



Air Infiltration and Ventilation Centre

La ventilation naturelle en zone urbaine

Matheos Santamouris, NKUA

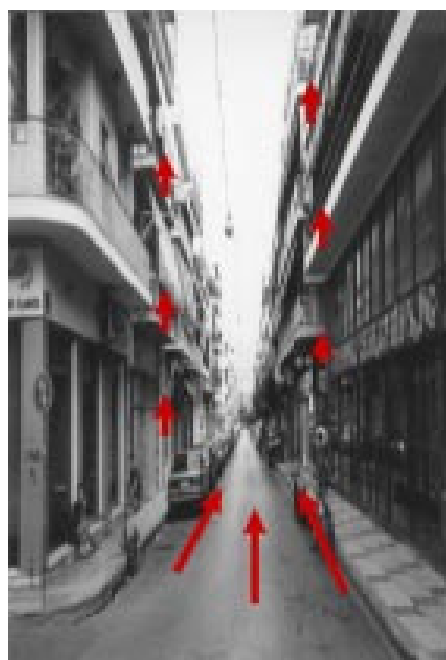
1 L'énergie dans les villes

La population de la planète connaît une croissance rapide. Chaque année, la population de la terre s'accroît de 80 millions de personnes et tandis qu'en 1987, la population mondiale totale approchait les 5 milliards, elle a dépassé les 6 milliards en 2000 et devrait, selon les Nations-Unies, poursuivre sa progression jusqu'à la moitié du siècle prochain. [Réf 1].

À cet égard, la plus forte croissance de population s'observe dans les villes. La population urbaine présente une croissance beaucoup plus rapide que la population rurale : entre 1990 et 2010, près de 80 pour cent de la croissance de la population mondiale se concentrent en zone urbaine, très vraisemblablement en Afrique, en Asie et en Amérique latine [Réf 2]. Ceci signifie simplement que l'on compte 60 millions de citoyens urbains en plus chaque année, et que, comme indiqué [à la Réf 3], « c'est comme si un nouveau Paris, Pékin ou le Caire voyait le jour chaque mois ».

L'énergie constitue l'un des facteurs les plus importants déterminant la qualité de la vie en ville et la qualité environnementale globale des villes.

Le processus d'urbanisation affecte dramatiquement la consommation énergétique. On sait [Réf 4] qu'une augmentation d'1 pour cent du PNB par habitant suppose une hausse quasi équivalente (1,03) de la consommation énergétique. Cependant, une augmentation d'1 % de la population urbaine



accroît la consommation énergétique de 2,2 %, ce qui signifie dès lors que le taux de variation de la consommation d'énergie est deux fois plus élevé que celui de l'urbanisation.

Aussi, l'augmentation du rendement énergétique, l'utilisation d'énergies renouvelables pour approvisionner les villes, l'amélioration du microclimat thermique urbain et l'adoption de politiques de consommation durables semblent-elles constituer les outils principaux en vue de réduire la consommation énergétique dans les villes.

La consommation énergétique du secteur du bâtiment est élevée et devrait poursuivre sa progression en raison de l'amélioration du

niveau de vie et de l'accroissement de la population mondiale. S'agissant de satisfaire les besoins grandissants sans compromettre l'environnement, il convient dès lors d'utiliser des systèmes et des techniques propres. À cet égard, la ventilation naturelle et d'autres techniques passives semblent constituer une solution très appropriée et efficace à ce problème.

2 Le climat en zone urbaine

L'urbanisation croissante a défiguré l'environnement urbain. Le manque de contrôle du développement entraîne des conséquences importantes pour le climat urbain et l'efficacité environnementale du bâti. Les parcelles d'habitation ont vu leur surface réduite, ce qui a augmenté leur densité. Par ailleurs, la multiplication des bâtiments a décimé la population végétale et les arbres. Selon un rapport, New York a ainsi perdu 175.000 arbres, soit 20 % de sa surface forestière urbaine au cours des dix dernières années [Réf 5].

En raison du bilan thermique, les températures de l'air relevées dans les villes à forte densité de constructions sont plus élevées que dans les zones rurales avoisinantes. Ce phénomène, connu sous le terme d'« îlot de chaleur », s'explique par de nombreux facteurs, dont les principaux sont résumés à la [Réf 6].

Des études consacrées aux îlots de chaleur urbains font généralement référence à l'« intensité de l'îlot de chaleur urbaine », soit l'écart de température maximal entre la ville et ses environs. Des données récoltées par plusieurs sources [Réf 7] font apparaître que l'intensité de l'îlot de chaleur peut atteindre 15 °C.

