

# LES TOITS DURABLES DANS LE VENT: QUELQUES EXEMPLES D'INTÉGRATION

TED STATHOPOULOS Ph.D., P.Eng.

MAURICIO CHAVEZ

*Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, Montréal,  
Canada*

## **RÉSUMÉ**

Cette communication propose un survol de quatre axes de recherche qui contribuent à mieux comprendre l'intégration du vent avec les toits urbains. Les axes de recherche sont : la ventilation naturelle, les panneaux solaires, les éoliennes urbaines et la dispersion de polluants en milieu urbain, cette dernière, analysée dans la perspective de qualité d'air intérieur. La compréhension de chaque phénomène permet (i) de renforcer la perception que le vent est un élément actif dans la dynamique urbaine (ii) que l'intégration du vent dès la conceptualisation d'un projet urbain permettrait des avancements significatifs du point de vue du développement durable, ceci à travers la matérialisation des gains énergétiques considérables ou des améliorations de la qualité de l'air.

## **INTRODUCTION**

La population mondiale est de plus en plus concentrée dans les grandes villes. Les implications de cette concentration ont grandement influencé les courants de recherches qui soulignent l'importance du développement urbain durable. Un des principaux axes du développement durable suggère de maximiser, notamment dans les étapes de conceptualisation d'un projet urbain, l'intégration des éléments environnementaux comme le soleil et le vent. Concrètement,

l'intégration de ces éléments bioclimatiques favorise l'efficacité énergétique des bâtiments et réduit la consommation d'énergie fossile.

La production d'énergie à partir du rayonnement solaire est une des composantes du développement durable les plus prometteuses. Au Canada le 46% des besoins électriques résidentiels pourraient être comblés par l'installation de panneaux photovoltaïques intégrés aux bâtiments et 29% si on combine le secteur résidentiel et le secteur commerciale ou institutionnel (Pelland et Poissant, 2006). Ceci dit, le potentiel solaire est énorme, malheureusement les politiques envers une économie basée sur les énergies renouvelables (en remplacement d'une économie dépendante du pétrole) sont très limitées. Néanmoins, l'avenir semble encourageant puisque depuis l'année 2000 l'exploitation solaire thermique a montré une croissance approximative de 15% annuellement au niveau mondiale (IEA, 2013). Cette croissance est un signe que la recherche dans le domaine solaire est de plus en plus pertinente et on peut dire la même chose pour l'énergie éolienne ou l'efficacité énergétique des bâtiments, la ventilation naturelle étant un excellent exemple.

L'aspect énergétique (production ou économie d'énergie) est seulement une des composantes du développement durable. L'amélioration de la qualité de vie en fait aussi partie. Dans ce contexte, la qualité d'air en milieu urbain devient un enjeu majeur en raison des effets directs sur la santé et l'espérance de vie des résidents. Par conséquent, les études dans ce domaine sont en pleine croissance. Des recherches pour mesurer l'impact de l'implantation massive de toits verts comme mécanisme d'absorption des polluants urbain menées par Yang et al. (2008) ou les études paramétriques pour prédire la dispersion de polluants menées par Chavez et al. (2011, 2012) sont des exemples qui permettent repousser les limites de la compréhension de notre environnement et ainsi adopter des mesures qui contribuent à améliorer la qualité de vie.

## **LE VENT URBAIN : NÉCESSAIRE ET DÉRANGANT À LA FOIS**

A échelle urbaine, l'écoulement du vent est déterminé principalement par la morphologie de la ville, c'est-à-dire, la distribution spatiale, les élévations, la forme et l'orientation des bâtiments qui composent le centre urbain. La compréhension de cette aérodynamique urbaine est un besoin incontournable non seulement pour les acteurs en planification urbaine, mais aussi pour les

gestionnaires et les autorités. La connaissance approfondie des bénéfices et inconvénients du vent dans le milieu urbain permettent la mise en place de politiques favorisant le bien commun.

Le vent est un élément très complexe qui présente une dualité d'aspects positifs et négatifs qu'il faut comprendre et connaître. A titre d'exemple, il est connu que le vent joue un rôle essentiel pour diluer dans l'atmosphère les émissions de polluants venant des cheminées ou du trafic véhiculaire. En contrepartie, le vent peut aussi rendre un espace public moins agréable ou difficilement fréquentable s'il présente des accélérations locales dangereuses. Du point de vue énergétique, le vent peut jouer un rôle clé en microclimatologie, par exemple, en favorisant ou non l'apparition des îlots de chaleurs, qui encore une fois, peuvent s'avérer positifs pour des villes froides ou négatifs pour d'autres, ce qui est généralement le cas. Également, le vent joue un rôle significatif, mais rarement considéré, dans un domaine en plein effervescence comme celui des panneaux solaires (thermiques ou photovoltaïques). Il est connu que la vitesse du vent sur la surface des panneaux solaires est le moteur qui active le transfert de chaleur vers l'atmosphère par convection forcée. Les recherches indiquent que ce refroidissement est souhaitable pour les panneaux photovoltaïques, mais très défavorable pour les panneaux thermiques.

