



Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains

Revue de littérature

Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains

Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels

Juillet 2009

AUTEURE

Mélissa Giguère, M. Env.
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

MISE EN PAGES

Nicole Dubé
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

PHOTOGRAPHIES

Mélissa Giguère, M. Env.
Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels
Institut national de santé publique du Québec

La présente étude est financée par le Fonds vert dans le cadre de l'Action 21 du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.

Le présent document est disponible en format PDF sur le site Web de l'Institut national de santé publique du Québec à <http://www.inspq.qc.ca>.

Les reproductions à des fins d'étude privée ou de recherche sont autorisées en vertu de l'article 29 de la Loi sur le droit d'auteur. Toute autre utilisation doit faire l'objet d'une autorisation du gouvernement du Québec qui détient les droits exclusifs de propriété intellectuelle sur ce document. Cette autorisation peut être obtenue en formulant une demande au guichet central du Service de la gestion des droits d'auteur des Publications du Québec à l'aide d'un formulaire en ligne accessible à <http://www.droitauteur.gouv.qc.ca/autorisation.php>, ou en écrivant un courriel à droit.auteur@cspq.gouv.qc.ca.

Les données contenues dans ce document peuvent être citées, à condition d'en mentionner la source.

DÉPÔT LÉGAL – 3^e TRIMESTRE 2009
BIBLIOTHÈQUE ET ARCHIVES NATIONALES DU QUÉBEC
BIBLIOTHÈQUE ET ARCHIVES CANADA
ISBN : 978-2-550-56805-6 (PDF)

©Gouvernement du Québec (2009)

REMERCIEMENTS

L'auteure tient à remercier les réviseurs de cette publication, dont la disponibilité à partager leur expertise à été grandement appréciée.

Diane Bélanger, chercheuse
Centre de recherche du Centre hospitalier universitaire de Québec

Emmanuelle Boulfroy
Centre collégial de transfert de technologie en foresterie affilié au Collège d'enseignement général et professionnel de Sainte-Foy

Musandji Fuamba, professeur adjoint
Département des génies civil, géologique et des mines
École Polytechnique de l'Université de Montréal

Pierre Gosselin, médecin-conseil
Institut national de santé publique du Québec

Guy Lalonde, directeur technique
Association des maîtres couvreurs du Québec

Xavier Laplace, président
Les Toits Vertige

Catherine Rivard, coordonnatrice
Secteurs Eau, Sols et Eaux souterraines
Réseau Environnement

Owen Rose, architecte
Provencher Roy et associés
Président du Centre d'écologie urbaine de Montréal

Madeleine Rousseau, chercheuse
Conseil national de recherches du Canada

AVANT-PROPOS

Le Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec intitulé *Le Québec et les changements climatiques, un défi pour l'avenir*, met à contribution plusieurs ministères et organismes québécois. Le Fonds vert, une redevance sur les carburants et les combustibles fossiles, assure majoritairement le financement de 26 actions s'articulant autour de deux grands objectifs : la réduction ou l'évitement des émissions de gaz à effet de serre et l'adaptation aux changements climatiques.

Le ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) est responsable du volet santé de l'Action 21 visant l'instauration des mécanismes qui serviront à prévenir et à atténuer les impacts des changements climatiques sur la santé. Il s'est ainsi engagé, d'ici 2013, à œuvrer dans six champs d'action liés à l'adaptation du Québec aux changements climatiques, comptant chacun plusieurs projets de recherche ou d'intervention, soit :

- La mise sur pied d'un système intégré de veille-avertissement en temps réel de vagues de chaleur et de surveillance des problèmes de santé associés pour toutes les régions du Québec susceptibles d'en être affectées.
- L'adaptation du système de surveillance des maladies infectieuses afin de détecter rapidement les agents pathogènes, les vecteurs et les maladies dont le développement est favorisé par le climat.
- La mise sur pied d'un système de surveillance des problèmes de santé physique et psychosociale liés aux événements météorologiques extrêmes (tempêtes hivernales et estivales, orages et pluies torrentielles, tornades, incendies de forêt, inondations, glissements de terrain, érosion côtière).
- Le soutien de l'adaptation du réseau de la santé aux événements météorologiques extrêmes, sur les plans clinique, social et matériel, afin de protéger les populations les plus vulnérables.
- Le soutien de l'aménagement préventif des lieux et des espaces habités pour atténuer l'impact des changements climatiques sur la santé des populations vulnérables.
- L'amélioration de la formation et la diffusion des connaissances sur les problèmes de santé liés aux changements climatiques et les solutions possibles.

Le MSSS a confié à l'Institut national de santé publique du Québec, en novembre 2007, le mandat de gestion du volet santé de l'Action 21, y compris la coordination de l'ensemble des projets indiqués ci-dessus, le soutien professionnel au MSSS et les relations avec les partenaires.

La présente étude s'insère dans la mise en place de programmes de soutien au milieu municipal et aux réseaux de l'éducation et de la petite enfance afin d'appuyer la lutte aux îlots de chaleur urbains et l'adaptation préventive des programmes et des infrastructures aux changements climatiques. Elle constitue par le fait même une référence pour la mise en œuvre de projets locaux de démonstration de lutte préventive aux îlots de chaleur urbains, qui feront l'objet d'appels de propositions au cours de l'été et de l'automne 2009.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	IX
GLOSSAIRE	XI
INTRODUCTION.....	1
1 MÉTHODOLOGIE	3
1.1 Méthodologie de la revue	3
1.2 Critères de sélection	3
1.3 Révision	3
2 CAUSES, IMPACTS ET CONFORT THERMIQUE	5
2.1 Définition d'îlot de chaleur urbain	5
2.2 Causes	6
2.2.1 Émissions de gaz à effet de serre	6
2.2.2 Perte progressive du couvert forestier dans les milieux urbains	6
2.2.3 Imperméabilité des matériaux.....	6
2.2.4 Propriétés thermiques des matériaux	7
2.2.5 Morphologie urbaine et taille des villes.....	7
2.2.6 Chaleur anthropique	7
2.3 Impacts	8
2.3.1 Impacts sur l'environnement.....	8
2.3.2 Impacts sur la santé.....	9
2.4 Confort thermique	9
2.5 Climatisation	10
3 LES ÎLOTS DE CHALEUR AU QUÉBEC	11
3.1 Zones où les actions sont requises	11
3.2 Outils de détection des îlots de chaleur urbains	11
4 MESURES DE LUTTE AUX ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS	13
4.1 Végétation et fraîcheur	13
4.1.1 Stratégie urbaine de végétalisation	14
4.1.2 Plantation ponctuelle d'arbres et de végétation	15
4.1.3 Végétalisation des stationnements	15
4.1.4 Végétalisation du pourtour des bâtiments	16
4.1.5 Murs végétaux	16
4.1.6 Toits verts	17
4.1.7 Gains de fraîcheur et autres bénéfices liés à la végétalisation des milieux urbains.....	20

4.2	Infrastructures urbaines durables	22
4.2.1	Bâtiments	22
4.2.2	Infrastructures routières	27
4.2.3	Aménagement urbain	28
4.2.4	Gains de fraîcheur et autres bénéfices liés aux infrastructures urbaines durables	30
4.3	Gestion durable des eaux pluviales	31
4.3.1	Arbres et toits verts	31
4.3.2	Revêtements perméables	32
4.3.3	Jardins pluviaux.....	34
4.3.4	Bassins de rétention	34
4.3.5	Tranchées de rétention	34
4.3.6	Puits d'infiltration	34
4.3.7	Chaussées à structure réservoir	35
4.3.8	Arrosage des pavés imperméables avec de l'eau recyclée	35
4.3.9	Gains de fraîcheur et autres bénéfices liés à la gestion des eaux pluviales	35
4.4	Diminution de la chaleur anthropique.....	36
4.4.1	Contrôle de la production de chaleur dans le bâtiment	36
4.4.2	Réduction du parc automobile en milieu urbain	38
4.4.3	Bâtiments passifs : contrôle de la demande de climatisation	40
4.4.4	Gains de fraîcheur liés à la climatisation passive.....	43
5	PROJETS RÉALISÉS.....	45
6	SYNTHÈSE ET COMPARAISON DES MESURES DE LUTTE AUX ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS.....	49
6.1	Exemples d'application des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains	49
6.1.1	Bâtiments	50
6.1.2	Aménagement urbain	52
6.2	Comparaison des différentes mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains	54
6.2.1	Critères de comparaison	54
7	SUGGESTIONS	59
	RÉFÉRENCES	61
	ANNEXE 1	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Taux d'émission anthropique et bilan radiatif net annuel pour quelques villes américaines, européennes et asiatiques.....	7
Tableau 2	Normales climatiques de trois villes québécoises (1971-2000)	11
Tableau 3	Arbres ayant un potentiel allergisant.....	14
Tableau 4	Comparaison des toits verts de types extensif et intensif	19
Tableau 5	Albédo et facteur d'émission de différents matériaux	22
Tableau 6	Différents types de protections solaires extérieures	26
Tableau 7	Différents types de ventilation mécanique contrôlée (VMC)	41
Tableau 8	Refroidissement en °C selon la vitesse de l'air (m/s).....	43
Tableau 9	Exemples de mesures de végétalisation.....	45
Tableau 10	Exemples de mesures liées au design durable des infrastructures urbaines	46
Tableau 11	Exemples de mesures de gestion durable des eaux pluviales	46
Tableau 12	Exemples de mesures de réduction de la chaleur anthropique	47
Tableau 13	Comparaison des différentes mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains	55

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Schéma de l'îlot de chaleur urbain.....	5
Figure 2	Exemple d'une cartographie d'îlots de chaleur urbains à Montréal	12
Figure 3	Végétalisation du pourtour du bâtiment	16
Figure 4	Murs végétaux de façade.....	17
Figure 5	Toits végétaux extensifs.....	18
Figure 6	Jeux d'eau et piscine.....	29
Figure 7	Dalles imperméables avec joints perméables. Espaces piétonniers permettant la percolation de l'eau	33
Figure 8	Stationnement végétalisé.....	33
Figure 9	Coupe d'un puits provençal.....	42
Figure 10	Organigramme des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains concernant les bâtiments	50
Figure 11	Organigramme des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains concernant l'aménagement urbain.....	52

GLOSSAIRE

Adaptation

Décroissance graduelle de la réponse de l'organisme à une exposition répétée à un stimulus, y compris toutes les actions qui le rendent plus apte à survivre dans un tel environnement¹.

Albédo

Fraction du *rayonnement solaire* incident réfléchi par une surface¹.

Capacité thermique

Quantité de chaleur mise en réserve lorsque sa température augmente de 1 °C. On l'exprime en Wh/m³ °C et on l'obtient en faisant le produit de la masse par la chaleur spécifique du matériau. Plus elle est grande, plus la quantité de chaleur à apporter à un matériau pour élever sa température est grande².

Convection

Déplacement de chaleur au sein d'un fluide par le mouvement de l'ensemble de ses molécules².

Éblouissement

Inconfort ou affaiblissement de la vision que l'on expérimente lorsque des parties du champ visuel sont excessivement claires comparativement à l'entourage².

Effet de cheminée

Tendance à s'élever qu'a un fluide en s'échauffant, en raison de la diminution de sa densité. On utilise ce phénomène thermique naturel pour évacuer la surchauffe de l'intérieur d'une construction en facilitant la sortie de l'air tiède ou chaud à travers des ouvrants en partie haute. Ce tirage thermique peut induire une dépression intérieure susceptible d'aspirer l'air plus frais du dehors à travers des ouvrants en partie basse².

Facteur de vue du ciel

Mesure de l'ouverture vers le ciel d'une texture urbaine qui a une influence sur divers phénomènes climatologiques tels que l'îlot de chaleur urbain, l'éclairage naturel et l'absorption de chaleur¹.

Morphologie urbaine

Forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments ainsi que les espaces que celui-ci crée¹.

¹ Nikolopoulou, M. (2004) *Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain : une approche bioclimatique*. Center for Renewable Energy Sources, 64 p.

² Outils solaires (2009) *Glossaire solaire*. Accessible au : <http://www.outilssolaires.com/Glossaire/default.htm>. Consulté le 3 avril 2009.

Rayonnement solaire

Ensemble des rayonnements émis par le soleil. La lumière est la partie visible du rayonnement et correspond à la plage de longueurs d'onde comprise entre 380 et 780 nanomètres, qui s'étend du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune. Le rayonnement solaire de plus petite longueur d'onde est l'ultraviolet, partiellement intercepté par la couche d'ozone dans la haute atmosphère. Au-delà du spectre visible, le rayonnement solaire de plus grande longueur d'onde est appelé infrarouge (chaleur), absorbé en partie par la vapeur d'eau de l'atmosphère³.

Transit Oriented Development (TOD)

Concept créé par Peter Calthorpe, un des fondateurs du Nouvel Urbanisme, le *Transit Oriented Development* « conduit à aménager des quartiers denses, multifonctionnels, autour de pôles de transports collectifs. Certains principes et objectifs sont favorisés tels que la qualité de vie, la diversité et l'accessibilité tant résidentielle que commerciale, les espaces publics, les formes de mobilité douce, la diversité des fonctions créant une animation continue, les services de proximité⁴ ».

³ Salomon, T., Aubert, C. (2003) *La fraîcheur sans clim*. Terre Vivante, Paris, 160 p.

⁴ Urbatod (2009) *Transit oriented development*. Accessible au : <http://www.urbatod.org/p1.htm>.

INTRODUCTION

Selon le Groupe intergouvernemental sur le climat (GIEC), onze des douze années les plus chaudes jamais observées ont été enregistrées depuis 1995 et seraient attribuables à la présence accrue des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les villes d'Amérique du Nord, « qui subissent actuellement des vagues de chaleur, devraient faire face à une hausse du nombre, de l'intensité et de la durée de ces phénomènes » (Pachauri et Reisinger, 2007).

Au Québec, les dix années les plus chaudes du siècle ont été enregistrées à partir des années 1980 (Ressources naturelles Canada, 2004). Les prévisions indiquent que les températures moyennes continueront leur ascension dans les prochaines décennies (Bourque et Simonet, 2007).

Cette hausse constante de la température observée et projetée accentuera un problème déjà connu : l'effet d'îlot de chaleur urbain. Ce phénomène se caractérise par des températures estivales plus élevées en milieux urbains que dans les zones rurales environnantes. Selon les observations, cette différence de température, principalement attribuable au cadre bâti urbain, varie entre 2 et 12°C et s'avère particulièrement menaçante pour la population urbaine (Oke, 1987; Voogt, 2002). Certaines villes comme Paris et Chicago l'ont compris à la suite des épisodes de canicule qui se sont avérés hautement mortels (Besancenot, 2007).

Beaucoup de villes ont mis de l'avant des mesures pour lutter contre les îlots de chaleur urbains. Les villes québécoises doivent également réagir à ces réalités climatiques changeantes, notamment en instaurant des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains et en créant des zones de fraîcheur urbaines. De telles initiatives protègent la population en augmentant sa capacité d'adaptation à de tels phénomènes.

La présente revue de littérature a été réalisée principalement à l'intention des intervenants de terrain dans les organismes sans but lucratif et les municipalités. Elle vient appuyer l'orientation des projets soumis dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques du Québec – Volet santé. Son objectif est de recenser, puis de publiciser les principaux moyens de lutte aux îlots de chaleur urbains et les nombreuses réalisations québécoises et internationales. Ce document n'a pas la prétention de remplacer les recommandations des experts des domaines concernés par la lutte aux îlots de chaleur urbains, dont l'architecture, l'urbanisme, les transports et l'ingénierie.

Cette revue des écrits présente à la section 2 les causes et les impacts des îlots de chaleur urbains et à la section 3 les zones vulnérables aux îlots de chaleur urbains au Québec. La section 4 répertorie les différentes mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains adaptées aux villes du Québec. Quelques applications de ces mesures réalisées dans différentes villes du Québec et du monde sont proposées à titre d'exemples à la section 5. Enfin, une synthèse et comparaison des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains ainsi que des suggestions d'application pour le Québec sont exposées à la section 6, suivie de recommandations.