L'élévation des températures urbaines présente un impact considérable sur les besoins en électricité pour le conditionnement d'air des bâtiments, augmente la production de smog, tout en contribuant à une hausse des émissions de polluants des centrales électriques, y compris de dioxyde de soufre, de monoxyde de carbone, de protoxydes d'azote et de particules en suspension. En été, l'effet d'îlot de chaleur dans les climats chauds à très chauds amplifie l'utilisation d'énergie de refroidissement.

Indépendamment de la demande accrue en énergie de refroidissement, l'augmentation des températures en ville affecte par ailleurs la concentration et la distribution de la pollution urbaine car la chaleur accélère les réactions chimiques dans l'atmosphère, donnant ainsi lieu à des concentrations en ozone élevées. D'autres sources, telles que les transports, l'industrie, les processus de combustion, etc., contribuent par ailleurs à un accroissement des niveaux de pollution dans les zones urbaines. En parallèle, les bâtiments et structures urbaines, par leur caractère irrégulier, entravent la dispersion du vent en ville et ralentissent sa vitesse, augmentant dès lors la concentration de polluants.

3 Courants d'air dans les villes – Notions de base

Le champ des vents urbains est complexe. De légères différences topographiques peuvent ainsi causer des courants atmosphériques irréguliers. Comme les courants atmosphériques se déplacent du milieu rural vers le milieu urbain, ils doivent s'ajuster aux nouvelles conditions limites définies par les villes. Ceci entraîne le développement d'une structure verticale à deux couches. On définit dès lors deux sous-couches spécifiques : tandis que la sous-couche dite « obstruée », ou canopée urbaine, s'étend du sol au sommet des bâtiments, la couche dite « couche limite de surface » ou « couche limite urbaine » s'étend au-dessus des toits (Figure 1).

La sous-couche « obstruée » ou canopée comporte un propre courant généré et déterminé par l'interaction entre le courant supérieur et l'unicité d'effets locaux tels que la topographie, la géométrie et les dimensions du bâti, les rues, le trafic et d'autres caractéristiques locales, comme la présence d'arbres. En général, la vitesse du vent dans la canopée est fortement réduite en comparaison avec sa valeur en l'absence de perturbation.

L'estimation de la vitesse du vent en ville revêt une importance cruciale pour les applications de rafraîchissement passif, plus particulièrement la conception de bâtiments à ventilation naturelle. En effet, les vitesses du vent mesurées au-dessus des bâtiments ou dans des aéroports diffèrent considérablement des

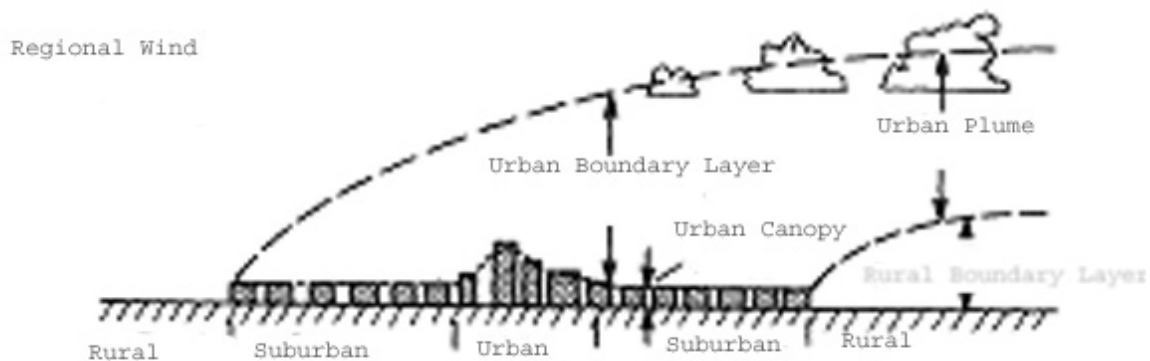


Figure 1 : Canopée urbaine et couche limite de surface [Réf 7]

vitesses relevées dans des stations de mesure urbaines. La hauteur de l'obstacle étant plus élevée en milieu urbain que dans la campagne environnante, la vitesse du vent u pour toute hauteur z est inférieure en milieu urbain et beaucoup plus faible dans la zone obstruée.

4 Courants d'air dans les villes – Canyons

La connaissance des caractéristiques des courants d'air dans les canyons urbains est nécessaire pour toutes les études liées à la ventilation naturelle des bâtiments, à la pollution, au confort thermique, etc.

À cet égard, les canyons urbains se caractérisent par trois paramètres principaux : H , la hauteur moyenne des bâtiments du canyon, W , la largeur du canyon et L , la longueur du canyon. Compte tenu de ces paramètres, les descripteurs géométriques se limitent à 3 mesures simples, à savoir les quotients H/W (rapport d'aspect), L/H et la densité des bâtiments $j = A_r/A_l$ où A_r représente le plan de la zone de toiture du bâtiment moyen et A_l la zone de parcelle ou l'unité de terrain occupée par chaque bâtiment.