Comprendre l'aérodynamique urbaine est crucial pour matérialiser des bénéfices collectifs. Pour y arriver, trois méthodes sont actuellement les plus utilisées: des études de terrain (à échelle naturelle) dans lesquelles on mesure les caractéristiques réelles du vent et son influence sur le toit; les études en soufflerie avec des modèles des bâtiments à échelle réduite, et les études par simulation numérique de fluides comme CFD (*computational fluid dynamics*). Les mesures de terrain sont les plus fiables puisque il s'agit de la vraie physique qui opère, cependant, leur applicabilité est limitée en raison de la complexité de la logistique et des coûts associées. De son côté, la soufflerie et la CFD sont des approximations de la réalité qui nécessitent plusieurs hypothèses et conditions pour obtenir des résultats. Néanmoins, ces deux techniques sont largement utilisées en recherche puisqu'elles ont l'avantage, pour les chercheurs, de pouvoir contrôler des paramètres et entamer des études paramétriques, situation impossible dans des études de terrain.

## EXEMPLES D'INTERACTION ENTRE LE VENT ET LES TOITS DES BÂTIMENTS

Dans une zone urbaine, le vent change non seulement sa trajectoire en permanence, mais aussi la concentration de polluants qu'il transporte et sa vitesse, qui augmente ou diminue en fonction des obstacles auxquels il est confronté, des températures et des conditions météorologiques entre autres. Ainsi, l'écoulement du vent en ville devient un élément bioclimatique hautement complexe et des fois imprévisible. Au niveau des toits urbains, plusieurs exemples démontrent la pertinence d'inclure le vent comme acteur clé pour le développement durable. Ceci grâce à son potentiel pour la ventilation naturelle, l'efficacité énergétique, la génération électrique et aussi son rôle dans la qualité de l'air. La section suivante présente quelques exemples d'intégration du vent dans la conception des toits urbains qui permettent de faire ressortir le plein potentiel du vent qui souffle en ville.

### VENTILATION NATURELLE

La ventilation naturelle est définie comme la circulation d'air à l'intérieur du bâtiment sans la participation de systèmes mécaniques (systèmes actifs). Elle permet de renouveler l'air intérieur, mais aussi collabore au refroidissement des espaces pendant les saisons chaudes. Les principales forces motrices dans la ventilation naturelle sont l'effet du vent, le tirage thermique ou la combinaison des deux. L'installation d'ouvertures qui facilitent la circulation d'air à travers le bâtiment ou l'aménagement de grands espaces (atria) chauffés par rayonnement solaire sont des stratégies qui favorisent la ventilation naturelle. Il est possible donc d'affirmer que la présence de la ventilation naturelle dans un bâtiment est le produit d'un choix architectural.

La ventilation qui est activée par l'effet du vent est connue comme ventilation transversale (*cross-ventilation*). Cette ventilation transversale est provoquée par deux éléments : par la différence de pression statique entre deux surfaces de l'enveloppe du bâtiment et par la quantité de mouvement du vent sur l'ouverture qui est face au vent. Pour favoriser la ventilation transversale, des ouvertures doivent être localisées aux endroits où la différence de pression est maximale. En principe, les pressions élevées se trouvent sur les surfaces face au vent et les basses pressions aux régions où les lignes de courant du vent se détachent de la surface du bâtiment. Ce détachement est suivi par l'apparition de tourbillons qui sont caractérisés comme

de zones de basse pression. En général, ceci a lieu dans les parties supérieures et murs du bâtiment en aval du vent.