1 MÉTHODOLOGIE

Dans le cadre de la présente revue de littérature, la recherche d'informations avait pour objectif la détermination des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains applicables au Québec et de leur performance en termes de création de fraîcheur. Ces mesures concernent différents domaines de spécialisation, tels que l'urbanisme et l'aménagement du territoire, l'architecture, l'ingénierie civile et du bâtiment, les transports et les technologies éconergétiques.

1.1 MÉTHODOLOGIE DE LA REVUE

La méthodologie retenue a consisté d'abord en une revue des publications scientifiques relatives aux mesures de création de fraîcheur en milieu urbain, un exercice qui s'est déroulé d'octobre 2008 à janvier 2009. Les sites de recherche documentaires (Medline, Embase, RUDI, Avery Index to Architectural Periodicals, Human population & natural resource management, Environmental engineering abstracts, Google Scholar, Google) ont été interrogés avec différents mots-clés (annexe 1). Ces recherches ont été complétées par le dépouillement de bibliographies des publications retenues et par des recherches sur des sites Internet gouvernementaux canadiens, états-uniens et européens. Par la suite, une recherche documentaire par le moteur de recherche Internet Google a permis de compléter la banque d'informations relatives aux projets d'application des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains au Québec et ailleurs dans le monde.

1.2 CRITÈRES DE SÉLECTION

La sélection des références a été basée sur :

- l'identification et le caractère descriptif des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains;
- l'évaluation du potentiel de rafraîchissement des différentes mesures en milieux urbains;
- l'année de publication, essentiellement la période 2000-2009;
- la langue d'édition : le français et l'anglais.

Certains critères d'exclusion ont permis de raffiner la recherche. Ainsi, ont été rejetés :

- les études menées dans des contextes climatiques différents de ceux du Québec;
- les études datant de 1999 ou d'avant, sauf exception;
- les documents traitant de mesures jugées non applicables au Québec selon les auteurs répertoriés ou les experts consultés.

1.3 RÉVISION

La revue de littérature a été soumise à neuf réviseurs, dont huit externes, spécialistes des divers champs d'expertise dans lesquels s'inscrivent les mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains répertoriés. Des corrections ont été effectuées à la suite de leurs commentaires. Toute erreur ou toute omission dans le texte demeurent cependant la seule responsabilité de l'auteure.

2 CAUSES, IMPACTS ET CONFORT THERMIQUE

2.1 DÉFINITION D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

L'expression « îlots de chaleur urbains » signifie la différence de température observée entre les milieux urbains et les zones rurales environnantes. Les observations ont démontré que les températures des centres urbains peuvent atteindre jusqu'à 12 °C de plus que les régions limitrophes (figure 1) (Voogt, 2002).

Trois types d'îlots de chaleur urbains sont distingués dans la littérature, soit :

- les îlots de chaleur à la surface du sol : grâce à des lectures de rayons infrarouges émis et réfléchis par les surfaces, il est possible de déceler les endroits d'une ville où les surfaces sont les plus chaudes (section 3.2);
- les îlots de chaleur de la canopée urbaine, qui est la couche d'air comprise entre le sol et la cime des arbres, ou des toitures des bâtiments, où l'essentiel de l'activité humaine se déroule;
- les îlots de chaleur de la couche limite urbaine, située au-dessus de la couche de la canopée. Les îlots de chaleur de la canopée urbaine et de la couche limite urbaine font référence à la température de l'air (Oke, 1982; Voogt, 2002).

L'intensité des îlots de chaleur change sur une base quotidienne et saisonnière en fonction des différents paramètres météorologiques et anthropiques présentés à la section 2.2. En général, l'intensité des îlots de chaleur de la canopée urbaine est plus forte la nuit que le jour (Oke, 1987; Pigeon *et al.*, 2008).

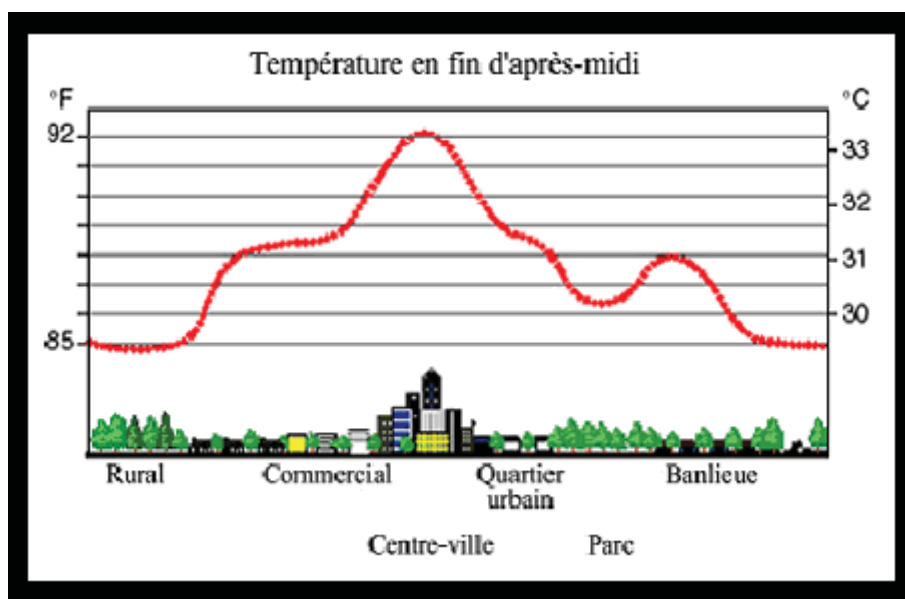


Figure 1 Schéma de l'îlot de chaleur urbain

Source : Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

2.2 CAUSES

En plus du climat local, influencé par différents paramètres météorologiques comme la température, l'humidité relative et le vent, plusieurs causes de source anthropique favorisent l'émergence et l'intensification des îlots de chaleur urbains. Ces causes sont les émissions de gaz à effet de serre, la perte progressive du couvert forestier dans les milieux urbains, l'imperméabilité et les bas *albédos* des matériaux, les propriétés thermiques des matériaux, la *morphologie urbaine* et la taille des villes ainsi que la chaleur anthropique.

2.2.1 Émissions de gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre (GES) piègent l'énergie solaire dans l'atmosphère et participent ainsi à son réchauffement. Selon le GIEC, « la poursuite des émissions de GES au rythme actuel ou à un rythme plus élevé devrait accentuer le réchauffement et modifier profondément le système climatique au XXI^e siècle. Il est très probable que ces changements seront plus importants que ceux observés pendant le XX^e siècle » (Pachauri et Reisinger, 2007).

Dans les milieux urbains, les sources d'émission de gaz à effet de serre sont principalement les véhicules, les procédés industriels et le chauffage des immeubles à l'aide de combustibles fossiles (MDDEP, 2006).

2.2.2 Perte progressive du couvert forestier dans les milieux urbains

Le couvert forestier urbain est en diminution constante au Québec depuis les années 1960 et serait même menacé de disparition d'ici 20 ans dans la communauté métropolitaine de Montréal (Cavayas et Baudouin, 2008). La densification progressive des villes et le développement des infrastructures urbaines ces dernières décennies en sont les causes principales.

Cette perte de végétation implique une perte de fraîcheur en milieu urbain. En effet, la végétation joue un rôle essentiel de protection contre la chaleur grâce au phénomène d'évapotranspiration et d'ombrage des sols et des bâtiments. Au cours du processus naturel d'évapotranspiration de la vapeur d'eau, l'air ambiant se refroidit en cédant une partie de sa chaleur pour permettre l'évaporation. La végétation participe également à une bonne gestion des eaux pluviales et à une meilleure qualité de l'air dans les villes (Bolund et Hunhammar, 1999; Cavayas et Baudouin, 2008; Akbari *et al.*, 2001; English *et al.*, 2007).

2.2.3 Imperméabilité des matériaux

L'intensification de l'urbanisation des dernières décennies a aussi provoqué la modification des types de recouvrement des sols. Les sols naturels ont été remplacés par des matériaux imperméables, tels que l'asphalte et les matériaux utilisés pour la construction des bâtiments qui, n'assurant pas de fonctions de filtration et d'absorption de l'eau, modifient le parcours naturel des eaux pluviales (Rushtone, 2001; Coutts *et al.*, 2008; Mailhot et Duchesne, 2005). En effet, dans les villes le taux d'infiltration des sols est de seulement 15 % et la quantité ruisselée de 55 %, tandis qu'en milieu naturel environ 50 % des eaux de pluie sont infiltrées dans le sol et 10 % ruissellent vers les cours d'eau (USEPA, 2007; Cyr *et al.*, 1998).

En minimisant la disponibilité de l'eau en milieu urbain, les processus naturels rafraîchissants, comme l'évaporation de l'eau contenue dans les sols et l'évapotranspiration de la végétation, sont restreints et ne peuvent pallier le réchauffement urbain (Brattebo et Booth, 2003). De plus, les revêtements imperméables contribuent à la contamination des cours d'eau récepteurs par :

- le ruissellement qui entraîne les polluants chimiques, tels que les hydrocarbures et les pesticides;
- les débordements d'égouts causés par les pluies intenses;
- l'érosion des berges due à la grande vitesse du ruissellement (Frazer, 2005; Brattebo et Booth, 2003).

Entre 2004 et 2006, les villes de Québec et de Laval auraient connu plus de 2 000 débordements annuels (Union St-Laurent Grands Lacs et Coalition Au secours, 2009). Selon les scénarios climatiques, ces effets néfastes risquent d'être amplifiés pour la région sud du Québec où les villes connaîtront des épisodes de pluies plus abondantes (Bourque et Simonet, 2007).

2.2.4 Propriétés thermiques des matériaux

Les revêtements imperméables et les matériaux des bâtiments influencent le microclimat et les conditions de confort thermique, car ils absorbent beaucoup de chaleur durant le jour qu'ils rediffusent à l'atmosphère pendant la nuit, contribuant ainsi à l'effet d'îlot thermique urbain (Asaeda *et al.*, 1994). Ces matériaux à bas *albédo* peuvent atteindre des températures de 80 °C en été (Liébard et DeHerde, 2005). Les urbanistes et architectes choisissent les matériaux selon différentes exigences techniques en fonction, entre autres, des besoins de sécurité et de durabilité et des coûts et négligeraient généralement les considérations environnementales (Luber et McGeehin, 2008; Frazer, 2005; Brattebo et Booth, 2003).

2.2.5 Morphologie urbaine et taille des villes

La *morphologie urbaine*, qui se rapporte aux formes tridimensionnelles, à l'orientation et à l'espacement des bâtiments dans une ville, joue également un rôle dans la formation des îlots de chaleur urbains (USEPA, 2008). Les grands bâtiments et les rues étroites peuvent nuire à la bonne ventilation des centres urbains, car ils créent des canyons où s'accumule et reste captive la chaleur occasionnée par le *rayonnement solaire* et les activités humaines (Coutts *et al.*, 2008). En effet, la réduction du *facteur de vue du ciel* limite les pertes radiatives nettes des bâtiments et des rues (Pigeon *et al.*, 2008). De plus, la *morphologie urbaine* peut également influencer la circulation automobile et encourager ainsi les apports de chaleur et de pollution de l'air de ce mode de transport que représente le véhicule automobile (Oke, 1988).

2.2.6 Chaleur anthropique

La production de chaleur anthropique telle que la chaleur émise par les véhicules, les climatiseurs et l'activité industrielle est un autre facteur contribuant au développement d'îlots de chaleur, notamment dans les milieux urbains denses où les activités se concentrent

(USEPA, 2008). Le tableau 1 présente le taux d'émission anthropique et le bilan radiatif net annuel pour quelques villes.

Tableau 1 Taux d'émission anthropique et bilan radiatif net annuel pour quelques villes américaines, européennes et asiatique

Ville	Taux d'émission anthropique (W/m ²)	Flux radiatif net global (W/m ²)
Chicago	53	n.d
Cincinnati	26	n.d
Los Angeles	21	108
Fairbanks	19	18
St. Louis	16	n.d
Manhattan, New York City	117-159	93
Montréal	99	52
Moscou	127	n.d
Budapest	43	46
Osaka	26	n.d

Source : Taha *et al.*, 1997.

2.3 IMPACTS

Les îlots de chaleur urbains en période estivale peuvent avoir des impacts néfastes sur l'environnement et la santé.

2.3.1 Impacts sur l'environnement

2.3.1.1 Détérioration de la qualité de l'air extérieur

Les îlots de chaleur urbains contribuent à la formation du smog. En effet, le smog, composé de particules fines et d'ozone troposphérique, se forme lors de la réaction entre les rayons du soleil, la chaleur et les polluants (oxydes d'azote (NO_x) et composés organiques volatils (COV)) (Akbari *et al.*, 2001).

2.3.1.2 Détérioration de la qualité de l'air intérieur

La chaleur accrue a un effet sur la qualité de l'air intérieur, car elle favorise la multiplication des acariens, des moisissures et des bactéries. De plus, certaines substances toxiques, telles que les formaldéhydes, contenues dans les colles utilisées dans la fabrication des meubles et les matériaux de construction, sont libérées lors de fortes chaleurs (Salomon et Aubert, 2003).

2.3.1.3 Hausse de la demande en énergie

Les besoins de rafraîchissement de l'air intérieur et de réfrigération peuvent générer une hausse de la demande en énergie ayant comme conséquence l'émission de gaz à effet de serre selon la source d'énergie employée (Voogt, 2002).

2.3.1.4 Hausse de la demande en eau potable

En raison des îlots de chaleur, une hausse de la demande en eau potable, pour se rafraîchir (exemples : piscines et jeux d'eau) ou pour hydrater les aménagements végétalisés, est probable (Balling *et al.*, 2008).

2.3.2 Impacts sur la santé

La chaleur accablante accentuée ou générée par les îlots de chaleur urbains peut créer un stress thermique pour la population. Certaines personnes peuvent être davantage vulnérables aux îlots de chaleur urbains, comme les personnes atteintes de maladies chroniques, les populations socialement isolées, les très jeunes enfants, les travailleurs extérieurs, les personnes ayant un faible niveau socioéconomique, les sportifs extérieurs de haut niveau et les personnes souffrant de troubles mentaux (Besancenot, 2002; OMS, 2007; CSST, 2004). Enfin, les personnes âgées, dont la proportion doublera au Québec d'ici 2051 (Institut de la statistique du Québec, 2004), sont également prédisposées à des troubles liés à la chaleur, notamment en raison des changements physiologiques associés au vieillissement (Thibault *et al.*, 2004).

La chaleur accablante engendrée par les îlots de chaleur urbains peut provoquer des inconforts, des faiblesses, des troubles de la conscience, des crampes, des syncopes, des coups de chaleur, voire exacerber les maladies chroniques préexistantes comme le diabète, l'insuffisance respiratoire, les maladies cardiovasculaires, cérébrovasculaires, neurologiques et rénales, au point de causer la mort (Besancenot, 2002; Luber et McGeehin, 2008). Les agences de santé à travers le monde, sur recommandation de l'Organisation mondiale de la santé, ont mis en place divers programmes de lutte aux effets de la chaleur accablante et de prévention des îlots de chaleur urbains, y compris au Québec.

2.4 CONFORT THERMIQUE

Afin de réduire la vulnérabilité individuelle et d'assurer un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique, les températures ambiantes doivent être ni trop basses ni trop élevées. La température corporelle, d'environ 37 °C, est maintenue grâce aux apports de calories apportés par la nourriture et aux échanges de chaleur avec l'environnement immédiat selon ces mécanismes :

- la *convection*, qui favorise les échanges entre la peau et l'air ambiant, lesquels sont accentués par la vitesse de l'air;
- la *conduction*, soit des échanges par contact direct de la peau et d'un corps plus chaud ou plus froid (exemple : marcher pieds nus sur un plancher froid);
- le *rayonnement*, ou des échanges entre la peau et les éléments solides de l'environnement (exemples : murs, plafond, sol et sources de chaleur);
- la *transpiration*, soit une perte de chaleur par évaporation de sueur, plus efficace lorsque l'humidité relative est faible (Salomon et Aubert, 2003).