Lorsque la direction prédominante du courant d'air est approximativement normale (soit ± 30 degrés) par rapport à l'axe longitudinal de la rue canyon, on observe trois types de régimes d'écoulement d'air selon la géométrie du bâtiment (L/H) et du canyon (H/W) (Figure 3) :

- Si les bâtiments sont bien séparés, ($H/W > 0.05$), leurs champs de courants n'interagissent pas. À des espacements

plus réduits, les sillages sont perturbés : on parle alors de régime d'« écoulement de rugosité isolé » (« Isolated Roughness Flow »).

- Lorsque la hauteur et l'espacement de la rangée se combinent pour perturber les cavités et les tourbillons transversaux, le régime de l'écoulement de rugosité isolé se transforme en un écoulement à interférence des sillages. Ce dernier est caractérisé par des écoulements secondaires dans l'espace du canyon où l'écoulement descendant de la cavité du tourbillon est renforcé par la déflexion vers le bas de la face au vent du courant descendant du bâtiment suivant.
- À des rapports H/W et des densités plus élevés, un vortex stable s'établit dans le canyon en raison du transfert de quantité de mouvement à travers une couche de cisaillement au niveau du toit et un régime d'écoulement rasant « skimming » apparaît où l'enveloppe de l'écoulement ne pénètre plus dans le canyon.

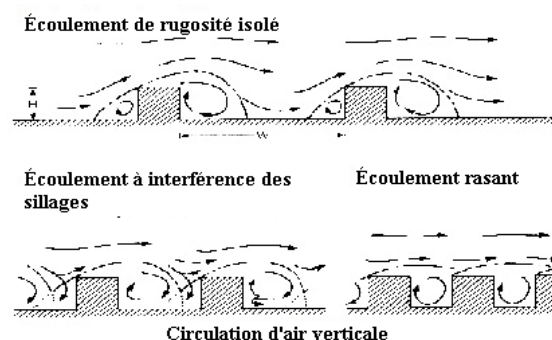


Figure 2 : Régimes de flux d'air [Réf 7]

Des lignes seuils divisant les flux d'air en trois régimes en fonction de la géométrie du bâtiment (L/H) et du canyon (H/W) ont été avancées. Ces courbes de valeurs-seuils sont indiquées à la Figure 3.

Dans le cas d'un écoulement d'air ambiant parallèle, un vent moyen est généré le long de l'axe du canyon, s'accompagnant d'une

élévation éventuelle le long des parois du canyon dans la mesure où l'écoulement d'air est ralenti par friction.

Dans le cas où l'écoulement fait un angle par rapport à l'axe du canyon, un vortex en spirale apparaît le long du canyon, un effet de type « tire-bouchon ».

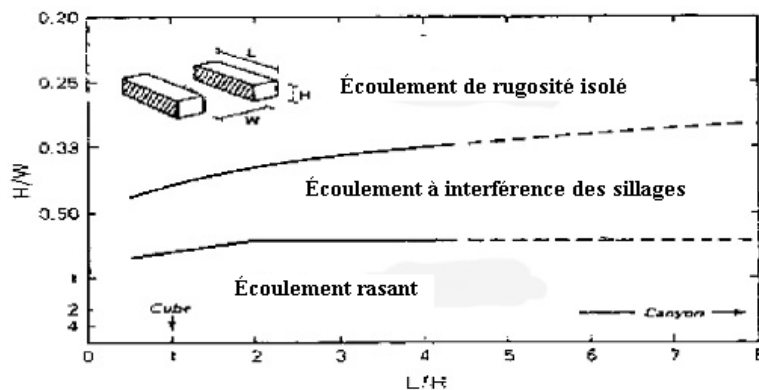


Figure 3 : Limites des différents types d'écoulements [Réf 7]

5 Potentiel de ventilation naturelle

La ventilation naturelle constitue l'une des techniques de rafraîchissement passif les plus efficaces. Toutefois, le rafraîchissement passif dans les villes est fortement tributaire de la distribution du vent qui y règne. Ainsi, la vitesse du vent dans les canyons urbains est fortement réduite par rapport à la vitesse du vent non perturbée. Par ailleurs, la direction du vent dans les canyons diffère presque totalement de celle relevée par les stations météorologiques habituelles.