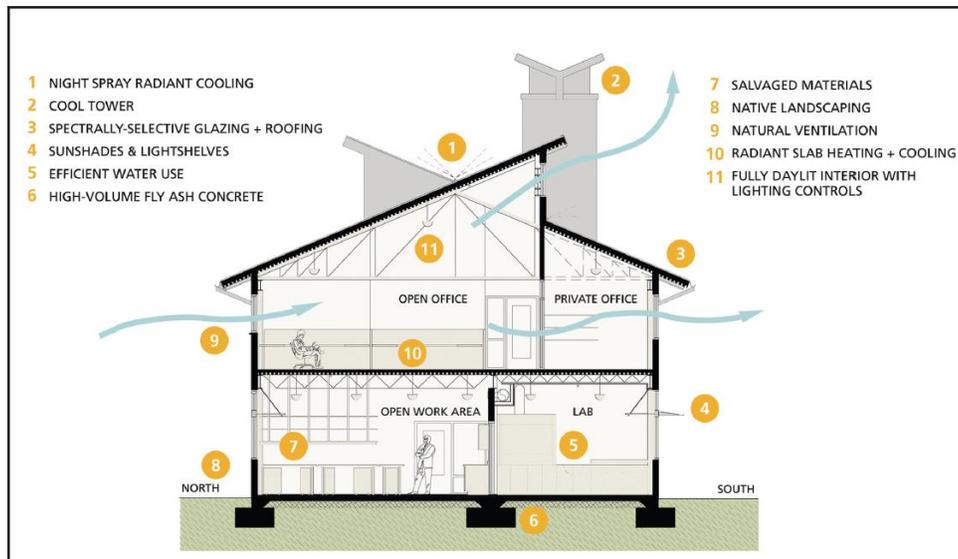


Figure 1. Exemple du concept de ventilation transversale (Brager, 2006)

Même si le principe de la ventilation transversale est connu, les guides pour son application efficace sont limités. Karava et al. (2011) ont réalisé une étude expérimentale en soufflerie portant sur les mécanismes qui activent la ventilation transversale pour un bâtiment générique. L'objectif de l'étude est de mieux comprendre les patterns élémentaires de l'écoulement présents dans la ventilation transversale et de faire le lien avec les caractéristiques et emplacement des ouvertures dans l'enveloppe du bâtiment. Les observations issues des expériences ont confirmé, entre autres, que le débit de circulation est maximisé quand les ouvertures sont axialement symétriques, quand l'entrée d'air est placée dans la partie inférieure du bâtiment ou quand le rapport de surface entre l'entrée et la sortie d'air est inférieur à 1. Il est important de noter que ces dernières configurations sont souhaitables pour un refroidissement intérieur efficace, mais qu'elles sont à éviter du point de vue du confort des occupants. Ceci est dû à des possibles vitesses de circulation de l'air intérieur au-delà de 0.5m/s, soit dépassant la vitesse limite du confort intérieur suggérée par ASHRAE (ASHRAE, standard 55).

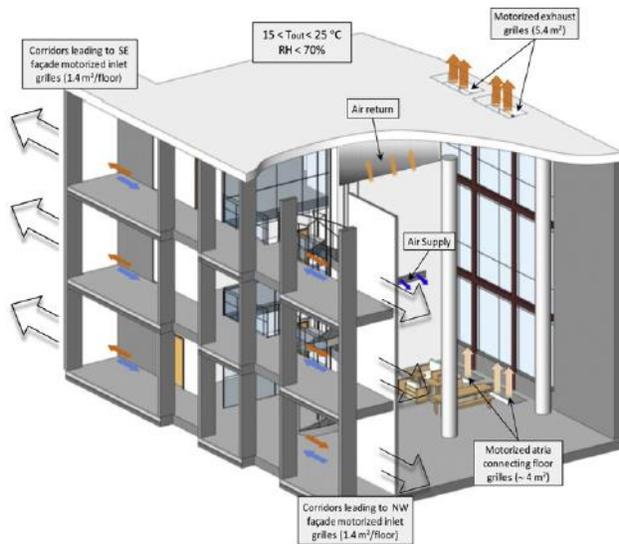


Figure 2. Schéma du système de ventilation hybride du *EV- building* de l'université Concordia (Karava et al. 2012)

