 de l'effet de coin pour les deux coins les plus critiques à chaque orientation du vent vaut 1.94. L'incidence du vent à 0° n'est donc pas l'incidence la plus critique du point de vue de l'effet de coin mais c'est une incidence représentative de la moyenne des effets critiques du vent au niveau des coins du bâtiment pour un vent variable. Dès lors toutes les simulations qui vont être réalisées par la suite pour cet effet de coin sont calculées pour une incidence de 0° . Les rapports U/U_0 maximaux pour chaque orientation varient autour de cette valeur de référence (incidence du vent à 0°) dans une fourchette de -2% à +13%.

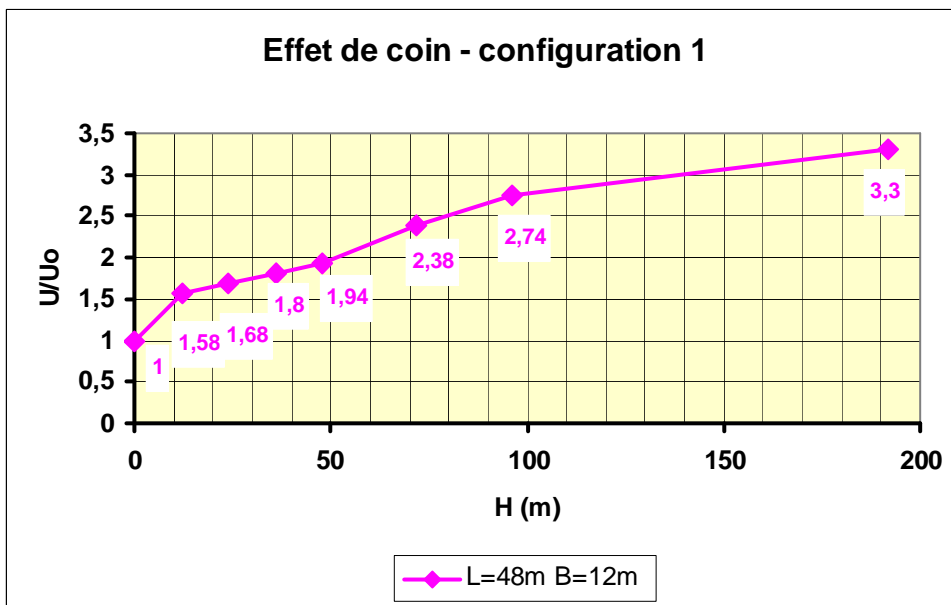
Rappelons toutefois que pour chaque angle d'incidence du vent, plusieurs effet différents peuvent apparaître, comme par exemple l'effet de coin et l'effet de barre. Il est donc indispensable de tenir compte de ces différents effets critiques en se référant pour chacun d'eux au paragraphe qui l'analyse.

Le graphe ci-dessous reprend le rapport U/U_0 autour du coin A du même bâtiment pour une orientation du vent variant de 0 à 360° dans le sens antihorlogique.



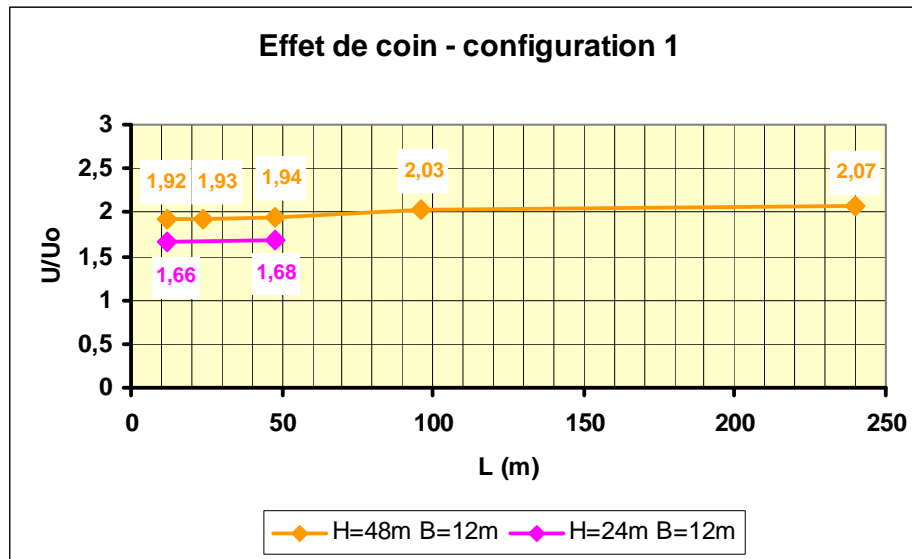
Ce schéma prouve que l'incidence du vent la plus critique du point de vue de l'effet de coin est une incidence de 45° par rapport à la normale à la façade au vent.

Pour évaluer l'effet de la hauteur du bâtiment élevé sur le confort au niveau piéton, des simulations ont été réalisées avec différentes hauteurs H pour un bâtiment de 48m de long et de 12m de large avec un vent perpendiculaire (incidence du vent = 0°). Le graphe suivant donne le rapport U/U_0 maximal simulé au coin de ce bâtiment pour des hauteurs H de 12m, 24m, 36m, 48m, 72m, 96m, et 192m.



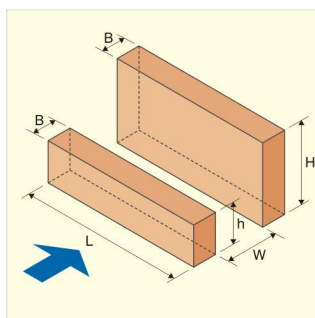
Ce graphe montre que les niveaux d'inconfort au vent au coin d'un bâtiment s'accroissent rapidement avec la hauteur de celui-ci. La hauteur est donc un élément fondamental pour la détermination de l'inconfort piéton au niveau des coins des grands bâtiments. En doublant la hauteur d'un édifice de 12m à 24m, on multiplie le rapport U/U_0 par 1.06 et en la quadruplant on le multiplie par 1.23. Les simulations suivantes permettent d'évaluer l'influence de la longueur d'un bâtiment élevé sur l'effet de coin pour deux hauteurs de bâtiment différentes :

- pour une hauteur du bâtiment élevé fixée à 48m, sa longueur vaut successivement 12m, 24m, 48m, 96m et 240m.
- pour une hauteur du bâtiment élevé fixée à 24 m, sa longueur vaut successivement 12m et 48m.



L'effet de coin est donc un effet critique du vent qui est pratiquement indépendant de la longueur du bâtiment. On note toutefois une très légère augmentation de l'inconfort pour des bâtiments de grande longueur. En doublant la longueur d'un édifice de 12m à 24m, on multiplie le rapport U/U_0 par 1.005 et en la quadruplant on le multiplie par 1.01. Cette faible influence de la longueur du bâtiment sur l'intensité de l'effet de coin signifie que la longueur du bâtiment peut être négligée dans l'évaluation de l'effet de coin en première phase du projet. En effet, doubler la hauteur d'un bâtiment augmente nettement plus l'inconfort au niveau piéton que quadrupler sa longueur...

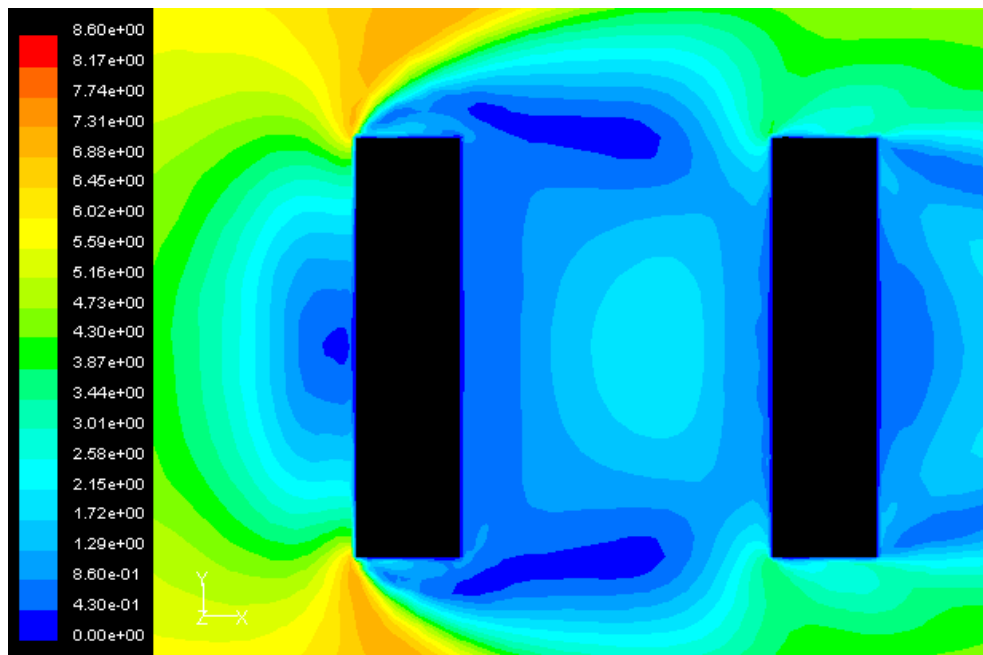
La **deuxième configuration** de l'effet de coin consiste en un bâtiment élevé (de hauteur H , de longueur L et de largeur B) précédé d'un petit bâtiment (de hauteur h , de même longueur L et largeur B). L'inter-distance entre les deux bâtiments est W .



Effet de coin – configuration 2

Notons que cette seconde configuration de l'effet de coin a déjà été en partie étudiée par Penwarden et Wise en tunnel à vent. Il n'est toutefois pas possible d'utiliser directement leurs résultats car le profil de vent utilisé par Penwarden et Wise est fort différent de celui que nous avons choisi pour nos outils graphiques quantitatifs. D'autre part, leurs mesures étaient réalisées à une hauteur de 3m de haut ce qui nous semble nettement trop élevé pour évaluer le confort réel des piétons. L'ensemble des résultats présentés ci-dessous correspond à des vitesses de vent évaluées à 1.5m du sol, c'est-à-dire arrivant au niveau du visage ou de la poitrine des passants. Un essai de recalage des données de Penwarden et Wise a été réalisé mais le facteur de transformation pour prendre en compte notre choix de profil de vent et une hauteur d'évaluation de 1.5m de haut n'était pas linéairement proportionnel à la hauteur des bâtiments.

Reprenons le premier exemple de l'effet de coin pour un bâtiment isolé : hauteur de 24m, longueur de 48m, largeur de 12m. Ce bâtiment est précédé d'un petit bâtiment de 12m de haut et 48m de long à une distance de 36m. Le second bâtiment est le même que dans la configuration 1 et l'échelle des vitesses du graphique ci-dessous est également la même que celle des simulations de la configuration 1.



Courbes iso-vitesses à 1.5m du sol

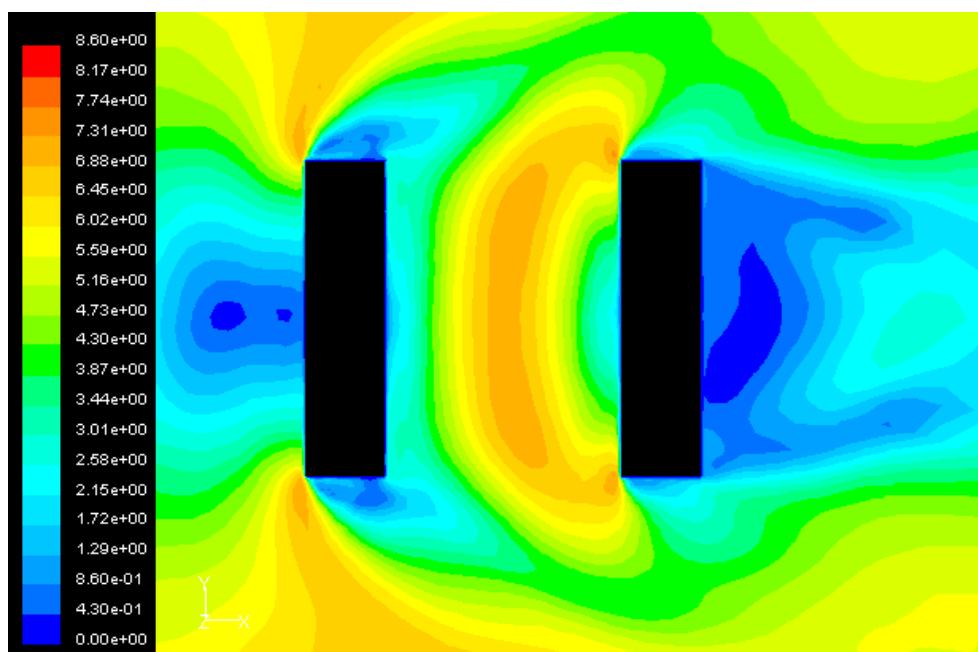
On voit bien que l'effet de coin autour du premier bâtiment se fait comme dans le cas d'un bâtiment isolé bien que l'intensité de la survitesse au coin de ce bâtiment soit légèrement plus faible que dans le cas d'un bâtiment seul de 12m de haut. L'intérêt de cette configuration réside surtout dans la forte réduction de l'effet de coin au pied du second bâtiment : l'intensité de l'effet de coin y est diminuée et son sillage est fortement ralenti. Ainsi, ajouter un petit bâtiment devant un plus grand permet de réduire l'impact de l'effet de coin.

Dans la configuration ci-dessus, le rapport des survitesses U/U_0 vaut 1.44 pour le coin du premier bâtiment alors qu'il valait 1.58 pour un bâtiment isolé de 12m de haut. Ce rapport U/U_0 est réduit à 0.77 pour le second bâtiment de 24m de haut dont le rapport de survitesses serait 1.68 s'il n'était pas précédé d'un plus petit

bâtiment. Le premier bâtiment a donc un effet réellement protecteur sur l'effet de coin du second bâtiment.

En revanche, il faut faire attention à l'écart entre ces deux bâtiments et leurs hauteurs respectives car un autre effet critique peut apparaître entre ceux-ci. En effet, sous certaines conditions, la présence d'une construction relativement basse devant un immeuble élevé augmente dans des proportions importantes l'effet de rouleau tourbillonnaire (décrit au point 4.4.4) générant un effet spécifique appelé l'effet Wise (analysé au point 4.4.7).

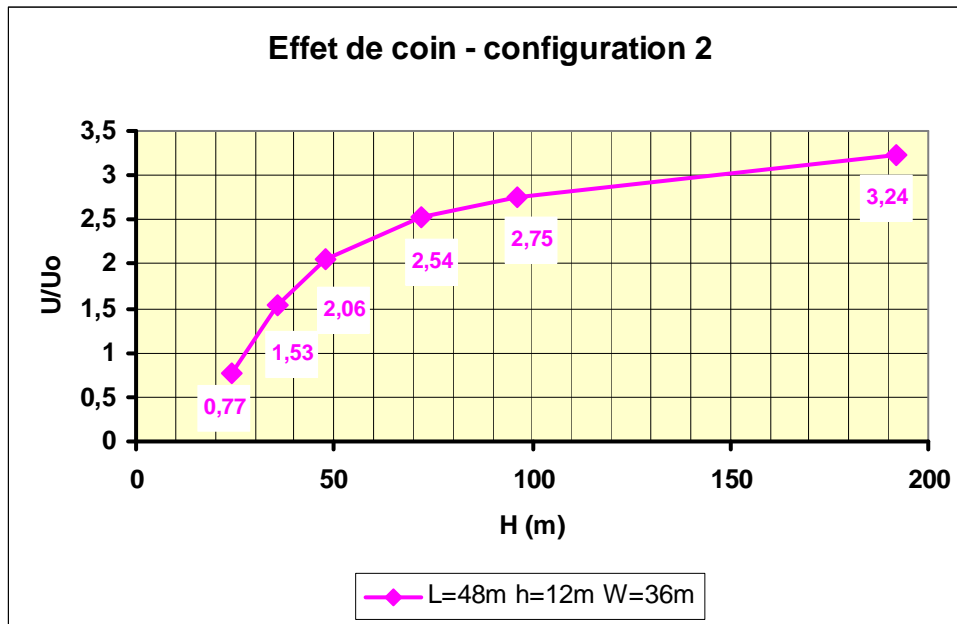
L'apparition de l'effet Wise dans une configuration bénéfique pour l'effet de coin est illustrée ci-dessous par un bâtiment de 24m de haut suivi à une distance de 36m d'un bâtiment élevé de 48m de haut. Dans ce cas-ci, le premier bâtiment est le même que dans la configuration 1 et le second bâtiment est encore plus élevé. L'échelle des vitesses du graphique ci-dessous est la même que celle des simulations de la configuration 1. L'effet Wise apparaît au centre des deux bâtiments. Il est toutefois visible que l'intensité des survitesses qu'il génère est nettement moins élevée que celle provoquée par l'effet de coin.



Courbes iso-vitesses à 1.5m du sol

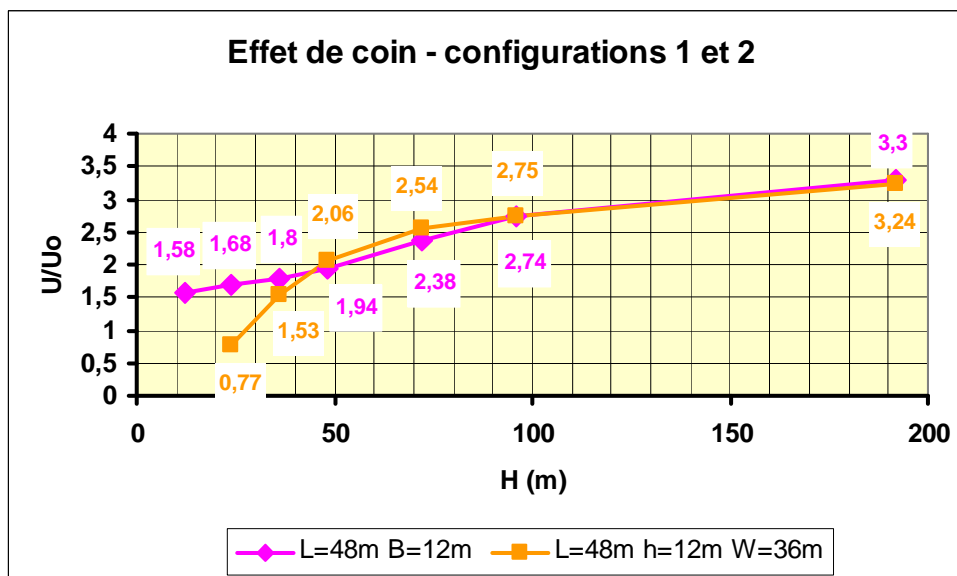
Malgré l'apparition de l'effet Wise, cette configuration reste bénéfique du point de vue de l'effet de coin. Ainsi, le rapport des survitesses U/U_0 généré par l'effet de coin vaut 1.46 au coin du premier bâtiment alors qu'il valait 1.68 pour un bâtiment isolé de 24m de haut. Ce rapport U/U_0 vaut également 1.46 pour le second bâtiment de 48m de haut dont le rapport de survitesses serait 1.94 s'il n'était pas précédé d'un plus petit bâtiment.

Pour un bâtiment élevé de 48m de long et 12m de large, précédé d'un petit bâtiment de 12m de haut, 48m de long et 12m de large, avec une inter-distance entre ces deux bâtiments de 36m, les valeurs de l'effet de coin varient en fonction de la hauteur du grand bâtiment. Le graphe ci-dessous donne le rapport U/U_0 maximal simulé au coin du grand bâtiment pour des hauteurs H de 24m, 36m, 48m, 72m, 96m et 192m.



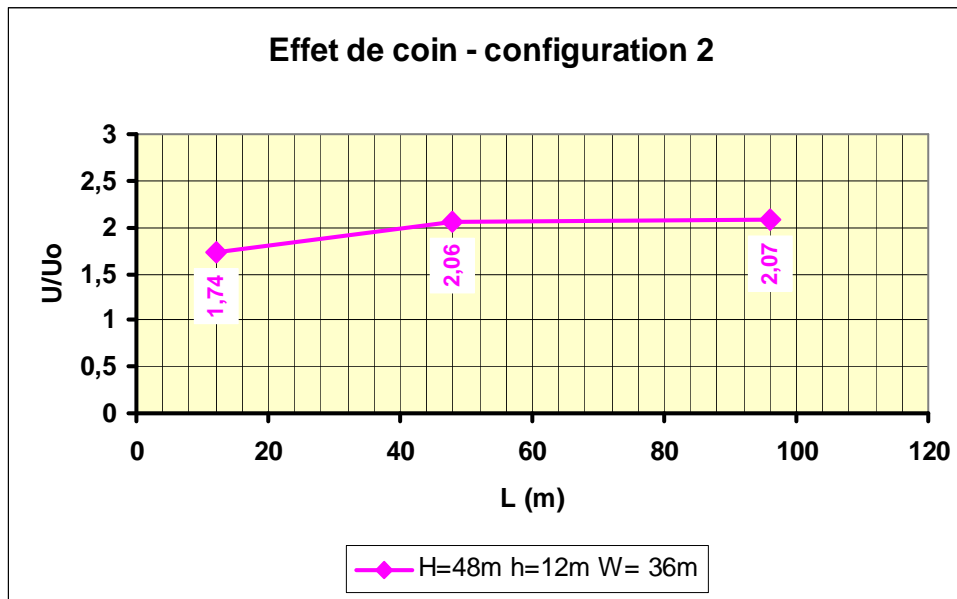
Au pied du bâtiment de 24m de haut, il y a une zone protégée du vent, favorisant le confort des piétons. Par contre, pour des hauteurs égales ou supérieures à 36m de haut, les niveaux d'inconfort au coin du grand bâtiment s'accroissent rapidement avec la hauteur de celui-ci. La hauteur reste donc un élément fondamental pour la détermination de l'inconfort des piétons au niveau des coins des grands bâtiments même dans le cas de cette seconde configuration utilisant la protection d'un bâtiment de faible hauteur.

Le schéma suivant compare la forme des courbes de croissance de la survitesse maximale liée à l'effet de coin, pour un bâtiment isolé (configuration 1) et un bâtiment élevé précédé d'un petit bâtiment de 12m (configuration 2), en fonction de leur hauteur.



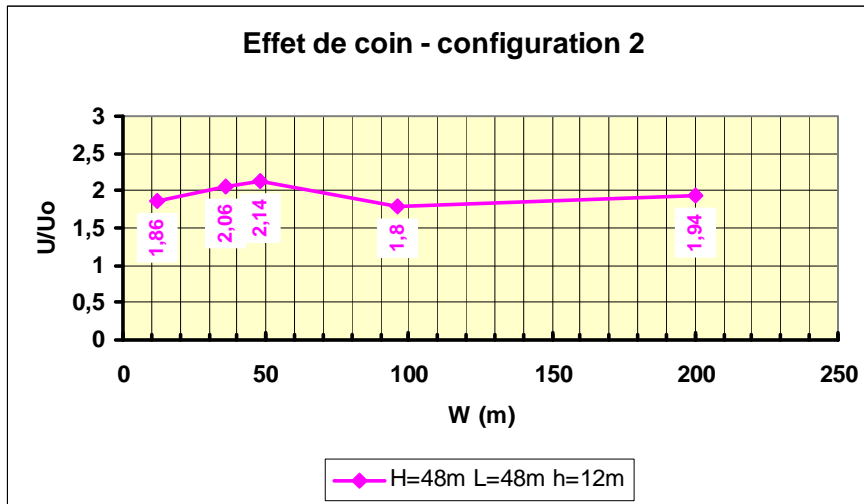
Au vu de ce graphe, il devient évident que rajouter un bâtiment de 12m de haut à une distance de 36m en amont d'un bâtiment élevé n'a un effet réellement protecteur par rapport à l'effet de coin que pour une hauteur du bâtiment élevé inférieure ou égale à 30m, c'est-à-dire pour un rapport $H/h \leq 2.5$.

Les simulations suivantes permettent d'évaluer l'influence de la longueur du groupe de bâtiments sur l'effet de coin au pied du bâtiment élevé. La hauteur du bâtiment élevé est cette fois fixée à 48m, celle du petit bâtiment à 12m, pour une longueur variable, de respectivement 12m, 48m et 96m, identique pour les deux bâtiments.



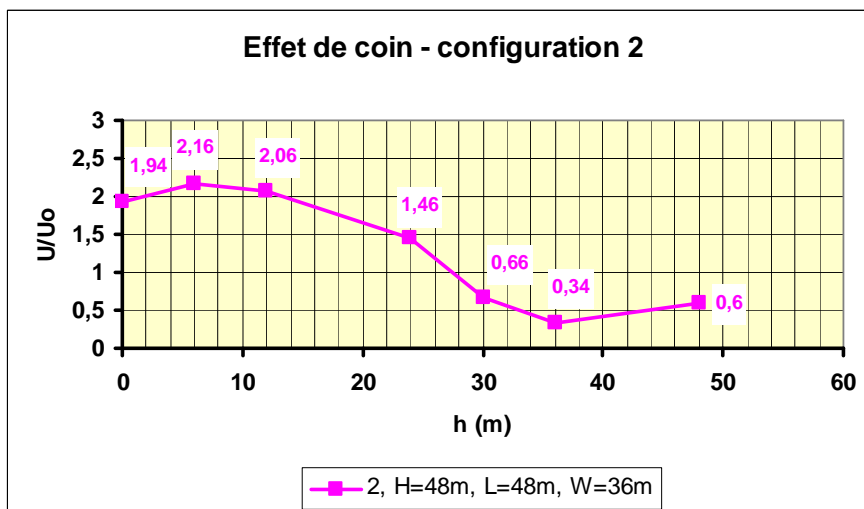
L'inconfort dû à l'effet de coin augmente donc avec la longueur des bâtiments pour cette seconde configuration. Cette augmentation est cependant nettement moins importante que l'accroissement des survitesses lié à l'augmentation de la hauteur du bâtiment. En quadruplant la longueur d'un édifice de 12m à 48 m, on multiplie le rapport U/U_0 par 1.18 alors qu'en doublant seulement sa hauteur de 24m à 48m, on le multiplie par 2.67. De plus, cette augmentation de l'effet de coin en fonction de la longueur des bâtiments diminue progressivement avec l'accroissement de celle-ci. Il est donc évident que pour limiter l'effet de coin, il est préférable de concevoir des bâtiments dont la hauteur soit relativement faible, quelque soit la longueur nécessaire pour répondre au programme architectural.

Nous avons encore analysé l'influence de la distance entre ces deux bâtiments pour situer le moment où le petit bâtiment commence à jouer un effet de masque sur l'effet de coin. Les paramètres fixés sont 48m pour la hauteur et la longueur du bâtiment élevé et 12m pour la hauteur du petit bâtiment.



Cette courbe montre tout d'abord que l'influence du petit bâtiment sur l'effet de coin généré par le grand bâtiment dépend de la distance qui sépare les deux constructions. Si on analyse les résultats avec précision, on peut tirer les conclusions suivantes. Pour une distance entre les deux bâtiments supérieure à 200m (c'est-à-dire $W > 16h$), le petit bâtiment n'a aucune influence sur l'effet de coin au pied du grand bâtiment. Pour une distance entre les deux bâtiments qui diminue progressivement de 16h à 8h, l'effet du premier bâtiment réduit l'effet de coin à l'angle du second bâtiment. Pour une distance entre les deux bâtiments qui diminue progressivement de 8h à 4h, le rapport U/U_o s'accroît : la présence du petit bâtiment est un élément perturbateur et non protecteur. Une distance entre les bâtiments de 4h, semble donc la distance la moins favorable pour l'effet de coin généré au pied du bâtiments élevé de la configuration 2 pour un vent perpendiculaire avec un petit bâtiment de 12m de haut et un grand bâtiment de 48m de haut. Lorsque la distance entre bâtiments passe de 4h à h, l'effet de coin diminue et retrouve un inconfort plus ou moins similaire au bâtiment élevé isolé pour une distance de 2h entre le petit et le grand bâtiment. Enfin, si la distance entre les deux bâtiments est égale ou inférieure à h, on remarque une diminution de l'effet de coin au pied du grand bâtiment.

Le graphe suivant montre l'évolution de la hauteur du petit bâtiment en amont sur l'effet de coin généré au pied d'un bâtiment élevé. La hauteur et la largeur du grand bâtiment sont fixées à 48m et l'inter-distance entre bâtiments à 36m.



Lorsque la hauteur du petit bâtiment augmente d'une hauteur $H/4$ à une hauteur $H/2$ puis $3H/4$, un effet de masque est généré et les survitesses au niveau du coin du bâtiment élevé sont fortement réduites. On voit que l'effet de coin disparaît pour une hauteur h supérieure ou égale à $0.6 H$. Ainsi, diminuer progressivement la taille des bâtiments qui entourent un bâtiment élevé d'une hauteur inférieure ou égale à 0.4 fois la hauteur du bâtiment précédent permet de supprimer les risques d'effets de coins au pied du bâtiment élevé et des édifices qui le précèdent dans la direction du vent.

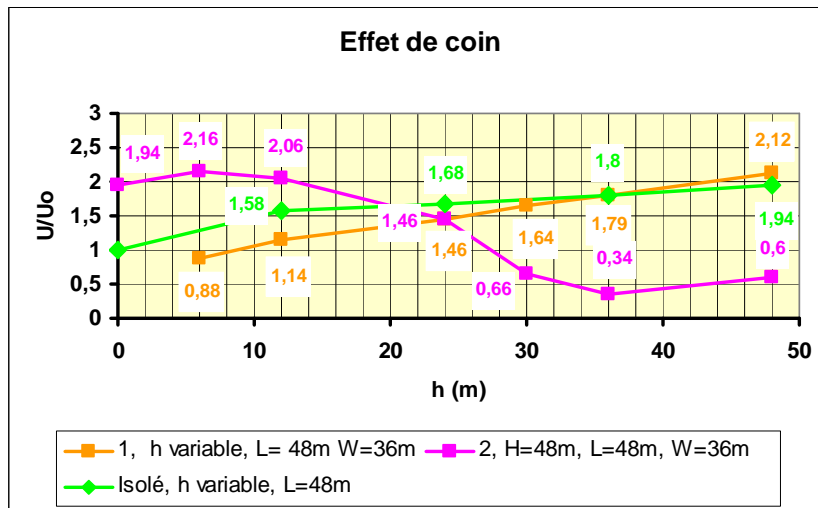
Le cas précédent permet déjà de comprendre l'effet de masque urbain qui se produit pour des tissus denses de hauteur relativement homogène. Ce phénomène bénéfique du point de vue du confort au vent est très répandu dans les villes denses ; il sera analysé dans un paragraphe ultérieur.

Jusqu'ici, nous avons à chaque fois regardé l'influence du petit bâtiment sur l'effet de coin au pied du grand bâtiment. Il ne faut toutefois pas oublier que l'effet de coin existe également au pied du premier bâtiment au vent, même si celui-ci est moins intense. Pour un bâtiment élevé ($H=48m$), précédé d'un autre bâtiment dont la hauteur varie de $12m$ à $48m$, avec une interdistance constante de $36m$, on obtient les valeurs suivantes du rapport de survitesses U/U_0 au coin du premier et du second bâtiment.

Description	Rapport H/h	U/U_0 au coin du premier bâtiment	U/U_0 au coin du second bâtiment
$h=6m ; H=48m$	$H/h = 8$	0.88	2.16
$h=12m ; H=48m$	$H/h= 4$	1.14	2.06
$h=24m ; H=48m$	$H/h = 2$	1.46	1.46
$h=30m ; H=48m$	$H/h= 1.6$	1.64	0.66
$h=36m ; H=48m$	$H/h = 1.33$	1.79	0.34
$h=48m ; H=48m$	$H/h = 1$	2.12	0.6

Comparons ces résultats au fait qu'un bâtiment isolé de $12m$ de haut crée un effet de coin dont le rapport U/U_0 vaut 1.58 , un bâtiment de $24m$ un rapport de 1.68 , un bâtiment de $36m$ un rapport de 1.8 et un bâtiment de $48m$ un rapport de 1.94 aux coins de la façade au vent. On voit que la présence d'un bâtiment dans son sillage réduit l'effet de coin du premier bâtiment lorsque le rapport H/h est supérieur ou égal à 1.6 . En revanche, lorsque deux bâtiments de même hauteur se suivent, l'effet de coin du bâtiment exposé au vent est amplifié. Pour le second bâtiment, c'est l'effet inverse qui se produit. L'effet de coin du second bâtiment est fortement réduit par le premier bâtiment dès que celui-ci présente une hauteur d'au moins $0.5 H$ et le coin du grand bâtiment est totalement protégé quand un bâtiment d'une hauteur au moins égale à $0.6 H$ le précède. Par contre, l'effet critique du vent au pied du second bâtiment est légèrement amplifié lorsqu'on ajoute un bâtiment de hauteur $H/4$ devant celui-ci.

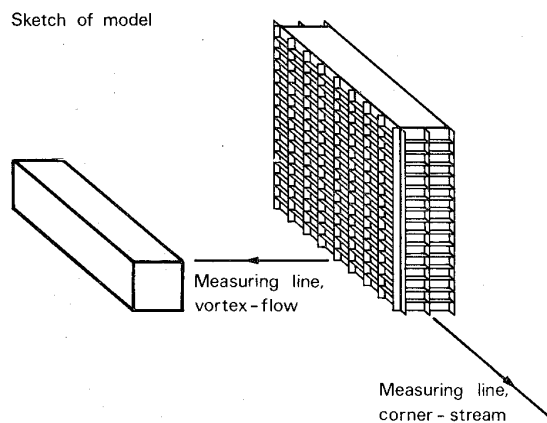
Ces différents cas sont repris dans le graphique ci-dessous. La courbe verte représente la variation de l'effet de coin en fonction de la hauteur d'un bâtiment isolé (configuration 1). La courbe orange représente la variation de l'effet de coin au pied d'un bâtiment exposé au vent suivi d'un bâtiment de $48m$ de haut dans son sillage (premier bâtiment de la configuration 2). La courbe rose présente la variation de l'effet de coin au pied du bâtiment de $48m$ de haut en fonction de la hauteur du bâtiment qui le précède (second bâtiment de la configuration 2).



Ainsi, pour un grand bâtiment de 48m de haut et une interdistance entre bâtiments de 36m, la géométrie suivante semble idéale : $1.6 \leq H/h \leq 2.5$, puisque les effets de coins situés au pied du premier et du second bâtiment sont tous les deux diminués par rapport aux cas de bâtiments totalement isolés.

D'après Jamieson & al., pour un bâtiment du double de la hauteur des bâtiments environnants, situé dans un milieu urbain dense, la présence de balcons de 6m de large, tous les 6m de haut sur toute la hauteur de la façade au vent du bâtiment réduit considérablement les vitesses de vent sur une grande région sans aucune augmentation de la vitesse du vent par ailleurs. Ceci est donc un cas extrêmement intéressant pour réduire les survitesses du vent lorsque la fonction du bâtiment le justifie. (Jamieson & al. 1992).

En revanche, les résultats de tests en tunnel à vent réalisés par Penwarden & Wise montrent que la présence de balcons d'1.5m de large sur la façade au vent d'un bâtiment élevé isolé ne modifie pas l'intensité de l'effet de coin au niveau piéton. La zone critique s'est juste écartée du bâtiment d'une longueur d'environ 4 mètres. La situation est toutefois améliorée au pied de la façade et donc à l'emplacement d'une entrée de bâtiment mais les alentours de l'édifice sont tout autant critiques. (Penwarden & Wise 1975).



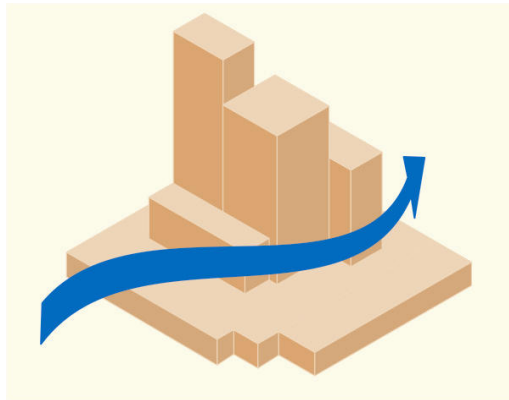
Configuration du bâtiment avec balcons. (Penwarden & Wise 1975)

Enfin, signalons que pour Bottema, la présence d'arbres autour d'un coin ou le fait d'arrondir un coin en diminue l'effet de 10% (Bottema 1993).

Conseils pratiques:

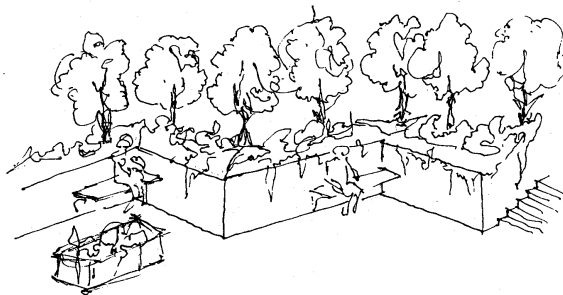
Pour limiter l'effet de coin au pied des bâtiments exposés au vent, on peut donner quelques conseils architecturaux :

- **diminuer la hauteur du bâtiment le long des espaces publics**, surtout à proximité des coins. Cela peut se faire par exemple par le fait de ceinturer un bâtiment par un élément de hauteur moins élevée : socle, rez-de-chaussée créant une avancée, galerie fermée, ...



(Gandemer 1975).

- **densifier le voisinage** immédiat du bâtiment élevé par des constructions moins élevées, dont le rapport de hauteur devrait idéalement se situer dans l'intervalle suivant : $1.6 \leq H/h \leq 2.5$
- **créer de larges débords** (balcons de 6m de profondeur,...) sur toute la façade au vent du bâtiment.
- **couper les angles** du bâtiment élevé à 45° ou créer des arrondis afin de diminuer le gradient horizontal des vitesses moyennes au niveau du coin.
- **prévoir des éléments poreux** près des angles du bâtiment élevé (végétation, écrans perméables,...). Ces dispositifs ralentiront la vitesse moyenne de l'air et atténueront l'effet du gradient de vitesse. Une haie de 2m de haut est un brise-vent efficace pour les piétons de par sa perméabilité naturelle.



(Hammoud 1986).



(Glaumann & Westerberg 1988).

- **protéger les balcons** situés aux coins des bâtiments.



Vauban (IMBE 2005).

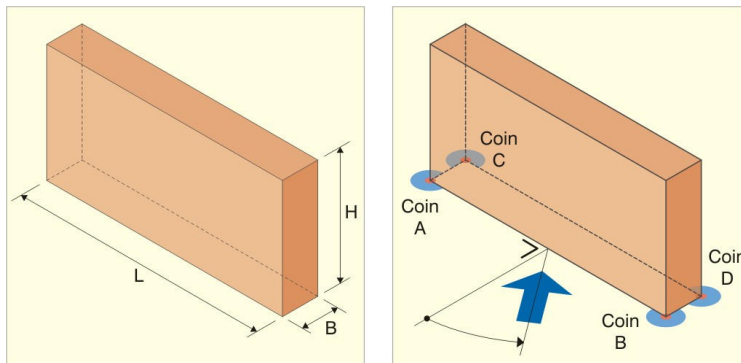
A retenir...

La vitesse maximale de l'effet de coin est peu influencée par l'angle d'incidence du vent par rapport au bâtiment élevé (différence de 15%). En revanche, la position de cet effet critique dépend fortement de l'angle d'incidence du vent.

La hauteur du bâtiment est le paramètre essentiel qui influence l'effet de coin pour un bâtiment isolé. Au plus la hauteur du bâtiment est élevée, au plus l'inconfort se fait sentir.

Dans le cas de deux bâtiments parallèles, un effet de protection au pied des coins des deux bâtiments apparaît lorsque le premier bâtiment présente une hauteur comprise entre 0.4 et 0.6 fois la hauteur du second bâtiment dans la direction du vent.

4.4.2 L'effet de cisaillement

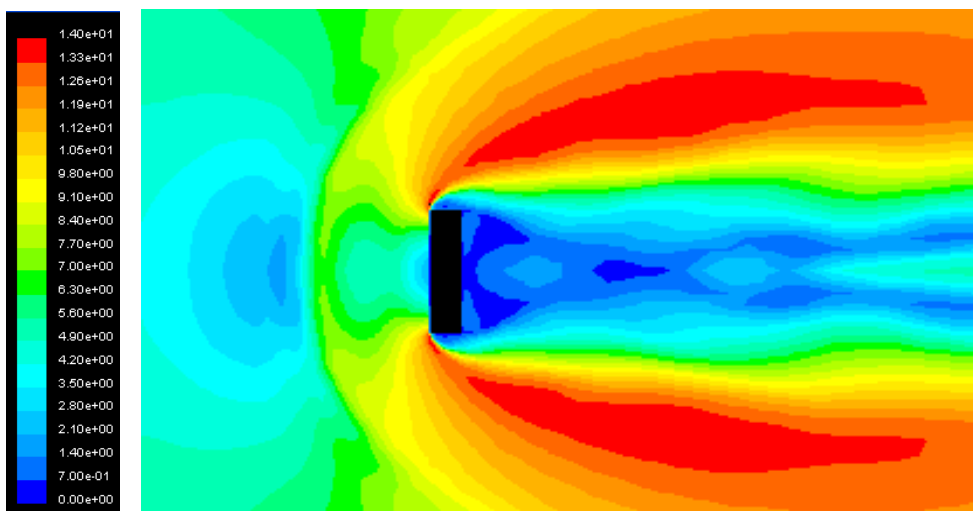


L'effet de cisaillement couvre les zones à fort gradient de vitesse de vent qui entourent la zone de protection due au sillage du bâtiment. Ces couches de cisaillement présentent de taux de turbulence élevés.

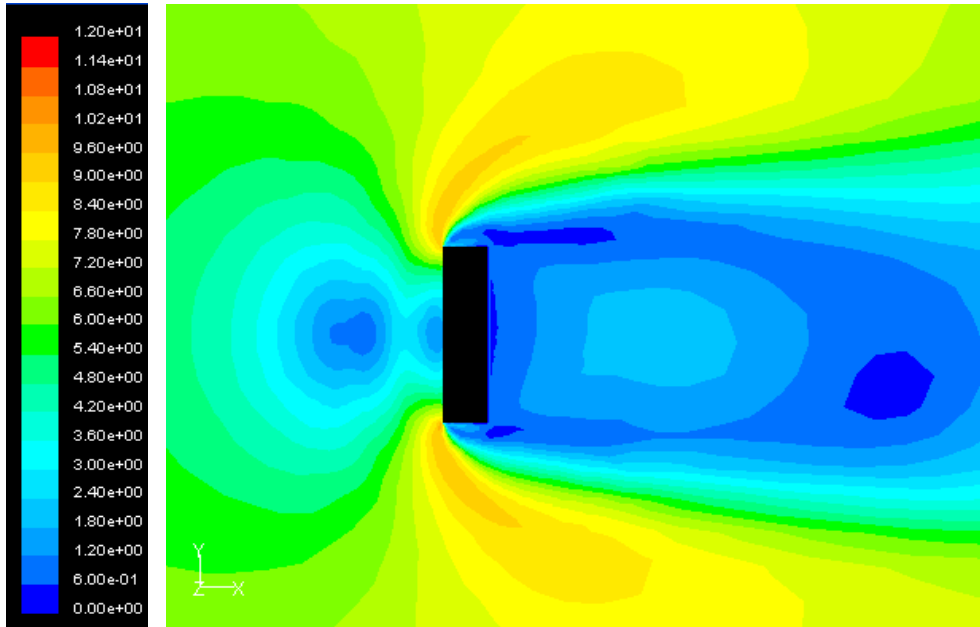
Dans le cas de l'effet de cisaillement, la valeur quantitative des survitesses n'a pas été analysée puisque le point le plus critique se trouve au niveau du coin du bâtiment et a été étudié sous le terme d'effet de coin. Si on réduit les survitesses au niveau de l'effet de coin, on obtiendra forcément une diminution des vitesses de l'air dans les couches de cisaillement.

Ainsi, on peut estimer que la vitesse de l'air dans les couches de cisaillement est peu influencée par l'angle d'incidence du vent par rapport au bâtiment élevé et que la hauteur du bâtiment est le paramètre essentiel qui influence l'effet de cisaillement pour un bâtiment isolé. Au plus la hauteur d'un bâtiment est élevée, au plus les risques d'inconfort pour les piétons augmentent au niveau de son sillage.

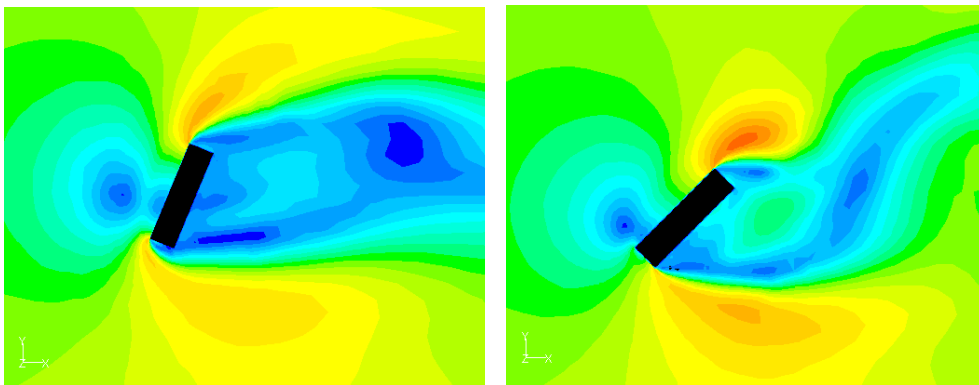
Signalons que l'accroissement de la hauteur des bâtiments n'a pas seulement un effet de renforcement des survitesses au niveau du coin et dans la zone de cisaillement mais qu'il augmente également la longueur de la zone de cisaillement où les survitesses sont importantes. Le graphique ci-dessous montre le sillage d'un bâtiment de 96m de haut et les zones de cisaillement qui l'encadrent. On remarque la forme caractéristique en forme de fer à cheval des couches de cisaillement dans le sillage des bâtiments élevés.



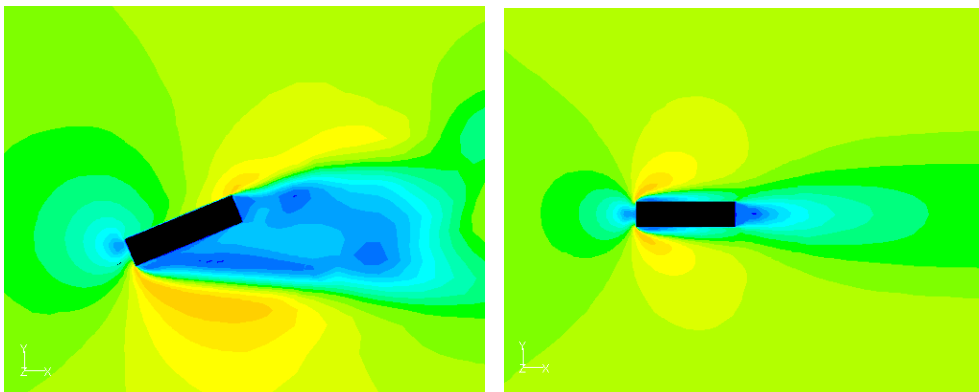
Les graphes ci-dessous donnent la répartition des survitesses moyennes générées dans le sillage d'un bâtiment de 48m de haut, de 48m de long et de 12m de large au niveau des piétons (à 1.5 m du sol), lorsque l'angle d'incidence α varie de 0° à 90° dans le sens antihorlogique. La même échelle des vitesses de l'air est valable pour les différents graphiques.



Courbes iso-vitesses pour un angle d'incidence du vent $\alpha = 0^\circ$



Courbes iso-vitesses pour $\alpha = 22.5^\circ$ (à gauche) et $\alpha = 45^\circ$ (à droite)



Courbes iso-vitesses pour $\alpha = 67.5^\circ$ (à gauche) et $\alpha = 90^\circ$ (à droite)

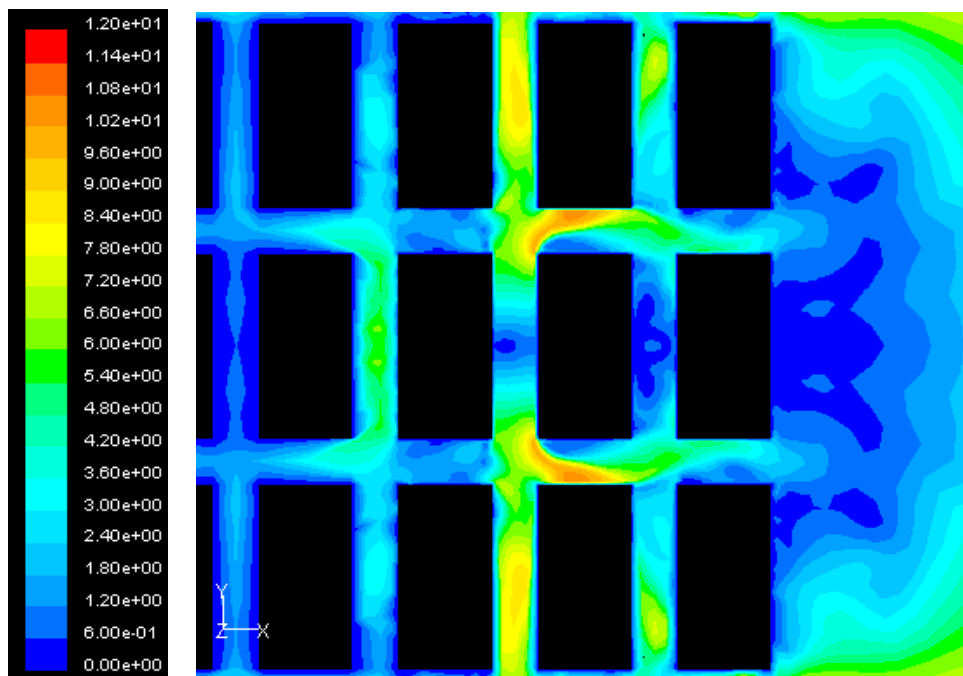
Attention les graphes ci-dessus donnent une solution moyenne qui semble ainsi permanente alors qu'en réalité le sillage généré par l'écoulement du vent autour d'un bâtiment est instationnaire. Ainsi, le mouvement temporel du sillage autour de sa position moyenne crée un agrandissement de la zone d'inconfort expérimentée dans un ensemble concret par rapport aux simulations présentées. Il serait donc judicieux de réaliser dans le futur des simulations temporelles afin de pouvoir mettre en évidence les cycles dynamiques des écoulements qui se produisent autour des bâtiments.

L'effet de cisaillement génère une surface de grande dimension qui est inconfortable pour les piétons. Il est donc utile de réduire non seulement l'intensité des survitesses maximales mais aussi la surface de la zone inconfortable.

Le positionnement des couches de cisaillement par rapport au bâtiment et les dimensions de la zone pour laquelle la vitesse de l'air est élevée dépendent fortement de l'angle entre la direction du vent et l'orientation du bâtiment. Les résultats de simulations présentés ci-dessus permettent d'affirmer qu'une méthode pour réduire la surface des couches de cisaillement est d'orienter le bâtiment élevé de manière judicieuse.

Il faut éviter les façades de grande longueur faisant face au vent dominant. Une orientation des façades principales de façon à ce que l'incidence du vent dominant soit comprise entre 60° et 120° permet déjà de réduire la zone de cisaillement de manière importante mais l'idéal consiste à placer la façade la plus longue parallèlement au flux du vent dominant.

Le schéma ci-dessous montre l'effet de cisaillement d'un bâtiment de 76m de haut au sein d'un milieu urbain formé de blocs homogènes de 19m de haut, 100 m de long et 50m de large.



Ainsi, tous les obstacles (bâtiments, végétation,...) qui sont placés directement dans la zone de cisaillement réduisent fortement cet effet critique.

Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet de cisaillement dans le sillage des bâtiments exposés au vent, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur du bâtiment le long des espaces publics**, surtout à proximité des coins.
- **densifier le voisinage immédiat du bâtiment élevé** (à la fois en amont de celui-ci et dans les zones de cisaillement) par des constructions moins élevées. En effet, plus l'environnement bâti est dense, plus l'effet de sillage est atténué.
- **prévoir des éléments poreux** près des angles du bâtiment élevé et dans la zone de cisaillement (végétation, écrans perméables,...). Des aménagements végétaux brisent aisément l'effet de cisaillement.
- **orienter le bâtiment élevé** de manière à ce que l'angle d'incidence du vent dominant par rapport à la façade principale soit compris entre 60° et 120° , avec une position idéale du bâtiment **parallèlement au flux du vent dominant** (c'est-à-dire pour une incidence du vent de 90°).

A retenir...

Si on réduit les survitesses au niveau de l'effet de coin, on obtiendra forcément une diminution des vitesses de l'air dans les couches de cisaillement.

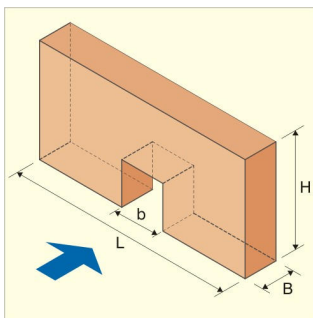
La hauteur du bâtiment influence fortement l'effet de cisaillement pour un bâtiment isolé, tant au niveau de l'intensité des survitesses qu'au niveau de la taille de la zone critique pour les piétons. Au plus la hauteur du bâtiment est élevée, au plus l'inconfort se fait sentir.

Placer des obstacles (bâtiments, végétation,...) dans la zone de cisaillement réduit fortement cet effet critique.

Une orientation de **l'axe principal des bâtiments élevés dans le sens des vents dominants** est la position idéale pour limiter leur effet de cisaillement

4.4.3 L'effet de passage sous immeuble

Pour étudier l'effet de passage sous immeuble, j'ai réalisé des simulations d'un bâtiment percé au niveau du sol par un passage pour piétons.

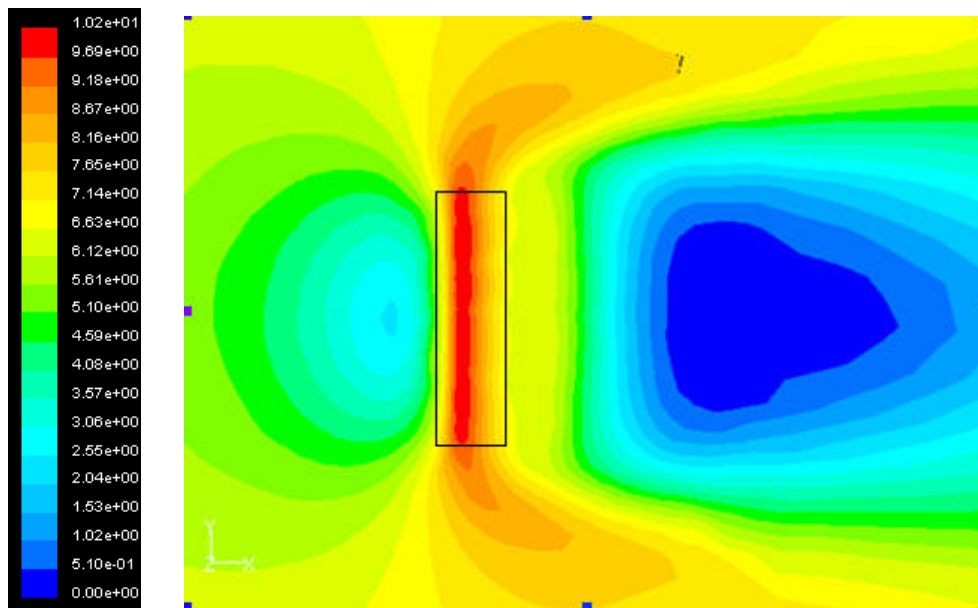


Passage sous immeuble

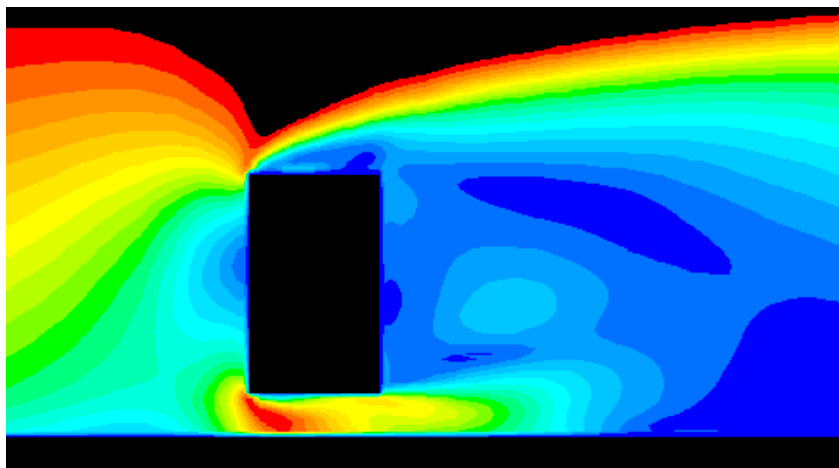
Les deux configurations suivantes ont été étudiées :

- un trou sous immeuble (de 6m de large et 4m de haut) creusé au centre du bâtiment.
- un bâtiment sur pilotis, c'est-à-dire un passage sous immeuble de 4m de haut et d'une largeur b égale à la longueur L du bâtiment.

Le graphique ci-dessous montre l'effet de passage sous immeuble pour le bâtiment sur pilotis. Le bâtiment simulé mesure 24m de haut, 48m de long et 12m de large, pour un angle d'incidence du vent de 0° . Il s'agit de la distribution des vitesses moyennes du vent en plan à 1.5m de haut et en coupe au centre du passage sous immeuble. L'échelle sur le côté gauche, qui est valable pour les deux graphes présentés, donne la vitesse moyenne du vent en m/s. Le rectangle noir indique la position en plan du bâtiment (de 6m à 48m de haut).



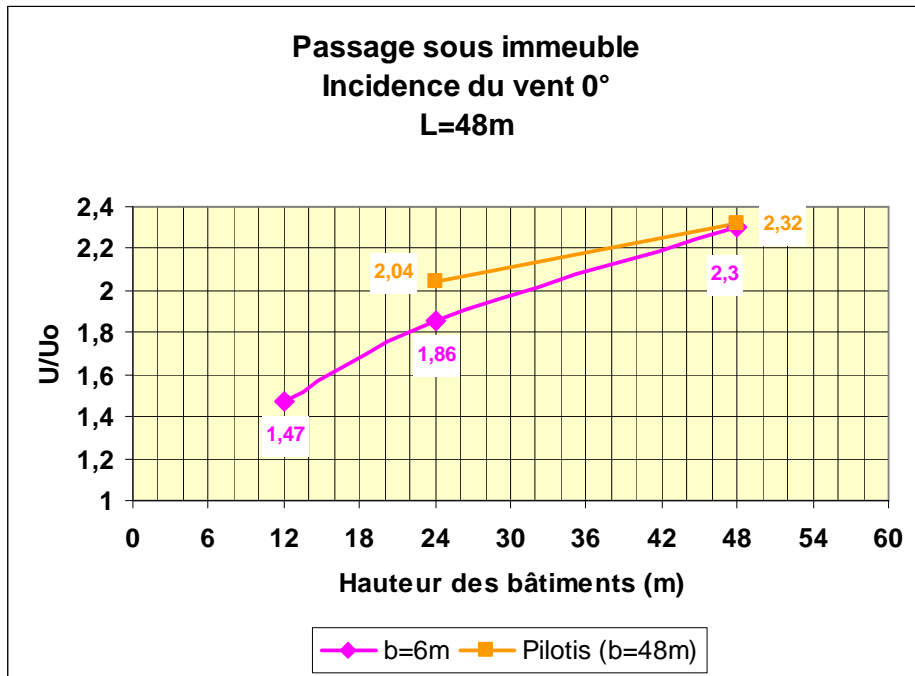
Distribution des vitesses de l'air à 1.5 m du sol.



Distribution des vitesses de l'air en coupe au milieu du passage sous immeuble.

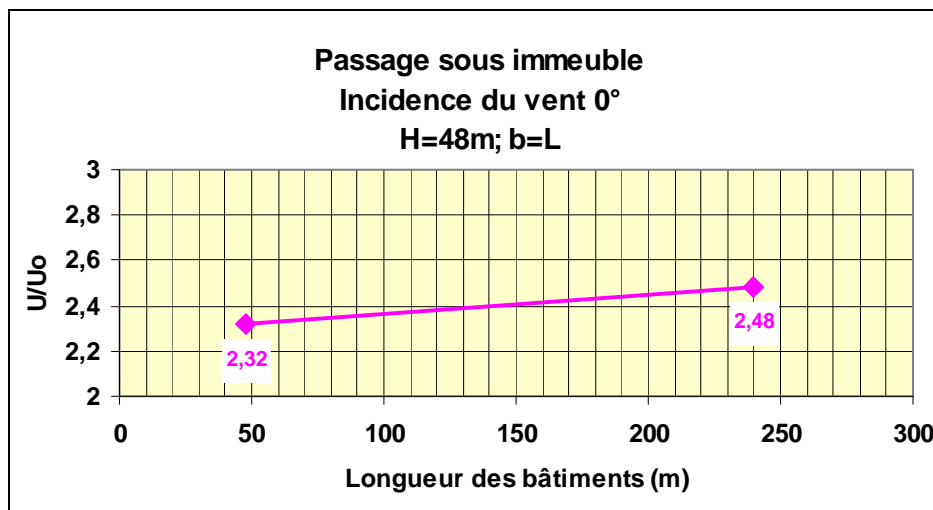
Ces résultats de simulation montrent que la zone critique de l'effet de passage sous immeuble commence quelques mètres avant le passage et se prolonge à l'arrière du bâtiment sur une longueur environ égale à la longueur du passage (= profondeur du bâtiment) et une largeur égale à la largeur du passage, quelque soit la hauteur du bâtiment et la largeur du passage.

Le graphe ci-dessous permet de constater que le rapport U/U_0 maximal au centre du passage augmente fort avec la hauteur du bâtiment, quelque soit la largeur du passage. Ces valeurs montrent que l'effet de passage sous immeuble est l'effet le plus critique pour une hauteur de bâtiment supérieure à 20m. C'est une configuration à abandonner dès qu'on construit un bâtiment élevé.

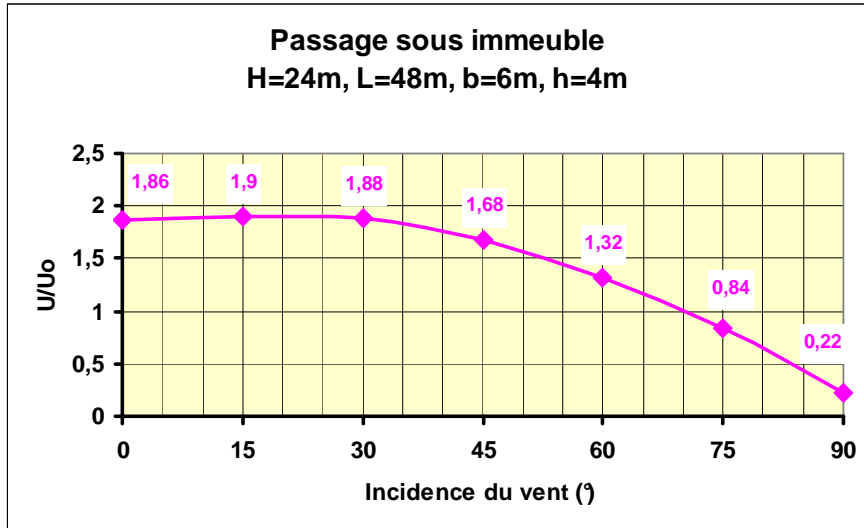


Les bâtiments sur pilotis présentent une accélération du vent au niveau du passage sous immeuble supérieure à la vitesse du vent dans un passage étroit mais cette différence diminue avec l'accroissement de la hauteur du bâtiment. Notons aussi que pour le passage sur pilotis, la valeur de survitesses donnée ici pour le centre du bâtiment reste en fait environ constante sur 90% de la largeur du passage (= 0.9 L). L'effet critique du vent pour les piétons occupe donc une surface de grande dimension.

Le graphe ci-dessous donne les valeurs quantitatives des survitesses au niveau piéton sous un bâtiment sur pilotis de 48m et de 240m de long, avec une hauteur constante 48m de haut. Pour une incidence du vent de 0°, la longueur du bâtiment ne semble pas avoir une influence importante sur l'effet de passage sous immeuble.

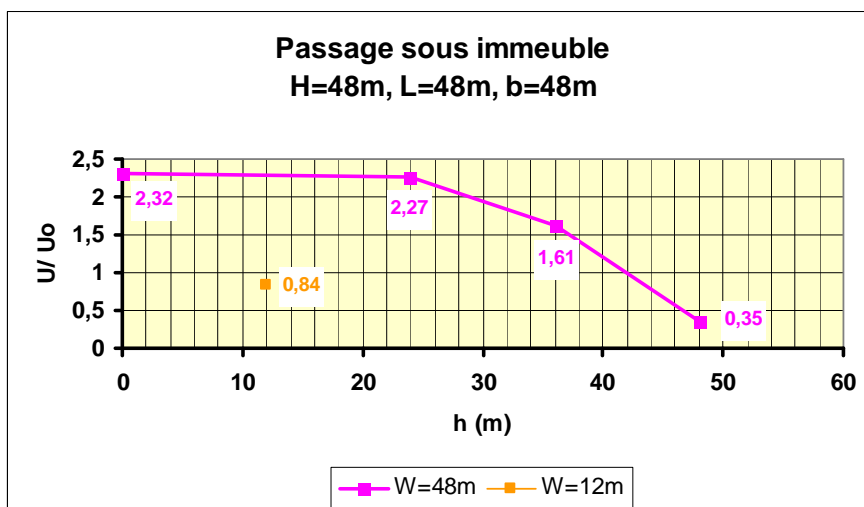


Les valeurs ci-dessous donnent la courbe d'influence de l'orientation du vent sur le rapport U/U_0 maximal au centre du passage pour piéton avec un bâtiment de 48m de long et de 24m de haut et un passage de 6m de large et 4m de haut. L'angle d'incidence de 0° correspond à un vent qui est parallèle au passage sous immeuble. Les vitesses de vent maximales à l'intérieur du passage piétonnier se produisent pour un angle d'incidence du vent de 15° à proximité du coin du passage.



Ce graphe nous permet de constater que l'effet de passage sous immeuble est surtout critique pour des incidences du vent de 0 à 45° par rapport à l'axe du passage. Pour une incidence supérieure à 70° , le passage devient une zone protégée par rapport à l'écoulement du vent. L'incidence du vent par rapport au trou joue donc un rôle capital sur l'intensité de l'effet de passage sous immeuble. Pour un bâtiment sur pilotis, il est difficile de donner un graphe de l'effet de trou sous immeuble en fonction de l'orientation du vent car cela dépend de la forme des pilotis. S'il s'agit de colonnes minces, l'orientation du vent ne devrait pas avoir d'impact important sur l'intensité de l'effet de passage sous immeuble. En revanche, s'il s'agit de pilotis massifs de grande longueur, ils auront un effet de brise-vent d'autant plus marqué que l'orientation du vent se rapproche de la direction perpendiculaire à leur longueur.

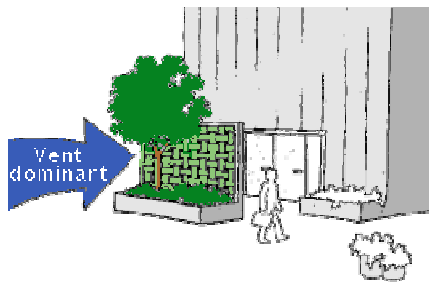
Le graphe ci-dessous permet de quantifier l'effet de protection d'un bâtiment placé avant l'entrée du passage exposée au vent par rapport à cet effet critique.



Un bâtiment placé en amont du passage sous immeuble crée une zone de protection par rapport au vent dans le passage sous immeuble lorsque le rapport h/W est supérieur ou égal à 1, c'est-à-dire quand la hauteur du petit bâtiment est supérieure ou égale à la distance qui sépare les deux bâtiments.

Plusieurs solutions spécifiques ont été testées en tunnel à vent par différents auteurs pour réduire l'effet critique du vent dans les passages sous immeubles. Ces solutions n'ont toutefois pas fait l'objet d'une évaluation quantitative à l'aide de FLUENT. Leurs principes semblent logiques mais nous ne pouvons pas garantir l'intensité de l'effet de protection généré. De telles applications nécessiteraient une étude spécifique.

La présence d'un brise-vent à l'entrée du passage ou à l'intérieur de celui-ci réduit les survitesses du vent dans les passages sous immeubles.



Brises-vents.

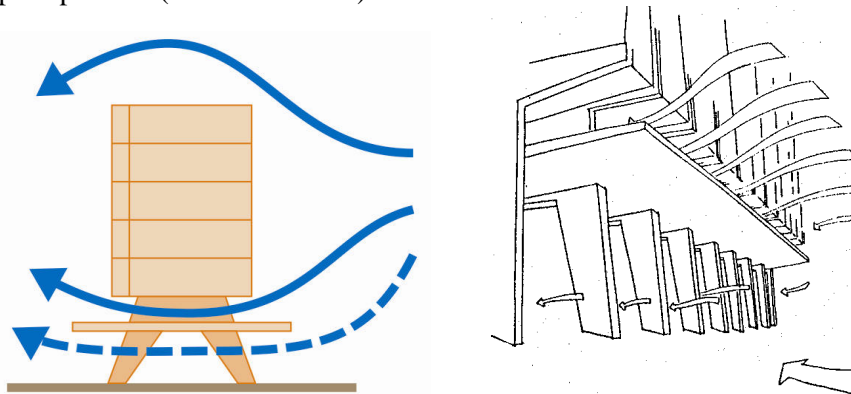


(Photo : S. Reiter)

Wiren suggère de décaler les étages supérieurs et les étages inférieurs, par exemple par le fait de ceinturer un bâtiment par un élément de hauteur moins élevée : socle, rez-de-chaussée créant une avancée de la galerie fermée, ... Il a quantifié l'influence d'un portique de 3m de long prolongeant le passage du côté de la façade au vent et il obtient ainsi une réduction de 6% de la survitesse maximale dans le passage pour piétons. (Wiren 1975)

Penwarden & Wise ont analysé l'effet de protection d'un auvent placé de chaque côté du passage sous immeuble. Du côté de la façade au vent, l'auvent supprime les survitesses dans le passage dès que sa profondeur est supérieure ou égale à 6m. Du côté sous le vent du bâtiment, l'auvent est inutile. (Penwarden & Wise 1975)

Gandemer propose la solution suivante pour limiter l'effet critique du vent pour les piétons traversant un passage sous immeuble: diviser le flux d'air au pied de l'immeuble par une augmentation de la porosité du bâtiment au-dessus du passage pour piétons. (Gandemer 1975)



(Gandemer 1975)

Dans le cas d'un passage suffisamment important (environ 5 à 6 m de hauteur), ce principe de protection consiste à diviser le trou en deux canaux : la partie supérieure est destinée à permettre à l'écoulement de l'air de traverser le bâtiment sans gêner les piétons alors que la partie inférieure sera protégée au maximum. Une avancée de la surface de division du passage de plusieurs mètres avant la façade au vent et/ou l'utilisation de surfaces poreuses à l'entrée du passage renforcent encore l'efficacité de ce système. (Gandemer & Guyot 1981).