Or, la forte réduction de la vitesse du vent abaisse considérablement le potentiel de ventilation naturelle dans les canyons urbains. À cet égard, de récentes études expérimentales en Europe ont proposé des directives empiriques pour considérer la ventilation naturelle dans les canyons urbains :

a) Au cours de la journée, lorsque la vitesse du vent ambiant est considérablement plus élevée que celle à l'intérieur du canyon et que des phénomènes d'inertie dominent les forces de gravitation, le potentiel de ventilation naturelle dans des configurations de ventilation unilatérale et transversale est fortement réduit

au sein du canyon. En pratique, on observe ceci lorsque la vitesse du vent ambiant est supérieure à 4 m/s. Tandis que, dans les configurations de ventilation unilatérale, l'écoulement d'air est réduit jusqu'à 5 fois, cette réduction peut parfois atteindre le facteur 10 dans les configurations de ventilation transversale.

b) Au cours de la journée et lorsque la vitesse du vent ambiant est inférieure à 3-4 m/s, les forces de gravitation dominent les processus d'écoulement d'air. Dans ce cas, la différence entre les vitesses du vent à l'intérieur et à l'extérieur du canyon ne joue aucun rôle important, surtout pour les configurations unilatérales

c) Pendant la nuit, la vitesse du vent ambiant diminue fortement et est comparable à celle établie à l'intérieur du canyon. Dans ce cas, l'écoulement d'air relevé est pratiquement identique à l'intérieur et à l'extérieur du canyon.

d) La réduction de l'écoulement d'air calculée à l'intérieur du canyon est fonction principalement de la direction du vent à cet endroit. Si le flux ambiant est pratiquement vertical par rapport à l'axe du canyon, le flux à l'intérieur du canyon est presque vertical et

parallèle à la fenêtre. Dans ce cas, un coefficient de pression beaucoup plus élevé correspond aux conditions à l'extérieur du canyon. On calcule donc un écoulement bien plus élevé si l'on considère les conditions ambiantes et que les forces d'inertie dominant.

Lorsque l'écoulement ambiant est parallèle à l'axe du canyon, on observe un écoulement similaire dans le canyon, les coefficients de pression étant dès lors pratiquement similaires [Réf 8].

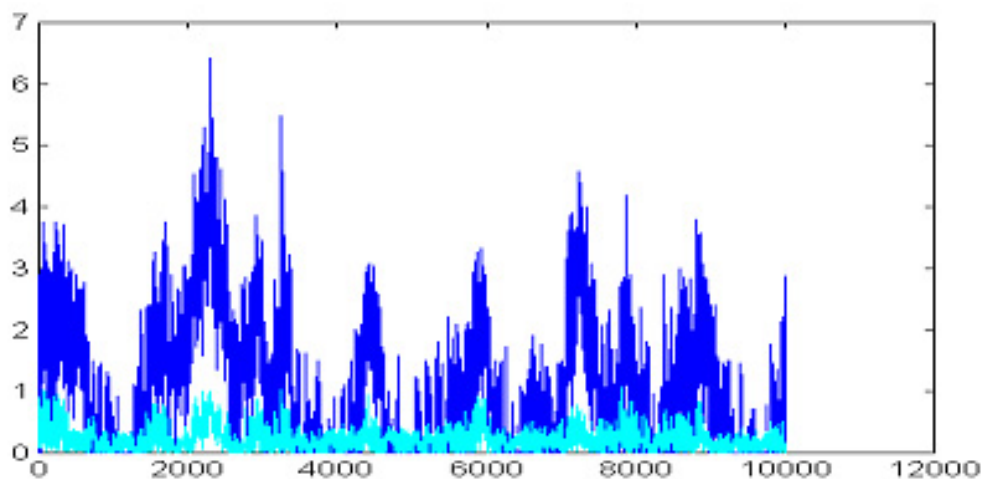


Figure 4 : Vitesse du vent (m/s) à l'intérieur (bleu clair) et à l'extérieur (bleu foncé) du canyon urbain