La conclusion du paragraphe précédent nous mène à voir la ventilation naturelle non seulement comme un choix architectural sinon aussi comme un concept qui va être accompagné d'une stratégie de ventilation. Cette stratégie implique l'implémentation d'un système hybride qui combine des éléments passifs à des éléments actifs afin de procurer de l'air respirable de qualité pour les occupants tout en faisant des économies énergétiques (Brager, 2006). Concrètement, la ventilation hybride contient tous les éléments qui configurent et maximisent la ventilation naturelle, mais avec des systèmes de clapets qui rendent possible le contrôle de l'intensité de la circulation d'air intérieur selon le critère de confort établi. La clé du concept est la complémentarité des systèmes actifs et passifs qui permettent de faire des économies d'énergie en fonction de l'heure du jour ou de la saison de l'année. Karava et al. (2012) ont fait le suivi du système de ventilation hybride installé dans un des bâtiments institutionnels de l'Université Concordia. Dans ce cas, la ventilation hybride, avec des stratégies de températures intérieures variables et des opérations de ventilation nocturnes caractérisées par de hauts débits de circulation d'air, ont permis la réduction significative des coûts énergétiques de refroidissement de la charge thermique intérieur. Les données réelles obtenues ont indiqué que, pendant la saison chaude (avril-octobre) 30% du temps le système a opéré en mode hybride et une bonne partie de ce temps juste comme ventilation naturelle à coût zéro. Plus spécifiquement, pendant une période de trois mois, le système a opéré en mode coût zéro (ventilation naturelle) pour refroidir

6,500kWh ce qui représente 30% de la charge total de refroidissement du bâtiment estimée en 20,500kWh. Les stratégies de ventilation hybrides ont un avenir prometteur pour les bâtiments commerciaux et institutionnels. Cependant il faut retenir qu'avant tout il est fondamentale de comprendre les mécanismes de la ventilation naturelle et le rôle primordiale qu'y joue le vent. Dans l'étape de conceptualisation d'un projet urbain, la définition de la forme d'un bâtiment, qui a certainement une composante esthétique importante, est aussi le moment crucial pour introduire des concepts en faveur de la ventilation naturelle.

## PANNEAUX SOLAIRES

Les panneaux solaires installés sur les toits ou façades des bâtiments permettent d'assister aux besoins énergétiques du bâtiment. Cependant, l'efficacité des panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques (PV) est fortement liée à la vitesse du vent proche de sa surface. Cette situation est rarement prise en compte au moment de l'étude d'installation des panneaux solaires. Dans cette section, sont présentées deux recherches qui font le point sur l'effet du vent sur l'efficacité énergétique des panneaux solaires.

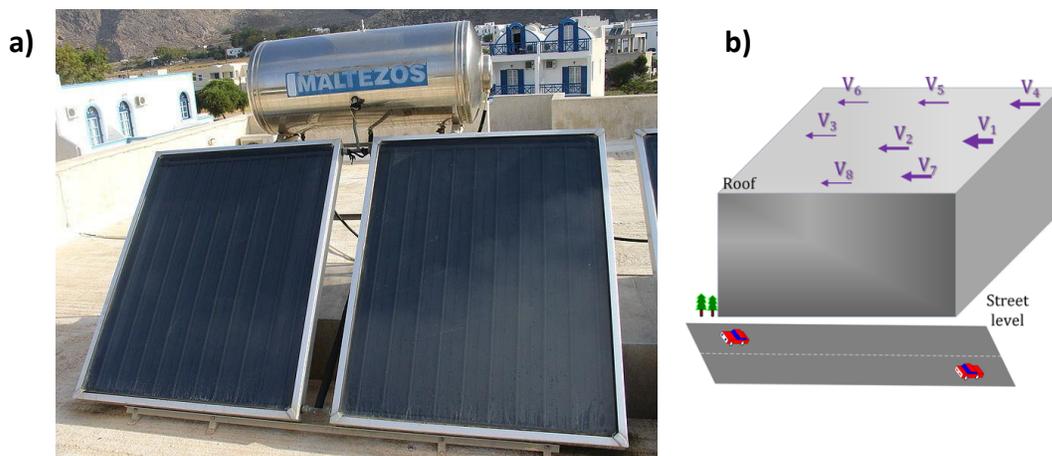


Figure 3: a) Panneaux solaire thermique. b) Schéma que qui représente le champ de vitesse du vent sur le toit d'un bâtiment.

En général, les vitesses élevées du vent favorisent le refroidissement des panneaux solaires. Comme déjà mentionné, le refroidissement est souhaitable pour les PV, mais très défavorable

pour les panneaux thermiques. Dans le premier cas, ceci s'explique parce que le vent évite la surchauffe du PV et ainsi maintient l'efficacité de génération électrique dans la valeur optimale (Mirzaei et Carmeliet, 2013). Dans le deuxième cas, l'explication se trouve dans le refroidissement du panneau thermique qui réduit la chaleur utile à transférer vers le caloporteur. Sachant que la distribution de vitesses sur le toit d'un bâtiment est non-uniforme, l'emplacement optimal des panneaux solaires sur le toit est une question qui mérite d'être analysée en détail.