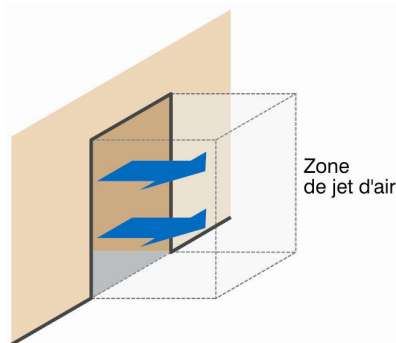
Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet de passage sous immeuble, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur du bâtiment le long des espaces publics**, surtout du côté du passage sous immeuble le plus exposé au vent dominant.
- **orienter le bâtiment** de manière à ce que l'angle d'incidence du vent dominant soit compris entre 70° et 90° par rapport à la façade au vent percée par le passage sous immeuble. L'orientation idéale correspond à un vent parallèle à la façade percée par le passage pour piétons.
- **protéger le passage sous immeuble par un bâtiment** d'une hauteur au moins égale à la distance qui le sépare de l'entrée du passage sous immeuble ($h/W \geq 1$).
- **protéger le passage sous immeuble par un auvent** de plusieurs mètres devant la face au vent percée du passage.
- **prévoir des éléments poreux** (végétation, écrans perméables,...) à l'entrée du trou sous immeuble ou à l'intérieur de celui-ci.
- **diviser le passage en hauteur** de manière à créer un couloir de déviation du vent au-dessus du passage pour piétons.

A retenir...

La zone d'inconfort liée à la présence d'un passage sous immeuble débute quelques mètres avant la façade au vent du bâtiment et se prolonge au-delà du passage par un jet d'air à grande vitesse dont le volume est du même ordre de grandeur que le passage. Au-delà de la zone de jet, on retrouve une zone de grande protection au vent correspondant au sillage du bâtiment.



(Gandemer 1975).

La hauteur du bâtiment influence fortement l'effet de passage sous un immeuble isolé. Le rapport U/U_0 au niveau des piétons (à 1.5m de haut) dans les passages sous immeubles augmente fortement avec une hauteur croissante des bâtiments.

Les survitesses dans le passage augmentent très légèrement avec l'accroissement de la largeur de l'ouverture.

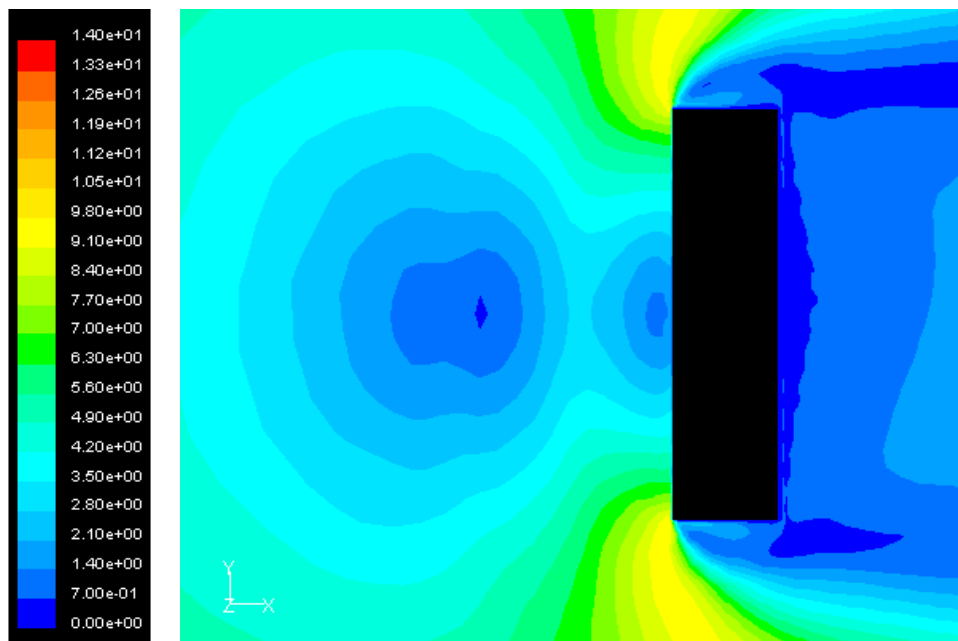
L'effet critique généré dans les passages étroits est très sensible à la direction du vent, ce qui n'est pas toujours le cas pour des bâtiments sur pilotis. Cet effet est surtout critique pour des incidences du vent de 0 à 45° par rapport à l'axe du passage étroit. **Pour une incidence du vent supérieure à 70° , le passage étroit devient une zone protégée par rapport à l'écoulement du vent.** Les pilotis peuvent jouer dans certains cas le rôle de brise-vent.

Un bâtiment placé en amont du passage crée une zone de protection par rapport au vent dans le passage sous immeuble lorsque la hauteur du petit bâtiment est supérieure ou égale à la distance qui sépare les deux bâtiments.

4.4.4 Le rouleau tourbillonnaire

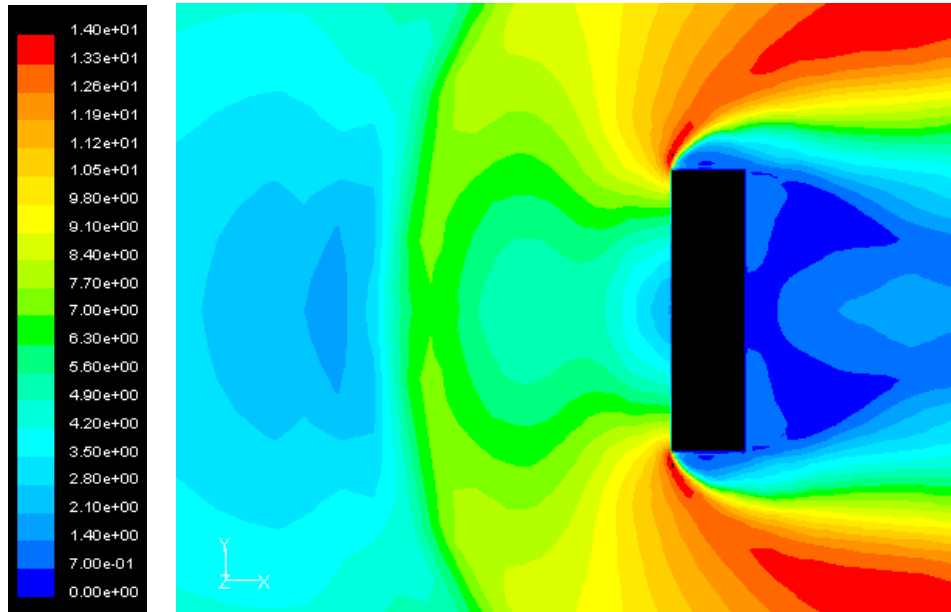
L'effet tourbillonnaire est simulé pour un bâtiment élevé isolé de hauteur H , de longueur L et de largeur B .

A l'avant de la face au vent des bâtiments se constitue un espace de recirculation de l'air. Pour la majorité des bâtiments, ce phénomène génère une zone protégée du vent, où les vitesses de l'air sont faibles. C'est ce qu'on voit ci-dessous pour un bâtiment de 48m de long, 48m de haut et 12m de large. La zone bleue au pied de la façade au vent du bâtiment est donc une zone de grand calme aérodynamique : le rapport U/U_0 y est égal ou inférieur à 0.58.



Courbes iso-vitesses en plan à 1.5m de haut.

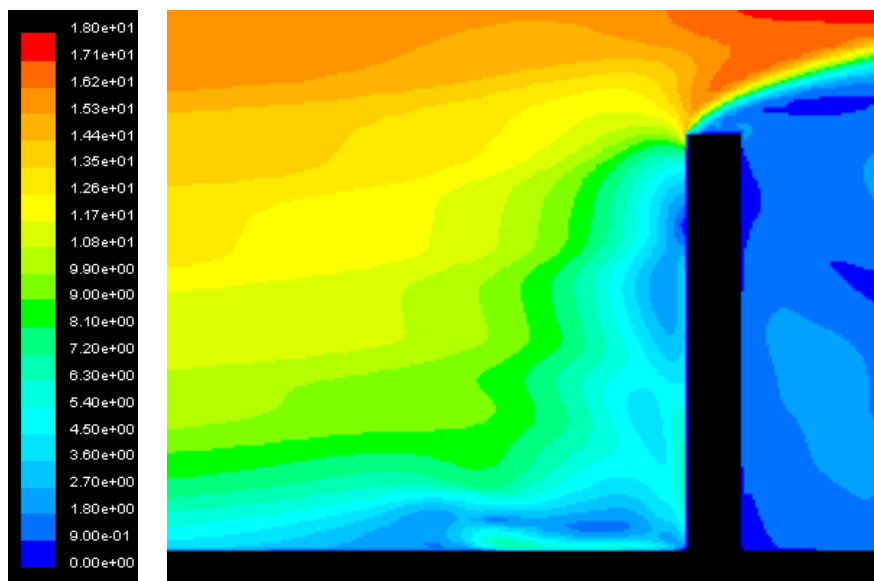
En revanche, pour de très hauts bâtiments, cette zone de protection existe mais elle est réduite et coupée en deux par une surface où les vitesses de l'air sont importantes. La zone verte sur le graphique ci-dessous correspond à la zone de survitesses que constitue le rouleau tourbillonnaire pour les bâtiments très élevés. Dans le cas de ce bâtiment de 96m de haut, 48m de long et 12m de large, le rapport U/U_0 atteint, sur l'axe médian du bâtiment, une valeur de 1.36 due à cet effet tourbillonnaire.



Courbes iso-vitesses en plan à 1.5m de haut.

Le plan ci-dessus montre bien que l'effet tourbillonnaire au pied des bâtiments très élevés reste toutefois largement moins critique que l'effet de coin généré par un bâtiment de même hauteur.

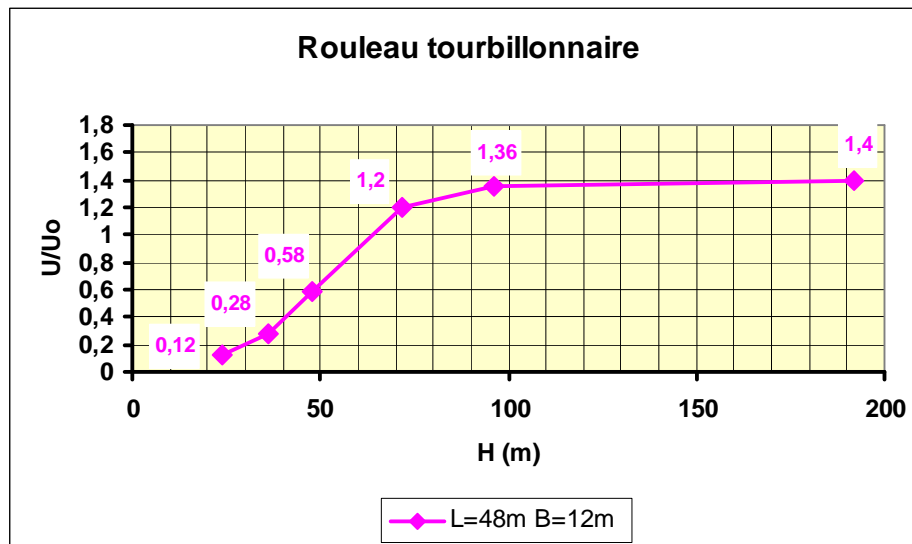
La coupe ci-dessous représente l'écoulement du vent autour de ce bâtiment de 96m de haut, 48m de long et 12m de large. Cette coupe a été réalisée au centre du bâtiment. Attention : l'échelle des vitesses n'est pas identique sur le plan et la coupe.



Courbes iso-vitesses en coupe.

La coupe ci-dessus montre bien que l'effet de rouleau tourbillonnaire a lieu sur une hauteur équivalente à la moitié de la hauteur du bâtiment à partir du sol.

Pour évaluer l'effet de la hauteur du bâtiment élevé sur le confort au niveau piéton devant la face au vent du bâtiment, des simulations ont été réalisées avec différentes hauteurs H pour un bâtiment de 48m de long et de 12m de large, avec un vent perpendiculaire à la façade principale. Le graphe ci-dessus donne le rapport U/U_0 maximal du rouleau tourbillonnaire au pied d'un bâtiment de 48m de long pour des hauteurs H de 24m, 36m, 48m, 72m, 96m, et 192m.



Le rouleau tourbillonnaire est un effet du vent qui ne crée des survitesses locales que pour les bâtiments très élevés, d'une hauteur supérieure à 60m. D'autre part, au-dessus de 100m de haut, l'effet semble totalement déployé et n'augmente plus que très légèrement avec l'accroissement de la hauteur du bâtiment. Cependant, il faut souligner le fait que cet effet est important spatialement puisqu'il s'étend tout le long de la face à vent du bâtiment et sur une profondeur de 50m pour un bâtiment de 100m de haut.

Ces résultats quantitatifs des survitesses générées par le rouleau tourbillonnaire au pied des bâtiments montrent en fait que ce phénomène n'est pas vraiment critique. En effet, en Belgique (sauf à la Côte où les vitesses moyennes du vent sont plus élevées), un rapport U/U_0 égal ou inférieur à 1.4 est tout-à-fait acceptable pour une zone de détente pour laquelle le risque d'inconfort par rapport au vent doit rester inférieur à 5% du temps. Cependant, il faut rappeler que le tourbillon engendre une forte augmentation de la turbulence au sol, ce qui augmente la sensation d'inconfort pour les piétons.

Ce phénomène peut donc augmenter les probabilités cumulées d'inconfort par rapport à d'autres effets critiques du vent mais il ne sera la seule cause de problème aérodynamique que pour des bâtiments très élevés ($H > 60m$) ou des climats très venteux.

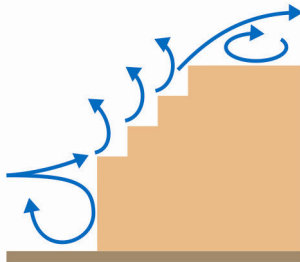
De plus, pour les bâtiments inférieurs à 50m de haut, il y a une zone de protection au vent marquée devant la face au vent d'un bâtiment isolé. Pour un bâtiment de moyenne hauteur exposé au vent, il serait donc très judicieux de concevoir l'entrée du bâtiment, la terrasse d'un café ou une zone de repos au niveau piéton vers le centre de la façade avant plutôt que sur ses bords, sujets à l'effet de coin qui est critique même pour des hauteurs de bâtiments peu élevées. Vu les très faibles

vitesses de l'air prévues pour des bâtiments inférieurs à 50m de haut, l'effet de la turbulence n'engendre dans ce cas aucun inconfort spécifique.

Conseils pratiques:

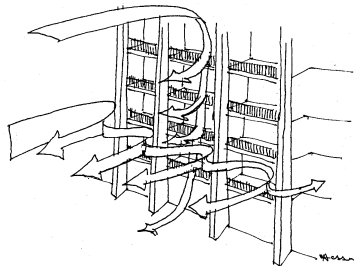
Pour limiter l'effet de rouleau tourbillonnaire au pied des bâtiments très élevés ($H > 60m$), on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur du bâtiment le long des espaces publics**, par exemple en créant un jeu de niveaux en gradin.



(Hammoud 1986)

- **intégrer des toits à versants inclinés** dans la direction du vent dominant.
- **augmenter la porosité ou la rugosité des façades** exposées directement au vent. D'une part, des trous peuvent être créés dans la façade pour casser le tourbillon d'air descendant. D'autre part, les balcons et les décrochements d'au moins 2 m de profondeur freinent les courants descendants, assurant une vitesse de l'air confortable au niveau piéton. La figure ci-dessous montre le freinage du courant d'air par un jeu de décrochements. Les balcons doivent toutefois être protégés latéralement pour ne causer aucun risque pour les habitants de l'immeuble. Les décrochements verticaux participent à la réduction des tourbillons au pied de l'immeuble.



(Hammoud 1986)

A retenir...

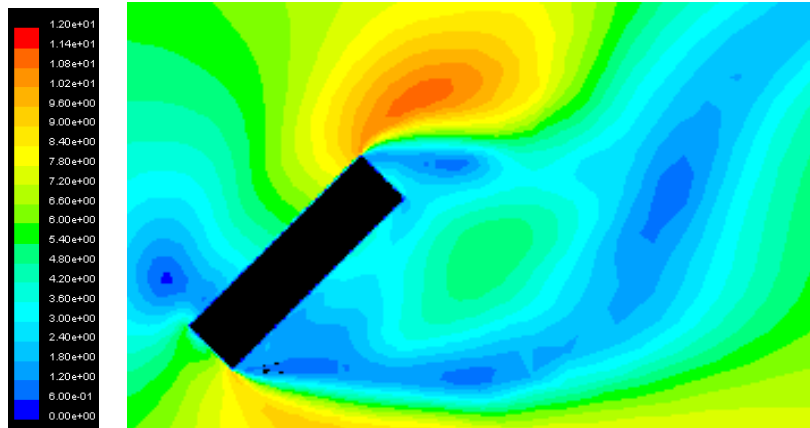
L'effet de rouleau tourbillonnaire a lieu sur une hauteur équivalente à la moitié de la hauteur du bâtiment à partir du sol.

Le rouleau tourbillonnaire n'est réellement critique que pour des bâtiments très élevés ($H > 60m$) ou des climats très venteux. Pour les bâtiments très élevés, l'augmentation de la turbulence dans la zone du rouleau tourbillonnaire doit être prise en considération comme un élément qui accroît l'inconfort des piétons.

Pour les bâtiments inférieurs à 50m de haut, il y a une zone de protection au vent marquée devant la face au vent d'un bâtiment isolé.

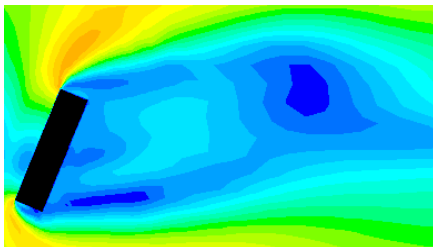
4.4.5 L'effet de barre

Le schéma ci-dessous montre l'effet de barre pour un bâtiment de 48m de long, 48m de haut et 12m de large. L'effet de protection dans le sillage du bâtiment (zone bleue) est annulé par l'effet de barre (zone verte) lorsque le vent passe au-dessus d'un bâtiment élevé sous une incidence de 45°.

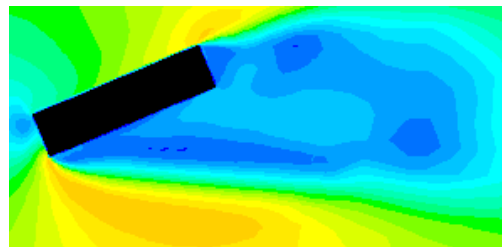


Incidence du vent $\alpha=45^\circ$

Les graphes ci-dessous montrent les courbes iso-vitesses pour le même bâtiment (H=48m, L=48m, B=12m) et la même échelle de vitesses de l'air mais selon des orientations du vent différentes. Ces schémas prouvent qu'une incidence du vent de 22.5° ou de 67.5° par rapport à la façade principale au vent suffit à supprimer la zone d'accélération du vent due à l'effet de barre. L'effet de barre est un effet du vent qui se produit exclusivement pour une incidence du vent plus ou moins égale à 45° par rapport à la façade.

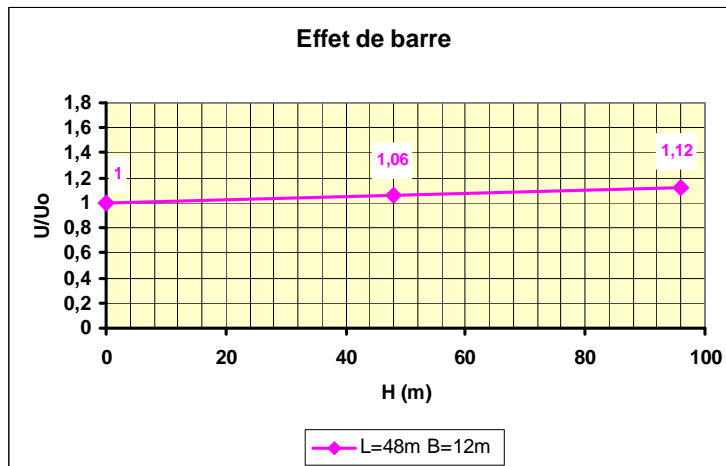


Incidence du vent $\alpha=22.5^\circ$



Incidence du vent $\alpha=67.5^\circ$

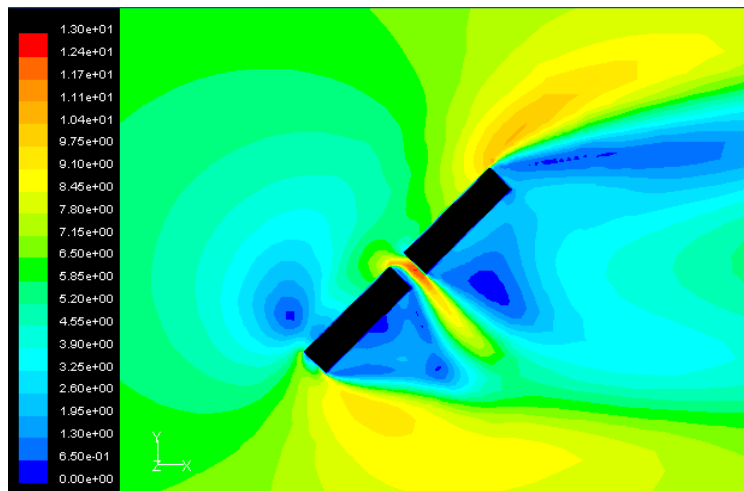
Le graphe ci-dessous donne le rapport U/U_0 pour l'effet de barre en fonction de la hauteur du bâtiment.



L'effet de barre ne génère pas d'inconfort au niveau piéton. Il annule toutefois l'effet de protection dû au sillage du bâtiment. Il est donc judicieux d'éviter de placer des bâtiments de grande longueur dans une orientation de 45° par rapport aux vents dominants, surtout si la zone de sillage par rapport aux vents dominants est conçue pour abriter des zones de détente pour les piétons. La position de l'effet de barre est d'autant plus éloignée de la façade arrière du bâtiment que sa hauteur est importante.

Pour deux bâtiments de 48m de haut orientés à 45° par rapport au vent dominant dont l'un est long de 48m et l'autre de 96m, l'effet de barre est identique et vaut 1.06. La longueur du bâtiment n'a donc pas d'impact sur l'intensité de l'effet de barre. En revanche, la position de l'effet de barre est d'autant plus éloignée de la façade arrière du bâtiment que sa longueur est importante.

Un effet de coin peut aussi être généré par l'assemblage de différents bâtiments en une barre longiligne continue (bâtiments mitoyens). Lorsque des espacements existent entre les bâtiments, l'effet de barre laisse la place à un autre effet critique du vent : l'effet de double coin, qui est spécialement critique pour le confort des piétons. Le graphe ci-dessous montre l'effet de double coin pour un ensemble de deux bâtiments de 48m de haut et de 48m de long placés dans la continuité l'un de l'autre mais séparés par un passage de 8m. Dans ce cas, l'effet de barre semble anodin par rapport à cet effet spécialement critique pour les piétons. Ce phénomène est étudié dans le paragraphe sur l'effet de double coin. Notons l'inconfort généré dans la zone de protection à l'arrière des bâtiments à cause du jet d'air venant du passage entre immeubles.



Conseil pratique:

Pour limiter l'effet de barre dans le sillage d'un bâtiment de grande longueur, il faut éviter d'orienter le bâtiment à 45° par rapport au vent dominant.

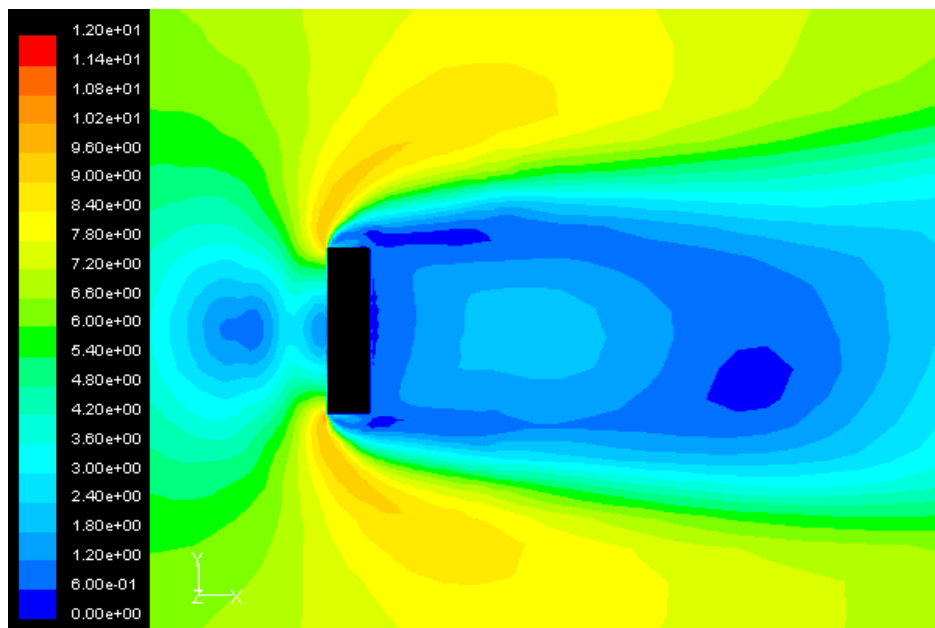
A retenir...

L'effet de barre ne génère pas d'inconfort au niveau piéton. Il annule toutefois l'effet de protection dû au sillage du bâtiment. Il est donc judicieux d'éviter de placer des bâtiments de grande longueur dans une orientation de 45° par rapport aux vents dominants, surtout si la zone de sillage par rapport aux vents dominants est conçue pour abriter des zones de détente pour les piétons.

4.4.6 L'effet de protection dans le sillage d'un bâtiment isolé

A l'arrière d'un bâtiment isolé exposé au vent se développe une large zone de protection par rapport au vent, appelée le sillage. Dans cette zone, la turbulence du vent est généralement forte mais elle n'est pas inconfortable pour les piétons à cause de la très faible vitesse de l'air à cet endroit. La géométrie du sillage est donc importante à évaluer puisque c'est une région spécialement adéquate pour y développer des zones de détente tels que places, terrasses de café, jardins publics,...

Le schéma ci-dessous montre l'étendue de l'effet de protection par rapport au vent dans le sillage d'un bâtiment isolé de 48m de long, 48m de haut et 12m de large.



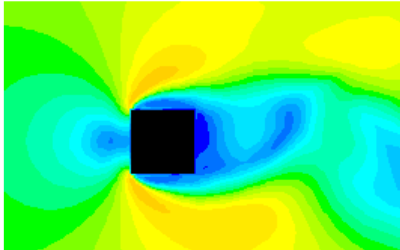
Même derrière des bâtiments très élevés, on retrouve une zone de protection par rapport au vent dans leur sillage. Le niveau de protection correspond généralement à un rapport U/U_0 inférieur ou égal à 0.5 sur une largeur égale à la largeur face au vent du bâtiment et une longueur égale à 3 à 4 fois la plus petite dimension entre la hauteur et la largeur face au vent du bâtiment. Mais la zone de recirculation de l'air s'étend bien au-delà.

Le flux de recirculation du sillage s'étend sur une région d'une longueur approximative $L = 10 R$ où $R = d^{0.67} D^{0.33}$ avec d = la dimension la plus petite entre la hauteur et la largeur de la face au vent du bâtiment et D = la dimension la plus grande entre la hauteur et la largeur de la face au vent du bâtiment. Quand $D > 8d$, alors il faut utiliser $D = 8d$. (Ashrae 2001).

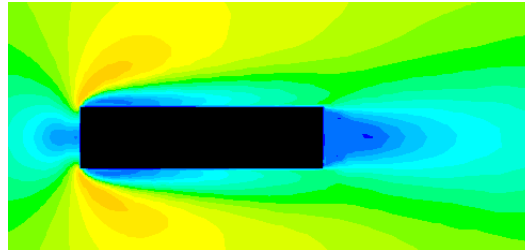
Il est important de souligner que la surface de cette zone de protection dépend en grande partie de la longueur de la façade au vent du bâtiment. Le schéma de gauche ci-dessous montre la zone de sillage générée par un bâtiment de plan carré de 12m de côté et de 48m de haut. La zone de sillage à l'arrière de cet édifice est nettement réduite par rapport au bâtiment de même hauteur mais dont la façade au vent mesure 48m de long.

Le schéma de droite montre la zone de protection à l'arrière d'un bâtiment de 48m de long, 48m de haut et 12m de large sous une incidence de 90° par rapport à sa longue façade. On voit qu'ici aussi la zone de protection par rapport au vent (surface bleue) est très fortement réduite.

Dans les deux schémas ci-dessous, l'échelle des vitesses du vent est identique à celle du premier schéma d'un bâtiment de 48m de long pour une orientation du vent de 0° par rapport à sa façade principale.



Bâtiment de 12m de côté.



Bâtiment de 48m de long orienté à 90°

Dans la simulation de gauche ci-dessus, on voit bien qu'un phénomène instationnaire s'impose. Il serait utile dans ce type de cas de faire une simulation temporelle pour analyser l'amplitude du mouvement instationnaire.

Pour profiter d'une large zone de protection à l'arrière d'un bâtiment, il est donc conseillé de tourner la longueur principale d'un bâtiment face au vent dominant. Nous vous renvoyons à la section sur l'effet de cisaillement pour observer l'évolution détaillée de la forme de cette zone protégée en fonction de l'angle d'incidence du vent par rapport à un bâtiment isolé. Il y a donc un choix architectural à faire entre une orientation du bâtiment qui réduit l'effet de cisaillement et la zone de sillage ou une orientation qui offre une large surface protégée du vent dans son sillage mais un effet de cisaillement accru. Les types d'espaces publics prévus autour du bâtiment devraient être pris en compte dans ce choix stratégique.

Conseil pratique:

Pour profiter d'une large zone de protection à l'arrière d'un bâtiment, il est conseillé de présenter sa plus longue façade perpendiculairement au vent dominant (= incidence du vent de 0°).

[A retenir...](#)

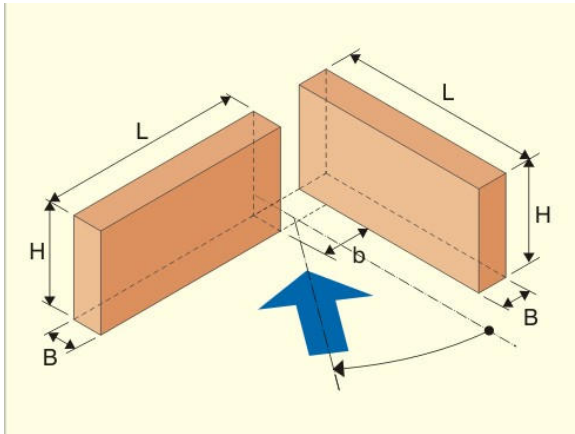
Dans le sillage d'un bâtiment isolé se développe une large zone de protection par rapport au vent, idéale pour y développer des zones de détente confortables pour les piétons.

Le niveau de protection correspond généralement à un rapport U/U_0 inférieur ou égal à 0.5 sur une **largeur égale à la largeur face au vent du bâtiment** et une **longueur égale à 3 à 4 fois la plus petite dimension entre la hauteur et la largeur face au vent du bâtiment.**

4.4.7 L'effet Venturi

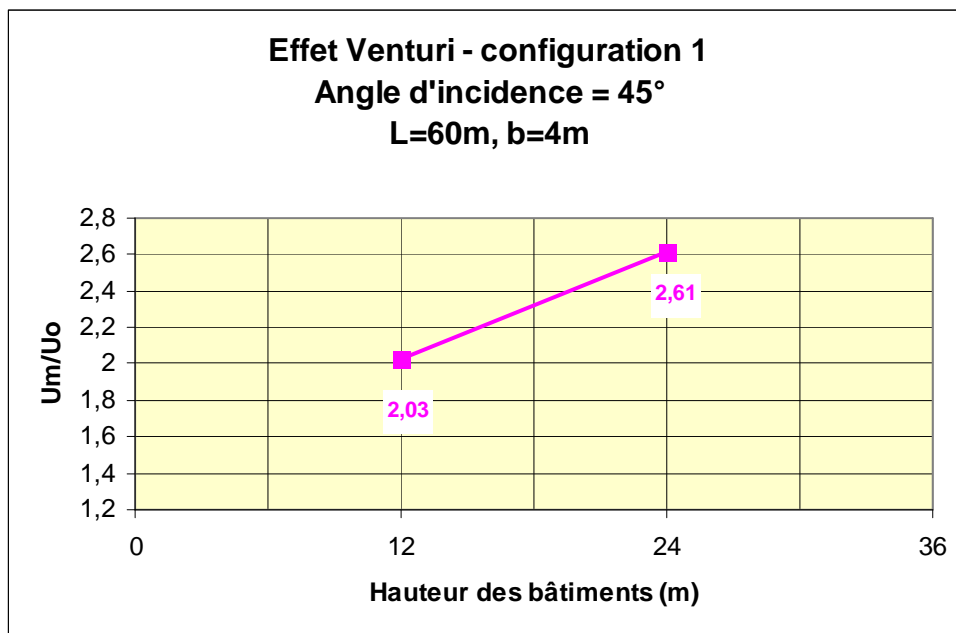
L'effet Venturi apparaît quand deux bâtiments sont placés de manière à créer un entonnoir par rapport au vent.

Notre **configuration de base** correspond à un entonnoir créé à partir de deux bâtiments perpendiculaires et alignés.



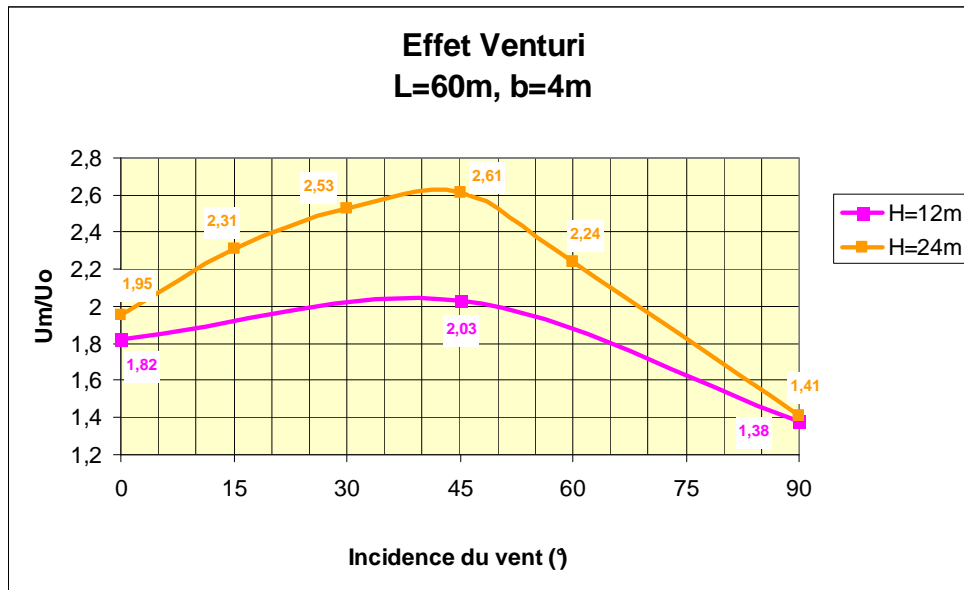
Effet Venturi – configuration 1

Augmenter la hauteur des bâtiments accroît fortement l'effet Venturi dans le passage entre bâtiments. Le graphe ci-dessous représente l'effet Venturi ($\theta=45^\circ$) pour des bâtiments de 60m de longueur et 12m de largeur avec un passage entre bâtiment de 4m, en fonction de la hauteur des bâtiments ($H=12\text{m}$ et $H=24\text{m}$).



Pour rappel, l'effet de coin au pied d'un bâtiment isolé de 24m de haut donne un rapport U/U_0 de 1.68 et l'effet de double coin entre deux bâtiments de 24m de haut donne un rapport U/U_0 de 2. Ainsi, l'effet Venturi multiplie la valeur du rapport U/U_0 au niveau piéton d'un rapport égal à 1.55 en comparaison d'un bâtiment isolé et d'un rapport égal à 1.3 en comparaison d'un effet de double coin pour une même hauteur de bâtiments.

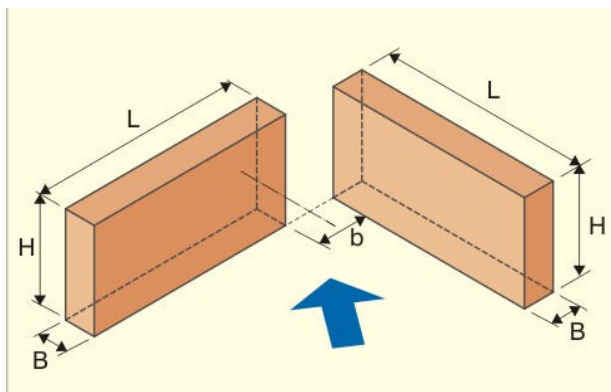
Le graphe ci-dessous permet d'étudier l'influence de l'incidence du vent couplée à la hauteur des bâtiments pour l'effet Venturi. Les bâtiments simulés ont une hauteur de 12 et 24m, une longueur de 60m et une largeur de 12m. Le passage entre bâtiments a 4m de large.



Ce graphe permet de conclure que l'effet Venturi est maximal pour une incidence du vent à 45°, c'est-à-dire pour un vent parallèle à la bissectrice de l'entonnoir. D'autre part, l'effet Venturi augmente avec la hauteur des bâtiments pour toutes les orientations de vent mais l'écart est maximal pour une orientation du vent de 45°.

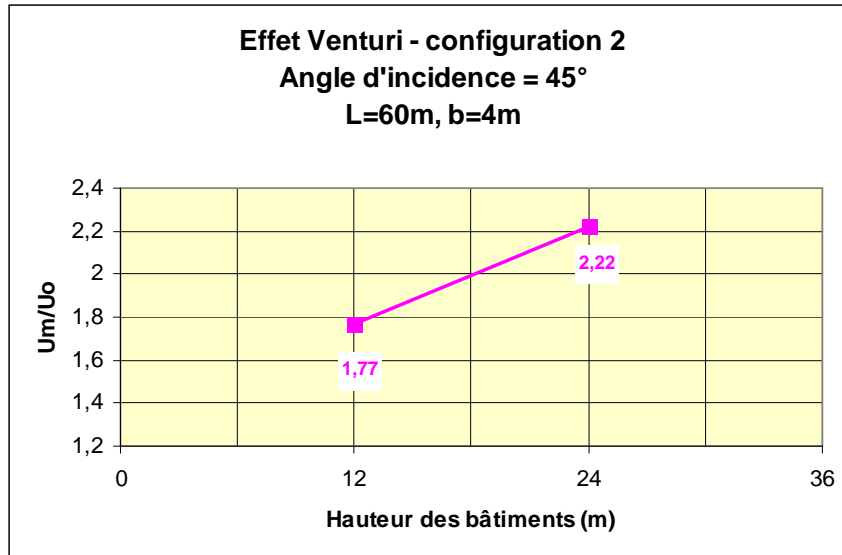
D'après Gandemer, l'effet Venturi n'apparaît que lorsque la somme des longueurs des bras du Venturi est supérieure ou égale à 100m, pour un passage dont la projection de la largeur orthogonalement à la direction du vent est comprise entre la moitié de la hauteur moyenne des bras du collecteur et 4 fois leur hauteur. A l'intérieur de cet intervalle, la largeur du passage modifie peu l'intensité de l'effet Venturi. (Gandemer 1975)

Une variante de cette configuration de base a été testée pour l'effet Venturi : il s'agit de bâtiments perpendiculaires mais décalés l'un par rapport à l'autre. Cette situation présente comme caractéristique essentielle de créer un effet Venturi sans qu'il y ait de couloir qui prolonge l'entonnoir.



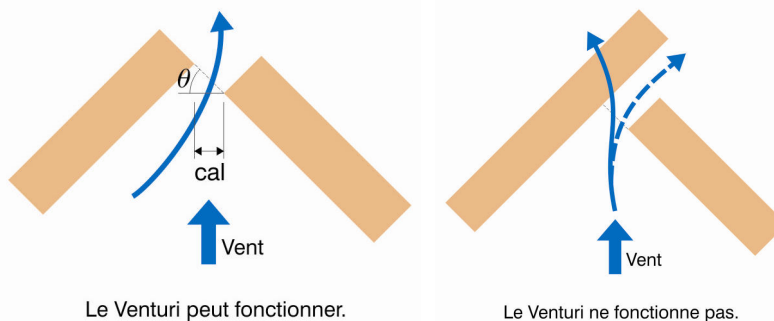
Effet Venturi – configuration sans couloir

Pour cette seconde configuration, le graphe ci-dessous montre l'effet de la hauteur des bâtiments sur l'effet Venturi au niveau le plus serré de l'entonnoir. Le graphe ci-dessous représente l'effet Venturi ($\theta=45^\circ$) pour des bâtiments de 60m de longueur et 12m de largeur avec un passage entre bâtiment de 4m, en fonction de la hauteur des bâtiments ($H=12\text{m}$ et $H=24\text{m}$).



Ainsi, cette seconde configuration est légèrement moins critique que la précédente. Décaler les bâtiments de manière à ce que le Venturi ne soit pas prolongé par un couloir réduit l'intensité des survitesses. La suppression d'un couloir de 12m de long, réduit l'effet Venturi d'environ 15%.

Une configuration semble encore meilleure d'après Gandemer et Barnaud : si un des bras dépasse largement derrière l'ouverture, le Venturi ne fonctionne pas parce que la largeur effective est insuffisante. (Gandemer & Barnaud 1975)



(Gandemer & Barnaud 1975)

D'après Gandemer, un Venturi noyé dans un environnement amont ou aval de même hauteur moyenne que celle des éléments constituant le Venturi, ne se comporte plus comme un collecteur. Il n'y a pas dans ce cas d'effet de survitesses au niveau de l'entonnoir. De même, si le Venturi débouche sur une maille fermée de superficie plus petite ou voisine de celle de l'anomalie et de hauteur suffisante par rapport aux bâtiments formant l'entonnoir, l'effet Venturi disparaît. Tant que les constructions amont et aval sont d'une hauteur supérieure ou égale à la moitié de la hauteur moyenne des bâtiments constituant le Venturi, la zone reste confortable. (Gandemer 1975)

Enfin, signalons que les Venturi à formes courbes conduisent à de véritables tuyères aérodynamiques. L'effet de survitesses y est violemment amplifié. (Gandemer 1975)

Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet Venturi, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur des bâtiments** formant l'angle ouvert au vent.
- **diminuer la longueur des bras du Venturi** pour que la somme de leur longueur totale reste inférieure à 100m. Une possibilité est de créer des bras poreux en introduisant des séparations d'une longueur supérieure à la moyenne des bras du Venturi.
- **orienter le bâtiment** de manière à ce que l'angle d'incidence du vent dominant soit parallèle à un des bras du collecteur. Eviter absolument l'orientation où la bissectrice de l'entonnoir correspond aux vents dominants.
- **densifier la zone** en amont ou en aval du collecteur par des bâtiments d'une hauteur au moins égale à la moitié de la hauteur du Venturi.
- **prévoir des éléments poreux** (végétation, écrans perméables,...) dans l'entonnoir pour ralentir le vent.
- **décaler les bâtiments** formant l'angle de manière à ce qu'un des bras dépasse largement derrière le Venturi.

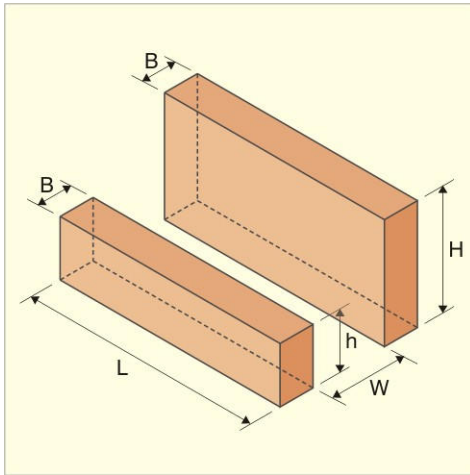
A retenir...

L'effet Venturi est d'autant plus fort que la hauteur des bâtiments augmente et que l'angle d'incidence du vent se rapproche de la bissectrice de l'entonnoir.

La prolongation de l'entonnoir par un couloir augmente l'intensité de l'effet Venturi alors qu'un prolongement important d'un des bras au-delà de l'ouverture supprime l'effet critique.

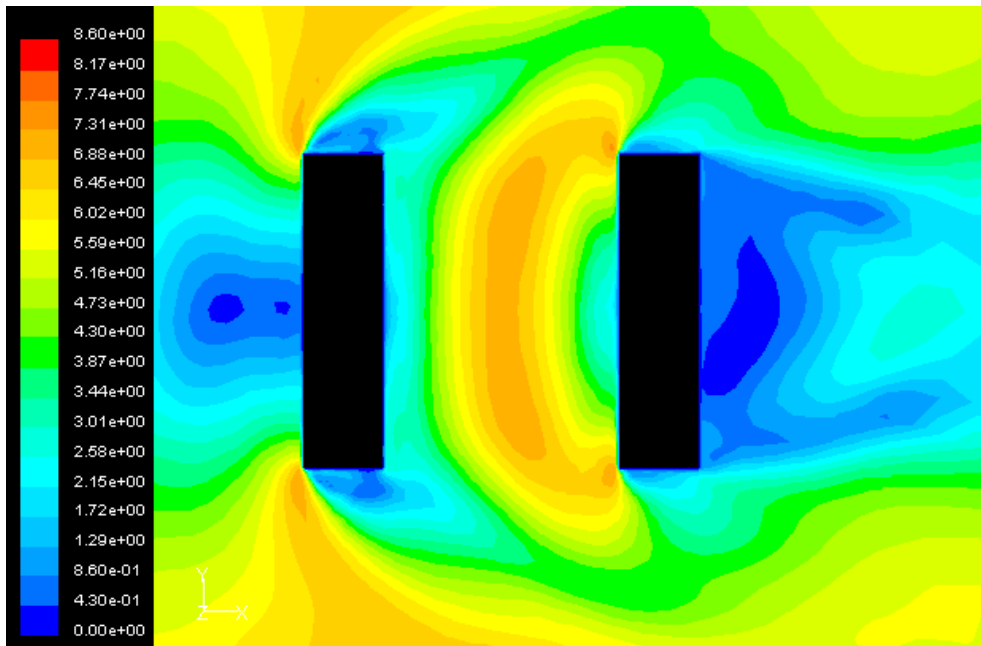
4.4.8 L'effet Wise

Analysons maintenant l'**effet Wise**. Il s'agit d'un rouleau tourbillonnaire qui apparaît devant un bâtiment élevé lorsque celui-ci est précédé d'un petit bâtiment. Il s'agit donc de la même structure architecturale que celle étudiée sous la dénomination de la configuration 2 de l'effet de coin. Mais ici, c'est la vitesse de l'air au centre entre les deux bâtiments qui est étudiée.



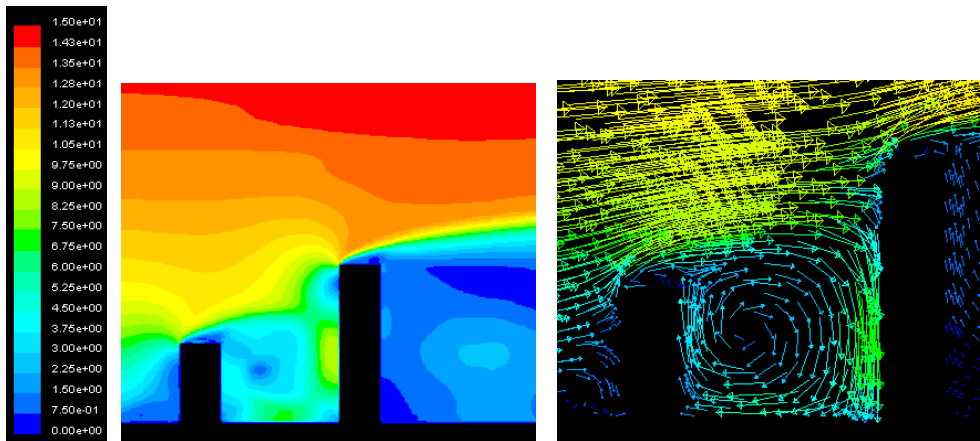
Configuration de l'effet Wise.

Pour un bâtiment de 24m de haut, 48m de long et 12m de large, suivi à une distance de 36m d'un bâtiment élevé de 48m de haut, on voit graphiquement la répartition des survitesses en plan à 1.5m du sol. Une zone d'accélération de l'air au niveau piéton est bien visible entre les deux bâtiments : il s'agit de l'effet Wise.



Plan des survitesses à 1.5 m de haut.

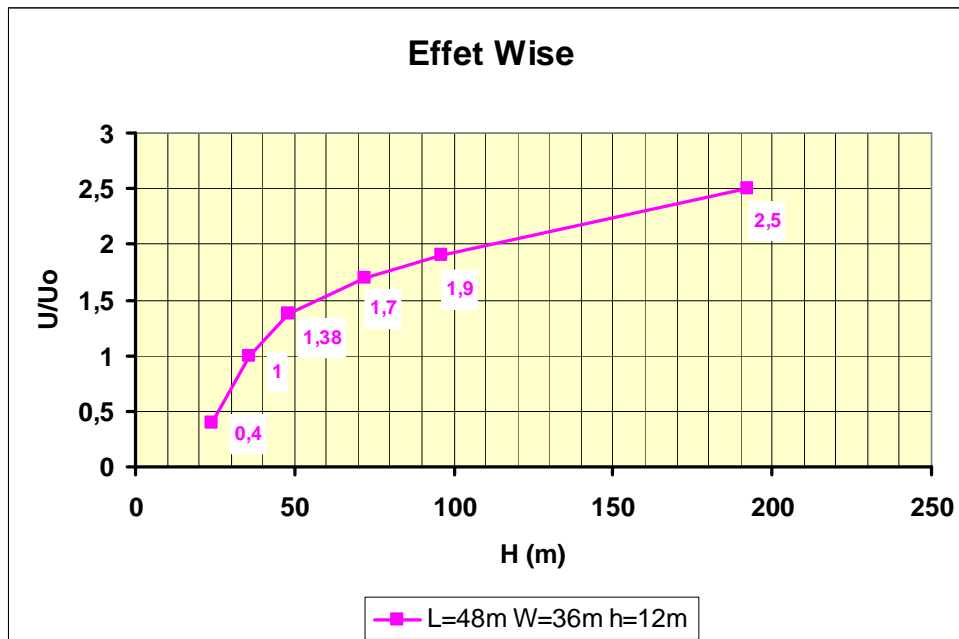
Les graphes ci-dessous donnent la répartition des vitesses de l'air dans le cas d'un effet Wise pour une coupe au centre des deux bâtiments. Le graphe de gauche montre l'écoulement général de l'air autour du groupe de bâtiments en fonction de courbes iso-vitesses. A droite, le graphe donne les vecteurs de vitesses de l'air dans l'espace compris entre les deux bâtiments, c'est-à-dire la zone soumise à l'effet Wise. Attention les échelles du plan ci-dessus et des coupes ci-dessous sont différentes. En revanche, les échelles utilisées pour les deux coupes sont identiques.



Courbes iso-vitesses et vecteurs de la vitesse de l'air au niveau de l'effet Wise.

Ce graphique met en évidence le fait que cet effet tourbillonnaire est spécialement gênant pour les piétons en raison de la forte composante verticale de la vitesse du vent dans la zone critique. Dans le cas ci-dessus, le rapport des survitesses au niveau piéton entre les deux bâtiments vaut $U/U_0=1.4$.

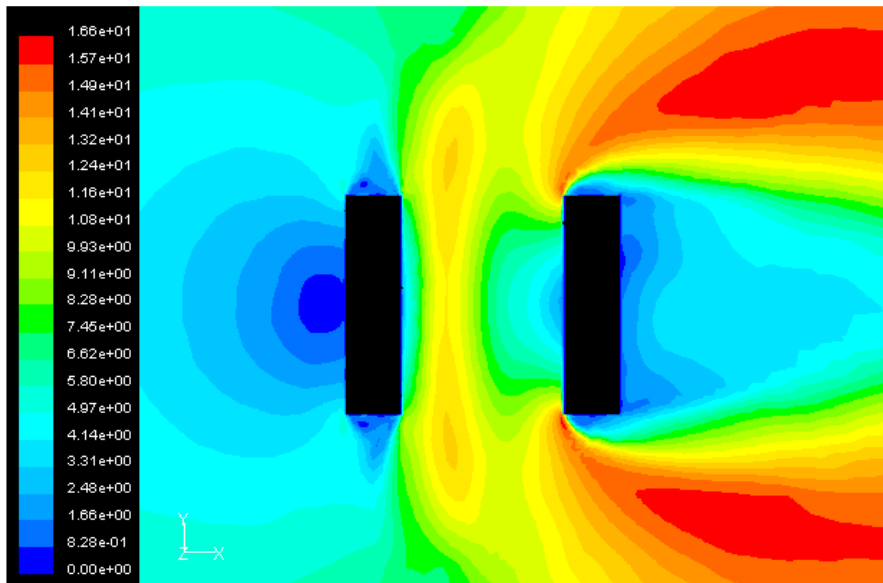
Pour un bâtiment élevé de 48m de long, précédé d'un petit bâtiment de 12m de haut avec une inter-distance entre ces deux bâtiments de 36m, on obtient les valeurs suivantes en fonction de la hauteur du grand bâtiment. Le graphe ci-dessous donne le rapport U/U_0 maximal simulé entre les deux bâtiments pour une hauteur du bâtiment élevé H de 24m, 36m, 48m, 72m, 96m et 192m.



L'effet Wise n'apparaît réellement que pour une hauteur de bâtiment de 40m de haut. Il n'empêche que cet effet peut être réellement critique pour les bâtiments très élevés. Le rapport U/U_0 généré entre les bâtiments par l'effet Wise croît fortement quand la hauteur du bâtiment augmente.

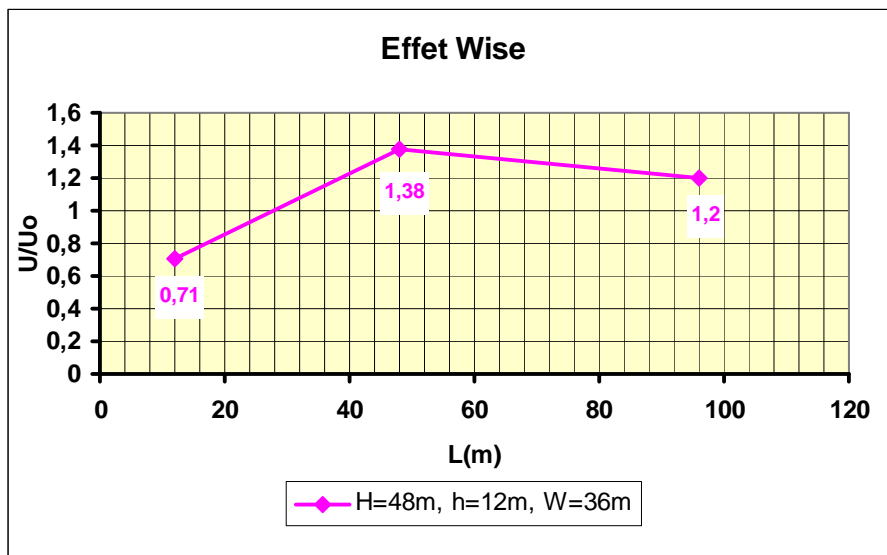
Pour les bâtiments très élevés, l'effet Wise s'étend largement de part et d'autre du groupe de bâtiments. Ainsi, le résultat de simulation ci-dessous montre l'étalement de l'effet Wise sur une longueur environ égale à $2L$ c'est-à-dire deux fois la

longueur des bâtiments pour le cas d'un petit bâtiment de 12m de haut précédant un un bâtiment de 192m de haut avec une interdistance de 36m. Ce graphe montre aussi que la zone où l'effet Wise est le plus prononcé se trouve aux extrémités de la zone d'inconfort, près des bords des bâtiments.



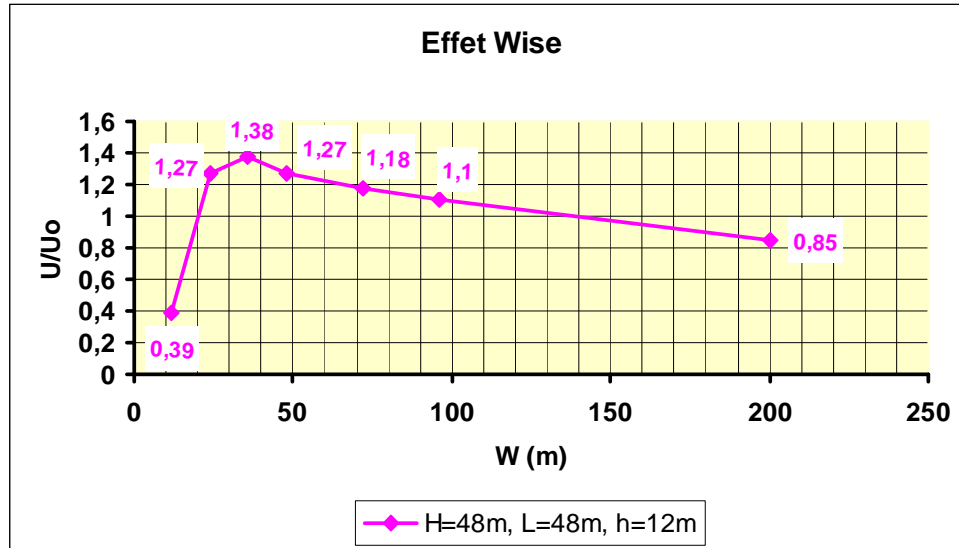
Plan des survitesses à 1.5 m de haut.

Les simulations suivantes permettent d'évaluer l'influence de la longueur du groupe de bâtiments sur l'effet Wise entre les deux bâtiments. La hauteur du bâtiment élevé est cette fois fixée à 48m, celle du petit bâtiment à 12m, pour une longueur identique pour les deux bâtiments de respectivement 12m, 48m et 96m.



Ce graphe montre que pour l'effet Wise, la réduction de la longueur du bâtiment diminue fortement le rapport U/U_0 . L'effet Wise est donc un phénomène qui n'est critique que pour de très hauts bâtiments ($H > 40m$) dont la longueur est également importante. En effet, un bâtiment plus long obstrue davantage l'écoulement du vent et une plus grande part de l'air est donc renvoyée vers le sol. Cependant, le rapport U/U_0 décroît lentement lorsque la longueur des bâtiments s'accroît au-delà de la hauteur du grand bâtiment ($L/H \geq 1$).

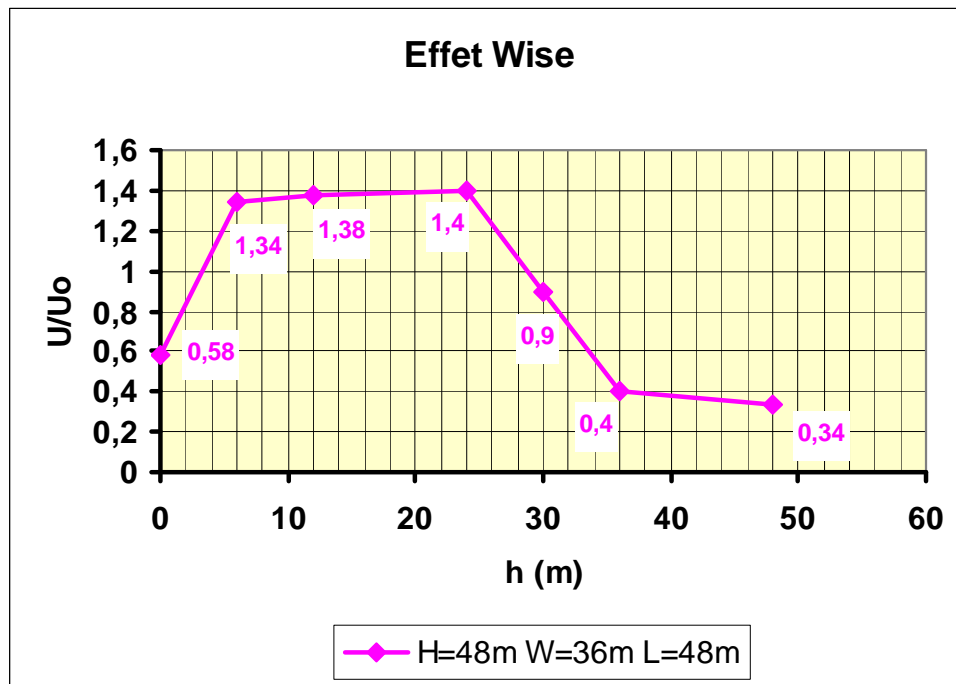
Vu que l'effet Wise se définit par la présence d'un petit bâtiment placé devant un bâtiment élevé, il est intéressant d'étudier l'influence de la distance entre ces deux édifices sur l'inconfort généré au niveau piéton. Le graphe ci-dessous donne le rapport U/U_0 généré par l'effet Wise pour différentes inter-distances mais pour une hauteur et une longueur du bâtiment élevé de 48m et une hauteur du petit bâtiment de 12m.



Pour l'inter-distance entre le petit et le grand bâtiment, on observe les phénomènes suivants :

- Lorsque W est faible, le tourbillon n'arrive pas à pénétrer profondément dans l'espace entre les bâtiments et le rapport U/U_0 est faible.
- Lorsque W augmente, le rapport U/U_0 augmente, atteint un maximum à une distance critique puis diminue. Pour $H=48\text{m}$ et $h=12\text{m}$, l'effet critique correspond à une inter-distance W comprise entre $W=0,4H$ et $W=2H$. La distance la plus critique correspond à une longueur de 36m entre les deux bâtiments, c'est-à-dire une distance égale aux trois quarts de la hauteur du bâtiment élevé : $W=3H/4$.
- Au-delà de $W=2H$, il n'y a plus vraiment d'effet critique. Pour un W supérieur à 200m, le rapport U/U_0 devant le grand bâtiment se rapproche de l'effet tourbillonnaire généré au pied d'un bâtiment élevé isolé. On voit que cet effet est protecteur pour un bâtiment de 48m de haut.

Enfin, pour une distance entre les deux bâtiments fixée, l'effet Wise dépend du rapport de hauteur entre le petit et le grand bâtiment. Le graphe ci-dessous permet d'analyser l'influence de la hauteur du petit bâtiment dans ce processus aérodynamique, pour une distance de 36m entre les deux bâtiments, distance qui se situe dans la zone critique générant réellement l'effet Wise. La hauteur et la largeur du grand bâtiment sont fixées à 48m.



L'effet Wise génère un rapport U/U_0 qui varie en fonction de la hauteur du petit bâtiment amont. Cet effet génère des survitesses au niveau piéton pour une hauteur du petit bâtiment comprise dans l'intervalle $h = [0.1 H ; 0.6 H]$. Les survitesses maximales sont atteintes pour une hauteur du petit bâtiment égale à la moitié de la hauteur du bâtiment élevé : $h = H/2$. Au-dessus de cette hauteur, le petit bâtiment commence à créer un effet de masque qui diminue progressivement l'effet Wise et annule son effet lorsque le petit bâtiment atteint une hauteur égale aux trois-quarts de la hauteur du plus grand bâtiment, générant alors une zone très confortable pour les piétons.

Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet Wise, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur du bâtiment élevé**
- **diminuer la longueur du bâtiment élevé**
- **augmenter la taille du petit bâtiment** de telle sorte que $h \geq 0.6 H$
- **augmenter l'inter-distance entre les deux bâtiments** de telle sorte que $W \geq 2 H$
- **densifier l'environnement proche**
- **protéger l'espace entre les bâtiments** par un auvent, de la végétation,...
- **introduire une porosité au-dessus du niveau piéton** (c'est-à-dire que l'air doit pouvoir passer à travers le grand bâtiment au-dessus du niveau piéton).

A retenir...

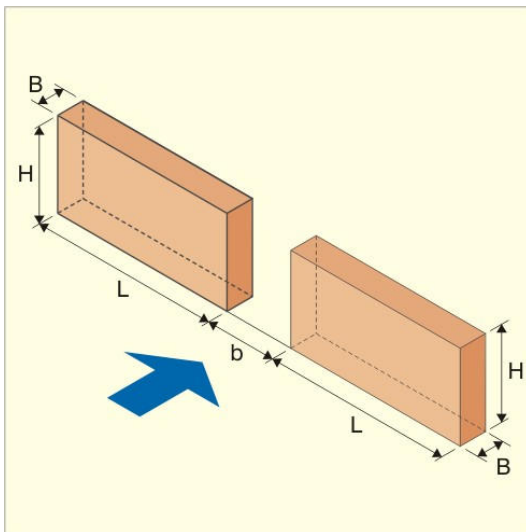
L'effet Wise est un phénomène qui n'est critique que pour de très hauts bâtiments ($H > 40\text{m}$) dont la longueur est également importante. L'effet Wise augmente fortement avec l'accroissement de la hauteur du second bâtiment.

Le rapport de hauteur entre les deux bâtiments et leur inter-distance ont un effet majeur sur la formation de l'effet Wise. L'effet Wise n'apparaît que pour une inter-distance entre les deux bâtiments comprise dans l'intervalle $W = [0.4 H ; 2 H]$ et pour une hauteur du petit bâtiment comprise dans l'intervalle $h = [0.1 H ; 0.6 H]$. L'inter-distance la plus critique vaut $W = 3/4 H$. La hauteur du petit bâtiment la plus critique vaut $h = H/2$.

Pour les bâtiments très élevés, l'effet Wise s'étend largement de part et d'autre du groupe de bâtiments, sur une longueur environ égale à $2L$ où L est la longueur du bâtiment élevé.

4.4.9 L'effet de double coin

La **configuration** de l'effet de double coin ou passage entre deux immeubles est créée à partir de deux bâtiments placés longitudinalement côte à côte et séparés par un passage.



Double coin

Une comparaison d'un même cas pour un profil de vent de campagne, un profil de vent suburbain et un profil de vent urbain a été réalisée pour l'effet de double coin (configuration 2) pour des bâtiments de 60m de long, 18m de haut et un passage de 4m de large. Les profils de vent utilisés suivent les formules suivantes.

Vent de campagne :

$$0.52 Z^{0.2} U_{10,\text{météo}} \text{ où } U_{10,\text{météo}} = 12.91 \text{ m/s soit } 7.28\text{m/s à } 1.5\text{m du sol.}$$

Vent suburbain :

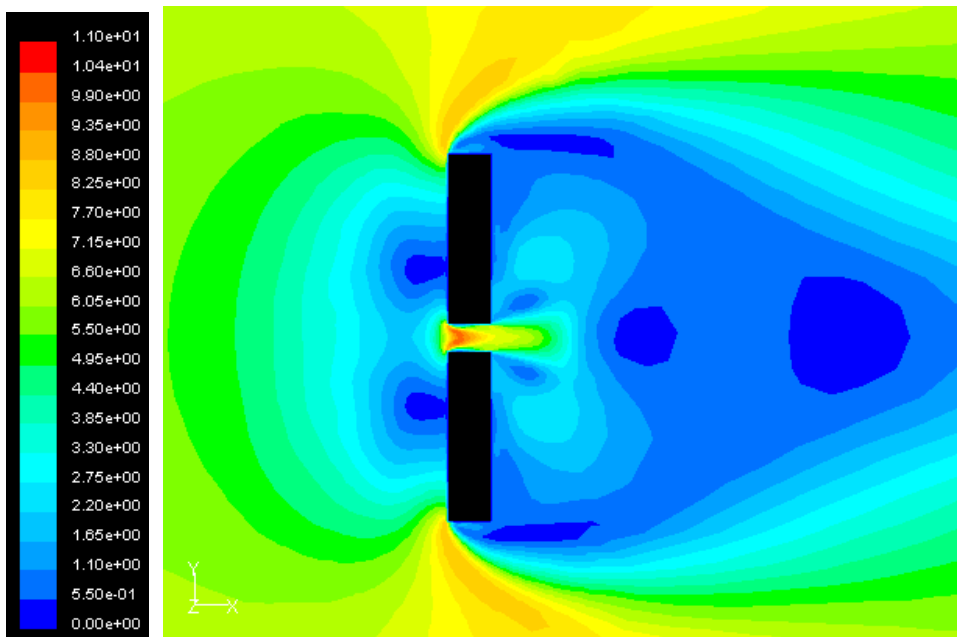
$$0.4 Z^{0.235} U_{10,\text{météo}} \text{ où } U_{10,\text{météo}} = 12.91 \text{ m/s soit } 5.68\text{m/s à } 1.5\text{m du sol.}$$

Vent urbain :

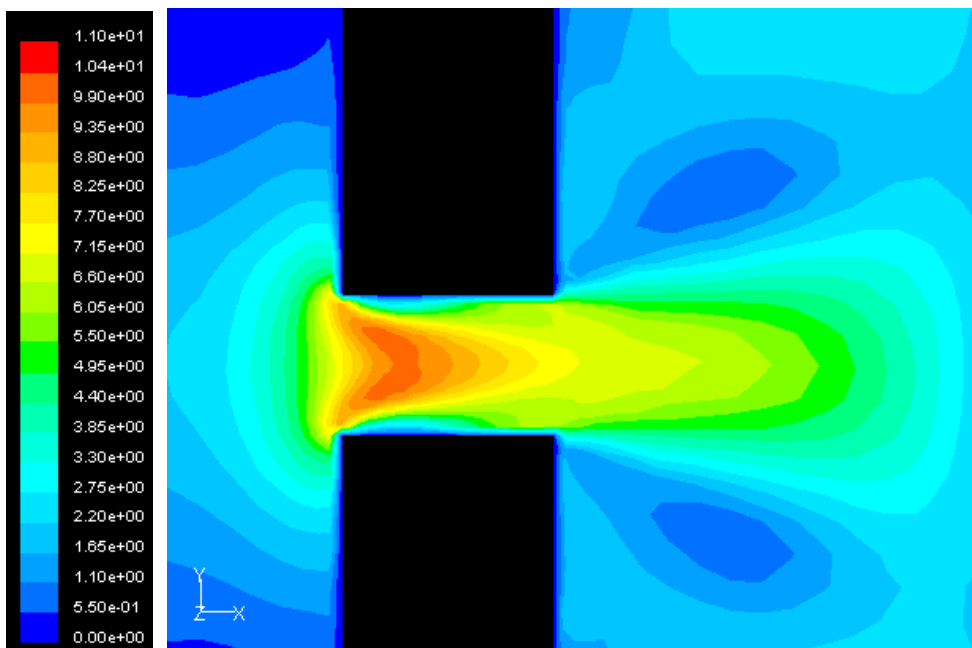
$$0.35 Z^{0.25} U_{10,\text{météo}} \text{ où } U_{10,\text{météo}} = 12.91 \text{ m/s soit } 5\text{m/s à } 1.5\text{m du sol.}$$

Ces trois profils de vent donnent un résultat semblable : le rapport U/U_0 est identique pour le vent urbain et le vent suburbain et vaut 1.84. Pour le vent de campagne, le rapport U/U_0 maximal vaut 1.87. Dans ce cas, la valeur donnée par la simulation en vent urbain est valable pour étudier un cas suburbain et donne une première approximation pour un groupe de bâtiments en pleine campagne....

Le résultat de simulation présenté ci-dessous montre l'effet de double coin généré par un passage entre deux immeubles de 24m de haut, 48m de long et 12m de large, séparés par un couloir de 8m de large. La zone entre les deux bâtiments est très critique du point de vue de l'inconfort au vent. De plus, la zone d'inconfort se prolonge à l'arrière des bâtiments par un jet d'air venant du passage entre immeuble sur une distance environ égale à la largeur des bâtiments formant le passage.