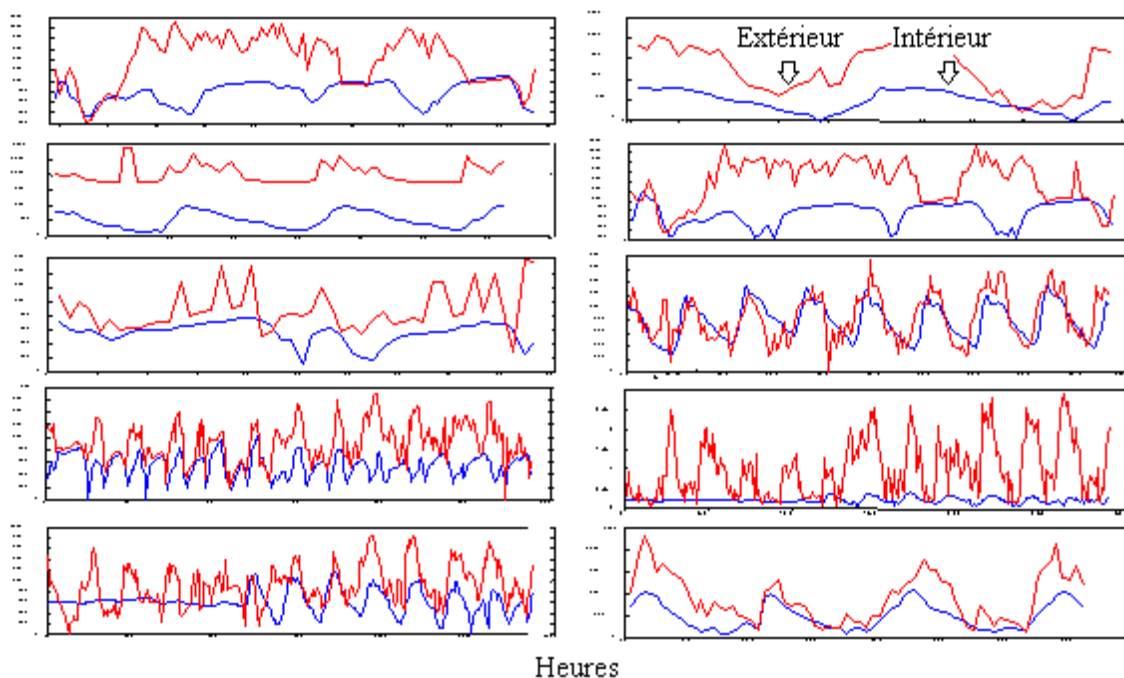


Figure 5 : Comparaison du taux d'écoulement d'air (m^3/h) dans un bâtiment à ventilation transversale situé à l'intérieur (bleu) et à l'extérieur d'un canyon (rouge). Valeurs basées sur des données expérimentales dans 10 canyons à Athènes.

6 Rafraîchissement des bâtiments urbains par ventilation naturelle

Les techniques de rafraîchissement passif présentent une alternative très sérieuse au conditionnement d'air conventionnel des bâtiments. Appliquées à des immeubles massifs, les techniques de ventilation nocturne peuvent réduire de manière significative la charge de refroidissement du conditionnement d'air des bâtiments et accroître les niveaux de confort thermique des bâtiments ne comportant pas de conditionnement d'air.

Les techniques de ventilation nocturne sont basées sur l'utilisation d'air froid ambiant comme dissipateur thermique pour réduire la température de l'air intérieur et de la structure du bâtiment. L'efficacité de rafraîchissement de ces techniques est basée principalement sur le taux d'écoulement d'air ainsi que sur la capacité thermique du bâtiment et le couplage efficace de l'écoulement d'air et de la masse thermique.

L'utilisation de techniques de ventilation nocturne dans les bâtiments (par exemple le bureau Tombazis à Athènes – Figure 6) a contribué à réaliser des gains énergétiques extrêmement importants (voir Figure 7) et a réduit la charge de refroidissement pour atteindre 5 kWh/m².a, [Réf 9].

En raison de la nette réduction de la vitesse du vent en environnement urbain et de la réduction correspondante du taux d'écoulement d'air, à la fois pour les configurations unilatérales et transversales, la charge de refroidissement des bâtiments situés à l'intérieur des canyons est bien plus élevée que celle des bâtiments dans lesquels le vent n'est pas obstrué (Figure 8). Plus particulièrement, de récentes études ont démontré qu'en configuration unilatérale, l'élévation de la charge de refroidissement s'établit entre 6 et 89 % contre une hausse comprise entre 18 et 72 % en configuration de ventilation transversale. Le canyon a donc un effet vraiment considérable sur la performance des techniques de ventilation nocturne des bâtiments équipés d'un conditionnement d'air.