Ladas et Stathopoulos (2014) ont présenté une étude expérimentale en soufflerie de la distribution de vitesse sur le toit d'un bâtiment et sa corrélation avec la performance des panneaux solaire thermique, voir Figure 3 a). L'objectif de l'étude était d'identifier les zones à favoriser pour maximiser les gains thermiques des panneaux solaires pour un bâtiment isolé et non-isolé. Le terme non-isolé signale la présence de bâtiments adjacents en amont de l'écoulement. D'abord, l'étude a mis en évidence le caractère non-homogène du champ des vitesses sur le toit du bâtiment isolé avec des valeurs qui peuvent varier entre 20% et 62% selon l'endroit. En même temps, les mesures de vitesses avec la présence de bâtiments adjacents ont présenté des réductions de vitesse entre 45% et 55% par rapport au cas du bâtiment isolé. Cependant, la présence d'un haut bâtiment juste en amont peut produire une augmentation de vitesse entre 20% à 30% comparativement à un bâtiment isolé; ceci à cause des augmentations de vitesses qui se créent au niveau du sol près d'un haut bâtiment. La performance des panneaux solaires dépend du coefficient de transfert thermique à sa surface qui, à son tour, dépend de la vitesse du vent.

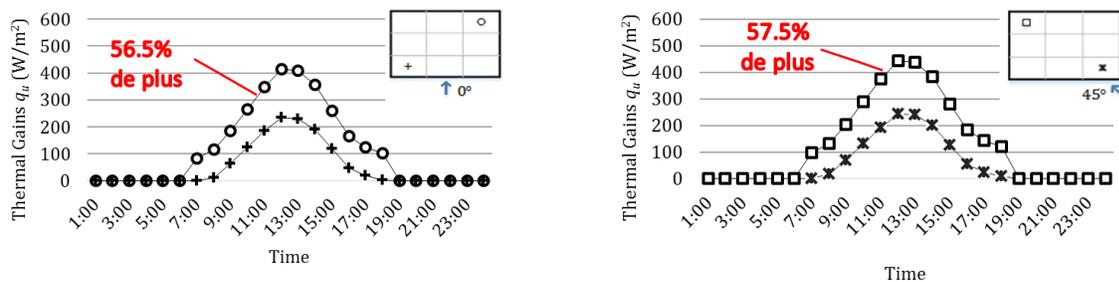


Figure 4. Effet de l'emplacement sur le toit sur les gains thermiques journalier pour deux directions du vent.

D'après les auteurs, la pratique courante est d'estimer la production d'énergie de panneaux solaires en considérant une vitesse unique sur le toit. En d'autres mots, des recommandations par

rapport au meilleur emplacement sont inexistantes. Pourtant, les résultats de cette recherche montrent que des améliorations de l'ordre du 50% sur les gains thermiques journalier peuvent être attribuables au déplacement du panneau dans la partie postérieure du toit plutôt que le placer en avant, comme indiqué dans Figure 4.

Parmi les panneaux solaires plus efficaces on trouve le *unglazed transpired collector* (UTC). Le UTC est un capteur d'énergie solaire qui absorbe le rayonnement solaire et le transfère par convection à l'air qui traverse le système par des ouvertures, voir Figure 5. L'air préchauffé qui traverse les ouvertures entre dans le système de ventilation du bâtiment permettant des économies d'énergie pour le traitement d'air.

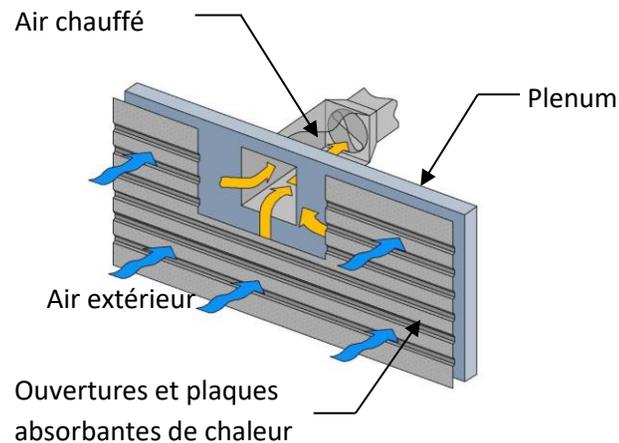


Figure 5. Schéma d'un UTC

Comme mentionné précédemment, la vitesse du vent en milieu urbain est dramatiquement influencée par la présence des bâtiments adjacents ce qui fait varier la performance de UTC en conséquence. L'effet plus problématique du vent sur le UTC est de refroidir les plaques par convection tout en dégradant la charge thermique disponible pour préchauffer l'air. Vasan et Stathopoulos (2013) ont fait une étude expérimentale en soufflerie pour quantifier la perte de performance énergétique d'un UTC soumis à des vitesses fluctuantes du vent urbain. Les résultats de l'étude ont démontré que l'influence du vent local peut réduire la performance du UTC de l'ordre de 20%. L'étude relève la pertinence de développer des modèles pour l'estimation des coefficients thermiques qui tiennent en compte la spécificité morphologique autour du bâtiment. Des études en aérodynamique urbaine, soit par soufflerie ou numériques