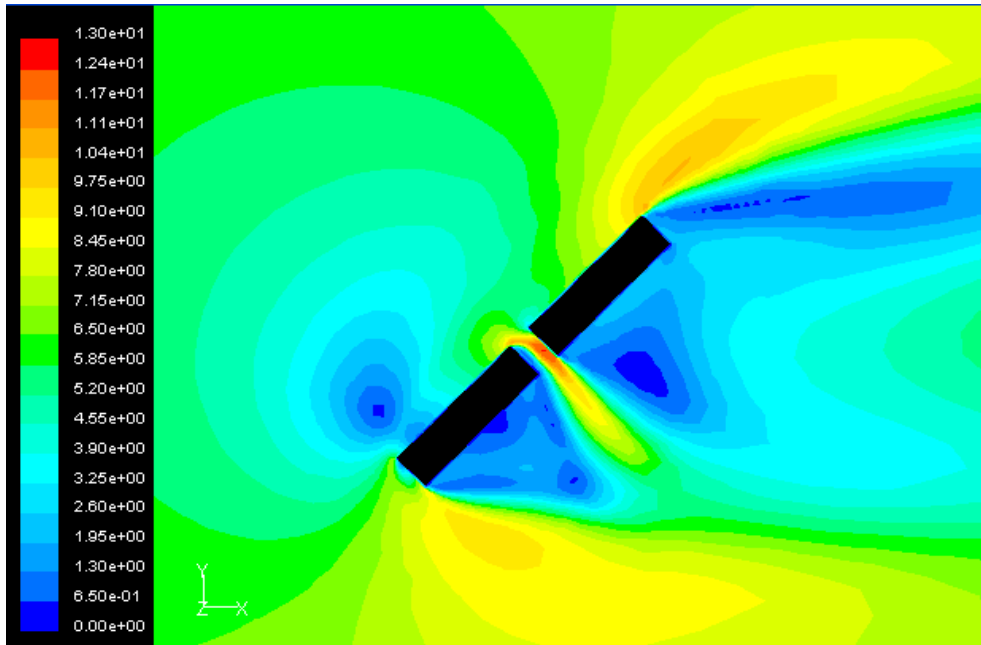


Plan : Survitesses à 1.5m de haut pour un effet de double coin



Agrandissement : survitesses au niveau du passage entre les bâtiments

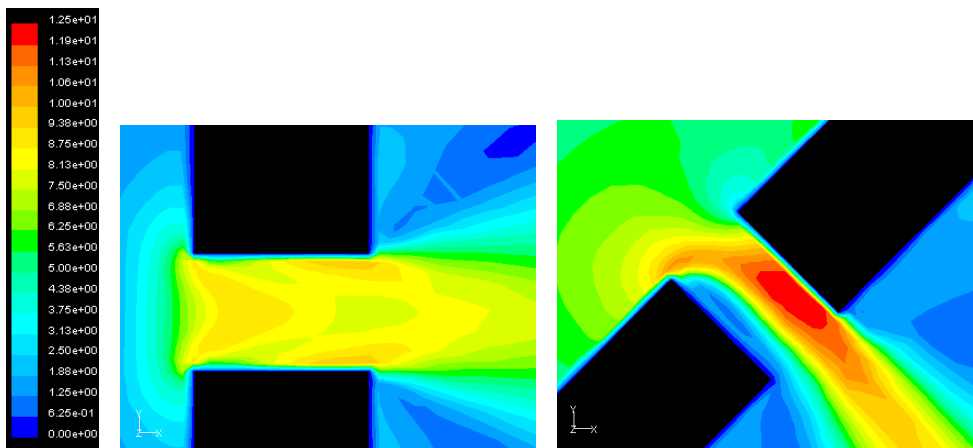
La zone critique de l'effet de double coin est nettement plus longue pour une orientation du vent à 45° par rapport à l'axe entre les bâtiments. Le graphe ci-dessous montre la répartition des vitesses de l'air autour d'un ensemble de bâtiments de 48m de long et de haut, espacés de 8m l'un par rapport à l'autre. On voit que la zone de jet se prolonge dans ce cas sur une longueur égale à trois fois la largeur des bâtiments formant le passage.



Plan : Survitesses à 1.5m de haut pour $\alpha=45^\circ$, $H=48m$, $L=48m$, $B=12m$, $b=8m$

Pour l'orientation du vent parallèlement à l'axe du passage, la distribution du rapport des vitesses se caractérise par un maximum à l'intérieur du passage à quelques mètres de son entrée. La position de la survitesse maximale varie peu avec la hauteur du bâtiment et la largeur du passage, tant que l'orientation du vent est perpendiculaire à la façade. En revanche, la position des survitesses maximales est totalement décentrée lorsque l'orientation du vent devient oblique à la façade.

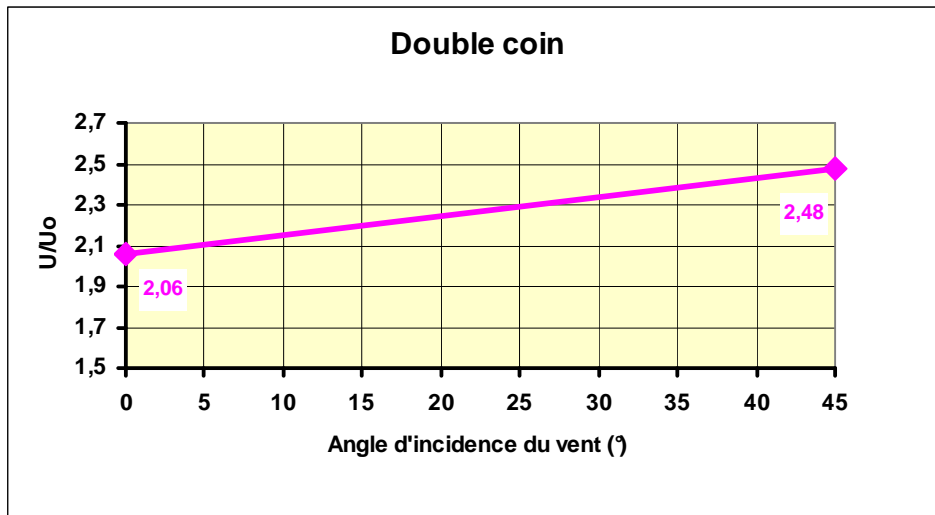
Les graphes ci-dessous montrent les survitesses dans un passage de 8m de large pour une orientation du vent de 0° (à gauche) et de 45° (à droite) par rapport à des bâtiments de 48m de long, 48m de haut et 12m de large.



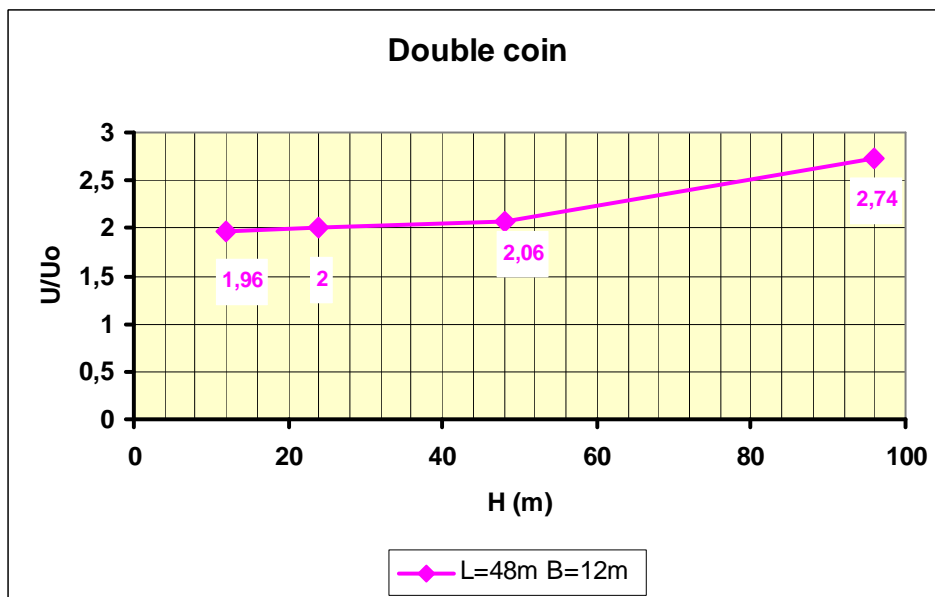
Comparaison des survitesses en plan pour une orientation du vent de 0° et 45° par rapport au passage entre les bâtiments

On voit que les survitesses sont symétriques par rapport à l'axe central du passage pour un vent parallèle au passage alors que les vitesses maximales de l'air longent la paroi du passage exposée au vent dans le cas d'un vent orienté à 45° par rapport au passage entre immeubles. Les deux graphes sont présentés selon la même échelle de vitesses de l'air. On voit déjà que l'orientation à 45° génère un inconfort encore plus élevé que l'orientation du vent parallèle au passage.

Le schéma ci-dessous permet de comparer l'inconfort au vent généré par un effet de double coin pour un vent perpendiculaire aux façades principales et pour une incidence du vent de 45°. Une orientation du vent oblique augmente l'effet de double coin d'environ 20% par rapport à un vent parallèle au passage.

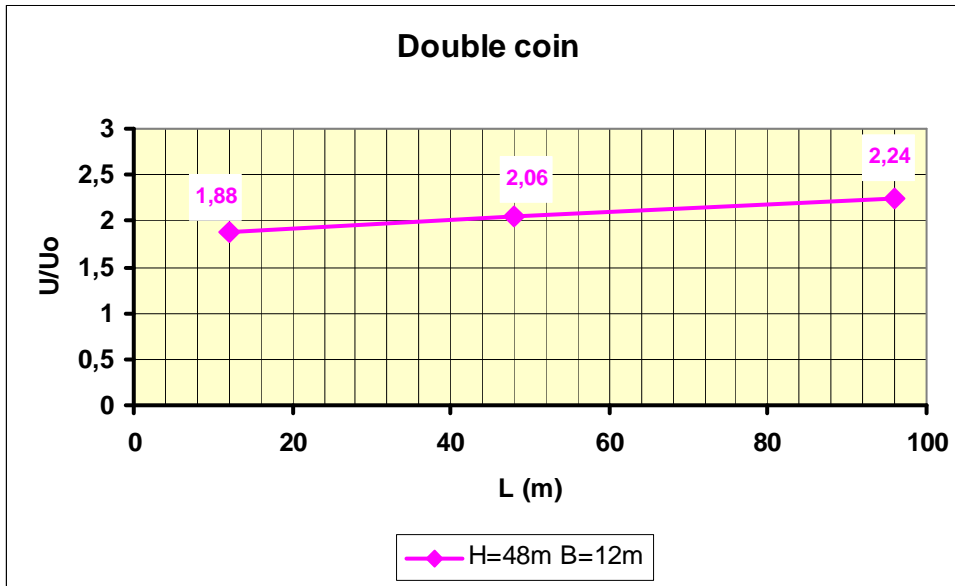


Le schéma ci-dessous présente la variation de l'effet de double coin avec l'accroissement de la hauteur des deux bâtiments, pour une longueur de 48m, une largeur de 12m et un espacement entre les bâtiments de 8m. L'orientation du vent est parallèle au passage entre immeubles : $\theta=0^\circ$.



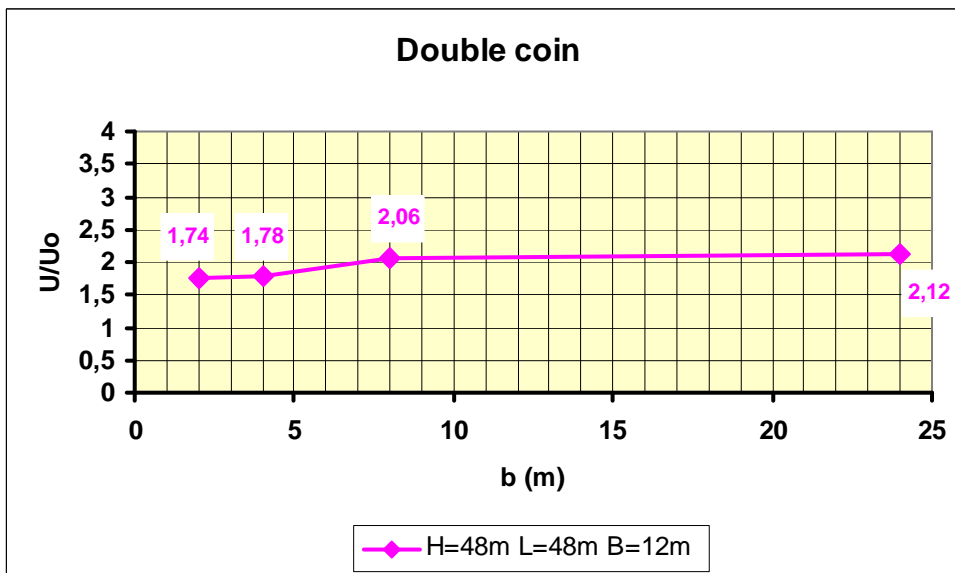
On voit que l'effet de double coin augmente avec l'accroissement de la hauteur des deux bâtiments.

Le graphe ci-dessous montre l'effet de double coin pour un ensemble de deux bâtiments de 48m de haut mais de longueur variable, placés dans la continuité l'un de l'autre mais séparés par un passage de 8m.



Ainsi, l'effet de double coin s'accroît avec l'augmentation de la longueur des bâtiments.

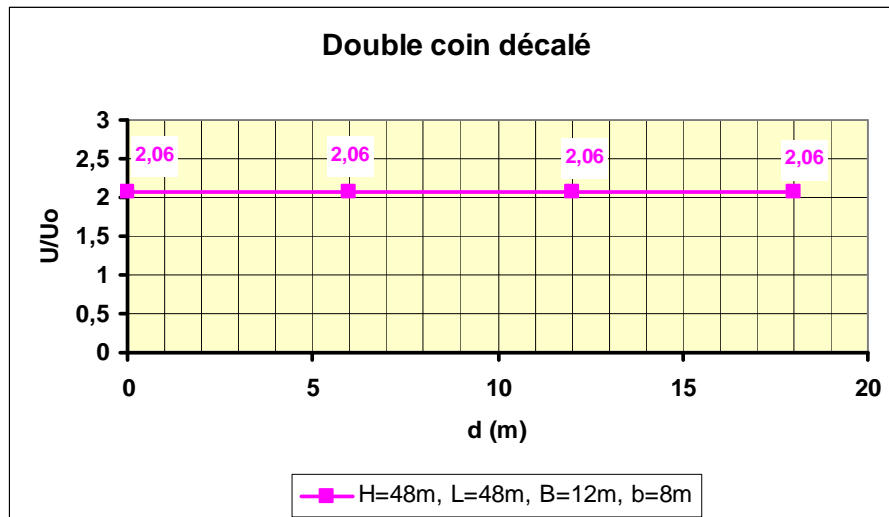
Le graphe ci-dessous montre l'effet de double coin pour un ensemble de deux bâtiments de 48m de haut et de longs, placés dans la continuité l'un de l'autre mais séparés par un passage dont l'interdistance varie.



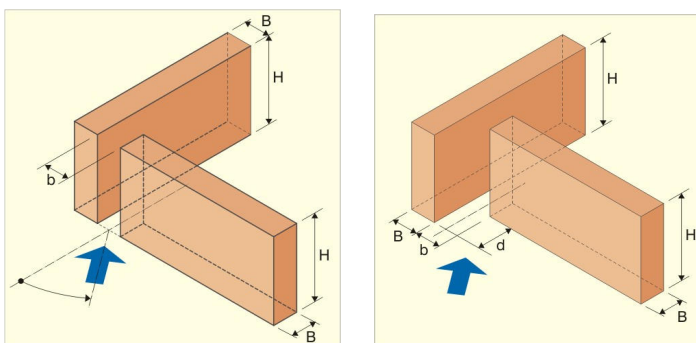
Ce graphe montre clairement que l'effet de double coin n'apparaît que pour une largeur du passage supérieure à 6m car en-dessous de cette longueur les survitesses mesurées à l'intérieur du passage sont inférieures à celles générées par un effet de coin classique. En effet, pour un bâtiment simple de 48m de haut, 48m de long et 12m de large, le rapport U/U_0 caractéristique de l'effet de coin vaut 1.94. En revanche, la largeur du passage a peu d'influence sur l'intensité de l'effet de coin, un fois que celui-ci est établi.

Cette configuration de l'effet de double coin généré par deux bâtiments situés parallèlement l'un à l'autre doit encore être analysée en fonction du décalage d'un bâtiment par rapport à l'autre le long de leurs largeurs respectives. Ainsi, pour une incidence du vent perpendiculaire aux façades, le paramètre d représente l'espace qui sépare les plans des deux façades au vent des bâtiments décalés. La configuration alignée présentée ci-dessus correspond donc à la valeur $d=0$.

Le graphe ci-dessous donne la survitesse maximale due à l'effet de double coin pour des bâtiments de 48m de long, 48m de haut et 12m de large, séparés par une largeur (b) de 8m et décalés d'une distance (d) de 0, 6, 12 et 18m.



Ce schéma montre que l'effet de décalage d'une longueur inférieure ou égale à deux fois la largeur du passage n'a aucun impact sur l'effet de double coin. C'est donc l'espace entre les bâtiments dans le sens de la longueur des façades qui prime sur la position en avant ou en arrière du bâtiment lorsqu'on évalue son effet aérodynamique. Ainsi, les deux configurations ci-dessous donnent par exemple le même inconfort au niveau du passage entre bâtiments.



Wiren a quantifié l'effet d'un auvent protecteur à l'intérieur du passage sur l'effet de double coin au niveau piéton. Un toit à double pente d'inclinaison 2/3 couvre la totalité du passage entre bâtiments à une hauteur de 4m. L'ajout de ce double toit apporte une réduction des survitesses de 10 à 20% en fonction de l'orientation du vent et de la hauteur des bâtiments (Wiren 1975).

Des rangées d'arbres placées dans un passage entre bâtiments peuvent diminuer la vitesse du vent de 10 à 20% (Bottema 1993).

Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet de double coin, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur des bâtiments formant le passage.**
- **orienter le bâtiment** de manière à ce que l'angle d'incidence du vent dominant soit compris entre 70° et 90° par rapport à la façade au vent percée par le passage entre immeubles. L'orientation idéale correspond à un vent perpendiculaire au passage pour piétons.
- **protéger le passage entre immeubles par un bâtiment**
- **protéger le passage entre immeubles par un auvent** qui divise le flux d'air à l'intérieur du passage et crée ainsi un couloir de déviation du vent au-dessus du passage pour piétons.
- **prévoir des éléments poreux** (végétation, écrans perméables,...) à l'intérieur du passage.

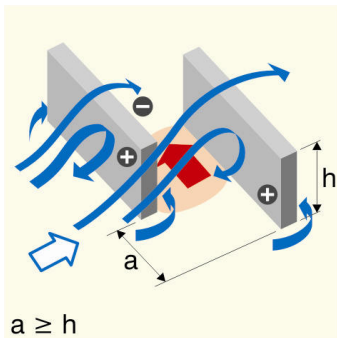
A retenir...

L'intensité de l'effet de double coin, augmente avec l'accroissement de la hauteur des bâtiments et plus légèrement avec l'augmentation de leur longueur.

Une largeur minimale du passage de 6m est nécessaire pour que l'effet de double coin soit supérieur à l'effet de coin d'un bâtiment isolé. En revanche, la largeur du passage a peu d'influence sur l'intensité de l'effet de coin, une fois que celui-ci est établi.

Des bâtiments décalés créent un effet de double coin identique par rapport à des bâtiments parallèles.

4.4.10 L'effet de bâtiments en quinconce (effet de liaison de zones de pression différente)



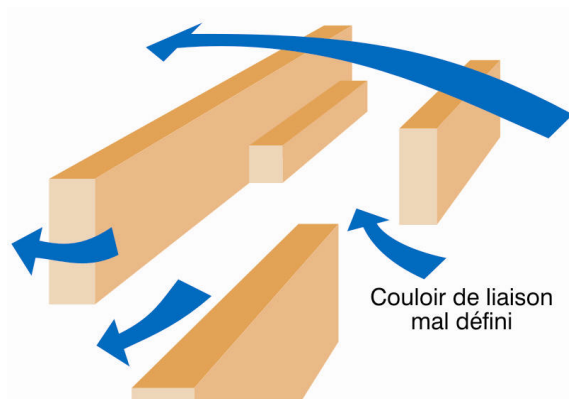
(Gandemer & Barnaud 1975).

Nous n'avons pas réalisé de simulations pour cet effet critique du vent. Nous nous contenterons de résumer les informations trouvées dans la littérature. Les valeurs quantitatives ne peuvent pas être directement comparées avec les résultats de nos simulations pour les effets critiques du vent étudiés précédemment.

Lorsque le vent rencontre un obstacle, il se forme une surpression à l'amont et une dépression à l'arrière de celui-ci. Si, au sein d'un plan masse, des bâtiments se trouvent placés en quinconce, sous une incidence du vent voisine de la normale, un phénomène d'écoulement entre les zones de pression différente (sens des pressions décroissantes) est formé. L'anomalie affecte tout le couloir de liaison.

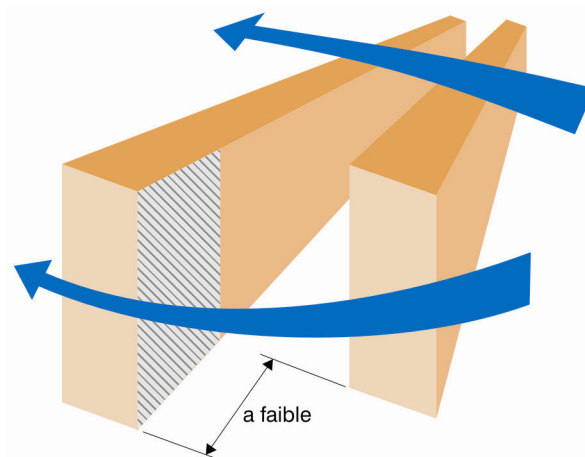
D'après Gandemer, pour que ce phénomène existe, il est nécessaire que (Gandemer 1975):

- le couloir de liaison soit bien défini, c'est dire qu'il soit continu et sans obstruction par rapport au vent



Pas d'effet critique du vent. (Gandemer 1975).

- la largeur du couloir de liaison reste inférieure ou égale à la hauteur des bâtiments en quinconce : $d \leq h$.
- la largeur des façades au vent non commune aux bâtiments soit supérieure ou égale à la hauteur des bâtiments en quinconce : $a \geq h$.

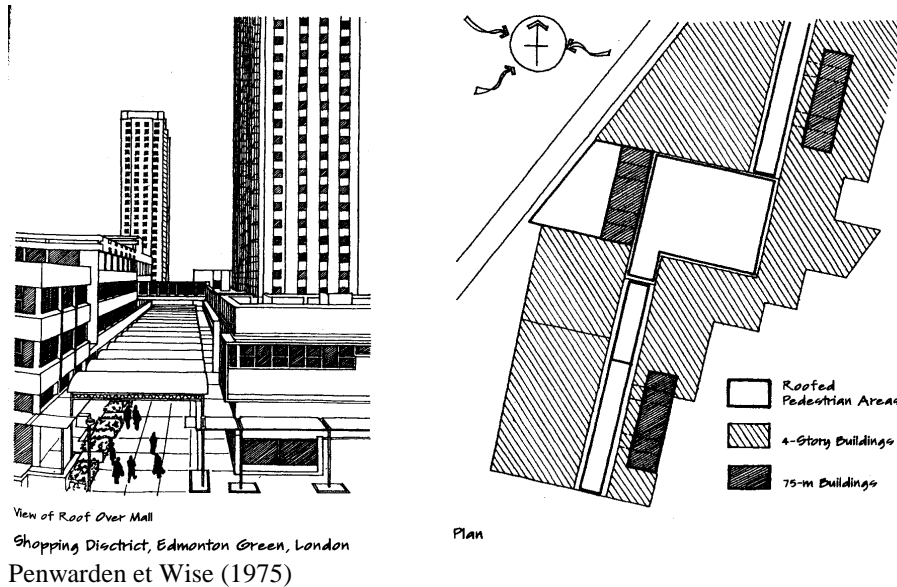


Pas d'effet critique du vent. (Gandemer 1975).

Pour une hauteur de bâtiments de 30m, des valeurs du rapport U/U_0 de 1.4 sont courante. Pour des bâtiments de 100m de haut, cet effet vaut 1.8 lorsque les tours sont espacées d'une largeur $d = L/4$ où L est la longueur au vent des bâtiments en

quinconce (Gandemer 1975). On voit donc que cet effet critique du vent est encore une fois très sensible à la hauteur des bâtiments.

Le « shopping district at Edmonton Green » à Londres illustre bien cet effet de bâtiments en quinconce entre trois bâtiments élevés (immeubles à appartements de 75m de haut). Pour remédier à l'inconfort important au niveau des deux rues de liaisons ainsi que sur la place, des toits ont été placés au-dessus de tous les espaces publics extérieurs pour protéger les piétons.



Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet des bâtiments en quinconce, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur des bâtiments en quinconce.**
- **rapprocher les bâtiments en quinconce** pour que la largeur de la surface au vent non commune aux bâtiments soit inférieure à la hauteur des bâtiments en quinconce.
- **entraver l'écoulement dans le couloir de liaison à l'aide de décrochements**



(Gandemer 1975).

- **élargir le couloir de liaison** : sa largeur doit être supérieure à la hauteur moyenne des bâtiments en quinconce.
- **rendre le couloir de liaison poreux** en séparant les bâtiments qui le constituent

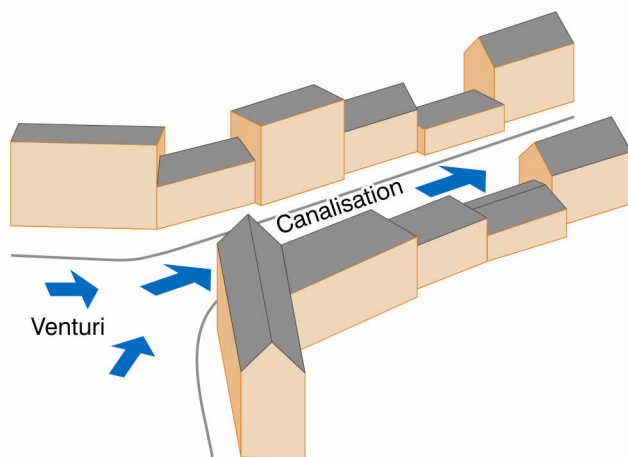
- **introduire des éléments poreux** (végétation, écrans perméables,...) dans le couloir de liaison.

A retenir...

L'effet de bâtiments en quinconce s'accroît fortement avec l'augmentation de la hauteur des bâtiments.

Son existence dépend de la définition et des dimensions du couloir de liaison entre les bâtiments en quinconce.

4.4.11 L'effet de canalisation linéaire



(Gandemer & Barnaud 1975).

Nous n'avons pas réalisé de simulations pour cet effet critique du vent. Nous nous contenterons de résumer les informations trouvées dans la littérature.

Une canalisation parallèle au vent dominant ne donne aucun caractère de protection mais n'introduit pas non plus des zones de survitesses importantes. Les vitesses peuvent toutefois être élevées si les conditions météorologiques ou l'implantation, par exemple en bord de mer, favorisent de fortes vitesses de vent. En revanche, une canalisation linéaire devient une cause de survitesses importantes si elle est associée à une autre anomalie aérodynamique (effet Venturi,...).

D'après Gandemer, pour que ce phénomène existe, il est nécessaire que (Gandemer 1975):

- le couloir soit constitué de parois peu poreuses (porosité totale < 5%), dont l'espacement maximal est inférieur ou égal à l'épaisseur des bâtiments.
- la largeur du couloir soit relativement constante et reste inférieure à trois fois la hauteur moyenne des constructions qui le constitue.
- l'incidence du vent soit parallèle à l'axe de la canalisation.

La hauteur des bâtiments influence l'anomalie initiale mais ne joue pas directement sur le phénomène de canalisation. (Gandemer 1975)

L'intensité de l'effet critique dans la canalisation dépend évidemment de l'intensité de l'effet critique de départ qu'elle propage le long de son axe.

Conseils pratiques:

Pour limiter l'effet de canalisation, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

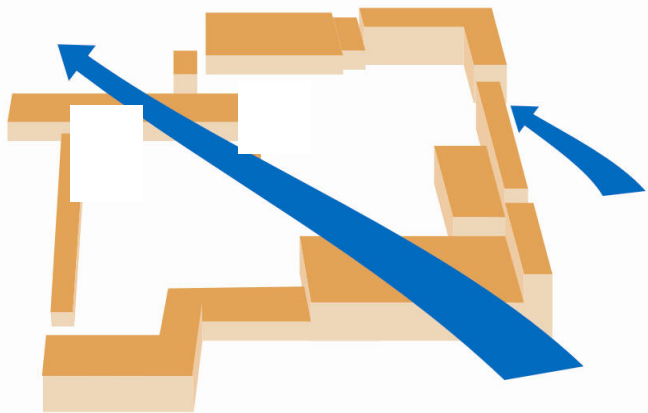
- **diminuer la longueur des canalisations**, surtout à proximité des bâtiments élevés.
- **élargir la canalisation** de manière à ce que sa largeur soit supérieure à trois fois la hauteur des bâtiments qui la constituent.
- **entraver l'écoulement dans la canalisation** à l'aide de décrochements, débords, terrasses,...
- **rendre la canalisation poreuse** (porosité >5%) en séparant les bâtiments qui la constituent
- **orienter les longues canalisations de manière perpendiculaire ou oblique par rapport aux vents dominants**, surtout à proximité des bâtiments élevés.
- **introduire des éléments poreux** (végétation, écrans perméables,...) le long de la canalisation afin d'y freiner le vent.

A retenir...

Une canalisation linéaire n'est pas une situation critique en soit mais elle peut transmettre un inconfort au vent généré par un bâtiment élevé ou en groupe de bâtiments sur une grande longueur.

La largeur d'une canalisation continue et non obstruée et son orientation par rapport au vent sont les paramètres déterminants pour l'existence d'un tel effet critique.

4.4.12 L'effet de maille



(Gandemer 1975).

Nous n'avons pas réalisé de simulations pour cet effet critique du vent. Nous nous contenterons de résumer les informations trouvées dans la littérature. Les valeurs quantitatives ne peuvent pas être directement comparées avec les résultats de nos simulations pour les effets critiques du vent étudiés précédemment.

L'écoulement du vent et le confort des piétons à l'intérieur d'une maille dépendent des dimensions du volume bâti.

Les résultats ci-dessous ont été obtenus en test en tunnel à vent sur des maquettes formant des mailles fermées dont la longueur face au vent (L) et la profondeur (B) étaient variables mais la hauteur (H) constante et peu élevée. La vitesse du vent a été calculée sur 25 points répartis selon un maillage orthogonal dans l'espace étudié et à partir desquels une moyenne arithmétique a été déterminée pour chaque îlot. Ainsi les différentes géométries ont pu être comparées du point de vue de leur capacité de protection par rapport au vent. L'orientation du vent a été simulée pour $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ et 90° . (Smith & Wilson 1977).

Le tableau ci-dessous donne le rapport U/U_0 entre la moyenne des vitesses de vent expérimentées dans la maille au niveau piéton et la vitesse de référence sans bâtiment à la même hauteur, pour différents rapport B/H, L/H et les quatre orientations du vent (Smith & Wilson 1977).

B/H	L/H	U/U ₀			
		$\Theta = 0^\circ$	$\Theta = 30^\circ$	$\Theta = 60^\circ$	$\Theta = 90^\circ$
1	1	0.37			0.37
1	2	0.41	0.41	0.38	0.42
1	3	0.43	0.47	0.41	0.41
1	4	0.45	0.44	0.59	0.36
2	1	0.42	0.38	0.41	0.41
2	2	0.44	0.47	0.47	0.44
2	4	0.49	0.49	0.45	0.37
2	6	0.49	0.56	0.6	0.4
2	8	0.5	0.71	0.85	0.51
3	1	0.41	0.4	0.46	0.43
3	3	0.43	/	0.44	0.43
4	1	0.36	0.59	0.49	0.45
4	2	0.37	0.45	0.48	0.49
4	4	0.41	0.49	0.6	0.41
4	8	0.42	0.57	0.57	0.4
6	2	0.4	0.6	0.71	0.49
8	2	0.51	0.85	0.54	0.5
8	4	0.4	0.6	0.51	0.42
8	8	0.36	0.5		0.36
10	10	0.72	/		0.72

On voit bien que quelque soit les proportions de la maille (pour une longueur face au vent et une profondeur de la maille variant entre une fois et dix fois la hauteur de la maille) et quelque soit l'orientation du vent, une maille fermée génère une zone de grande protection par rapport aux vitesses de vent. Cette situation correspond évidemment aux intérieurs d'îlots, rencontrés dans la majorité des villes européennes.

D'après Gandemer, un ensemble de bâtiments en forme de boucle constitue une maille dès que (Gandemer 1975) :

- la hauteur moyenne h des bâtiments est supérieure à leur épaisseur.
- la longueur non construite de cette maille ne représente pas plus de 25% du périmètre de la maille.

D'une façon générale, toutes les mailles plus ou moins bien définies augmentent le confort si les dimensions transversales sont de l'ordre de 50 à 60m.

L'effet protecteur de la maille à l'intérieur de son périmètre est constaté pour des hauteurs de bâtiments inférieures ou égales à 25m et pour toutes les directions du vent dès que le rapport $S/(h^2) < 10$, où S est la superficie intérieure de la maille et h est la hauteur moyenne des bâtiments. (Gandemer 1975)

Pour des bâtiments de 30m de haut ou plus, l'influence de la position des ouvertures vis à vis de la direction du vent joue un rôle fondamental (Gandemer 1975) :

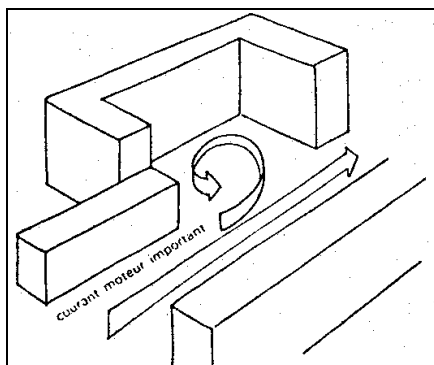
- lorsque la maille est fermée ou que l'ouverture est sous le vent de la maille, si $S/(h^2) < 30$, alors l'effet protecteur est important ($U/U_0 \approx 0.5$).
- lorsque la maille est ouverte au vent, si $S/(h^2) < 20$, il y a une zone de protection ($U/U_0 \approx 0.8$) sur 75 % de l'aire de la maille et une zone exposée au vent : l'embouchure, sur 25% de la maille.
- lorsque la maille présente son ouverture sous un angle de 45° à 90° par rapport au vent, si $S/(h^2) < 20$, les zones de confort sont variables mais globalement les vitesses de l'air sont plus faibles qu'en terrain découvert.

Il existe en plus deux types de mailles particulières (Gandemer 1975). La maille rectangulaire dont le côté compris entre les deux autres est de hauteur au moins égale à deux fois celle des autres cotés: le bâtiment élevé joue un rôle d'écran si l'incidence du vent est faible et si S' (surface du bâtiment élevé) vaut au moins 20% de S (la surface de la maille), alors l'effet protecteur est important ($U/U_0 \approx 0.5$).



(Gandemer & Barnaud 1975).

En revanche, la maille sifflet, une maille adjacente à un couloir de liaison ou une canalisation linéaire et telle que $S/(h^2) < 5$, donne des vitesses de vent supérieures à un terrain dégagé.



(Gandemer 1975).

Enfin, signalons que des mailles d'une superficie beaucoup plus importante ($S/h^2 \leq 300$) peuvent introduire un effet de protection intérieure si elles sont

intégrées dans un tissu urbain de hauteur similaire à la hauteur de la maille. (Gandemer 1975)

En bref, on peut résumer cet ensemble de constatations par la conclusion suivante : l'effet de protection des mailles, dont le périmètre est construit sur au moins 75% de sa circonférence, est d'autant plus important que $S/(h^2)$ est faible (idéalement inférieur à 30 pour des mailles en site dégagé mais allant jusqu'à 300 pour des mailles en site urbain), avec des ouvertures sous le vent. L'étude de Smith & Wilson nous a montré qu'une maille totalement fermée peut présenter une superficie très protégée pour toutes les directions du vent tant que le rapport S/h^2 est inférieur ou égal à 100.

Il faut toutefois signaler que si l'augmentation de la hauteur des bâtiments favorise le confort des piétons à l'intérieur de la maille, il est tout de même nécessaire de prendre en compte les effets critiques qu'elle peut éventuellement générer autour de la maille (effets de coin, ...).

Conseils pratiques:

Pour favoriser l'effet de maille qui assure un espace confortable pour les piétons, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **augmenter la hauteur des bâtiments** pour augmenter la superficie de la zone protégée à l'intérieur de la maille.
- **créer une maille la plus continue possible**, en construisant des murs ou des barrières végétales là où aucun bâtiment ne peut pas être construit.
- **orienter la maille** de manière à ce que ses ouvertures soient sous les vents dominants.
- **densifier l'environnement de la maille**, par des bâtiments de hauteur homogène et similaire à la hauteur de la maille.

A retenir...

Un effet de maille peut apparaître pour les configurations construites en boucle dont la hauteur moyenne des bâtiments est supérieure à leur épaisseur et dont la longueur non construite de cette boucle ne représente pas plus de 25% du périmètre de la maille.

L'effet de protection généré au cœur d'une maille est d'autant plus important que :

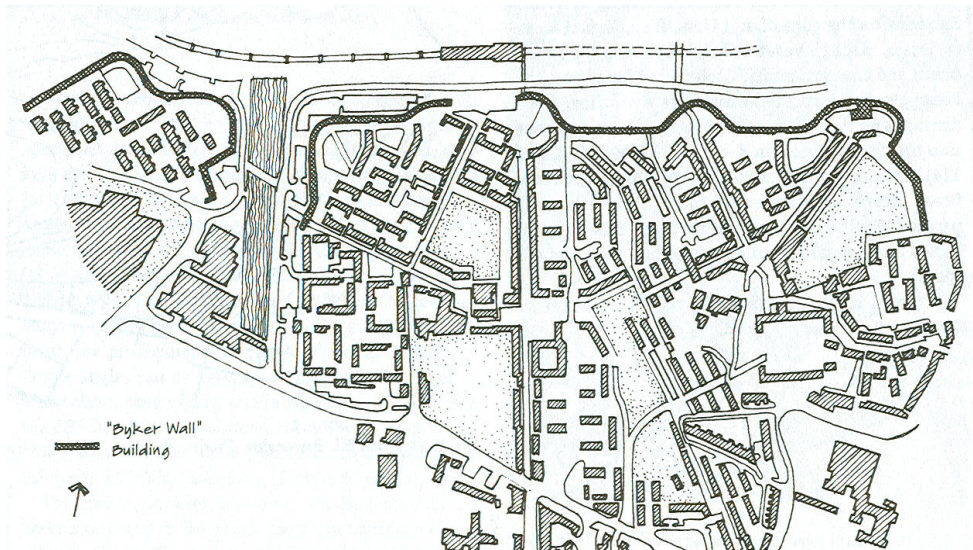
- le rapport entre sa superficie intérieure et le carré de sa hauteur est faible,
- la maille est davantage fermée,
- les ouvertures sont placées du côté sous le vent,
- l'environnement construit est formé de bâtiments d'une hauteur équivalente à celle de la maille.

4.4.13 L'effet d'écran linéaire

Nous n'avons pas réalisé de simulations pour cet effet protecteur dû à un écran linéaire. Nous nous contenterons de résumer les informations trouvées dans la littérature.

Les études ont montré qu'un bâtiment long et continu placé comme façade au vent par rapport à une zone urbaine peut réduire les vitesses de vent entre les bâtiments de ce quartier jusqu'à 15% dans la direction du vent obstruée (Givoni 1969).

Ainsi, le « Byker Redevelopment », à Newcastle upon Tyne, en Angleterre, conçu par Ralph Erskine, est situé sur une pente faisant face au sud-ouest avec une vue vers le centre ville de Newcatle. Erskine a protégé ce quartier du vent en créant de longs rubans bâtis fermant le quartier aux vents d'orientation nord. Cette longue bande de bâtiments étroits bloque le vent venant de la mer du Nord et isole en même temps le centre de la communauté du bruit généré par le train et le trafic automobile. (Brown et De Kay 2001 à partir de Collymore 1994).



Site Plan, Housing at Byker, Newcastle-Upon-Tyne, England, Ralph Erskine

(Brown et De Kay 2001).

Conseils pratiques:

Pour favoriser l'effet d'écran linéaire qui assure un espace confortable pour les piétons, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **allonger le premier bâtiment face au vent de manière à créer une bande construite** perpendiculairement aux vents dominants.
- **augmenter la hauteur de l'écran linéaire.**
- **combler les espacements entre les bâtiments face au vent par des écrans poreux (végétation, ...)** de manière à assurer la continuité de la protection.

A retenir...

L'**effet de protection** généré dans le sillage d'un bâtiment ou d'un brise-vent peut être étendu à un quartier en créant un **écran continu** perpendiculairement aux vents dominants.

4.4.14 L'effet de pyramide



(Gandemer & Barnaud 1975).

Nous n'avons pas réalisé de simulations pour cet effet protecteur. Nous nous contenterons de résumer les informations trouvées dans la littérature. Les valeurs quantitatives ne peuvent pas être directement comparées avec les résultats de nos simulations pour les effets critiques du vent étudiés précédemment.

Pour des formes pyramidales inférieures à 50m de haut et bien étagées, le rapport U/U_0 reste inférieur à 1. (Gandemer 1975)

Pour que l'effet de pyramide soit réellement efficace, il est toutefois important d'étagier le plus possible les niveaux. Si la gradation n'est pas assez progressive, les secteurs critiques seront

- les coins globaux de la pyramide.
- les balcons au vent et les terrasses au voisinage des crêtes.

Conseils pratiques:

Pour favoriser l'effet de pyramide, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur du bâtiment du centre vers les espaces publics de manière la plus continue possible (gradins progressifs), surtout à proximité des coins.**
- **densifier la zone proche des coins globaux de la pyramide**
- **protéger les coins globaux de la pyramide par des éléments poreux (végétation, écrans perméables,...).**
- **couper les angles de la pyramide à 45° ou créer des arrondis afin de diminuer le gradient horizontal des vitesses moyennes au niveau des coins.**

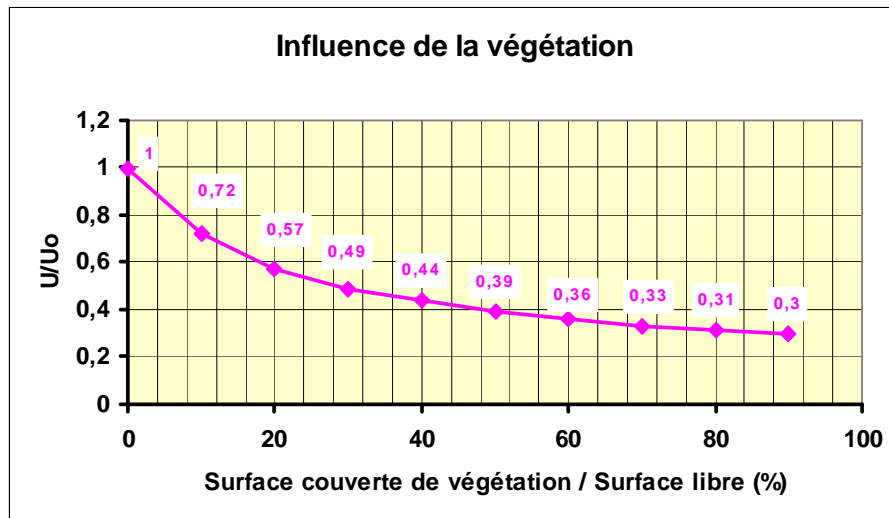
- **protéger les balcons** situés aux coins de la pyramide et à proximité de son sommet (volumétrie aérodynamique, garde-corps déflecteurs, ...).

A retenir...

Les formes pyramidales offrent un effet de protection par rapport au vent qui permet d'augmenter la hauteur d'un bâtiment tout en conservant le confort au niveau piéton. Il est important d'étager le plus possible les niveaux.

4.4.15 L'effet de la végétation

Pour la réduction du vent dans les zones suburbaines, une étude de Heisler montre que pour une densité bâtie inférieure à 25%, la réduction de la vitesse du vent entre les bâtiments due à la présence d'une végétation haute (haies,...) peut être évaluée à partir du graphe ci-dessous en fonction de la densité de végétation présente (Heisler 1989).



(Graphique élaboré d'après Heisler 1989).

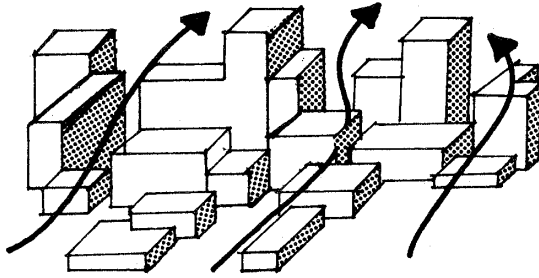
En réalité, un environnement comportant une végétation dense dépasse rarement une couverture de l'espace entre les bâtiments de plus de 25%.

Une étude in situ de Heisler confirme les ordres de grandeur donnés ci-dessus pour une couverture végétale comprise entre 25% et 10% de la surface libre entre bâtiments. De plus, cette étude montre que quand la végétation est dense, malgré la perte des feuilles en hiver, la réduction de la vitesse du vent y est importante. Par contre, lorsque les arbres sont isolés, la protection hivernale de la végétation à feuilles caduques devient négligeable. (Heisler 1989)

Pour une couverture végétale dense en hiver, nous conseillons d'utiliser l'outil graphique présenté ci-dessus et de majorer le rapport U/U_0 obtenu d'un facteur 10%, ce qui donne la formule suivante : U/U_0 en hiver = 1.1 * (U/U_0 en été).

4.4.16 L'effet de masque urbain

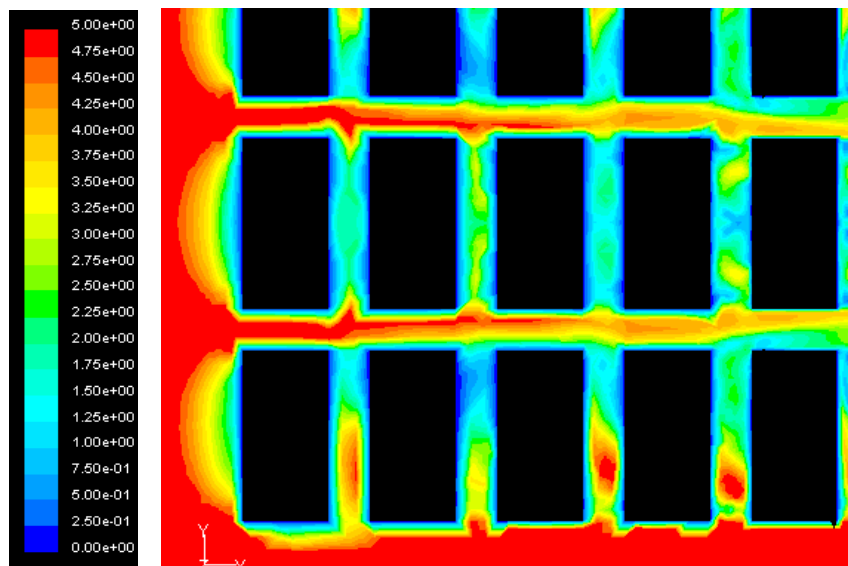
L'effet de masque urbain génère une zone de protection étendue sur l'ensemble d'un tissu de hauteur relativement homogène et peu élevée.



(Gandemer & Barnaud 1975).

Nous considérons comme un milieu de hauteur relativement homogène tout milieu urbain pour lequel la hauteur des bâtiments les plus élevés reste inférieure au double de la hauteur moyenne du tissu urbain considéré. Dans les espaces publics d'un milieu urbain dense et de hauteur relativement peu élevée, les vitesses moyennes de l'air sont faibles, typiquement de l'ordre de 0.3 à 0.8 (Gandemer 1975).

Le graphique ci-dessous provient d'une simulation réalisée avec FLUENT pour un ensemble urbain de 7 x 3 blocs de 100m de long, 50m de large et 19m de haut espacés de 25m les uns des autres. La couleur rouge correspond aux vitesses de l'air d'environ 5m/s, ce qui correspond à U_0 pour un terrain ouvert à 1.5m du sol et donc à la vitesse de vent qui arrive au niveau du front de l'urbanisation. On voit que le vent est ralenti sur une distance de trois blocs, c'est-à-dire 200m de long, dans la direction du vent et d'un demi bloc, c'est-à-dire 50m de long, dans la direction perpendiculaire au vent.



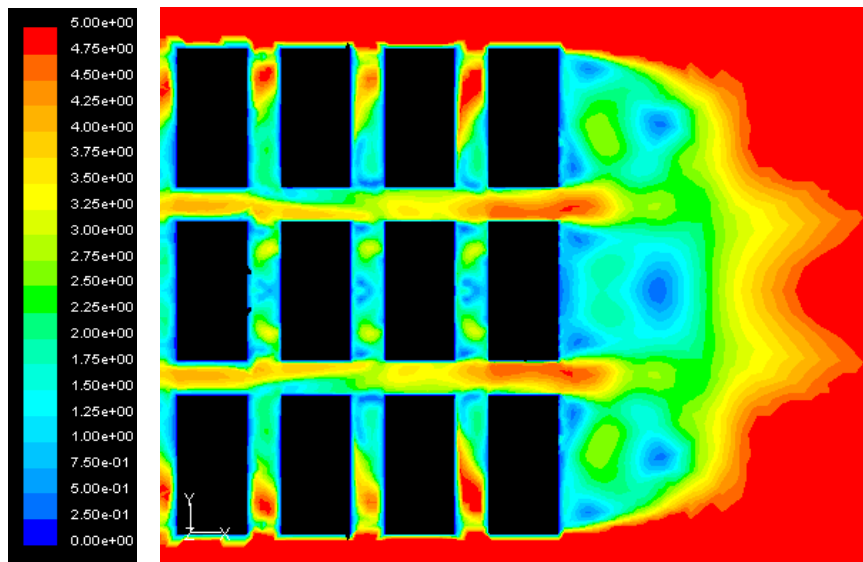
Courbes iso-vitesses en plan à 1.5m de haut.

Au-delà de cette bande périphérique de 200m de large dans la direction du vent et de 50m de large dans la direction perpendiculaire, les vitesses de l'air sont nettement plus faibles : le rapport U/U_0 moyen vaut 0.53 sur l'ensemble du tissu

urbain comprenant le dernier bloc de l'urbanisation ouvert sur une zone dégagée, 0.3 pour les rues protégées du vent et au centre de ce quartier, 0.61 pour les rues dans la direction du vent mais au centre du quartier et 0.84 pour la zone de la rue exposée au vent et ouverte sur la zone dégagée à l'arrière de l'urbanisation. Ainsi, l'ensemble des rues de ce tissu urbain assurent des conditions très confortables pour les piétons, au-delà d'une zone périphérique de 200m dans la direction du vent et 50m dans la direction perpendiculaire au vent.

Dans ce type de plan masse, la zone de probabilité d'accidents aérodynamiques la plus forte est une bande de l'ordre de 200 mètres d'épaisseur située en périphérie de l'urbanisation ou du quartier. En bordure de ville, placer les îlots en quinconce est utile pour réduire la vitesse du vent sur cette zone plus exposée.

La simulation ci-dessous montre qu'au-delà d'un quartier urbain dense de hauteur homogène et peu élevé, on trouve une zone de grande protection d'environ 100 m de long. Au-delà de 200m après l'urbanisation, l'effet de masque urbain a disparu. Les rues au vent s'ouvrant sur un large espace ouvert perdent également les bénéfices de l'effet de masque urbain sur une distance environ égale à 50m. Cette accélération de l'air se prolonge par un effet de jet de 25m de long dans l'espace ouvert. Ce phénomène ne génère toutefois pas de vitesses de l'air réellement inconfortables.



Courbes iso-vitesses en plan à 1.5m de haut.

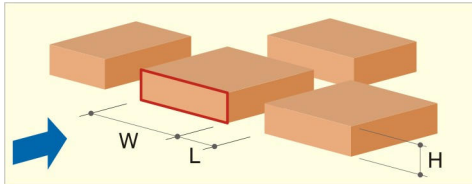
Ainsi, en dehors de la bande périphérique de 200m, un tissu urbain dense de hauteur homogène assure l'effet de masque urbain sur la totalité de ses espaces publics sauf s'il comprend des espaces découverts de grande superficie (plus de 200m de long sur au moins 200 m de large). Dans ce cas, le vent va "retomber" dans ces espaces libres et les bâtiments périphériques seront à nouveau exposés. Il faudra atteindre alors une pénétration de 200 mètres pour retrouver un effet de protection global dans le milieu construit.

Du point de vue du confort au vent, nous conseillons donc une répartition de places et d'espaces verts de taille moyenne à travers la ville plutôt que quelques grands espaces ouverts. Les parcs ou zones ouvertes de très grande dimension ont intérêt à être fortement plantés de manière à recréer un effet de masque dû à la végétation.

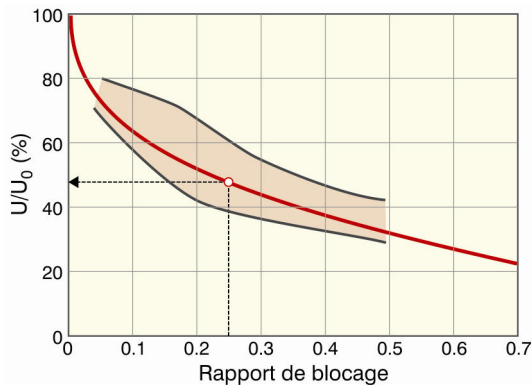
C'est grâce à cet effet de masque urbain que des mailles poreuses, ayant un coefficient S/h^2 atteignant 300, offrent une bonne protection contre le vent lorsqu'elles sont intégrées dans un milieu urbain de hauteur homogène et environ égale à la hauteur de la maille (Gandemer 1975). Ainsi, les intérieurs d'îlots urbains sont généralement des zones très protégées du vent.

La vitesse du vent dans les rues décroît avec l'augmentation du rapport de blocage des îlots urbains. Les dimensions horizontales des îlots influencent légèrement la vitesse de l'écoulement du vent mais dans une moindre mesure. Le rapport de blocage peut être calculé par la formule suivante :

$$R_b = (W \cdot H) / (W + L)^2$$

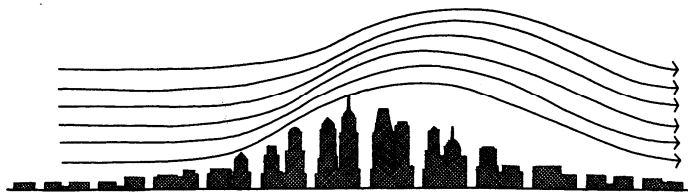


Le graphe ci-dessous montre la vitesse de l'air dans les rues en fonction du rapport de blocage des îlots urbains. Cette méthode n'est valide que si la rue en question est au moins à 200 m de la limite du groupe bâti. (Brown et De Kay 2001).



(Brown et De Kay 2001).

La présence d'un bâtiment de hauteur supérieure à deux fois la hauteur moyenne d'un tissu urbain dense de hauteur homogène supprime localement l'effet de masque urbain (Gandemer 1975). Ce type de configurations urbaines est étudié au point 4.4.18. Les changements de hauteur abrupts créent toujours des problèmes au niveau piéton. Ainsi, des zones de transition doivent être créées pour éviter des changements de hauteur qui dépassent 100% de la hauteur de la zone précédente. Une évolution graduelle de la hauteur des bâtiments permet à une partie importante du vent de passer au-dessus des toits. La hauteur des bâtiments d'un îlot ne devrait pas dépasser le double de la hauteur de l'îlot précédent (du point de vue de la direction du vent). Par exemple, si un bâtiment mesure 15m de haut, le bâtiment suivant dans la direction des vents a une hauteur maximale de 30m.



(Brown et De Kay 2001)

Pour les ensembles formés de bâtiments très élevés de hauteur homogène, un effet de masque peut apparaître sur certaines zones mais des zones de survitesses seront également présentes. En général, ces milieux bâtis sont critiques pour les piétons. Ce type de tissu urbain est étudié au point 4.4.19.

Conseils pratiques:

Pour favoriser l'effet de masque urbain, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **prévoir des hauteurs de bâtiments relativement homogènes**, c'est-à-dire créer des zones de transition pour éviter des changements de hauteur qui dépassent 100% de la hauteur de la zone précédente.
- **disposer les îlots urbains en quinconce en bordure de la zone urbaine dense**, sur une bande large de 200m.
- **prévoir des places et des espaces verts de dimension moyenne** ($S < 40\,000\text{ m}^2 = 200 \times 200\text{m}$).
- **planter les rues de grande longueur en bordure de la zone urbaine dense**, afin de profiter de l'effet de protection de la végétation.
- **placer des éléments poreux (végétation, écrans perméables,...) sur les places et dans les parcs de grande dimension** ($S \geq 40\,000\text{ m}^2$), afin d'y ralentir l'écoulement du vent

A retenir...

L'effet de masque urbain génère une zone de protection étendue sur l'ensemble d'un tissu de hauteur relativement homogène et peu élevée.

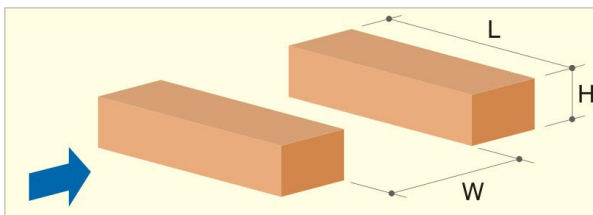
La vitesse du vent dans les rues décroît avec l'augmentation du rapport de blocage des îlots urbains. La vitesse de l'air en intérieur d'îlot dépend du rapport S/h^2 entre sa surface intérieure et le carré de la hauteur des bâtiments.

Les seules zones à risque dans ce type de plan masse sont :

- une bande de 200m située en bordure de l'urbanisation dense,
- les zones ouvertes de grande taille ($S \geq 40\,000\text{ m}^2$) et le périmètre de 200m de large qui les entoure,
- les zones au pied d'un bâtiment dont la hauteur est égale ou supérieure au double de la hauteur moyenne du tissu urbain.

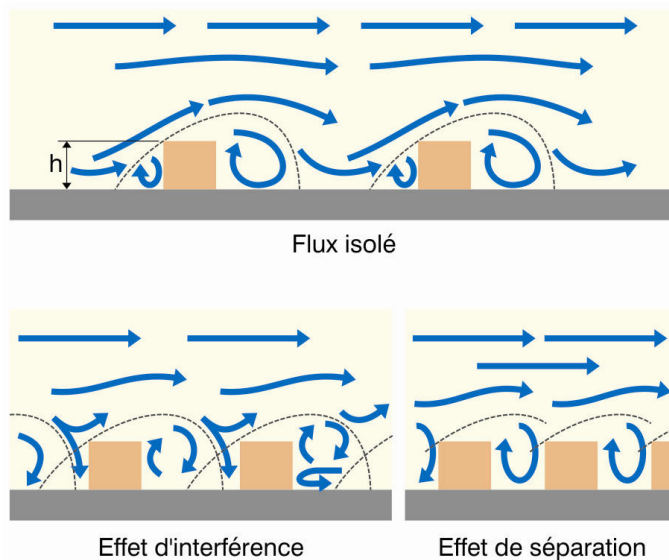
4.4.17 L'effet canyon

Lorsque les bâtiments sont construits en mitoyens, ils forment des rues qui créent un effet de masque supplémentaire par rapport au vent: l'**effet canyon**. Pour que cet effet existe, il faut toutefois que la distance entre les deux côtés de la rue ne soit pas trop élevée.



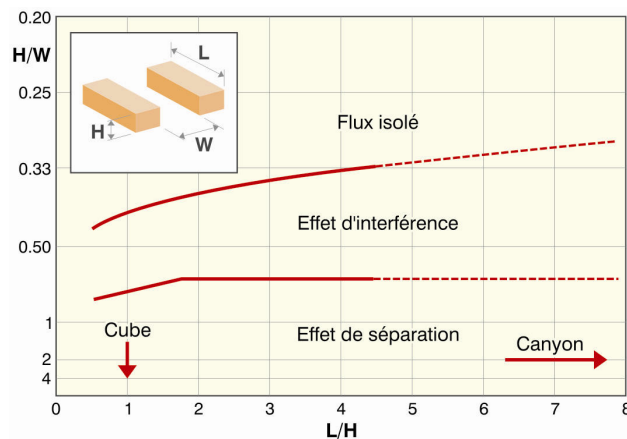
Quand le vent est plus ou moins perpendiculaire au grand axe des rues (disons à 30° près dans chaque sens), trois types de régimes de vent sont observés en fonction des dimensions des rues. Lorsque les bâtiments sont très distants ($H/W < 0.3$), ils n'interagissent pas au niveau de l'écoulement de l'air : on parle de « flux isolé » (isolated roughness flow). L'air extérieur pénètre donc largement dans l'espace qui est bien ventilé. Lorsque cet espace diminue ($0.3 < H/W < 0.7$), le flux se modifie et forme un « effet d'interférence » (wake interference flow). Ce flux se caractérise par des mouvements secondaires dans l'espace de la rue, là où l'effet de sillage de la face sous le vent est renforcé par l'effet de rabattement de la face au vent du bâtiment suivant. L'air extérieur pénètre moins dans le canyon que dans le cas précédent. Lorsque W diminue encore ($H/W > 0.7$), une circulation faible mais stable s'établit dans le canyon ; on parle d'« effet de séparation » (skimming flow). L'air extérieur entre faiblement dans le canyon et l'air intérieur crée une boucle de recirculation. L'entrée d'air neuf et la circulation de l'air intérieur sont d'autant plus réduites que le rapport H/W sera élevé. (Oke 1988)

Le graphe ci-dessous montre les trois types de régimes de vent pour une incidence du vent perpendiculaire à une canalisation linéaire.



(Oke 1988).

Pour les rues de petite longueur pour lesquelles l'effet de bord est important, les transitions entre ces trois régimes d'écoulement du vent sont données dans le schéma ci-dessous (Oke 1988).



(Oke 1988).

En général, la longueur des rues (L) est assez large. Le passage entre le flux de type isolé et le régime basé sur des interférences entre bâtiments correspond donc à une rue d'une largeur égale à environ 3 hauteurs de bâtiments ($H/W=1/3$ ou $W/H=3$). Le passage entre le régime d'interférences entre bâtiments et le flux qui passe au-dessus de tout l'espace public est situé à une limite qui correspond environ à une rue dont la largeur est égale à 1.5 hauteurs de bâtiments ($H/W= 2/3$ ou $W/H=1.5$).

Dans le cas de l' « effet de séparation », le flux d'air dans la rue peut être interprété comme un flux secondaire créé par le flux au-dessus des toits. Lorsque la vitesse du vent au-dessus des toits n'est pas suffisante, le couplage entre le flux du dessus et du dessous est perdu.

Dans les canyons profonds (par exemple $H/W=2.5$), des tests en tunnel à vent ont montré que deux circulations apparaissent sur la hauteur du canyon et que les vitesses du vent au niveau piéton deviennent très faibles.

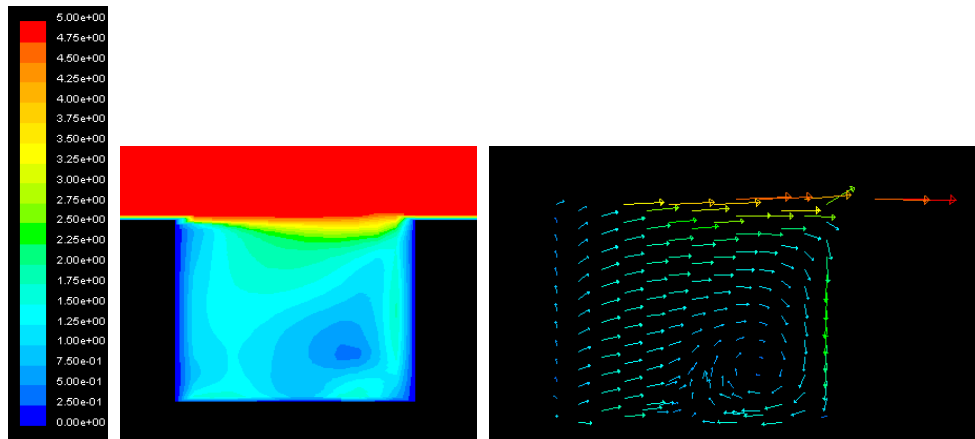
Si nous prenons l'ensemble des longueurs de rues possibles, l'effet canyon apparaît pour des rues dont le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue est supérieur ou égal à 0.7. (c'est-à-dire pour $H/W \geq 0.7$), ce qui assure de se trouver dans la zone de flux séparé (« skimming flow »).

Le tableau ci-dessous permet d'évaluer la vitesse moyenne du vent dans une rue soumise à l'effet canyon ($H/W \geq 0.7$) en fonction de l'incidence du vent, de la vitesse du vent au-dessus des toits et des dimensions de la rue.

Rue parallèle au vent		
Vitesse du vent au-dessus des toits	Dimensions du canyon	Vitesse du vent au niveau piéton
<3m/s	$H/W \geq 0.7$	0.2 à 0.3 m/s
3 à 4 m/s	$H/W \geq 0.7$	0.5 m/s
> 4m/s	$H/W \geq 0.7$ et $L/W < 20$	0.4 m/s
	$H/W \geq 0.7$ et $L/W > 20$	Variable en fonction du profil de vent
Rue perpendiculaire au vent		
Vitesse du vent au-dessus des toits	Dimensions du canyon	Vitesse du vent au niveau piéton
<3m/s	$H/W \geq 0.7$	0.2 m/s
3 à 4 m/s	$H/W \geq 0.7$	0.4 m/s
> 4m/s	$H/W \geq 0.7$ et $L/W < 20$	0.4 m/s
	$0.7 \leq H/W < 2$ et $L/W > 20$	Variable en fonction du profil de vent . $U_{\text{canyon}} = p U_{\text{toit}}$ avec p compris entre 0.66 et 0.75
	$H/W > 2$ et $L/W > 20$	0.3 m/s
Rue oblique par rapport au vent		
Vitesse du vent au-dessus des toits	Dimensions du canyon	Vitesse du vent au niveau piéton
<3m/s	$H/W \geq 0.7$	0.2 m/s
3 à 4 m/s	$H/W \geq 0.7$	0.4 m/s
> 4m/s	$H/W \geq 0.7$ et $L/W < 20$	0.4 m/s
	$H/W \geq 0.7$ et $L/W > 20$	Variable en fonction du profil de vent

(d'après Santamouris & al. 2000 pour les données en noir ; d'après Nakamura & Oke 1988 pour les valeurs en bleu, U_{canyon} ayant été mesuré à $0.06H$ et U_{toit} à $1.2H$)

Les coupes ci-dessous présentent les résultats obtenus à l'aide de FLUENT des mouvements d'air dans un canyon perpendiculaire au vent dont le rapport H/W vaut 0.76. Les bâtiments ont 19m de haut et la largeur des rues est de 25m. Le premier graphique donne les courbes iso-vitesses et le second les vecteurs-vitesses. Le rapport U/U_0 reste inférieur à 0.4 au niveau piéton dans ce type de rues protégées du vent.



Effet canyon : courbes iso-vitesses et vecteurs-vitesses en coupe perpendiculaire au vent.

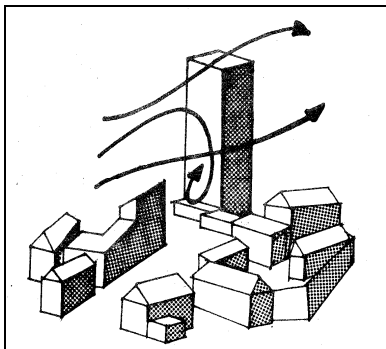
Conseil pratique:

Pour limiter au maximum les vitesses de vent dans les rues, il est utile d'assurer l'effet canyon qui est très confortable pour les piétons, en appliquant la règle géométrique suivante : **le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue doit être supérieur ou égal à 0.7** (c'est-à-dire pour $H/W \geq 0.7$),

A retenir...

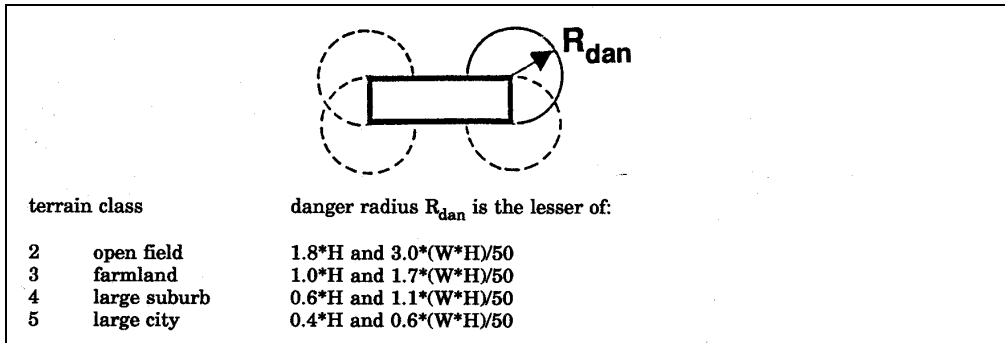
Les rues étroites ($H/W \geq 0.7$) créent un effet de masque important : l'effet canyon.

4.4.18 L'écoulement du vent autour d'un bâtiment élevé implanté en milieu urbain dense



(Gandemer & Barnaud 1975).

L'implantation d'un bâtiment de grande hauteur dans un tissu de hauteur homogène et relativement faible, dont un exemple type est le tissu ancien de nos centres villes, perturbe de manière violente le pied immédiat de la tour. De plus, sa présence accroît nettement les vitesses de l'air au niveau piéton sur une surface dont le rayon est de l'ordre de la hauteur de ce bâtiment élevé. Le schéma ci-dessous permet d'évaluer le rayon critique autour des coins d'un bâtiment élevé en fonction de la densité construite. (Bottema 1993)

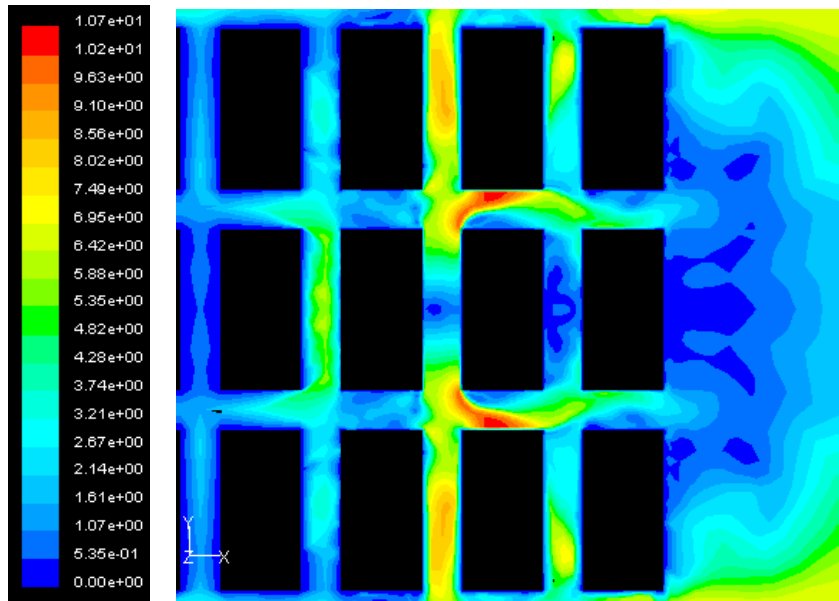


(Bottema 1993).