Figure 6 : Bureau Tombazis à Athènes

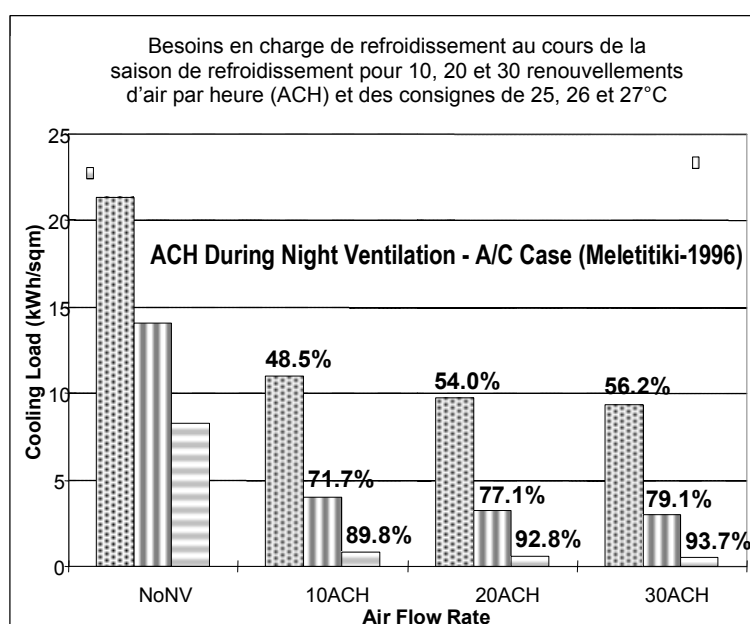


Figure 7 : Gains énergétiques au bureau Tombazis à Athènes

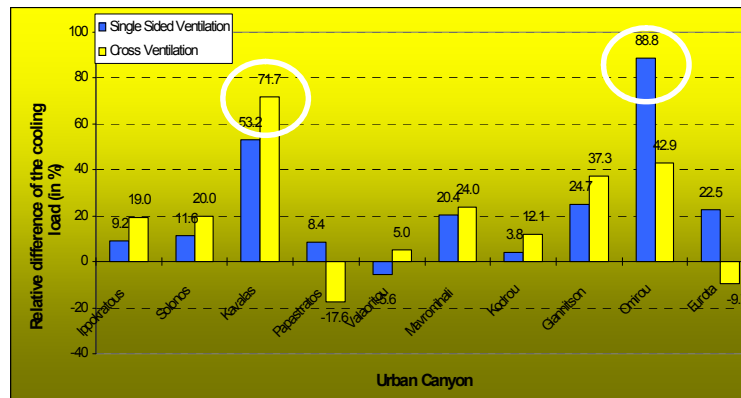


Figure 8 : Pourcentage d'accroissement de la charge de refroidissement en raison de l'effet canyon

Il est dès lors très important de considérer l'existence d'autres techniques que les fenêtres pour renforcer l'écoulement d'air dans les bâtiments urbains : des techniques traditionnelles telles que les cheminées solaires ou les tours de ventilation peuvent facilement être intégrées dans les bâtiments urbains et sont susceptibles de contribuer de manière significative à l'augmentation de l'écoulement d'air naturel à travers le bâtiment.

À ce propos, d'autres techniques de pointe comme le refroidissement par évaporation PDEC ou la fenêtre intelligente AIRLIT-PV ont été développées récemment.

Les cheminées solaires constituent des techniques de ventilation alternatives idéales en environnement urbain : elles peuvent être utilisées dans des canyons urbains profonds pour promouvoir l'écoulement d'air à travers des gaines verticales.

Dans les cheminées solaires, l'écoulement d'air s'effectue à travers une gaine verticale en raison de l'écart de température entre les parties inférieure et supérieure de la gaine (Figure 9). S'agissant de favoriser l'écoulement d'air, les surfaces externes supérieures de la gaine sont réchauffées par radiation solaire. L'air pénètre alors dans le bâtiment par des fenêtres latérales.

Récemment, de nombreux bâtiments ont été conçus de telle manière qu'ils puissent accueillir des cheminées solaires pour les besoins de ventilation. À cet égard, l'Environmental Building du BRE à Garston au Royaume-Uni témoigne d'une réussite exemplaire.

Les techniques de cheminées solaires ont été commercialisées et on trouve désormais des cheminées acceptables d'un point de vue esthétique pouvant faire l'objet d'une intégration directe et immédiate dans les bâtiments.

Traditionnellement, on recourt aux tours de ventilation en milieu urbain dans la mesure où celles-ci peuvent capter l'écoulement d'air non perturbé. Les amenées d'air doivent être placées dans la façade au vent et les évacuations d'air dans les façades à l'abri du vent (Figure 10).