(CFD), permettent d'assister au développement de ces modèles et ainsi mieux prédire la performance des UTC.

## ÉOLIENNES EN MILIEU URBAIN

L'installation d'éoliennes sur les toits ou façades des bâtiments peuvent contribuer à l'autonomie énergétique des bâtiments grâce à la production d'électricité. La technologie entourant ces éoliennes urbaines est très prolifique et les concepts innovateurs d'éoliennes verticales, horizontales ou hélicoïdales n'a presque pas de limites. L'installation de ces systèmes sur le toit des hauts bâtiments se voit favorisée par un vent relativement stable avec des vitesses plus élevés, mais elles peuvent aussi être installées dans les espaces verticales entre les bâtiments où le vent tient s'accélérer. Quoi qu'il en soit, avant tout processus d'analyse pour l'implantation d'éolienne en milieu urbain, une étude pour déterminer les meilleurs emplacements en ville doit être accomplie. Évidemment, cet emplacement doit assurer des vitesses de vent favorables pour la production d'énergie. Les études d'aérodynamique urbaine soit numérique ou expérimentale permettent d'identifier ces zones favorables. Par conséquent, l'estimation fiable des vitesses et direction du vent suivit par le calcul du potentiel de génération électrique deviennent une étape cruciales pour démarrer tout étude de faisabilité économique d'installation d'éoliennes.

Des recherches, comme celui de Al-Quraan et al. (2014) sont menées pour aborder la question du potentiel éolien en milieu urbain. Leur article propose une méthodologie pour estimer la génération d'énergie à l'aide des données expérimentales - mesures de vitesse du vent qui sont converties en énergie équivalente - pour un modèle réduit de bâtiment, où serait installée l'éolienne, et les bâtiments adjacents en soufflerie (voir Figure 6 a)). Afin de valider la méthode, décrite en détail dans leur publication, Al-Quraan et al. (2014) ont comparé les valeurs d'énergie estimée avec des calculs d'énergie à partir de mesures de vitesse réelles de terrain. Les mesures de terrain furent obtenues à l'aide d'un anémomètre installé sur le toit d'un des bâtiments de l'Université Concordia, voir Figure 6 b). La comparaison sur trois mois, présentée dans la Figure 7, montre une concordance acceptable entre l'énergie estimée et les valeurs de terrain avec une différence moyenne de l'ordre de 5%. Cependant, les auteurs mentionnent que cette concordance peut se voir significativement affectée dans le cas où la morphologie urbaine est hautement non-

homogènes, c'est-à-dire, quand les élévations et caractéristiques des bâtiments adjacents sont très inégales.



Figure 6. a) Maquette 1:400 du groupe des bâtiments de l'université Concordia et ses bâtiments adjacents. b) Anémomètre sur toit du *EV-building* de Concordia

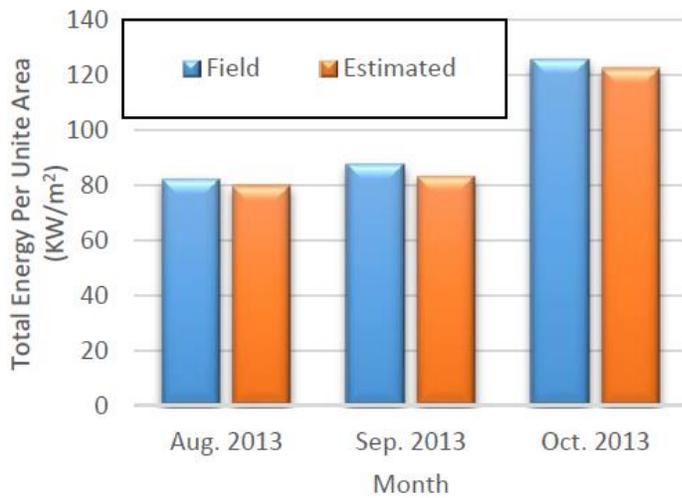


Figure 7. Comparaison entre énergie éolienne mesurée et estimée sur toit du *EV-building*