Cependant, l'inconfort généré au pied du bâtiment élevé est diminué par rapport à l'inconfort au vent au pied d'un immeuble de même hauteur en site totalement dégagé.

Les bâtiments élevés sont les bâtiments dont la hauteur est au moins du double de la hauteur moyenne du tissu urbain environnant. La vitesse maximale de l'air au niveau piéton dépend essentiellement dans ce cas du rapport entre la hauteur du bâtiment élevé et la hauteur moyenne des bâtiments environnants : H/h . Lorsque le rapport H/h s'accroît, le rapport U/U_0 au niveau piéton augmente.

Nous avons réalisé la simulation suivante avec notre profil de vent urbain habituel. Le graphique ci-dessous présente les effets critiques du vent autour d'un bâtiment de 76m de haut au sein d'un milieu urbain formé de blocs homogènes de 19m de haut, 100 m de long et 50m de large. Le rapport H/W des rues vaut 0.76.



Survitesses à 1.5m de haut au pied d'une tour de 76m de haut ($H/h=4$).

Ainsi, la présence d'un bâtiment très élevé modifie totalement le comportement de l'air dans les rues avoisinantes.

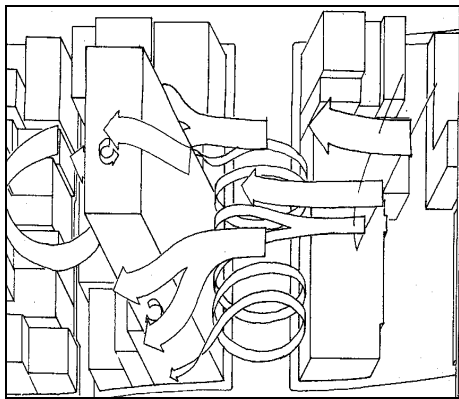
Le tableau ci-dessous montre que ce milieu urbain a réduit l'effet de coin maximal au pied du bâtiment de 76m de haut, dont la hauteur est quatre fois la hauteur des bâtiments environnants : $H/h = 4$, d'un peu plus de 10% par rapport à l'effet de coin au pied d'un bâtiment isolé mais qu'il n'a pas modifié l'intensité de l'effet de rouleau tourbillonnaire (qui n'est pas un effet critique s'il est pris isolément dans ce cas).

Effets critiques du vent	Bâtiment élevé isolé (H=76m)	Bâtiment élevé dans un milieu urbain dense (H=76m et H/h=4)
Effet de coin	2.38	2.12
Effet de rouleau tourbillonnaire	1.2	1.2

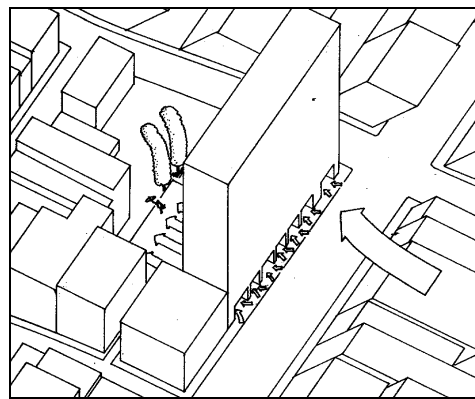
Il faut absolument éviter de construire des bâtiments élevés à proximité des espaces publics de détente : places publiques, squares, plaines de jeux,... Les dispositifs de correction (brise-vent,...) sont toujours moins efficaces qu'une conception appropriée du bâtiment (forme et taille). Pour les bâtiments élevés, la meilleure protection au vent est toujours la diminution de sa hauteur.

L'ensemble des effets critiques présentés pour des bâtiments isolés ou des groupes de bâtiments sont également présents lorsqu'un bâtiment ou un groupe de bâtiments de grande hauteur est implanté dans un tissu urbain homogène de faible hauteur :

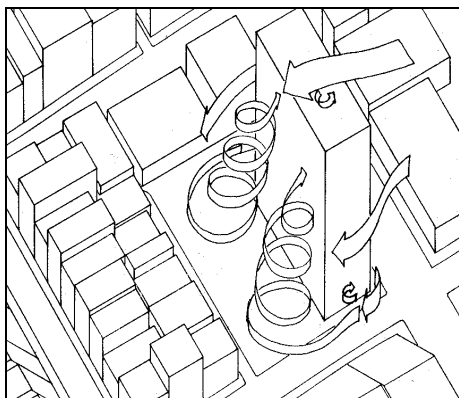
- l'effet de coin,
- l'effet de cisaillement,
- l'effet de trou sous immeubles,
- le rouleau tourbillonnaire,
- l'effet de barre,
- l'effet Venturi,
- l'effet Wise,
- l'effet de double coin,
- l'effet de bâtiments en quinconce
- l'effet de canalisation linéaire.



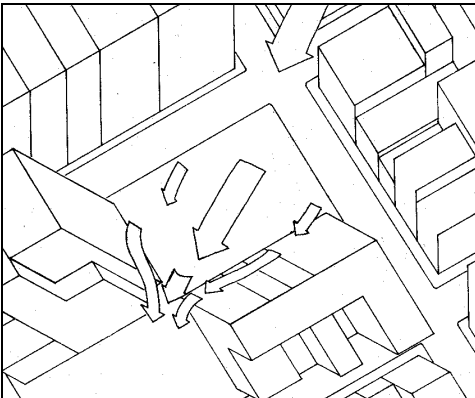
(Bosselmann & al 1988)



(Bosselmann & al 1988)



(Bosselmann & al 1988)



(Bosselmann & al 1988)

Les bâtiments très élevés et le confort des piétons en milieu urbain sont donc difficiles à concilier.

Pour un bâtiment ou un groupe de bâtiments dont la hauteur est comprise entre 15m et 40m et dont la hauteur est double de la hauteur moyenne du tissu urbain, les différents effets critiques du vent doivent être évalués et des mesures doivent éventuellement être prises pour réduire l'inconfort au niveau piéton. Tous les bâtiments de plus de 40m de haut en milieu urbain devraient faire l'objet d'une étude spécifique de leur impact sur le confort et la sécurité des piétons aux abords de ceux-ci. (Penwarden & Wise 1975).

Conseils pratiques:

Pour réduire les vitesses de vent autour d'un bâtiment élevé implanté en milieu urbain, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer la hauteur du bâtiment élevé**, afin de diminuer le rapport H/h entre la hauteur de ce bâtiment et la hauteur moyenne du tissu urbain,
- **diminuer la hauteur des parties du bâtiment qui longent l'espace public**, surtout près des coins, par des reculs, des gradins, des socles,...
- **créer des bâtiments élevés aux contours aérodynamiques ou des bâtiments qui présentent leur face la plus étroite vers les vents dominants.**
- **ajouter des terrasses horizontales d'au moins 6m de large.**

A retenir...

L'implantation d'un bâtiment de grande hauteur dans un tissu de hauteur homogène et relativement faible ($H/h_{\text{moyen}} > 2$) crée des zones d'inconfort dans les rues adjacentes et accroît les vitesses de l'air au niveau piéton sur une surface dont le rayon est de l'ordre de la hauteur de ce bâtiment élevé.

L'intensité des survitesses au niveau piéton dépend essentiellement du rapport entre la hauteur du bâtiment élevé et la hauteur moyenne des bâtiments environnants : H/h .

4.4.18 Les effets du vent au sein des grands ensembles de bâtiments élevés

Les flux de vent au sein **de grands ensembles de bâtiments élevés** ont un haut degré de complexité. Les effets d'interaction peuvent décroître les vitesses de vent localement mais en général elles ont plutôt tendance à l'accroître. Les risques d'inconfort pour les piétons y sont élevés.

Il semble qu'il existe des espacements critiques à éviter absolument parce qu'ils ont pour effet de conduire à un rapport U/U_0 de l'ordre de 2 dans tout l'espace au sol. Pour les bâtiments élevés de type tour, ces espacements critiques sont :

- $E_c = 2d$, où d est la dimension moyenne transversale des tours.
- $E_c = H/2$, où H est la hauteur moyenne des tours.

En revanche si l'espace entre tours devient inférieur à $d/4$, la zone piétonne est protégée du vent mais il faut toutefois soulever dans ce cas le problème évident de l'obstruction face à l'ensoleillement.

C'est donc un espacement supérieur à $3d$ qui est le moins critique car, dans ce cas, les formes immeuble-tour ont tendance à se comporter comme des formes isolées (plus d'interférence directe), tout en permettant leur ensoleillement. Ce type de morphologie urbaine reste toutefois à déconseiller puisqu'on peut obtenir des densités équivalentes avec des bâtiments moins élevés qui apporteront donc de grands bénéfices au niveau du confort et des consommations d'énergie des bâtiments (plus faible exposition des surfaces).

Ce type de plan masse devrait être considéré avec une très grande prudence. Dans ce cas, nous conseillons fortement de réaliser des essais en soufflerie aérodynamique ou des simulations CFD spécifiques.

Conseils pratiques:

Pour limiter les survitesses du vent dans les grands ensembles de bâtiments élevés, on peut donner les conseils architecturaux suivants :

- **diminuer les hauteurs des bâtiments, surtout le long des espaces publics.**
- **agrandir l'espacement entre les bâtiments élevés jusqu'à une distance au moins égale à 3 fois la dimension transversale des tours ($E > 3d$).** afin d'éviter les interférences entre celles-ci
- **prévoir des éléments poreux** (végétation, écrans perméables,...) sur l'ensemble de la zone afin de réduire les vitesses de vent au niveau piéton.

A retenir...

Dans les grands ensembles de bâtiments élevés, les risques d'inconfort pour les piétons sont élevés.

5. Etude de l'ambiance sonore à l'extérieur des bâtiments

« *Quand un arbre tombe, on l'entend; quand la forêt pousse, pas un bruit* ». Proverbe africain.

Cette cinquième partie aborde l'analyse des ambiances sonores à l'extérieur des bâtiments. Elle met en évidence les caractéristiques d'un site qui influencent son ambiance sonore. Elle décrit les méthodes d'évaluation des paramètres acoustiques en milieu urbain.

5.1 Paramètres acoustiques

Le bruit en ville se compose de tous les bruits qui existent sur un site urbain et qui proviennent des animations et activités qui s'y déroulent. Le bruit est un indicateur de la vie présente en un lieu, une expression des échanges qui s'y produisent, une référence au contexte spatio-temporel traversé. Le bruit en ville s'avère donc souvent utile et indispensable. Il est cependant évident que certains types de bruit ou certains niveaux sonores sont inacceptables parce qu'ils engendrent une gêne significative.

L'urbanisme et l'architecture de la ville modifient la propagation du bruit et peuvent donc empêcher ou diminuer les situations d'inconfort acoustique dans les lieux extérieurs en ville. Ce chapitre va montrer comment le tissu urbain et les décisions d'urbanisme influencent les ambiances sonores de nos espaces publics.

Il faut d'abord signaler que l'ambiance acoustique est considérée par les habitants comme un paramètre essentiel du plaisir de vivre dans une urbanisation. Ainsi, l'ensemble des habitants de la Région de Bruxelles-Capitale se sentent concernés par les nuisances sonores en ville. De plus, le bruit est apparu en tête des nuisances qui poussent les citoyens à quitter la ville à la recherche d'un cadre de vie réputé plus vert et plus tranquille. Les différentes enquêtes menées par le Plan Régional de Développement à Bruxelles ont montré que près de 30% des bruxellois estiment que le bruit en ville est une nuisance susceptible de les pousser à déménager (IBGE 2002).

Des ambiances sonores confortables favorisent également l'utilisation des espaces publics urbains et ont une influence indirecte de limitation des consommations d'énergie des bâtiments (potentiel de ventilation naturelle des locaux,...) et du transport (rend plus agréable les trajets réalisés à pied ou à vélo,...).

En général, la gêne acoustique apparaît pour un niveau sonore égal ou supérieur à 65 dB (A). Toutefois, n'oublions pas que le décibel est une échelle logarithmique, afin de ne pas sous-estimer l'importance des mesures à prendre pour réduire les nuisances sonores. Pour gagner 3 dBA, il faut réduire le bruit de moitié ; pour gagner 5 dBA, il faut le réduire au tiers ; pour gagner 10 dBA, il faut le réduire de 9/10ème ; etc.

5.1.1 Les émissions de bruit en milieu urbain

Aujourd'hui, dans les villes européennes, la circulation routière apparaît nettement comme la première source de bruit en zone urbaine. Le bruit des avions et du trafic ferroviaire est aussi un facteur important de gêne acoustique pour de nombreux habitants. Il est à souligner que ces sources de bruit sont étroitement liées à d'importantes préoccupations urbaines : la mobilité, la sécurité, la pollution atmosphérique,...

L'analyse des sources mécaniques de type trains et tramways constitue un domaine de recherche complexe, notamment de part la nature du contact roue-rail. Nous n'aborderons pas le détail des solutions à envisager car il s'agit clairement d'une réflexion technologique spécifique mais le lecteur pourra toutefois se référer à des documents récents sur le sujet, disponibles à la Direction de la Recherche de la SNCF ou au SerB (bureau d'étude Nantais, spécialiste du bruit des tramways).

Nous n'étudierons pas non plus en détail les possibilités de réduction des bruits aériens qui ne sont pas vraiment du ressort de l'architecte.

Le bruit de la circulation automobile est le bruit urbain de loin le plus important. Il s'agit donc de diminuer en priorité le trafic automobile en ville. Dans la suite de ce chapitre, nous nous concentrerons sur le bruit dû à la circulation routière, qui est largement influencé par la conception urbaine et touche en général une grande partie des citoyens. Ainsi, environ 28% de la population bruxelloise totale est exposée à un niveau de bruit dû au trafic routier supérieur à 65 dB(A). (IBGE 2002)

Les nuisances sonores induites par le trafic automobile dépendent essentiellement de trois caractéristiques de la circulation, sur lesquelles on peut intervenir pour essayer de limiter l'émission de bruit:

- **l'intensité du trafic**, mesurée en nombre de véhicules par heure ou par jour.
- **le type de véhicules**, notamment la proportion de camions (plus bruyants que les voitures).
- **la vitesse moyenne des véhicules.**

Le type de revêtement de la chaussée et la pente de la voie ont également une influence sur le niveau sonore produit par la circulation.

Pour une première évaluation du niveau sonore émis par le trafic automobile, on peut faire le calcul suivant (Semidor 2002) :

$$E = (E_{VL} + 10 \log Q_{VL}) + (E_{PL} + 10 \log Q_{PL})$$

où E_{VL} est l'émission sonore unitaire des véhicules légers,

E_{PL} est l'émission sonore unitaire des véhicules lourds

Q_{VL} = débits horaires moyen des véhicules légers,

Q_{PL} = débits horaires moyen des poids lourds.

E: l'émission sonore d'un tronçon d'infrastructure

L'intensité du trafic est le premier critère du point de vue des émissions sonores. En quelques décennies, le parc automobile a augmenté considérablement dans toutes les villes. Or les véhicules actuels ne sont pas beaucoup moins bruyants que ceux d'hier. Sur les grandes artères, le bruit varie constamment entre 70 et 80 dBA, atteignant des pointes fréquentes de 85 à 90 dBA. Mais surtout le bruit est devenu omniprésent : il suscite des nuisances non seulement sur les voies principales, mais

dans les quartiers et les banlieues, de jour comme de nuit. On assiste à un phénomène généralisé d'extension du bruit plutôt que d'intensification là où les niveaux sonores étaient déjà élevés. Le calme est devenu rare et contribue à la valeur immobilière des bâtiments. En outre, les tendances ne promettent pas une réduction spontanée du bruit, bien au contraire, puisque les gens achètent de plus en plus de voitures.

De manière assez approximative, on peut dire que le bruit moyen augmente de 3 à 5 dBA lorsque le flot de véhicules double; c'est dire, réciproquement, qu'il faut diminuer le trafic de moitié pour gagner de 3 à 5 dBA. La lutte contre le bruit réclame donc des réductions considérables du trafic ! Toutefois, des mesures aussi importantes seront de toute façon nécessaires pour réduire la pollution de l'air et... améliorer la circulation automobile elle-même.

Une analyse des différents **types de véhicules** au niveau du bruit généré (puissance sonore et fréquence) a permis de distinguer deux grandes classes de véhicules à quatre roues:

- les véhicules légers : voitures particulières et utilitaires,
- les poids lourds et trains routiers.

En moyenne, la seconde classe de véhicules émet un niveau sonore supérieur de 3dB(A) par rapport à la première. (Picaut & al. 2001)

Sur ce point de vue, on peut espérer le développement d'autres types de véhicules moins bruyants. Aujourd'hui, aucune alternative ne concurrence sérieusement l'automobile auprès du grand public mais il est très possible que, d'ici quelques années, la voiture électrique urbaine soit en mesure de résoudre à la source le problème des nuisances sonores générées par le trafic en ville.

Rappelons également l'intérêt de favoriser l'utilisation de moyens de transport en commun, qui présentent le grand avantage de ne pas générer un bruit permanent, et la création d'itinéraires agréables pour piétons et cyclistes.

La **vitesse de circulation** est l'un des principaux facteurs qui déterminent la production de bruit. De manière très approximative, on peut dire qu'au-dessus de 20km/h et en-dessous de 60 km/h, chaque augmentation de la vitesse de 10 km/h augmente le niveau sonore de 3 dB(A). Cependant, dans cet intervalle de vitesse, le bruit émis par le contact roues-sol et le type de conduite (nerveuse ou calme) des automobilistes influencent également le niveau sonore généré. Par exemple, une augmentation de la vitesse de 30 à 50 km/h entraîne, selon le type de revêtement, une augmentation sonore de 6 dB(A) sur de l'asphalte très ouvert et de 8.7 dB(A) sur des dalles en pierre naturelle (IBGE 1998). Généralement, au-dessus de 60 km/h, le bruit moyen augmente de 6 à 9 dBA chaque fois que la vitesse double.

Depuis le début des années 80, plusieurs villes allemandes, hollandaises et norvégiennes développent et comparent des expériences de "zones à 30 km/h". L'idée est simple : instaurer une limite de vitesse obligatoire à 30 km/h dans certains quartiers bien délimités en dehors des voies de circulation principales. Les expériences systématiques et les bilans réalisés après des périodes d'essai aboutissent aujourd'hui à des conclusions précises. Les mesures de bruit réalisées dans les quartiers expérimentaux concordent toutes, au moins au niveau des ordres de grandeur:

- dans les quartiers où l'on s'est contenté de mesures de signalisation peu coûteuses, le bruit diminue de 3 à 6 dBA ;
- dans les zones à 30 km/h plus complètes, on parvient à gagner de 5 à 10 dBA.

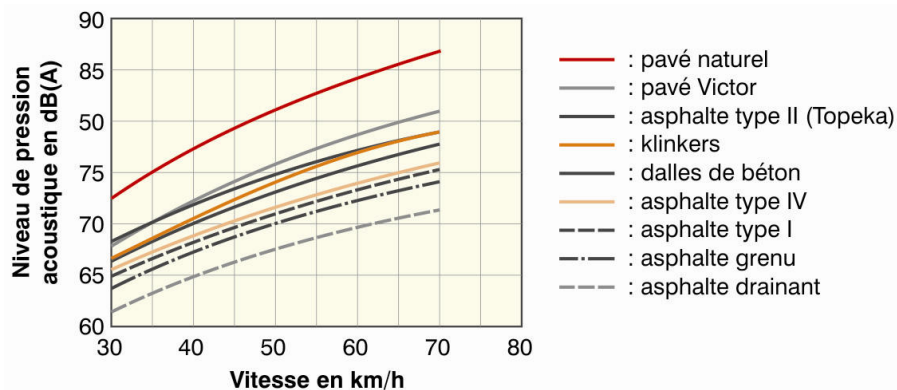
Il paraît donc assuré que la mise en place de zones à 30 km/h permet de diminuer le bruit dans des proportions équivalant à une réduction de 50% du volume du trafic, sinon plus. En outre, les limitations de vitesse des véhicules à 30 km/h renforcent la sécurité des rues, notamment pour les enfants et les personnes âgées. A cet égard, l'efficacité des zones à 30 km/h n'est pas contestée. Ainsi, à Hambourg, où la réduction de vitesse est bien respectée par les automobilistes, on a observé en 1984 une diminution globale de 11 % des accidents, et plus précisément une réduction de 47% des accidents corporels.

D'autre part, le temps perdu aux vitesses maximales est généralement rattrapé par une circulation plus lente mais plus fluide, plus régulière, moins heurtée. Ce type d'observation est bien connu des ingénieurs de trafic : les vitesses rapides favorisent la formation d'embouteillages ou des ralentissements aux points critiques et les alternances de vitesses rapides et d'arrêts engendrent des émissions polluantes accrues au niveau sonore et atmosphérique.

Le **revêtement des chaussées** a aussi son importance au niveau de l'émission des bruits urbains. Un revêtement en pavés augmente le bruit de roulement de 6 à 8 dBA par rapport à une chaussée en asphalte. En revanche, certains revêtements spéciaux peuvent le réduire de 4 à 5 dBA pour les chaussées les plus bruyantes.

Les revêtements routiers peuvent être classés en quatre catégories du moins bruyant au plus bruyant : les revêtements en asphalte, les revêtements en béton, les dalles en pierre naturelle et les pavés bombés (« belgian blocks »). Nous pouvons dire en général qu'un revêtement est plus silencieux à mesure que la couche de recouvrement a une grande capacité d'absorption acoustique, que la mégastucture est petite (pas de grandes irrégularités) et que les petits granulats dominent dans la macrotexture.

Le graphe ci-dessous résume les résultats des mesures réalisées par l'IBGE pour évaluer le bruit en dB(A) généré par un véhicule en fonction de sa vitesse, sur 9 revêtements routiers différents. (IBGE 1998)



(IBGE 1998).

Cependant, l'exécution et la qualité d'entretien d'un même type de revêtement routier peuvent également influencer le niveau d'émission sonore. Il est donc conseillé de restaurer les fortes irrégularités de certains revêtements de sols. Cette mesure peut souvent entraîner d'importantes réductions de bruit à faible coût. Elle permet également de préserver le caractère esthétique des revêtements de routes en dalles naturelles.

Les **pentés** importantes augmentent le niveau sonore produit par les voitures, surtout au démarrage (moteurs) et à l'arrêt (freins).

5.1.2 La propagation du bruit en milieu urbain

Pour concevoir des ambiances sonores, il faut également comprendre les éléments qui influencent la propagation des sons en milieu urbain, tels que : l'affectation des sols, la distance à la source de bruit et les caractéristiques du tissu urbain :

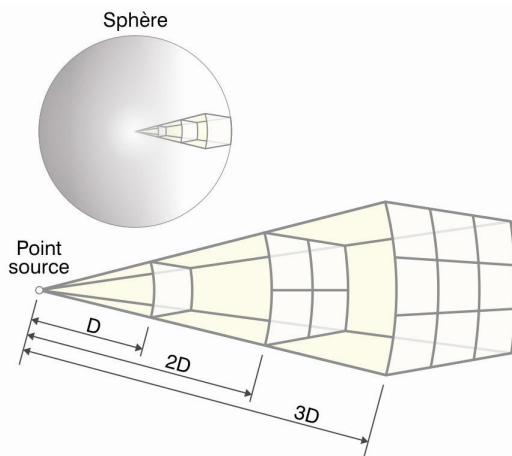
- la **morphologie** bâtie.
- la **forme** de la rue. Aux rues ouvertes s'opposent les rues corridors où le bruit est réverbéré contre les façades.
- la **largeur** de la chaussée, opposant boulevards et rues étroites
- le **traitement des surfaces**.
- la présence d'**espaces tampons**

L'utilisation des **différences de niveaux** et des **zones de végétation dense** permet de séparer une ambiance sonore de son environnement large. En milieu ouvert, il faut aussi signaler l'influence du **vent** sur la propagation des bruits.

Attribuer une zone à telle ou telle activité particulière (industries, commerces, bureaux, habitat) ou à une mixité des fonctions ainsi qu'à certains types de circulation (piétonnier, zone 30, voirie avec ralentisseurs de vitesse,...) conditionnera inévitablement le type de bruit généré par ces activités et l'ambiance sonore des lieux. Ainsi, le **type d'affectation du sol** est important du point de vue du confort acoustique dans les espaces publics. En effet, l'affectation du sol influence le trafic (intensité, composition) et le cadre bâti (morphologie urbaine, géométries des espaces ouverts, matériaux utilisés,...) qui sont les deux éléments les plus importants du point de vue de l'émission et de la propagation du bruit en ville.

La **distance** par rapport aux sources de bruits est un élément essentiel de leur atténuation. En l'absence d'obstacles, le bruit diminue de 6 dBA chaque fois que la distance à une source ponctuelle de bruit double.

Considérons une source ponctuelle (par exemple une voiture ou un avion,...) dans un espace extérieur libre sans réverbération : le son est diffusé de manière quasiment identique dans toutes les directions à partir de ce point. La ligne enveloppante des points d'énergie sonore identique est donc la surface d'une sphère. Si l'on double le rayon de la sphère (c'est-à-dire si l'on se trouve deux fois plus loin de la source ponctuelle), la surface de la sphère augmente 4 fois et l'énergie sonore est donc 4 fois plus faible en un point de cette sphère.



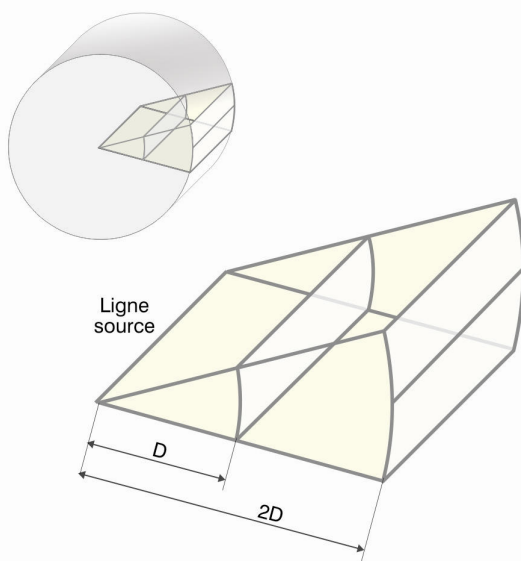
(Blasco 2002).

L'énergie sonore en un point de la sphère peut être trouvée selon la formule suivante qui donne un niveau en dB:

$$L_p = L_w + 10 \lg \left(\frac{1}{4\pi r^2} \right) = L_w - 20 \lg r - 11$$

où L_w est le niveau de puissance sonore de la source ponctuelle et r est la distance entre la source ponctuelle et le récepteur initial en mètres. Donc, à chaque doublement de la distance d'une source ponctuelle (dans un champ libre), le niveau sonore diminue de 6 dB. En pratique, en milieu urbain, le bruit diminue de 3 ou 4 dB chaque fois que la distance à une source ponctuelle de bruit double, en raison des réflexions contre le sol, les bâtiments environnants,...

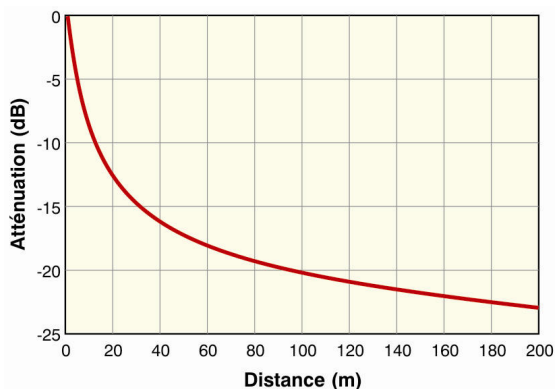
Pour une source linéaire ou un ensemble de sources ponctuelles se succédant en ligne droite (par exemple une rue à haut trafic, une autoroute, une voie de chemin de fer...), le même raisonnement nous amène à définir un cylindre d'égale énergie sonore.



(Blasco 2002).

Dans un champ libre, doubler la distance par rapport à une source linéaire correspond donc à diminuer le niveau sonore de 3 dB. Une source linéaire peut toutefois être considérée comme une source ponctuelle à partir d'une certaine distance égale à 2 fois la dimension la plus large de la source.

Le graphe ci-dessous donne l'atténuation du niveau sonore (dB) en fonction de la distance par rapport à une source linéaire : une route. (Gay 2004-b)



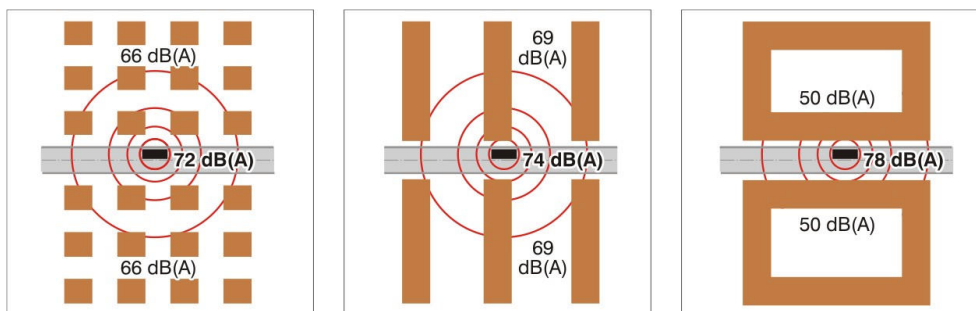
Atténuation du niveau sonore en fonction de la distance de la route (Gay 2004-b)

Dans un espace clos, il y a deux champs autour d'une source sonore : le champ direct et le champ réverbéré. Dans le champ direct, l'intensité décroît en fonction de la distance par rapport à la source. Dans le champ réverbéré, l'intensité varie en fonction de la constante de l'espace et du coefficient d'absorption des matériaux des surfaces le délimitant.

La **morphologie bâtie** influence fortement les ambiances acoustiques. Une réflexion sur l'aménagement urbain peut limiter les nuisances sonores en ville, par un travail sur les formes urbaines : détermination des limites, des épaisseurs, de la perméabilité des tissus, des zones calmes ou animées,... Il s'agit donc d'analyser le positionnement des bâtiments en plan et en coupe, c'est-à-dire les alignements, retraits, dissociations, orientations, traitement des angles, espaces tampons,...

Le graphe ci-dessous permet de comparer trois morphologies urbaines du point de vue de leur impact sur le bruit urbain :

- l'urbanisme pavillonnaire, constitué de maisons séparées les unes des autres, expose toutes ses façades au bruit urbain,
- la barre moderne perpendiculaire à la rue augmente son niveau sonore par réflexions multiples sans créer de protection.
- la configuration traditionnelle des îlots augmente encore le niveau sonore dans les rues mais elle offre à l'intérieur des îlots des zones de calme et de détente (niveau sonore inférieur ou égal à 50 dBA) protégées du bruit généré dans les rues.



(D'après Roulet 2002).

La morphologie urbaine détermine la propagation du bruit routier autour des bâtiments et dans les espaces urbains extérieurs (rues, places, parcs, intérieurs d'îlots). Choisir un type de tissu urbain a donc des conséquences significatives sur les ambiances acoustiques des espaces publics. Il est possible de modifier les différents obstacles (bâtiments, ...) pour se protéger des sources de bruit.

Des bâtiments mitoyens ou reliés entre eux par des murs ou murets (d'une hauteur supérieure à la source de bruit) constituent un obstacle efficace par rapport au bruit. Ainsi, les intérieurs d'îlots ont un univers sonore propre et relativement indépendant des bruits de la rue. Par contre, lorsque les bâtiments sont dispersés, le bruit s'engouffre entre les bâtiments.

La prise en compte des problèmes de protection contre le bruit conduit à une réévaluation radicale des formes d'urbanisation. La forme traditionnelle de l'îlot apparaît aujourd'hui comme le modèle le plus adéquat pour protéger les habitants du bruit de la rue. Elle assure une bonne isolation acoustique au centre de l'îlot par rapport aux rues extérieures et y garantit un niveau sonore propice à la détente, même dans des quartiers où la circulation est très intense. On voit que le niveau sonore est le plus élevé au centre d'une rue bordée de bâtiments mitoyens mais ce

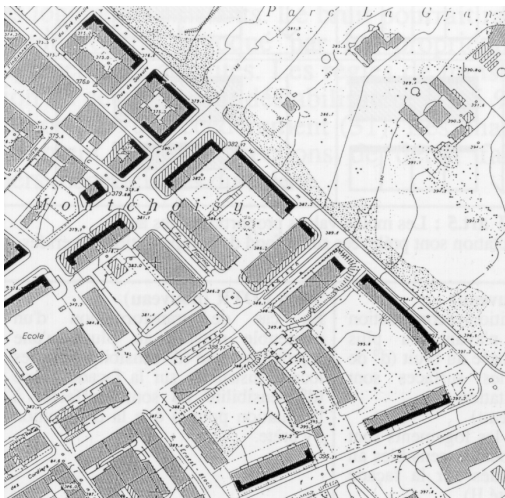
léger désavantage est contrebalancé par une très forte diminution du niveau sonore de l'autre côté de ces bâtiments, offrant des zones de calme et de détente. Au contraire, le modèle moderne de barres perpendiculaires aux voies et l'étalement urbain contemporain en petites maisons isolées exposent une majorité d'habitants au bruit de la circulation en générant un environnement sonore inacceptable sur l'ensemble de l'espace compris entre les bâtiments.

Ainsi, les formes bâties peuvent constituer un moyen efficace de lutter contre le bruit : une rangée d'immeubles continus est un écran acoustique, créant dans l'espace une polarité avant/arrière, bruyant/calme. Des immeubles mitoyens sont la meilleure barrière possible au bruit des rues. Les rez-de-chaussée sur pilotis sont évidemment à proscrire le long des rues où le trafic est important.

Les quartiers centraux d'une urbanisation ancienne sont généralement moins touchés par les nuisances sonores que les quartiers plus récents. En périphérie de ville, les habitants subissent d'une part l'effet des grands axes routiers ou autoroutiers (ring en particulier) et d'autre part le fait que l'habitat en ordre ouvert (maisons ou immeubles 4 façades entourés de jardins) est plus perméable au bruit. C'est donc un paradoxe : ceux qui sont partis habiter loin du centre à la recherche de calme subissent en réalité souvent une gêne plus importante... Cependant, au centre-ville, les places et les espaces verts qui devraient être les zones de calme les plus protégées sont en fait très exposés aux nuisances sonores générées par le trafic routier.

Chaque tissu urbain est caractérisé par sa **perméabilité** acoustique. A grande échelle, le bruit se comporte à peu près comme la lumière. C'est pourquoi les acousticiens parlent couramment "d'ombre sonore" portée par un écran, de phénomènes de réflexion sur des façades voisines, etc. D'autre part, à petite échelle, le bruit se comporte un peu comme un gaz ou un liquide : il pénètre largement les espaces ouverts, mais se trouve arrêté par des brèches de faibles dimensions. Ces deux principes suffisent généralement pour apprécier la perméabilité au bruit d'un plan d'aménagement et juger ses qualités acoustiques.

Sur le plan ci-dessous les façades exposées à un niveau de bruit important ont été représentées par des lignes noires épaisses. On voit qu'il s'agit essentiellement des façades situées le long des voies à fort trafic. La continuité des bâtiments alignés le long de la voie permet d'éviter que le bruit se propage loin à l'intérieur des parcelles.



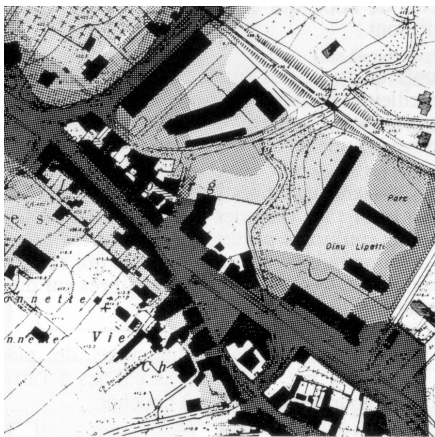
(Plan : Service cantonal d'écotoxicologie 1980)

A Genève, dans les îlots de Montchoisy, conçus par Maurice Braillard en 1929, les angles ouverts diminuent l'étanchéité des formes bâties au bruit mais elles ne laissent pénétrer qu'une faible partie des nuisances, puisque le bruit de la cour est limité entre 50 et 55 dBA, ce qui est légèrement supérieur aux 45 à 50 dBA que l'on rencontrerait si ces îlots étaient fermés. Ces îlots sont représentés en plan et en photo ci-dessous (mesures du Service cantonal d'écotoxicologie, 1980). Sur le plan, les zones les plus foncées correspondent aux niveaux de bruit élevé et les zones les plus claires aux surfaces où le niveau sonore est le plus faible.



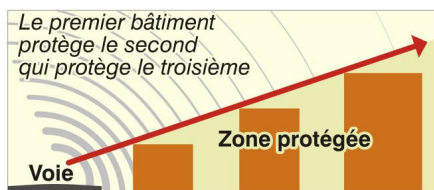
(Plan et photo : Service cantonal d'écotoxicologie 1980)

Dans le plan ci-dessous, une ligne continue des maisons de bas gabarit forme écran contre le bruit de la rue. La hauteur des bâtiments utilisés comme écran n'est donc pas un élément important pour la protection contre le bruit du trafic de l'autre côté de celui-ci. Les mesures ont été réalisées par le Service cantonal d'écotoxicologie en 1980. Les zones les plus foncées correspondent aux niveaux de bruit élevé et les zones les plus claires aux surfaces où le niveau sonore est le plus faible.



(Plan : Service cantonal d'écotoxicologie 1980)

La construction de bâtiments de petite taille, par exemple pour des commerces, des garages ou des industries non polluantes, le long des voies à fort trafic, peut servir d'écran acoustique en offrant le grand avantage de maintenir la rue comme un lieu d'échange convivial et de générer une ombre sonore sur le reste du quartier grâce à une zone de transition vivante.



Il est nécessaire de définir la notion de champ libre et de champ diffus. Le champ libre caractérise un milieu acoustique où le bruit se propage sans rencontrer d'obstacle. L'intensité du bruit y diminue avec l'éloignement de la source. En revanche, dans un champ diffus, le son rencontre des obstacles et se réfléchit sur ceux-ci. Le niveau sonore y dépend davantage de la capacité d'absorption des surfaces que de la distance à la source. En effet, le niveau sonore perçu en champs diffus s'obtient par l'addition du niveau sonore émis par la source initiale et des niveaux sonores des réflexions de ce bruit sur les surfaces environnantes.

Ces deux notions appliquées au tissu urbain permettent de définir les tissus urbains ouverts et fermés acoustiquement. Dans un espace acoustiquement ouvert, plus perméable au bruit, le son émis par une source s'éloigne et se disperse dans l'atmosphère, sans revenir. La distance à la source de bruit et la présence d'écrans acoustiques sont les éléments principaux qui déterminent le niveau sonore d'un espace ouvert. Dans un espace acoustiquement fermé, le son émis par une source est successivement réfléchi ou absorbé par les obstacles (habitations, murs, mobilier urbain,...). Les caractéristiques d'absorption des surfaces d'un espace fermé ont une grande importance pour définir son niveau sonore.

Les rues délimitées sur leurs deux côtés (rues en U) et les cours intérieures de petites dimensions sont des lieux acoustiquement fermés. Tout tissu pavillonnaire, toute zone non bâtie et les rues ouvertes d'un côté vers un large espace dégagé (rues en L) sont considérés comme des espaces ouverts. Certains espaces clos visuellement et protégés du vent peuvent présenter une grande perméabilité au bruit et être de la sorte acoustiquement ouverts; c'est le cas par exemple d'un jardin entouré d'une haie au centre d'un espace dégagé. Les places urbaines et les boulevards sont des espaces semi-ouverts ou semi-fermés pour lesquels les caractéristiques des surfaces ont une influence sur le niveau sonore mais moins que dans les espaces totalement fermés. Les dimensions de ces espaces semi-ouverts jouent sur leur caractère plus ouvert ou plus fermé.

Pour une voie de circulation à trafic identique, à une même distance de la source, le niveau sonore dans une rue en U sera supérieur à celui enregistré dans une rue en L ou un large boulevard. Le tableau ci-dessous donne les résultats de simulations qui comparent les niveaux de bruit moyen pour une rue en L et une rue en U soumises à des niveaux de trafic équivalents, correspondant à une vitesse de circulation de 50 km/h, des voies de 15 m de large en terrain plat et 10% de camions.

Niveau de bruit	Trafic dans une rue en L	Trafic dans une rue en U
50 dBA	600 véhicules /jour	200 véhicules /jour
55 dBA	1000 véhicules /jour	600 véhicules /jour
60 dBA	2000 véhicules /jour	1200 véhicules /jour
65 dBA	6000 véhicules /jour	2000 véhicules /jour
70 dBA	17000 véhicules /jour	7000 véhicules /jour
75 dBA	60000 véhicules /jour	20000 véhicules /jour

La largeur d'une rue en U influence les réflexions acoustiques et donc le niveau sonore qui y est atteint. Au plus la rue est étroite, au plus le bruit est réverbéré. On peut calculer de manière théorique le niveau sonore dans une rue en U par la formule suivante :

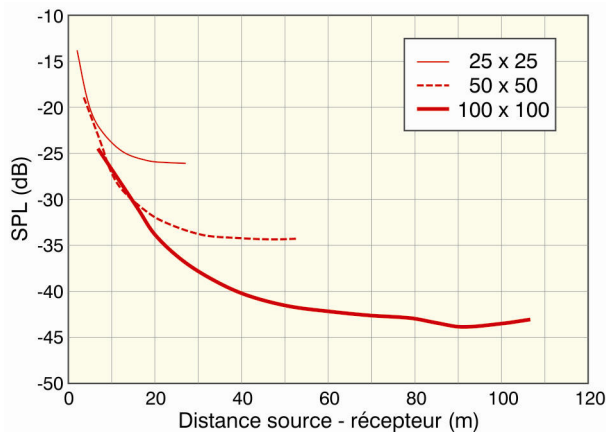
$$L_{aeq} = E - 9.5 \log(W) + 24 \text{ (dBA)}$$

Où E est l'émission sonore d'un tronçon d'infrastructure

W est la distance entre les lignes moyennes des façades (en mètres).

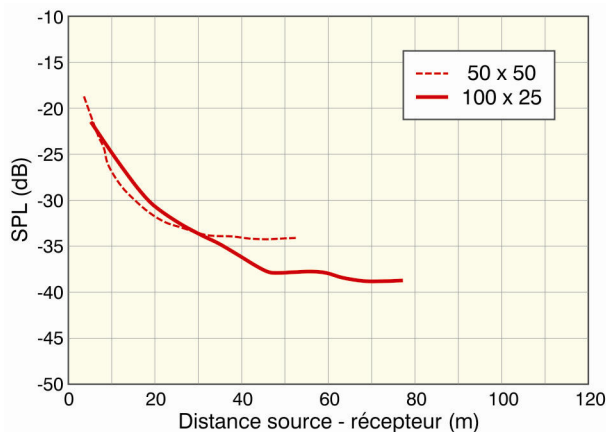
Les effets des dimensions des places urbaines sur leur champ sonore ont été étudiés à l'aide de modèles informatiques développés à l'Université de Sheffield. Des résultats typiques sont résumés ci-dessous et représentés graphiquement, considérant la taille de la place, ses proportions et la hauteur des immeubles (Kang & al. 2004).

Le graphe ci-dessous montre les différences de niveau sonore mesurées dans des espaces de 25m, 50m et 100m de côté pour une distance entre la source et le récepteur croissante, une hauteur des bâtiments de 20m et un coefficient d'absorption des parois de 0.1. Le niveau sonore est exprimé en fonction du paramètre SPL qui correspond au niveau sonore mesuré en un point de l'espace duquel on soustrait le niveau sonore mesuré à la source du bruit.



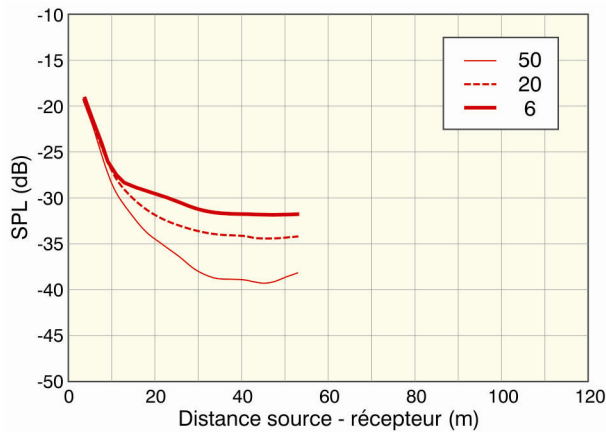
(Kang & al. 2004).

Pour des places de même superficie, la différence entre un carré et un rectangle est représentée par le schéma ci-dessous, pour des places dont la hauteur des bâtiments est de 20m et un coefficient d'absorption des parois de 0.1. L'atténuation du niveau sonore SPL est plus importante dans le champ lointain dans une configuration rectangulaire



(Kang & al. 2004).

Enfin pour une place de 50m x 50m, la variation du SPL en fonction de la hauteur des bâtiments est donnée dans le graphe ci-dessous, pour un coefficient d'absorption des parois de 0.1. Lorsque la hauteur des constructions passe de 6m à 50m de haut, l'écart maximal de niveau sonore est typiquement de 8 dB avec un niveau sonore croissant pour des bâtiments plus élevés.



(Kang & al. 2004).

Les conditions de propagation de l'énergie sonore sont modifiées par les matériaux des surfaces rencontrées. Les éléments constitutifs du tissu urbain possèdent des qualités acoustiques réfléchissantes ou absorbantes variables selon les matériaux utilisés. Notons par exemple que le verre réfléchit davantage les sons qu'un mur en brique. Ainsi, le choix des matériaux influence l'ambiance sonore d'un site.

Le pouvoir absorbant d'un matériau est défini par son coefficient d'absorption. Au plus une paroi absorbe au moins elle réfléchit et inversement. Le coefficient d'absorption α détermine la quantité d'énergie absorbée par une paroi par rapport à la quantité d'énergie incidente : $\alpha = \text{énergie absorbée} / \text{énergie incidente}$. Le tableau ci-dessous donne la valeur du coefficient d'absorption acoustique de divers types de matériaux.

Coefficient d'absorption acoustique α	Caractéristique réfléchissante du matériau	Exemples de matériaux
$\alpha = 0$	Totalement réfléchissant	Plan d'eau, dalle bétonnée, plaques métalliques, bois vernis, marbre, vitrages, ...
$\alpha = 0.2$	Semi-réfléchissant	Bois non poncé et peu jointif, pierres plates régulières, crépi, blocs de béton rugueux, sols revêtus de matériaux bitumineux, ...
$\alpha = 0.5$	Semi-absorbant	Bois non jointifs et non poncés, graviers ou matières granuleuses répandues sur le sol, sol en terre avec gazon
$\alpha = 0.7$	Absorbant	Sol naturel très irrégulier comportant une végétation dense

Signalons par exemple que l'utilisation des matériaux réfléchissants améliore la perception de certains sons alors que les matériaux absorbants permettent d'atténuer certains bruits. L'utilisation de matériaux absorbants sur de grandes surfaces permet de transformer un espace urbain fermé en un espace acoustiquement ouvert. En effet, les matériaux absorbants empêchent la réflexion du bruit sur ses parois et donc l'augmentation du niveau sonore dans l'espace due à la superposition du bruit émis et du bruit réfléchi. Ainsi, par exemple, dans le cas d'un intérieur d'îlot dont l'accès se fait par un porche, l'utilisation de matériaux absorbants sur les murs du porche permet d'atténuer le bruit provenant de la circulation routière. En revanche, dans un parc, sur une place ou à l'intérieur d'un

flot, il est parfois judicieux de placer des matériaux réfléchissants acoustiquement afin de faire ressortir certains sons agréables et utiles (bruit d'une fontaine, de la végétation, des oiseaux,...).



Différents types de matériaux du point de vue acoustique (Photos : S. Reiter).

L'atténuation sonore est plus forte dans le cas des bords diffusants que pour ceux qui sont géométriquement réfléchissants. Notons aussi que la réverbération des sons est beaucoup plus courte sur les places urbaines ayant des bords diffusants que sur celles qui ont des bords réfléchissants (vitrages,...). Ainsi, lorsqu'on veut limiter le niveau sonore d'un espace public et le temps de réverbération des sons dans cet espace, il faut éviter les longues façades réfléchissantes (vitres, ...).

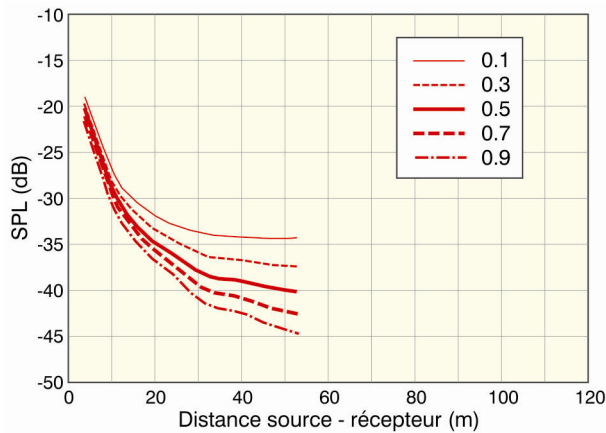


Longues façades réfléchissantes (Photos : S.Reiter).

Le site de Beaulieu à Auderghem s'étend autour de l'axe formé par l'autoroute E411 et la ligne de métro 1A aérienne, deux sources d'importantes nuisances sonores. En 1990, suite à des plaintes d'habitants et à des mesures effectuées par l'IBGE, les nouveaux immeubles « Coddic » ont été identifiés comme responsables de l'accroissement régulier du bruit en façade arrière des habitations situées de l'autre côté de l'autoroute. Ces immeubles, affectés essentiellement aux bureaux, présentaient sur plusieurs étages une façade lisse et très réverbérante qui renvoyait le bruit de l'autoroute par-dessus les murs antibruit qui jusque-là préservaient les riverains (IBGE 1998). Cette expérience prouve que des nuisances sonores indirectes peuvent être liées à des modifications de la morphologie bâtie ou à la construction de nouveaux bâtiments.

Les effets de l'absorption des matériaux des parois d'une place sur le facteur SPL ont été étudiés avec des modèles informatiques développés à l'Université de Sheffield. Le graphe ci-dessous montre la variation du SPL liée à une augmentation

du coefficient d'absorption des bords, pour une place de 50x50m² entourée de bâtiments de 20m de haut. Le SPL diminue proportionnellement à l'augmentation du coefficient d'absorption des bords. La baisse est typiquement de 12 dB quand le coefficient d'absorption des parois augmente de 0.1 à 0.9.



(Kang & al. 2004).

Le champ sonore sur une place urbaine dont les façades et le sol diffusent seulement 20% de l'énergie incidente sur ses bords est très proche de celui résultant d'une surface réfléchissante purement diffuse. Cela signifie que l'effet d'ajouter même une petite quantité de diffusion sur une place urbaine où les réflexions sont principalement spéculaires peut être bénéfique du point de vue de la réduction du bruit urbain. De façon similaire aux bords diffusants, le mobilier de rue, tel que les lampadaires, les bancs, les cabines téléphoniques ou les abribus, peut également être efficaces pour réduire le bruit (Kang & al. 2004).

La végétation sur les façades des immeubles et au sol peut aussi servir à augmenter le caractère diffusant des parois d'un espace public et ainsi augmenter l'absorption sonore dans cet espace, ce qui réduit le bruit. Il est important de noter que l'efficacité de la végétation comme absorbeur dans un espace public urbain (boulevard, place, rue) est beaucoup plus grande que son effet dans espace totalement découvert, à cause des réflexions multiples sur les parois de l'espace urbain. Ainsi, les arbres situés dans des espaces publics urbains y introduisent une absorption sonore et un effet de dispersion du bruit additionnels par rapport à l'effet du sol et des façades (Kang & al. 2004). Il est toutefois important de noter que pour que la végétation ait un effet d'absorption sonore toute l'année, il faut choisir des espèces à feuilles persistantes.



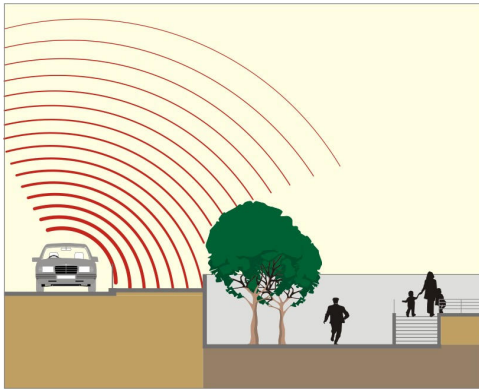
Absorption sonore due à la végétation (Photos : S. Reiter).

La création d'**espaces tampons** entre des ambiances sonores très différentes est utile. Ce sont des espaces intermédiaires entre la source de bruit et l'endroit où le calme est recherché. Ils permettent de faire sentir une progression du bruit entre deux lieux fort différents du point de vue de leur ambiance sonore. Dans cette optique, l'ajout de porches, de cours intermédiaires, de galeries ou d'arcades permet de dévier ou de conduire le son.



Espace tampon (Photo : S. Reiter).

Créer des **différences de niveaux** entre la source de bruit et les espaces de détente est parfois une solution pour isoler un lieu de la pollution sonore de son environnement.



Différence de niveau.

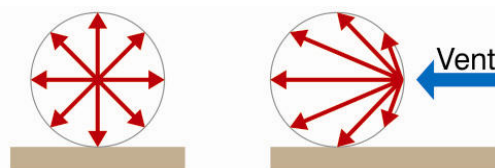
Ainsi, la place Bruegel à Bruxelles est protégée du point de vue acoustique par la dénivellation de 20m de haut qui la sépare de la place Poelaert, fortement exposée au bruit généré par le trafic important sur le boulevard de la toison d'or. Lorsqu'on descend à pied la rampe qui longe le palais de justice, on perçoit aisément qu'on quitte un lieu bruyant où la voiture est reine pour entrer dans une ambiance sonore confortable et à dominance humaine.



Dénivellation importante entre la place Bruegel et la place Poelaert (Photo : S. Reiter).

Les **zones de végétation dense** peuvent aussi servir à isoler un lieu du point de vue acoustique. Dans une rue, la présence de rangées d'arbre ne va pas diminuer le niveau sonore direct qui atteint les piétons mais va limiter la réverbération du son entre les façades grâce à l'absorption du son par les feuilles des arbres. Toutefois, cette réduction sonore due à la végétation peut être fortement renforcée par la présence de zones de plantation dense de l'ordre de 6 à 15m de large entre la source de bruit et le récepteur (Santamouris & Asimakopoulous 1996). Dans ce cas, la végétation sert réellement de barrière acoustique et diminue à la fois les champs sonores directs et diffus.

La direction du **vent** modifie la direction de propagation des sons en plein air. Lorsqu'une source sonore se trouve en aval du bâtiment par rapport au sens des vents dominants, la propagation des bruits est diminuée. Lorsqu'elle se trouve en amont, c'est l'inverse. Le dessin ci-dessous montre la modification de la propagation des sons entre une situation sans vent (à gauche) et une situation où le vent souffle de droite à gauche.



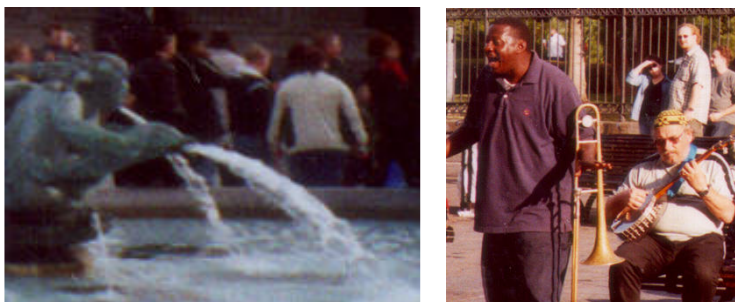
(Roulet 2002)

En milieu dégagé, cette influence du vent sur le son perçu ne devient significative qu'à partir d'une distance de 100m de la source de bruit. Vu la densité des obstacles, en milieu urbain, l'influence du vent sur le niveau sonore peut généralement être négligée.

5.1.3 Les dispositifs de correction acoustique

Les dispositifs de correction acoustique servent à limiter l'inconfort acoustique lorsque les émissions de bruit ne peuvent pas être limitées à la source et que le contexte construit ne peut pas être modifié. Il s'agit essentiellement des **masques sonores** et des **écrans acoustiques**.

L'effet de masque permet de masquer un son que l'on ne veut pas entendre en augmentant le bruit de fond suffisamment pour qu'il masque le bruit parasite ou en limitant le niveau sonore du bruit parasite de manière à ce qu'il soit inférieur au bruit de fond habituel. Un effet de masque peut être créé en couvrant un bruit désagréable par un bruit de même niveau sonore mais plus agréable, comme par exemple une fontaine à fort débit d'eau. L'utilisation d'un masque sonore est à conseiller pour couvrir un bruit de fond qui ne peut pas être supprimé. L'effet de masque peut aussi être utilisé pour choisir un type d'ambiance sonore agréable : lieu à sonorités naturelles, musicales ou autres.



Effets de masque : fontaine et accompagnement musical. (Photos : S. Reiter).

En milieu urbain, dans des espaces collectifs de rencontre, les fontaines sont un moyen efficace pour dissimuler les sons gênants tels que le trafic automobile et créer une ambiance sonore spécifique. Notons que l'effet de masque peut être renforcé si l'on traite la fontaine en matériaux réfléchissants du point de vue acoustique. La végétation peut générer un léger masque contre le bruit routier quand elle est parcourue par le vent et elle ajoute des sonorités agréables à l'ambiance sonore grâce au chant des oiseaux qu'elle attire.



Sonorités naturelles : jets d'eau, branches agitées par le vent, chants d'oiseaux,...
(Photos : S. Reiter)

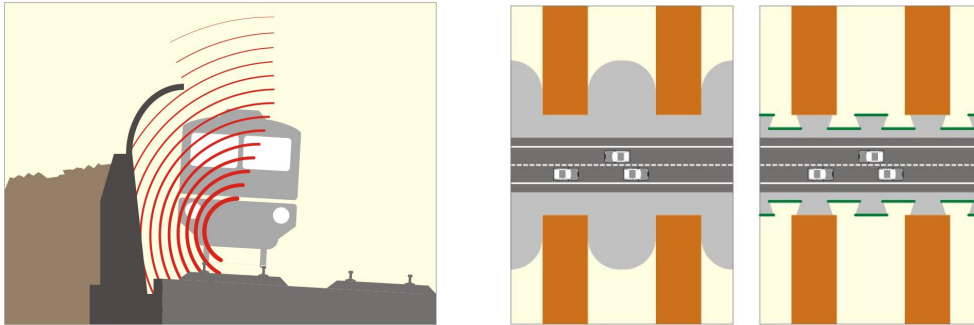
En première approximation, un bruit est masqué par un autre bruit quand son niveau sonore est inférieur de 10 dB(A) par rapport à ce dernier. Mais l'effet de masque dépend en réalité de la fréquence : il est plus vite atteint dans les basses fréquences car l'écart de niveau entre le bruit de fond et le bruit parasite doit être faible pour obtenir un bon effet de masque. Ainsi, utiliser des masques sonores pour cacher le bruit dû au trafic s'avère un moyen très utile pour améliorer le confort acoustique d'un espace public. Le tableau ci-dessous donne les valeurs approchées de l'écart de niveau entre le bruit de fond et un bruit parasite suivant le spectre de fréquences pour obtenir un effet de masque.

Fréquence centrale des octaves du bruit parasite (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Différence entre le bruit de fond et un bruit parasite (dB) pour assurer l'effet de masque	2	6	9	12	13	13

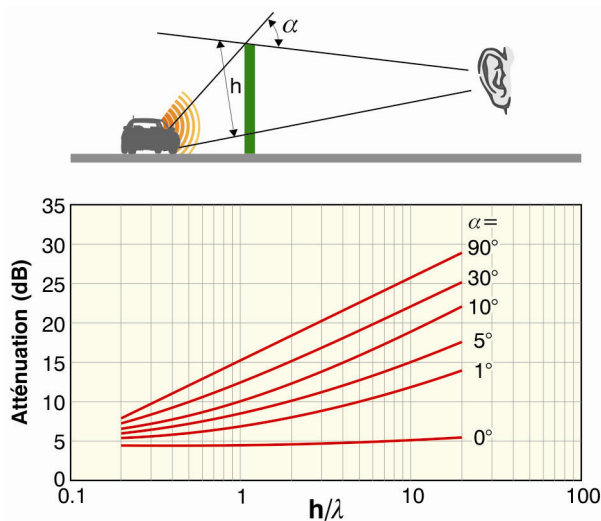
Les **écrans acoustiques** sont des dispositifs techniques dont la fonction première est de limiter la propagation du bruit. La forme des écrans peut être évaluée, en première approche, en assimilant la propagation du bruit à celle de la lumière. Les écrans acoustiques ne doivent en aucun cas être considérés comme une solution universelle aux problèmes acoustiques : ils peuvent améliorer des situations sonores très inconfortables mais ne remplacent ni le travail sur la diminution des sources de bruit ni la conception adaptée d'un aménagement urbain ou territorial de qualité.

La technique des murs pare-bruits est ancienne mais elle s'est développée plus récemment au bord des autoroutes et des voies de chemin de fer. Les murs pare-bruits sont en général mal adaptés aux problèmes rencontrés en milieu urbain, pour des raisons esthétiques et des raisons d'encombrement, mais dans certains cas ils peuvent permettre de corriger les défauts de plans de masse préexistants. Ils peuvent être utilisés pour corriger la mauvaise conception des certaines zones bâties qui sont spécialement vulnérables au bruit, comme par exemples des

ensembles d'immeubles perpendiculaires à des voies de circulation importante ou des lotissements pavillonnaires situés à côté de routes à grand trafic. Les schémas ci-dessous donnent deux exemples de l'utilisation de murs pare-bruit. Le graphe de gauche propose l'implantation d'un mur pare-bruit le long d'une voie ferrée. Les deux graphes de droite montrent la limitation de la propagation des nuisances sonores provenant d'une rue à forte circulation entre des longs bâtiments situés perpendiculairement à la chaussée.

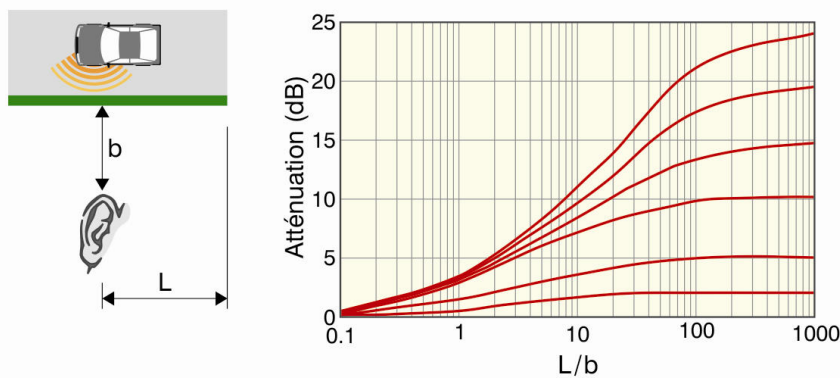


Le schéma ci-dessous donne l'atténuation acoustique d'une paroi infiniment longue. (Roulet 2002).



(Roulet 2002).

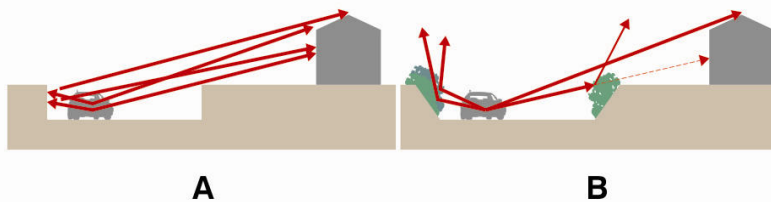
Le graphique ci-dessous montre que l'atténuation acoustique d'une paroi anti-bruit diminue fortement si sa longueur est inférieure à 100 x la distance entre la paroi et le récepteur.



(Roulet 2002).

Pour être efficaces, les écrans acoustiques doivent être continus. Les écrans sont d'autant plus efficaces qu'ils sont pleins. Le bruit qui s'engouffre dans les brèches est d'autant plus intense que les ouvertures sont amples. C'est la raison pour laquelle une rangée d'arbres n'est pas un bon écran acoustique : la réduction du bruit générée par la présence d'une rangée d'arbres est en général inférieure à 2 dBA. Les rideaux d'arbres sont donc de bons écrans visuels mais offrent une réduction acoustique nettement inférieure à un mur. La végétation peut toutefois être utilisée comme écran acoustique à condition que la largeur de la zone plantée soit importante et qu'il s'agisse d'un écran continu en hauteur (petits arbustes et buissons en dessous des arbres,...). D'autre part, la végétation peut agrémenter et embellir les autres systèmes de protection acoustique (murs, talus,...) tout en renforçant leurs capacités d'absorption du bruit.

La création d'une ombre sonore est la meilleure solution pour supprimer le champ sonore direct entre une source de bruit et le récepteur. D'autres systèmes de protection jouent uniquement sur les réflexions sonores ; il s'agit de l'utilisation de matériaux absorbants ou de la présence de surfaces obliques de manière à réfléchir le bruit vers le ciel. Le schéma ci-dessous (Roulet 2002) montre la différence de comportement acoustique entre des tranchées d'autoroute à parois verticales classiques (A) qui causent des réflexions gênantes vers l'habitation et les parois obliques (B) qui renvoient le bruit, atténué par les plantations, vers les ciel. Une solution encore plus performante au niveau acoustique que le schéma B serait la surélévation du talus planté à droite afin d'arrêter (par effet d'ombre sonore) l'ensemble des émissions sonores directes qui se dirigent vers la maison.



(Roulet 2002)

D'autres solutions locales sont à signaler :

- des talus, des terrassements et des différences de niveaux peuvent parfois être avantageusement exploités pour faire obstacle au bruit. Il est généralement conseillé d'y placer de la végétation pour absorber les sons.
- des chicanes ou des portails épais peuvent assurer le passage des personnes et empêcher le passage du bruit ;
- des programmes annexes en bordure de voies (garages, par exemple) peuvent être une bonne manière de créer un ombrage sonore tout en conférant à cette zone une fonctionnalité multiple.
- les vitrages et châssis acoustiques sont utiles pour protéger les bâtiments directement exposés à une source de bruit. Ces bâtiments servent de protection acoustique pour les espaces publics et les bâtiments qui se trouvent du côté de la façade opposée.

Les schémas ci-dessous illustrent ces exemples de dispositifs de correction acoustique.



(Roulet 2002)

Ces dispositifs exercent en général un impact paysager important qui ne doit pas être négligé. Ils spécialisent les espaces, avec comme effet pervers de faire oublier la nécessité de traiter le bruit à la source et de rendre certains lieux inaccessibles aux piétons. Ils transforment ainsi des espaces de coexistence en lieux réservés à un usage spécifique. Ils doivent donc être utilisés en dernier recours lorsque aucune autre solution n'est possible pour réduire la source de bruit et que la pollution sonore qu'elle génère est très importante.

Le tableau ci-dessous compare la réduction sonore possible entre différents types de protections acoustiques.

Type de protection acoustique	Diminution maximale du niveau sonore en dB(A)
Mur pare-bruit	12 à 15
Butte de terre	5 à 10
Ecran utilitaire (parking,...)	5 à 10
Bâtiment de petite dimension	10 à 15

5.2 Méthodes d'évaluation des ambiances sonores

Les méthodes d'évaluation des ambiances sonores sont au nombre de deux :

- les simulations réalisées à partir de logiciels acoustiques.
- les mesures in situ.

Différents logiciels d'acoustique peuvent être utilisés pour l'analyse du paysage sonore dans les espaces urbains ouverts ; citons les logiciels acoustiques MITHRA, Sound Plan, RAYNOISE ou encore le logiciel de cartographie du bruit CADNA. Pour prévoir la propagation du son dans les places urbaines de manière précise, deux modèles informatiques ont été développés à l'Université de Sheffield, l'un basé sur la méthode de la radiosité et l'autre à partir de la méthode image-source (Kang & al. 2004). Le premier est destiné aux surfaces réfléchissantes diffuses (c-à-d., acoustiquement rugueuses) tandis que la deuxième se rapporte aux surfaces géométriquement réfléchissantes (c-à-d. acoustiquement lisses). Ces modèles ont été validés avec des mesures en site réel (Kang & al. 2004).

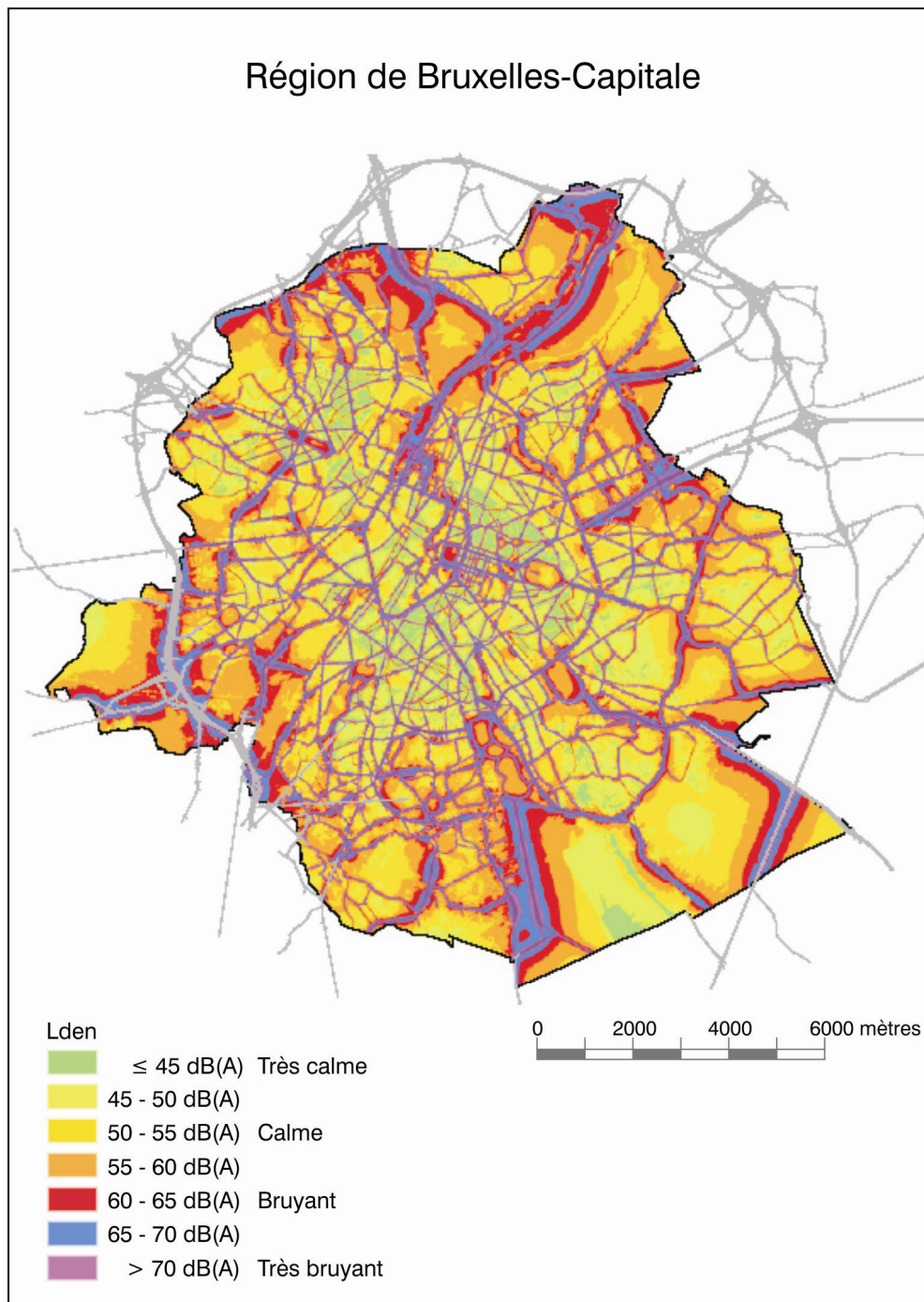
Les mesures in situ restent évidemment la meilleure manière de caractériser le niveau sonore d'un lieu spécifique mais cela nécessite des mesures durant au moins une semaine et la possibilité de placer les instruments de mesure en façade d'un des bâtiments, ce qui n'est pas toujours possible.