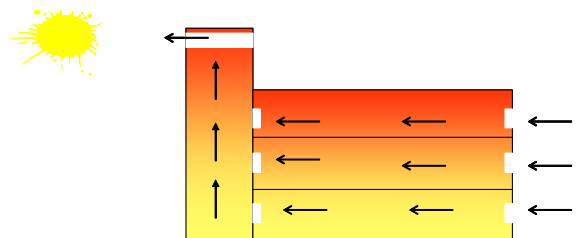


Figure 9 : Cheminée solaire

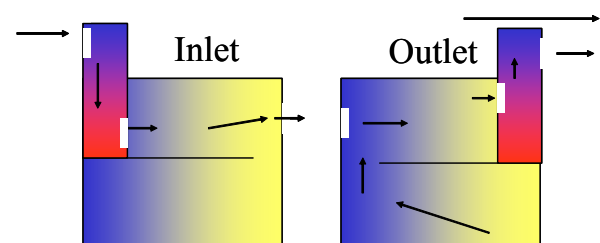


Figure 10 : Tours de ventilation

Le refroidissement passif par évaporation à courant d'air descendant est une technique utilisée depuis plusieurs siècles dans certaines parties du Moyen-Orient. Dans cette tradition, des capteurs de vent guident l'air extérieur à travers des vases poreux remplis d'eau, provoquant l'évaporation et apportant une baisse de température significative avant que l'air pénètre à l'intérieur du bâtiment [Réf 9]. Cette technique convient tout à fait pour une application dans un contexte urbain, dans la mesure où les aménages d'air se situent au-dessus du toit, où la concentration en polluants est plus faible. Dans le même temps, il est tout à fait indépendant de la vitesse et de la direction du vent, si bien que l'on n'observe pas d'influence négative d'éventuels bâtiments avoisinants plus hauts susceptibles de perturber les configurations de vent.

L'unité de façade intelligente AIRLIT – PV a été conçue récemment pour faire face au problème de ventilation naturelle contrôlée dans les bâtiments urbains, [Réf 9]. (Figure 11 – Figure 12).

Elle intègre ainsi les dernières réflexions en matière de contrôle solaire, de ventilation naturelle, d'éclairage lumineux naturel et d'énergie photovoltaïque.

L'unité comporte trois sections principales :

- la section inférieure est un orifice de ventilation assurant l'alimentation en air frais pour le refroidissement de confort en conditions diurnes de pointe et le refroidissement nocturne
- la section centrale est une fenêtre conventionnelle pouvant être ouverte par les occupants en conditions extrêmes
- la section supérieure de l'unité est une fenêtre de haut niveau servant également de voie de ventilation.

Le concept intègre chacun de ces éléments par le biais d'un contrôleur intelligent local, opérant soit en mode autonome, soit en communication avec le SGEB comme composant du Système de Gestion Environnementale du Bâtiment.

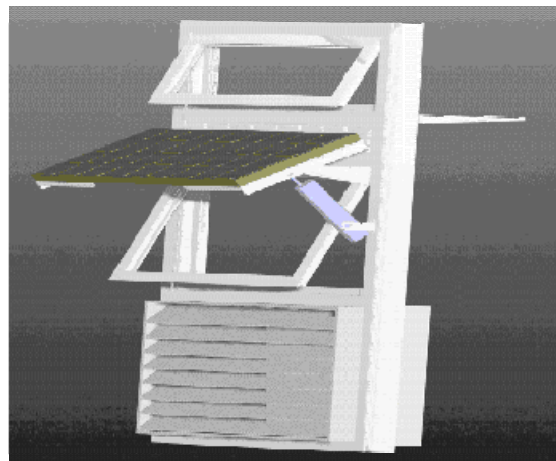


Figure 11: Fenêtre AIRLIT PV



Figure 12 : Health Centre Building dans le Nord de Londres [Réf 9]

7 Étude de cas

7.1 Évacuation d'air par cheminée solaire et amenée d'air par ventilation mécanique

Ce complexe de bâtiments se situe dans une zone urbaine jouxtant une gare ferroviaire. L'air frais y est acheminé à travers un conduit sous-terrain et une grille de plancher. La ventilation est mécanique et peut être contrôlée par les occupants. Les portes intérieures menant aux cages d'escaliers (tours de ventilation) sont maintenues en position ouverte et l'air chaud est évacué par effet de cheminée. Les gains solaires dans la tour augmentent la pression ascensionnelle [Réf 9]. (Figure 13).



Figure 13 : Exemples de cheminées solaires [Réf 9]

7.2 Ventilation mécanique à basse pression : Portcullis House, Westminster, Londres

Ce bâtiment intègre un système mécanique à faible vitesse comprenant un système de traitement de l'air par dépression et conduits sans refroidissement mécanique. L'air ventilé est refroidi par extraction d'eau souterraine issue de deux forages dans un aquifère crayeux. [Réf 9].



Figure 14 : La Portcullis House, Westminster, Londres [Réf 9]

7.3 Higher Education Building à Portsmouth

Bâtiment comportant à l'origine une ventilation naturelle, comprenant une ventilation unilatérale, une ventilation transversale et une colonne de ventilation. Des ventilateurs sont installés dans les escaliers pour seconder l'effet de cheminée. La ventilation nocturne est une option. L'air pénètre par les pièces et est évacué par un espace situé dans le plafond du corridor. Cet espace est relié à l'escalier qui expulse l'air par le haut. Les escaliers forment des cheminées aux toits vitrés offrant des éclairages s'ouvrant sélectivement. [Réf 9].