## QUALITÉ D'AIR INTÉRIEUR

La pollution de l'air en milieu urbain est de nos jours une préoccupation majeure en ce qui concerne son impact sur la santé et bien-être de la population. Une autre composante du développement durable. La qualité de l'air intérieur des bâtiments dépend grandement de la qualité de l'air extérieur, en particulier pour les bâtiments hermétiques qui ont une prise d'air frais unique. Pendant longtemps, peu d'attention a été apportée à ces prises d'air frais comme non plus aux caractéristiques et emplacements des cheminées d'évacuation des bâtiments. Cependant, il est connu que la contamination des prises d'air par les émissions provenant des cheminées – connu comme ingestion ou re-ingestion des contaminants – est un problème de pollution urbaine récurrent. La nécessité d'étudier ce phénomène et d'élaborer de critères de design pour éviter ou limiter l'ingestion de contaminants permet d'améliorer la qualité de l'air intérieur des bâtiments.

Des études paramétriques comme celle de Chavez et al. (2011, 2012) sont nécessaires pour mieux comprendre la dynamique des polluants en ville. À titre d'exemple, Chavez et al. (2012) ont analysé par simulation numérique l'effet de la hauteur du bâtiment en amont d'un bâtiment émetteur qui a une cheminée au milieu du toit. Les résultats ont montré qu'au fur et à mesure la hauteur du bâtiment en amont augmente, les contaminants ont la tendance à se déplacer dans le sens contraire de l'écoulement du vent et rester coincés entre les deux bâtiments. Ce phénomène est présenté dans la Figure 8 où le nuage gris délimite la zone des concentrations élevées d'un contaminant générique. L'évolution du nuage permet de comprendre la dynamique des contaminants pour différentes configurations et d'identifier, en même temps, les surfaces où l'installation de prises d'air s'avère non recommandable. Des analyses comme celui-ci permettent d'élaborer des recommandations de base des caractéristiques des cheminées (e.g. localisation, hauteur, vitesse d'impulsion) et d'emplacement des prises d'air frais afin d'éviter l'ingestion des contaminants.