A l'heure actuelle, de nombreuses villes se dotent de cartes de bruit, établies à partir d'une combinaison de mesures sur site réel (densité du trafic,...) et de simulations informatiques. Ces cartes sonores sont accessibles au grand public et peuvent donc être utilisées gratuitement par les concepteurs de projets urbains. Ces cartes de bruit donnent le niveau sonore moyen sur les axes principaux de la ville. En général, les niveaux de bruit sont évalués selon l'indicateur Lden (qui consiste en une pondération des moyennes effectuées sur la journée, la soirée et la nuit : day-evening-night).

Au niveau des études acoustiques, la Région de Bruxelles-Capitale donne déjà le ton au niveau européen. Elle compte plusieurs stations de mesure de bruit. Ces stations relèvent en continu les niveaux acoustiques, soit en un point représentatif

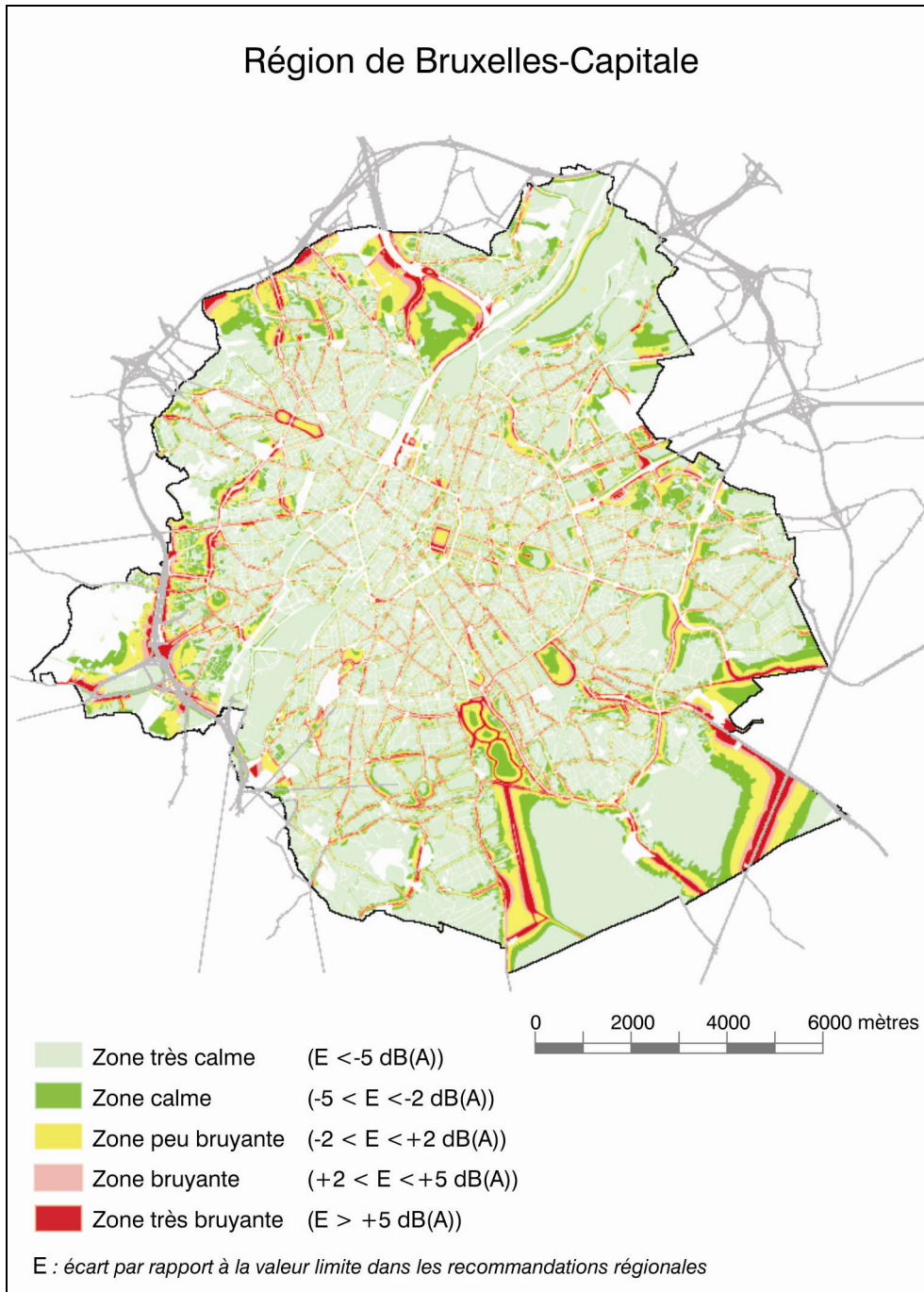
d'une configuration urbanistique donnée soit en vue de la surveillance d'une source sonore spécifique (par exemple le bruit de trafic aérien). Les cartes d'exposition au bruit produites par l'IBGE consistent en une modélisation du bruit routier. Les calculs sont basés sur la forme du bâti, les données de trafic du plan IRIS, des mesures complémentaires de trafic ainsi que des relevés relatifs aux caractéristiques de revêtements routiers.

Le plan ci-dessous est une carte du bruit représentant l'exposition des principaux espaces publics bruxellois au bruit du trafic routier en juillet 2001. (IBGE 2002)



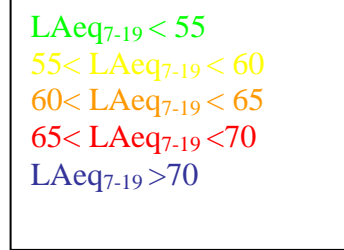
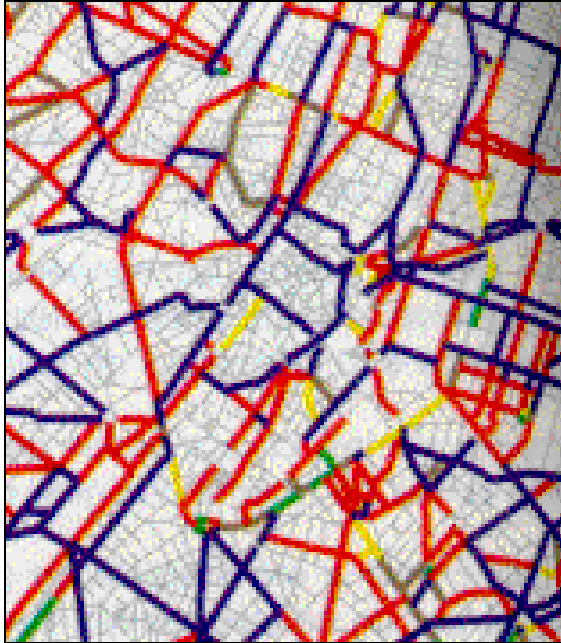
(IBGE 2007)

D'autres types de cartes de bruit existent. Elles représentent par exemple l'écart entre la valeur Lden en un site et des valeurs limites de référence. La carte ci-dessous présente l'écart de dépassement des valeurs Lden par rapport aux recommandations régionales, en juillet 2001 en Région de Bruxelles-Capitale.



(IBGE 2007)

D'autre part, ces cartes peuvent permettre de voir de manière détaillée la répartition des niveaux sonores élevés dans le tissu urbain. Ainsi, l'agrandissement ci-dessous donne une schématisation des niveaux sonores annuels rencontrés dans les rues à fort trafic du centre de Bruxelles entre 7h et 19h. Les rues en gris sont celles pour lequel le niveau sonore n'a pas été modélisé car elles sont en principe considérées comme calmes.



(IBGE 1998)

Il existe enfin une méthode dynamique d'évaluation des ambiances sonores : **la promenade sonore**. Cette méthodologie d'approche de l'environnement sonore urbain est liée au concept de Paysage Sonore qui veut aborder les ambiances sonores d'un point de vue objectif et quantitatif, tout en ne limitant pas l'étude acoustique d'une ambiance sonore à la seule valeur de son niveau sonore moyen.

Ce type de relevé consiste à parcourir un cheminement tout en enregistrant les sons perçus par les deux oreilles du promeneur pour pouvoir ensuite analyser quantitativement et qualitativement en détail les types d'ambiances sonores traversées. La promenade sonore permet d'avoir une représentation instantanée de ce qu'on peut entendre sur un site urbain en fonction des activités qui s'y produisent. Se déroulant sur une période d'une demi-heure environ le long d'un parcours défini par les besoins de l'étude, elle vient en complément des mesures acoustiques standardisées de bruit urbain (en un point situé en façade pendant une durée d'une semaine au minimum).

Nous avons testé cette méthodologie particulièrement intéressante du point de vue de l'analyse des ambiances urbaines sur plusieurs espaces publics bruxellois. Ces expériences scientifiques destinées à étudier la qualité du confort acoustique ont été réalisées avec la collaboration du laboratoire du GRECAU de Bordeaux et plus particulièrement de Catherine Sémidor.

Le mode opératoire est basé sur l'utilisation d'un système d'enregistrement sonore associé avec des prises de vue. Les photographies servent à conserver une trace d'une part des formes urbaines dans lesquelles se fait la promenade et d'autre part du type de sources sonores en présence. Pour le matériel son, Catherine Sémidor a

porté son choix sur un magnétophone DAT équipé d'une "tête artificielle". Le DAT (Digital Audio Tape) est un magnétophone numérique qui permet de réaliser des enregistrements sonores de grande qualité. Le Système d'enregistrement binaural (SEB) est un microphone stéréophonique constitué d'une paire de capsules électret miniatures placées à proximité des oreilles du preneur de son, afin d'utiliser celles-ci comme réflecteurs acoustiques. Ce principe permet donc une captation de l'espace stéréophonique au plus près de l'écoute naturelle. Ses caractéristiques sont telles que l'on peut envisager son utilisation d'un studio d'enregistrement jusqu'à la prise de son à l'extérieur. De plus sa discrétion et sa polyvalence permettent un emploi en toutes circonstances. Les deux microphones du SEB peuvent être calibrés à chaque mesure. Nous pouvons donc de cette façon connaître assez précisément le niveau de pression acoustique des enregistrements sonores réalisés. Il est important de noter que les études acoustiques sont habituellement réalisées à l'aide de microphones omnidirectionnels. Le microphone omnidirectionnel, du fait de sa constitution, mesure simplement la pression acoustique en un point et ne permet donc d'assurer l'effet stéréophonique de l'écoute humaine. Pour cette raison, nous avons choisi le SEB pour des enregistrements sonores en milieu urbain où l'effet stéréophonique nous semble important pour définir les ambiances sonores.

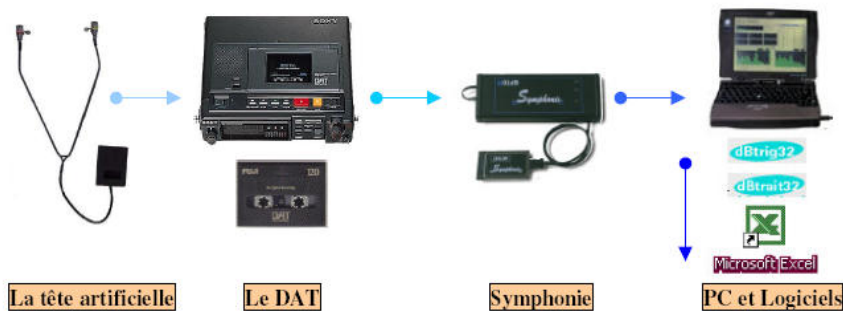


Calibration des microphones
(Photos : S. Reiter)



Déroulement de la promenade sonore

Très souple de mise en œuvre, cette chaîne d'acquisition donne accès à des enregistrements stéréophoniques similaires à l'écoute naturelle binaurale du promeneur. La calibration des bandes magnétiques (couplée avec le repérage de la position de l'atténuateur) permet de dépouiller par la suite en laboratoire chacune des voies grâce à la carte Symphonie associée au logiciel dBEnv. Le schéma ci-dessous montre l'ensemble du dispositif expérimental utilisé pour les promenades sonores (Hamdoun 2004).



(Hamdoun 2004).

Cet équipement offre donc la possibilité de pouvoir analyser séparément et comparer entre eux les signaux sonores captés par les deux oreilles du promeneur (niveaux sonores dynamiques et fréquences des sons perçus par chaque oreille). Cette caractéristique est un avantage indéniable pour pouvoir évaluer l'influence de l'aménagement urbain sur le confort acoustique.

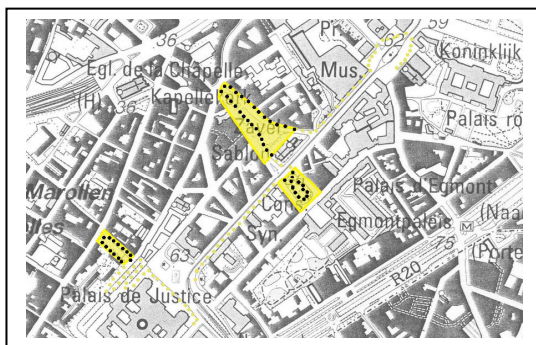
On dispose donc de données chiffrées de l'évolution des niveaux sonores et des fréquences des sons perçus par l'oreille humaine au cours de la promenade. De plus, on possède aussi l'enregistrement de signaux qui peuvent être utilisés dans le cadre d'une enquête, auprès des citoyens par exemple, pour avoir leur opinion sur la qualité du confort sonore urbain.

Les données sont exportées dans un fichier Excel, ce qui permet ensuite d'étudier le niveau sonore en fonction de la fréquence et du temps. Les résultats du dépouillement des enregistrements seront présentés dans cette thèse sous forme d'« images acoustiques » dont l'abscisse représente l'évolution du temps et l'ordonnée les fréquences sonores. Les couleurs correspondent aux niveaux sonores selon la gamme de valeurs de Leq en dB donnée juste à côté. Ces images synthétisent de manière graphique et très efficace le spectre sonore rencontré sur un parcours déterminé.

Il faut souligner que la promenade sonore est une technique innovante, inventée par le GRECAU, qui nous semble extrêmement porteuse pour l'avenir de la recherche en acoustique urbaine. En effet, la promenade sonore est un outil acoustique qui nous permet des comparaisons aisées en fonction de multiples paramètres, tels que :

- les formes urbaines : rue en U, rue en L, place, parc,...
- le type d'utilisation de l'espace : journée sans voiture ou trafic automobile intense, marché ou journée sans activité particulière,...
- les moyens de transports : tramway, bus, voiture, vélos, piétons.
- les caractéristiques architecturales : formes et matériaux qui réfléchissent ou absorbent les sons.
- ...

Les paragraphes qui suivent présentent les promenades sonores effectuées selon cette démarche en juin 2003 sur trois places de Bruxelles : la place du Grand Sablon, le square du Petit Sablon et la place de l'Épée (rénovée depuis lors et rebaptisée Place Bruegel). Le plan suivant montre la situation de ces espaces publics et les parcours (en pointillés noirs) suivis pour les enregistrements dans ces espaces publics. Les trajets repérés en pointillés jaunes correspondent à des promenades complémentaires réalisées pour avoir un aperçu des ambiances acoustiques dans les voies de circulation qui relient ces trois places entre elles ainsi qu'à la place Poelaert et à la place Royale.



Les promenades ont été effectuées en collaboration avec Catherine Sémidor du GRECAU de Bordeaux. Le dépouillement des enregistrements a été réalisé par Catherine Sémidor. Nous avons réalisé les mesures de niveaux sonores complémentaires sur des durées de 10 minutes à différents moments d'une même semaine ainsi que l'interprétation des images acoustiques.

La promenade de la **place du Grand Sablon** débute depuis la rue de la Régence en laissant l'église Notre Dame des Sablons sur la gauche, se poursuit jusqu'au bas de la place avec un arrêt au niveau de la fontaine avant de remonter par le parking jusqu'à la rue de la Régence toujours en ayant l'église sur la gauche. Cette promenade a débuté le mardi 3 juin 2003 à 11h ; elle a duré 12 minutes. Les photos prises pendant le parcours ont été placées sur le plan de la place afin d'en analyser les éléments significatifs.



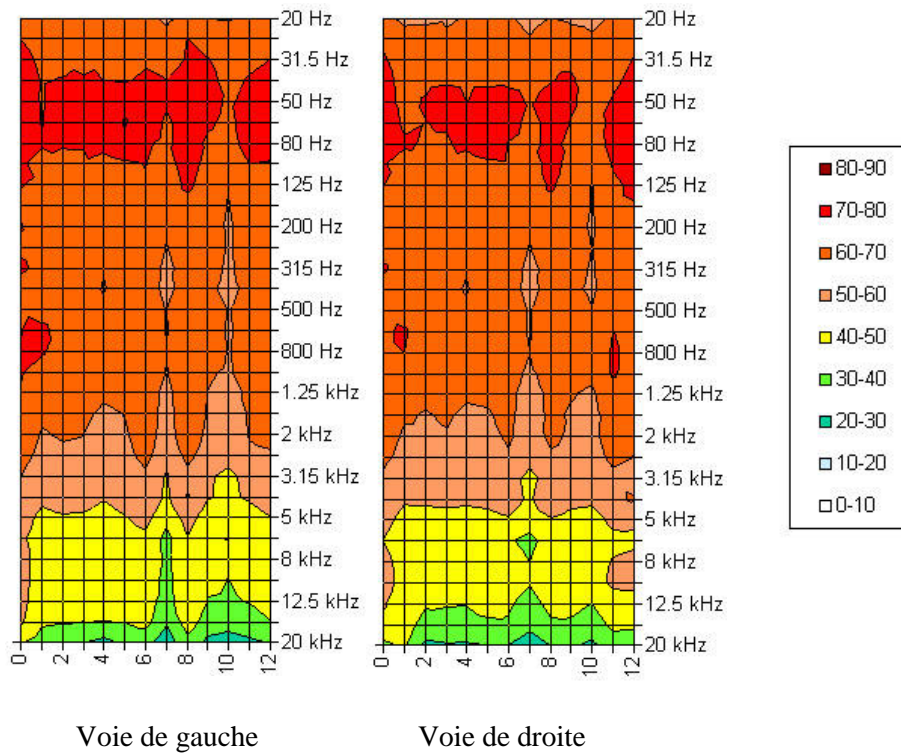
Sens du regard par rapport au plan

La Place du Grand Sablon est une très belle place bruxelloise mais très bruyante et occupée en permanence par un parking. Longée par des voies à fort débit, elle subit le bruit incessant du trafic routier. Cette place, de par ses qualités microclimatiques, historiques et urbanistiques évidentes mériterait un

aménagement intégré de façon à y réduire les nuisances actuelles et y retrouver une zone de calme et de convivialité. Cette place constitue un point de rencontre de différentes fonctions de la ville.

Cependant, malgré les problèmes d'encombrement et d'acoustique importants sur la place du Grand Sablon, cette place est malgré tout fortement fréquentée (terrasses de cafés et de restaurants remplies en permanence en été). Cette place vaut donc réellement la peine d'être réaménagée, d'autant plus qu'elle peut créer encore un lien entre le haut et le bas de la ville (entre le mont des Arts et la connexion place Poelaert – place Bruegel). Son microclimat permet de valoriser un aménagement asymétrique de la place en fonction de la course du soleil.

Le dépouillement des enregistrements est représenté ci-dessous sous forme d'un graphe dont l'abscisse représente l'évolution du temps (un carré par minute) et l'ordonnée les fréquences sonores. Les couleurs correspondent aux niveaux sonores selon la gamme de valeurs de Leq en dB donnée juste à côté.



On observe que sur l'ensemble de la promenade le niveau sonore est élevé (de 60 à 70 dB) jusqu'à 2 kHz, avec des valeurs encore plus importantes (jusqu'à 80 dB) dans les fréquences graves ce qui révèle bien un espace où la circulation des véhicules à moteur est importante. Ce caractère est accentué dans le site par le bruit de roulement sur le revêtement en pavé de la chaussée nettement perceptible à l'écoute.

Globalement, la saturation sonore du lieu est confirmée par la très grande ressemblance des signaux perçus par chacune des oreilles. Ceci traduit également une difficulté à pouvoir repérer, sauf émergence très forte, la provenance des sons dans l'espace.

Seul le passage d'un véhicule à côté du promeneur peut ressortir sur le bruit de fond important. On note que les basses fréquences présentent des niveaux sonores un peu plus importants à gauche jusqu'à la neuvième minute, ce qui correspond au fait que la circulation automobile était à la gauche du promeneur pendant toute cette partie de la promenade. Ensuite, le parcours s'est inversé ; le promeneur a traversé le parking et la circulation est alors à droite du promeneur et un peu plus éloignée que dans la première partie du trajet. On remarque à la 11^{ème} minute une légère augmentation du niveau sonore en basse fréquence du côté droit par rapport au côté gauche. Le signal sonore, qui émerge dans les fréquences aiguës sur la voie de droite en fin de parcours, correspond à la musique qui sort d'une voiture attendant dans la file du feu qui permet de rejoindre la rue de la Régence.

Lors de la station de 3mn (à partir de la 6^{ème} mn) effectuée près de la fontaine le relevé au sonomètre IdB donne une valeur de Leq de 68 dBA, ce qui est une situation d'inconfort. Des mesures de niveaux sonores équivalents ont été réalisées avec un sonomètre d'autres jours pendant une durée de 10 minutes. Les mesures ont été réalisées le mercredi 11 juin, le jeudi 12 juin, le vendredi 13 juin et le samedi 14 juin 2003. Le tableau ci-dessous reprend les niveaux Leq mesurés. La position « Sablon bas » correspond aux bancs situés un peu en dessous de la fontaine et la position « Sablon haut » correspond à un banc situé le long de l'église, sous les arbres.

Lieux	Mercredi 18h	Jeudi 18h	Vendredi 18h	Samedi 12h	Samedi 15h
<i>Sablon : bas</i>	70 dBA	68 dBA	71 dBA	69 dBA	69 dBA
<i>Sablon : haut</i>	60 dBA	62 dBA	61 dBA	59 dBA	60 dBA

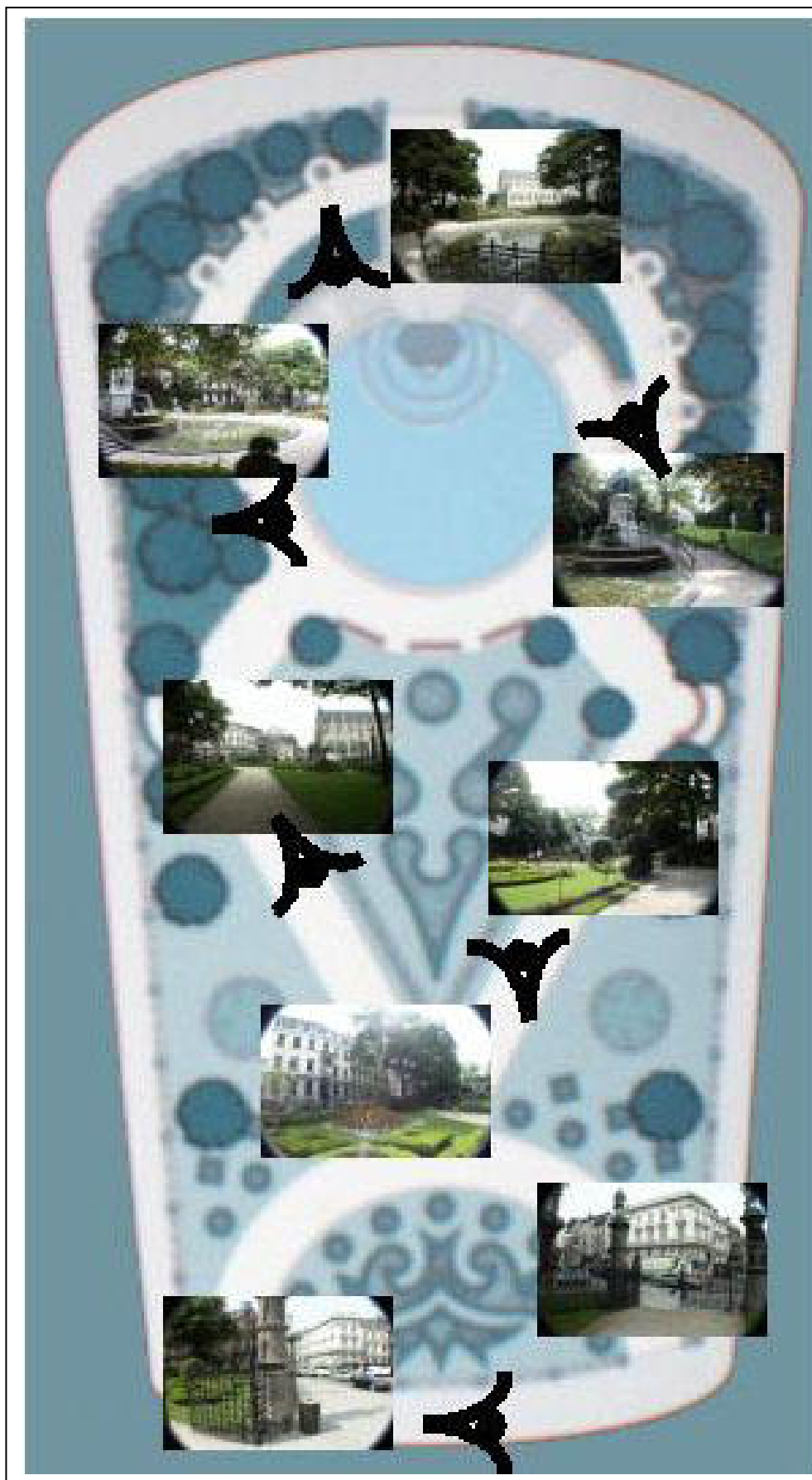
Quelques remarques notées lors des mesures : il faisait chaud à cette période de l'année et le soleil était présent le jeudi et le vendredi. Les échoppes du marché étaient déjà placées mais vides le vendredi et le marché du sablon était en activité le samedi.

Vu les données du tableau ci-dessus, l'intensité de l'enveloppe sonore semble assez constante entre les différents jours de la semaine bien que la présence du marché modifie fortement l'ambiance de la place pendant le week-end.

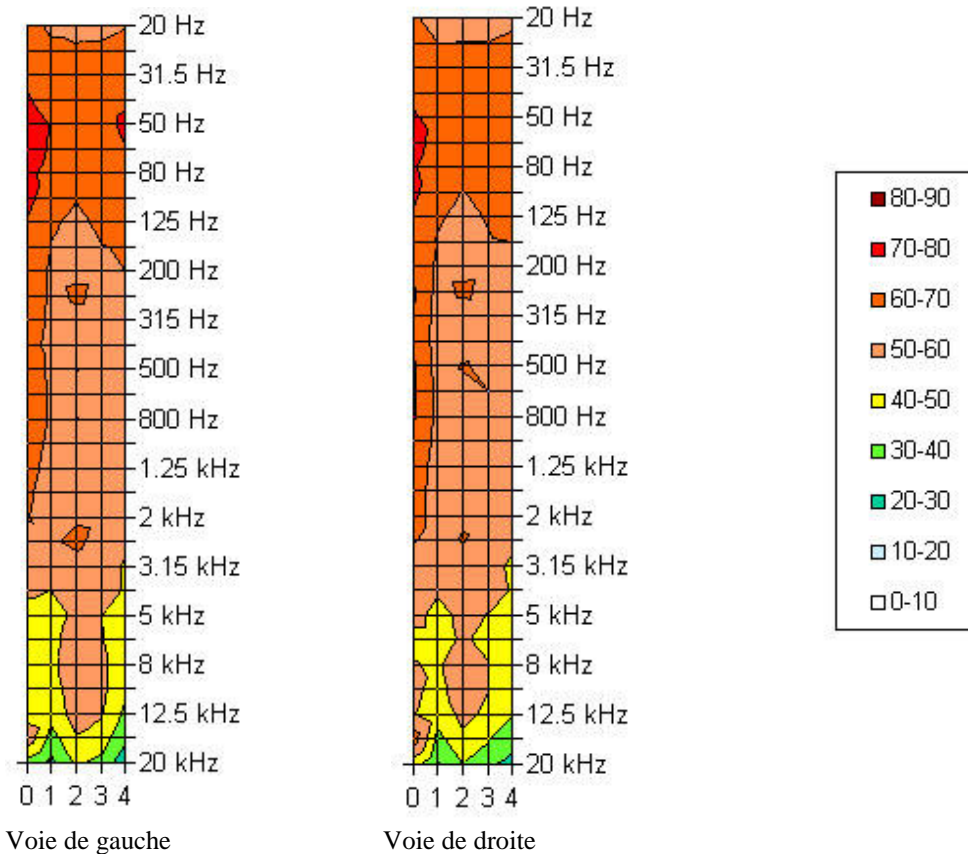
La promenade de la **place du Petit Sablon** débute en entrant par le portail gauche du jardin lorsque qu'on lui fait face. Le promeneur se dirige vers la fontaine, en fait le tour en la laissant sur sa gauche et ressort par le portail droit. Cette promenade s'est déroulée le mardi 3 juin 2003, juste après la promenade du Grand Sablon. Elle a duré 4 minutes.

Il faut signaler que le choix de la place du Grand Sablon et du square du Petit Sablon a été en grande partie déterminé par le désir de trouver deux places très proches l'une de l'autre dont les ambiances acoustiques et climatiques semblaient à première vue très différentes. L'abondance de la végétation et la présence d'une grande fontaine sont des éléments qui donnent une ambiance spécifique au square du Petit Sablon.

Le plan ci-dessous présente en photos le parcours réalisé à travers le square du petit Sablon.



Le dépouillement des enregistrements est à nouveau représenté ci-dessous sous forme d'un graphe dont l'abscisse représente l'évolution du temps (un carré par minute) et l'ordonnée les fréquences sonores. Les couleurs correspondent aux niveaux sonores selon la gamme de valeurs de Leq en dB donnée juste à côté.



On repère bien sur les images acoustiques une forte diminution du niveau sonore après une minute de parcours : le bruit de la circulation provenant de la rue de la Régence est filtré par le jardin pour les fréquences graves et médiums.

La marque acoustique de la fontaine est mise en évidence par la modification de la réponse spectrale entre la 1^{ère} et la 3^{ème} minute : le niveau sonore augmente nettement dans les aigus durant le tour du bassin et particulièrement sur l'oreille gauche qui est du côté de l'eau.

L'écoulement de l'eau de la fontaine sert de masque acoustique par rapport aux bruits de la rue. Le bruit engendré par la circulation est très fortement réduit. On remarque cependant l'émergence d'un bruit de freinage de voiture associé au son d'un klaxon à la 2^{ème} minute vers 250 Hz et 2,5 kHz plus marqués sur l'oreille gauche qui est tournée vers la rue de la Régence à cet instant.

Une autre caractéristique de l'ambiance acoustique du petit Sablon est la présence très régulière de morceaux de musique classique répétés par les étudiants du conservatoire qui habitent dans les maisons donnant sur le square. On peut aussi à l'occasion y entendre le chant d'un oiseau.

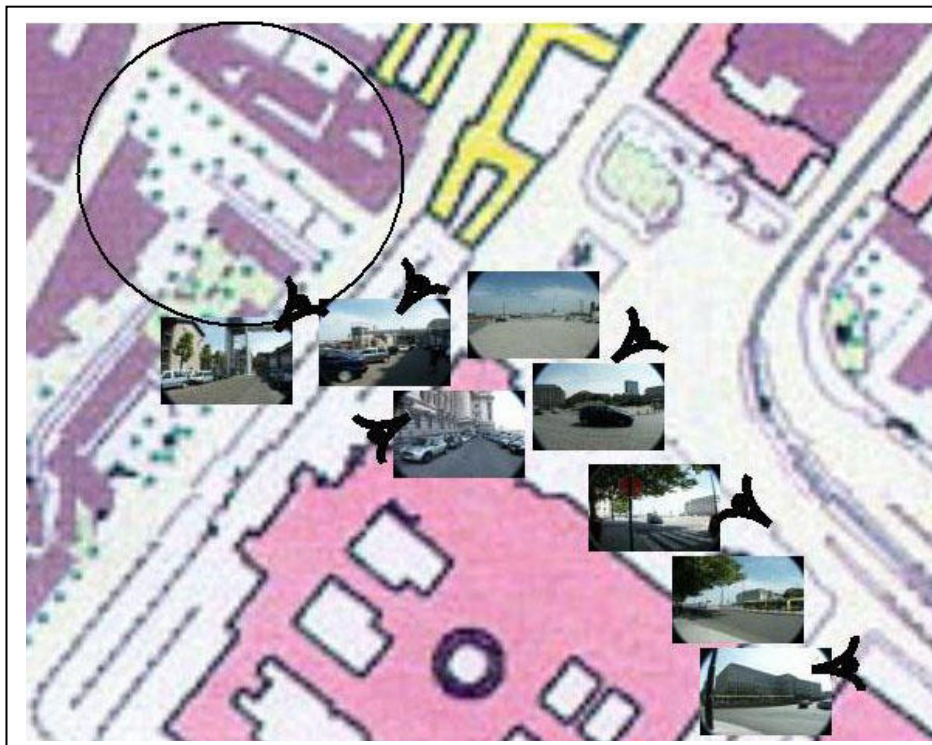
Des mesures de niveaux sonores équivalents ont été réalisées avec un sonomètre d'autres jours pendant une durée de 10 minutes. Les mesures ont été réalisées le mercredi 11 juin, le jeudi 12 juin, le vendredi 13 juin et le samedi 14 juin 2003. Le tableau ci-dessous reprend les niveaux Leq mesurés dans le square du Petit Sablon, sur un des bancs devant la fontaine.

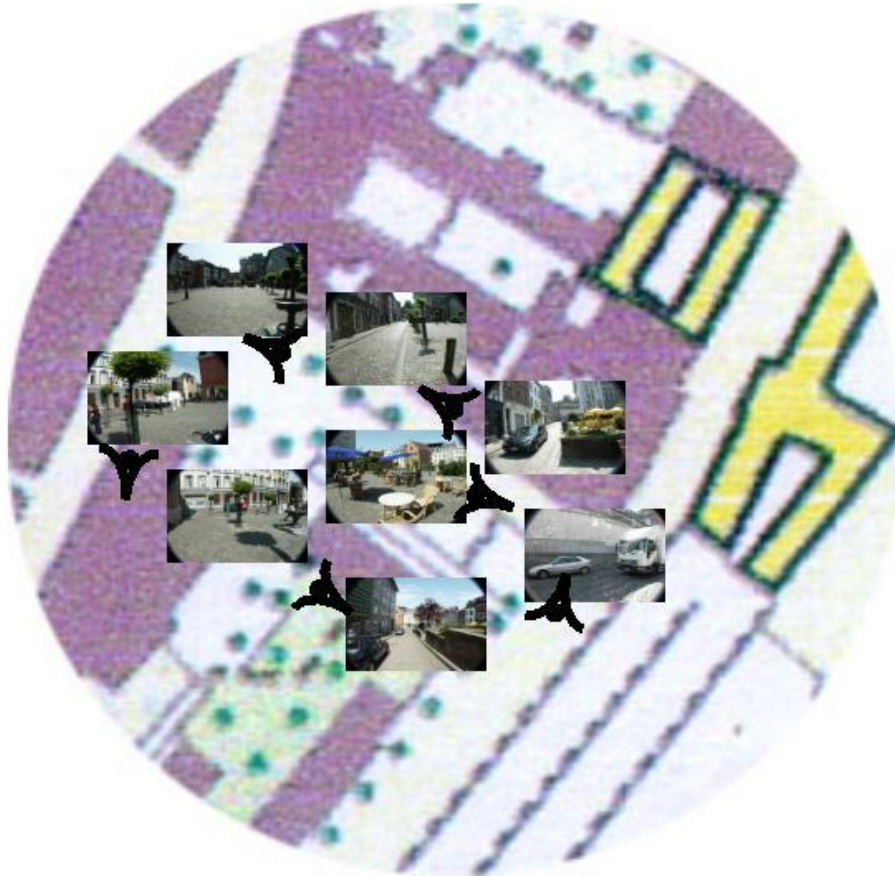
Lieu :	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Samedi
<i>Square sablon</i>	18h	18h	18h	12h	15h
	63 dB(A)	64 dB(A)	64 dB(A)	63 dB(A)	64 dB(A)

Ici aussi, l'intensité de l'enveloppe sonore semble assez constante entre les différents jours de la semaine. Le niveau sonore général est du même ordre de grandeur (mais légèrement plus élevé) que la position sur le banc à côté de l'église de la place du Grand Sablon. Cependant, l'ambiance sonore y est réellement agréable. Ce qui caractérise le paysage sonore dans le jardin n'est donc pas d'être dans un lieu intrinsèquement moins bruyant mais d'entendre d'autres sons que ceux des voitures, des bus, des camions et du tram.

Lors des enregistrements, j'ai noté la présence importante de visiteurs (touristes, familles avec enfants, couples amoureux, personnes promenant leur chien,...) surtout le week-end. Mais l'ambiance sonore reste surtout marquée par le bruit de la fontaine.

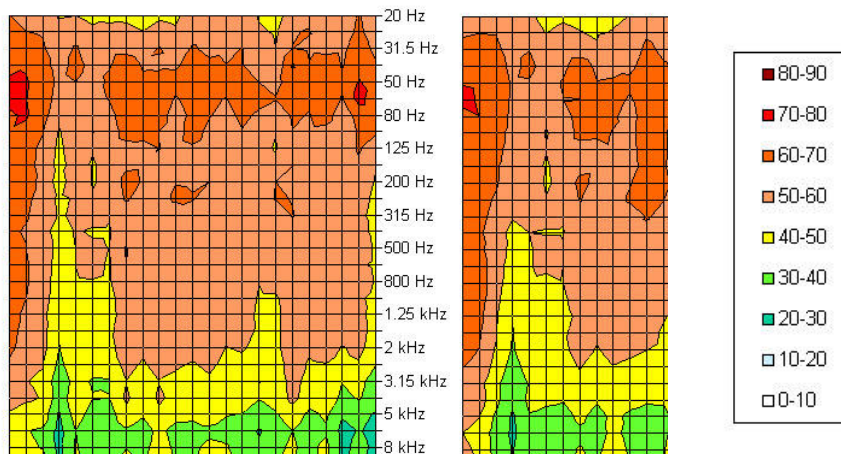
La promenade de la place de l'Epée (rénovée depuis lors et rebaptisée Place Bruegel) débute sur la place Poelaert, descend le long du parking situé derrière le Palais de Justice et rejoint la place de l'Epée en contrebas. Le tour de cette place se fait dans le sens des aiguilles de la montre avec un arrêt en bas de la place et un autre au niveau de la terrasse de café. La promenade a débuté à 11h le vendredi 6 juin 2003. La durée de la promenade est de 20 minutes. La première partie de la promenade est représentée sur le plan ci-dessous avec les photos qui y sont associées. La seconde partie de la promenade est agrandie dans le plan suivant.





Le choix de la place de l'Épée correspond à une place assez proche géographiquement des autres places étudiées mais dont l'exposition à la circulation automobile nous semblait nettement moins importante que celle rencontrée dans la rue de la Régence ou sur place du Grand Sablon. De plus l'influence du dénivelé de 20m entre la place Poelaert et la place de l'Épée nous semblait intéressant à analyser du point de vue acoustique.

Le dépouillement des enregistrements est encore une fois représenté ci-dessous sous forme d'un graphe dont l'abscisse représente l'évolution du temps (un carré par minute) et l'ordonnée les fréquences sonores. Les couleurs correspondent aux niveaux sonores selon la gamme de valeurs de Leq en dB donnée juste à côté.



La promenade commence par le tour réalisé sur la place Poelaert. Le début de la descente le long de la rampe du palais de justice correspond à 2 minutes 39 secondes d'écoulées, puis l'arrivée sur la place de l'Epée à 4 minutes 49 secondes. Une station debout de 3 minutes a été réalisées au bas de la place, le long de la rue la plus circulée. La valeur de Leq lue sur le sonomètre IdB est de 63 dBA. A la 11^{ème} minute commence la remontée sur la partie gauche de la place vers la terrasse du café. Une autre station de 3 minutes permet de mesurer un second niveau sonore équivalent de 58 dBA. La promenade se termine en haut de la place au pied de l'ascenseur à la 20^{ème} minute.

Les deux dernières minutes correspondent à l'enregistrement des cloches donnant midi depuis la place Poelaert. Cet élément a été choisi parce qu'il représente à nos yeux un des éléments typiques de l'ambiance sonore du centre de Bruxelles. Le nombre de cloches qui résonnent régulièrement y est assez important et nous semble un élément positif pour l'identification d'une ambiance bruxelloise.

En premier lieu, il est important de signaler que c'est la première promenade sonore où les résultats entre l'oreille gauche et l'oreille droite sont clairement différenciés. Ceci est un élément important car cela signifie que l'audition peut alors être utilisée pour se situer, ce qui participe largement à la création d'une sensation de confort.

Ces images acoustiques permettent de bien mettre en évidence les changements d'ambiances sonores lors des différents passages d'un lieu à un autre. En particulier, dans la descente le long de la rampe du palais de justice, on observe une diminution importante du niveau sonore. En effet, sur la place Poelaert, le niveau sonore du bruit de fond de la ville est important (lié au trafic du boulevard de la Toison d'or). Grâce à sa position en contrebas, le bas de la rampe profite d'une protection acoustique. On montre ici l'influence de la morphologie urbaine sur la qualité acoustique d'un site.

Sur la place de l'Epée les niveaux sonores augmentent légèrement tout en restant à des valeurs qui caractérisent un espace non saturé de bruit, laissant émerger les conversations par exemple, même dans la partie la plus basse qui jouxte une rue circulée. Le confort acoustique est assuré sur l'ensemble de la place et spécialement au niveau des terrasses. La différence importante entre les valeurs globales en Leq relevées au sonomètre à côté de la rue et sur la terrasse (5 dB(A)) sont confirmées par les résultats détaillés. A la hauteur de la terrasse du café située au centre de la place la zone est nettement plus calme qu'au point le plus bas.

Un petit détail est à souligner. A la 13^{ème} minute, la chute d'un couvert depuis la table d'une terrasse est nettement perceptible sur la voie de droite dans les fréquences aiguës. Ce petit incident est bien une preuve que la vie locale sur la place est perceptible au niveau acoustique.

Des mesures de niveaux sonores équivalents supplémentaires ont été réalisées avec un sonomètre d'autres jours pendant une durée de 10 minutes. Les mesures ont été réalisées le mercredi 11 juin, le jeudi 12 juin, le vendredi 13 juin et le samedi 14 juin 2003. Le tableau ci-dessous reprend les niveaux Leq mesurés en deux endroits de la place de l'Epée. Le point haut correspond à un banc situé dans la partie supérieure gauche de la place et le point bas au point le plus bruyant de l'espace : juste à côté de la rue la plus passante.

Lieux	Mercredi 18h	Jeu-di 18h	Vendredi 18h	Samedi 12h	Samedi 15h
<i>Epée : haut</i>	57	57	59	60	60
<i>Epée : bas</i>	63	62	64	64	61

Le point le plus haut est celui qui est vraiment représentatif de l'ambiance sonore de la place de l'Épée. Lors des mesures, j'ai noté que la place est toujours très appropriée et souvent traversée. Le trafic y est nettement moins important le week-end qu'en semaine. Si le niveau sonore augmente légèrement au point haut le samedi c'est par une augmentation de la fréquentation humaine des terrasses.

Cette première analyse des ambiances sonores de trois places à Bruxelles s'appuie sur des promenades sonores effectuées sur une période unique. Pour affiner ces résultats il faudrait procéder à des promenades additionnelles (périodes différentes dans la journée, dans la semaine et dans l'année) ainsi qu'à des mesures standardisées prises au niveau des façades de ces espaces publics sur une durée d'au moins une semaine. Cette première étude permet néanmoins de dégager le caractère marquant du paysage sonore de chacune des places analysées:

- pour la place du Grand Sablon : le bruit dû à la prégnance de la circulation,
- pour le Petit Sablon : l'identité sonore créée par la présence de la fontaine,
- pour la place de l'Épée : l'ambiance animée d'une place fréquentée avec la possibilité de percevoir une grande variété de sons et la protection acoustique assurée par la dénivellation de 20m entre la place Poelaert et la place de l'Épée.

Les **promenades le long des voies de circulation intense**, que sont la rue de la Régence et la rue Royale, n'ont pas été dépouillées en détail mais on peut toutefois en tirer déjà quelques conclusions de base.

Le long de la rue de la Régence, les niveaux sonores sont élevés. Le bruit des voitures, des bus et des trams sont les seuls éléments reconnaissables.

La promenade réalisée dans la rue Royale longe le parc de Bruxelles ; elle met en évidence le fait que le bruit du trafic couvre toutes les autres sollicitations sonores qui pourraient émerger si ce bruit de circulation continu était plus faible. Ainsi, les événements sonores typiques de la présence d'un parc (chant d'oiseaux, jeux d'enfants, bruissement du vent dans les arbres) pourraient qualifier l'identité du lieu traversé et inviter à s'y arrêter mais ils disparaissent eux aussi dans le trafic urbain. D'autre part, cette promenade supplémentaire permet de comparer l'ambiance sonore d'une rue ouverte (puisque'un des côtés est bordé par le parc) avec celle d'une rue en U équivalente (à savoir la rue de la Régence). La conclusion est évidente dans ce cas : la perception sonore qui devrait être différente entre les deux oreilles pour la rue ouverte est pourtant identique à cause de la prégnance du bruit engendré par les moyens de transport. Ainsi, la lisibilité de la morphologie urbaine est perdue au niveau auditif.

Ces promenades mettent en évidence le problème acoustique que constitue le trafic au-delà même des niveaux sonores élevés engendrés : le bruit de la circulation couvre toutes les autres sollicitations sonores qui pourraient émerger si ce bruit de fond continu était plus faible et uniformise donc l'ambiance sonore de tous les lieux qui y sont confrontés, quelques soient leur morphologie, leur aménagement et leur appropriation.

Dans les cas où le bruit du trafic ne peut pas être diminué, la présence d'une fontaine ou d'une différence de niveau entre la source de bruit principale et l'espace public ont été mis en valeur comme des solutions réalistes pour générer des ambiances acoustiques confortables sur des places urbaines. Il faut bien entendu que le débit de la fontaine et le bruit qu'elle génère soient suffisants pour masquer le bruit de fond. Par ailleurs, la création d'une dénivellation devrait avoir un sens dans le tissu urbain et topographique local au-delà de ses qualités acoustiques.

La participation à ces promenades sonores et leur interprétation confirment la validité et l'intérêt de la méthodologie que nous avons développée dans la partie 2 de cette thèse pour évaluer la qualité des ambiances sonores. Nous nous proposons donc d'analyser un espace public du point de vue acoustique en quatre étapes :

- inventorer les sources de bruit,
- évaluer quantitativement la pollution sonore locale (à l'aide de mesures réalisées selon les normes habituelles ou de simulations informatiques ou d'une consultation des cartes de bruit régionales lorsqu'elles existent) et comparer les niveaux sonores obtenus avec les valeurs limites du confort acoustique et de la santé des piétons,
- évaluer quantitativement la répartition en fréquence des sons dans l'espace considéré à l'aide de promenades sonores réalisées à des moments variés d'une journée et d'une semaine.
- évaluer le ressenti de la qualité sonore d'un espace par l'analyse du lieu public en fonction des critères qualitatifs du confort des ambiances développés dans la partie 2 de cette thèse.

6. Elaboration de règles de conception pour des ambiances microclimatiques et acoustiques de qualité

*« L'avenir, il ne suffit pas de le prévoir, mais de le rendre possible. »
Antoine de Saint-Exupéry.*

Ce huitième chapitre développe un ensemble de règles de conception pour des ambiances microclimatiques et acoustiques de qualité. Des exemples illustrent cette stratégie de conception des ambiances urbaines. Cette partie clôture notre recherche sur les ambiances urbaines.

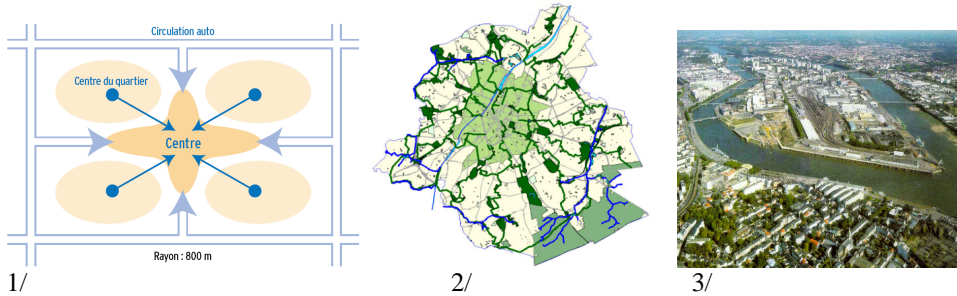
Les règles de bonne conception sont le seul type d'outil qui permet de guider la conception architecturale avant même qu'un premier schéma ne soit dessiné. Or au niveau du microclimat, les mesures de « restauration » qui portent sur des détails sont nettement moins efficaces que les mesures qui concernent la totalité du bâtiment ou la distribution des masses bâties. Les chapitre 3, 4 et 5 de cette thèse permettent de déterminer des premières règles de conception pour des ambiances microclimatiques et acoustiques de qualité.

L'urbanisme microclimatique s'accorde aux rythmes naturels en tirant le meilleur parti possible du climat pour assurer des ambiances confortables pour les piétons et limiter les consommations d'énergie des bâtiments. Une bonne utilisation des éléments climatiques et leur intégration harmonieuse aux différents niveaux de la conception procurent un microclimat favorable. Une conception urbanistique qui tient compte du microclimat favorise donc à la fois des espaces publics confortables et des bâtiments qui peuvent tirer profit du climat pour réduire leurs consommations d'énergie. Les formes urbaines anciennes couvraient en général ce savoir microclimatique: modulation de la hauteur des bâtiments, placettes, espaces de transition,.... Puisque les bâtiments ont une durée de vie importante (de plusieurs décennies à plusieurs siècles), les décisions prises au stade de la conception ont des effets à long terme sur l'équilibre énergétique et l'environnement.

Construire avec le climat a souvent pour conséquence de produire une architecture sensible, en accord avec son environnement, à l'échelle du site et de l'homme. **L'urbanisme microclimatique s'inscrit naturellement dans la stratégie du développement durable.**

Notre stratégie des ambiances urbaines est développée ci-dessous en un ensemble de principes d'intervention formant un canevas pour les actions futures. Nous allons définir des règles de conception urbaine aux deux niveaux d'action de la conception urbanistique. Le premier niveau est celui de la planification urbaine, où la conception est réalisée à l'échelle de la ville entière. Le deuxième niveau est la morphologie urbaine, où la conception est appliquée à un groupe de bâtiments et les espaces qui les séparent.

Les illustrations ci-dessous montrent un projet de conception, un projet de rénovation et un projet de reconstruction partielle au niveau de la planification urbaine.



- 1/ 1= Projet de conception d'une ville nouvelle : Louvain-la-Neuve, schéma simplifié.
- 2/ 2= Projet de gestion d'une ville existante : plan des maillages vert et bleu de la Région de Bruxelles-Capitale.(Plan : IBGE 2002).
- 3/ 3= Planification urbaine : création d'un nouveau quartier au cœur de la ville de Nantes.(Photo : Escudero 2004).

Les illustrations ci-dessous montrent un projet de conception, un projet de rénovation et un projet de reconstruction partielle au niveau de la morphologie urbaine.



- 1/ 1= Conception d'une place urbaine contemporaine : la place des Sciences à Louvain-la-Neuve. (Photo : S. Reiter).
- 2/ 2= Rénovation de la place d'armes à Namur. (Photo : J.-M. Gillon)
- 3/ 3=Inscription d'un bâtiment contemporain sur une place existante : hôtel de ville à Murcia.(Photo : El Croquis n°98, 1999)

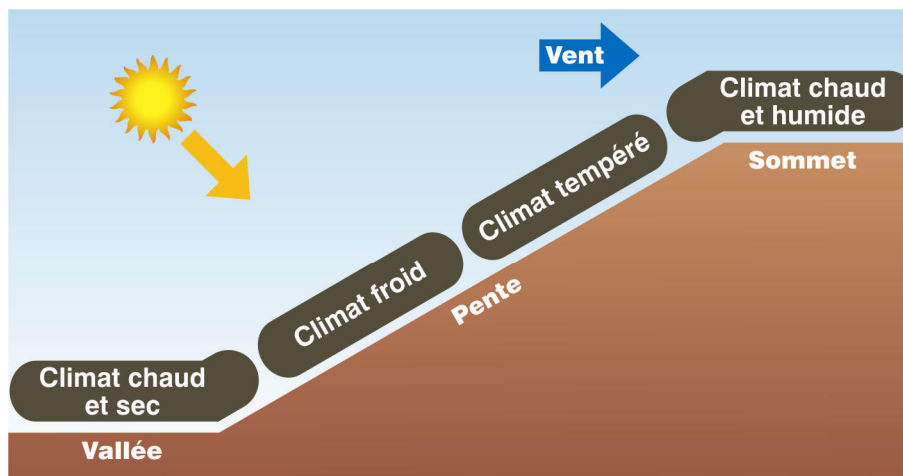
6.1 La planification urbaine

Au niveau de la planification urbaine, les quatre éléments de composition essentiels à cette échelle sont l'implantation du projet, la densité construite, les moyens de transport utilisés et la répartition des zones d'espaces verts.

Lors de la création d'un nouvel ensemble urbain, il y a lieu de choisir le terrain idéal d'un point de vue microclimatique dans le but d'offrir un bon confort aux piétons dans les espaces publics et de limiter les consommations d'énergie des bâtiments.

Il faut choisir la localisation privilégiée d'une zone bâtie en fonction du climat. Par exemple, sa position idéale par rapport à la topographie dépend de la zone climatique:

- en climat froid : l'idéal est une situation relativement basse sur une pente orientée au sud pour accroître le rayonnement solaire et être protégé du vent sans être refroidi par l'accumulation d'air froid dans la vallée.
- en climat tempéré : il faut se placer dans la partie moyenne à supérieure de la pente pour maximiser l'exposition au soleil et la possibilité d'une ventilation naturelle, tout en se protégeant des vents les plus forts.
- en climat chaud et aride : il faut se placer au pied d'une pente orientée vers l'est, pour profiter de l'air frais qui s'y accumule la nuit et limiter le rayonnement solaire durant l'après-midi.
- en climat chaud et humide : il faut se placer au sommet d'une pente pour profiter de la puissance maximale du vent à cet endroit ou sur la partie supérieure d'une pente orientée dans le sens des vents dominants ou éventuellement d'une pente orientée vers l'est pour diminuer l'ensoleillement d'après-midi tout en profitant tout de même du vent.



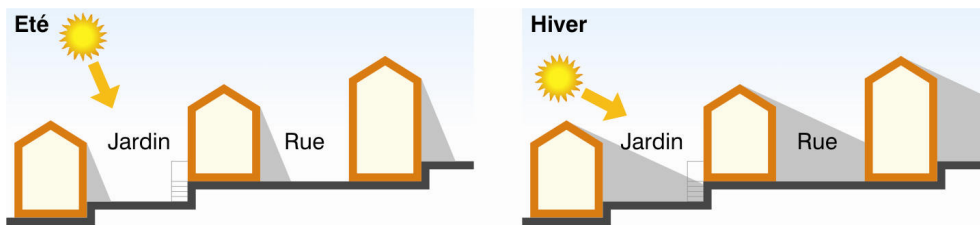
Position idéale d'une zone bâtie en fonction du climat

Ainsi, il est utile de choisir une topographie favorable du point de vue microclimatique pour y implanter un nouveau quartier ou une nouvelle ville. En Belgique, on placera de préférence les zones bâties suffisamment haut à flanc de colline pour bénéficier du soleil même en hiver.

L'éclairement d'un site en pente dépend de l'orientation et de l'inclinaison du terrain. Les pentes orientées vers l'est offrent de beaux levers de soleil et sa disparition rapide dans la soirée; les versants ouest montrent de superbes couchers mais un soleil qui se lève tard; le creux de la vallée reçoit une période d'ensoleillement direct plus courte que le sommet. Les pentes sud jouissent d'une meilleure insolation que les terrains plats. Il faut prendre en compte les caractéristiques naturelles du site et tirer profit du profil du terrain. Les bâtiments qui sont situés sur une pente orientée vers le sud peuvent être rapprochés les uns des autres par rapport à un terrain plat pour obtenir le même accès au soleil dans l'espace public. Inversement, une pente orientée au nord induit une perte d'ensoleillement surtout pour les latitudes élevées. Ainsi, les pentes fortes orientées vers le nord doivent à tout prix être évitées si on désire profiter de la lumière solaire dans les espaces publics.

Le « droit au soleil » soulève toujours la crainte au sujet du devenir des densités d'occupation du sol. Pourtant, le passé nous fournit des exemples de qualité de zones urbaines denses et bien conçues pour profiter d'un ensoleillement maximal. Dans l'urbanisme spontané, nous pouvons citer de nombreux villages du midi

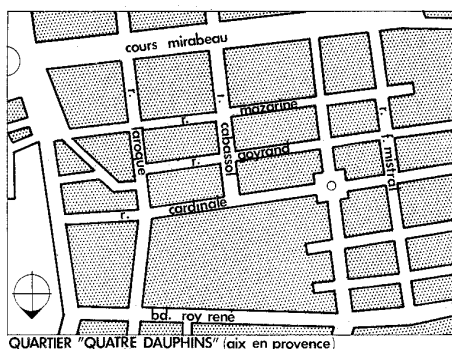
méditerranéen, de la Côte d'Azur au Roussillon, installés sur les versants sud des collines, permettant des prospects serrés tout en garantissant le droit au soleil de chacun, grâce à la propriété verticale des maisons. Cette verticalité autorisait la migration saisonnière. En été, les pièces inférieures restaient plus fraîches du fait de leur position et de la masse thermique des étages et du voisinage. En hiver, on pouvait bénéficier durant le jour des apports solaires aux étages supérieurs et se retirer dans les pièces inférieures mieux isolées la nuit, le seul point de chauffage étant situé au rez-de-chaussée. Certaines façades, côté jardin, pouvaient même être totalement ensoleillées en hiver, grâce à la pente du terrain.



(Izard & guyot 1979)

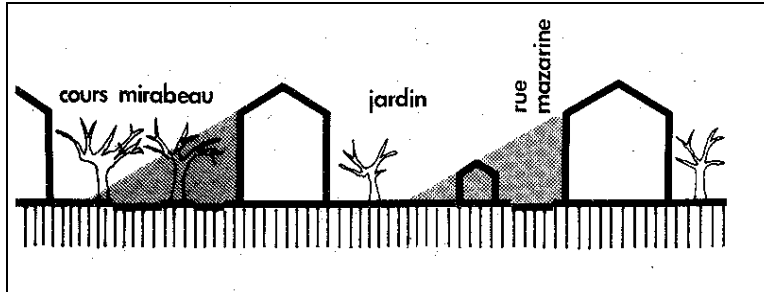
Dans les climats tempérés, les villages traditionnels sont majoritairement implantés sur le versant nord des collines afin de favoriser l'orientation principale face au sud. Les rues orientées nord-sud seront bordées par une succession de pignons de bâtiments dont les façades principales seront ouvertes transversalement vers le sud. Dans le cas des rues est-ouest, la coupe est souvent asymétrique : les façades nord sont alignées à la rue et profitent de l'ensoleillement par l'arrière alors que les façades sud prennent du recul par rapport à la rue. Les rues ont de nombreuses inflexions qu'on perçoit aujourd'hui comme pittoresques mais qui servaient à éviter que les rues ne se transforment en couloirs venteux. Les villages importants ont également une implantation générale qui cherche à se protéger des vents dominants. Une plus grande densité et le mitoyenneté constituent une protection supplémentaire au vent et limitent les déperditions de chaleur.

En urbanisme volontaire, on ne disposait généralement pas de sites dont la pente était aussi forte, aussi la sauvegarde du droit au soleil passait-elle par un traitement approprié des gabarits des bâtiments en fonction de l'orientation des voies. Un très bel ensemble est fourni par l'opération d'urbanisme que fut la création du quartier des Quatre Dauphins à Aix-en-Provence au 18^{ème} siècle. Il s'agit d'une extension de la ville au Sud du célèbre Cours Mirabeau, dont l'axe est orienté sensiblement est-ouest. Son concepteur serait Michel Mazarin, le frère du cardinal. Le plan ci-dessous présente le quartier des Quatre Dauphins à Aix-en-Provence.



(Izard & guyot 1979)

Les rues principales sont parallèles au Cours Mirabeau (rue Mazarine, rue Goyrand, rue Cardinale...). Les constructions situées sur leur côté Sud sont hautes et ont leur façade principale sur le côté jardin, au Sud. Du côté nord, on ne trouve que des constructions basses qui sont en fait des dépendances et qui sont plongées dans l'ombre, sans conséquence puisqu'en principe inoccupées. Le schéma ci-dessous montre la coupe du quartier des Quatre Dauphins à Aix-en-Provence.



(Izard & Guyot 1979)

Les rues qui les recoupent perpendiculairement (rue Laroque, Cabassol, F-Mistral...) ne sont en général pas bordées d'immeubles, à l'exception des façades pignons des immeubles déjà cités. Bien entendu, les jardins sont plantés d'arbres à feuilles caduques (des platanes en général). Les photos ci-dessous montrent des vues typiques des zones bordées de jardins.



(Photos : S. Reiter)

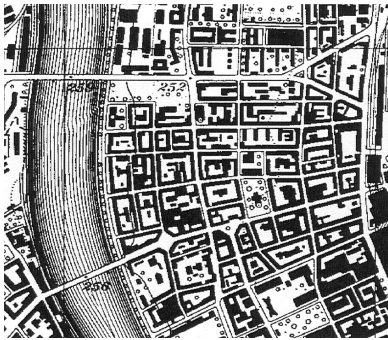
Lors du choix de l'emplacement de la ville de Louvain-la-Neuve, les données climatiques n'ont pas été prises en compte. Aussi non, le site aurait sans doute été écarté pour sa très forte exposition aux vents, ce qui explique que le lieu était vierge d'urbanisation et que même les cultures donnaient un mauvais rendement. Cependant, il faut admettre que globalement la ville est bien organisée pour se protéger des vents dominants et que la plupart des ruelles et places sont fort agréables à fréquenter grâce à l'effet de masque urbain.

Les choix urbanistiques de base influencent fortement la capacité des villes à disperser la pollution produite. Certaines villes, comme Mexico ou Athènes sont célèbres pour leurs taux de pollution : encaissées dans une dépression, à l'écart des grands vents, tous les sous-produits de l'activité humaine s'y accumulent en quantités dangereuses sous forme solide, liquide et gazeuse. Les enjeux liés à la santé et au confort des citoyens y deviennent aigus.

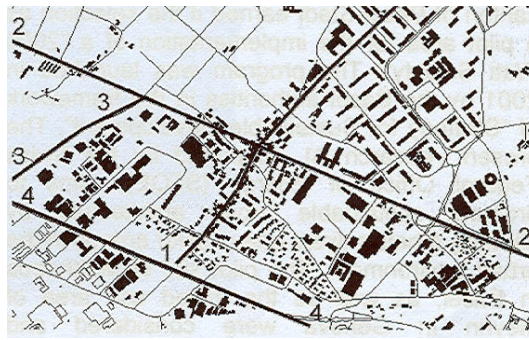
Les industries polluantes doivent toujours être placées sous le vent de la ville par rapport aux vents dominants, ainsi que toutes les infrastructures bruyantes telles que les aéroports, champ de courses automobiles, ...

Il est indispensable de concevoir des urbanisations suffisamment denses pour limiter la surconsommation d'espace et conserver des zones naturelles en dehors de nos villes. De plus une planification urbaine relativement dense est la configuration urbaine la plus favorable pour limiter les consommations d'énergie (bâtiments, transport,...)

Les deux plans ci-dessous représentent à gauche le quartier matthaeus de la ville de Bâle et à droite le quartier Meyrin de la ville de Genève, tous deux situés en Suisse.



Bâle : quartier Matthaeus
(Plans : Montavon & al. 2004).



Genève : quartier Meyrin

Les tableaux ci-dessous permettent de comparer l'utilisation du sol de ces deux quartiers (Montavon & al. 2004).

Quartier (ville)	Matthaeus (Bâle)	Meyrin (Genève)
Morphologie urbaine	Ilots urbains. Toits inclinés.	Barres et blocs isolés. Toits plats.
Hauteur moyenne des bâtiments	15m (Rez+4 étages)	30m (Rez + 10 étages)
Superficie du quartier	59 hectares	998 hectares
Nombre d'habitants	15 300 habitants	20 500 habitants
Densité de la population	259.1 hab./hectare	20.6 hab./hectare
Nombre d'habitants par logement	1.96	2.3
Surface habitable par personne	32 m ²	35m ²
Année de construction	66% avant 1945	70% après 1960

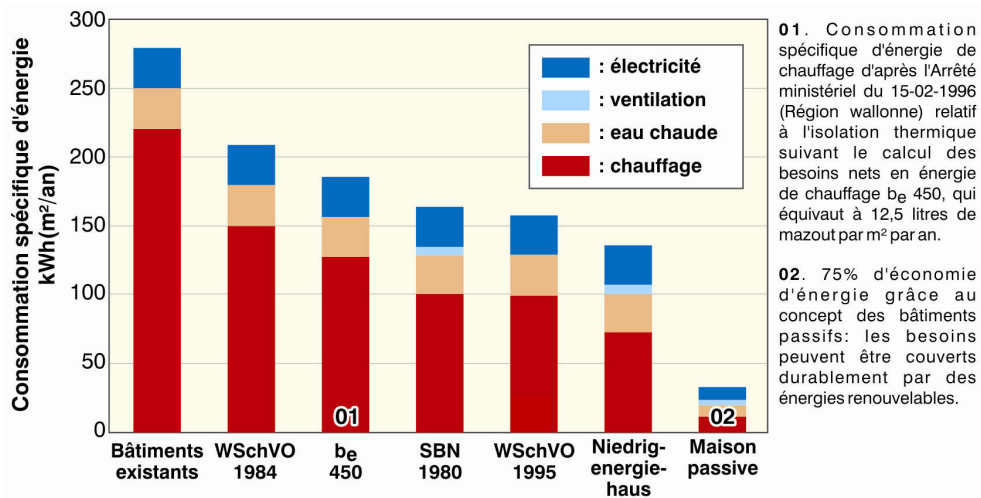
On voit donc que le quartier traditionnel construit à partir d'îlots urbains consomme dix fois moins d'espace que le quartier moderniste, alors que la surface habitable par personne est pratiquement la même. Considérons même que le quartier traditionnel de Bâle offre désormais une surface habitable par personne exactement équivalente au quartier Meyrin de Genève (35m²/habitant), la densité de la population serait encore de 236.89 habitants/hectare, ce qui correspond à 11.5 fois le nombre d'habitants par hectare de Meyrin pour une même surface habitable par habitant !

Tant que l'angle d'obstruction solaire moyen reste inférieur à 30°, la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel situé en ville est plus faible que celle d'un bâtiment isolé en site totalement dégagé. Par contre, si l'angle

d'obstruction solaire moyen dépasse les 30°, la consommation énergétique des bâtiments sera supérieure dans le cas urbain (Steeemers 2003). Pour des bâtiments en îlots de 10m de large, un angle d'obstruction de 30° correspond à une densité de l'ordre de 200 logements par hectare, pour une surface habitable de 125 m² par logement, ce qui est énorme.

En plus de limiter les consommations d'énergie des bâtiments, un tissu urbain dense favorise le potentiel d'utilisation des modes de transport écologique. En outre, une utilisation plus intense du territoire et un partage des infrastructures (énergie, eau, drainage, rues, bâtiments, transport public) réduit l'énergie associée à sa construction et à sa maintenance. Ainsi, il est préférable de favoriser la densification des friches urbaines, plutôt que de créer des lotissements en zone rurale. Le concept de constructions à haute densité horizontale présente des avantages réels au plan du confort des personnes et de la consommation d'énergie par habitant, tout en étant moins consommateur d'espace et d'un coût de réalisation moins élevé que les constructions en hauteur ou l'habitat dispersé. Au plan social, la construction basse de haute densité constitue un cadre physique favorable aux contacts informels, à la convivialité et à l'appropriation des espaces publics urbains.

Signalons également que les performances énergétiques du bâti s'améliorent régulièrement. Par conséquent, les infrastructures sont destinées à prendre une importance croissante dans le bilan environnemental global. A titre de comparaison, le graphe et le tableau suivant indiquent les consommations d'énergie [kWh] par m² et par an pour les bâtiments existants (non isolés), les bâtiments répondant aux exigences belges du K55 ou du Be 450 (1996) et pour le standard de la 'maison passive'.



Bâtiment non isolé	Bâtiment K55-Be450	Maison passive
250 kWh/m ² .an	150	25
25 l/m ² .an	15	2,5

Se concentrer sur la consommation des bâtiments à l'exclusion de leur construction et des infrastructures est donc du point de vue environnemental erroné à terme : les réseaux de desserte ne peuvent être négligés. La densité de l'habitat joue toujours un rôle de premier plan dans le bilan global d'une urbanisation.

La densité urbaine et son exploitation sont des critères importants dans l'évaluation des émissions polluantes en milieu urbain car ils influencent non seulement les consommations d'énergie des bâtiments (mitoyens,...) mais aussi celles dues au transport (opportunité d'utiliser des moyens de transport en commun, proximité des activités autour du domicile, ...). Ainsi, différentes études ont porté sur le rapport entre la densité de la population urbaine et les émissions de CO₂ dues au transport routier. Elles arrivent toutes à la même conclusion que la densité d'une ville est un facteur important de la réduction des consommations d'énergie. Ces études montrent aussi que la diminution des dépenses d'énergie par habitant grâce à l'augmentation de la densité est très rentable pour une densité équivalente aux centres urbains européens traditionnels mais qu'elle devient minime pour des densités telles que celles de Hong Kong qui créent par ailleurs de nombreux désagréments locaux et vraisemblablement des surconsommations au niveau des bâtiments.

Encourager la construction de nouveaux logements à haute efficacité énergétique en dehors des centres, par exemple, risque de favoriser la désurbanisation et donc, de générer un accroissement des déplacements en voiture vers les lieux d'emploi réduisant les effets durables attendus. C'est en fonction d'un bilan global intégrant les dimensions économiques, sociales, culturelles et environnementales que l'on doit opter pour tel ou tel ensemble de mesures urbanistiques.