L'interprétation du confort thermique varie d'une personne à l'autre selon divers paramètres individuels et contextuels, dont le niveau d'activité, l'acclimatation physiologique et

psychologique à la chaleur, le type de vêtements portés, la température de l'air et des surfaces environnantes, le *rayonnement solaire* ainsi que la vitesse et l'humidité relative de l'air (Brown et Gillespie, 1995; Fanger, 1982).

Le confort thermique est donc propre à chacun et il est impossible de définir un type d'environnement thermique qui répond aux exigences de tous. Cependant, il est possible de spécifier un intervalle de température acceptable pour un pourcentage élevé de personnes. Cet intervalle se situerait entre 20 et 27 °C avec un taux d'humidité optimal allant de 35 à 60 % (Fanger, 1982; Déoux, 2004; Nikolopoulou, 2004).

2.5 CLIMATISATION

Afin d'assurer un confort thermique en période estivale, les climatiseurs sont souvent employés au domicile, au travail, dans les lieux publics et même dans la voiture. Cependant, cette solution n'est pas à choisir d'emblée, car en plus de la grande demande en énergie qu'elle crée, une climatisation accrue et généralisée peut entraîner des impacts accentuant l'îlot de chaleur urbain. De façon générale, la climatisation à grande échelle peut occasionner :

- une grande demande en énergie, en particulier aux heures de pointe, en opposition avec les principes d'efficacité énergétique (Déoux, 2004). À titre d'exemple : la proportion de ménages québécois ayant un climatiseur à domicile a plus que doublé en quinze ans, passant de 15,2 % en 1993 à 36,4 % en 2005 (Institut de la statistique du Québec, 2005);
- la production de chaleur anthropique par extraction de l'air chaud de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur du bâtiment. De plus, le processus de climatisation (compression et condensation) émet de la chaleur (Lachal *et al.*, 2004; Bourque et Simonet, 2007);
- l'émission de gaz à effet de serre (CFC, HCFC, HFC) causée par l'utilisation de fluides frigorigènes nocifs, dont le taux annuel de fuite atteindrait environ 10 % pour les climatiseurs individuels et 15 % pour les climatisations centralisées (Déoux, 2004);
- la dégradation de la qualité de l'air et certaines de ses conséquences sur la santé humaine, principalement en raison du risque de dissémination des bactéries *Legionella*, associé surtout aux climatiseurs industriels (Déoux, 2004); et
- l'augmentation de la pollution sonore que crée le bruit de certains systèmes de climatisation (Salomon et Aubert, 2003).

À ce jour, la climatisation semble souvent envisagée comme une solution de premier choix. De fait, cette mesure préventive apparaît utile et essentielle pour certaines personnes ayant très peu de *capacité d'adaptation* à faire face aux troubles liés à la chaleur (par exemple, les résidents de centres d'hébergement et de soins de longue durée) et à ceux pouvant conduire au décès (Jacques et Kosatsky, 2005). Cela dit, elle ne saurait être considérée comme le moyen de pallier l'actuelle déforestation urbaine ou encore de régler les défauts de conception ou les erreurs de gestion d'un bâtiment (Dixsaut, 2005). À la lumière des conséquences de l'utilisation de la climatisation à grande échelle, dont certaines ont été rapportées ci-dessus, il s'avère donc très important d'envisager d'autres solutions, plus durables tant pour l'environnement que pour la santé des générations actuelles et futures, et qui tiennent compte de considérations qui toucheront à la fois les causes du changement climatique et l'adaptation à ce changement (McEvoy *et al.*, 2006).

3 LES ÎLOTS DE CHALEUR AU QUÉBEC

3.1 ZONES OÙ LES ACTIONS SONT REQUISES

La zone géographique concernée par la problématique d'îlots de chaleur urbains est la partie sud du Québec sujette à la « tropicalisation » de ses périodes estivales (Bourque et Simonet, 2007). Cette zone inclut les régions sociosanitaires (RSS) de la Capitale-Nationale (RSS-03), de la Mauricie et du Centre-du-Québec (RSS-04), de l'Estrie (RSS-05), de Montréal (RSS-06), de l'Outaouais (RSS-07), de Chaudière-Appalaches (RSS-12), de Laval (RSS-13), de Lanaudière (RSS-14), des Laurentides (RSS-15) et celle de la Montérégie (RSS-16).

Les villes situées dans la partie sud du Québec et concernées par la problématique d'îlots de chaleur urbains ont un climat estival qualifié de continental humide (tableau 2). Bien qu'elles s'avèrent plus efficaces en milieu urbain chaud et sec, en raison de l'évapotranspiration des sols et de l'évapotranspiration par les plantes, certaines mesures liées à la création de fraîcheur en milieu urbain peuvent tout de même être utiles en climat plus humide, comme nous le verrons à la section 4.

Tableau 2 Normales climatiques de trois villes québécoises (1971-2000)

Ville/Mois	Température moyenne (°C)	Humidité relative moyenne à 15 h (%)	Vitesse moyenne des vents (km/h)
Montréal			
juin	18,2	56,2	13,2
juillet	20,9	56,3	12,2
août	19,6	58,2	11,3
Québec			
juin	16,5	55,9	11,8
juillet	19,2	58,2	10,6
août	17,9	59,3	10,5
Sherbrooke			
juin	15,5	57,6	8,3
juillet	18,1	58,8	7,5
août	16,9	61,6	7,1

Source : Environnement Canada, 2009.

3.2 OUTILS DE DÉTECTION DES ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS

Afin de déterminer précisément où sont situés les îlots de chaleur urbains de surface, l'emploi de certains outils est essentiel, dont les plus utilisés relèvent de la géomatique et plus spécifiquement de l'analyse cartographique d'images (exemples : images satellites Landsat ou images aéroportées).

L'analyse cartographique d'images, basée sur des cartes, permet de connaître la température de surface d'une ville (figure 2) et de caractériser le type de recouvrement des sols (Aniello *et al.*, 1995; Cavayas et Baudouin, 2008; Gill *et al.*, 2008). Peu dispendieuse et pratique, elle permet également la juxtaposition de cartes comportant différentes données du

milieu urbain étudié (données socioéconomiques, couvert forestier, surverses annuelles des eaux pluviales, etc.) (Quénol *et al.*, 2007).

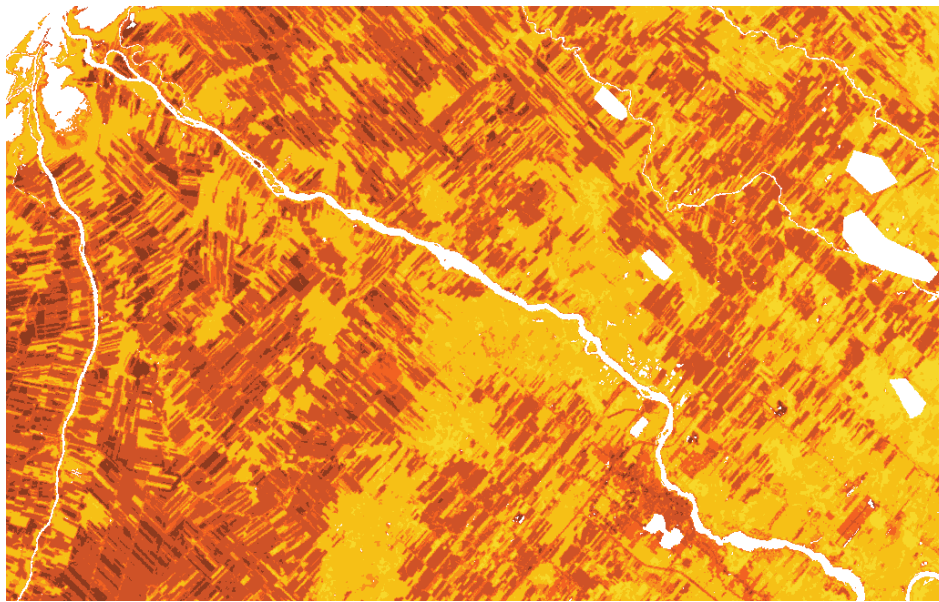


Figure 2 **Exemple d'une cartographie d'îlots de chaleur urbains à Montréal**

Note : Les zones de couleur orange foncé représentent les zones les plus chaudes.

Source : Smargiassi *et al.*, 2009.

Le thermomètre numérique à rayonnement infrarouge est un deuxième type d'outil utilisé sur le terrain, pour obtenir des mesures plus précises des températures de surface que celles issues de l'analyse cartographique d'images. Il permet à la fois de mesurer et de convertir l'énergie lumineuse en signal électrique, même à une distance éloignée de la source, contrairement aux autres types de thermomètres (Voogt, 2009).

En terminant, mentionnons que le réseau Environmental Prediction in Canadian Cities (EPiCC) procède actuellement à des recherches sur les îlots thermiques urbains à Montréal. Leurs projets consistent en une surveillance continue et à long terme du bilan énergétique de surface d'un site résidentiel urbain, d'un site résidentiel de banlieue et d'un site de référence en milieu rural (EPiCC, 2008).

4 MESURES DE LUTTE AUX ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS

Les mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains sont nombreuses et concernent divers domaines professionnels, dont l'urbanisme, l'architecture, la gestion des ressources naturelles et les transports. Elles ont une incidence positive tant sur le climat local que sur le climat global.

En plus de favoriser la fraîcheur dans les milieux urbains, ces mesures comportent d'autres bénéfices, notamment la réduction de la demande en énergie, la diminution à la source de la pollution de l'eau et de l'air, y compris des émissions de gaz à effet de serre.

Sont présentées dans cette section les mesures de lutte aux îlots de chaleur ainsi que leur efficacité à créer de la fraîcheur en milieu urbain, telle qu'elle est rapportée dans la littérature. Afin de les associer directement aux causes des îlots de chaleur urbains précédemment mentionnées, ces mesures ont été regroupées en quatre catégories :

- les mesures de végétalisation;
- les mesures liées aux infrastructures urbaines (architecture et aménagement du territoire);
- les mesures de gestion des eaux pluviales et de perméabilité du sol;
- les mesures de réduction de la chaleur anthropique.

4.1 VÉGÉTATION ET FRAÎCHEUR

Plusieurs études font état de l'importance primordiale de la végétalisation et de la protection des espaces verts et boisés actuels afin de lutter contre l'effet d'îlot thermique urbain (Heisler *et al.*, 1994; Taha *et al.*, 1996; McPherson *et al.*, 2005; Solecki *et al.*, 2005). En effet, la végétation permet de créer de la fraîcheur par différents processus, plus précisément :

- l'ombrage saisonnier des infrastructures;
- l'évapotranspiration;
- la minimisation des écarts de température au sol.

La végétation offre également d'autres avantages intéressants et complémentaires en milieu urbain, dont :

- l'amélioration de la qualité de l'air par la production d'oxygène, la captation du CO₂, la filtration des particules en suspension et la réduction de la demande énergétique liée à la climatisation;
- l'amélioration de la qualité de l'eau grâce à la rétention de l'eau de pluie dans le sol et le contrôle de l'érosion des sols;
- des bienfaits pour la santé de la population, y compris la protection contre le rayonnement ultraviolet (UV), la réduction du stress dû à la chaleur et la disponibilité de lieux pour faire de l'activité physique (Sundseth et Raeymaekers, 2006; Chiesura, 2004; Health Scotland *et al.*, 2008; Rowntree et Nowak, 1991).

Au Québec, la végétation choisie pour protéger les bâtiments du *rayonnement solaire* estival doit avoir un feuillage caduc, mais peu de branchage pour réduire l'ombrage au minimum pendant les autres saisons, lorsque le gain solaire est souhaité (Déoux, 2004). Le choix des espèces aux fins de végétalisation urbaine doit être fait de façon judicieuse afin d'assurer une bonne densité du feuillage qui permettra, lorsque l'arbre est mature, une filtration d'au moins 60 % du *rayonnement solaire*.

Il convient également d'éviter les espèces émettrices de composés organiques volatils (COV) (par exemple, isoprènes, monoterpènes et hydrocarbures) entrant dans la composition du smog ainsi que les espèces à fort pouvoir allergisant (tableau 3). Selon Déoux (2004), la pollution atmosphérique et notamment les teneurs élevées en ozone potentialisent l'action des allergènes. En effet, les plantes des milieux urbains, plus stressées, pollinisent davantage ce qui engendre la fixation de certaines substances polluantes aux particules de pollen et augmente le potentiel allergisant.

Tableau 3 Arbres ayant un potentiel allergisant

Genre d'arbre	Potentiel allergisant
Bouleau, chêne	Fort
Aulne, frêne	Moyen
Noyer, peuplier, saule, orme, érable	Faible

Source : R.N.S.A, 2009.

Enfin, il est essentiel d'adapter le choix des essences en fonction de l'espace disponible. Par exemple, s'il y a une ligne électrique sur le site de plantation, on choisira des espèces qui atteignent une hauteur moyenne (Boulfroy, 2009). Enfin, le choix d'espèces indigènes, tolérantes aux variations climatiques du Québec et à la pollution urbaine est à privilégier (Evergreen, 2008).

Les environnements urbains se transforment constamment, et les occasions d'intégrer de la végétation dans les plans de restructuration, de développement ou de revalorisation urbanistiques sont nombreuses. Différentes applications, présentées aux points suivants, sont à la portée des municipalités, des entrepreneurs et des citoyens afin de lutter contre les îlots de chaleur urbains.

4.1.1 Stratégie urbaine de végétalisation

Une stratégie de végétalisation en milieu urbain a pour objectif d'augmenter l'indice global de végétalisation d'une ville. À cette fin, la végétation peut être disposée ou densifiée dans de nombreux espaces, comme :

- le long des axes de transport (platebandes de rues, ruelles, lignes ferroviaires, etc.);
- sur les terrains publics (parcs, terrains municipaux et gouvernementaux, cours d'école, cours de centres de la petite enfance, etc.);
- sur les terrains privés (pourtours de bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels, ruelles, etc.) (Conseil régional de l'environnement de Montréal, 2007).

La fraîcheur apportée par la végétation peut être garante de la fréquentation de certains de ces espaces par les citoyens (Health Scotland *et al.*, 2008). Il est à noter que les terrains de gazon artificiels ne permettent pas un rafraîchissement de l'air ambiant. Au contraire, ces terrains, dont les fibres synthétiques absorbent la chaleur, peuvent atteindre une température jusqu'à 10 °C de plus qu'un milieu naturel végétalisé. En outre, ils sont rarement perméables (Perez Arrau, 2007).

4.1.2 Plantation ponctuelle d'arbres et de végétation

Pour que les arbres puissent fournir de la fraîcheur, leur bonne croissance est essentielle et peut dépendre de la qualité des sols, de la disponibilité de la ressource hydrique et de l'espace suffisant pour un déploiement racinaire optimal. Un arbre occupant un espace restreint dans le sol n'atteindra pas sa taille maximale et sa durée de vie en sera écourtée (McPherson, 1994).

Une croissance optimale des arbres plantés sur les rues est possible grâce à des aménagements dits cellulaires. Ce type d'aménagement comprend l'utilisation de structures offrant l'espace requis au développement complet des racines sous un recouvrement partiel d'asphalte. Également, le drainage des eaux de pluie est facilité grâce à la présence d'un sol de qualité. Le coût d'un aménagement cellulaire est environ cinq fois supérieur à celui de la plantation d'un arbre directement en terre (Urban, 2008). À titre indicatif, l'aménagement cellulaire d'un arbre coûterait environ 1 000 \$ à Montréal, y compris le prix de son acquisition, de sa plantation et de son entretien pendant les quatre premières années (Ville de Montréal, 2005). L'installation des aménagements cellulaires demande un personnel qualifié (Urban, 2008).