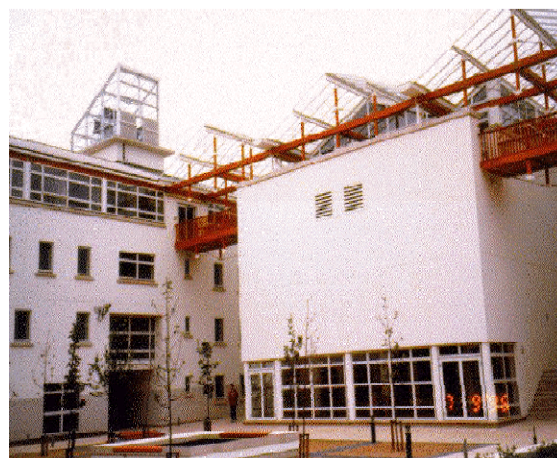


Figure 15 : Higher Education Building à Portsmouth [Ref 9]

7.4 Immeuble résidentiel à Ampelokipi

Cet immeuble recourt à un système de ventilation transversale et d'effet de cheminée. La surchauffe estivale est réduite en assurant une ventilation transversale à travers les ouvertures externes au nord et au sud. On évite la surchauffe de la zone d'ensoleillement en recourant à des ouvertures dispersées dans l'enveloppe vitrée de la verrière et à plusieurs régulateurs situés dans sa partie supérieure. Il était question de prévoir un ventilateur afin d'assurer une recirculation de l'air, mais celui-ci n'a jamais été installé [Réf 9].



Figure 16 : Immeuble résidentiel à Ampelokipi, Athènes [Réf 9]

8 Ouvrages consacrés à la ventilation naturelle

1. Allard F (Ed), Natural Ventilation in Buildings: A design Handbook, James & James, 1998. (<http://www.jxj.com/>)
2. Santamouris M. (Ed), Energy and Environmental Quality in the Urban Built Environment, , James and James, 2001, (<http://www.jxj.com/>)
3. Santamouris M. (Ed), Passive Cooling of Buildings, James and James, 1997, (<http://www.jxj.com/>)
4. Santamouris M. (Ed), State of the Art on Solar Thermal Technologies for Buildings, James and James, 2002, (<http://www.jxj.com/>)
5. IEA Annex 35 HybVent: Hybrid Ventilation (<http://hybvent.civil.auc.dk/hotel/hybvent/hybvent.htm>)
6. BRE Digest 399, Natural ventilation in non-domestic buildings, CRC Ltd, October 1994. (crc@construt.emap.co.uk)
7. CIBSE AM10, Natural Ventilation in non-domestic buildings, CIBSE, 1997. (<http://www.cibse.org/>)
8. CIBSE AM13, Mixed mode ventilation, CIBSE, 2000. (<http://www.cibse.org/>)

9 Références

1. UNFPA, United Nations Population Fund. 1998. État de la population mondiale 1998.
2. Nations Unies, 1998 : World Urbanisation Prospects, The 1996 Revision, Population Division, New York
3. UNEPTIE : Tomorrow's Market : Global Trends and their Implications for Business. 2002
4. Jones B. G. : 'Population Growth, Urbanization and Disaster Risk and Vulnerability in Metropolitan Areas : A conceptual Framework'. In Kreimer, Alcira and Mohan Munasinghe, Environmental Management and Urban Vulnerability, World Bank Discussion Paper, No 168, 1992.
5. Environmental Protection Agency : Cooling Our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light Colored Surfacing. January 1992.
6. Oke T. R. : 'Boundary Layer Climates', Routledge, 1988b.
7. Santamouris M. (Ed) : Energy and Environmental Quality in the Urban Built Environment, , James and James, 2001
8. V. Geros, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis and G. Guarracino : 'Experimental Evaluation of Night Ventilation Phenomena'. J. Energy and Buildings, 29, 141-154, 1999.
9. Sol-Vent website
<http://www.brunel.ac.uk/research/solvent>

Version originale en anglais

Traduction française réalisée avec le soutien de :



L'Air Infiltration and Ventilation Centre a été inauguré par l'Agence Internationale de l'Energie et est financé par les pays suivants: Belgique, République Tchèque, France, Grèce, Pays-Bas, Norvège et États-Unis d'Amérique.

L'Air Infiltration and Ventilation Centre apporte son soutien technique à la recherche théorique et appliquée sur l'infiltration d'air et la ventilation. Il ambitionne de promouvoir la compréhension de la complexité de la circulation de l'air dans les bâtiments. Il entend également faire progresser l'application efficace de mesures d'économie d'énergie dès la conception des nouveaux bâtiments et l'amélioration du parc immobilier existant.