Les études de la CPDT (2002) ont montré quels étaient les paramètres qui affectent le coût d'une désurbanisation latente. Parmi ceux-ci, la consommation d'espace par l'urbanisation peu structurée, la dédensification urbaine et la monofonctionnalité de certaines zones sont clairement pointées comme causes de coûts collectifs importants et d'impacts environnementaux négatifs.

De manière générale, pour limiter les consommations d'énergie d'un quartier, il est nécessaire de favoriser la densité du bâti et de densifier de préférence les zones situées près des infrastructures de transport en commun, d'assurer une concentration des activités humaines (habitat, travail, activités récréatives), de prévoir des transports en commun efficaces, d'offrir une abondance d'espaces publics confortables et de trajets continus pour valoriser l'utilisation de la marche et du vélo, de créer un microclimat urbain qui limite les besoins énergétiques de chauffage, d'éclairage et de refroidissement des bâtiments, tout en assurant le confort des habitants.

Une densité d'environ 100 personnes par hectare est recommandée en Grande Bretagne sur la base de:

- la densité nécessaire pour supporter un bon service de bus.
- la densité minimale viable pour un système de chauffage du district.
- la densité maximale pour un accès solaire abondant.

Par comparaison, signalons que la densité moyenne de Bruxelles, ville très verte mais assez compacte, est de 72.5 habitants par hectare.

Quand on parle de densifier notre habitat, il s'agit d'aller contre la tendance européenne actuelle à l'étalement des constructions à travers tout notre paysage. Pour combattre le phénomène de désurbanisation et le départ en périphérie non seulement des habitants mais aussi de nombreuses fonctions urbaines, entraînant une paupérisation du cadre bâti et des populations résidentes au cœur des villes, il faut envisager :

- de stabiliser la présence de la fonction résidentielle dans les parties les plus centrales et les plus denses de la ville,
- de densifier l'habitat dans les périphéries les plus proches (parcelles inoccupées, intérieurs d'îlots surdimensionnés,...), les espaces urbains abandonnés (friches urbaines, sites d'activité économique désaffectés, ...) et autour des connections de lignes de transport en commun.
- de concevoir des espaces publics de qualité tant à l'échelle de la ville qu'à celle du quartier.

Il est judicieux d'être attentif à la présence dans chaque quartier de diverses activités ouvertes au public et créatrices d'animation, y compris en soirée. Pour construire une urbanité, il est indispensable de développer la coexistence des groupes sociaux, des cultures, des langages, des religions, des âges et des activités. La diversité recherchée peut être favorisée par une diversité de la forme urbaine : mixité du type de logements proposés (par exemple entre petits collectifs et maisons individuelles accolées), formes architecturales variées (traitement coloré des façades, variété des matériaux utilisés...), ... Ces éléments ont une implication directe sur la mixité des fonctions, l'équilibre emploi-habitat et la mixité sociale et générationnelle des habitants.

Il est important de souligner qu'en Belgique les contraintes imposées aux promoteurs pour un aménagement du territoire durable sont encore trop timides.... Des incitations politiques et financières doivent être adoptées, par exemple pour limiter l'aménagement de terrains vierges. Voici quelques actions à mener d'urgence dans le but de réaliser un aménagement urbain durable:

- afficher et définir une politique forte de développement durable dans les documents d'urbanisme ou à travers des procédures volontaires de type Agenda 21.
- privilégier la reconversion des friches urbaines à la création de quartiers neufs sur des espaces agricoles ou naturels ;
- planifier les infrastructures de transport, d'équipements et de services dès le démarrage du projet.

Il est également important de prévoir des transports en commun efficaces ainsi que d'offrir une abondance d'espaces publics de rencontre et de trajets continus pour valoriser l'utilisation de la marche et du vélo. Signalons encore que si des mesures drastiques de diminution des voitures étaient réellement appliquées dans nos villes nous pourrions redessiner nos espaces publics totalement différemment. Nos petits trottoirs et nos pistes cyclables en bord de route pourraient retrouver des dimensions convenables.



(Photo : S. Reiter).

Les mesures suivantes sont importantes pour favoriser une politique de valorisation des modes de transport plus écologiques que la voiture individuelle :

- la planification et le développement, très en amont du projet d'urbanisation, des transports publics. Les arrêts devraient être distants de 300 et 700 mètres maximum des commerces et des services.
- la création de sites propres ou de rues réservées aux transports publics.
- la réduction du nombre de places de stationnement de voitures dans les quartiers.
- la limitation de la vitesse de circulation automobile à l'intérieur des quartiers.
- la création d'axes piétons et de pistes cyclables, agréables et bien éclairés, reliant les différents quartiers et zones urbanisées.
- l'aménagement de nombreux parkings pour vélos.

Pour favoriser le confort en ville, il est indispensable d'offrir un grand nombre d'espaces publics de rencontre. Il faut fournir des surfaces d'espaces verts suffisantes et une bonne répartition de ces zones végétales à travers le milieu urbain. La Commission Européenne suggère d'utiliser comme indicateur de la qualité de l'environnement urbain la distance de 15 minutes de marche ou moins de toute habitation à un espace vert. A Bruxelles, Copenhague et Glasgow, l'ensemble des citoyens peuvent accéder à un espace vert en 15 minutes. Dans beaucoup de villes européennes ce critère est toutefois loin d'être atteint (Barton & Tsourou 2000).

Prendre en compte les critères sociaux est indispensable pour tout aménagement urbain durable et cela passe notamment par une distribution équitable des services et des zones de détente ainsi qu'un accès à tous les lieux publics offerts à l'ensemble des citoyens. La qualité de l'expérience urbaine offerte est un élément social extrêmement important. De manière plus précise, tenir compte du contexte social, c'est chercher à identifier et à valoriser les préférences, les habitudes, les références culturelles des différents utilisateurs potentiels de l'espace, afin de favoriser les éléments qui vont dans le sens d'une plus grande appropriation de l'espace par les différentes populations habitant notre pays. D'autre part, les activités et lieux offerts devraient être pensés pour favoriser à la fois le bien-être individuel, la possibilité de se rencontrer ou de se réunir entre amis, familles,... ainsi que de se sentir appartenir à une communauté. Pour cela, il faut par exemple offrir des espaces de détente mais aussi des espaces de contact (barbecue, plaines de jeux,...) et des lieux de fête ainsi qu'une plus grande participation des habitants à l'aménagement de leur territoire.

Une des raisons de la faiblesse du dynamisme collectif urbain et du contrôle social se trouve dans la médiocre participation des habitants des villes modernes surtout des grandes villes à la vie publique urbaine. La recherche de la durabilité exige une conscience plus profonde de notre responsabilité collective vis-à-vis de la Terre et des générations futures. Chaque homme est citoyen du monde, habitant d'une même planète et membre de la communauté humaine. Toutes les couches de la société doivent donc avoir leur mot à dire dans les décisions concernant les besoins du développement durable et les mesures à prendre pour l'atteindre. La sensibilisation doit aller de pair avec le renforcement de la participation. Lors de la conception ou de la rénovation de quartiers, il est judicieux de mettre en place des lieux d'échanges et de diffusion de l'information sur différentes thématiques liées au développement durable.

Les espaces publics urbains remplissent également différentes fonctions écologiques étroitement liées aux questions de gestion des ressources naturelles, dont la maîtrise des eaux pluviales, l'augmentation de la diversité biologique et la purification de l'air. Ces différentes fonctions devraient être visibles dans les espaces collectifs.

Des promenades peuvent servir de liens entre lotissements, villages, ou zones urbaines et zones rurales. Ainsi, ces allées vertes peuvent à la fois servir de parcours pour une mobilité écologique et de corridors naturels de biodiversité ou de lieux où certains éco-systèmes spécifiques peuvent être implantés. Les anciennes voies de chemin de fer ou autres infrastructures linéaires qui ne sont plus utilisées peuvent être avantageusement transformées en promenades pour piétons, cyclistes, rollers, cavaliers,... aussi bien en ville qu'en dehors de la ville.

Pour agir avec efficacité en faveur de la biodiversité, il est important d'établir une planification concernant directement le développement de la biodiversité en milieu urbain mais aussi d'intégrer cette problématique dans les plans de développement de la ville et autres plans d'urbanisme.

Les réseaux de chauffage par quartier doivent être encouragés dans les nouveaux projets urbains car ils permettent d'inclure différentes sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie provenant de la biomasse, l'énergie éolienne ou l'énergie provenant d'installations solaires thermiques à grande échelle. Evidemment, les réseaux de chauffage urbain sont à conseiller uniquement pour des morphologies denses. Les meilleurs exemples de réalisations actuelles proviennent d'Europe du Nord. En matière de réseau de froid, Lund, en Suède, possède un réseau de climatisation développé à partir de pompes à chaleur géothermales exploitant les différentiels de température entre l'air ambiant et la mer baltique. Concernant les réseaux de chaleur, on peut citer la ville suédoise de Kungälv qui profite d'un réseau couplé à la plus grande chaufferie solaire de l'Union européenne. La photo ci-dessous montre les 10 000 m² de capteurs solaires thermiques qui alimentent le réseau de chaleur de Kungälv.



(Liébard & al. 2004).

Ainsi, à l'échelle de la planification urbaine, une collectivité peut faire des choix de conception qui influenceront fortement le bien-être de ses habitants et l'impact environnemental de cette urbanisation.

6.2 La morphologie urbaine

Les objectifs de conception de la morphologie urbaine pour le confort des piétons sont de :

- limiter les sources de pollution (air, eau, sol, bruit).
 - Limiter la circulation automobile
 - ...
- Générer un environnement confortable du point de vue physiologique par l'évaluation des différents paramètres physiques et leur adaptation éventuelle si nécessaire. Par exemple :
 - Créer des places et des promenades exposées au soleil en hiver mais partiellement ombragées en été,
 - Protéger les espaces publics des vents froids et dominants,
 - Eviter de concevoir des bâtiments élevés,
 - Assurer la ventilation des espaces publics,
 - ...
- Favoriser l'adaptation psychologique des piétons, grâce à :
 - la globalité de la sensation de confort,
 - l'identification d'une ambiance,
 - la relation au contexte,
 - la continuité des conditions environnementales,
 - la diversité des ambiances (qui comprend la nécessité de créer une variété d'ambiances à proximité ainsi que plusieurs choix d'ambiances sur une même place),
 - la perception du contrôle possible,
 - la capacité de s'adapter,
 - la naturalité du lieu (qui est aussi marquée par le besoin de stimulations environnementales en milieu urbain),
 - la variabilité des conditions environnementales,
 - le caractère signifiant du lieu.

Pour limiter les consommations d'énergie d'un bâtiment, la réflexion énergétique, envisagée dès le choix du lieu d'implantation, s'attachera à réduire toutes les sources de consommation. Citons quelques stratégies importantes :

- diminuer l'énergie liée aux transports effectués par les utilisateurs du bâtiment.
- diminuer l'énergie liée au chauffage, au refroidissement et à l'éclairage du bâtiment. La conception des bâtiments et des espaces publics doit
 - maximiser les gains solaires en hiver.
 - minimiser les pertes de chaleur en période de chauffe.
 - offrir la possibilité de refroidir le bâtiment grâce à la ventilation naturelle.
 - offrir la potentialité d'un éclairage naturel du bâtiment conçu et des bâtiments environnants.
- valoriser les ressources locales.
- favoriser les énergies renouvelables.

Tout développement urbain devrait tenter de réduire l'intensité de trafic automobile. Pour ce faire, les nouveaux bâtiments doivent être localisés autour ou proche des noeuds de transport public et être conçus autour d'un réseau de routes piétonnes qui encouragent la marche à pied et les cyclistes par une réduction des distances entre les services principaux. Les implantations en site urbain sont à favoriser en préférence (friches urbaines,...).

C'est au niveau de la morphologie urbaine, que les enjeux microclimatiques sont les plus importants. Les éléments de conception essentiels sont la hauteur des édifices, l'espacement entre les bâtiments, l'homogénéité ou la variabilité des tailles et des hauteurs des coupes, l'orientation des rues et des places, la distribution des espaces verts. Le choix des types de matériaux de surface, la présence de surfaces d'eau et de végétation sont également des éléments à analyser.

Voici quelques règles simples pour assurer le confort des piétons dans les espaces publics en fonction de l'ensoleillement:

- les bâtiments plus élevés sont placés du côté nord du site, pour tenir compte de l'effet d'ombrage.
- des hauteurs plus faibles sont conservées du côté sud.
- la création des places présente une orientation préférentielle vers le sud.
- l'ensoleillement est favorisé sur les places en hiver mais un ombrage est au moins partiellement accessible en été. L'utilisation d'arbres à feuilles caduques est un moyen privilégié pour le confort des piétons.

La largeur et l'orientation des rues d'une ville ont une influence sur les disponibilités qu'elle offre du point de vue climatique. Il est parfois possible de profiter de la topographie pour assurer un meilleur accès au soleil de tous les bâtiments.

Dans les climats froids et tempérés, les espaces ouverts devraient généralement être :

- assez larges pour permettre un accès au soleil dans les espaces publics.
- orienter les bâtiments pour qu'ils puissent profiter au maximum des gains solaires en hiver. Ainsi, une orientation E-O des rues est toujours idéale. Ceci dit, même lorsque la rue est d'orientation N-S, il est possible de donner une orientation des maisons vers le sud à condition de créer des décrochements ou de bénéficier du relief. Quand les rues sont orientées au NW-SE ou au NE-SW, l'accès au soleil peut être amélioré en créant un angle entre la rue et la façade.

Pour un bon ensoleillement des façades afin de profiter des gains solaires, on peut prendre les règles suivantes :

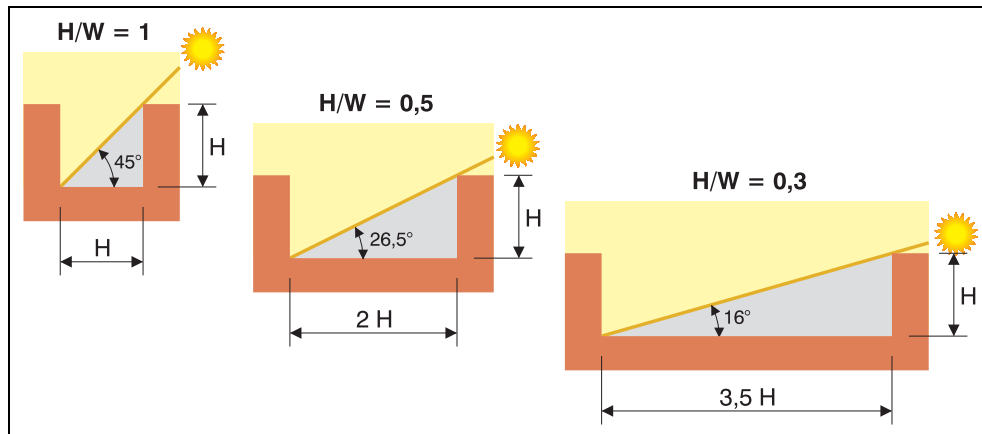
- pour une latitude supérieure à 50°N, une surface sud doit être ensoleillée à midi pour les 21 janvier et le 21 novembre, ce qui correspond approximativement à un angle d'obstruction maximal égal à « 70° - latitude du site ».
- pour une latitude comprise entre 46.5°N et 50°N, un angle d'obstruction maximal de 20° peut être choisi.
- pour une latitude inférieure à 46.5°N, une surface sud doit être ensoleillée à midi pour le 21 décembre, ce qui correspond approximativement à un angle d'obstruction maximal égal à « 66.5° - latitude du site ».

En Belgique, cela nous conduit à limiter les angles d'obstructions verticaux à 19.2° pour les orientations allant du sud-est au sud-ouest. Pour un bâtiment situé dans un tissu dense, on peut toutefois conseiller de mesurer l'angle d'obstruction vertical à partir de 2m de haut plutôt qu'à partir du sol.

Si l'angle d'obstruction à l'ensoleillement reste inférieur à la valeur de référence pour l'ensemble de l'angle allant du sud-est au sud-ouest, une conception solaire passive du bâtiment est vraiment conseillée. Lorsque l'ensemble de la zone sud-est-

sud-ouest est coupée de l'ensoleillée au-delà des limites fixées, la création d'une architecture qui prenne en compte les gains solaires est à abandonner ou bien il faut changer de site. Entre les deux, une étude plus poussée est nécessaire pour évaluer les gains solaires disponibles.

En général en Belgique, il est souhaitable que les angles d'obstruction des bâtiments ne dépassent pas 25° pour l'angle vertical, soit $H/W \leq 0.5$ sur la zone angulaire allant du sud-est au sud-ouest. Mais il serait idéal d'avoir au moins une distance entre bâtiments égale à la hauteur solaire le 21 décembre afin de permettre au soleil d'hiver d'éclairer les bâtiments ; cet angle vaut 15.8° à Uccle et correspond au rapport $H/W=0.3$. De plus, vu qu'en Belgique le ciel est souvent couvert, il est judicieux de choisir des surfaces de sol qui soient plutôt claires pour augmenter les réflexions lumineuses. De même au niveau des façades, les surfaces exposées au sud, devraient présenter des coefficients de réflexion plus élevés pour renvoyer la lumière vers l'espace public et les bâtiments d'en face. Il faut toutefois éviter les surfaces très réfléchissantes (miroir,...) au sud car elles peuvent causer de l'éblouissement.



Nous pouvons donc conclure que l'accès au soleil est un critère critique au niveau de l'urbanisme en Belgique.

Pour correspondre aux préférences des utilisateurs des espaces publics, le potentiel d'ensoleillement direct d'un espace public devrait couvrir entre 20% et 80% de sa surface totale quelle que soit l'heure ou la saison. Et il faudrait favoriser les zones où le ciel occupe une plus grande partie du champ visuel que les bâtiments environnants. En première approximation, ces zones correspondent aux parties de l'espace pour lesquelles le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de l'espace reste inférieur à $1/2$ (c'est-à-dire $H/W < 0.5$).

Bien sûr, il est fondamental d'étudier les zones d'ombre et d'ensoleillement sur une place avant de l'aménager. Par exemple la position d'une terrasse de café sur l'espace public peut dépendre de la position du soleil.

Evidemment, les centre-villes historiques nécessitent souvent des niveaux d'obstruction solaire supérieurs pour conserver une homogénéité de hauteur entre les édifices et s'inscrire dans le contexte construit local. Dans ce cas, les exigences d'éclairage naturel et d'ensoleillement doivent être étudiées avec précaution. Parfois, la limitation de l'éclairage naturel disponible peut être compensée par des plus larges fenêtres, des matériaux et couleurs réfléchissantes et une profondeur de

bâtiments réduite. Dans certains cas, une conception solaire passive ne pourra être appliquée qu'aux étages supérieurs.

Par ciel couvert, l'orientation de l'espace public n'a pas d'influence sur son ambiance lumineuse. C'est uniquement l'angle de vue du ciel qui définit la possibilité de pénétration du rayonnement solaire diffus et donc la disponibilité sous ciel couvert de la lumière naturelle. Une rue dont la hauteur est faible sera toujours mieux éclairée au niveau du sol qu'une rue de même largeur mais dont les bâtiments sont plus élevés. Notons que dans le cas de bâtiments présentant un retrait au niveau des étages supérieurs, le facteur de vue du ciel est fortement augmenté. En Belgique, il est fortement conseillé d'adopter une forme évasée dès que la hauteur des bâtiments atteint le double de la largeur de la rue.

Notons que pour des espaces publics étroits, la lumière qui atteint les niveaux supérieurs des bâtiments est plus importante que celle qui pénètre jusqu'au sol. Vu que le facteur de réflexion des murs est normalement supérieur à celui des vitrages, l'augmentation de la surface des murs dans la partie supérieure des bâtiments améliore la luminosité de l'ensemble de la rue et accroît la lumière disponible aux étages inférieurs de ces bâtiments. Adapter la taille des ouvertures à l'étage auquel elles appartiennent est donc également un élément essentiel de l'efficacité de la de distribution lumineuse en ville. Ainsi, nous recommandons que les surfaces vitrées des étages supérieurs soient plus petites que celles des étages inférieurs.

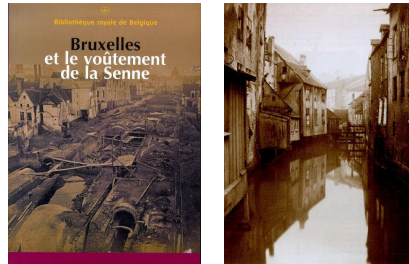
Les plantes à feuilles caduques apportent une protection solaire naturellement variable. En été, le feuillage fournit un ombrage; en hiver, la chute des feuilles fait profiter les bâtiments des apports gratuits du soleil. En général, on recherchera des essences à feuilles caduques qui présentent peu de branchage pour avoir un ombrage minimum en hiver mais avec un feuillage dense en été. Les arbres à feuilles caduques sont un très bon système de protection solaire pour les orientations est et sud-est ainsi que pour les orientations ouest et sud-ouest. En effet, pour ces orientations, le soleil est bas en début de matinée et en fin d'après-midi.

Aménager ou ré-aménager les centres d'îlots urbains peut aussi être une solution pour favoriser le confort des habitants et les consommations d'énergie du bâti. En effet, l'intérieur des îlots fortement construits comprennent parfois des annexes ou même des bâtiments complets. Dans certains cas, dans les climats où la saison de chauffe prédomine, retirer les constructions sous-utilisées ou délabrées d'un îlot urbain permet de réaménager son centre de façon à pouvoir bénéficier de l'accès au soleil et d'une meilleure privacité à l'intérieur des habitations ainsi que d'un espace suffisant pour implanter une zone verte. Cette zone verte peut soit être privée, soit être semi-publique (c'est-à-dire qu'elle profite à l'ensemble des habitants de l'îlot) ou encore être publique (c'est-à-dire qu'elle s'ouvre sur l'extérieur et profite donc à l'ensemble des citoyens passants par là).

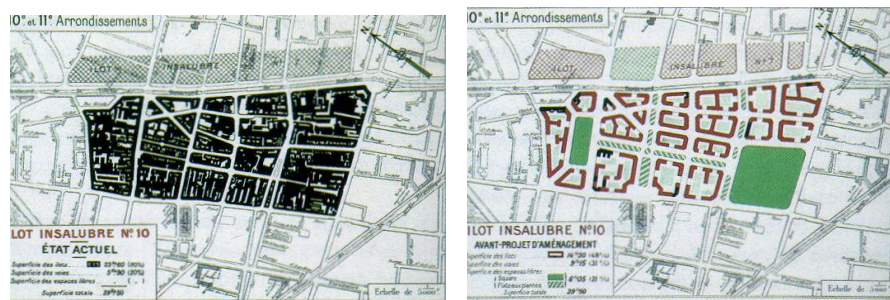
L'urbanisme hygiéniste a consisté au 19^{ème} siècle à étudier la question de l'air, de la lumière et de l'eau dans nos villes hyper denses. Les grandes villes ont procédé progressivement à l'assainissement de leur tissu par plusieurs types d'actions urbaines (Deprez 2003-b) :

- la création de zones aérées et de parcs en pleine ville, comme Central Park (1857).
- la rectification ou le voûtement des cours d'eau qui avaient précédemment permis le développement des quartiers d'activités artisanales, mais

provoquaient inondations ou épidémies (Bruxelles, couverture de la Senne en 1867).



- des campagnes de travaux visant à dédensifier la ville ancienne, devenue insalubre et à lui rendre un peu d'air frais. Citons par exemple l'Haussmanisation, le curetage et la réhabilitation de nombreux îlots insalubres à Paris. Ci-dessous, les plans d'une opération de salubrité publique d'un ensemble d'îlots surdensifiés dans le 10^{ème} arrondissement de Paris (1900).



Opérations de salubrité publique en 1900 dans le 10^{ème} arrondissement de Paris (Deprez 2003).

La transformation d'îlots urbains existants est toutefois une action délicate qui demande d'en étudier soigneusement les différents aspects et de prendre en compte le point de vue des différents acteurs concernés. Les contextes physique (topographie, microclimat, orientation,...), construit (type de bâtiments, ...) et humain (réseaux sociaux,...) sont à prendre en considération pour élaborer la solution la plus appropriée à un site spécifique. Il est recommandé de concevoir les modifications les plus faibles du tissu urbain qui génèrent des changements efficaces, afin de respecter l'environnement existant.

Dans les climats chauds, il faut favoriser le refroidissement naturel des espaces publics. Pour des rues dont le rapport H/W est inférieur à 0,3, la ventilation est bonne mais l'ombrage est faible. Par contre, pour un rapport H/W élevé, la ventilation est mauvaise mais l'ombrage est nettement amélioré : des zones d'air stagnant peuvent se créer qui seront plus froides en été que l'air ambiant mais qui risquent d'être polluées s'il y a du trafic. Les rues N-S sont les moins exposées au soleil. Pour un maillage orthogonal, des rues orientées NW-SE et NE-SW offrent un ombrage moyen sur l'ensemble du réseau de rues.

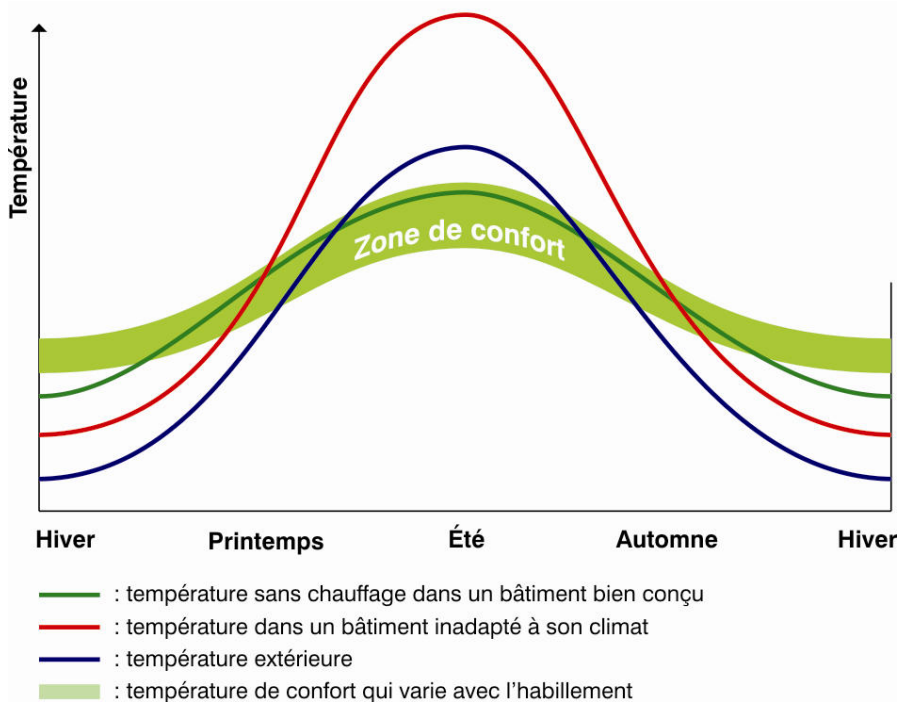
Dans les climats chauds, l'orientation E-O doit être évitée ou bien le rapport H/W doit être très élevé pour cette orientation. Ainsi, pour une rue E-O, l'ombrage est assuré à Rome si le rapport H/W vaut 3,5 et à Athènes s'il vaut 4.... L'orientation des rues la plus bénéfique pour les pays chauds est donc l'orientation N-S. Cependant, comme les villes sont généralement constituées de rues environ perpendiculaires, un maillage orienté NE-SW/SE-NW offre une pénétration du soleil nettement inférieure à un maillage E-O/N-S. Un exemple pratique confirme cette étude théorique : le quartier de Santa Cruz à Séville, qui offre un microclimat

spécialement agréable dans cette ville où la chaleur est souvent un problème, a été conçu selon une grille NE-SW/SE-NW et des rues étroites et profondes (Littlefair & al. 2000).

Pour les climats chauds et secs, des rues étroites sont à conseiller pour conserver un ombrage et ainsi limiter les surchauffes dues au rayonnement solaire direct et au rayonnement réémis par les surfaces construites. Ensuite, il est intéressant de chercher à rafraîchir les espaces publics en augmentant le taux d'humidité dans l'air (bassins, tours à vent avec humidificateur, végétation,...). Des rues plus larges doivent toutefois être utilisées s'il y a un risque de pollution. Dans ce cas, des systèmes de protections solaires peuvent être introduits au niveau de l'aménagement urbain, soit au niveau du sol (arbres, arcades, ...) soit en toiture (voiles mobiles,...). Il faut aussi stopper les vents chauds et les vents qui apportent la poussière, le sable,...

Dans ces climats chauds et humides, il est essentiel de limiter le rayonnement solaire direct et d'augmenter la ventilation naturelle des espaces publics urbains. Ainsi, il est préférable d'élargir fortement les canyons pour ventiler l'espace urbain tout en ajoutant des protections solaires aux bâtiments pour créer un ombrage des façades et des piétons.

Essayer de créer des microclimats urbains proches de la zone de confort pour les piétons permet de limiter fortement les dépenses énergétiques des bâtiments car ce sont aussi les températures qui demandent le moins d'énergie pour chauffer ou refroidir l'intérieur des bâtiments. Un bâtiment inadapté à son climat a tendance à surchauffer en saison chaude et à être glacial en saison froide. Un rattrapage technologique coûteux est nécessaire pour assurer le confort dans ces bâtiments, qui consomment alors de grandes quantités d'énergie pour assurer un confort parfois juste acceptable. Le graphe ci-dessous montre que, pour assurer le même niveau de confort intérieur, un bâtiment mal adapté à son climat consommera donc nettement plus d'énergie qu'un bâtiment inséré dans un contexte microclimatique favorable et conçu pour en profiter.



Une différence de quelques degrés peut suffire à faire franchir un « seuil de confort ». Des études empiriques montrent qu'il est possible, en climat tempéré, de gagner 5 à 7.5% du coût de l'énergie nécessaire pour chauffer les bâtiments pour 1°C d'augmentation de la température moyenne (Oke 1988). Enfin, la réduction de l'écart entre les températures intérieures et extérieures est considérée comme un élément du confort psychologique des personnes.

La température extérieure est un facteur climatique essentiel pour la détermination des besoins en énergie d'un bâtiment. L'évaluation de la demande en énergie des bâtiments nécessite en effet la prise en compte de l'écart de température entre l'ambiance intérieure et l'extérieur. Les éléments suivants aident à limiter fortement les pertes de chaleur en période de chauffe, ce qui est un critère de conception essentiel en climat tempéré:

- la densité du bâti et la concentration des activités. L'îlot de chaleur est bénéfique pour notre climat au niveau des consommations d'énergie des bâtiments : si la température extérieure est plus chaude, la différence de température int/ext est plus faible, en période de chauffe, ce qui réduit les pertes de chaleur à la fois par conduction et ventilation/infiltration.
- la protection par rapport aux vents dominants, grâce à l'effet de masque urbain, à une meilleure étanchéité des bâtiments, à la réduction des surfaces exposées au vent ou à l'installation d'écrans extérieurs (bâtiments ou murs de grande longueur, végétation, brise-vents, etc).
- l'utilisation de la compacité du bâti, c'est-à-dire réduire le rapport entre surfaces et volumes pour créer des bâtiments compacts. Des maisons individuelles consomment jusqu'au double d'énergie au m² que des appartements dans un immeuble multifamilial.
- éviter les sites situés au sommet des collines ou au fond des vallées ; la zone intermédiaire est la plus bénéfique.

Ainsi, une habitation en ville dépense nettement moins d'énergie en hiver qu'une habitation en zone rurale grâce à une combinaison de la réduction de l'exposition au vent, de l'augmentation de la température due à l'effet d'îlot de chaleur et de l'augmentation de la compacité du bâtiment grâce à la mitoyenneté.

En climat froid, les zones urbanisées de manière dense sont indispensables pour profiter un maximum de la chaleur apportée par les autres bâtiments et les activités humaines. En revanche, l'effet d'îlot de chaleur est négatif pour les climats chauds et en périodes de surchauffes pour les autres climats.

Une conception adaptée de la ville permet de diminuer ou d'augmenter cet effet d'îlot de chaleur en fonction du résultat désiré. Ainsi, une conception microclimatique précise d'un quartier urbain dans les pays chauds peut contrebalancer l'effet d'îlot de chaleur et même générer un effet d'oasis, c'est-à-dire de fraîcheur par rapport à la température de l'air en dehors de la ville. C'est le cas du quartier Santa Cruz à Séville qui présente des températures moyennes de l'air en journée de 4 à 8°C inférieures à celles mesurées au niveau de l'aéroport de la ville. Cet effet d'îlot de fraîcheur est créé par la conception urbanistique de ce quartier traditionnel : rues très étroites (ombragées toute la journée), matériaux à fortes inertie, couleurs claires.

Pour conserver un minimum d'effet d'îlot de chaleur urbain et donc limiter les consommations de chauffage des bâtiments tout en élargissant la période de confort dans les espaces publics urbains en Belgique, nous devrions concevoir une morphologie urbaine dont le rapport H/W ne descend pas en-dessous de 0.4 (Oke 1988).

Pour les bâtiments en climat tempéré, les bénéfices énergétiques fournis par un accroissement de la densité grâce à une diminution des pertes de chaleur s'équilibrent à un moment avec les pertes énergétiques dues à la densification qui induit une diminution de la disponibilité de l'éclairage naturel, de la ventilation naturelle et des gains solaires. Le paramètre de la densité plus élevée est toutefois le facteur de conception primordial car il est davantage bénéfique à l'environnement que l'utilisation des gains solaires : les consommations d'énergie liées au transport y seront réduites ainsi que les consommations d'espace et de ressources en paysages naturels. Toutefois, certaines formes de bâtiments favorisent l'utilisation des éléments naturels par rapport à d'autres. Citons par exemple le fait d'avoir une profondeur de bâtiment assez faible pour pouvoir créer une ventilation transversale.

Une manière d'augmenter la densité construite et l'efficacité énergétique simultanément consiste à augmenter la compacité du tissu urbain tout en conservant une profondeur de bâtiments faible (de l'ordre de 10 à 12m), avec une orientation solaire appropriée des façades.

Les bâtiments résidentiels et les bâtiments de bureaux ont des comportements très différents en rapport au climat. Les habitations ont des besoins de chauffage qui dépassent toujours sur l'ensemble de l'année les besoins de refroidissement, même pour le sud de l'Europe. Par contre, la situation s'inverse pour les bureaux. Même en Belgique, les bâtiments de bureaux demandent plus d'énergie pour leur refroidissement que pour leur chauffage. Ce résultat est sans doute valable pour d'autres bâtiments non-domestiques de grande taille tels que les supermarchés et bâtiments industriels. (Littlefair & al. 2000)

Avec la méthode LT déterminée par Baker et Steemers pour déterminer les implications énergétiques des bâtiments (Baker & Steemers 2000), un immeuble de bureau ventilé naturellement consomme trois fois moins qu'un immeuble de bureau refroidi par air conditionné lorsque sa profondeur est de 12m. Lorsque la largeur du bâtiment passe de 12 à 24m, les consommations d'énergie du bâtiment ventilé naturellement doublent alors que les consommations d'énergie du bâtiment refroidi à l'aide d'un système à air conditionné augmentent seulement de 20% (Steemers 2003). On peut donc tirer deux conclusions importantes :

- pour favoriser l'efficacité énergétique d'un bâtiment ventilé naturellement, il est important que sa largeur soit la plus étroite possible (idéalement aux environs de 12m de large).
- pour un immeuble de bureau de 24m de large, un bâtiment ventilé naturellement consommera encore 1.8 fois moins qu'un bâtiment refroidi à l'aide d'un système d'air conditionné et ce rapport augmentera jusqu'à 3 pour une largeur du bâtiment de 12m au lieu de 24m.

Les zones d'un édifice qui peuvent être éclairées et ventilées naturellement sont appelées « passives ». En général, en se basant sur des données empiriques, toutes les parties de bâtiments situées à une distance égale ou inférieure à 6m d'une façade (ou plus exactement au double de la hauteur du local) sont considérées comme passives alors que les zones situées à plus de 6m d'une façade du bâtiment sont considérées comme n'étant pas passives (Ratti & al. 2005). On retrouve donc une largeur maximale de 12m pour une utilisation passive du rayonnement solaire et de la ventilation naturelle. La proportion de surfaces passives par rapport aux surfaces totales du bâtiment présente une estimation du potentiel d'utilisation des techniques passives de limitation de la consommation d'énergie des bâtiments. Il faut toutefois rappeler qu'il s'agit seulement d'un potentiel qui peut être exploité

ou non en fonction des choix de l'architecte en matière de conception du bâtiment et de choix des systèmes (% de surfaces vitrées, protections solaires, HVAC, ...) ainsi que des usages des occupants.

Au niveau des vents, une densité urbaine moyenne permet d'arrêter les vents froids en créant un effet de masque tout en permettant la ventilation naturelle des bâtiments. La facilité avec laquelle une ventilation traversante peut s'installer en climat tempéré, même en ville, a été confirmée par des simulations numériques et des tests in situ en Belgique et à Athènes (van Moeseke & al. 2005 ; Niachou & al. 2005). Vu ce constat et le rôle non négligeable du vent sur l'augmentation des déperditions par infiltration, nous en concluons qu'il n'est pas utile sous notre climat de rechercher à tout pris les implantations les plus venteuses, d'autant plus que la ventilation naturelle des bâtiments peut fonctionner même sans vent par effet thermique. Ainsi, une implantation des bâtiments en zone urbaine réduit de manière évidente les déperditions par infiltrations sans compromettre l'utilisation du refroidissement naturel.

Si l'on veut accroître les possibilités de refroidissement naturel des bâtiments, l'orientation du vent devrait de préférence être oblique (30° à 60°) par rapport à leurs façades principales pour favoriser leur ventilation naturelle. En revanche, les infiltrations sont maximales pour un vent à 45° par rapport au bâtiment. Il y a donc un conflit d'intérêt entre la limitation des infiltrations et le refroidissement à l'aide de la ventilation naturelle des bâtiments. Pour des bâtiments isolés, il est donc important de veiller à ce qu'ils soient bien étanches si on les place à 45° des vents dominants; parfois, il sera même nécessaire d'implanter de la végétation pour ralentir la vitesse du vent. En revanche, dans un milieu urbain relativement dense, nous recommandons de favoriser la ventilation naturelle vu que le tissu urbain sert déjà de protection au vent et ralentit sa vitesse moyenne. Ainsi, des rues orientées est-ouest pour permettre le meilleur ensoleillement sont également bénéfiques pour la ventilation en Belgique puisque le vent dominant vient du Sud-Ouest. La possibilité d'utiliser une ventilation naturelle à la place de l'air conditionné n'est possible que pour un environnement qui n'est pas trop bruyant ou trop pollué. C'est ainsi que la diminution de l'utilisation des voitures peut avoir une importance significative sur l'énergie utilisée dans les bâtiments.

Dans les pays froids, il est possible de réduire l'humidification des façades par le contrôle du vent car limiter la vitesse du vent réduit également les projections de pluies fortes ou de neige sur les façades. Ainsi, dans ce cas, le contrôle du vent a un double effet thermique : celui de limiter les pertes de chaleur dues aux infiltrations d'air ainsi que limiter l'accroissement de la transmission thermique des murs due à leur humidification. Dans les climats froids ou en périphérie d'une urbanisation située en climat tempéré ou en bordure de mer, une organisation des îlots en quinconce réduit la vitesse du vent avec efficacité.

Les règles de conception de la morphologie urbaine pour limiter les consommations d'énergie des bâtiments dans un climat tempéré peuvent être synthétisées comme suit :

- Maximiser les gains solaires en période de chauffe
 - Limiter les obstructions des bâtiments, surtout entre le SE et le SO.
 - Maximiser les façades d'exposition au sud, tout en ne limitant pas l'accès au soleil des autres.
 - Favoriser l'orientation des rues le long de l'axe E-O.
 - Offrir une bonne accessibilité possible à la lumière naturelle (SVF)

- Minimiser les pertes de chaleur en période de chauffe :
 - Profiter de l'îlot de chaleur généré par la densité urbaine.
 - Favoriser la compacité des bâtiments (mitoyens).
- Rendre possible le refroidissement naturel :
 - Favoriser les brises d'été,
 - Limiter la circulation automobile,
 - ...

Tous les bâtiments du quartier écologique Vauban (Fribourg-en-Brisgau, Allemagne) devaient répondre au moins aux exigences du label Habitat à Basse Energie, correspondant à une consommation de chauffage maximale de 65 kWh/m²/an, soit l'équivalent de 6,5 litres de fioul/m² de surface utile. La ville de Fribourg a également planifié des espaces en bandes prévus spécifiquement pour les maisons répondant au label d'Habitat passif. L'orientation principale des bâtiments y est nord/sud et les habitations sont libres d'ombres portées, afin d'optimiser les apports énergétiques solaires en hiver. Ces maisons sont pensées pour ne pas dépasser une consommation de 15 kWh/m²/an. Ces logements utilisent les énergies renouvelables pour leur chauffage. Les façades sud sont très vitrées alors que les façades nord présentent des ouvertures minimales. Une usine de cogénération construite par la ville de Fribourg, alimentée à 80% par des copeaux de bois et à 20% par du gaz naturel, dessert en chaleur l'ensemble des logements du quartier Vauban, à l'exception des maisons passives.



Façade nord (IMBE 2005)



Façade sud (IMBE 2005)

Les maisons « actives » ou « positives » produisent, quant à elles, plus d'énergie qu'elles n'en consomment, grâce à des capteurs photovoltaïques.



Maisons « Plus energy » à Fribourg (architecte : Rolf Disch ; photos : IMBE 2005)

Dans les climats chauds, la stratégie inverse est nécessaire. La conception urbaine devrait permettre de réduire l'effet d'îlot de chaleur, générer des poches de fraîcheur.

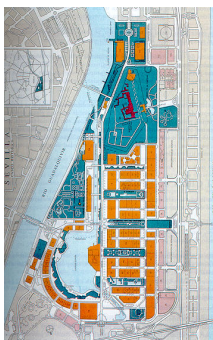
Les facteurs suivants sont donc à prendre en considération :

- une localisation proche de réservoirs de fraîcheur comme la mer, les lacs, les forêts et les parcs, de préférence sous le vent de ceux-ci,
- des zones piétonnes ou à faible trafic,
- ombrager les zones ensoleillées en été grâce aux arbres et bâtiments,
- utiliser des matériaux à forte capacité thermique,
- utiliser des surfaces à haute albédo pour réfléchir le rayonnement.

Les deux méthodes les moins coûteuses pour réduire l'effet d'îlot de chaleur sont d'augmenter la végétation dans les villes et d'utiliser des revêtements de façades de couleur claire plutôt que des matériaux sombres. La végétation joue un double rôle, celui d'ombrage et celui de réduire la chaleur de l'air par évapotranspiration.

Dans les pays chauds et secs, il faut favoriser l'ombrage des espaces publics et le refroidissement par évaporation. Une étude réalisée dans la ville de Fès compare un quartier traditionnel du tissu urbain très dense de la médina (tracé des rues irrégulier et $H/W = 7$ à 10) et d'autre part, un quartier relativement nouveau à faible occupation du sol (rues régulières et $H/W = 0.5$ à 0.7). Les températures par journées claires dans le quartier traditionnel sont jusqu'à 10°C plus basses que dans un quartier moderne et ceci aussi bien en été qu'en hiver, parce qu'il limite la pénétration du rayonnement solaire dans les espaces publics. Par contre, la nuit, le quartier traditionnel reste toujours plus chaud que le quartier moderne. Les températures des parois restent très stables et proches de la température de l'air pour les bâtiments de la médina traditionnelle alors que les températures superficielles varient fortement dans le quartier moderne entre le jour et la nuit. Cette étude démontre qu'un tissu urbain plus dense que celui prévu actuellement est en général nécessaire dans les pays chauds et secs pour améliorer le confort d'été en milieu urbain. Les simulations effectuées pour compléter les mesures effectuées sur le terrain suggèrent que le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur des rues doit être au moins de 2 ($H/W \geq 2$). Vu qu'en hiver, les canyons plus larges accueillent davantage le rayonnement solaire, cette étude propose de prévoir des canyons ayant un rapport H/W se situant entre 0.7 et 2 ; les rues les plus larges étant bordées d'arbres et les constructions munies d'arcades pour ombrager le sol et protéger les piétons du soleil en été tout en profitant de l'ensoleillement en hiver (Grundström & al. 2003). Dans les climats à fortes variations entre le jour et la nuit, un facteur de vue du ciel relativement étroit diminue cet écart généralement très inconfortable.

L'expo de Séville en 1992 regroupe 100 pavillons internationaux couvrant une superficie de 50 hectares, dont les $\frac{3}{4}$ sont des espaces extérieurs. Globalement le site de l'exposition universelle, qui a eu lieu en 1992 à Séville, profite des brises fraîches générées par le fleuve. Un lac artificiel a été aménagé en fonction des vents dominants pour tempérer la sécheresse de l'air. Sur 170 ha d'espaces publics, 30 ont été aménagés en jardins et 35 km de voiries ont été plantés d'arbres. L'eau a été utilisée par des fontaines, des murs d'eau, des jets, des cascades et des bassins.



Plan de l'expo'92 à Séville (Grupo de Termotecnia 1994).

Les espaces de détente, pour le repos, la restauration ou l'information entre deux visites, ont été étudiés du point de vue microclimatique et présentent différents dispositifs pour améliorer le confort. Les stratégies de contrôle du microclimat utilisées comprennent: la végétation, l'ombrage, la ventilation naturelle, l'évaporation de l'eau, l'inertie thermique du sol, des systèmes de dissipation de la chaleur et des systèmes de filtration de l'air.

Du point de vue du rayonnement solaire, l'objectif le plus important est de créer un ombrage sur l'ensemble de la zone de l'exposition utilisée en journée pour se reposer. Mais la température de surface inférieure de l'ombrage est également un élément important pour éviter que les personnes soient soumises au rayonnement de cette surface surchauffée. Ainsi, plusieurs solutions ont été mises en évidence (Grupo de Termotecnia 1994):

- des couvertures végétales car les plantes absorbent une grande partie de l'énergie solaire mais qu'elles l'utilisent dans leur processus de transpiration, ce qui maintient leur température de surface au niveau de la température ambiante.

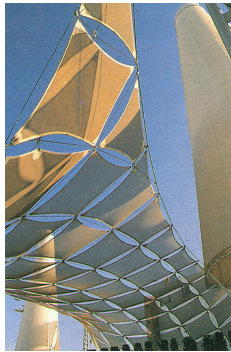


(Grupo de Termotecnia 1994).



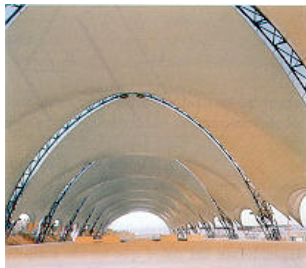
(Grupo de Termotecnia 1994).

- des couvertures dont la forme est étudiée de manière aérodynamique pour que l'air évacue la chaleur de cette surface par convection.



(Grupo de Termotecnia 1994).

- des couvertures doubles, permettant une aération entre les deux surfaces. La température de la surface inférieure de l'ombrage reste alors à la température de l'ambiance.

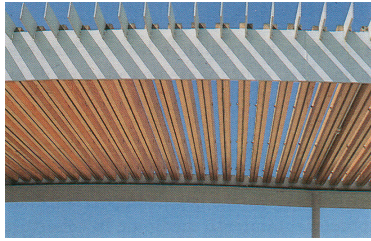


(Grupo de Termotecnia 1994).



(Grupo de Termotecnia 1994).

- des couvertures formées de lamelles multiples, laissant passer l'air entre chacune d'entre elles et permettant de voir le ciel à travers l'ombrage. A Séville, la température inférieure de ce type de couverture était environ égale à la température ambiante +2°C.



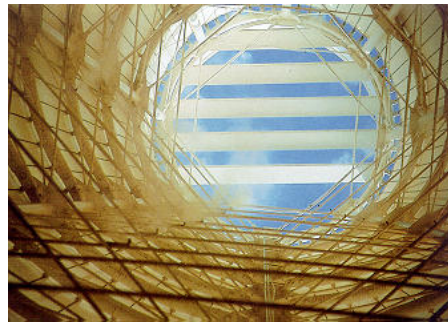
(Grupo de Termotecnia 1994).

D'autres dispositifs sont également utiles. Ainsi, par exemple, sur le site de l'expo'92, l'avenue de l'eau est une allée qui utilise la présence de bassins et de fontaines pour le confort thermique des visiteurs. La température de surface de l'eau étant faible par rapport au corps humain, les surfaces d'eau refroidissent les personnes par rayonnement. Quant l'eau est en mouvement, sa température demeure encore plus basse que si elle est immobile dans un bassin. De plus, la présence de jets d'eau humidifie et refroidit l'air qui passe au-dessus du bassin et diminue la température de la zone de détente qui le jouxte.



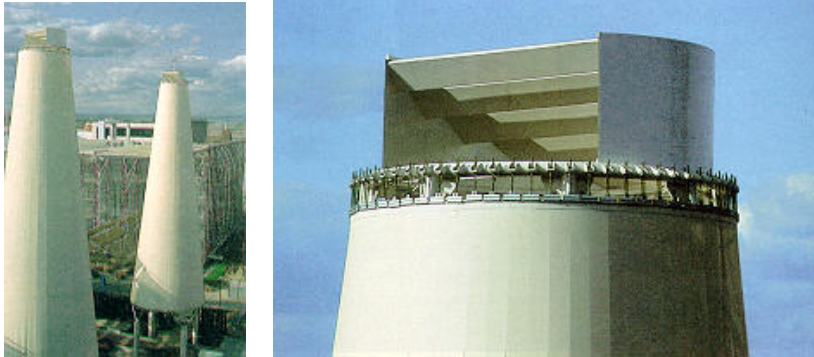
(Grupo de Termotecnia 1994).

Dans l'expo de Séville, l'avenue de l'Europe est un espace de détente, de 300m de long et de 80m de large au sein du quel se trouve un jardin de 40m de large sur toute la longueur. Cet espace public est à citer pour son microclimat, travaillé à partir de ses bassins, des toits parasols et d'un élément spécifique : la conception de 12 tours réfrigérantes. De forme conique, ces tours de 30m de haut sont habillées d'un textile blanc réfléchissant le rayonnement solaire. La base est ouverte sur une hauteur de 5m. Le diamètre de ces tours varie de 8m pour la base à 3m pour le cercle supérieur de la tour. Le jardin est entouré d'une enceinte de 2.5m de haut dont les 12 tours marquent les 12 portes.



Tours de refroidissement naturel. (Photos : Grupo de Termotecnia 1994).

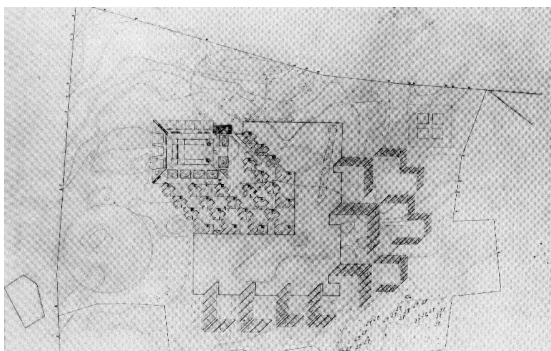
Dans les tours de refroidissement, des vaporisateurs projettent de l'eau « brumisée » sous la forme de micro-gouttes afin d'augmenter la surface d'évaporation et ainsi d'accroître fortement l'efficacité du refroidissement de l'air. L'air entre au sommet, se rafraîchit par l'évaporation de l'eau brumisée à l'intérieur, puis l'air frais descend, chargé d'humidité, sur l'espace public.



Tour de refroidissement. Capteur d'air au sommet des tours
(Photos : Grupo de Termotecnia 1994).

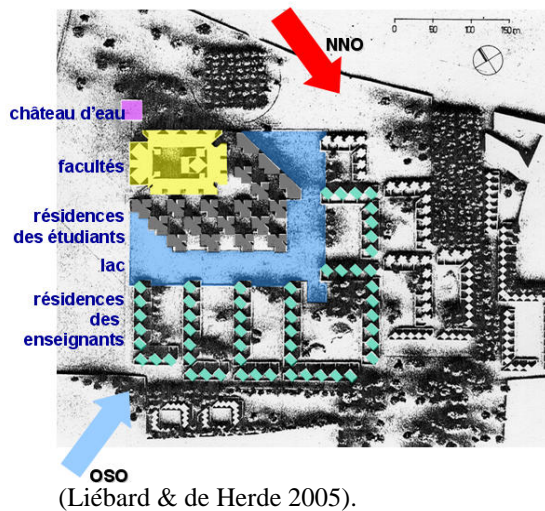
Une conclusion importante est que pour ce type d'application, il est indispensable que le volume d'air à traiter soit bien délimité. Un espace peu confiné implique une grande entrée d'air extérieur, ce qui limite l'efficacité des systèmes de refroidissement naturel. Il est également recommandé de placer les systèmes de refroidissement de l'air ou d'humidification en tenant compte de la direction des vents dominants.

Dans les pays chauds et humides, il faut favoriser la ventilation des espaces publics, alliée à l'ombrage de ceux-ci. Un bel exemple d'urbanisme microclimatique en climat chaud et humide est la cité universitaire que L. Kahn a conçue à Ahmedabad, en Inde. Il s'agit de l'Institut indien de Gestion, dont le plan d'ensemble comprend non seulement les bâtiments facultaires mais aussi des résidences d'étudiants et des logements pour les enseignants. La recherche de l'air est primordiale pour rafraîchir les locaux. A travers l'orientation du plan masse de l'Indian Institute of Management, l'attention de l'architecte s'est portée sur le travail de l'ombrage, par de larges enfilades de portiques et le travail de l'aération. L'architecte Louis Kahn explique que « *Les maisons des enseignants sont tournées vers le vent ; tous les murs sont parallèles à sa direction. Ils se mettent en épi par rapport à une cour pour l'enclorre et se conformer à la rigueur exigée par l'orientation. (...) L'orientation par rapport au vent et l'ombrage ont fourni les éléments architecturaux de la composition (...) Il faut sans arrêt considérer l'orientation comme une qualité dont les gens ont désespérément besoin. C'est cela qui est à la base de ces formes diagonales.* »



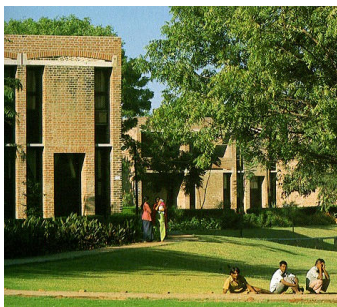
Croquis de L. Kahn à la fin de l'année 1963. (Plan : Deprez 2003).

L'orientation définitive du projet s'est établie progressivement en tenant compte de la direction des vents. L'axe de l'ensemble de la cité universitaire se réfère aux vents d'été (rafraîchissants : ouest/ sud-ouest) et aux vents d'hiver (froids : nord/nord-ouest). La figure ci-dessous en donne le plan masse.



Les résidences des étudiants forment au nord un bloc compact qui garantit un meilleur ombrage des cours. En hiver, le vent souffle parallèlement à la diagonale (N/N-O) des dortoirs sans s'engouffrer dans les enfilades de portiques : leur alignement faisant office de protection mutuelle. En été, le vent (O/S-O) rafraîchit les portiques et les escaliers communs en s'engouffrant entre les deux ailes de chambres. Les arcs tendus au ras du plafond des salles communes des dortoirs assurent leur ventilation haute. Les résidences des enseignants font face au vent d'été et lui sont ouvertes de part en part. Le plan des logements, ouvert et traversant, permet une meilleure ventilation naturelle. Par contre, les longs côtés sont complètement fermés au vent d'hiver. Les arcs tendus en pied de terrasse permettent la ventilation de celle-ci et son utilisation traditionnelle comme lieu de repos nocturne en été. Le lac, séparant les résidences d'étudiants des logements académiques, agit comme tampon thermique.

La cité universitaire d'Ahmedabad conçue par L. Kahn est donc un exemple magnifique d'un urbanisme contemporain qui intègre totalement le microclimat dans les principes fondateurs de son architecture. Il s'agit d'un ensemble urbanistique qui profite réellement des éléments bénéfiques d'un climat difficile tout en se protégeant de ses contraintes. La photo ci-dessous illustre les bâtiments orientés au nord-est (vent dominant). La façade est très épaisse afin de réduire l'insolation sur les vitrages. Les arcades ouvertes au niveau du toit-terrasse créent une ventilation naturelle pour déstocker la chaleur accumulée la journée et permettre aux occupants d'y dormir la nuit à l'air libre.

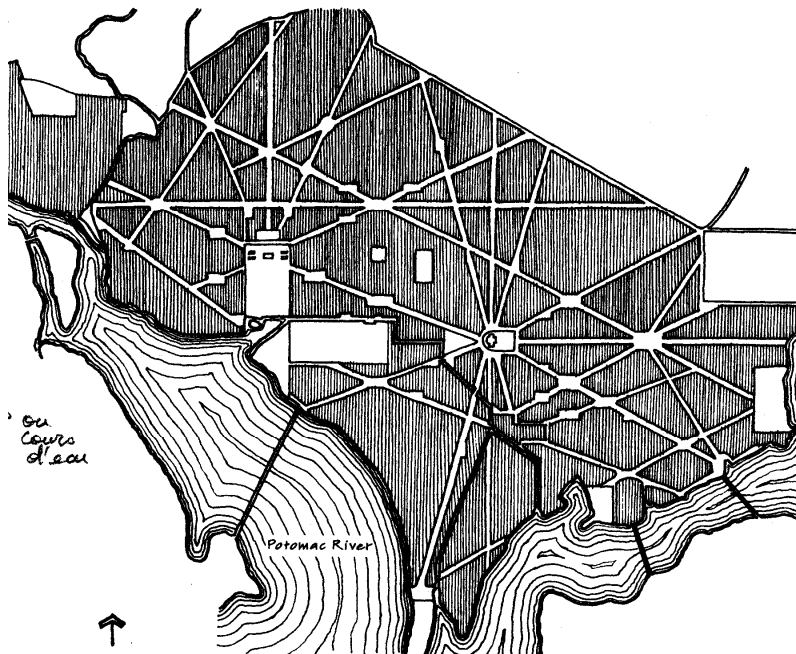


Logements à Ahmedabad. Architecte : Louis I. Kahn. (Deprez 2003)

Comme règle simplifiée, on peut estimer que des larges avenues arborées et des parcs linéaires ouverts de 100m de largeur ou davantage sont utiles pour refroidir les villes pendant les nuits sans vent. Si en plus on oriente certains de ces corridors de ventilation parallèlement aux vents dominants, on canalise le vent vers le centre urbain dense. Une stratégie pour ventiler les villes est donc celle de créer des corridors de ventilation radialement connectés à des espaces ouverts de refroidissement de l'air tels que parcs ou cours d'eau. L'effet d'îlot de chaleur, actif surtout la nuit, cause une distribution du vent centripète allant des zones de faible densité aux zones de forte densité. Deux éléments de conception sont nécessaires :

- une surface importante non urbanisée, de préférence une surface végétale ou une surface d'eau, à l'extérieur de la zone à ventiler afin de servir de source de refroidissement.
- des corridors larges pour fournir un passage à l'air provenant des zones moins denses vers les zones les plus denses. Cela suppose donc des voies vertes ou de larges boulevards organisés de manière à converger vers un ou plusieurs centres.

Le plan de Washington DC, dessiné par Pierre L'Enfant en 1791, peut servir d'exemple à un urbanisme bien ventilé grâce à ses larges avenues axiales allant des bords de la ville vers son centre. Dans ce cas, les avenues se rejoignent en différentes places considérées comme des centres de développement pour la ville. De plus, le vent d'été à Washington vient du sud et entre donc dans la ville en passant au-dessus de l'importante surface d'eau que constitue la rivière Potomac (Brown & DeKay 2001).



Plan Washington DC (Brown & DeKay 2001).

En milieu urbain, des espaces ouverts d'au moins 200m de long sur 200m de large, permettent au vent de retrouver la vitesse qu'il aurait sans les obstacles construits.

Dans des régions où la topographie est significative, on peut également utiliser cette caractéristique locale pour bien ventiler une urbanisation. En effet, les courants d'air générés par la gravité y sont souvent significatifs pendant les nuits sans vent. L'air froid, plus dense, descend vers le fond des vallées, comme le ferait

l'eau. Pour utiliser ce principe en zone urbaine, il faut placer des zones végétales non urbanisées sur les pentes les plus élevées comme source de refroidissement à partir de laquelle des coulées d'air froid vont descendre vers les zones urbanisées en aval. Pour bien distribuer le potentiel de cette source froide, il faut créer des corridors à partir de cette zone végétale vers les quartiers urbains denses. La ville de Stuttgart en Allemagne, située dans une vallée peu ventée, est implantée de manière à profiter des brises générées par la topographie. Un système de larges corridors ouverts dirige l'air refroidi vers les centres denses ; leur largeur est généralement d'au moins 100m. Ces corridors relient les zones rurales ainsi que des zones de parcs sur les flancs de collines aux zones urbaines. Les constructions sur ces pentes végétales et dans les corridors verts sont régulées strictement. A l'intérieur de la ville, des parcs sont connectés à ces canalisations d'air frais, fournissant des sources locales de refroidissement pour les quartiers (Brown & DeKay 2001). Ces corridors de ventilation offrent en plus un tracé privilégié pour des allées piétonnes et des pistes cyclables.

Même si on a dit que la température de l'air en ville est généralement homogène par quartier morphologique, il est possible d'avoir des poches de surchauffes ou de fraîcheur dans les endroits dits confinés, c'est-à-dire dans les lieux où l'échange entre l'air de ce site et l'air extérieur est réduit. L'aspect confiné d'un lieu dépend surtout de son rapport H/W ainsi que de la position des ouvertures de l'espace par rapport au vent. Ainsi, les pergolas ou des plantations dont le feuillage couvre la presque totalité de l'espace d'une cour ou d'une place relativement confinée servent de séparation entre l'air au-dessus et en dessous de son feuillage. Cette séparation permet de conserver la fraîcheur à l'intérieur d'un espace urbain. Des auvents peuvent également jouer ce rôle de séparateur de l'air pour favoriser un microclimat spécifique.

Pour augmenter localement la température de l'air d'un site confiné, il faut :

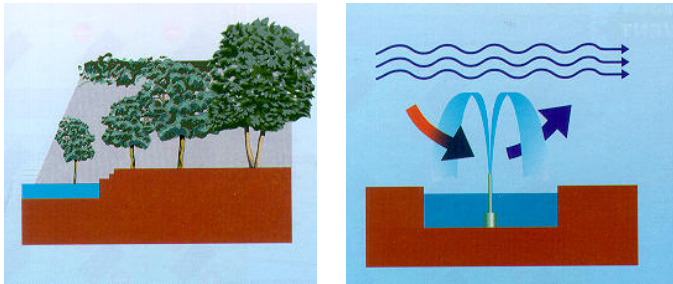
- optimiser l'exposition solaire du site (ouverture privilégiée du sud-est au sud-ouest).
- fournir des protections contre le vent pour écarter les vents froids des espaces publics et des bâtiments.
- utiliser des matériaux à forte inertie (béton, maçonnerie) et de couleur foncée sur les surfaces situées du sud-est au sud-ouest.
- utiliser des matériaux à capacité thermique et à albédo faible (par exemple du bois) pour le mobilier urbain et les zones de sol appropriables par les utilisateurs de l'espace, car ils conservent une sensation de chaleur au toucher même lorsque les températures sont relativement basses.

Pour diminuer localement la température de l'air d'un site confiné, il faut :

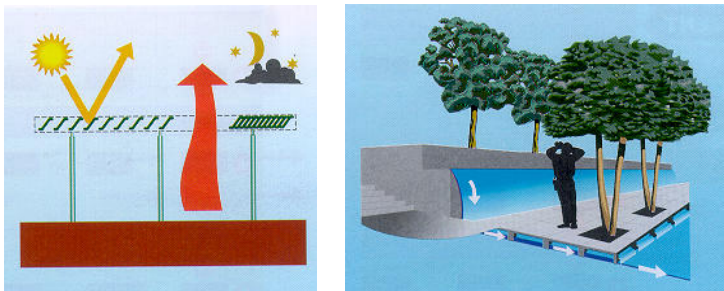
- ombrager les surfaces,
- utiliser une couverture végétale extensive. La température de surface de la végétation reste basse grâce au processus d'évapotranspiration.
- ventiler l'espace public,
- favoriser le refroidissement par évaporation (fontaines, bassin, végétation,...).
- utiliser des matériaux dont la capacité thermique est forte (maçonnerie, béton,...) et l'albédo élevé (couleurs très claires) pour les surfaces ensoleillées.

L'inertie d'un bassin d'eau dépend directement de sa masse et donc de sa profondeur. En revanche, l'évaporation dépend de la surface de contact entre l'eau et l'air. C'est la raison pour laquelle les jets d'eau, fontaines, cascades, etc produisent une baisse importante de température car ils induisent des gouttes dont le diamètre n'est que de quelques millimètres. Lorsqu'on utilise des pulvérisateurs

de micro-gouttelettes (de diamètre inférieur ou égal à 1mm), le refroidissement est encore plus efficace. En effet, au plus les gouttes sont petites, au plus la surface de contact air-eau est grande et donc l'évaporation augmente.



Les deux graphes suivants montrent comment des technologies adaptées peuvent aussi traiter ce problème de température de surface trop élevée. Le graphe de gauche propose de placer des ombrages amovibles afin d'ombrager le sol en journée mais de le laisser se refroidir par rayonnement vers le ciel en soirée. L'image de droite montre que l'eau peut aussi refroidir le sol en circulant en dessous de celui-ci.



Ainsi, les espaces confinés permettent de créer des ambiances thermiques spécifiques alors que les grands espaces ouverts restent très dépendants de la température du vent.



Louvain-la-neuve : haies et murets qui créent des espaces confinés visuellement ou thermiquement selon leur hauteur. (Photo : S. Reiter).

Il est également utile de créer des espaces de transition entre des sites dont les ambiances microclimatiques sont très différentes. Des espaces tampons, tels que des galeries couvertes, sont par exemple très favorables pour diminuer les différences de température trop importantes entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments.

Les espaces partiellement fermés sont des espaces publics spécialement intéressants du point de vue microclimatique. Des études basées sur des tests in situ en Angleterre et en Grèce montrent que dans ces deux types de climats fort différents, les arcades, galeries, marchés couverts et autres types d'espaces partiellement fermés génèrent un microclimat local intermédiaire entre les espaces extérieurs totalement ouverts et les espaces situés à l'intérieur des bâtiments (Sinou & Steemers 2004).



(Photo : S. Reiter).

Ainsi, les espaces partiellement fermés (arcades, galeries, marchés couverts,...) créent des espaces tampons qui limitent la consommation d'énergie des bâtiments qui les jouxtent et assurent des espaces publics relativement protégés du climat extérieur en comparaison des espaces ouverts (rues, places, parcs). Ils génèrent donc des espaces où les personnes peuvent expérimenter des conditions de confort thermique extérieure supérieures à des espaces totalement ouverts, tout en offrant les mêmes bénéfices sociaux que les autres types d'espaces publics extérieurs. Dans les pays chauds, ils protègent une zone de l'ensoleillement direct tandis que dans les climats tempérés froids, ils permettent au contraire à cette zone d'être protégée des intempéries. Ils servent d'espace de transition du point de vue thermique pour les personnes qui vont de l'intérieur d'un bâtiment vers l'extérieur ; ils facilitent donc l'adaptation des citoyens au climat extérieur.

Enfin, ces espaces partiellement fermés assurent une diversité et une variabilité des conditions thermiques extérieures. Ils participent donc activement à la création d'un environnement urbain divers et confortable, indispensable pour le confort psychologique des piétons. Ils apportent également une séparation claire par rapport à l'espace du trafic routier, un agrandissement de l'espace piétonnier sans diminuer fortement les surfaces constructibles et souvent sont dimensionnés à l'échelle humaine. Ils unifient différents bâtiments et peuvent donc servir de trait d'union entre des composants divers de l'espace public. Ils améliorent donc la cohérence de l'espace public.

Les résultats de monitoring réalisés à Cambridge (Sinou & Steemers 2004) montrent que les espaces partiellement fermés restent plus chauds en hiver durant la majorité des heures, permettant donc une occupation plus longue et plus confortable. En été, ces mêmes espaces restent plus froids pendant la journée et plus chauds pendant la nuit, ce qui favorise également leur utilisation et leur appréciation.

Rappelons que les espaces partiellement fermés ont généré de multiples exemples historiques fascinants à travers toute l'Europe. C'est donc à regret qu'il faut constater que l'architecture contemporaine semble abandonner des espaces de grande qualité du point de vue climatique et social.

Les dimensions idéales d'une colonnade dépendent de la latitude où elle sera implantée. Ainsi à Bruxelles (50°N), la largeur optimale du passage couvert serait de 0.6 à 1.4 fois sa hauteur, en considérant que l'espacement entre les colonnes soit égal à la hauteur du passage. Au niveau de la lumière diffuse, l'éclairement naturel diffus juste à l'intérieur du passage sera de 50% inférieur à celui reçu à l'extérieur de la colonnade. Le rayonnement solaire diffus est réduit de 75% à une distance intérieure de 0.4 fois la hauteur de la galerie et de 90% à une distance de 1.2 à 1.4 fois la hauteur de la colonnade. (Littlefair & al 2000)

L'orientation d'une galerie a aussi de l'importance sur les zones d'ensoleillement direct. Par contre, elle modifie peu le rayonnement solaire diffus reçu puisque celui-ci provient de la totalité de la voûte céleste. Bien entendu la latitude du lieu où la colonnade sera construite est le premier élément à prendre en compte. Au latitudes basses, l'effet de protection solaire de la colonnade est encore accentué puisque l'altitude solaire est plus élevée. A la latitude de Séville (37°N), la distance intérieure d'une galerie à partir de laquelle le rayonnement solaire direct est pratiquement complètement bloqué en juin est 0.4 fois la hauteur de la galerie, pour une façade orientée vers le sud. Le rayonnement solaire de mars est arrêté à une distance de 0.8 fois la hauteur de la galerie et le rayonnement de décembre à une distance de 1.6 fois sa hauteur. Donc, pour Séville, la largeur idéale d'une galerie serait entre 0.8 et 1.6 fois sa hauteur afin d'éviter le rayonnement solaire en été et au printemps.

Notons également que les galeries et colonnades offrent généralement un espace protégé du vent et limitent les échanges par rayonnement et par convection par rapport à une rue ouverte. De plus, les zones couvertes offrent une protection par rapport aux intempéries. Ce sont donc des lieux spécialement confortables pour le confort d'hiver dans nos régions.

En plus de fournir une vue agréable et d'apporter un caractère naturel à un espace public, la végétation peut influencer fortement le microclimat local : elle crée de l'ombre, sert de brise-vent et refroidit la température de l'air par évaporation pendant les chaudes journées d'été. Les zones plantées permettent aussi à l'eau de pluie de pénétrer dans le sol et d'alimenter les nappes phréatiques. Les opportunités pour intégrer la végétation dans le développement urbain sont nombreuses : dans les espaces publics et semi-publics (places, cours, squares, passages, arcades, ...), dans les jardins privés, le long des routes, rues pavées, rues piétonnes, au centre des routes à grand trafic et autoroutes, en toiture, pergolas, toitures plantées et façades plantées. La végétation, qui est perméable à l'air, est idéale pour servir de brise-vent car elle crée moins de turbulence que les murs ou parois totalement fermées à l'air. Pour les espaces verts et les arbres implantés en milieu urbain, il est indispensable de choisir soigneusement l'espèce utilisée. En général, les espèces indigènes sont plus résistantes et plus économiques à l'entretien.