4.1.3 Végétalisation des stationnements

Les stationnements, construits avec du bitume, un matériau à faible *albédo*, contribuent à la formation des îlots de chaleur urbains (Rosenzweig *et al.*, 2005). Afin de diminuer la chaleur qu'emmagent ces surfaces asphaltées et les voitures qui s'y garent, il est conseillé d'aménager de la végétation sur le pourtour (bandes végétalisées) et à l'intérieur (îlots végétalisés) des espaces de stationnements. L'objectif est de créer de l'ombre sur les surfaces asphaltées. L'ombrage des arbres protégera également les revêtements des grandes variations thermiques et prolongera leur durée de vie (McPherson et Muchnick, 2005).

Afin de réduire la température de la surface des stationnements, il est également possible de végétaliser l'entièreté des surfaces au moyen de divers revêtements modulaires composés de béton, de PVC ou d'autres matériaux permettant la croissance de végétaux. Ces modules sont installés sur des sols filtrants, qui favorisent la percolation naturelle de l'eau de pluie dans le sol et qui supportent des charges allant jusqu'à 376 tonnes par mètre carré. Ainsi, cette résistance fait que les voitures peuvent être garées sur les revêtements végétalisés (section 4.3.2) (Communauté urbaine de Lyon, 2008).

4.1.4 Végétalisation du pourtour des bâtiments

Pour une fraîcheur optimale, l'aménagement du pourtour d'un bâtiment doit protéger celui-ci du *rayonnement solaire*. En effet, la texture et la nature des sols entourant le bâtiment en déterminent en partie la température intérieure et extérieure. La végétation permet de garder un sol plus frais et d'éviter le *rayonnement solaire* direct, réfléchi et diffus pouvant affecter la fraîcheur du bâtiment (figure 3) (Akbari *et al.*, 2001).

Afin de maximiser l'ombrage sur le bâtiment, les arbres doivent être disposés sur les faces est, sud-est, sud-ouest et ouest de la maison et idéalement être assez grands pour ombrager le toit en partie ou en totalité. Il est aussi possible d'aménager des treillis, des pergolas, des murs et des toits végétaux qui, juxtaposés aux bâtiments, assurent une température intérieure plus fraîche (Oliva et Courgey, 2006).



Figure 3 **Végétalisation du pourtour du bâtiment**

4.1.5 Murs végétaux

Les murs végétaux sont des écosystèmes verticaux qui créent un microclimat abaissant substantiellement la température de l'enveloppe du bâtiment et améliorant le comportement énergétique de celle-ci (Kingsbury et Dunnett, 2008). Ils permettent d'amoinrir les grands écarts de température grâce à l'augmentation de la masse thermique du bâtiment (Jour de la Terre Québec, 2008).

Ces installations végétales possèdent également d'autres avantages tels que la protection de l'enveloppe du bâtiment aux rayons UV, la captation des particules en suspension et le recouvrement des murs par des graffiti. Elles peuvent être mises en place sur tous les types d'édifices et même sur les clôtures, les poteaux de téléphone et les lampadaires. Des précautions sont à prendre quant à l'état de la structure hôte, qui doit supporter le poids de la végétation, et au type de végétation choisie et à ses colonisateurs potentiels (Kingsbury et Dunnett, 2008). L'entretien de la végétation est simple, soit la taille, le désherbage et l'inspection du support (Oliva et Courgey, 2006).

Deux types de murs végétaux existent. D'abord, le mur végétal de façade est un mur recouvert de plantes grimpantes plantées au sol et pouvant grimper jusqu'à 30 m. Un espace minimal de 15 cm sur 15 cm est requis au sol afin d'y mettre en terre la plante. Certaines plantes peuvent grimper directement sur la paroi du mur ou être disposées sur un support métallique (figure 4). Ensuite, le mur vivant est constitué de plants enracinés dans un médium attaché au mur. Cette installation est plus complexe et requiert notamment des membranes imperméables qui éviteront d'humecter le mur (Kingsbury et Dunnnett, 2008).

Les plantes adaptées au climat québécois incluent la vigne vierge ou lierre de Boston (*Parthenocissus quinquefolia*) et l'hydrangée grimpante (*Hydrangea petiolaris*). Contrairement aux idées reçues, la végétation grimpante n'abîme pas l'enveloppe du bâtiment, à moins que la paroi ne soit déjà endommagée (exemple : mortier altéré) (Angers, 2007).



Figure 4 Murs végétaux de façade

4.1.6 Toits verts

Les toits verts réduisent la quantité de chaleur transférée du toit vers l'intérieur du bâtiment grâce à l'évapotranspiration et à l'ombrage créé par les plants. En outre, ils permettent de rafraîchir l'air ambiant extérieur (McPherson, 1994) tout en contribuant à :

- une augmentation de l'isolation thermique en hiver, mais aussi en été, à l'instar d'autres facteurs qui influencent la fraîcheur de l'air intérieur du bâtiment, comme l'inertie thermique de la couverture végétale et l'eau contenue dans la terre ou le revêtement humidifiant;
- une intégration esthétique des bâtiments au paysage;
- la possibilité de faire de l'agriculture urbaine;
- une amélioration de la qualité de l'air. Les plants des toitures végétales fixent les poussières et divers polluants atmosphériques;

- une amélioration de la qualité de l'eau, car la végétation des toitures compense l'imperméabilisation et la perte du couvert végétal engendrées par l'emprise au sol des bâtiments (section 4.3);
- une meilleure durée de vie du toit, du fait que la toiture végétale protège des intempéries, de l'exposition aux rayons UV et des variations importantes de température, autant de facteurs qui entraînent la dégradation du toit (Déoux, 2004; CNRC, 2002; Oberndorfer *et al.*, 2007).

L'installation de végétation sur les toits est une pratique courante dans plusieurs pays du monde, dont l'Allemagne, le Japon et les États-Unis (Lawlor et Société canadienne d'hypothèques et de logement, 2006). Il s'agit d'une pratique de plus en plus utilisée au Québec également (Boucher, 2006). Les toits verts conviennent avant tout aux toits plats ou à pente égale ou inférieure à 20 % (Déoux, 2004), bien que l'installation végétale soit appropriée à tous les types de toits pourvu que leurs structures permettent d'en supporter le poids. Le cas échéant, l'installation de toitures végétales peut exiger d'importantes rénovations (Fischetti, 2008). Aussi, il est économiquement plus avantageux de prévoir l'installation d'un toit vert dans les constructions neuves (Lawlor et Société canadienne d'hypothèques et de logement, 2006).

Un toit végétal standard est constitué de plusieurs composants, principalement d'une structure porteuse, d'une couche d'isolation (si la toiture n'est pas ventilée), d'une couche d'étanchéité, d'une membrane antiracine, d'une section de drainage et de filtration, d'une membrane géotextile pour retenir la terre, d'un substrat de croissance et d'une couche végétale ou d'une couche de substrat. La couche végétale est utilisée si l'aspect engazonné ou de type prairie est recherché, alors que la couche d'un substrat permet la plantation surtout de plantes succulentes, de type sedum (Miller, 2009; Lalonde, 2009). La figure 5 présente des exemples de toits végétaux extensifs.



Figure 5 Toits végétaux extensifs

Source : Avec l'aimable autorisation de Léonard, 2009.

Le substrat de croissance (ou terreau) peut être léger, pauvre, absorbant (mélange de billes d'argile expansée ou d'ardoise expansée) et sans engrais. Il est également possible d'utiliser des feutres de rétention d'eau pour des toitures vertes de type extensif (tableau 4) et précultivées. Ces différents substrats réduisent substantiellement le poids du toit végétal (Miller, 2009).

Tableau 4 Comparaison des toits verts de types extensif et intensif

Caractéristique	Type de toit vert	
	Extensif	Intensif
Poids	Léger Supplément de 30 à 100 kg/m ²	Lourd Supplément de 120 à 350 kg/m ²
Coût	Entre 100 \$ et 150 \$/m ²	Jusqu'à 1 000 \$/m ² . Dépend de l'épaisseur du substrat et des végétaux choisis
Fonction	Écologique Adapté aux grandes superficies (industries)	Usage récréatif; agriculture urbaine Adapté aux petites et moyennes surfaces
Type de substrat	Léger, poreux, peu de matière organique	Léger à lourd, poreux, quantité de matière organique variable
Épaisseur	2 à 20 cm	30 cm et plus
Type de végétation	Végétation résistante au climat rigoureux (par exemple, les plantes de type sedum)	Aucune restriction Type de toit pouvant héberger des arbres
Entretien	Restreint	Modéré Similaire à un jardin classique; désherbage, tonte, ensemencement, arrosage des plants, etc.
Accessibilité	Peu fréquent Pour l'entretien uniquement	Accessible pour loisirs ou jardinage

Sources : Lawlor et Société canadienne d'hypothèques et de logement, 2006; Boucher, 2006; Laplace, 2009; Oberndorfer *et al.*, 2007.

Enfin, plusieurs études ont traité les types de végétaux adaptés aux aménagements extensifs sur les toits (Laplace, 2009). On y note que les plantes de type sedum, les graminées et les plantes vivaces très rustiques seraient très performantes pour les toits extensifs, qui nécessitent des plantes pouvant résister aux variations de température et d'humidité du climat québécois (Miller, 2009; Monterusso *et al.*, 2005).

4.1.7 Gains de fraîcheur et autres bénéfices liés à la végétalisation des milieux urbains

4.1.7.1 Stratégies de végétalisation

Selon Dimoudi et Nikolopoulou (2003), l'apport de végétation dans les milieux urbanisés peu végétalisés offre des gains importants de fraîcheur. Également, une rangée d'arbres diminue la température de l'air environnant de 1 °C, tandis la création d'un parc au centre-ville en remplacement de bâtiments générerait une baisse de température de l'air environnant de 2 °C à plus de 6 °C.

L'équipe d'Akbari et Taha (1992) a examiné par modélisation le potentiel d'utilisation de la végétation et des matériaux à hauts *albédos* (section 4.2) dans quatre villes canadiennes, dont Montréal, afin de lutter contre les îlots de chaleur et de minimiser les besoins de climatisation et de chauffage. Les résultats de l'étude ont indiqué qu'une augmentation du taux de végétalisation de 30 % (correspondant à environ trois arbres par domicile) et qu'une augmentation de l'*albédo* des matériaux des bâtiments de 20 % (soit un *albédo* moyen) pouvaient générer des économies d'énergie liées au chauffage et à la climatisation de 10 % et de 35 % respectivement.

D'après Liébard et Deherde (2005), une différence de température moyenne de 3,5 °C serait également observable entre un centre-ville peu végétalisé et des quartiers longeant une bande de végétation d'une profondeur de 50 à 100 m.

Comme il a été observé par Lachance *et al.* (2006), dans l'arrondissement de Mercier–Hochelaga-Maisonneuve à Montréal, l'été, un secteur situé en bordure d'une zone végétalisée présentait une température de surface plus fraîche de 6 °C, comparativement à un secteur situé en bordure de zone industrielle sans végétation (respectivement 29 °C et 35 °C).

Dans leur étude (2000) réalisée à Tel-Aviv en période estivale, Shashua-Bar et Hoffman ont souligné que des îlots de végétation urbains d'une largeur de 60 m génèrent un effet de fraîcheur dans un rayon de 100 m. Ils rapportent également que la portée du rafraîchissement varierait de façon exponentielle selon la dimension des espaces végétalisés. D'autres facteurs peuvent aider la diffusion de la fraîcheur créée par la végétation, notamment le vent : un grand parc placé en amont d'un centre urbain, dans la direction des vents dominants, peut avoir une plus longue portée rafraîchissante (Ca *et al.*, 1998; Honjou et Takakura, 1990).

4.1.7.2 Plantation ponctuelle d'arbres

Les arbres matures favorisent la fraîcheur par leur capacité d'évapotranspiration et la superficie d'ombre créée. En effet, un arbre mature peut perdre jusqu'à 450 litres d'eau par jour par évapotranspiration, ce qui équivaldrait à cinq climatiseurs fonctionnant 20 heures par jour (Ville de Montréal, 2005; Johnston et Newton, 2004; Bolund *et al.*, 1999).

Une étude réalisée à Tokyo par Ca *et al.* (1998) illustre que, grâce à l'ombrage de la végétation, la température de surface du sol est réduite. En effet, les températures de

surface enregistrées à midi ont démontré que la température de surface végétalisée d'un parc était de 19 °C inférieure à celle des surfaces asphaltées et la température de l'air, à 1,2 m au-dessus du sol, de 2 °C inférieure à la température de l'air mesurée dans une aire de stationnement d'un centre commercial situé aux alentours. Également, la présence du parc, d'une superficie de 0,6 km², avait pour effet de réduire de près de 1,5 °C la température de l'air d'une zone commerciale située à 1 km en aval, dans l'axe des vents dominants. Sur ce même site, les températures enregistrées la nuit ont révélé que la surface végétalisée du parc était plus fraîche que l'air ambiant, contrairement aux surfaces asphaltées, dont la température était plus élevée que celle de l'air ambiant.

4.1.7.3 Végétalisation des stationnements

Une étude de McPherson *et al.* (2001) affirme qu'une voiture ombragée par la végétation a une température d'environ 7 °C inférieure à une voiture garée au soleil, tandis qu'un pavé asphalté sera de 2 à 4 °C plus frais.

4.1.7.4 Végétalisation du pourtour du bâtiment

Les chercheurs Akbari *et al.* (1997) ont évalué pendant quelques mois la température de surface maximale des murs et des toits ombragés par les arbres sur deux bâtiments situés en Californie. La température de surface maximale mesurée a atteint de 11 à 25 °C.

4.1.7.5 Murs végétaux

La température maximale des murs végétaux est de 30 °C, alors que les murs classiques peuvent atteindre 60 °C en fonction du type de revêtement (Kingsbury et Dunnett, 2008). Sandifer et Givoni (2002) ont évalué l'effet rafraîchissant de la vigne vierge sur un mur. Ils ont observé des réductions de températures allant jusqu'à 20 °C, comparativement à un mur non ombragé.

Luxmore *et al.* (2005) ont modélisé les gains de fraîcheur générés par l'emploi de végétation sur les bâtiments formant les canyons urbains de la ville. Ils ont conclu que plus le climat de la ville est chaud et sec, plus grands seront les gains de fraîcheur. Cela dit, les villes au climat chaud et humide peuvent également profiter de murs végétaux pour abaisser la température des canyons urbains de quelques degrés Celsius.

4.1.7.6 Toits végétaux

D'entre tous les types de recouvrement de toits (classique, à revêtement réfléchissant, végétal), le toit végétal est celui qui présente les conditions de fraîcheur les plus avantageuses. Pendant une journée ensoleillée de 26 °C, un toit foncé peut atteindre jusqu'à 80 °C, un toit blanc, 45 °C et un toit végétal, 29 °C (Fischetti, 2008; Liu et Bass, 2005).

Voici quelques études qui relatent la performance de fraîcheur des toits végétaux. À Chicago, un toit intensif installé sur le toit de l'hôtel de ville a une température annuelle moyenne de 7 °C plus fraîche que les toits classiques environnants, une différence pouvant atteindre 30 °C durant les périodes les plus chaudes de l'été (Daley, 2008). À Ottawa, Liu *et al.* (2002) obtiennent des conclusions similaires : une même toiture dont la moitié était

recouverte d'un couvert végétal et l'autre moitié, d'un revêtement de bitume classique affichait une différence de température de 45 °C lors d'une journée ensoleillée de 35 °C. Enfin, à Toronto, on a établi par modélisation que la création de toits végétaux sur 25 % de la superficie totale des toits de la ville réduirait la température de l'air de 1 ou 2 °C en période estivale (Ministère des Affaires municipales et du Logement de l'Ontario, 2004).