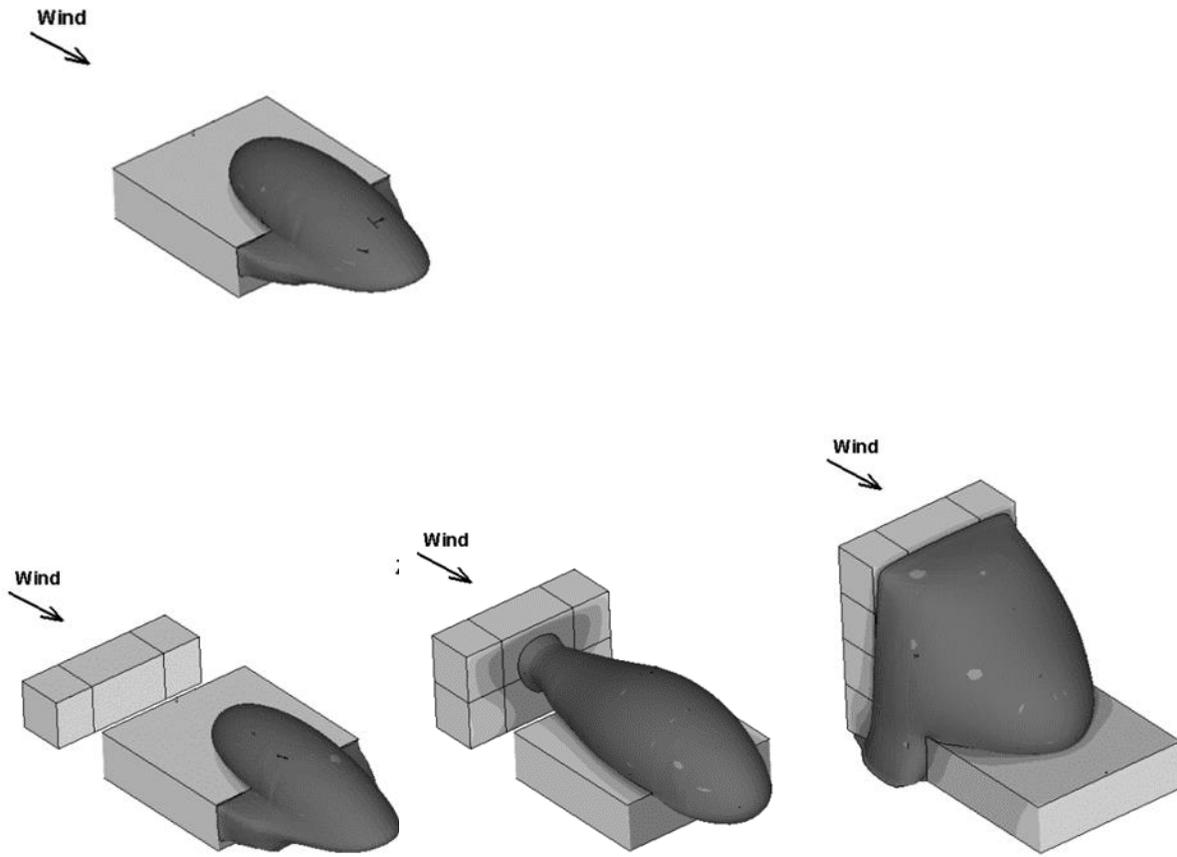


Figure 8. Effet d'un bâtiment en amont d'un autre qui contient une cheminée sur le toit

## CONCLUSION

Cet article a présente 4 axes de recherche (ventilation naturelle, panneaux solaire, éoliennes et dispersion de polluants) qui contribuent à faire ressortir le potentiel du vent sur les toits urbains et à en éviter les inconvénients. Il est a noté que, dans tous les domaines observés, comprendre l'écoulement du vent autour d'un bâtiment devient incontournable. Le vent urbain est le résultat d'une diversité de facteurs et régimes d'écoulement qui se superposent et interagissent. Pendant l'étape de conceptualisation d'un projet urbain la définition de la forme d'un bâtiment, qui a certainement une grande composante esthétique, constitue le moment cruciale pour d'introduire des concepts qui favorisent la ventilation naturelle, qui optimise la performance thermique des panneaux solaires et qui évitent ou limitent les problèmes de re-ingestion de polluants.

## **REMERCIEMENT**

Les auteurs tiennent à remercier les membres du groupe de recherche en aérodynamique urbaine de l'Université Concordia pour leurs très précieuses contributions dans la présente publication. Merci à Neetha Vasan, Panagiota Karava, Dimitris Ladas et Ayman Al-Quraan. Les auteurs remercient également le groupe de recherche IGNIS MUTAT RES pour son support financier.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Al-Quraan, A., Stathopoulos, T., Pillay., P. 2014. Wind Tunnel Technology for Wind Power and Energy Estimation in Urban Areas. Paper in preparation

ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers; 2007

Brager, G.S., 2006. Mixed-mode cooling. ASHRAE Journal 48, 30-37.

Chavez, M., Hajra, B., Stathopoulos, T., Bahloul, A., 2011. Near-field pollutant dispersion in the built environment by CFD and wind tunnel simulations. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 99, 330-339.

Chavez, M., Hajra, B., Stathopoulos, T., Bahloul, A., 2012. Assessment of Near-field Pollutant Dispersion: Effect of Upstream Buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 104-106, 509-515.

IEA, 2013. Renewables Information 2013. Paris: International Energy Agency.

Ladas, D. and Stathopoulos, T. Performance of solar collectors on urban roofs under strong wind conditions. Conference paper to be presented on ICBEST 2014, June 09-12, Aachen, Germany.

Mirzaei, P. A. and Carmeliet, J., 2013. Influence of the underneath cavity on buoyant-forced cooling of the integrated photovoltaic panels in building roof: a thermography study. Progress in Photovoltaics: Research and Application. doi: 10.1002/pip.2390.

Karava P., Athienitis, A., Stathopoulos, T., Mouriki, E., 2012. Experimental study of the thermal performance of a large institutional building with mixed-mode cooling and hybrid ventilation. *Building and Environment*, 53, 313-326.

Karava, P., Stathopoulos, T., Athienitis, A.K., 2011. Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements. *Building and Environment*, 46, 266-279.

Pelland, S., Poissant, Y., 2006. An evaluation of the potential of building integrated photovoltaics in Canada. 31<sup>st</sup> Annual Conference of the Solar Energy Society of Canada (SESCI). Aug. 20-24th 2006, Montréal Canada.

Vasan, N., Stathopoulos, T., 2014. Experimental study of wind effects on unglazed transpired collectors. *Solar Energy*, 101, 138-149.

Yang, J., Yu, Q., Gong, P., 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, 42 (31), 7266-7273.