Pour le confort et la sécurité des piétons par rapport au vent, il est nécessaire :

- de protéger les places des vents froids et dominants.
- d'éviter que les bâtiments ne génèrent des survitesses inacceptables pour le confort des piétons. Les bâtiments très élevés sont à proscrire des centres urbains. Il faut prévoir des hauteurs de bâtiments relativement homogènes, c'est-à-dire créer des zones de transition pour éviter des changements de hauteur qui dépassent 100% de la hauteur de la zone précédente.
- de favoriser les possibilités de ventiler l'espace pour évacuer la pollution et rafraîchir l'ambiance en été. On peut par exemple profiter de la topographie et de la végétation pour guider les vents et permettre une

ventilation naturelle des espaces publics. En ville, le vent est plus souvent problématique à cause de son absence qu'à cause de sa présence, sauf pour des configurations de bâtiments élevés.

- disposer les îlots urbains en quinconce en bordure de la zone urbaine dense, sur une bande large de 200m.
- prévoir des places et des espaces verts de dimension moyenne ($S < 40\,000\text{ m}^2 = 200 \times 200\text{m}$).
- planter les rues de grande longueur en bordure de la zone urbaine dense, afin de profiter de l'effet de protection de la végétation.
- placer des éléments poreux (végétation, écrans perméables,...) sur les places et dans les parcs de grande dimension ($S \geq 40\,000\text{ m}^2$), afin d'y ralentir l'écoulement du vent

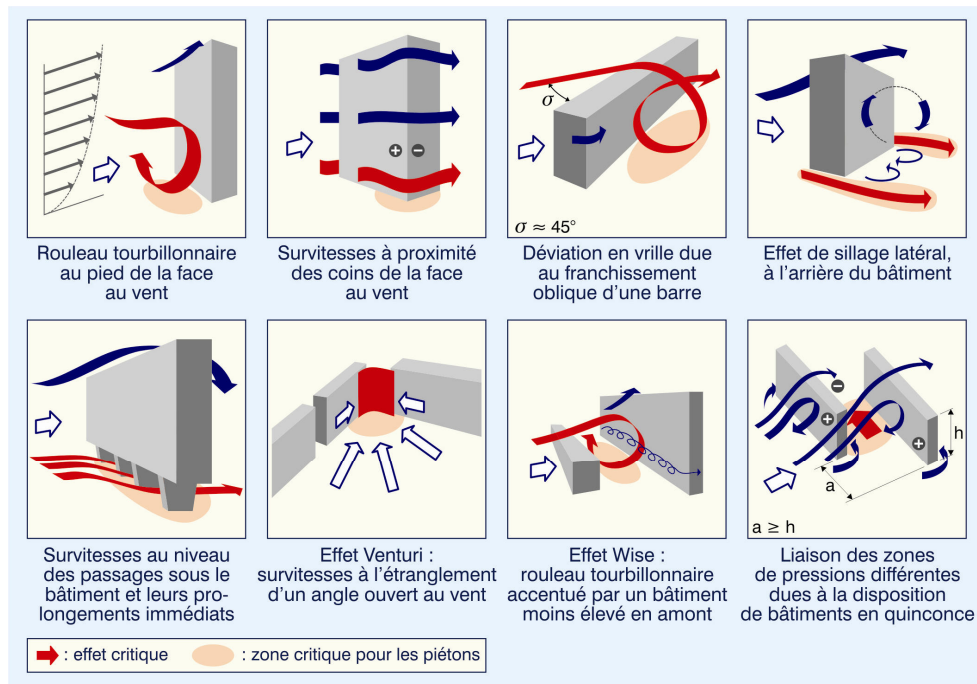
Pour le confort des piétons, les tissus denses de hauteur homogène relativement faible, tels que les centres des villes traditionnelles, assurent globalement un excellent confort au vent. En effet, lorsque les bâtiments d'une ville sont approximativement de la même hauteur, il y a une séparation entre le flux d'air au-dessus des bâtiments et l'air qui circule dans les rues. Les quelques accidents aérodynamiques à craindre se situent alors à la périphérie et dans les zones très dégagées. Cependant, les villes contemporaines présentent des constructions très élevées qui entraînent des rafales de vent inacceptables au niveau piéton. Il est indispensable d'étudier l'impact du vent au niveau du sol pour des bâtiments dont la hauteur est supérieure ou égale à 40m mais il est prudent d'étudier cet aspect dès qu'un bâtiment de 15 à 40m de haut présente une hauteur au moins égale au double de la hauteur moyenne de son environnement bâti.

Les bâtiments très élevés et les activités humaines qui nécessitent un certain confort piéton sont difficiles à concilier. Il faut donc éviter de construire des bâtiments élevés, surtout à proximité des places publiques. L'implantation d'un bâtiment de grande hauteur dans un tissu de hauteur homogène et relativement faible ($H/h_{\text{moyen}} > 2$) crée des zones d'inconfort dans les rues adjacentes et accroît les vitesses de l'air au niveau piéton sur une surface dont le rayon est de l'ordre de la hauteur de ce bâtiment élevé. L'intensité des survitesses au niveau piéton dépend essentiellement du rapport entre la hauteur du bâtiment élevé et la hauteur moyenne des bâtiments environnants : H/h .

Lorsqu'un projet présente des risques d'inconfort au niveau piéton à cause du vent, il faut évaluer le projet en fonction des différents mécanismes critiques d'écoulement du vent suivants :

- l'effet de coin
- l'effet de cisaillement
- l'effet de trous sous immeubles
- le rouleau tourbillonnaire
- l'effet de barre
- l'effet Venturi
- l'effet Wise
- l'effet de double coin
- l'effet de bâtiments en quinconce
- l'effet de canalisation linéaire

En milieu urbain, ces effets apparaissent à la base des bâtiments dont la hauteur est nettement plus élevée que le plan masse moyen et au pied des ensembles de tours.



Voici quelques règles de bonne pratique qui permettent d'atténuer le problème, lorsqu'un de ces écoulements critiques apparaît dans le projet:

- diminuer la hauteur du bâtiment élevé, afin de diminuer le rapport H/h entre la hauteur de ce bâtiment et la hauteur moyenne du tissu urbain,
- réduire la hauteur des bâtiments le long des espaces publics, surtout à proximité des coins ou des passages sous immeuble.
- créer des décrochements progressifs à partir du cinquième étage (gradins), pour profiter de l'effet de pyramide.
- ceinturer les bâtiments élevés par des constructions plus basses: socle, rez-de-chaussée créant une avancée, galerie fermée, ...,
- densifier le voisinage immédiat du bâtiment élevé par des bâtiments moins élevés,
- créer une maille la plus continue possible, en construisant des murs ou des barrières végétales là où aucun bâtiment ne peut pas être construit.
- éviter les larges façades faisant face au vent dominant, orienter de préférence l'axe principal des bâtiments élevés dans le sens des vents les plus fréquents,
- pour les bâtiments élevés avec trou sous immeuble, orienter le bâtiment de manière à ce que l'angle d'incidence du vent dominant soit compris entre 70° et 90° par rapport aux façades au vent percées par un passage sous immeuble ou générant un effet de double coin. L'orientation idéale correspond à un vent parallèle à la façade percée par le passage pour piétons.
- pour les bâtiments élevés formant un effet Venturi, orienter le bâtiment de manière à ce que l'angle d'incidence du vent dominant soit parallèle à un des bras du collecteur d'un Venturi. Eviter absolument l'orientation où la bissectrice de l'entonnoir correspond aux vents dominants.
- prévoir des éléments poreux (végétation, écrans perméables,...) près des coins, des passages sous immeuble ou des passages entre bâtiments rapprochés ainsi que dans la zone de cisaillement d'un bâtiment élevé et l'entonnoir d'un Venturi.

- augmenter la rugosité des façades par de larges débords (balcons de 6m de profondeur,...) sur toute la façade au vent du bâtiment.
- augmenter la porosité du bâtiment (trous dans les façades,...),
- couper les angles du bâtiment élevé à 45° ou créer des arrondis afin de diminuer le gradient horizontal des vitesses moyennes au niveau du coin.
- protéger les balcons situés aux coins des bâtiments.
- créer un couloir de déviation du vent au-dessus d'un passage piétonnier sous immeuble.
- éviter de placer des bâtiments de grande longueur dans une orientation de 45° par rapport aux vents dominants, surtout si la zone de sillage par rapport aux vents dominants est conçue pour abriter des zones de détente pour les piétons.
- enterrer un espace public.
- diminuer la longueur des bras d'un Venturi pour que la somme de leur longueur totale reste inférieure à 100m. Une possibilité est de créer des bras poreux en introduisant des séparations d'une longueur supérieure à la largeur moyenne des bras du Venturi.
- décaler les bâtiments formant un Venturi de manière à ce qu'un des bras dépasse largement derrière la zone resserrée.
- Pour un bâtiment élevé générant un effet Wise, diminuer la longueur du bâtiment élevé, augmenter la taille du petit bâtiment ($h \geq 0.6 H$) ou augmenter l'inter-distance entre les deux bâtiments ($W \geq 2 H$).
- rapprocher les bâtiments en quinconce pour que la largeur de la surface au vent non commune aux bâtiments soit inférieure à la hauteur des bâtiments en quinconce.
- entraver l'écoulement dans les couloirs de liaison entre des bâtiments en quinconce en l'élargissant ($d > h$), à l'aide de décrochements ou en le rendant poreux.
- diminuer la longueur des canalisations linéaires à proximité des bâtiments élevés ou les orienter de manière perpendiculaire par rapport aux vents dominants.

Les dispositifs de correction (brise-vent,...) sont toujours moins efficaces qu'une conception appropriée du bâtiment (forme et taille). Les problèmes sont souvent déplacés et non supprimés lorsque le champ de pression autour du bâtiment n'est pas modifié substantiellement. Pour les bâtiments très élevés, la meilleure forme pour la protection au vent est toujours celle qui minimise sa hauteur. Gardons toutefois en mémoire deux conseils généraux par rapport à l'application des brise-vent en milieu bâti (Gandemer & Guyot 1981):

- privilégier la protection d'un secteur conduit généralement à la détérioration d'un autre. Il est donc important de choisir les zones où le confort au vent est le plus indispensable et reporter le vent vers les zones où les critères de confort ne sont pas aussi importants.
- Plus la zone est exposée ou l'anomalie aérodynamique est élevée, plus l'efficacité relative de l'action du brise-vent sera grande.

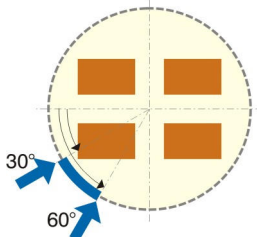
Dans les grands ensembles de bâtiments élevés, les risques d'inconfort pour les piétons sont toujours élevés.

Il faut toutefois faire attention qu'un excès de protection au vent peut rendre l'air des villes irrespirable. Dans tous les climats, les espaces publics qui subissent des sources de pollution locales (trafic,...) doivent être assez larges pour permettre au vent de disperser la pollution. Les rues de nos urbanisations sont polluées au niveau

du sol par les véhicules à moteur et à hauteur des toits par les cheminées. Pour assurer le confort respiratoire, il est important de limiter la circulation des véhicules à moteur, de profiter de la capacité du vent à disperser les polluants et d'introduire de la végétation en ville. Il faut également dimensionner des hauteurs de cheminées suffisamment hautes pour empêcher que le vent ne redirige la pollution générée en toiture vers le sol.

La géométrie urbaine affecte la capacité de la ville à disperser les polluants produits au niveau de la rue et des toitures :

- la rugosité de surface de la ville affecte la turbulence mécanique produite et la forme du profil de vent vertical. La rugosité du milieu urbain dépend à la fois de sa densité et du type de groupement des bâtiments. La rugosité maximale et donc la ventilation maximale, correspondent à une densité du bâti de 0.2 à 0.25.
- la géométrie des rues détermine la profondeur de la zone de dispersion des polluants. Il s'agit non seulement de la hauteur moyenne des bâtiments et de leur espacement mais aussi de l'orientation des rues principales par rapport aux vents dominants. Pour que le vent assure en permanence une ventilation de l'espace public, le rapport H/W devrait rester en-dessous de 0.65. Au-delà et pour des rapports H/W de l'ordre de 1 à 1.5, il faut qu'il y ait des vitesses de vent d'au moins 2m/s au niveau des toitures pour qu'une ventilation des rues soit possible. Pour la dispersion des polluants, les rues devraient idéalement se situer dans un angle de 30° à 60° par rapport aux vents dominant. En effet, les rues parallèles au vent propagent la pollution à l'intérieur de la rue sur de longues distances avant de la disperser et les rues perpendiculaires au vent créent généralement des poches d'air où la pollution peut stagner sauf si ces rues sont très larges.



- l'inhomogénéité des hauteurs du bâti influence l'écoulement du vent en milieu urbain. La hauteur au vent des bâtiments qui sont supérieurs à deux fois la hauteur moyenne des bâtiments influencent la dispersion des polluants autour de ceux-ci. Des différences de hauteurs raisonnables peuvent à la fois favoriser la dispersion des polluants tout en conservant le confort des piétons du point de vue de l'effort mécanique du vent.
- l'îlot de chaleur crée des brises thermiques entre la campagne et le centre-ville.

Une géométrie de rue correspondant à $H/W \leq 0.7$ associée avec une densité construite d'environ 0.25 et une orientation préférentielle des axes majeurs de 30° à 60° par rapport aux vents dominants fournit la meilleure situation pour la dispersion des polluants locaux.

Nous proposons de créer des variations moyennes de la hauteur du bâti, d'une hauteur égale à 1.5 ou 2 fois la hauteur moyenne des bâtiments, ce qui est très bon pour la ventilation et la dispersion des polluants, sans générer de problèmes pour le confort au vent des piétons. De plus, cela apporte de la diversité dans la ville,

créant des rythmes et la possibilité de repères visuels tout en évitant des inconforts excessifs.

Signalons que la végétation peut aussi aider à remédier au problème critique de la pollution de nos agglomérations. Les arbres ont un effet d'oxygénation sur leur entourage et ils sont capables de filtrer les poussières en suspension. De plus, les zones vertes de grande taille peuvent générer des courants d'air thermiques entre leurs surfaces végétales et les zones urbanisées. Ces mouvements d'air participent à la diminution de la pollution urbaine.

Dans les zones où les problèmes de pollution sont graves, il faut étudier l'éventuelle possibilité de créer des tours de ventilation (réappropriation de la technique des tours à vent des pays ensoleillés). Créer un mouvement d'air vers le haut devrait permettre d'évacuer l'air surchauffé, les polluants et fumées émises au niveau de la rue. Le sommet des tours à vent est généralement couvert d'une plaque de métal noire et inclinée afin d'assurer un échauffement rapide de l'air situé juste en dessous. Comme alternative, on pourrait aussi utiliser un panneau photovoltaïque, qui pourrait éventuellement alimenter une ailette qui assurerait le relais si nécessaire.

Dans les pays fortement pluvieux, il est nécessaire d'offrir des espaces et des parcours extérieurs couverts. Pour se protéger de la pluie, les arcades et les galeries couvertes sont des éléments essentiels pour une conception microclimatique de qualité. Ainsi, en Belgique, les auvents et galeries sont toujours bienvenues pour nous protéger des intempéries. Notons que la protection par rapport aux intempéries devient un élément réellement critique de la conception des espaces publics dans les climats froids (chutes de neige,...). Il est important de protéger les édifices et les lieux de détente de la neige. Dans les climats froids, une architecture spécifique est créée pour tenir compte de ces besoins de protection par rapport aux précipitations. Le principe de base est que la neige se dépose et s'accumule là où il y a une bonne protection au vent.

Pour le développement durable des villes, il est important de promouvoir des aménagements urbains qui réconcilient l'eau et la ville. Il s'agit d'abord de promouvoir une nouvelle « culture urbaine » de l'eau reposant sur différents principes :

- reconsidérer les fonctions urbaines de l'eau (élément d'aménagement urbain, élément de sociabilité, développement économique local lié aux activités associées à l'eau, potentiel symbolique,...),
- développer et utiliser les techniques alternatives qui s'opposent au principe du « tout à l'égout » et essaient de se rapprocher le plus possible du cycle naturel de l'eau en absence d'urbanisation. Ces techniques sont par exemple les tranchées drainantes, les chaussées à structure de réservoir, le stockage en toiture, les bassins de retenue, les puits d'infiltration, etc.
- mieux gérer les risques mineurs et majeurs des inondations. La prise en compte de ces événements exceptionnels constitue un devoir pour l'aménageur. Les recherches et solutions pour les débordements des rivières existent et sont appliquées. En revanche, les recherches sur les solutions pour les inondations dues à des ruissellements superficiels sur les surfaces urbaines sont moins avancées et plus difficiles à appliquer. Pourtant, cette protection contre les risques mineurs peut également être assurée par des solutions techniques. Les techniques alternatives intégrées à l'urbanisation retardent le transfert de l'eau vers les exutoires de surface

et accélèrent son évacuation vers les exutoires souterrains : elles réduisent très significativement les pointes de débit.

- Gérer intelligemment l'eau par sa prise en compte dans les documents d'urbanisme prévisionnel et opérationnel : repenser les découpages techniques et administratifs. Les principaux freins à une gestion durable de l'eau en ville ne sont pas techniques. La réussite du développement de ces nouvelles solutions nécessite surtout de changer d'attitude par rapport à l'eau. Le cycle de l'eau doit être considéré dans son ensemble. Les découpages territoriaux de nature administrative doivent s'estomper devant des découpages correspondant mieux à la réalité de la gestion de l'eau (par « bassin hydrologique » par exemple).

Il est indispensable de tenter de réduire les eaux de ruissellement dans tout environnement construit. La première action à poser est donc de permettre aux eaux de pluies de s'infiltrer dans le sol, le plus rapidement possible pour qu'elles restent propres, afin de continuer à alimenter les nappes phréatiques. Une végétation adaptée retient les eaux de pluies et réduit considérablement le ruissellement. Des revêtements filtrants, des fossés, des puits ou des bassins filtrants permettent également d'éviter le ruissellement en surface.



(IMBE 2005)



(IMBE 2005)

Ensuite, pour les eaux de ruissellement inévitables, il faut tenter de ralentir leur écoulement vers l'aval afin d'éviter les inondations. Dans ce but, il est nécessaire de générer l'évaporation ou la réutilisation de ces eaux. Le but est de supprimer les canalisations d'eaux pluviales enterrées. Les zones de rétention, bassins d'orages végétalisés, étangs ou canaux aménagés au sein même des quartiers recueillent les eaux de pluie et recréent ainsi des biotopes. L'eau peut s'évaporer via des bassins, des toitures végétales ou des zones plantées. Les eaux de pluie peuvent être mises à profit dans les bâtiments avec ou sans traitement selon le type d'usage désiré. On peut aussi retarder les eaux de pluies vers les égouts en rallongeant le plus possible le chemin de l'eau grâce à des bassins d'orage ou des retenues multiples mais il est indispensable d'éviter le mélange des eaux de pluie et des eaux usées.



(IMBE 2005)



(IMBE 2005)

Ainsi, la promotion de la perméabilité des surfaces dans les zones urbaines et la séparation du ruissellement des eaux de pluies du système d'égouts pourraient

contribuer à la recharge des nappes d'eau souterraines, à l'abaissement du coût de la collecte et de l'épuration des eaux usées et à la réduction des inondations urbaines.

Un bel exemple de gestion de l'eau en milieu urbain est réalisé dans le quartier Kronsberg à Hanovre. Un système de drainage semi naturel est mis en place afin de reproduire fidèlement l'écoulement naturel des eaux et ainsi limiter l'impact de la construction du quartier sur le cycle de l'eau et les ressources en eau de la région (IMBE 2005). Un réseau de fossés d'infiltration est creusé de chaque côté de la chaussée. Il draine les eaux pluviales des voiries vers des bassins de rétention afin de les filtrer et de les remettre "dans le circuit" (chasses d'eau,...). La municipalité de Hanovre a imposé dans le quartier de Kronsberg l'installation d'un système d'infiltration des eaux de pluie devant chaque propriété avec raccordement à ce réseau de fossés d'infiltration et recyclage. Un premier bilan de la destination des eaux pluviales, au niveau du quartier, montre que 45% s'infiltrent dans le sol, 53% s'évaporent et seulement 2% est rejeté dans les réseaux.



(IMBE 2005)



(IMBE 2005)

Dans le quartier Vauban, récemment construit à Fribourg, plusieurs solutions sont retenues pour respecter le cycle de l'eau (IMBE 2005):

- toutes les toitures plates sont végétalisées, y compris celles des locaux à déchets.
- des citernes de récupération des eaux de pluie sont installées dans certains immeubles ou dans les locaux à déchets et les abris vélos.
- ces eaux de pluie sont utilisées pour le lavage du linge, pour l'arrosage des jardins et pour les chasses d'eau des toilettes de certains bâtiments (école primaire, habitations,...)
- un système de cuvettes et de tranchées filtrantes permet d'alimenter la nappe phréatique.
- des caniveaux pavés reçoivent aussi bien les eaux de ruissellement des rues que celles des toits, en l'absence de citernes. Le trop plein est dirigé vers un étang et un biotope (bassin d'orage végétalisé).



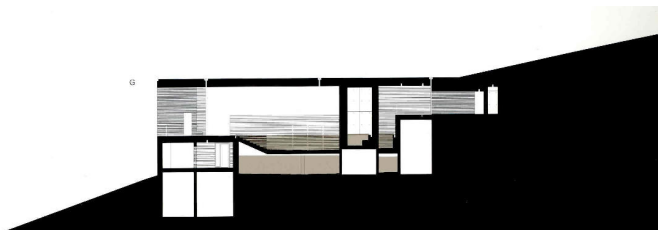
(IMBE 2005)



(IMBE 2005)

La végétation extensive des toitures est une technique connue et appliquée à grande échelle dans les pays germaniques et scandinaves ; elle consiste à planter une végétation pauvre, supportant l'humidité comme la sécheresse, poussant sur une mince couche de terre de 4 à 10cm, ne nécessitant aucun engrais, arrosage ou fauchage. La pauvreté du substrat évite la croissance exagérée et l'épaisseur de terre faible permet en général de ne pas renforcer les structures portantes. Une couche de 4-10 cm de substrat pour les racines permet déjà de ralentir l'écoulement des eaux et favorise une évaporation progressive de la pluie. Tout en faisant office d'épuration naturel des eaux de pluie, pour leur récupération ou non, cette végétation dépoussière l'air et le rafraîchit quand il fait très chaud. Par opposition à la végétation extensive, la végétalisation intensive des toitures consiste à y créer des toitures jardin où la végétation peut être constituée de gazon, arbres ou arbustes sur une couche de terre allant de 50 à 100 cm. En raison du poids de la terre sur une telle épaisseur, les structures portantes doivent en général être renforcées. De plus, ce type de végétation nécessite un entretien régulier. Mais son côté esthétique et ses valeurs d'agrément pour les utilisateurs de ce jardin suspendu sont toutefois à signaler. (CONVIVE 1995)

La photo et la coupe ci-dessous montrent la toiture plantée du bâtiment des thermes conçu par P. Zumthor à Vals.



Les thermes de Vals (architecte : Peter Zumthor ; photo et coupe : de Myttenaere 2006).

Enfin pour assurer une bonne qualité d'ambiance sonore en ville, il est nécessaire :

- d'opérer un travail de limitation des sources de bruit,
- de limiter la propagation du bruit en milieu urbain,
- de valoriser les qualités sonores du lieu.

Au niveau de l'acoustique urbaine, les politiques de subsides pour l'isolation des façades des logements ne sont encore qu'un palliatif qui ne s'attaque pas à la cause réelle du problème : l'émission de bruit. Nous encourageons donc davantage des

mesures qui consistent à diminuer le trafic urbain et ses multiples nuisances dont le niveau sonore dans les espaces publics. Bien entendu l'isolation acoustique des façades restera dans certains lieux une solution indispensable mais elle devrait être utilisée en tout dernier recours.

Améliorer le confort acoustique en ville peut être mis en œuvre grâce à différents moyens :

- diminuer l'intensité du trafic (rues piétonnes, limitation des parkings en ville, sensibilisation de la population, canalisation du trafic de transit sur quelques grands axes,...),
- diminuer la vitesse des véhicules (aménagement locaux de voiries, zones 30, etc),
- choisir un revêtement de sol peu bruyant,
- augmenter la distance entre la source de bruit et les zones de détente,
- utiliser la continuité du bâti comme barrière acoustique,
- entourer un espace de détente par un ensemble de bâtiments,
- utiliser des éléments sonores agréables (ex : fontaines) comme masques sonores.
- créer des différences de niveaux entre la source de bruit et les espaces de détente.
- ajouter des espaces tampons entre zones acoustiques très contrastées.
- utiliser des matériaux absorbants.

La morphologie urbaine détermine la propagation du bruit routier autour des bâtiments et dans les espaces urbains extérieurs (rues, places, parcs, intérieurs d'îlots). Choisir un type de tissu urbain a donc des conséquences significatives sur les ambiances acoustiques des espaces publics. Il est possible de modifier les différents obstacles (bâtiments, ...) pour se protéger des sources de bruit. Des bâtiments mitoyens ou reliés entre eux par des murs ou murets (d'une hauteur supérieure à la source de bruit) constituent un obstacle efficace par rapport au bruit. Ainsi, les intérieurs d'îlots ont un univers sonore propre et relativement indépendant des bruits de la rue. Par contre, lorsque les bâtiments sont dispersés, le bruit s'engouffre entre les bâtiments.

L'utilisation d'un masque sonore est à conseiller pour couvrir un bruit de fond qui ne peut pas être supprimé. L'effet de masque peut aussi être utilisé pour choisir un type d'ambiance sonore agréable : lieu à sonorités naturelles, musicales ou autre.

Il est important de prendre en compte le choix des matériaux de construction pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les matériaux qui entreront dans le projet représenteront chacun un investissement énergétique spécifique en fonction de l'énergie nécessaire pour le produire, de sa localisation,... On privilégiera donc le choix de matériaux de construction locaux, de faible énergie grise et l'utilisation de matériaux recyclables ou recyclés,...

L'espace public comme lieu multifonctionnel nécessite sa réorganisation et son partage. Tous les utilisateurs (piétons, cyclistes, automobilistes, handicapés, personnes utilisant les transports en commun, ...) doivent pouvoir s'y épanouir aussi librement que possible. Partager l'espace public, c'est montrer par des aménagements que les différents utilisateurs de l'espace cohabitent équitablement en donnant une place juste à chacun d'eux. Lors de la conception d'un groupe de bâtiments, d'un lotissement ou d'un quartier, il est possible d'intégrer une réflexion sur les continuités piétonnes et cyclables avec les zones voisines.



(Architecture et Climat 2004).

Il est également important d'améliorer l'ambiance des stations et des arrêts de transports en commun. Il faut également favoriser l'intermodalité entre les transports publics et le vélo, par l'installation de dispositifs pour garer ou consigner les vélos aux arrêts. Tous les équipements destinés à favoriser le transport à pied ou à vélo sont utiles.

Enfin, l'éclairage artificiel des espaces publics est un des domaines qui ouvre à la possibilité de créer des ambiances urbaines de qualité. Il est important de prendre en compte les implications de l'éclairage artificiel des espaces publics sur ses consommations d'énergie, le confort des piétons en soirée ainsi que le sentiment de sécurité qui est conféré à ces lieux. Il est important d'assurer un éclairage artificiel et des équipements urbains peu consommateurs en énergie. L'éclairage des vitrines la nuit et le chauffage des espaces publics bordant des restaurants sont des exemples de pratiques spécialement énergivores.



(Deprez 2003).



(Deprez 2003).

L'utilisation des sources d'énergie renouvelable permettrait de limiter l'utilisation de sources d'énergie polluantes. Les énergies renouvelables sont d'autant plus crédibles et rentables que les besoins énergétiques sont faibles.

Conclusion

« On ne résout pas les problèmes avec les modes de pensée qui les ont engendrés. » Albert Einstein.

Ce chapitre de conclusion rappelle les enjeux, la méthode utilisée et la structure de cette thèse de doctorat. Les résultats obtenus tout au long de cette thèse sont résumés et leur caractère innovant est souligné. Des pistes sont lancées pour des recherches ultérieures qui permettraient d'approfondir encore le sujet traité dans cette thèse. Quelques réflexions finales clôturent enfin ce doctorat. Elles mettent en évidence l'importance de recherches multidisciplinaires basées sur une vision holistique pour mieux tenir compte de la complexité des interactions qui relient l'homme à l'univers. Elles rappellent enfin notre responsabilité en tant qu'être humain face à l'évolution de l'humanité sur Terre.

Cette thèse de doctorat consiste à élaborer des outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception d'ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes.

En ce début de XXI^{ème} siècle, l'urbanisation croissante du monde nous oblige à envisager très sérieusement l'avenir de nos villes. En effet, nos urbanisations représentent fondamentalement les lieux où se jouent des enjeux planétaires cruciaux pour l'avenir de l'humanité, tels que l'exclusion sociale, la dégradation de l'environnement naturel, la pauvreté, ... A l'échelle du quartier, citons quelques problématiques critiques à l'heure actuelle : l'étalement urbain, la mono-fonctionnalité du tissu bâti, la pollution urbaine (atmosphérique, sonore, de l'eau,...), la dissolution de l'espace public, les inégalités sociales, l'appauvrissement des centres-villes, l'accaparement de l'espace public par la voiture, la privatisation de l'espace public, le non respect du contexte local, ... Ces problèmes ne se limitent pas à diminuer notre qualité de vie mais, en outre, hypothèquent gravement le potentiel des générations futures.

La crise actuelle de l'urbain s'inscrit dans une crise générale de notre société où la technologie et la rentabilité financière à court terme sont survalorisées par rapport aux valeurs sociales, environnementales, économiques et éthiques tenant compte de l'évolution à long terme de notre civilisation. Il est désormais indispensable de trouver des solutions qui revalorisent ces différentes dimensions au sein d'un développement équilibré.

La conception d'espaces publics urbains de qualité est un atout majeur pour développer les qualités architecturales, sociales, environnementales et économiques de nos villes. Ce travail de thèse s'inscrit dans la recherche de nouveaux modes de conception de notre espace habité pour assurer le développement durable des villes.

Au niveau des enjeux globaux du développement durable, la volonté de densifier les zones urbaines est un élément positif pour le développement de l'humanité sur Terre : rassemblement de populations diverses, conservation du paysage naturel, diminution des coûts liés aux infrastructures et aux équipements publics, ... Mais par contre la ville dense engendre de sérieux désagréments au niveau local (risques pour la santé des habitants dus à la pollution accrue, ...). C'est ainsi que le confort

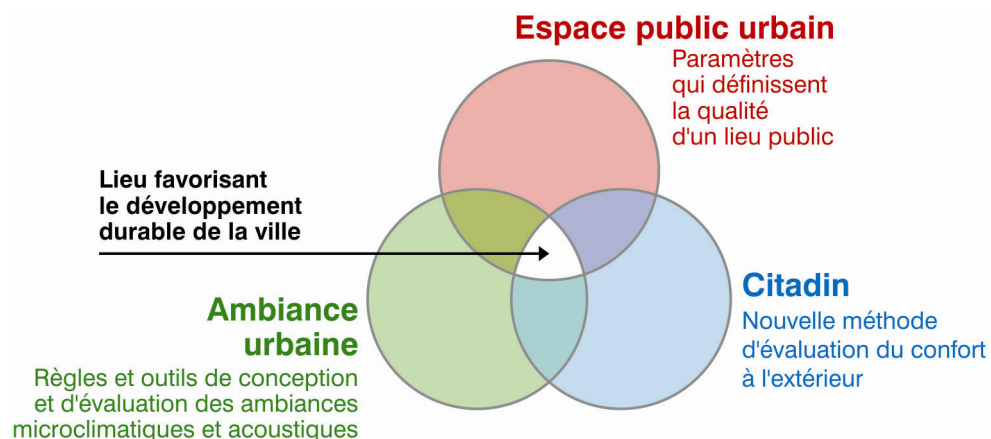
dans les espaces publics urbains devient un élément charnière entre l'enjeu local d'assurer le bien-être des habitants et l'enjeu global de densifier le tissu urbain. Les effets bénéfiques les plus importants d'une conception urbaine tenant compte du confort des personnes sont :

- l'amélioration de la qualité de vie dans les espaces publics en ville (équité sociale, bien-être des habitants,...),
- l'accroissement de l'utilisation des places urbaines (rencontres, mixité de la population, démocratie, ...)
- la diminution des consommations d'énergie liées à l'utilisation des bâtiments (ventilation, ensoleillement des façades...) et de l'espace public (diminution de la circulation automobile, utilisation accrue des vélos et des transports en commun, valorisation du piéton),
- la limitation des nuisances environnementales (diminution de la pollution atmosphérique, amélioration de la santé des habitants...),
- la valorisation de l'image de la ville, pour faire revenir les habitants en ville. Ce critère présente de nombreux avantages sociaux, économiques et environnementaux. Rappelons notamment que le premier facteur d'économie d'énergie est la densité de l'habitat.

Cette thèse représente donc un enjeu important pour favoriser un développement durable de nos urbanisations, équilibrant de manière harmonieuse les bénéfices sociaux, environnementaux et économiques aux différentes échelles

Cette thèse de doctorat propose un éclairage spécifique et technique des ambiances urbaines, tout en l'insérant dans une approche architecturale globale. Elle est centrée sur l'étude des multiples interactions entre la morphologie du tissu urbain, les ambiances urbaines et les citoyens.

Le schéma ci-dessous représente les différents thèmes abordés par cette recherche doctorale.



Dans une première partie, cette thèse étudie les caractéristiques des espaces publics qui sont nécessaires pour promouvoir une conception architecturale et urbaine respectueuse de l'homme et de l'environnement. Dans une seconde partie, ce travail de thèse approfondit l'étude du confort des piétons dans les espaces publics, selon une approche innovante du confort à l'extérieur qui consiste à regrouper les points de vue physiologiques et psychologiques. Dans une troisième partie, cette

thèse décrit les moyens existants et développe de nouveaux outils méthodologiques et techniques pour concevoir des ambiances urbaines de qualité du point de vue microclimatique et acoustique. L'étude du vent autour des bâtiments y est particulièrement développée. Cette section comprend une validation du logiciel FLUENT pour l'étude du confort par rapport au vent au niveau piéton ainsi que l'élaboration d'outils graphiques quantitatifs d'évaluation des niveaux d'inconfort au vent autour des bâtiments. Ces outils méthodologiques et techniques permettront aux différents acteurs du processus de conception et de réalisation des projets urbains d'identifier dans le tracé de leurs plans masses les zones susceptibles d'être critiques ou clémentes pour les piétons en fonction du microclimat et de l'acoustique.

La conception des ambiances urbaines est un processus architectural qui se situe à la charnière entre différentes disciplines, telles que l'urbanisme, la climatologie, la physiologie et la psychologie. L'approche technologique seule ne permet pas de fonder un projet urbain car elle ignore les fondements culturels et psychologiques indispensables pour créer une architecture de qualité. Chaque partie de cette recherche est étudiée selon une démarche multidisciplinaire et holistique afin d'analyser les ambiances urbaines dans leurs aspects qualitatifs autant que quantitatifs.

Actuellement, l'étude approfondie d'un microclimat urbain requiert l'utilisation de technologies de pointe que sont les outils actuels de simulations des paramètres climatiques. Cependant, ces techniques qui permettent de simuler très précisément le microclimat urbain sont très complexes et demandent aux concepteurs un investissement trop important en temps et en argent pour la majorité des projets. C'est pourquoi cette recherche utilise les outils de simulations contemporains pour déterminer des règles de bonne conception microclimatique et créer des outils simplifiés d'évaluation du microclimat urbain, facilement utilisables par les concepteurs urbains avant même qu'un premier schéma ne soit dessiné.

Ainsi, ce travail de doctorat utilise deux méthodes de recherche :

- une réflexion basée sur une étude bibliographique étendue et pluridisciplinaire. Cette recherche se fonde sur une approche scientifique rigoureuse.
- des simulations du microclimat urbain. Il s'agit plus précisément de l'étude des mouvements d'air autour des bâtiments grâce aux simulations CFD (computational fluid dynamics) à l'aide du logiciel FLUENT.

La première partie de ce doctorat étudie les caractéristiques des espaces publics qui sont nécessaires pour le développement durable des villes. Cette étude souligne également l'importance du point de vue humain et de son expérience corporelle pour qu'un espace public puisse être approprié, tout en favorisant la création de liens entre l'homme, son environnement et les différentes échelles de l'habiter. Cette recherche a abouti à la définition d'un espace public durable, basée sur trois qualités fondamentales : la contextualité, la coexistence et la cohérence.

S'interroger sur le développement durable urbain consiste à se questionner sur le rapport entre l'être humain et son milieu ainsi que sur les rapports au monde que nos espaces habités peuvent favoriser. Poser la question de l'établissement humain nécessite inévitablement de prendre en compte les trois niveaux de l'incarnation humaine: sa corporéité, sa sociabilité et sa spiritualité. Tout espace bâti se positionne par rapport à ces trois points de vue incontournables de l'expérience sur Terre:

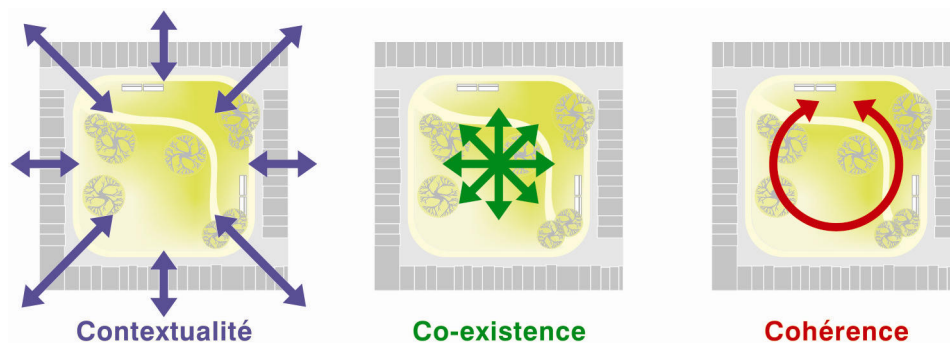
- la corporéité ou enracinement de l'être,
- le domaine relationnel ou mise en relation de l'être,
- la métaphysique ou recherche de sens et essence de l'être.

Il s'agit donc de développer des modes d'habiter qui peuvent faire sens à ces trois niveaux pour l'homme d'aujourd'hui et de demain au regard des enjeux globaux et locaux du développement durable

La situation urbaine contemporaine peut être globalement définie comme une « perte de lieu ». La modernité a tout simplement nié les lieux, ce qui a produit des espaces inhabitables. Créer un espace public durable est pour nous l'art d'offrir à autrui un monde habitable pour pouvoir vivre ensemble et en harmonie avec notre milieu. Tout espace public devrait instaurer un rapport fondamental au monde, à autrui et à soi-même. C'est justement là que se situe la perte de lieu des espaces contemporains, qui peut être interprétée dans les espaces actuels comme une absence d'intégration au contexte local, comme une impossibilité à nous relier et comme un manque de cohérence.

C'est pourquoi nous proposons les trois concepts suivants pour définir les caractéristiques essentielles que doit présenter un espace public durable ou, dit autrement, **les qualités fondamentales de tout lieu public** :

- la **contextualité** (ou inscription dans son milieu),
- la **coexistence** (ou mise en présence dense et complexe des différences),
- la **cohérence** (ou identité porteuse de sens).



Dans cette thèse de doctorat, les principaux enjeux urbains contemporains ont été analysés et expliqués à travers le développement de ses trois principes fondamentaux du développement durable des espaces publics. Chacune de ces trois caractéristiques se définit dans un lieu public selon trois points de vue: quantitatif, qualitatif et dynamique (c'est-à-dire porteur d'une capacité d'évolution).

La contextualité est la mise en relation d'un espace spécifique à son milieu englobant, constitué par un contexte physique, un contexte construit et un contexte humain. La contextualité d'un espace public, ou son inscription dans un milieu, nécessite :

- son intégration grâce aux continuités, au respect de la mémoire des lieux, à la création d'espaces de transition entre les différentes échelles, ... Pour s'intégrer dans son milieu, l'espace public doit profiter des opportunités offertes par le milieu et se protéger des contraintes du milieu, aux différentes échelles de l'habiter.
- sa participation. Un lieu public apporte des bénéfices au milieu dans lequel il s'inscrit et le protège de toute nuisance qu'il pourrait induire, aux différentes échelles de l'habiter. Cette participation induit donc une

éthique, qui vise à établir une justice intergénérationnelle en poussant les habitants à prendre conscience de leur responsabilité face au Monde et à l'Histoire. « J'ai droit à la ville » se transforme en « je suis responsable de la ville ».

- son adaptabilité. S'inscrire dans un milieu c'est aussi être capable d'évoluer en même temps que ce milieu.

Par la rencontre de l'altérité, le lieu public devient le lieu privilégié de la mise en présence dense et complexe des différences, accès indispensable au vivre ensemble. La coexistence, qui définit le lieu public comme une identité collective, est créée à partir de trois qualités complémentaires :

- le rassemblement qui nécessite de la proximité et une certaine densité. Les espaces collectifs sont des lieux où les hommes sont réunis pour vivre ensemble.
- la diversité : variété de lieux, mixité des fonctions, hétérogénéité du bâti, simultanéité ou succession des activités,... La multiplicité sous toutes ses formes est nécessaire.
- l'ouverture, comme disponibilité à la transformation et à l'appropriation, tolérance de l'autre, libre accès, possibilité de laisser advenir... La complexité, l'hétérogénéité, les paradoxes, les incertitudes, les ambiguïtés sont des caractéristiques qui ouvrent à la liberté, à la possibilité de choisir et d'agir.

L'espace public ne crée un lieu public que dans la mesure où s'induit à son propos un processus d'identification collective. Un lieu public est alors perçu comme une unité spécifique, dotée d'une singularité qui la distingue de tout autre espace public. Le lieu public est une totalité hautement complexe. Sa cohérence, qualité qui le définit comme une identité singulière, se fonde sur :

- son identité, c'est à dire une unité ordonnée qui assemble ses parties de telle sorte que les tensions s'équilibrent (unité basée sur une hiérarchie, des limites, une orientation, une durée,...).
- son sens, qui révèle des valeurs, des symboles, une esthétique spécifique.
- sa naturalité, comme capacité d'émergence et d'intégration des différentes échelles de son être.

Ainsi, notre réflexion se propose de considérer le lieu public comme une identité à la fois singulière, collective et inscrite dans un milieu.



Selon notre définition du lieu public, pour être durable un espace public doit donc :

- **s'inscrire dans son milieu, c'est-à-dire s'intégrer, participer et s'adapter.**
- **offrir la possibilité de coexister dans la différence, c'est-à-dire rassembler, offrir de la diversité et ouvrir à l'altérité.**
- **créer un lieu cohérent, c'est-à-dire révéler une identité, donner sens et favoriser la naturalité.**

La création d'un lieu public réside dans l'équilibre entre ces neuf principes de conception, qui s'affirment en se limitant et en se complétant l'un l'autre. Cette stratégie de conception et de rénovation des espaces publics a été largement illustrée par de nombreux exemples concrets d'espaces publics belges et européens.

Il faut signaler que le concept de « développement durable » est sans cesse utilisé à l'heure actuelle mais peu de centres de recherche se sont penchés sur la définition d'un urbanisme durable au-delà de la question de la mobilité. L'importance de l'espace public urbain comme enjeu du développement durable et la définition des critères de conception d'un espace public durable sont des nouveaux thèmes de recherches.

Dans une seconde partie, cette thèse approfondit l'étude du confort des piétons dans les espaces publics. La majorité des études réalisées sur le confort portent uniquement sur les conditions intérieures et les quelques recherches qui ont été abordées pour étendre les critères de confort à l'extérieur sont très souvent des approches purement physiologiques. Il est toutefois évident qu'on ne peut pas évaluer de manière identique le confort à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment. Tout d'abord, les trois paramètres climatiques principaux à l'extérieur (le rayonnement solaire direct, le vent et la pluie) sont exclus des études réalisées à l'intérieur. De plus, le comportement psychologique des personnes face aux conditions environnantes est très différent à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.

Les espaces extérieurs présentent peu de contraintes. Les personnes qui s'y arrêtent y sont de par leur propre choix. Il serait toutefois erroné de conclure que le confort à l'extérieur n'est pas important alors que les études présentées dans cette thèse montrent clairement que les conditions environnementales influencent fortement l'utilisation des espaces publics. La qualité des ambiances urbaines participe largement à l'évaluation positive ou à la dépréciation des caractéristiques du site. De plus, la perception du confort possible détermine le fait de sortir à l'extérieur et l'impression de confort ressentie motive à s'arrêter dans un espace plutôt que de le traverser. Cependant, lorsque quelqu'un a décidé de sortir et de s'asseoir dehors, il s'est préparé à s'accommoder aux conditions extérieures. C'est là que l'adaptation psychologique prend toute son importance. En fait, à l'extérieur des bâtiments, les êtres humains évitent l'inconfort mais ne recherchent pas spécialement un équilibre physiologique optimal.

Le confort dans les espaces publics est vécu comme une sensation globale de bien-être ou d'inconfort, ce qui engendre une difficulté à percevoir d'où vient la cause d'une insatisfaction. Le confort extérieur est aussi bien influencé par des éléments physiologiques que psychologiques. Une approche uniquement quantitative est donc insuffisante pour décrire les conditions de confort à l'extérieur. Dans cette thèse de doctorat, nous avons mis au point **une méthode d'évaluation du confort**

dans les espaces publics urbains réunissant les approches physiologiques et psychologiques, à l'aide de critères quantitatifs et de critères qualitatifs.

Cette nouvelle approche du confort dans les espaces extérieurs a pour but d'optimiser le confort des personnes dans les espaces publics grâce à la prise en compte du point de vue humain du confort en plus de ses aspects techniques. Cette démarche est résolument innovante.

Une conception prudente et étudiée des ambiances urbaines peut fournir une protection contre les aspects négatifs et une exposition aux aspects positifs de l'environnement climatique et sonore en milieu urbain, pour la majorité des utilisateurs pendant la plus grande partie du temps. Ce doctorat permet d'affirmer que la conception d'un projet urbain de qualité du point de vue des ambiances urbaines doit intégrer la question du confort humain à travers une évaluation quantitative de l'équilibre thermique des piétons, de l'effet mécanique du vent, de la qualité de l'air, du niveau sonore, de la luminance des surfaces et de l'intensité des intempéries ainsi qu'une évaluation qualitative des critères qui influencent l'adaptabilité psychologique des piétons, afin de tirer les conclusions les plus judicieuses de cet ensemble de critères pour améliorer les possibilités de confort des piétons dans les espaces publics.

Pour déterminer les critères quantitatifs et les critères qualitatifs du confort extérieur, nous avons réalisé de multiples comparaisons entre les critères de confort présents dans la littérature et les nombreuses études expérimentales et in situ du comportement des personnes en relation avec les paramètres environnementaux. Nous avons d'abord analysé, adapté et choisi différents critères physiologiques du confort des piétons. Notre étude a permis de constater que les critères physiologiques du confort des piétons doivent être définis séparément en fonction des différents types de confort: confort thermique, confort par rapport au vent, confort respiratoire, confort acoustique, confort visuel et confort par rapport aux intempéries. En revanche, les aspects qualitatifs du confort humain sont identiques pour ces différents types de confort physique.

Les paramètres physiologiques du confort thermique sont la température, la vitesse de l'air, le rayonnement, l'humidité relative, l'habillement des citadins et leurs activités. Notre point de vue est qu'une détermination trop complexe du confort thermique quantitatif à l'extérieur est inutile à cause de l'importance des processus d'adaptation psychologique qui modifient largement la sensation de confort perçue. Deux méthodes intéressantes doivent être signalées : celle d'Olgyay parce qu'elle est très expressive de par sa présentation graphique et que son évaluation est très rapide et surtout celle de Brown et Gillespie, que nous avons adaptée pour offrir un calcul simplifié mais détaillé du bilan thermique d'une personne, qui fait intervenir les paramètres urbanistiques (facteur de vue du ciel, albedo des surfaces,...). Ces deux méthodes permettent de déterminer rapidement les paramètres à modifier pour améliorer une situation spécifique.

Pour l'inconfort par rapport au vent, nous avons opéré un choix de critères de confort et d'insécurité parmi un très grand nombre de critères présentés dans la littérature. La règle la plus importante à retenir est la suivante : la vitesse moyenne de l'air doit être inférieure à 5m/s sur l'ensemble de l'espace public pendant la plus grande majorité du temps ($U \leq 5\text{m/s}$). Pour une étude plus précise, notre choix se porte sur les deux critères scientifiques suivants :

- limite du confort : $P(U + \sigma_u > 6\text{m/s}) < P_{\text{max}}$, avec U vitesse moyenne horaire à 1.5 m du sol et $U + \sigma_u$ est la vitesse de vent effective. P_{max} est

une probabilité maximale de 5% pour un long séjour immobile, de 10% pour un court séjour immobile et de 15% pour flâner.

- limite de danger : $P(U + 3 \sigma_u > 20\text{m/s}) < P_{\text{max}}$, où $P_{\text{max}} = 1 \text{ heure/an} = 0.01\%$. Le terme $U + 3 \sigma_u$ correspond à la vitesse de vent effective pour une turbulence maximale mesurée en une heure par moyennes de 3 secondes de mesures.

Il faut toutefois garder à l'esprit que si le confort des piétons lié à l'effet mécanique du vent nécessite que les vitesses de vent ne soient pas trop fortes ($U \leq 5\text{m/s}$), une bonne ventilation des rues pour assurer la qualité de l'air et leur confort respiratoire demande une vitesse de vent minimale de 2m/s au-dessus des toits.

Par ailleurs, la pollution atmosphérique ne devrait pas dépasser les seuils suivants afin de respecter le confort respiratoire des citoyens.

Polluant	Type de concentration	Valeur de la norme
SO ₂	Horaire	350 µg/m ³
	Journalière	125 µg/m ³
NO ₂	Horaire	200 µg/m ³
	Annuelle	40 µg/m ³
PM10	Journalière	50 µg/m ³
	Annuelle	20 µg/m ³
Pb	Annuelle	0.5 µg/m ³
O ₃	8h-max	120 µg/m ³
CO	8h	10 µg/m ³
Benzène	Annuelle	5 µg/m ³

Du point de vue quantitatif de la gêne sonore en ville, les niveaux sonores équivalents ($L_{\text{Aeq},8\text{h}}$) doivent être strictement limités dans les espaces publics à une valeur de 65 dB(A) en journée et à une valeur de 60 dB(A) la nuit.

Il y a quatre conclusions importantes pour les caractéristiques physiologiques du confort visuel des piétons :

- à l'exception de rues très étroites et profondes ou de certaines arcades, la lumière naturelle est toujours suffisante dans les espaces urbains du point de vue du confort visuel.
- il faut favoriser les zones où le ciel occupe une plus grande partie du champ visuel que les bâtiments environnants. En première approximation, ces zones correspondent aux parties de l'espace pour lesquelles le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de l'espace reste inférieur à 1/2 (c'est-à-dire $H/W < 0.5$).
- pour correspondre aux préférences des utilisateurs de ces espaces, le potentiel d'ensevelissement direct d'un espace public devrait couvrir entre 20% et 80% de sa surface totale quelle que soit l'heure ou la saison.
- Les problèmes majeurs rencontrés à l'extérieur du point de vue quantitatif du confort visuel sont de deux types :
 - en journée, les risques d'éblouissement qui sont le plus souvent générés par les réflexions spéculaires du rayonnement solaire direct sur des surfaces très réfléchissantes.
 - après le coucher du soleil, le mauvais éclairage artificiel des espaces publics.

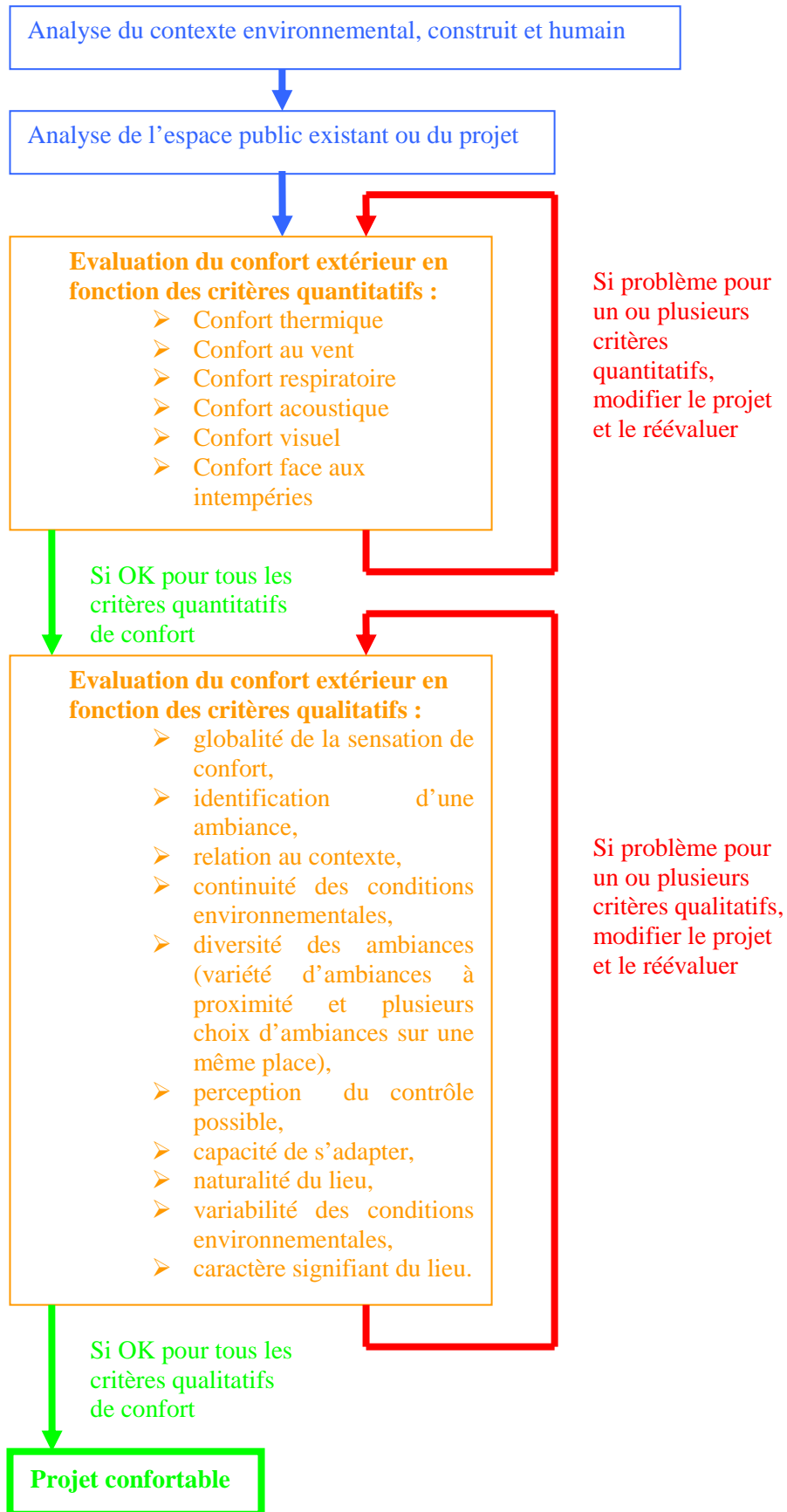
Un élément important du confort physiologique constitue le fait de pouvoir être à l'abri des intempéries (pluie, neige,...). Dans les pays à fortes précipitations, toutes les protections contre les intempéries sont à valoriser : auvents, galeries,...

Différents critères psychologiques du confort humain à l'extérieur ont pu être mis à jour dans cette étude. Nous devons être conscients des implications significatives de ces éléments psychologiques sur le confort extérieur. Les concepteurs de l'espace urbain devraient tenir compte de ces paramètres pour améliorer la qualité de nos villes. Nous avons relevé dix paramètres qui influencent de manière significative l'évaluation qualitative du confort à l'extérieur. Il s'agit de:

- la globalité de la sensation de confort,
- l'identification d'une ambiance,
- la relation au contexte,
- la continuité des conditions environnementales,
- la diversité des ambiances (qui comprend la nécessité de créer une variété d'ambiances à proximité ainsi que plusieurs choix d'ambiances sur une même place),
- la perception du contrôle possible,
- la capacité de s'adapter,
- la naturalité du lieu (qui est aussi marquée par le besoin de stimulations environnementales en milieu urbain),
- la variabilité des conditions environnementales,
- le caractère signifiant du lieu.

Nous conseillons d'évaluer dans un premier temps une situation quantitativement suivant les moments les plus importants de l'année et de la journée pour pouvoir établir des % de temps représentant telle ou telle situation. A partir de ces données, il est possible d'évaluer les critères qualitatifs décrits. Ces situations devraient alors être évaluées séparément et dans leur globalité pour voir quels sont les éléments environnementaux utiles à modifier pour que la plupart du temps, en fonction des activités les plus fréquentes prévues, le confort global (quantitatif et qualitatif) des personnes soit assuré.

Le graphe ci-dessous synthétise la nouvelle méthode d'évaluation du confort extérieur qui a été développée dans le cadre de ce doctorat.



Malgré la complexité des interrelations ci-dessus, il est possible de considérer quelques pistes de conception qui vont influencer le confort des piétons en site urbain. Ainsi, il est déjà possible de modifier les conditions de confort d'une place par plusieurs moyens:

- en modifiant le microclimat d'un lieu par l'adaptation d'un de ses paramètres physiques, en général le rayonnement solaire ou le vent.
- en contrôlant le niveau sonore d'un espace.
- en valorisant les spécificités d'un lieu.
- en assurant la cohérence entre les différents types de stimulations environnementales (ex : ambiance sonore et vision).
- en tenant compte du type de public habituel.
- en suscitant des activités adaptées au lieu.
- en créant des lieux de transition entre zones différentes (intérieur/extérieur, etc.) pour atténuer les contrastes par rapport à l'expérience passée récente et améliorer la continuité des conditions climatiques et sonores.
- en créant une ambiance différente de celle des places situées à proximité.
- en proposant plusieurs possibilités d'ambiances dans un même lieu: de l'ombre et du soleil, du vent et un abri, de l'animation et du calme,
- en augmentant le contrôle perçu (par exemple par des parasols mobiles, ...).
- en augmentant la naturalité du lieu.
- en jouant sur la qualité signifiante des éléments d'aménagement du lieu.
- en assurant un équilibre global entre ses différents critères de confort.

La comparaison des critères de confort à l'extérieur avec la définition des concepts fondateurs d'un lieu public définis dans la première partie de cette thèse montre qu'il y a des **similitudes évidentes entre les critères qualitatifs du confort à l'extérieur et les qualités de conception globales des places publiques durables**. Nous pouvons ainsi créer un tableau de correspondances :

Stratégie	Lieu public	Environnement confortable
Contextualité	Intégration	Relation au contexte et continuité des conditions environnementales.
	Participation	Perception du contrôle environnemental possible
	Adaptation	Capacité de s'adapter
Coexistence	Rassemblement	Plusieurs choix d'ambiances microclimatiques sur une même place
	Diversité	Diversité des ambiances situées à proximité
	Ouverture à l'altérité	Variabilité des conditions environnementales
Cohérence	Identité	Identification d'une ambiance et globalité de la sensation de confort
	Sens	Caractère signifiant du lieu
	Naturalité	Naturalité du lieu

Ces similitudes soulignent le fait que la question du confort dans les espaces publics extérieurs est une question autant architecturale que technique. On peut donc y répondre par une méthode de conception adaptée. Pour concevoir des espaces publics confortables, le concepteur doit intégrer les contraintes liées au confort des piétons dans une conception globale de qualité, équilibrant de manière harmonieuse les principes de contextualité, de coexistence et de cohérence.

D'autre part, la découverte de ces similitudes nous permet d'affirmer que **notre stratégie de développement durable des espaces publics est aussi un outil qui favorise le confort des piétons en ville**. Ainsi, cette stratégie de conception et de rénovation durable des espaces publics nous permet d'appréhender ensemble l'être et son environnement, le local et le global, le point de vue humain et la multi-dimensionnalité de notre milieu, c'est-à-dire la véritable complexité des conditions du comportement humain.

Le microclimat d'un lieu est une clé de conception pour des ambiances architecturales et urbaines de qualité. Son utilisation judicieuse est un atout majeur pour développer les qualités architecturales, énergétiques et environnementales de nos villes. Cependant, bien que la conception d'un bâtiment du point de vue bioclimatique a été largement analysée, l'influence de la forme urbaine sur le microclimat extérieur est en général négligée. De plus, un de ses paramètres fondamentaux, le vent, est encore très peu étudié. Il y a donc actuellement un manque crucial d'informations et d'outils faciles et rapides permettant aux concepteurs de projets urbains d'intégrer la préoccupation microclimatique.

Les grands centres urbains ont vu leur microclimat changer au rythme de l'activité humaine. Les millions de déplacements automobiles quotidiens, le chauffage et l'éclairage des édifices ou des lieux publics sont autant de sources de chaleur et de pollutions diverses qui modifient le microclimat urbain. Des éléments urbanistiques tels que la minéralisation généralisée des sols ou la présence de bâtiments élevés ont également un impact fondamental sur les modifications des différents paramètres climatiques en ville. En concentrant ses activités en ville, l'homme y modifie les différents paramètres de son microclimat : température moyenne plus élevée, vitesses de vent plus faibles mais turbulences plus élevées, modification des précipitations, nébulosité due à la pollution de l'air,...

Le microclimat réel sur un site peut être significativement différent de celui mesuré à la station météorologique, surtout si le projet est situé en milieu urbain. Si, à l'heure actuelle, les seules données climatiques dont nous disposons proviennent de stations météorologiques en site dégagé, comment tenir compte de l'effet de l'urbanisation dans notre conception architecturale et urbaine? Comment prédire et simuler ces effets? Dans cette thèse de doctorat, nous avons analysé les caractéristiques microclimatiques et les spécificités du microclimat urbain (la pollution de l'air, l'effet d'îlot de chaleur, la modification du rayonnement solaire, la modification des mouvements d'air et la modification de l'humidité et des précipitations). Les paramètres climatiques (température, rayonnement solaire et terrestre, vent, précipitations et humidité) sont modifiés par la topographie, la nature du sol et l'aménagement d'un site (présence et orientation d'obstacles construits et végétaux). En milieu urbain, les éléments de conception essentiels sont la hauteur des édifices, l'espacement entre les bâtiments, l'homogénéité ou la variabilité des hauteurs des édifices, l'orientation des rues et des places, la distribution des espaces verts. Cette partie décrit également les méthodes d'évaluation des paramètres microclimatiques en milieu urbain, pour aider les concepteurs et les bureaux d'études à intégrer les paramètres microclimatiques dans le processus de conception de leurs projets. **Le microclimat urbain suit une logique propre qui devrait enrichir tout projet urbain.**

Sous un climat tempéré, ce qui est le cas de la Belgique, les deux éléments climatiques essentiels pour le confort des piétons à l'extérieur sont le rayonnement solaire et le vent. Le rayonnement solaire est déjà largement étudié dans la littérature scientifique ; nous nous sommes contentés d'en synthétiser les éléments

importants du point de vue de la conception architecturale et urbanistique. Par contre, cette recherche a mis en évidence un manque réel d'études scientifiques et d'outils d'aide simplifiés pour comprendre l'écoulement du vent en milieu urbain, malgré son importance significative sur le confort des personnes et les consommations énergétiques des bâtiments. C'est pourquoi une partie importante de ce doctorat a été dédiée à l'analyse des outils de simulation du vent et à l'élaboration d'outils quantitatifs simplifiés pour l'évaluation du vent autour des constructions.

Nous avons comparé les différents outils de simulation du vent et nous avons choisi de travailler avec les simulations numériques en mécanique des fluides (CFD) et plus particulièrement avec le logiciel FLUENT. Les avantages des simulations CFD par rapport aux résultats de tests en tunnel à vent sont:

- la relative rapidité des simulations numériques par rapports à des essais en soufflerie aérodynamique,
- le traitement des résultats sur l'ensemble du domaine simulé.
- la clarté de la visualisation des mouvements d'air qui en font un outil de compréhension et de présentation des résultats remarquable.
- la CFD est un outil de pointe récent mais qui s'améliore d'année en année.
- contrairement aux tests en tunnel à vent, les simulations CFD ne nécessitent aucune réduction d'échelle, ce qui élimine donc certaines erreurs dues à la réduction des géométries complexes ou aux facteurs d'échelle employés.

L'écoulement du vent autour d' « objets non profilés » est un phénomène très complexe à simuler. Une validation scientifique de l'outil de simulation choisi était donc nécessaire. La **validation de FLUENT** comme outil d'étude du vent en milieu urbain a été réalisée en comparant mes résultats de simulations avec des tests en tunnel à vent. Cette validation s'est faite en trois étapes : l'analyse de l'écoulement du vent autour d'un bâtiment isolé, l'analyse de l'écoulement du vent autour de groupes de deux bâtiments et enfin l'analyse de l'écoulement du vent en milieu urbain dense. Cette validation montre que la distribution du vent autour des bâtiments peut être simulée numériquement avec un très haut degré de précision.

Les simulations réalisées pour la validation de FLUENT nous ont permis de déterminer des **règles pour l'élaboration des simulations numériques** et le choix des différents paramètres dans le cadre d'études du vent autour des bâtiments: la taille du domaine de simulation, la précision du maillage, le modèle de turbulence, l'ordre de précision du calcul, les conditions aux limites et le profil de vent utilisé. Toutes nos simulations d'environnements urbains ont ensuite été réalisées selon ces règles, en utilisant le modèle de turbulence RSM (Reynolds-stress model) de FLUENT convergé au second ordre. Des maillages de grande taille (un million à deux millions de cellules) ont été élaborés avec un raffinement important autour des bâtiments simulés (mailles de 0.5m de haut au niveau des façades au vent et des zones critiques de l'écoulement qui l'entourent). Toutes nos simulations ont été réalisées avec un profil de vent urbain. Cette validation et ces règles d'élaboration de simulations numériques sont une base importante pour des recherches scientifiques ultérieures dans le domaine de l'interaction entre le vent et les bâtiments.

En suivant ces règles d'élaboration d'une simulation CFD, l'erreur maximale atteinte entre nos simulations et des tests en tunnel à vent pour l'écoulement du vent autour d'un bâtiment isolé ou d'un groupe de deux bâtiments est inférieure à 15% sur l'ensemble de la zone où les vitesses de vent sont inconfortables pour les

piétons et elle n'est que de quelques pourcents (<5%) pour la pointe maximale des survitesses. De plus, la position de la survitesse maximale est très bien simulée.

Vu la complexité de l'écoulement du vent en milieu urbain dense, les méthodes CFD ne donnent pas une équivalence parfaite de la vitesse de l'air point par point dans un tel contexte construit. Il faut signaler que des erreurs de l'ordre de 40% ou même plus peuvent se produire très localement. En revanche, en suivant les règles que nous avons élaborées pour la construction d'une simulation dans un milieu urbain dense (maillage de 0.5m de haut et 2m x 2m de large sur l'ensemble de la zone simulée), nous obtenons des résultats moyens de qualité. Pour les rues exposées au vent dans un tissu de hauteur homogène, l'erreur relative est inférieure à 15% entre la moyenne des vitesses simulées et la moyenne des vitesses mesurées en tunnel à vent sur l'ensemble de la rue. Pour les sections de rues abritées du vent dans un tissu de hauteur homogène, l'erreur relative est inférieure à 20% entre la moyenne des vitesses simulées et la moyenne des vitesses mesurées en tunnel à vent sur l'ensemble de ces sections de rues protégées. Cette erreur est légèrement plus élevée que les autres limites acquises jusqu'à présent mais il est important de se souvenir qu'elle concerne des vitesses de vent très faibles où le confort des personnes n'est pas mis en cause.

A l'intérieur d'un tissu urbain de hauteur homogène comprenant un bâtiment élevé, l'erreur relative est inférieure à 20% entre la moyenne des vitesses simulées et la moyenne des vitesses mesurées en tunnel à vent, pour les différentes zones d'écoulement, y compris dans la zone de sillage du bâtiment élevé. Cette limite peut être abaissée à 10% en utilisant des mailles mesurant horizontalement 1.5m x 1.5m sur l'ensemble de la zone à quantifier. La pointe maximale des survitesses générées au pied d'un bâtiment élevé situé au sein d'un milieu urbain dense de petite hauteur est simulée avec une précision de 15%. Les zones de survitesses importantes en milieu urbain dense sont bien localisées mais les pointes de survitesses peuvent être décentrées localement.

Il est donc important de considérer les simulations CFD de milieux urbains denses comme un outil d'aide pour l'évaluation des moyennes de vitesses du vent sur des morceaux d'espaces publics mais pas comme un outil de détermination précise de la vitesse du vent en un point déterminé à l'intérieur du milieu urbain. Des résultats encore plus précis peuvent toutefois être obtenus si les maillages sont fortement densifiés, ce qui n'était pas possible dans cette thèse en fonction des moyens de calcul dont nous disposions.

Enfin, ces simulations nous ont convaincu que le logiciel FLUENT est un outil remarquable pour la compréhension des mouvements d'air autour des bâtiments grâce aux résultats obtenus sur l'ensemble du domaine simulé. En outre, la majorité des essais en tunnel à vent ne donnent pas des résultats plus précis au niveau des survitesses critiques que les simulations numériques puisque l'incertitude du résultat dépend dans le premier cas de la position exacte du capteur placé dans le modèle réduit et dans le second des erreurs numériques générées par les imprécisions du maillage et des modèles de turbulence utilisés.

Les simulations réalisées dans cette section nous permettent donc d'affirmer que FLUENT est un bon outil d'évaluation des effets critiques du vent autour des bâtiments. Nous estimons que le logiciel a été validé pour l'évaluation tant quantitative que qualitative des survitesses autour d'un bâtiment isolé, autour d'un petit groupe de bâtiments, en milieu urbain dense de hauteur homogène et

relativement faible ainsi qu'en milieu urbain dense de hauteur faible comprenant un bâtiment élevé.

Nos simulations numériques de l'écoulement du vent autour des bâtiments, nous ont permis d'élaborer des outils quantitatifs simplifiés pour l'évaluation des vitesses du vent autour de bâtiments de formes simples. Il est important de souligner que nous avons fait le choix de baser nos simulations et nos outils quantitatifs sur une analyse du projet en fonction des mécanismes d'écoulement du vent plutôt qu'une analyse basée uniquement sur la forme des bâtiments. Ce choix permet en effet de diminuer le nombre de simulations à réaliser et en même temps de faciliter la compréhension des phénomènes aérodynamiques. Pour chaque type d'effet du vent autour des bâtiments, des outils quantitatifs et des conseils pratiques de conception sont donnés par rapport au problème considéré.