En somme, durant la saison estivale, les besoins en climatisation peuvent être réduits par l'utilisation d'un toit végétal, notamment pour les toitures moins bien isolées à l'origine. De fait, l'utilisation d'énergie peut être relativement stable jusqu'à une certaine température. Au-delà de ce seuil critique, une augmentation de 2 °C due aux îlots de chaleurs urbains peut accroître la consommation d'énergie de 5 % (Bass et Baskaran, 2003).

4.2 INFRASTRUCTURES URBAINES DURABLES

4.2.1 Bâtiments

Les bâtiments qui intègrent la protection contre la chaleur ont généralement des ouvertures pourvues de protections solaires, des matériaux réfléchissants et parfois d'ingénieux systèmes de rafraîchissement naturel.

4.2.1.1 Matériaux réfléchissants

Plus un matériau a une réflectivité (*albédo*) élevée et une émissivité élevée, moins il risque d'emmagasiner de la chaleur et de la diffuser dans l'atmosphère ou à l'intérieur du bâtiment par l'entremise des parois et du toit (Paroli et Gallagher, 2008; Synnefa, 2007).

La réflectivité des surfaces détermine la capacité des surfaces à refléter le *rayonnement solaire*. L'*albédo* est représenté sur une échelle de 0 à 1. Un haut *albédo*, par exemple 0,70, signifie que la surface réfléchit une grande quantité du rayonnement solaire. L'émissivité est la propriété d'un matériau à diffuser l'énergie qu'il accumule. L'énergie qui n'est pas diffusée contribue au réchauffement des surfaces. Le coefficient d'émissivité d'un matériau est fonction de son état de surface, et pour un métal, de son degré d'oxydation. Ce coefficient est également exprimé par une valeur située entre 0 et 1 (tableau 5). Un matériau d'émissivité faible est un meilleur isolant thermique (Liébard et DeHerde, 2005).

L'industrie des matériaux pour toitures a développé récemment des produits performants de revêtement de toitures, tels que des membranes élastomères ou polyurées, des tuiles et des graviers pâles, dont les *albédos* sont tous plus élevés que ceux des matériaux classiques (Akbari *et al.*, 2006). Ces produits sont disponibles au Québec (Lalonde, 2009). L'utilisation de ces matériaux est recommandée pour les toits plats uniquement, dans les régions sujettes aux îlots de chaleur urbains, car installés sur un toit en pente ils peuvent créer un *éblouissement* (Nikolopoulou, 2004).

Tous les matériaux réfléchissants perdent un peu de leur efficacité réfléchissante avec le temps en raison de la saleté qui se dépose sur le revêtement (USEPA, 2008b).

Tableau 5 Albédo et facteur d'émission de différents matériaux

Matériau	Facteur d'émission	Albédo
Aluminium poli	0,1	0,9
Béton sale	0,9	0,2
Bois foncé	0,95	1,5
Brique rouge	0,9	0,3
Cuivre terni	0,4	0,4
Marbre blanc	0,9	0,6
Peinture blanche	0,9	0,8
Plâtre	0,9	0,9

Source : Liébard et DeHerde, 2005.

Afin d'augmenter l'*albédo* des toitures en pente, le Lawrence Berkeley National Laboratory, en collaboration avec l'Oak Ridge National Laboratory, a effectué des recherches sur les propriétés de différents pigments de couleur. Ces études ont révélé que certains pigments de couleur peuvent réfléchir un haut taux de rayonnement infrarouge proche (qui constitue la moitié de l'énergie solaire) (Akbari *et al.*, 2006). Visuellement, les couleurs des revêtements composées de ces pigments sont similaires à celles des toits classiques, mais leur capacité de réflectivité est nettement supérieure (Levinson *et al.*, 2005). Ces produits ne seraient pas encore disponibles au Québec.

4.2.1.2 Architecture bioclimatique

Les principes de l'architecture bioclimatique permettent de protéger le bâtiment des surchauffes en période estivale, car ils tiennent compte des contraintes climatiques. De la conception de l'enveloppe jusqu'à l'orientation du bâtiment, l'architecture bioclimatique met tout en œuvre pour assurer le confort thermique des occupants, protégeant ainsi les personnes les plus vulnérables de la chaleur (Liébard et DeHerde, 2005).

Isolation et étanchéité des bâtiments

Bien qu'elles soient des paramètres associés aux climats froids, l'isolation et l'étanchéité sont aussi incontournables pour assurer le contrôle de la fraîcheur à l'intérieur du bâtiment. Elles servent à éviter la pénétration du froid ou de la chaleur dans le bâtiment par les murs, la toiture, le sol ou les vitrages et donc à atténuer l'inconfort thermique des occupants (Déoux, 2004).

L'isolation du bâtiment est assurée lorsque l'enveloppe ne présente pas ou présente peu de ponts thermiques. Les ponts thermiques sont des défauts de conception ou de réalisation de l'enveloppe isolante, qui laissent s'infiltrer la chaleur dans le bâtiment en été et le froid en hiver. Ils sont source d'inconfort thermique et de surconsommation d'énergie (chauffage et climatisation). Pour les repérer et les réparer, plusieurs techniques existent, dont la thermographie à infrarouges qui permet de visualiser les températures de surface de l'enveloppe d'un bâtiment (Liébard et DeHerde, 2005).

Une bonne étanchéité du bâtiment à l'air peut également minimiser l'entrée d'air chaud. Elle doit être combinée à un système de ventilation adéquat qui assurera une saine qualité de l'air intérieur et permettra de rafraîchir l'air ambiant la nuit si cela est possible (Déoux, 2004).

Inertie thermique

« L'inertie thermique d'un matériau mesure sa capacité à accumuler de la chaleur et à en différer la restitution après un certain temps : c'est le temps de déphasage » (Liébard et DeHerde, 2005). L'inertie est caractérisée par la rapidité avec laquelle la chaleur va pénétrer dans un matériau (ou diffusivité) et par la capacité du matériau à absorber ou à restituer la chaleur (ou effusivité). Plus la diffusivité est grande, plus la chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbera de l'énergie sans se réchauffer substantiellement.

Pour réduire la quantité de chaleur transmise dans un bâtiment, l'idéal est que les matériaux de l'enveloppe présentent une faible diffusivité et une forte effusivité.

Les matériaux à forte inertie permettent d'emmagasiner et de stocker la chaleur en excès, évitant que la chaleur se retrouve dans l'air ambiant et améliorant ainsi le confort thermique. La chaleur contenue dans les matériaux de forte inertie sera diffusée de six à dix heures après que ceux-ci auront commencé à emmagasiner de la chaleur, soit vers la fin de la journée, au moment où il sera possible de faire entrer de l'air plus frais dans la maison (Arizona Solar Center, 2009; Hollmuller *et al.*, 2005). Les matériaux ayant une bonne inertie thermique sont par exemple la pierre, le béton, la terre crue et la brique.

Pour maximiser le potentiel de fraîcheur qu'offre une forte inertie des matériaux à l'intérieur des bâtiments, il serait idéal de placer les parois à forte inertie là où il y a de l'ensoleillement et veiller à ce qu'au moins 50 % des parois des pièces soient à forte inertie (Oliva et Courgey, 2006). Une forte inertie thermique permet d'éviter les surchauffes en conservant la fraîcheur de l'air nocturne pendant toute la journée, tout en gardant la fraîcheur dans le bâtiment grâce à une bonne isolation et une bonne étanchéité.

Vitrages

Les vitrages sont les points faibles de l'isolation thermique d'un bâtiment en été comme en hiver (Armstrong *et al.*, 2008). Il est cependant possible d'améliorer la performance de l'isolation thermique en faisant notamment les choix suivants :

- des vitrages antiémissifs intelligents qui réduisent l'apport solaire à l'intérieur du bâtiment. Ces vitrages s'adaptent en fonction des saisons et l'angle d'inclinaison des rayons incidents : ils laissent passer la lumière en hiver quand le soleil est plus bas et limitent le *rayonnement solaire* en été lorsqu'il est plus haut;
- des vitrages doubles ou triples avec lame d'air. L'air est un isolant qui permet de minimiser les échanges de chaleur par conduction et *convection*. Les vitrages doubles ou triples renferment une lame d'air de 16 à 20 mm qui en augmente la capacité d'isolation. L'insufflation de gaz argon ou krypton (inflammables et non toxiques), en remplacement de l'air, offre une meilleure isolation de ces vitrages;

- des films plastiques autocollants bloquant 98 % du rayonnement UV et 75 % de la chaleur solaire thermique (Energy Film Insolation, 2008; SCHL, 2009; Manning *et al.*, 2008; Ali, 2008).

Des vitrages à faible gain solaire existent également et pourraient régler le problème de la surchauffe en été. Toutefois, leur utilisation entraînerait une perte de gain solaire en hiver et donc une hausse de la demande énergétique. À ce sujet, une étude a été réalisée par des chercheurs du CNRC, à Ottawa, afin de comparer la performance énergétique durant toute l'année des deux types de vitrages à faible émissivité : le vitrage à gains solaires élevés (GSÉ) et le vitrage à faibles gains solaires (FGS). Elle a démontré que l'utilisation des vitrages GSÉ devrait être préconisée dans les villes où sont enregistrés plus de 3 000 degrés-jours Celsius (soit la majorité des villes québécoises). Également, l'utilisation des vitrages GSÉ générerait une réduction de 13 à 17 % des coûts combinés de chauffage et de refroidissement, tandis que celle des vitrages FGS entraînerait des économies de 8 à 10 % (Manning *et al.*, 2008).

Une attention sera également portée aux puits de lumière intégrés aux toits. À moins de pouvoir les couvrir à l'extérieur, il est fortement déconseillé de les incorporer au bâtiment afin d'éviter l'effet de serre en résultant et pouvant nécessiter une climatisation énergivore (Oliva et Courget, 2006).

L'idéal en conditions climatiques québécoises est de tirer profit de l'ensoleillement l'hiver et de s'en protéger l'été par des protections solaires diverses (Potvin, 2008).

Protections solaires

En plus de la végétation qui, comme indiqué précédemment, est un excellent moyen de protéger l'enveloppe du bâtiment de l'ensoleillement direct, d'autres solutions existent afin de limiter l'apport de chaleur du *rayonnement solaire*. Il s'agit des protections solaires des vitrages et du bâtiment.

Les protections solaires sont des dispositifs qui s'installent à l'extérieur, autour des fenêtres ou sur celles-ci afin de bloquer l'entrée du *rayonnement solaire* estival, tout en laissant entrer la lumière (contrairement aux protections intérieures). Divers types de protections solaires sont présentées au tableau 6.

Le recours aux masques solaires fixes demande un dimensionnement précis afin de ne pas perdre les bénéfices de l'ensoleillement en saison hivernale (éviter d'installer un pare-soleil trop long qui bloquera l'entrée du *rayonnement solaire* en hiver, lorsque le soleil est plus bas).

Bien qu'elles soient beaucoup moins efficaces pour protéger l'intérieur du bâtiment de la surchauffe estivale, les protections intérieures telles que les toiles opaques ou les stores devront être claires et couvrir toute la surface de la fenêtre (Oliva et Courgey, 2006).

Tableau 6 Différents types de protections solaires extérieures

Type de protection solaire	Description
Protections solaires fixes	Auvent Protection solaire horizontale opaque, incluse dans la structure du bâtiment 
	Brise-soleil Formé de lames disposées sur un châssis 
	Persiennes Série de lamelles extérieures fixes ou mobiles disposées sur la façade 
	Débords de toits et balcons à l'étage Protègent également les fenêtres et une partie du bâtiment du <i>rayonnement solaire</i> 
Protections solaires amovibles	Pare-soleil horizontaux Protègent les fenêtres, les façades ou une partie des trottoirs du <i>rayonnement solaire</i> 
	Volets Protègent les fenêtres du <i>rayonnement solaire</i> en période estivale et peuvent être retirés en hiver 
	Stores extérieurs Protègent également les fenêtres du <i>rayonnement solaire</i> en période estivale et peuvent être retirés en hiver 

Source : Liébard et DeHerde, 2005.

4.2.2 Infrastructures routières

4.2.2.1 Pavés à hauts albédos

Les pavés peuvent représenter jusqu'à 45 % de la surface des villes (USEPA, 2008b). Comme mentionné précédemment, les grandes aires pavées urbaines, telles que les cours d'école, les routes et les aires de stationnement, sont souvent recouvertes de bitume et d'autres matériaux foncés qui absorbent la majorité du *rayonnement solaire*. Lors de journées chaudes, ces surfaces peuvent atteindre des températures de 80 °C, contribuant ainsi grandement à l'effet d'îlot de chaleur urbain (Asaeda *et al.*, 1994).

Afin de minimiser cette accumulation de chaleur des pavés, il est possible d'en augmenter l'*albédo* par les techniques suivantes :

- **Pavé inversé** : Les routes asphaltées actuelles sont composées d'environ 85 % de granulat minéral recouvert de 15 % de bitume. Une façon d'augmenter l'*albédo* de l'asphalte est d'inverser la façon de fabriquer le pavé, soit étendre une fine couche de bitume sur laquelle est disposé le granulat à haut *albédo* (par exemple 0,60). Le granulat ainsi exposé augmente le taux de réflectivité du revêtement *rayonnement solaire*, ce qui diminue la température du pavé. Ces types de pavés sont cependant déconseillés pour les routes à grande vitesse, car les morceaux d'agrégats peuvent se décoller et occasionner des bris de pare-brises.
- **Asphalte et le béton coloré** : Un ajout de pigments réfléchissants dans l'asphalte et le béton permet d'en augmenter la réflectivité.
- **Couche superficielle de béton** : Il s'agit d'appliquer une couche de béton de 2,5 à 10 cm d'épaisseur sur une chaussée de bitume en bonne condition (Maillard, 2009). Le béton ayant un *albédo* plus élevé (entre 0,30 et 0,40 lorsque neuf) permet de conserver une température de surface plus fraîche. Cette méthode serait très performante et permettrait la circulation de tous les types de véhicules (Winkelman, 2005; Synnefa *et al.*, 2007; Maillard, 2009).

L'épaisseur du pavé conditionnant sa capacité à emmagasiner de la chaleur, les surfaces plus minces sont à privilégier pour les *albédos* bas, qui absorbent la chaleur (Golden et Kaloush, 2006).

4.2.2.2 Augmenter l'albédo de la peinture des véhicules

Tout comme pour les bâtiments ou les pavés, des peintures avec un haut taux de réflectivité solaire sont disponibles pour les véhicules et leur utilisation devrait être préconisée par les entreprises. Ces peintures sont composées de pigments spéciaux, qui permettent d'en augmenter l'*albédo* de 17,5 % en moyenne (Ihara, 2006).

4.2.3 Aménagement urbain

Il existe une corrélation entre des indicateurs morphologiques (rugosité, densité bâtie, *albédo* des surfaces, géométrie urbaine) et la chaleur dans les milieux urbains. Cette relation entre la *morphologie urbaine* et les microclimats a été établie dans différentes recherches (Fouad, 2007; Pinho *et al.*, 2003; Nikolopoulou, 2004).

La *morphologie urbaine* peut notamment générer des canyons urbains où la chaleur et les polluants atmosphériques restent captifs. Les urbanistes devraient porter une attention particulière à la conception intégrative des villes, qui prend en compte différents paramètres de confort thermique selon le climat et la morphologie existante des villes (USEPA, 2008; USEPA, 2001).

Les urbanistes peuvent favoriser le confort thermique des citoyens en intégrant les préoccupations suivantes à la planification urbaine :

- l'aménagement du territoire visant la bonne circulation des vents en période estivale, très utile dans les villes ayant un fort taux d'humidité. Combinés à cette stratégie de ventilation, des aménagements de végétation et d'eau (jets d'eau, chutes et fontaines) peuvent créer davantage de fraîcheur;
- l'aménagement, la bonne répartition et la sauvegarde des espaces verts. Les espaces verts urbains devraient être bien répartis afin de faciliter leur accès (moins de 20 minutes de marche de toute habitation). Ils doivent idéalement créer des passages verts au travers des villes, que les piétons peuvent facilement emprunter. De grands espaces verts situés en amont de la ville dans l'axe des vents dominants peuvent également contribuer à un rafraîchissement de l'air;
- la mixité des usages, c'est-à-dire l'aménagement de trajets continus destinés au transport actif et permettant l'accès aux aires récréatives et sociales ainsi qu'aux différents services essentiels, tels que les commerces d'alimentation. Cette pratique limite également l'utilisation ou l'achat de véhicules automobiles;
- la promotion du transport en commun, la limitation de l'utilisation des véhicules personnels et le développement urbain inspiré du *Transit Oriented Development* (TOD) (section 4.4.2.1) (USEPA, 2008b; Coutts *et al.*, 2007; Nikolopoulou, 2004; URBATOD.org, 2009).

4.2.3.1 Accès à des installations de rafraîchissement

Centres de rafraîchissement

L'accès à des aires de rafraîchissement est parfois essentiel pour soulager la population des effets néfastes de la chaleur accablante (centres commerciaux, écoles, centres culturels ou tout autre édifice public climatisé pouvant accueillir la population). Il est également important de prévoir une aide aux personnes ne pouvant se déplacer seules afin d'accéder à ces lieux. (English *et al.*, 2007; Agence de la santé et des services sociaux de Chaudière-Appalaches, 2009). Des aires de repos, par exemple des abris ou des centres climatisés, doivent aussi être disponibles pour les travailleurs extérieurs (CSST, 2004).

Installations d'eau

Les petites installations ou étendues d'eau (bassins, fontaines et jets d'eau) jouent le rôle de tampons thermiques car elles tempèrent les fluctuations de température, créant ainsi des microclimats. Il est à noter que les grands plans d'eau augmentent la propagation du son et devraient être évités dans les zones urbaines très bruyantes (Déoux, 2004).

Aires aquatiques

L'accès et la proximité des aires aquatiques sont aussi essentiels afin que la population puisse se rafraîchir, tant en milieu naturel que dans les aires aménagées publiques (figure 6). D'autres installations, comme les bassins et les brumisateurs, servent aussi au rafraîchissement et peuvent être aménagées dans les parcs et les centres récréatifs. Les brumisateurs s'utilisent aussi à l'intérieur du domicile (Raymond *et al.*, 2006). L'eau trouve dans l'air ambiant l'énergie nécessaire pour s'évaporer : le processus d'évaporation rafraîchit ainsi l'air ambiant.



Figure 6 Jeux d'eau et piscine

Protection solaire dans les zones publiques

Le *rayonnement solaire* direct élève la température ressentie par l'humain et a un impact marqué sur son confort thermique (Watkins *et al.*, 2007). Au même titre que les bâtiments ou les infrastructures, l'ombrage permet aux personnes de se protéger en partie du *rayonnement solaire* direct et des rayons UV responsables du cancer de la peau (Santé Canada, 2006; Parisi *et al.*, 2000).

4.2.4 Gains de fraîcheur et autres bénéfices liés aux infrastructures urbaines durables

4.2.4.1 Toits réfléchissants

Un revêtement de toiture foncé (à faible *albédo*) peut atteindre une température de 50 °C plus élevée que celle de l'air ambiant tandis que, selon Akbari *et al.* (2001), une toiture à haut *albédo* atteindra une température maximale de 10 °C supérieure à celle de l'air ambiant. Cette surface peut grandement contribuer à la réduction des besoins en climatisation (ENERGY STAR, 2009). Des études américaines ont démontré que la réduction des besoins en climatisation pouvait atteindre de 13 à 40 % selon les villes (Konopacki *et al.*, 1998). Une étude californienne a établi que l'ajout de pigments de couleur à haut *albédo* dans la fabrication des revêtements de toiture pourrait réduire les besoins en climatisation de 10 % et la chaleur ambiante de 1 à 1,5 °C, de même que le smog d'environ 5 % (Akbari et Miller, 2006). L'utilisation de matériaux réfléchissants et à faible émissivité générerait plus de fraîcheur en milieu urbain et, par le fait même, améliorerait la qualité de l'air en minimisant la formation de smog (Taha, 1995).

Une étude réalisée pour la grande région de Toronto a estimé que les coûts liés à la climatisation pourraient diminuer de quelque 11 M\$ (150 GW) si la ville installait des toitures blanches et recourait à une stratégie de verdissement stratégique (Akbari et Konopacki 2004). Toutefois, au Québec, l'installation de tels revêtements réfléchissants pourrait engendrer des pertes de chaleur pendant les mois froids de l'année. Le CNRC mène actuellement une étude afin de connaître les bilans énergétiques annuels des bâtiments faisant usage de tels matériaux. La recherche en cours est effectuée dans la ville d'Ottawa (Baskaran, 2009).

4.2.4.2 Parois murales réfléchissantes

Une expérience a été réalisée à Londres afin de mesurer la différence de température de deux parois murales situées dans le même canyon urbain, toutes deux recevant le même taux de *rayonnement solaire*. L'un des murs était fait d'un matériau à haut *albédo* (0,50) et l'autre, d'un matériau foncé à faible *albédo* (0,03). Différentes mesures ont été enregistrées lors d'un après-midi ensoleillé, et la température de la surface réfléchissante s'est avérée de 6 à 10 °C plus fraîche pendant cette période. En conclusion, si toutes les surfaces avaient eu une bonne capacité réfléchissante, la température de la gorge aurait pu être diminuée de 3 à 4 °C au point le plus chaud de la journée (Watkins *et al.*, 2007).

4.2.4.3 Pavés à hauts albedos

Une étude du Heat Island Group a estimé que l'installation de pavés à hauts *albedos* combinée à une stratégie de végétalisation pouvait réduire la température ambiante de la ville de Los Angeles de 0,6 °C (Rosenfeld *et al.*, 1998). Selon une étude comparative de l'état des pavages de quelques villes américaines, la chaleur d'une ville aurait une incidence sur le taux de détérioration des composés de l'asphalte. Des pavés plus clairs auraient donc une meilleure durée de vie (Pomerantz, 1999).

4.2.4.4 Installations d'eau

Les techniques liées à la micronisation (pulvérisation de gouttelettes d'eau de l'ordre du micromètre en suspension dans l'air) favorisent le rafraîchissement de l'air ambiant. Leur effet est maximisé dans un climat chaud et sec, mais permet également de faire des gains de fraîcheur dans les milieux où l'humidité relative est plus élevée, notamment lorsque le rafraîchissement par mouvements d'air est possible (Liébard et DeHerde, 2005). À la suite d'une canicule qui a sévi en Europe en 2003, des chercheurs français ont mené une étude portant sur l'utilisation d'un brumisateur dans un centre de gérontologie de Marseille. L'utilisation de cet appareil dans la salle de séjour où circulent les soignants et les résidents a entraîné une réduction de la température intérieure de 3 °C (Bonin-Guillaume *et al.*, 2005).

4.3 GESTION DURABLE DES EAUX PLUVIALES

Plusieurs études établissent une corrélation entre le taux d'humidité des sols et l'atténuation des îlots de chaleur urbains. En effet, grâce à l'évaporation, les sols humides ont des capacités de rafraîchissement semblables à celles de la végétation, et leurs températures de surface sont plus fraîches que celles des sols secs (Lakshmi *et al.*, 2000; Donglian et Pinker, 2004).

Afin de favoriser l'humidification des sols en milieux urbains et d'assurer une disponibilité en eau pour les végétaux, plusieurs pratiques de gestion durable des eaux pluviales et de maîtrise de la pollution de l'eau existent et s'inscrivent dans l'approche de développement à faible impact. Le développement à faible impact favorise les aménagements à petite échelle qui permettent la gestion des eaux pluviales à la source afin d'éviter la pollution due au ruissellement (Endreny, 2008).

Pour être efficaces et sécuritaires, les aménagements à petite échelle doivent faire l'objet d'études préalables. La proximité d'une nappe phréatique, la granulométrie du sol et les risques de pollution sont autant de facteurs à considérer lors de l'instauration de mesures visant l'infiltration des eaux pluviales dans le sol. S'il s'agit de l'aménagement d'un site où les sédiments et les polluants sont présents (stationnements et sites industriels), un suivi et un entretien rigoureux doivent être effectués (Fuamba, 2009). Les études aideront à prévenir la contamination des aquifères souterrains et à éviter l'infiltration de faible intensité qui favorise le ruissellement accru à l'instar des surfaces imperméables (Craul, 1994; Gregory *et al.*, 2006).

4.3.1 Arbres et toits verts

L'infiltration de l'eau est grandement maximisée grâce au système racinaire des arbres. La capacité de rétention d'eau des arbres varie en fonction de la taille, de la texture de l'écorce, de la saison et de l'intensité des épisodes de pluie (Xiao *et al.*, 1998). Il est admis que la végétalisation des milieux urbains et l'installation de toitures végétales améliorent la qualité de l'air, diminuent la température ambiante (évapotranspiration) et réduisent la demande énergétique liée à la climatisation (Niachou, 2001; Ryerson University, 2005). Les aménagements végétalisés peuvent aussi capter une grande quantité des eaux pluviales (Gill *et al.*, 2007; DeNardo *et al.*, 2005). Les toits verts ont des caractéristiques qui

influencent leur capacité de rétention d'eau, dont la profondeur du substrat, la pente du toit, le type de plantes et l'intensité des précipitations (Oberndorfer *et al.*, 2007).

4.3.2 Revêtements perméables

Les revêtements perméables permettent à l'eau de percoler à travers le pavé ou la végétation, qui atteint une couche de substrat favorisant une infiltration profonde (Albanese et Matlack, 1999). Les sols recouverts de gravier sont utilisés comme revêtements perméables depuis longtemps. Ils aident à une bonne infiltration de l'eau dans le sol lorsque ce dernier n'est pas trop compact, mais ils sont peu prisés en milieu urbain (Gilbert et Clausen, 2006).

D'autres types de revêtements perméables existent, soit :

- les dalles imperméables, disposées les unes contre les autres et permettant à l'eau de pluie de percoler dans les joints perméables (figure 7). Ce type de revêtement est utilisé dans les cours d'école, les rues piétonnières, les parcs, les voies d'accès pour piétons, les pistes cyclables, les stationnements, etc. Il ne convient pas aux aéroports ou aux autoroutes, car il est vulnérable aux freinages brusques et aux poids lourds;
- les dalles ou revêtements de béton poreux permettant l'écoulement de l'eau par de petites cavités. Ce type de pavé est obtenu grâce à un mélange de béton sans ajout d'agrégat. Son entretien requiert un nettoyage par aspirateur ou jet d'eau afin d'en dégager toute substance pouvant colmater les cavités. Son utilisation est préconisée pour les voies piétonnières, l'absence de joint ne conférant pas aux dalles une très grande résistance mécanique;
- les structures permettant l'engazonnement : Leur forme alvéolée permet la végétalisation du sol et favorise l'infiltration de l'eau dans celui-ci. Elles peuvent supporter de lourdes charges et sont donc appropriées pour les stationnements (figure 8) (Communauté urbaine de Lyon, 2008; USEPA, 2008b).



Figure 7 Dalles imperméables avec joints perméables. Espaces piétonniers permettant la percolation de l'eau

Les revêtements perméables exigent un entretien régulier et des pratiques particulières afin d'éviter la contamination de la nappe phréatique et le colmatage. Ainsi, les sels de déglacage et les sables sont à proscrire sur ce genre de revêtement (Communauté urbaine de Lyon, 2008).



Figure 8 Stationnement végétalisé

4.3.3 Jardins pluviaux

Afin d'éviter que les eaux de pluie s'écoulant sur le toit, les différentes surfaces imperméables du bâtiment et son pourtour soient dirigées vers le réseau de drainage des eaux pluviales, il est possible de réaliser un jardin pluvial à faible coût. Pour des bâtiments résidentiels de petite et moyenne taille, cet aménagement est très intéressant et relativement facile à mettre en place. Les jardins pluviaux sont un moyen de réduire le ruissellement et d'augmenter le taux d'humidification des sols ainsi que la percolation de l'eau pour la régénération des nappes phréatiques (Frazer, 2005; USEPA, 2007).

Selon la SCHL (2005), le jardin pluvial est « un lit de plantes ou de pierres, conçu expressément pour capter les eaux pluviales et permettre au sol de les absorber lentement par infiltration ». Les dimensions des jardins pluviaux dépendront du volume d'eau à recueillir, leur forme devra être longiligne et leur longueur, perpendiculaire à la dépression. L'aménagement sera constitué de pierres et de plantes résistantes aux conditions tant humides que sèches. Les quenouilles, la spirée, les fougères et les eupatoires seraient notamment des plantes adéquates pour ce type d'aménagement (Smeesters, 2008).

4.3.4 Bassins de rétention

Le bassin de rétention est un aménagement du même type que le jardin pluvial, mais de plus grande dimension. Il s'agit d'une dépression réalisée grâce à un dénivelé du terrain. Cette dépression recueille l'eau qui y ruisselle et la laisse s'infiltrer dans le sol (USEPA, 1997). Il existe deux types de bassins de rétention : les bassins d'eau, qui conservent une eau stagnante en permanence, et les bassins secs. Ce type d'aménagement procure aussi d'autres avantages tels que la création de paysages végétaux, voire d'espaces de jeux et de loisirs (bassins secs) en milieu urbain. Il peut être doté de moyens prévenant la pollution du milieu, comme un bassin de sédimentation ou des plantes aquatiques filtrantes, notamment dans les stationnements et les sites industriels (Yamada *et al.*, 2001).

4.3.5 Tranchées de rétention

Les eaux de ruissellement peuvent aussi être recueillies dans des tranchées de rétention. Linéaires et peu profondes (1 m), ces tranchées sont recouvertes d'un revêtement perméable, de galets ou de gazon. Elles peuvent également servir de voies d'accès aux automobiles ou aux piétons. Ce type d'aménagement s'intègre bien au paysage urbain, car il occupe peu d'espace. L'entretien régulier est important pour éviter la sédimentation de la tranchée de rétention et prolonger sa durée de vie (PortlandOnline, 2004).

4.3.6 Puits d'infiltration

Les puits d'infiltration recueillent les eaux de ruissellement et permettent leur infiltration dans le sol. Ils sont constitués d'un espace de décantation d'une bonne hauteur, fait de gravier et de sable, et d'exutoires qui rendent possible l'infiltration de l'eau dans le sol. Ils sont utilisés notamment pour recueillir les eaux de ruissellement des toits. Leur conception est simple et demande peu d'espace au sol (Grand Toulouse communauté urbaine, 2008).

4.3.7 Chaussées à structure réservoir

Les chaussées à structure réservoir sont constituées des pavés poreux favorisant l'infiltration de l'eau à la source. Elles laissent passer l'eau et l'air à même le revêtement, ne requièrent pas d'espace supplémentaire et s'intègrent bien au milieu urbain. Comme ils ont une densité plus faible et un *albédo* plus élevé que le bitume, les revêtements poreux emmagasinent moins de chaleur que le bitume. L'entretien et la gestion de tels revêtements sont délicats car ce type de surface présente des risques de colmatage. Pour assurer une bonne perméabilité, un curage du pavé doit être effectué régulièrement par jet d'eau ou aspirateur (Grand Toulouse communauté urbaine, 2008). Il est à noter que le climat québécois peut nuire à la performance de telles chaussées lors de la fonte des neiges au printemps. En effet, l'eau gelée dans les cavités de la chaussée peut empêcher l'infiltration de l'eau en période de fonte (Backtröm et Viklander, 2000).

4.3.8 Arrosage des pavés imperméables avec de l'eau recyclée

Grâce au processus d'évaporation, l'arrosage des surfaces pavées imperméables est un moyen efficace de réduire la température des surfaces asphaltées, perméables ou non (Asaeda *et al.*, 1994).