Les outils d'évaluation des survitesses de vent autour des bâtiments que nous avons élaborés à l'aide de nos simulations FLUENT permettent de quantifier et de comprendre les effets suivants :

- tous les mécanismes critiques de l'écoulement du vent autour de bâtiments isolés de formes simples :
 - l'effet de coin,
 - l'effet de cisaillement,
 - l'effet de passage sous immeuble,
 - le rouleau tourbillonnaire,
 - l'effet de barre.
- l'effet de protection dans le sillage d'un bâtiment isolé.
- trois mécanismes critiques du vent autour de groupes de bâtiments :
 - l'effet Venturi,
 - l'effet Wise,
 - l'effet de double coin.
- trois types d'écoulement du vent dans un milieu urbain dense :
 - l'effet de masque urbain,
 - l'effet canyon
 - l'implantation d'un bâtiment élevé dans un milieu urbain de faible hauteur.

Les autres mécanismes critiques de l'écoulement du vent autour de groupes de bâtiments (effet de bâtiments en quinconce, effet de canalisation, effet de maille, effet d'écran linéaire et effet de pyramide), l'effet de la végétation et les autres mécanismes spécifiques de l'écoulement du vent en milieu urbain dense (ensembles de bâtiments élevés) sont expliqués et quantifiés à partir de résultats trouvés dans la littérature.

La méthodologie développée dans cette thèse peut être utilisée dans l'avenir pour continuer de produire des outils quantitatifs simplifiés pour l'ensemble des mécanismes critiques du vent, y compris au sein d'un milieu urbain complexe, ou pour réaliser des études spécifiques d'un contexte particulier à l'aide de simulations CFD.

Dans cette thèse, nous avons ensuite étudié la qualité sonore de l'environnement urbain et l'effet de ce domaine sur une conception du paysage urbain de qualité. Nous désirons entre autres attirer l'attention des concepteurs et des décideurs sur le fait que la conception d'espaces publics confortables pour les piétons du point de vue acoustique nécessite une étude plus complexe que la seule évaluation du

niveau sonore en dB(A) : la qualité sonore d'une ambiance n'est pas équivalente au niveau de bruit mesuré dans ce lieu. La méthodologie que nous proposons est la combinaison intelligente de cartes de bruit avec une approche perceptuelle de la qualité acoustique d'une ambiance urbaine: les promenades sonores. Cette méthode permet de travailler sur l'acoustique urbaine à l'échelle des rues, des places, des parcs,...

Finalement, cette thèse de doctorat propose des règles de conception pour l'intégration des différents paramètres microclimatiques et acoustiques dans les projets urbains. Cette stratégie des ambiances urbaines est développée en un ensemble de principes d'intervention formant un canevas pour les actions futures aux deux niveaux d'action de la conception urbanistique : la planification urbaine et la morphologie urbaine.

Au niveau de la planification urbaine, les quatre éléments de composition essentiels à cette échelle sont l'implantation du projet, la densité construite, les moyens de transport utilisés et la répartition des zones d'espaces verts.

Lors de la création d'un nouvel ensemble urbain, il y a lieu de choisir le terrain idéal d'un point de vue microclimatique. Les industries polluantes seront placées sous le vent de la ville par rapport aux vents dominants, ainsi que toutes les infrastructures bruyantes telles que les aéroports,... La densité idéale est celle de la ville compacte car c'est la configuration urbaine la plus favorable aux gains d'énergie. Il est également important de prévoir des transports en commun efficaces ainsi que d'offrir une abondance d'espaces publics de rencontre et de trajets continus pour valoriser l'utilisation de la marche et du vélo.

C'est au niveau de la morphologie urbaine, que les enjeux microclimatiques sont les plus importants. Les éléments de conception essentiels sont la hauteur des édifices, l'espacement entre les bâtiments, l'homogénéité ou la variabilité des tailles et des hauteurs des coupes, l'orientation des rues et des places, la distribution des espaces verts. Le choix des types de matériaux de surface et la présence d'eau sont également des éléments à analyser.

Les objectifs de conception de la morphologie urbaine pour le confort des piétons sont de :

- limiter les sources de pollution (air, eau, sol, bruit).
 - Limiter la circulation automobile
 - ...
- Générer un environnement confortable du point de vue physiologique par l'évaluation des différents paramètres physiques et leur adaptation éventuelle si nécessaire. Par exemple :
 - Créer des places et des promenades exposées au soleil en hiver mais partiellement ombragées en été,
 - Protéger les espaces publics des vents froids et dominants,
 - Eviter de concevoir des bâtiments élevés,
 - Assurer la ventilation des espaces publics,
 - ...
- Favoriser l'adaptation psychologique des piétons.

Pour limiter les consommations d'énergie d'un bâtiment, la réflexion énergétique, envisagée dès le choix du lieu d'implantation, s'attachera à réduire toutes les sources de consommation. Citons quelques stratégies importantes :

- diminuer l'énergie liée aux transports effectués par les utilisateurs du bâtiment.

- diminuer l'énergie liée au chauffage, au refroidissement et à l'éclairage du bâtiment. La conception des bâtiments et des espaces publics doit
 - maximiser les gains solaires en hiver.
 - minimiser les pertes de chaleur en période de chauffe.
 - offrir la possibilité de refroidir le bâtiment grâce à la ventilation naturelle.
 - offrir la potentialité d'un éclairage naturel du bâtiment conçu et des bâtiments environnants.
- valoriser les ressources locales.
- favoriser les énergies renouvelables.

Pour limiter l'empreinte écologique de nos urbanisations, il faut en plus :

- réduire l'utilisation d'énergie due aux transports en augmentant la densité construite, en améliorant la distribution des transports en commun et en assurant des cheminements confortables pour les piétons et les cyclistes.
- favoriser l'utilisation de l'énergie provenant des sources d'énergie renouvelable.

Voici quelques règles simples pour assurer le confort des piétons dans les espaces publics en fonction de l'ensoleillement:

- les bâtiments les plus élevés sont placés du côté nord du site, pour tenir compte de l'effet d'ombrage.
- des hauteurs plus faibles sont conservées du côté sud.
- la création des places présente une orientation préférentielle vers le sud.
- l'ensoleillement est favorisé sur les places en hiver mais un ombrage est au moins partiellement accessible en été (20 à 80% de la surface totale). L'utilisation d'arbres à feuilles caduques est un moyen privilégié pour le confort des piétons.
- il est parfois possible de profiter de la topographie pour assurer un meilleur accès au soleil de tous les bâtiments.

Dans les climats froids et tempérés, les espaces ouverts devraient généralement être :

- assez larges pour permettre un accès au soleil dans les espaces publics,
- orienter les bâtiments pour qu'ils puissent profiter au maximum des gains solaires en hiver. Ainsi, une orientation E-O des rues est toujours idéale.

En général en Belgique, il est souhaitable que les angles d'obstruction des bâtiments ne dépassent pas 25° pour l'angle vertical sur une section angulaire allant du SE au SO. Mais il serait idéal d'avoir au moins une distance entre bâtiments égale à la hauteur solaire le 21 décembre afin de permettre au soleil d'hiver d'éclairer les bâtiments ; cet angle vaut 15.8° à Uccle. De plus, vu qu'en Belgique le ciel est souvent couvert, il est judicieux de choisir des surfaces de sol qui soient plutôt claires pour augmenter les réflexions lumineuses. De même au niveau des façades, les surfaces exposées au sud, devraient présenter des coefficients de réflexion plus élevés pour renvoyer la lumière vers l'espace public et les bâtiments d'en face. Il faut toutefois éviter les surfaces très réfléchissantes (miroir,...) au sud car elles peuvent causer de l'éblouissement.

Essayer de créer des microclimats urbains proches de la zone de confort pour les piétons permet de limiter fortement les dépenses énergétiques des bâtiments car ce sont aussi les températures qui demandent le moins d'énergie pour chauffer ou refroidir l'intérieur des bâtiments.

Les éléments suivants aident à limiter fortement les pertes de chaleur en période de chauffe, ce qui est un critère de conception essentiel en climat tempéré :

- la densité du bâti et la concentration des activités. L'îlot de chaleur est bénéfique pour notre climat au niveau des consommations d'énergie des bâtiments : si la température extérieure est plus chaude, la différence de température int/ext est plus faible, en période de chauffe, ce qui réduit les pertes de chaleur à la fois par conduction et ventilation/infiltration.
- la protection par rapport aux vents dominants, grâce à l'effet de masque urbain, à une meilleure étanchéité des bâtiments, à la réduction des surfaces exposées au vent ou à l'installation d'écrans extérieurs (bâtiments ou murs de grande longueur, végétation, brise-vents, etc).
- l'utilisation de la compacité du bâti, c'est-à-dire réduire le rapport entre surfaces et volumes pour créer des bâtiments compacts. Des maisons individuelles consomment jusqu'au double d'énergie au m² que des appartements dans un immeuble multifamilial.
- éviter les sites situés au sommet des collines ou au fond des vallées ; la zone intermédiaire est la plus bénéfique.

Pour conserver un minimum d'effet d'îlot de chaleur urbain et donc limiter les consommations de chauffage des bâtiments tout en élargissant la période de confort dans les espaces publics urbains en Belgique, nous devrions concevoir une morphologie urbaine dont le rapport H/W ne descend pas en-dessous de 0.4. Une manière d'augmenter la densité construite et l'efficacité énergétique simultanément consiste à augmenter la compacité du tissu urbain tout en conservant une profondeur de bâtiments faible (de l'ordre de 10 à 12m), avec une orientation solaire appropriée des façades.

Au niveau thermique, on peut aussi profiter de l'ensoleillement en plaçant des matériaux à forte inertie thermique au sud, créer des espaces de transition ou réguler la température grâce à des surfaces d'eau et à la végétation.

Par rapport au vent, il est nécessaire :

- de protéger les places des vents froids et dominants
- d'éviter que les bâtiments ou le paysage ne génère des turbulences inacceptables pour le confort des piétons. Les bâtiments très élevés sont à proscrire des centres urbains.
- de favoriser les possibilités de ventiler l'espace pour évacuer la pollution et rafraîchir l'ambiance en été. On peut par exemple profiter de la topographie et de la végétation pour guider les vents et permettre une ventilation naturelle des espaces publics.

Pour le confort des piétons, les tissus denses de hauteur homogène relativement faible, tels que les centres des villes traditionnelles, assurent globalement un excellent confort au vent. En effet, lorsque les bâtiments d'une ville sont approximativement de la même hauteur, il y a une séparation entre le flux d'air au-dessus des bâtiments et l'air qui circule dans les rues. Les quelques accidents aérodynamiques à craindre se situent alors à la périphérie et dans les zones très dégagées. Cependant, les villes contemporaines présentent des constructions très élevées qui entraînent des rafales de vent inacceptables au niveau piéton. Il est indispensable d'étudier l'impact du vent au niveau du sol pour des bâtiments dont la hauteur est supérieure ou égale à 40m mais il est prudent d'étudier cet aspect dès

qu'un bâtiment de 15 à 40m de haut présente une hauteur au moins égale au double de la hauteur moyenne de son environnement bâti.

Lorsqu'un projet présente des risques d'inconfort au niveau piéton à cause du vent, il faut évaluer le projet en fonction des différents mécanismes critiques d'écoulement du vent (l'effet de coin, l'effet de sillage, l'effet de trous sous immeuble, le rouleau tourbillonnaire, l'effet de barre, l'effet Venturi, l'effet Wise, l'effet de double coin, l'effet de bâtiments en quinconce, l'effet de canalisation linéaire). En milieu urbain, ces effets apparaissent à la base des bâtiments dont la hauteur est nettement plus élevée que le plan masse moyen et au pied des ensembles de tours.

Voici quelques règles de bonne pratique qui permettent d'atténuer le problème, lorsqu'un de ces écoulements critiques apparaît dans le projet:

- réduire la hauteur du bâtiment,
- éviter les larges façades faisant face au vent dominant, orienter de préférence l'axe principal des bâtiments élevés dans le sens des vents les plus fréquents,
- ceinturer les bâtiments élevés par des constructions plus basses,
- densifier l'environnement,
- prévoir des éléments poreux (végétation,...) près des coins ou des passages sous le bâtiment,
- augmenter la rugosité des façades par des balcons (>6m de large).
- ...

Les dispositifs de correction (brise-vent,...) sont toujours moins efficaces qu'une conception appropriée du bâtiment (forme et taille). Pour les bâtiments très élevés, la meilleure forme pour la protection au vent est toujours celle qui minimise sa hauteur.

Il faut toutefois faire attention qu'un excès de protection au vent peut rendre l'air des villes irrespirable. Dans tous les climats, les espaces publics qui subissent des sources de pollution locales (trafic,...) doivent être assez larges pour permettre au vent de disperser la pollution. Il faut également dimensionner des hauteurs de cheminées suffisamment hautes pour empêcher que le vent ne redirige la pollution générée en toiture vers le sol. Une géométrie de rue correspondant à $H/W \leq 0.7$ associé avec une densité construite d'environ 0.25 et une orientation préférentielle des axes majeurs de 30 à 45° par rapport aux vents dominants fournit la meilleure situation pour la dispersion des polluants locaux.

L'inhomogénéité des hauteurs du bâti influence l'écoulement du vent en milieu urbain ($H \geq 1.5$ h). Des différences de hauteurs raisonnables peuvent à la fois favoriser la dispersion des polluants tout en conservant le confort des piétons du point de vue de l'effort mécanique du vent. Enfin, l'îlot de chaleur crée des brises thermiques entre la campagne et le centre-ville.

En Belgique, si on compare les formes de tissus urbains en fonction de différents critères de limitation des consommations d'énergie et de maximisation du confort, on trouve que le rapport H/W idéal vaut 0.4 à 0.5 et que la densité construite idéale varie entre 0.2 et 0.25.

Pour la Belgique, le critère de l'accès au soleil est l'élément le plus critique à prendre en compte lors de la conception de nouveaux quartiers. En Europe, les

centres-villes présentent toutefois des rapports H/W de 0.75 à 1.7 en moyenne, ce qui est nettement plus élevé que ce que nous recommandons. Les centres-villes d'Amérique du Nord, avec leurs gratte-ciels, atteignent une moyenne de 1.15 à 3.3, ce qui est encore bien pire. Du point de vue de la densité construite, les villes européennes sont également plus denses que les villes nord-américaines à cause de leurs immenses suburbs. Les valeurs que nous avons déterminées devraient toutefois permettre d'encore améliorer la morphologie urbaine de nos villes à travers la conception des nouveaux quartiers et la rénovation des quartiers existants.

Dans les pays fortement pluvieux, il est nécessaire d'offrir des espaces et des parcours extérieurs couverts. Pour se protéger de la pluie, les arcades et les galeries couvertes sont des éléments essentiels pour une conception microclimatique de qualité. Ainsi, en Belgique, les auvents et galeries sont toujours bienvenues pour nous protéger des intempéries.

Il est indispensable de tenter de réduire les eaux de ruissellement dans tout environnement construit. La première action à poser est donc de permettre aux eaux de pluies de s'infiltrer dans le sol, le plus rapidement possible pour qu'elles restent propres, afin de continuer à alimenter les nappes phréatiques. Une végétation adaptée retient les eaux de pluies et réduit considérablement le ruissellement. Des revêtements filtrants, des fossés, des puits ou des bassins filtrants permettent également d'éviter le ruissellement en surface. Ensuite, pour les eaux de ruissellement inévitables, il faut tenter de ralentir leur écoulement vers l'aval afin d'éviter les inondations. Le but est de supprimer les canalisations d'eaux pluviales enterrées. Les zones de rétention, bassins d'orages végétalisés, étangs ou canaux aménagés au sein même des quartiers recueillent les eaux de pluie et recréent ainsi des biotopes. Ainsi, la promotion de la perméabilité des surfaces dans les zones urbaines et la séparation du ruissellement des eaux de pluies du système d'égouts pourraient contribuer à la recharge des nappes d'eau souterraines, à l'abaissement du coût de la collecte et de l'épuration des eaux usées et à la réduction des inondations urbaines.

Pour assurer une bonne qualité d'ambiance sonore en ville, il est nécessaire :

- d'opérer un travail de limitation des sources de bruit,
- de limiter la propagation du bruit en milieu urbain,
- de valoriser les qualités sonores du lieu.

Améliorer le confort acoustique en ville peut être mis en œuvre grâce à différents moyens :

- diminuer l'intensité du trafic (rues piétonnes, limitation des parkings en ville, sensibilisation de la population, canalisation du trafic de transit sur quelques grands axes,...),
- diminuer la vitesse des véhicules (aménagement locaux de voiries, zones 30, etc),
- choisir un revêtement de sol peu bruyant,
- augmenter la distance entre la source de bruit et les zones de détente,
- utiliser la continuité du bâti comme barrière acoustique,
- entourer un espace de détente par un ensemble de bâtiments,
- utiliser des éléments sonores agréables (ex : fontaines) comme masques sonores.
- créer des différences de niveaux entre la source de bruit et les espaces de détente.

- ajouter des espaces tampons entre des ambiances acoustiques trop contrastées.
- utiliser des matériaux absorbants.

La morphologie urbaine détermine la propagation du bruit routier autour des bâtiments et dans les espaces urbains extérieurs (rues, places, parcs, intérieurs d'îlots). Choisir un type de tissu urbain a donc des conséquences significatives sur les ambiances acoustiques des espaces publics. Il est possible de modifier les différents obstacles (bâtiments, ...) pour se protéger des sources de bruit. Des bâtiments mitoyens ou reliés entre eux par des murs ou murets (d'une hauteur supérieure à la source de bruit) constituent un obstacle efficace par rapport au bruit. Ainsi, les intérieurs d'îlots ont un univers sonore propre et relativement indépendant des bruits de la rue. Par contre, lorsque les bâtiments sont dispersés, le bruit s'engouffre entre les bâtiments.

Il est également important de prendre en compte le choix des matériaux de construction pour limiter les émissions de gaz à effet de serre ainsi que les implications énergétiques et visuelles de l'éclairage artificiel des espaces publics urbains. Enfin, l'utilisation des sources d'énergie renouvelable permet de limiter l'utilisation de sources d'énergie polluante. Les énergies renouvelables sont d'autant plus crédibles et rentables que les besoins énergétiques sont faibles.

Ainsi, grâce à la réalisation d'outils d'aide méthodologiques et techniques, ce doctorat comble le profond écart entre la pratique de la conception architecturale et les technologies actuelles de simulations du microclimat urbain, trop spécifiques et complexes pour les architectes et les urbanistes. Dès lors, les résultats et les outils d'aide produits par ce doctorat permettent enfin à la « contrainte » microclimatique de devenir un support de la création architecturale.

Cependant, pour que l'habitat microclimatique soit compatible avec des formes urbaines riches et complexes, le concepteur doit intégrer ces contraintes climatiques dans une conception d'ensemble. Ainsi, il est important de ne pas seulement imposer des critères géométriques et quantitatifs. Les bonnes solutions architecturales sont toujours un compromis entre les multiples exigences interdisciplinaires qui s'y rejoignent, dont le microclimat est un des facteurs permettant de poser des choix de définition de notre cadre bâti.

Prospectives...

Cette thèse de doctorat ouvre un champ de recherches très vaste. Citons quelques thèmes qui mériteraient d'être abordés dans les prochaines années...

Il serait intéressant de prolonger notre réflexion sur les principes de cohérence, de coexistence et de contextualité du milieu urbain. Une question essentielle est celle de l'échelle d'application idéale des différentes qualités urbaines mises en évidence, telles que le rapport entre ordre et désordre, la mixité sociale et fonctionnelle, les opportunités d'appropriation, ... Chaque caractéristique a-t-elle une échelle d'application privilégiée : le bâtiment, la rue ou la place, l'îlot urbain, le quartier ou la ville... ou bien peuvent-elles se décliner de manière variée à ces différentes échelles ? Il serait utile d'analyser et de comparer les différentes manières d'appliquer chacune de ces caractéristiques fondatrices de la soutenabilité des espaces publics aux différentes échelles du milieu urbain.

La majorité des modèles de simulations énergétiques des bâtiments adopte habituellement la perspective d'un bâtiment isolé (paramètres architecturaux et systèmes installés), en négligeant l'interdépendance entre le bâtiment et son contexte construit. Ainsi, l'effet de la géométrie urbaine sur les consommations énergétiques des bâtiments reste un sujet encore très peu étudié. L'influence de l'ombrage créé par les bâtiments voisins n'est prise en compte que par un logiciel énergétique sur trois. Des éléments aussi complexes que l'écoulement du vent en milieu urbain dense ou l'évaluation de l'effet d'îlot de chaleur ne sont jamais pris en compte.

Un domaine de recherche qui a reçu relativement peu d'attention ces dernières années est l'étude de comment minimiser les problèmes de la pollution atmosphérique urbaine à l'échelle locale. On pourrait par exemple étudier l'impact de l'emplacement et de la distribution des rues polluantes dans le tissu urbain ou approfondir l'étude du type de morphologie construite qui facilite la dispersion des polluants par le vent au niveau des espaces publics piétons et des façades des bâtiments.

Enfin, différents sujets interdisciplinaires ayant trait au développement durable des villes nécessitent des études plus poussées. Citons notamment l'influence de l'urbanisation sur la biodiversité, l'impact du renouvellement des espaces publics urbains sur la qualité des échanges interpersonnels dans les quartiers rénovés, les bénéfices économiques qu'on peut tirer d'une densité urbaine durable,...

Le mot de la fin...

Les outils développés dans cette thèse pour les architectes, les urbanistes et les décideurs politiques comprennent:

- une stratégie pour prendre en compte la problématique du développement durable des espaces publics urbains contemporains existants ou en phase de conception.
- une nouvelle méthodologie pour l'étude du confort des piétons à l'extérieur, basée sur des critères quantitatifs et qualitatifs.
- des règles de conception et différents modèles simplifiés pour prédire le confort physiologique des piétons (confort thermique, confort au vent, confort respiratoire, confort visuel et confort acoustique) en utilisant les données météorologiques disponibles et les caractéristiques de la morphologie urbaine.

Cette recherche devrait aider en pratique les architectes et les urbanistes à concevoir et évaluer les ambiances générées par leurs projets urbains dans le cadre du développement durable des villes. L'urbaniste et l'architecte disposent désormais des outils d'identification dans le tracé de leurs plans masses des zones susceptibles d'être critiques ou clémentes en fonction du microclimat et de l'acoustique. Ainsi, cette thèse de doctorat enrichit de manière évidente la connaissance des ambiances urbaines, tout en proposant des méthodes et des solutions applicables concrètement.

Cette approche devrait donc assister la conception des villes à travers la conception d'espaces ouverts de qualité, contribuant au développement durable des villes du futur. La diffusion de cette thèse devrait apporter de nombreux bénéfices environnementaux, sociaux et économiques à notre société grâce à un meilleur développement de nos urbanisations contemporaines. Citons notamment :

- la revalorisation de l'étude des espaces publics et du microclimat urbain.

- la mise en évidence de l'importance du point de vue humain et de son expérience corporelle dans tout projet urbain.
- l'information offerte aux décideurs politiques pour les aider dans la sélection des projets urbains.
- la formation des concepteurs de projet et donc la réalisation de meilleurs projets architecturaux et urbanistiques.
- la sensibilisation de la population aux problèmes de notre environnement bâti, ce qui devrait augmenter la responsabilité citoyenne.
- de nombreux impacts positifs dus à une conception microclimatique de nos espaces publics :
 - l'amélioration de la qualité de vie dans les espaces publics collectifs en ville (équité sociale, bien-être, ...),
 - l'accroissement de l'utilisation des places urbaines (mixité de la population, rencontres, visibilité sociale, démocratie, ...),
 - la diminution des consommations d'énergie des bâtiments (gains solaires, ventilation,...) et des espaces publics (diminution de la circulation automobile, valorisation des moyens de transport écologiques et communautaires,...).
 - des effets bénéfiques pour la planète (valorisation de l'image des villes, retour des habitants dans les centres de nos villes, diminution de l'étalement urbain,...),
 - la limitation de nuisances environnementales (diminution de la pollution, amélioration de la santé des habitants, ...).

Cependant, aucune méthode, aucun principe, aucune technique ne peut se substituer à l'intention architecturale, à l'écriture qui relie un espace à sa fonction tout en la transcendant. Là, est la nécessité de l'architecture, là est la responsabilité du concepteur, qui demeure le créateur d'un espace. Si l'étude des ambiances urbaines se base sur des données scientifiques, sa mise en application relève de la sensibilité et de la capacité de composition de l'auteur de projet.

Les outils développés dans cette thèse comprennent également une partie destinée aux chercheurs scientifiques:

- une validation du logiciel Fluent (CFD) pour l'étude de la vitesse moyenne du vent en milieu urbain.
- des règles pour l'élaboration de simulations CFD pour l'étude du vent autour des bâtiments. Ces règles comprennent le choix du type de maillage, le modèle de turbulence, la grandeur du domaine simulé, la taille des mailles, les paramètres de calcul et les conditions aux limites les plus judicieux dans l'écoulement du vent en milieu urbain.

Au-delà des travaux présentés ici, cette thèse permet de souligner l'intérêt colossal d'une démarche qui consiste à confronter les résultats issus de disciplines très variées et à tisser des liens entre différentes tentatives de compréhension de l'univers. Le développement durable de l'humanité nécessite une vision holistique et une grande interdisciplinarité. Il est donc important d'essayer de comprendre les lois qui nous gouvernent par une approche plus globale que celle à laquelle la recherche scientifique nous a habitués, de manière à mieux saisir la complexité du monde et les multiples interactions qui relient l'homme à l'univers, pour favoriser l'évolution de l'humanité sur Terre.

Dans ce doctorat, nous avons élargi le point de vue habituellement technologique et a-contextuel porté sur les phénomènes de confort extérieur et de microclimat urbain par la prise en compte du contexte global de l'urbanisation actuelle et de la

complexité de l'expérience humaine dans ses aspects psychologiques autant que physiologiques. Ainsi, ce doctorat devrait aider les concepteurs de projets urbains à tenir compte de la multi-dimensionnalité des interactions entre la morphologie bâtie et les ambiances urbaines, tout en s'inscrivant naturellement dans le choix conscient de favoriser le développement durable de l'humanité.

Enfin, cette thèse soulève une interrogation sur le type de société que nous désirons promouvoir et sur le développement de l'humanité (qui est fondamentalement éthique et pas seulement financier). Le temps est venu de tenir compte de l'importance fondamentale de la notion de qualité et de son rôle dans la production des phénomènes quantitatifs observables. Nous avons la certitude que la question du développement durable de l'humanité est un pas vers une transformation plus profonde : c'est vers une transmutation de l'être humain et de sa relation au monde que se porteront les recherches de demain. Ainsi, le développement durable serait une marche, un pallié entre croissance et transmutation. Ce doctorat a été rédigé dans le but de participer à une prise de conscience collective, qui ne peut se réaliser que par la sensibilisation du public, la formation des concepteurs de projets et l'information des décideurs politiques. **N'oublions pas que nous appartenons tous à des pays en voie de développement... durable ...**

Bibliographie

ANDRE-DUMONT Florence, **Le panel de citoyens : Quel Brabant wallon pour demain ? Vade-mecum d'une expérience de participation citoyenne**, Fondation pour les Générations Futures, Namur, 2002.

ANSAY Pierre, SCHOONBRODT René, **Penser la ville : choix de textes philosophiques**, Archives d'Architecture Moderne, Bruxelles, 1989.

ARCHITECTURE ET CLIMAT, Gratia Elisabeth, Saelen Michel, **Opti-maisons**, Louvain-la-Neuve, 1998.

ARCHITECTURE ET CLIMAT, **Energie+, version 4 : conception et rénovation énergétique des bâtiments tertiaires**, Ministère de la Région Wallonne, Namur, 2004.

ARENDRT Hannah, **Condition de l'homme moderne**, Ed. Calmann-Lévy, Paris, 1983.

ARENS E., LEE E. S., BAUMAN F., FLYNN L., **SITECLIMATE: a program to create hourly Site-specific Weather Data**, 1985

ASHRAE, **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, ANSI/ASHRAE Standard 55-1981, 1981.

ASHRAE, **Airflow around buildings**, in ASHRAE Handbook-Fundamentals, American Society of Heating, refriger. And air-cond., 2001

ASHRAE, **Thermal comfort**, in Ashrae Handbook-Fundamentals, American society of Heating, Refrigerating and air conditioning, 2001.

ATU, **Travail urbain, espace public et démocratie locale**, Cahier n°1- Atelier de Travail Urbain de Grande-Synthe, 1995.

AULICIEMS A., **Thermal comfort**. In Building Design and Human Performance. New York: Ruck. 1989.

BAETKE F., WERNER H., WENGLER H., **Numerical simulation of turbulent flow over surface mounted obstacles with sharp edges and corners**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 35, 1990, 129-147.

BAKER Nick, **We are all outdoor animals**. In Koen Steemers and Simos Yannas, Architecture City Environment, Proceedings of PLEA 2000. London: James and James. 2000.

BAKER N., STEEMERS K., **Energy and Environment in Architecture : A Technical Design Guide**, E&FN Spon, Londres, 2000

BAKER N., **Designing for comfort, Recognising the Adaptive Urge**. Cambridge: Martin Center for Architectural and urban Studies, 2001.

BERANEK W.J., **Wind environment around single buildings of rectangular shape**. Heron 29-1:3-33. 1984.

BERQUE Augustin, **Médiance, de milieux en paysage**, GIP RECLUS, Montpellier, 1990.

BERQUE Augustin, **Etre humains sur la terre, principes d'éthique de l'écoumène**, Gallimard, 1996.

BERQUE Augustin, **ECOUMENE, Introduction à l'étude des milieux humains**, Editions Belin, France, 2000.

BERTRAND M. J., LISTOWSKI H., **Les places dans la ville**, Les pratiques de l'espace, Dunod, Paris, 1984.

BLASCO M., **Cours UCL Acoustique 2001-2002: Partie théorique (AMCO 2361 : partie acoustique)**.

BLOCKEN B., ROELS S., CARMELIET J., **Pedestrian wind conditions in passages through buildings- Part 1. Numerical modelling, sensitivity analysis and model validation**, research report, Laboratory of Building Physics, KULeuven, 2003.

BLOCKEN B., ROELS S., CARMELIET J., **Modification of pedestrian wind comfort in the Silvertop Tower passages by an automatic control system**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004.

BODART Magali, **Principes de base de l'éclairage naturel et des études en modèles réduits**, cours UCL, Université catholique de Louvain, 2007.

BODEUX A., **La vitesse et la direction du vent en Belgique**, Institut Royal Météorologique, Bruxelles, 1977.

BOSELDMANN P., DAKE K., FOUNTAIN L., KRAUS L., HARRIS L., HARRIS A., **Sun, Wind and Comfort: Study of Thermal Comfort in San Francisco**. Berkeley: Centre for Environmental Design Research, University of California. 1988.

BOTTEMA Marcel, **Wind climate and urban geometry**, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 1993.

BOTTEMA Marcel, **Towards rules of thumb for wind comfort and air quality**, Atmospheric Environment 33, 1999, p. 4009 à 4017.

BOTTEMA Marcel, **A method for optimisation of wind discomfort criteria**, Building and Environment 35 : 1-18, 2000.

BROWN, R.D. & GILLESPIE, T.J., **Microclimate Landscape Design, creating thermal comfort and energy efficiency**. Canada: John Wiley & Sons. 1995.

BROWN G.Z., DEKAY M., **Sun, Wind & Light : Architectural Design Strategies**, 2d edition, John Wiley & Sons, New York, 400 p., 2001.

Bureau Fédéral du Plan, **Plan Fédéral pour un Développement Durable 2000-2004**, Belgique, 2000.

CARLES José Luis, BARRIO Isabel Lopez, DE LUCIO José Vicente, **Sound influence on landscape values**, Landscape and urban planning 43 :191-200, 1999.
CEE, **Livre vert sur l'environnement urbain : communication de la Commission au Conseil et au Parlement**, Luxembourg : Office des publications officielles des Communautés européennes, 1990.

CEE, **Energy Conscious Design, a primer for architects**, Batsford, Bruxelles, 1992.

CEE (1992b), **Energy in architecture. The European Passive Solar Handbook**, Batsford, Bruxelles, 1992.

CEE, Groupe d'experts sur l'environnement urbain, direction générale XI : environnement, sécurité nucléaire et protection civile, **Villes durables européennes, rapport**, Bruxelles, mars 1996.

CEE (1996b), "**Design source book on passive solar architecture**", Santamouris & Asimakopoulos, Athènes, 1996.

CEE, **Villes cyclables, villes d'avenir**, Luxembourg, 1999.

CEE, **Vers une stratégie thématique pour l'environnement urbain**, Communication de la Commission au conseil, au parlement européen, au comité économique et social européen et au comité des régions, Bruxelles, 2004

CEE (2004b), **Reclaiming city streets for people. Chaos or quality of life?** Luxembourg, 2004.

CEE (2004c), PROPOLIS, **Planning and research of policies for land use and transport for increasing urban sustainability**, final report, 2004

CERMA, **Proceedings of the First International Workshop on Architectural and Urban Ambient Environment**, G. Hégron, Nantes, 2002.

CEESE, **Mobilité durable en Région Bruxelloise**, rapport final, Centre d'Etudes Economiques et Sociales de l'Environnement, ULB, Bruxelles, 2001.

CHANDRA S., FAIREY PW, HOUSTON M.M., **A handbook for designing ventilated buildings**, Final report FSEC-CR-93-83. Florida Solar Energy Centre, Cap Canaveral, Florida, 1983.

CHELKOFF Grégoire, **Ambiances Sonores Urbaines**, Actes des 3^{ème} assises nationales de la qualité de l'environnement sonore, Angers, 2001.

CHENG François, **L'éternité n'est pas de trop**, éd. Albin Michel, Paris, 2002.

CHOAY Françoise, **La règle et le modèle, Sur la théorie de l'architecture et de l'urbanisme**, Editions du seuil, 1980.

COMPAGNON R., GOYETTE-PERNOT J., **Visual Comfort in Urban Spaces**. In: CEE, **Designing Open Spaces in the Urban Environment: a bioclimatic approach**, Centre for Renewable Energy Sources. Grèce; 2004.

CONSEIL FEDERAL DU DEVELOPPEMENT DURABLE., **Avis cadre pour une mobilité compatible avec le développement durable**, Belgique, 2004.

CONVIVE, **Végétalisation du Milieu construit, Pourquoi?**, Journée du CUEPE 1995 « Energie et climat urbain », Genève, 1995.

CPDT, **Le patrimoine bâti, outil de développement territorial**. ULB (IGEAT) – UCL (CREAT). Ministère de la Région wallonne, 2002.

CRETTON P., **Ecobilans. Les infrastructures : quels impacts?** Cycle d'études postgrades et master européen en architecture et développement durable. Louvain-la-Neuve, 2000.

CULJAT B., ERSKINE R., **Climate-responsive social space: a Scandinavian perspective**, In J. Mänty et N. Pressman (eds), *Cities Designed for Winter*. Helsinki, 1998.

DE ASIAIN J. L., **The making of the urban environment**, in Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, 2000.

DECROLY Jean-Michel, ROUYET Yves, **La féodalisation de la ville. Les clos privés à Bruxelles**. Dans : Les cahiers de l'urbanisme n°32, Ed : Pierre Mardaga. Et Direction générale de l'aménagement du territoire, du logement et du patrimoine de la Région wallonne. 2002.

DE CLERCQ Matthieu, **Elaboration d'un système expert d'aide à l'intégration de la problématique du vent au niveau du piéton dans la conception architecturale**, mémoire UCL, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2000.

DE DEAR Richard, BRAGER Gail, COOPER Donna, **Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, Final Report**. ASHRAE RP- 884. 1997.

DE DEAR RJ, BRAGER G.S. **Thermal comfort in naturally ventilated buildings : revisions to ASHRAE Standard 55** ». Energy and Buildings 34: 549-561. 2002.

DEFRISE P., A. Quinet, **Le vent**, documentation météorologique, Institut royal météorologique de Belgique, Gembloux, 1973.

DE HERDE André, **Le manuel du Responsable énergie. L'utilisation rationnelle de l'énergie dans le tertiaire**, Ministère de la Région Wallonne, Namur, 1994.

DE MYTTERAERE, **Vers une Architecture Soutenable**, thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2006.

DEPREZ Bernard, **Cours d'équipements, thermique et confort du bâtiment**, La Cambre, 2003.

DE ROSNAY Joël, **Le macroscopie, vers une vision globale**. Editions du Seuil, Paris, 1975.

- DE SAINT-EXUPERY Antoine, **Le Petit Prince**, Paris, Gallimard, 1946.
- DE SCHILLER S., **Sustainable cities: contribution of urban morphology**, dans Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, 2000.
- DE SHILLER Silvia, EVANS John Martin, Delbene Claudio, **Sustainable urban Planning developing tools for the planners**, in Proceedings of Plea 96, Louvain-la-Neuve, 1996.
- DE SCHUTTER G., GRYSEELS M., KEMPENEERS S., **Biodiversité en Région de Bruxelles-Capitale: la nature de Bruxelles**, Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, Biologie, 70-suppl.: 35-39, 2000.
- DIMOUDI A., NIKOLOPOULOU M., **Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits**, dans Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, UK, 2000.
- DOCHERTY M., SZOKOLAY Steven V., **Climate analysis**. PLEA notes 5: University of Queensland. 1999.
- DOULOS L., SANTAMOURIS M., LIVADA I., **Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials**, Solar Energy 77: 231-249, 2004.
- DURGIN F.H., **Pedestrian level wind criteria using the equivalent average**, Journal of Wind Engineering., 1997
- ESOURROU G.: **Le climat et la ville**, Nathan Université, 1991.
- ESOURROU Gisèle, **Les particularités du climat urbain**, Journée du CUEPE 1995 « Energie et climat urbain », Genève, 1995.
- ESCODERO N., **La mobilité dans la ville, une composante essentielle du développement urbain durable**, thèse de doctorat, UCL, 2004.
- FANGER P.O., **Thermal comfort, analysis and applications in environmental engineering**. USA: Mc Graw-Hill Book Company, 1970.
- FJELD T., **The Effect of Indoor foliage plants on the Health and Discomfort Symptoms among Office Workers**. Indoor Built Environment 7. 1998.
- FOLCHER Alain, **Modification de la structure du vent en zone urbaine**, CAHIERS DU CSTB n° 2385, 1990
- FONTAINE Thierry, **Architecture, urbanisme et climat : le vent**. Travail de fin d'études, Institut supérieur d'architecture La Cambre, Bruxelles, 1984.
- FRANKE J., HIRSCH C., JENSEN A.G., KRUS H.W., SCHATZMANN M., WESTBURY P.S., MILES S.D., WISSE J.A., WRIGHT N.G., **Recommendations on the use of CFD in wind engineering**, in: Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics, COST Action C14, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genèse (Belgique), 2004.

GADILHE A., **Numerical and experimental modelling of the three-dimensional turbulent wind flow through an urban square**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46 & 47, 1993, 755-763, Elsevier.

GANDEMER J., **Wind environment around buildings : aerodynamic concepts**, in : Proceedings of the 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow, p. 423-432, 1975.

GANDEMER J., **Inconfort dû au vent aux abords des bâtiments : concepts aérodynamiques**, Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment n°170, Paris, 1976.

GANDEMER J., **Aerodynamic studies of built-up areas made by CSTB at Nantes, France**. J. Ind. Aerodyn; 3; 227 – 40. 1978.

GANDEMER J., **Le confort et le vent dans les espaces extérieurs**, CSTB Magazine, 1982.

GANDEMER J., BARNAUD G., **Inconfort dû au vent aux abords des bâtiments. Etude aérodynamique de vitesse dans les ensembles bâtis : étude complémentaire**, CSTB, Paris, 1975

GANDEMER J., GUYOT A., **La protection contre le vent, Aérodynamique des brise-vent et conseils pratiques**, CSTB, Paris, 1981.

GAY Jean-Bernard, **Environnement et climat- Critères et indicateurs du développement durable**, cycle d'études postgrades européen en architecture et développement durable, EPFL, 2004.

GAY Jean-Bernard (2004-b), **Confort et santé – Isolation acoustique**, cycle d'études postgrades européen en architecture et développement durable, EPFL, 2004.

GEIGER Rudolf, **The climate near the ground**, revised edition, Harvard College, USA, 1980.

GEORGAKIS C., SANTAMOURIS M., **Development and validation of a model to calculate wind speeds in urban canyons**, AIVC 26^{ème} conférence, Bruxelles, 2005.

GEROS V., SANTAMOURIS M., KARATASOU S., TSANGRASSOULIS A., PAPANIKOLAOU N., **On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment**. Energy and Buildings 37 : p243-257, 2005

GHIAUS C., ALLARD F., SANTAMOURIS M., GEORGAKIS C., NICOL F., **Urban environment influence on natural ventilation potential**, Building and environment n°41, p.395-406, 2006.

GIEC, **Rapport de synthèse sur les changements climatiques 2001**, Cambridge University Press, 2001.

GHORRA-GOBIN Cynthia, **Les espaces de la médiation**; réinventer les « espaces publics » comme symbole de la médiation, Commission nationale française pour l'UNESCO- Paris, 2000.

GHORRA-GOBIN Cynthia (2000-b), **Etats-Unis : gated communities et private cities**, Urbanisme n°312 p.67, 2000.

GILLOT Christian, **La place et la ville, notes sur l'ouverture**, thèse de doctorat UCL, Louvain-la-Neuve, 1995.

GILLOT Christian, **Éléments de structure de la ville et du territoire, documents de références**, cours UCL, 1999, Louvain-la-Neuve.

GILLON Jean-Marie, **Les places publiques. Un enjeu local et régional...**, Ministère de la Région Wallonne, Namur, 2002.

GIVONI B., **Man, Climate and Architecture**, UK: Elsevier Architectural science series. 1969.

GIVONI B., **Climate considerations in building and urban design**. Van Nostrand Reinhold, 443 pages. 1998.

GLAUMANN M., WESTERBERG U., **Klimatplanering vind**, Svensk Byggtjänst, Akersberga, 1988.

GODART O., **Modification du climat à Louvain-la-Neuve. Une évolution à suivre**, Extrait de 'Ciel et Terre' vol. 87 n°4, 1971.

GONTIER Pascal, **Constitution de la forme urbaine et développement durable**, mémoire de DEA, EPFL 2000.

GRATIA E., DE HERDE A., **Concevoir avec le climat: la maison individuelle**, Ministère de la Région Wallonne, Namur, 2002.

GRATIA E., BRUYERE I., DE HERDE A., **How to use natural ventilation to cool narrow office buildings**, Building and Environment, Université Catholique de Louvain, 2004

GRATIA E., DE HERDE A., **Thermique des immeubles de bureaux**, Presses universitaires de Louvain, Louvain-la-neuve, 2006.

GRECO-ERAC & al., **A l'écoute d'une ville. Evaluation quantitative de la qualité du confort urbain vis-à-vis du bruit des transports**, dans ACOUSTIQUE & TECHNIQUE n° 26 (2001), 3^{ème} assises nationales de la qualité de l'environnement sonore, Angers, 2001.

GREENPEACE, **Energy revolution, a sustainable pathway to a clean energy future for Europe**, rapport Greenpeace, 2005.

GRUNDSTROM K., JOHANSSON E., MRAISSI M., OUAHRANI D., **Climat et Urbanisme, La relation entre le confort thermique et la forme du cadre bâti**, Lund University & Laboratoire Public d'essais et d'Etudes (Maroc), Lund, 2003.

GRUPO DE TERMOTECNIA, UNIVERSIDAD DE SEVILLA, **Control climatico en espacios abiertos, proyecto EXPO'92**, Ciemat, Séville, 1994.

GRUPO DE TERMOTECNIA, UNIVERSIDAD DE SEVILLA, **Control climático en espacios abiertos, evaluación del proyecto EXPO'92**, Ciemat, Séville, 1994.

GRUPO DE TERMOTECNIA, UNIVERSIDAD DE SEVILLA, **Guia basica para el acondicionamiento climático de espacios abiertos**, Ciemat, Séville, 1994.

GUSTAVINO C., **Perception of Background Noise in Urban Soundscapes**, Nantes, 2001.

GUSTAVINO Catherine, DUBOIS Danièle, ARRAS Christine, **Etude sémantique de la perception des basses fréquences dans les bruits de transports terrestres. Application à l'appréciation qualitative des ambiances sonores urbaines**, in : ACOUSTIQUE & TECHNIQUE n° 26 (2001), 3^{ème} assises nationales de la qualité de l'environnement sonore, Angers, 2001.

HAGAN S., **Sardines and Tins : Is « Densification » Sustainable ?**, Plea 2004, The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, 2004.

HALL Edward T., **La dimension cachée**, Editions du Seuil, Paris, 1971.

HALL R.C., **Evaluation of modelling uncertainty. CFD modelling of near-field atmospheric dispersion. Project EMU final report**, European Commission Directorate- General XII Science, Research and Development Contract EV5V-CT94-0531, WS Atkins Consultants Ltd., Surrey, 1997.

HALLEUX Jean-Marie, **Désurbanisation et développement durable**, Master européen en développement durable, UCL, Louvain-la-Neuve, 2005

HAMDOUN Anas, **Etude de l'environnement sonore urbain à la place Paul Doumer**, Rapport de stage de fin d'étude dans le cadre du Master Mécanique et Ingénierie, GRECAU, Ecole d'architecture et de paysage de Bordeaux, Bordeaux, 2004.

HAMMOUD Hassan, **L'impact du vent sur la forme externe de l'habitat**, Travail de fin d'études, Institut supérieur d'architecture La Cambre, Bruxelles, 1986.

HAVENITH George, HOLMER Ingvar, PARSONS Ken, **Personal factors in thermal comfort assessment : clothing properties and metabolic heat production**, Energy and Buildings, vol 34, n°6, juillet 2002, p. 581-591.

HEIDEGGER Martin, **Essais et conférences**, éditions Gallimard, Saint-Amand (France), 1958.

HEISLER G.M., DEWALLE D.R., **Effects of Windbreak Structure on Wind Flow**, Agriculture, Ecosystems and Environment, 22/23, p.41-69, 1988.

HEISLER G.M., **Mean wind speed below building height in residential neighbourhoods**, Controlling Summer Heat Islands, LBL-27872, 1989.

HOPPE Peter, **Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort**. Energy and Buildings 34, 2002.

HOTCHKISS RS, HARLOW FH, **Air Pollution and transport in street canyons**, Office of research and monitoring, Washington DC, USA, 1973.

HUNTINGTON Ellsworth, **Principles of Human Geography**. 6th edition. New York: John Wiley and Sons, 1951.

IBGE, AED-BUV, **La lutte contre le bruit en milieu urbain dans la région de Bruxelles-capitale**, Données de base pour le plan. Les Carnets de l'Observatoire, Bruxelles, 1998.

IBGE, **Question bruit, nous voulons vous entendre**. Plan de lutte contre le bruit 1999-2004. Enquête publique, Bruxelles.

IBGE, **L'état de l'environnement en Région de Bruxelles-Capitale**, Rapport de Synthèse, IBGE-BIM, Bruxelles, 2002.

IMBE, **Quartiers durables, Guide d'expériences européennes**, Arene (France), 2005

ISYUMOV N., DAVENPORT AG, **The ground level wind environment in built-up areas**. In: Proceedings of Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Heathrow, UK: Cambridge University Press, 1975.

IZARD Jean-Louis, Guyot Alain, **Archi bio.**, éditions Parenthèses, Roquevaire, 1979

JACKSON P.S., **The evaluation of windy environments**. Build environment 13:251-60, 1978.

JAMIESON NJ., CARPENTER P., CENEK P.D., **The effect of architectural detailing on pedestrian level wind speeds**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, p. 2301-2312, 1992.

JIMENEZ Alcala B., **Environmental Aspects of Hispano-Moslem Architecture**, PhD, AA EE, Londres, 2002.

JOHANSSON Erik, **Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate : A study in Fez, Morocco**, Building and Environment, 2005.

JOUKOFF A., **Brussels urban solar microclimate**, , PLEA 96, Institut Royal Météorologique de Belgique

JUNG Carl Gustav, **Commentaire sur le mystère de la fleur d'or**, spiritualités vivantes, Ed. Albin Michel, 1994.

KANG J., YANG W., ZHANG M., **Sound Environment and Acoustic Comfort in Urban Spaces**. In: CEE, Designing Open Spaces in the Urban Environment: a bioclimatic approach, Centre for Renewable Energy Sources. Grèce; 2004.

KASTNER-KLEIN P., FEDOROVITCH E., ROTACH M.W., **A wind tunnel study of organised and turbulent air motions urban street canyons**, Journal of wind engineering and aerodynamics, vol 89, 849 -861, 2001.

KAHN Louis I., **What the City should be**, in : *Louis I. Kahn Silence et lumière*, éditions du linteau, Douai, 1996.

KIM Sung-Eun, BOYSAN Ferit, **Application of CFD to environmental flows**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81, 1999, 145-158

KOSTOF Spiro, **The city assembled. The elements of urban form through history**. Thames & Hudson, Londres, 1992.

KRISTENSEN P. E., **Climatic design of a new housing area**, Plea96.

KUKADIA D.V., **Ventilation and air pollution. Strategies for buildings located in Urban Areas**, Oscar Farber Group Ltd., Air Infiltration Review, vol. 18, n°3, 1997

LADRIERE Jean, **Vie sociale et destinée**, Editions Duculot, Gembloux, 1973.

LANDSBERG H. E. , **The Urban Climate**, International geophysics series, ed. W.L.Donn. Vol.28, 275 pages. Academic Press, Londres. 1981.

LAWSON T.V., **The wind environment of buildings : a logical approach to the establishment of criteria**. University of Bristol, Department of Aeronautical Engineering, 1973.

LAWSON T. V., PENWARDEN A. D., **The effects of wind on people in the vicinity of buildings**. In: Proceedings of Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Heathrow, UK: Cambridge University Press, 1975.

LAWSON T.V., **The wind content of the built environment**. J Ind Aerodyn 3;93-105, 1978.

LAWSON T.V., **The Determinatin of the Wind Environment of a Building Complex Before Construction**, Bristol, 1990.

LET (Laboratoire d'Economie des Transports – Université Lyon 2), LTMU (Laboratoire Théorie des Mutations Urbaines (Université Paris 8), **ETHEL – Energie, Transport, Habitat, Environnement, Localisations**, rapport final, Paris, 2006.

LEFEBVRE Henri, **Le droit à la ville**, suivi de **Espace et politique**, Editions Anthropos, Paris, 1972.

LELOUP Xavier, **La Ville de l'Autre, Effets de composition et registres du rapport à l'Autre dans un espace pluriel (Ixelles)**, thèse de doctorat UCL, 2002.

LIEBARD A., DE HERDE A., **Guide de l'architecture bioclimatique. Haute qualité et développement durable**. Tome I, Ed : Systèmes solaires, Chaumont cedex, 1996.

LIEBARD A., DE HERDE A., **Guide de l'architecture bioclimatique. Haute qualité et développement durable**. Tome III, Ed : Systèmes solaires, Langres,2001.

LIEBARD A., DE HERDE A., GROSJEAN B., CHABAUDIE J., REITER S., **Guide de l'architecture bioclimatique. Tome 6 : Aménagement urbain et développement durable en Europe**, Ed : Systèmes solaires, Langres, 2004.

LIEBARD A., DE HERDE A., **Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques. Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable**. Observ'ER, Baume-les-Dames, 2005.

LE GOFF Olivier, **L'invention du confort, naissance d'une forme sociale**, Presses universitaires de Lyon, France, 1994.

LIMB Mark, **Impact of Urban Air Pollution on the Indoor Environment : An Annotated Bibliography**, New AIVC Publications, Oscar Faber Group LTD, 1999

LITTLEFAIR Paul, **Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment**, Solar energy vol 70 n°3, p. 177-185, 2001.

LITTLEFAIR P.J., AIZLEWOOD M.E., **Calculating access to skylight, sunlight and solar radiation on obstructed sites in Europe**. BRE Report BR 379. Garston, CRC, 1999.

LITTLEFAIR P.J., SANTAMOURIS M., ALVAREZ S. DUPAGNE A., HALL D., TELLER J., CORONEL J.F., PAPANIKOLAOU N., **Environmental Site Layout Planning : Solar Access, Microclimate and Passive Cooling in Urban Areas**, Building Research Establishment, London, 2000.

LOUWERS Marc, **Caractérisation de la qualité perçue du bruit routier. Mise au point d'une méthode d'investigation multimodale**. Dans ACOUSTIQUE & TECHNIQUE n° 26 (2001), 3^{ème} assises nationales de la qualité de l'environnement sonore, Angers, 2001.

LOZANO E.E., **Visual needs in the urban environment**, Town Planning review, vol.45, n°4, 1974.

MAHAUT Valérie, **Comment l'eau traverse-t-elle la question de l'architecture, ou suivant quel processus l'eau est un média d'architecture et d'urbanisme ?**, Mémoire de DEA, UCL, 2005.

MALET L. M., **Le vent dans les premières centaines de mètres de l'atmosphère, Pourquoi et comment déterminer le vent standard de surface ?**, Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles, 1989.

MANINS P.C., COPE M.E., HURLEY P.J., NEWTON P.W., SMITH N.C., MRQUEZ L.O., **The impact of urban development on air quality and energy use**. 14th International Clean Air and Environment Conference, Melbourne, 1998.

MARTIN Nicole, **Jusqu'où pourrions-nous désurbaniser nos territoires ?**, Espace-vie, aménagement du territoire, urbanisme et environnement, n°134, janvier 2003, Centre culturel du brabant wallon, Court-St-Etienne, 2003.

Mc CARTNEY K.J. and NICOL J. F. 2002. **Developing an adaptive control algorithm for Europe**. Energy and Buildings 34: 623-635.

Mc CARTNEY K., MATSIKA W., **An Evaluation of the Educational Effectiveness of Using the Bioclimatic Chart in a Design Exercise**, Plea 2004, The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Eindhoven, The Netherlands, 2004.

Mc CORMICK R.A., **Air pollution in the locality of buildings**. Philosophical Transactions of the Royal Society, London, Vol A269, 1971, p.515-526.

MEIR I., **Courtyard microclimate**, dans Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, 2000.

MELBOURNE W. H., JOUBERT P. N., **Problems of wind flow at the base of tall buildings. Procesings of the International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures**, Tokyo, 1971.

MELBOURNE W.H., **Criteria for environmental wind conditions**, J. Ind Aerodyn 3, 1978.

MEUNIER Sabine, **Critères psychoacoustiques des nuisances sonores : évaluation perceptive de bruits de circulation routière et ferroviaire**.2001

Meunier S., **Approche multicritères des nuisances sonores**, dans G2AU/ GSO (Groupe spécialisée acoustique architecturale et urbaine / Section régionale grand Sud-ouest) , La place des ambiances sonores dans l'aménagement urbain et péri-urbain, Ecole d'Architecture et de Paysage de Bordeaux, juin 2001.

MERLEAU-PONTY Maurice, **Phénoménologie de la perception**, Ed. Gallimard, Paris, 1945.

MERLIN Pierre, CHOAY Françoise, **Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement**, ADAGP, Paris, 1996

MERONEY Robert N., LEITL Bernd M., RAFAILIDIS Stillianos, SCHATZMANN Michael, **Wind-tunnel and numerical modelling of flow and dispersion about several building shapes**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81, 1999, 333-345, Elsevier.

MERTENS André, **Louvain-la-Neuve. Une aventure urbanistique**, L'Harmattan, Paris, 2002.

Ministère de la Région Wallonne, **A comme ... aménagement**. Inspection Générale de l'Aménagement du territoire, Tournai, 1985.

MONTAVON M., SCATERZZINI J-L, COMPAGNON R., **Comparison of the solar energy utilisation potential of different urban environments**, Plea 2004, The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven. P. 19-22, 2004.

MORIN Edgar, **Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur**, Seuil, Paris, 2000.

MORHAYIM L., **Rethinking "architecture for sustainability"**, Plea 2004, The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, 2004.

MURAKAMI S., UEHARA K., DEGUCHI K., **Wind effects on pedestrians : new criteria based on outdoor observation of over 2000 persons**. In: Proceedings of Fifth International Conference on Wind Engineering. . p.277-88, CO, USA: Fort Collins, 1980.

MURAKAMI S., IWASA Y., MORIKAWA Y. **Study on acceptable criteria for assessing wind environment on ground level based on resident's diaries**. J. Wind Engineering Ind Aerodyn 24:1-18, 1986.

MURAKAMI Shuzo, MOCHIDA Akashi, HAYASHI Yoshihiko, **Examining the k-ε model by means of a wind tunnel test and large-eddy simulation of the turbulence structures around a cube**. Institute of Industrial Science, Tokyo, 1990.

MURAKAMI S., MOCHIDA A., **On turbulent vortex shedding flow past 2D square cylinder predicted by CFD**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 54/55 (1995) 191-211.

MURAKAMI Shuzo, **Current status and future trends in computational wind engineering**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67 & 68, 1997, 3-34

MURAKAMI S., **Overview of turbulence models applied in CWE-1997**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74-76, 1998, 1-24

MURAKAMI Shuzo, OOKA Ryozi, MOCHIDA Akashi, YOSHIDA Shinji, KIM Sangjin, **CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 81, 1999, 57-81

NAKAMURA Y., OKE T.R. **Wind, temperature and stability conditions in an E-O oriented urban canyon's** , Atmospheric Environment, 1988

NARBONI Roger, **La lumière urbaine, éclairer les espaces publics**, Collection techniques de conception, Le Moniteur, Paris, 1995.

NASAR J.L., FISHER B., GRANNIS M., **Proximate physical cues to fear of crime**, Landscape and urban planning, 1993: 26: 161-178.

NBN B62-002 : Calcul des coefficients de transmission thermique des parois de bâtiments, Institut Belge de Normalisation, Bruxelles, 1987.

NBN B 03-002-1, Action du vent sur les constructions : généralités ; pression du vent sur une paroi et effets d'ensemble du vent sur une construction, deuxième édition, Institut belge de Normalisation, Bruxelles, 1988.

NEWMAN PW and KENWORTHY JR, 1989. **Gasoline Consumption and cities: a comparison of US cities with a global survey**, Journal of American Planning Association, 55(1): 24-37.

NG E., WONG H.-H., **Building Heights and Better Ventilated Design for High Density Cities**, Plea 2005, The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Beirut, Liban, 2005.

NIACHOU K., HASSID S., SANTAMOURIS M., LIVADA I., **Comparative monitoring of natural, hybrid and mechanical ventilation systems in urban canyons**, Energy and Buildings 37 : p.503-513, 2005.

NICOL J.F., **Thermal comfort- A Handbook for Field Studies Toward an Adaptive Model.** London, 1993.

NICOL J.F., HUMPHREYS M.A., **Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings,** Energy and Buildings 34: 563-572, 2002

NICOL F., WILSON M., **The effect of street dimensions and traffic density on the noise level and natural ventilation potential in urban canyons,** Energy and Buildings, 36, p. 423-434, 2004.

NIKOLOPOULOU M., BAKER N., STEEMERS K., **Thermal comfort in outdoor urban spaces.** In Proceedings PLEA 1998: Environmentally Friendly Cities. James&James. 1998.

NIKOLOPOULOU M., LYKLOUDIS S., **Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries.** Building and Environment, vol. 41 (11), p. 1455-1470, 2006.

NIKOLOPOULOU M., STEEMERS K., **Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces.** In Proceedings of PLEA 2000. Cambridge, 2000.

NIKOLOPOULOU M., BAKER N., STEEMERS K., **Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter.** Solar Energy 70 (3): 227-235. 2001.

NIKOLOPOULOU Marialena, STEEMERS Koen, **Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces.** Energy and Buildings 35 (1):95-101. 2003.

NIKOLOPOULOU M., LYKLOUDIS S., KIKIRA M., **Thermal Comfort Models for Open Urban Spaces.** In: CEE, Designing Open Spaces in the Urban Environment: a bioclimatic approach, Centre for Renewable Energy Sources. Grèce; 2004.

NORBERG-SCHULZ Christian, **Genius Loci. Paysage, ambiance, architecture.** Pierre Mardaga, Sprimont (Belgique), 1981.

NORBERG-SCHULZ Christian, **A la recherche d'un langage contemporain de l'architecture,** Institut Supérieur d'Architecture Saint-Luc, Bruxelles, 1988.

NORBERG-SCHULZ Christian, **L'art du lieu. Architecture et paysage, permanence et mutations,** La Moniteur, Paris, 1997.

OKE T.R., **Boundary layer climates.** University Press, Cambridge, 1987

OKE T R., **Street Design and Urban Canopy Layer Climate,** Energy and Buildings, 1988, vol11 p 103-113

OLGYAY Victor, **Design with climate, bioclimatic approach to architectural regionalism.** New Jersey: Princeton university press. 1963.

OSELAND N.A., **A within-groups comparison of predicted and reported thermal sensation votes in climate chambers, offices and homes.** In Healthy Buildings 1, 1994.

PACIUK M., **The role of personal control of the environment in thermal comfort and satisfaction in workplace.** In Coming of age. USA: EDRA. 1990.

PANERAI Philippe, DEPAULE Jean-Charles, DEMORGON Marcelle, **Analyse urbaine**, éditions parenthèses, Marseille, 1999.

PAQUOT Thierry, **Homo Urbanus**, Essai éditions du félin, Paris, 1990.

PENWARDEN A. D., **Acceptable wind speeds in towns**, Building Science, 8, p.259-268, 1973.

PENWARDEN A.D., WISE A.F.E., **Wind environment around buildings**, Building research Establishment Report, London, 1975.

J. PICAUT, D. GAULIN et M. BERENGIER, **Identification des sources sonores urbaines**, dans G2AU/ GSO (Groupe specialise acoustique architecturale et urbaine / Section régionale grand Sud-ouest) , La place des ambiances sonores dans l'aménagement urbain et péri-urbain, Ecole d'Architecture et de Paysage de Bordeaux, juin 2001.

PITTS A., HOMEWOOD J., **Environmental issues in strategic and urban planning**, dans Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, 2000.

PLUMLEY Harriet, **The design of Outdoor Urban Spaces for Thermal Comfort**, these de DEA, COLLEGE OF Environmental Science and Forestry, Syracuse, 1975.

POTVIN, A., **Assessing the microclimate of urban transitional spaces**, dans Proceedings of PLEA 2000, Cambridge, UK, 2000.

PROULX Jean, **De l'homo faber à l'homo sapiens**, Critère n°11, L'encyclopédie de l'agora, 1974.

PROUST Marcel, **A la recherche du temps perdu, Tome I**, Bibliothèque de la Pléiade, Paris, Gallimard, 1954.

RATTI C., BAKER N., STEEMERS K., **Energy consumption and urban texture**, Energy and Buildings, n°37, p.762-776, 2005.

REES William E., **Les empreintes écologiques urbaines : vers la durabilité des villes**, in : Le territoire urbain, Ressource pour le développement durable. Ceraa, Bruxelles, 2004.

REITER Sigrid, DE HERDE André, **L'éclairage naturel des bâtiments**. Belgique : Ministère de la Région Wallonne, 2001.

REITER Sigrid, **L'influence du microclimat sur le confort des piétons pour des espaces publics durables**, mémoire de DEA, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2003.

REMY Jean, VOYE Liliane, **Ville, ordre et violence**, Presses Universitaires de France, Paris, 1981.

REMY Jean, VOYE Liliane, **La ville et l'urbanisation, Modalités d'analyse sociologique**, Cabay, 1982.

RICCIARDELLI F., POLIMENO S., **Some experimental results concerning the characteristics of the wind flow in the canopy layer**. In: Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics, Impact of Wind and Storm on City Life and Built Environment, COST Action C14, ed: von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genèse, Belgique, 2004.

RODI W., **Comparaison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, 1997, 55-75, Elsevier.

ROGERS Richard, **Des villes pour une petite planète**, Le Moniteur, Paris, 2000.

ROSENFELD A.H., **Mitigation of urban heat islands materials**, utility programs, updates, Energy and buildings n°22 (3), 255-265, 1995.

ROULET Claude-Alain, « **Qualité de l'environnement intérieur et santé dans les bâtiments** », EPFL (Ecole Polytechnique de Lausanne) – Laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment. 2002.

ROULET P.C. A., **Ventilation naturelle**, cycle d'études postgrades européen en architecture et développement durable, EPFL, 2004.

SACQUET Anne-Marie, **Atlas mondial du développement durable**, éditions Autrement, 2002.

SAINT-AUGUSTIN, **Les Confessions**, Flammarion, Paris, 1997.

SANTAMOURIS M., ASIMAKOPOULOS D., **Passive cooling of buildings**, James & James, London, 1996.

SANTAMOURIS M., **Natural Ventilation in Buildings : A design Handbook**, F.Allard Editor, London, 1998

SANTAMOURIS M., **Energy and climate in the urban built environment**, James & James, Athènes, 2000.

SANTAMOURIS M., DASCALAKI E., KLITSIKAS N., PAPAKONSTANTINO K., GEORGAKIS C., **On the impact of the urban environment on potential of natural ventilation**, in : Innovations in ventilation technology, 21st annual conference, The Hague, 2000.

SANTAMOURIS M., ASIMAKOPOULOS D. N., ASIMAKOPOULOS V. D., CHRISOMALLIDOU N., KLITSIKAS N., MANGOLD D., MICHEL P., TSANGRASSOULIS A., **Energy and climate in the urban built environment**, ed : Santamouris, London, 2001.

SANTAMOURIS M., PAPANIKOLAOU N., LIVADA I., KORONAKIS I., GEORGAKIS C., ARGIRIOU A., ASIMAKOPOULOS D.N., **On the impact of**

urban climate on the energy consumption of buildings, Solar Energy: 70, n3, pp201-216, 2001.

SCUDO Gianni, **Design of outdoor microclimatic control**, cycle d'études postgrades et master européen en architecture et développement durable, Louvain-la-Neuve, 2000.

SCUDO G., ELSA F., **Thermal comfort in urban spaces: streets and courtyards**. IN: The 18th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Brazil, 2001.

SCUDO G., **Thermal comfort**, COST « Green structures and urban planning »-Milan, 2002.

SCUDO G, DESSI V., ROGORA A., **Evaluation of Radiant Conditions in Urban Spaces**, in CEE « Designing Open Spaces in the Urban Environment : a bioclimatic approach », Centre for Renewable Energy Sources. Grèce; 2004.

SEMIDOR Catherine, **cours : GRECO-Bordeaux**, Ecole d'Architecture et de Paysage de Bordeaux, 2002.

SEMIDOR Catherine, **"In town without my car!": a new urban soundscape**, in: PLEA 2003- the 20th conference on passive and low energy architecture- Santiago-chile, 2003.

SEMIDOR Catherine, **Ambiances sonores et espace public**, Cycle d'études postgrades européen en architecture et développement durable, UCL, 2005.

SENNETT Richard, **Les tyrannies de l'intimité**, Ed. du seuil, Paris, 1979.

SERRES Michel, **les cinq sens**, Grasset, Paris, 1985.

SINOUE Maria, STEEMERS Koen, **Urban semi-enclosed spaces as climate moderators**, Plea2004, the 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, 2004.

SITTE Camillo, **L'art de bâtir les villes : l'urbanisme selon ses fondements artistiques**, Seuil, Paris, 1996.

SMITH F., WILSON C.B., **A parametric study of airflow within rectangular walled enclosures**, Building and Environment: 12, p.223-230, 1977.

SNEYERS R., **Un modèle statistique de la répartition des vents en force et en direction. Application aux données d'Uccle (Bruxelles) et validité du modèle pour la Belgique**. Institut Royal Météorologique de Belgique, publications série B, n°107, 1980.

SNOY Th., **Développement durable et choix de consommation**, cycle d'études postgrades européen en architecture et développement durable, architecture et climat, Louvain-la-Neuve, 2005.

SOLIGO Michael J., IRWIN Peter A., WILLIAMS Colin J., SCHUYLER Glenn D., **A comprehensive assessment of pedestrian comfort including thermal**

effects, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 77&78, 753-766, Elsevier Science Publisher, 1998.

STATHOPOULOS Th., WU H., **Generic models for pedestrian-level winds in built-up regions**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 54/55 (1995) p.515-525

STEEMERS Koen, **Cities, energy and comfort : a PLEA 2000 review**, Energy and Buildings n°1454, 2002

STEEMERS Koen, **Energy and the city: density, buildings and transport**. Energy and Buildings 35:(3-14), 2003.

STEEMERS K. A., RAMOS M.C., SINOUE M., **Urban morphology**, In: CEE, Designing Open Spaces in the Urban Environment: a bioclimatic approach, Centre for Renewable Energy Sources. Grèce; 2004.

STIB (Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles), **STIB 2020 : Visions d'avenir pour le transport public urbain à Bruxelles**, Bruxelles, 2004.

SFASTC (Services fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles), **Enquête nationale sur la mobilité des ménages, réalisation et résultats**, synthèse du rapport final, Plan d'appui scientifique à une politique de développement durable, Bruxelles, 2001

TAHA Haider, **Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat**. Energy and Buildings 25, 99-103, 1997.

TAKAKURA S., SUYAMA Y., AOYAMA M., **Numerical Simulation of Flowfield around Buildings in an Urban Area**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46 & 47, 1993, 765-771, Elsevier.

Tchekhov Anton, **La groseille à maquereau**, 1898.

THIBAUD Jean-Paul, **From situated perception to urban ambiances**, Laboratoire CRESSON, Nantes

TSANGRASSOULIS A., SANTAMOURIS M., **Numerical estimation of street canyon albedo consisting of vertical coated glazed facades**. Energy and Buildings, 35. 2003. p527-531.

ULRICH R.S., **View through a Window may influence Recovery from Surgery**, Science 224. 1984.

VAN EYCK A., **Un miracle de modération** dans 'Le sens de la ville', Paris, Seuil, 1972.

VAN MOESEKE G., **Influence du vent en milieu bâti sur la ventilation naturelle**, mémoire de DEA, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2004

VAN MOESEKE G., GRATIA E., REITER S., DE HERDE A., **Wind pressure distribution influence on natural ventilation potential for different incidences and environments densities**. Energy and Building, 37 878-88p, 2005.

VILLE DE GENEVE (service d'urbanisme), **Le bruit dans la ville**, Cahiers d'urbanisme, 1989

VENTURI Robert, **De l'ambiguïté en Architecture**, Dunod, Paris, 1999.

VISSER GTh. **Wind discomfort criteria: a literature study into and proposals for the use of uniform TNO wind discomfort criteria**. Report 80-02746, TNO-IMET-ST, Apeldoorn, NL 1980.

VON MEISS Pierre, **De la forme au lieu. Une introduction à l'étude de l'architecture**, Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne. 1993.

VOOS L., **Effets du vent sur la ventilation naturelle des maisons unifamiliales**, Université de Liège, Travail de fin d'études, 1978.

WILLEMSSEN E., WISSE J.A., **Accuracy of assessment of wind speed in the built environment**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, p 1183-1190, 2002.

WIERINGA J., Updating the Davenport roughness classification, J Wind Eng, 41 (1992) 357- 368)

WIREN B.G., **A wind tunnel study of wind velocities in passages between and through buildings**, in: Proceedings of the 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, p. 465-475, Cambridge University Press, Heathrow, 1975.

WIREN B.G., **Effects of surrounding buildings on wind pressure distributions and ventilative heat losses for a single family house**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 15 :15-26, 1983.

WHITELEGG J., **Transport for a Sustainable Future : the case for Europe**, Wiley, Chichester, 1993

WCED (World Commission on Environment and Development), **Our common futur**, Oxford University Press, 1987

WCED (World Commission on Environment and Development), **Notre avenir à tous**, édition du fleuve, Montréal, 1988. (*traduction en français du rapport Brundtland dont la référence en anglais est WCED 1987*).

YANG W., KANG J., **Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces**, Applied Acoustics: vol 66 n°2, p. 211-229, 2005.

YANNAS Simos, **Energy indices and performance targets for housing design**, Energy and buildings: 23, p. 237-249, 1996.