4.3.9 Gains de fraîcheur et autres bénéfices liés à la gestion des eaux pluviales

Dans le cadre de cette revue, très peu d'articles traitant de la création de fraîcheur liée à l'humidification des sols en milieux urbains ont été répertoriés. Les recherches sur les installations de gestion des eaux pluviales portent principalement sur la quantité d'eau retenue à la source. Une étude suédoise a pour objet les mesures de gestion des eaux pluviales propices aux climats froids. Il a été constaté que les revêtements poreux, les tranchées de rétention, les jardins pluviaux et les bassins de rétention sont très bien adaptés au climat suédois, caractérisé comme le climat québécois par des périodes de gel en saison hivernale (Backtröm et Viklander, 2000).

4.3.9.1 Arbres et toits verts

Une extrapolation du potentiel d'interception des précipitations par les arbres publics de la ville de Montréal a mené à la conclusion que ceux-ci captent actuellement environ 2,2 % des eaux pluviales. (Vergriete et Labrecque, 2007). Une autre étude a évalué que la capacité de rétention d'eau de pluie d'un toit végétalisé de 10 cm d'épaisseur est d'environ 60 % (Moran *et al.*, 2007). La rétention des eaux de pluie varierait de 25 à 50 % pour les substrats plus minces. Selon la littérature, les toits extensifs pourraient retenir un maximum de 45 % d'eau alors que les toits intensifs en retiendraient jusqu'à 75 % (Carter et Keeler, 2008). Une étude par modélisation a conclu que si 10 % des toits de Bruxelles étaient végétalisés, la réduction du ruissellement total serait de 2,7 % (Mentens *et al.*, 2006).

4.3.9.2 Puits de rétention

Les puits de rétention aident à réduire le ruissellement de l'eau pluviale jusqu'à 90 %. Leurs vertus filtrantes permettent de purifier l'eau de contaminants tels que les hydrocarbures et les métaux (James, 2002; Albanese et Matlack, 1999).

4.3.9.3 *Revêtements perméables*

Selon le Milwaukee Metropolitan Sewerage District (2007), les pavés perméables et poreux permettraient l'infiltration de 70 à 80 % des précipitations pluviales annuelles. De plus, une étude comparative de trois types de revêtements de stationnements (asphalte, pavés perméables et poussière de roche) conclut que les pavés perméables favorisent une plus grande filtration de polluants et un meilleur assainissement des eaux de ruissellement (Gilbert et Clausen, 2006).

4.3.9.4 *Arrosage des pavés avec de l'eau recyclée*

D'après étude réalisée à Tokyo, le gain de fraîcheur provenant de l'arrosage de rues asphaltées avec de l'eau recyclée est de 8 °C le jour et de 3 °C la nuit. Les températures des pavés après arrosage seraient les mêmes que celles des zones végétalisées avoisinantes (Yamagata *et al.*, 2008).

4.4 DIMINUTION DE LA CHALEUR ANTHROPIQUE

4.4.1 **Contrôle de la production de chaleur dans le bâtiment**

La production de chaleur à l'intérieur d'un bâtiment contribue à sa surchauffe en période estivale, notamment lorsqu'elle s'ajoute au *rayonnement solaire* direct ou à la mauvaise isolation thermique du bâtiment. Selon une analyse de Taha (1997), la chaleur anthropique peut être responsable d'une augmentation de 2 à 3 °C dans les centres urbains. Les appareils électroménagers, les lampes et les ordinateurs, par exemple, transforment l'énergie qu'ils consomment en chaleur. Ces apports de chaleur internes ne sont pas simultanés et représentent plutôt une source de chaleur diffuse dans les bâtiments.

4.4.1.1 *Éclairage artificiel et lumière naturelle*

L'éclairage participe aux apports internes de chaleur. Les lampes halogènes et à incandescence produisent beaucoup de chaleur qui, par rayonnement ou *convection*, est absorbée par les parois et matériaux environnants. Lorsque les capacités de stockage de chaleur des parois et matériaux sont atteintes, cette chaleur est rediffusée dans l'air ambiant. Par exemple, une lampe halogène de 500 W utilise seulement 6 % de l'électricité qu'elle consomme pour produire de la lumière, le reste se dissipant sous forme de chaleur (Salomon et Aubert, 2004). L'utilisation de lampes fluocompactes à faible consommation d'énergie contribue à réduire la quantité de chaleur dissipée. Ce type de lampe consomme cinq fois moins d'énergie et dure dix fois plus longtemps qu'une lampe à incandescence, tout en offrant le même niveau d'éclairage. Il faut cependant faire preuve de vigilance lors de la mise au rebut de ces lampes, car celles-ci contiennent du mercure. Elles doivent être retournées chez un détaillant offrant un service de récupération (Gagné *et al.*, 2008).

Une autre façon de contrôler l'apport de chaleur dû à l'éclairage artificiel est d'en réguler l'utilisation. Pour ce faire, différents moyens existent, tels que :

- le contrôle du flux lumineux : ajustement continu de l'éclairage artificiel en fonction de la lumière naturelle provenant de l'extérieur;
- l'horloge : contrôle horaire de l'éclairement dans les endroits où les besoins de lumière sont fixes (commerces, immeubles de bureaux, écoles);
- la minuterie : dispositif permettant d'éclairer momentanément les endroits à fréquentation passagère;
- le détecteur de présence : système qui permet d'éclairer uniquement quand les lieux sont occupés;
- la cellule d'éclairement : appareil de mesure de l'éclairage naturel placé dans la pièce ou sur le bâtiment et qui permet d'ajuster les besoins d'éclairage artificiel uniquement lorsqu'ils sont requis (Levy, 1978; Liébard et DeHerde, 2005).

Certains bâtiments gagnent aussi à maximiser l'utilisation de lumière naturelle telle que les hôpitaux et les écoles (sauf dans les locaux où l'éclairage doit être constant, comme les laboratoires). L'éclairage naturel et la vue du paysage extérieur auraient une incidence positive sur le rétablissement des patients et la réussite scolaire des enfants. Les entrées de lumière naturelle doivent cependant être munies de protection solaire afin de protéger les occupants du *rayonnement solaire* direct (Liébard et DeHerde, 2005).

Également, il convient, lors de la construction d'un nouveau bâtiment, d'optimiser les gains de lumière naturelle afin de réduire la dépendance à l'éclairage artificiel. Pour cela, une étude de la capacité d'éclairement du site selon les saisons doit être réalisée au début du projet de construction (Salomon et Aubert, 2003).

4.4.1.2 Appareils de bureautique

Tous les appareils électriques émettent de la chaleur même quand ils sont en mode veille. L'utilisation de matériel informatique ayant une bonne efficacité énergétique est donc fortement recommandée. De plus, afin de minimiser l'apport de chaleur, il importe d'éteindre et de débrancher les appareils lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Un ordinateur de table avec un écran cathodique peut augmenter la température d'une pièce de 3 °C en une journée. Les ordinateurs portables et les écrans plats dégagent jusqu'à dix fois moins de chaleur que les ordinateurs avec écran cathodique (Ressources naturelles Canada, 2009; Salomon et Aubert, 2003).

4.4.1.3 Appareils électroménagers

L'îlot de chaleur urbain a un impact sur la demande en énergie, notamment en raison de la climatisation et de la réfrigération. La demande accrue peut être à ce point élevée qu'elle peut mener à une surcharge pouvant faire flancher le réseau électrique. Ce fut le cas à New York, le 17 juillet 2006. Cette panne a duré plus de cinq jours, plongeant les citoyens dans des conditions d'inconfort thermique extrêmes. Afin d'éviter de telles situations, le choix d'appareils certifiés éconergétiques est recommandé (Gagné *et al.*, 2008).

Les apports de chaleur intérieure réchauffent rapidement l'air ambiant surtout si les bâtiments sont faits de matériaux à faible inertie (ne pouvant absorber beaucoup de chaleur). Par de chaudes journées, il est approprié de limiter l'utilisation des électroménagers tels que le lave-vaisselle, le lave-linge et le sèche-linge, de les mettre en route lorsqu'ils sont pleins et de les faire fonctionner en mode économique (exemple : laver le linge à 30 °C nécessite de deux à trois fois moins d'énergie qu'un lavage à 60 °C) (ADEME, 2009).

4.4.2 Réduction du parc automobile en milieu urbain

Les automobiles et véhicules contribuent à l'émission de chaleur en milieu urbain. La chaleur totale émise par les véhicules peut rester prisonnière des canyons urbains mal ventilés, réduisant par le fait même le confort thermique des citadins. Les émissions des véhicules contribuent également à la formation du smog urbain et au réchauffement climatique (Watkins *et al.*, 2007; Younger *et al.*, 2008; CAPE, 1995). Une bonne planification du transport est essentielle afin de minimiser l'apport de chaleur dans les milieux urbains (Coutts *et al.*, 2008).

4.4.2.1 Densifier les centres urbains et limiter l'étalement urbain

La densification des centres urbains permet de réduire l'utilisation de la voiture et incidemment la production de chaleur et de pollution de l'air, car elle a pour effet de diminuer la longueur des déplacements en voiture, d'offrir plus de choix quant aux modes de transport et de réduire le besoin de posséder un véhicule (Coutts *et al.*, 2008).

Le concept du *Transit Oriented Development* (TOD) peut servir de guide pour orienter un développement urbain qui encourage l'utilisation générale du transport en commun : « Le TOD conduit à aménager des quartiers denses, multifonctionnels, autour de pôles de transports collectifs. Certains principes et objectifs sont favorisés tels que la qualité de vie, la diversité et l'accessibilité tant résidentielle que commerciale, les espaces publics, les formes de mobilité douce, la diversité des fonctions créant une animation continue, les services de proximité » (Urbatod, 2009).

4.4.2.2 Mixité d'usages

Plusieurs études ont démontré que la mixité d'usages à proximité réduit la circulation automobile. Dans les zones résidentielles, les quartiers dont les commerces sont accessibles à pied ont un trafic routier moins élevé que les quartiers sans commerces, où les déplacements en voiture sont inévitables (Boarnet et Crane, 2001; Fischler et Lewis, 2005; Vivre en ville, 2004).

4.4.2.3 Restreindre l'accès des véhicules automobiles

Une des solutions envisageables afin de garantir plus de fraîcheur dans les milieux urbains est d'y limiter l'accès et la circulation des véhicules. Entre autres moyens pour ce faire :

- le contrôle du flux de véhicules par des règlements de circulation lors de journées chaudes;
- l'augmentation des coûts de stationnement en ville;

- l'instauration de péages pour circuler dans des aires spécifiques de la ville et réduire progressivement les places de stationnement;
- l'aménagement de stationnements près des terminaux de transport en commun destinés à la population vivant en périphérie. Ces stationnements permettent de laisser la voiture en périphérie et réduire le trafic automobile en ville;
- la gratuité de l'accès aux transports collectifs en cas d'alerte de chaleur accablante (Déoux, 2004; Vivre en ville, 2004; Cappe, 2003).

Ces mesures peuvent être combinées à de meilleurs services de transports collectifs et actifs, dont les tramways, les autobus et les vélos (service de location) (Vivre en ville, 2004).

4.4.2.4 *Transport en commun*

Les voitures consomment deux fois plus d'énergie par kilomètre qu'un train et quatre fois plus qu'un autobus. Les impacts liés à la chaleur et la pollution de l'air qu'engendre l'utilisation accrue de la voiture dans les centres urbains où le transport collectif n'est pas suffisamment développé sont inévitables. Les services de transport collectif répondant aux besoins des consommateurs (métro, autobus) et faciles d'usage, voire gratuits, permettront de réduire les effets néfastes du transport individuel. De plus, l'utilisation de véhicules moins énergivores et à faibles émissions polluantes peut améliorer la qualité de l'air et contribuer à la lutte aux îlots de chaleur urbains (Vivre en ville, 2004).

4.4.2.5 *Transport actif*

Le développement d'infrastructures facilitant le transport à vélo ou à pied est aussi à privilégier, car le transport actif non seulement concourt à réduire la chaleur anthropique liée aux transports motorisés, mais il est aussi bénéfique pour la santé humaine en encourageant l'activité physique (Health Scotland *et al.*, 2008). En effet, grâce à l'amélioration de la santé des usagers, des économies liées aux soins de santé seraient presque trois fois plus élevées que l'investissement nécessaire pour développer de telles infrastructures (Wang, *et al.*, 2004; CAPE, 1995). De plus, les aménagements, tels que les pistes cyclables et les rues piétonnières, sont des endroits propices à l'introduction de végétation et de mesures de gestion durable des eaux pluviales qui contribuent à la lutte aux îlots de chaleur. Afin d'augmenter le transport actif, il serait pertinent d'introduire des itinéraires cyclables pourvus d'aménagements sécuritaires lors de rénovations de voies urbaines (Déoux, 2004).

Selon Wendel *et al.* (2008), une attention particulière devrait être portée à la conception des pistes cyclables et des rues piétonnières. Pour une question de sécurité du public, celles-ci devraient être adaptées par exemple aux enfants, aux personnes âgées, aux personnes ayant une mobilité réduite et aux personnes à faible revenu ne possédant pas de véhicule personnel (Wendel *et al.*, 2008). De plus, les aménagements végétalisés devraient respecter certaines règles de sécurité, comme assurer une bonne visibilité des lieux et une surveillance policière. En effet, selon Horrobin (2008), un aménagement végétalisé trop dense peut créer des espaces cachés propices à la flânerie, au vandalisme ou à divers crimes.

4.4.3 Bâtiments passifs : contrôle de la demande de climatisation

En 2000, plus de 75 % des bâtiments commerciaux et institutionnels étaient climatisés en totalité ou de façon partielle au Canada. En outre, il y aurait une forte corrélation entre l'année de construction d'un bâtiment et la climatisation de celui-ci. En effet, 80 % des bâtiments construits dans les années 1990 étaient munis de climatiseurs (Statistique Canada, 2002). De plus, la climatisation des domiciles et des véhicules est en hausse et devient presque une norme dans certaines régions. Il existe des solutions de remplacement moins énergivores et plus durables pour rafraîchir l'air intérieur des bâtiments. En effet, il est possible de recourir à différentes techniques de climatisation passive afin de rafraîchir un bâtiment qui n'a pas été conçu pour se protéger des températures très chaudes.

4.4.3.1 Ventilation

La ventilation peut être assurée par des moyens naturels (ventilation naturelle) ou mécaniques (ventilation de pulsion ou par extraction). Pour qu'un occupant se sente confortable lorsque les températures ne sont pas élevées, la vitesse de l'air devrait être d'environ 0,2 m/s. Si les températures deviennent plus chaudes et plus humides, elle pourrait augmenter afin de soulager l'occupant. En effet, la vitesse de l'air influence les échanges de chaleur par *convection* et permet l'évaporation à la surface de la peau (Watkins et Kolokotroni, 2007).

Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est de deux types, soit la ventilation transversale et la ventilation à tirage naturel ou surventilation nocturne. La ventilation transversale s'effectue en ouvrant les fenêtres ou les portes situées sur des murs opposés, ce qui permet aux courants d'air de circuler dans les pièces. Plus la différence de température entre l'air extérieur et intérieur est grande, plus la capacité de climatisation est optimisée. Il a été observé, lors de la vague de chaleur de 2003 en Europe, que la surmortalité a été plus importante dans les appartements à orientation unique ne permettant pas une ventilation transversale (Déoux, 2004).

La technique de ventilation à tirage naturel ou surventilation nocturne requiert de laisser l'air frais entrer par des ouvertures préférablement situées dans le bas de la façade nord du bâtiment (air plus frais) et de laisser sortir l'air chaud par une ouverture située dans le haut du bâtiment. Ce différentiel de température crée un *effet de cheminée* et permet une ventilation verticale et un renouvellement de l'air plus rapide. En plus du différentiel de température (effet local), l'*effet de cheminée* est également lié à la différence de pression atmosphérique entre le bas et le haut; il est donc plus prononcé dans les bâtiments comportant de nombreux étages. C'est pourquoi les gratte-ciel sont pressurisés (Rose, 2009). Cette surventilation nocturne offre des gains de fraîcheur uniquement dans les villes où l'air extérieur est plus frais que l'air intérieur la nuit. Par cette technique, la température de l'air intérieur peut ainsi être réduite de quelques degrés (Salomon et Aubert, 2003).

Afin de favoriser la ventilation naturelle dans un nouveau bâtiment, l'architecte doit étudier le régime local des vents dominants. Un bâtiment placé dans un angle de 45° par rapport au vent permettra des surpressions et des dépressions optimales favorisant la ventilation. Des

dispositifs tels que des déflecteurs peuvent également être ajoutés au bâtiment pour modifier l'effet des vents et faciliter la ventilation (Liébard et DeHerde, 2005).

Ventilation mécanique contrôlée (VMC)

La ventilation mécanique contrôlée (VMC) requiert un système qui utilise un ou des ventilateurs pour extraire régulièrement l'air vicié des pièces. Ce système peut rafraîchir l'air intérieur si l'air extérieur est plus frais que celui-ci. L'évaluation préalable des besoins en ventilation et en climatisation permettra un meilleur choix de VMC et optimisera les gains en ventilation et en rafraîchissement. Le tableau 7 présente les différents types de VMC.

Tableau 7 Différents types de ventilation mécanique contrôlée (VMC)

Types de VMC	Caractéristiques
Simple flux de base	Ventilateur centralisé d'extraction de l'air Air neuf entre dans le bâtiment par dépression
Simple flux hygroréglable	Ventilateur centralisé d'extraction de l'air Bouches d'entrée et d'extraction d'air qui s'ajustent aux taux d'humidité de l'air de chaque pièce
Double flux	Deux ventilateurs centralisés (extraction et arrivée d'air) Possibilité d'intégrer un échangeur de chaleur qui permet en hiver de récupérer la chaleur et d'économiser environ 15 % des coûts de chauffage par rapport à une ventilation à simple flux
Ventilation mécanique par insufflation	Un circuit de gaines insuffle l'arrivée d'air
Ventilation mécanique répartie	Plusieurs ventilateurs placés dans les différentes pièces du bâtiment

Source : Oliva et Courgey, 2006.

Brasseurs d'air et ventilateurs

Les ventilateurs sur pied et les brasseurs d'air plafonniers peuvent être employés pour accélérer la vitesse de l'air. En climat humide, les brasseurs d'air s'avèreraient efficaces pour procurer un rafraîchissement grâce à la *convection* (Liébard et DeHerde, 2005).

4.4.3.2 Rafraîchissement solaire

Il est possible d'utiliser des systèmes de chauffage-rafraîchissement utilisant les énergies renouvelables. Comme Déoux (2004) l'explique : « L'énergie solaire récupérée par des capteurs solaires peut produire la source chaude à basse température (80 °C à 120 °C) utilisée par les machines à absorption qui sont des alternatives intéressantes aux machines à compression classique utilisées en climatisation. » Il s'agit d'un concept encore peu utilisé au Québec, mais qui existe en Europe depuis déjà près de 20 ans (Rose, 2009). Les machines à absorption y sont en effet les plus répandues. En voici le principe : « La compression thermique est obtenue en utilisant un couple réfrigérant/liquide absorbant, et une source de chaleur (issue de l'énergie solaire) qui remplace la consommation électrique du compresseur mécanique. Pour de l'eau glacée au-dessus de 0 °C, comme c'est le cas en

climatisation, c'est le couple eau/bromure de lithium ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$) qui est utilisé, l'eau étant le réfrigérant. La plupart des systèmes utilisent une pompe à solution, très faiblement consommatrice d'électricité. Dans un système $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$, la cristallisation de la solution doit être évitée par un contrôle interne de la température du circuit de refroidissement » (Rhônalénergie Environnement, 2009).

Ces systèmes par absorption peuvent également être alimentés par récupération de chaleur (eaux chaudes inutilisées, fumées, etc.). Aussi, ils sont très silencieux et performants sur le plan environnemental, n'utilisant pas de fluides frigorigènes (Salomon et Aubert, 2003).

4.4.3.3 Puits provençal (ou puits canadien)

Le puits provençal capte de manière passive l'énergie géothermique du sol grâce à une ventilation mécanique contrôlée. Le principe repose sur l'installation d'un tuyau dans le sol à 1 ou 2 m de profondeur. Pour une efficacité optimale, la longueur du tuyau doit être d'au moins 25 m et son diamètre, d'environ 180 mm. Un capteur permet à l'air d'entrer dans le tuyau, d'être refroidi grâce à la température plus basse du sol et d'être ventilé dans le bâtiment. Ce système peut aussi être utilisé pour le chauffage hivernal. Le tuyau doit faciliter l'évacuation efficace de la condensation d'eau afin d'éviter les problèmes de moisissures qui affecteraient la qualité de l'air intérieur (Rose, 2009). Il est possible de remédier au problème de condensation en inclinant le tuyau et en installant un siphon qui récupère les condensats (figure 9) (Baldos, 2007). S'il est mis en place au moment de la construction du bâtiment, le puits provençal permet un rafraîchissement passif à un coût relativement faible.

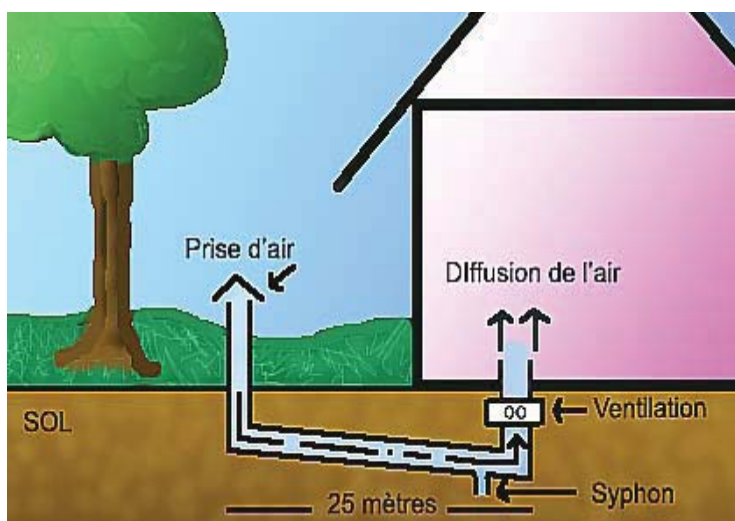


Figure 9 Coupe d'un puits provençal

Source : Adapté de Baldos, 2007.

4.4.3.4 Système de rafraîchissement par rayonnement

Le système de rafraîchissement par rayonnement est composé de conduites d'eau fraîche (19 °C) servant à répartir de la fraîcheur dans les murs d'un bâtiment. La circulation de l'eau dans ces conduites se fait au moyen d'une pompe. L'effet de climatisation vient du rayonnement de la chaleur du corps humain vers les parois des murs, du plancher ou du toit qui sont rafraîchis par le système de conduites d'eau. Pour maximiser la capacité de rafraîchissement, un système de ventilation sera utilisé conjointement avec le système de rafraîchissement. Il servira à contrôler le niveau d'humidité et de qualité de l'air intérieur.

Une fois installé, le système de rafraîchissement est relativement simple à exploiter. Il permet des économies d'énergie par rapport à la climatisation traditionnelle. Cependant, pour éviter qu'un taux élevé d'humidité nuise à son bon fonctionnement, il serait nécessaire d'utiliser un déshumidificateur d'air (Oliva et Courgey, 2006). Ce système est également possible pour les planchers. Pour éviter le risque de condensation, l'eau ne peut cependant être à trop basse température (Déoux, 2004).

4.4.4 Gains de fraîcheur liés à la climatisation passive

La climatisation solaire peut générer des niveaux de froid de 7 à 12 °C, tandis que le puits provençal, par l'air insufflé, rafraîchit de 5 à 8 °C par rapport à l'air ambiant et permet de réduire la température de l'air intérieur du bâtiment de 3 °C et plus (Déoux, 2004).

La vitesse de l'air créée par la ventilation permet d'améliorer le confort thermique des occupants d'un bâtiment. Plus la vitesse de l'air augmente, plus l'effet de refroidissement est élevé (tableau 8).

Tableau 8 Refroidissement en °C selon la vitesse de l'air (m/s)

Vitesse de l'air (m/s)	Refroidissement équivalent en °C
0,1	0
0,3	1
0,7	2
1,0	3
1,6	4
2,2	5
3,0	6
4,5	7
6,5	8

Source : Osborne, 1956.

5 PROJETS RÉALISÉS

Les mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains présentées à la section précédente ont été mises en œuvre dans différentes villes du monde. Les tableaux 9 à 12 présentent quelques exemples de ces mesures, regroupées par catégories, dont la presque totalité furent inaugurées entre 2000 et 2009.

Tableau 9 Exemples de mesures de végétalisation

Ville, pays	Projet	Bénéfices/Gains
Montréal, Canada	Jardin pilote sur le toit du bâtiment de la Télé-Université (TÉLUQ) – Projet du groupe Alternatives	Agriculture urbaine
Montréal, Canada	Végétalisation du quartier Milton Parc	Plantation de 70 arbres, 260 arbustes, 86 plantes grimpantes et plus de 200 plantes vivaces
Ottawa, Canada	Programme Arbres, ReBoisement et Revalorisation de l'Environnement (ARBRE)	Plantation prévue de 100 000 arbres entre 2007 et 2010
Kelowna, Canada	Plantation d'arbres de rues : aménagements cellulaires permettant un bon développement racinaire sous le pavé, favorisant la croissance optimale des arbres	Création de fraîcheur grâce aux grandes superficies d'ombrage et à l'évapotranspiration Durée prolongée de la vie des arbres de rues et des pavés Amélioration de la qualité de l'air Rétention des eaux pluviales
Toronto, Canada	<i>Green Roof Strategy</i>	Programme incitatif d'aménagement de toits végétalisés sous forme de projet pilote
Toronto, Canada	Loi sur les toits verts	Première grande ville du Canada à rendre les toits verts obligatoires sur les nouveaux édifices : - 50 à 75 nouveaux toits verts par an; - le toit de l'hôtel de ville sera transformé en jardin à l'automne 2009.
Chicago, États-Unis	Toits végétaux – La ville de Chicago compte approximativement 33 445 m ² de couverture végétale sur les toits, ce qui en fait le « leader » nord-américain.	Amélioration de la qualité de l'air Réduction de la demande en énergie pour la climatisation des bâtiments Réduction d'émissions de gaz à effet de serre Création de fraîcheur grâce à l'évapotranspiration Gestion des eaux pluviales
Tokyo, Japon	Tokyo Plan 2000 exige qu'au moins 20 % de la superficie des toits de taille moyenne (plus de 1 000 m ² de surface de plancher) soit recouverte de végétation.	Création de fraîcheur Rétention des eaux pluviales Amélioration de la qualité de l'air Diminution de la demande en climatisation
Portland (Oregon), États-Unis	Différents indices de végétalisation urbaine ont été fixés dans l' <i>Urban Forest Action Plan</i> de la ville de Portland.	- 35 à 40 % de végétalisation dans les zones résidentielles - 15 % de végétalisation dans les zones commerciales et industrielles - 30 % de végétalisation dans les parcs et places publiques
Lyon, France	Mur végétal dépolluant : gare Lyon-Perrache, surface de 400 m ²	Création de fraîcheur Amélioration de la qualité de l'air : réduction d'environ 80 % de la concentration atmosphérique des COV et réduction des oxydes d'azote et du dioxyde de soufre

Tableau 10 Exemples de mesures liées au design durable des infrastructures urbaines durables

Ville, pays	Projet	Bénéfices/Gains
Montréal, Canada	Toit réfléchissant : Collège de Rosemont - 3 125 mètres carrés de toit blancs - 22 % de la superficie totale équivalente à 14 150 mètres carrés	Réduction de la température de l'air extérieur et intérieur
Montréal, Canada	Projet Benny Farm : - réaménagement d'un complexe d'habitation privé pour personnes âgées - utilisation d'énergies renouvelables (géothermie; énergie solaire) et isolation supérieure du bâtiment	Réduction d'émissions de gaz à effet de serre liée à la climatisation Réduction de la demande en énergie et diminution de la chaleur anthropique
Californie, États-Unis	Le <i>California Building Energy Code</i> exigera dès juillet 2009 que les toitures aient un <i>albédo</i> minimal de 0,15 ou 0,20 selon différentes caractéristiques dont l'angle du toit	Réduction de la température de l'air extérieur et intérieur Diminution de la demande en énergie Réduction de l'émission de gaz à effet de serre

Tableau 11 Exemples de mesures de gestion durable des eaux pluviales

Ville, pays	Projet	Bénéfices/Gains
Lorraine, Canada	Fossés de rétention de 60 cm le long des rues de la ville	Réduction des taxes municipales Réduction des coûts liés à la gestion du réseau de drainage des eaux de ruissellement
Boucherville, Canada	Marais filtrant du parc Vincent-d'Indy	Filtre naturellement les eaux de ruissellement Loisirs : sentiers et patinoires en hiver
Montréal, Canada	Bassin de rétention sur le site de la TOHU – Cité des arts du cirque	Réduction de la demande en eau potable (L'eau est dissipée par évaporation ou percolation et utilisée pour les besoins en arrosage du site.) Création de fraîcheur provenant de l'évaporation et de l'évapotranspiration
Portland, États-Unis	Jardins pluviaux – Oregon Museum of Science and Industry	Site d'environ 73 000 m ² Réseau de dix jardins pluviaux Parcours semés de panneaux signalétiques pour sensibiliser les visiteurs
Kansas, États-Unis	Programme visant l'implantation de 10 000 jardins pluviaux afin de favoriser la gestion durable des eaux de pluie	Augmentation de la rétention des eaux pluviales à la source Végétalisation des jardins pluviaux et augmentation de la fraîcheur en raison de l'évaporation des sols humides et de l'évapotranspiration de la végétation Réduction de la demande en eau potable pour l'irrigation des jardins
Dearborn (Michigan), États-Unis	Toit vert, Usine Ford : plus grand toit vert du monde : 42 178 m ²	Capacité de rétention d'eau pluviale : 1 700 m ³ /an Durée de vie de la toiture : 50 ans Réduction de la demande en énergie du bâtiment : 25 %/an

Tableau 12 Exemples de mesures de réduction de la chaleur anthropique

Ville, pays	Projet	Bénéfices/Gains
Québec, Canada	Campagne <i>La rue pour tous!</i> de Vélo Québec	Convivialité maximisée lors des déplacements à pied, à vélo, en auto Adoption d'une attitude courtoise et respectueuse envers les autres usagers de la route, particulièrement les plus vulnérables Sécurité accrue des enfants près des écoles
Ottawa, Canada	O'Train : Train-tram léger sur rail – 8 000 déplacements par jour	Amélioration de la qualité de l'air par la diminution des émissions polluantes des véhicules Réduction de la chaleur anthropique
Sherbrooke, Canada	Programme <i>Moi j'embarque au centre-ville!</i>	Permettra aux 6 650 travailleurs du centre-ville de se rendre au travail en autobus gratuitement pendant une année
Province de Québec, Canada	Certification Novoclimat - Système de ventilation optimisé - Isolation supérieure	Amélioration de la performance énergétique des bâtiments (minimum 25 %)
Canada	EQuilibrium : maison saine pour un environnement sain - Six projets pilotes réalisés et ouverts aux visiteurs à l'année	Initiative nationale visant la promotion de projets de construction durables ultraéconergétiques et à faible impact sur l'environnement Ces habitations ont une consommation en énergie nulle : elles produisent autant d'énergie qu'elles en consomment.
Portland (Oregon), États-Unis	Fareless Square Transport public gratuit dans le centre-ville	Zone couvrant le secteur urbain situé entre la Willamette River et l'Interstate 405 et celui situé entre l'Union Station et la Portland State University. En 2001, la zone de gratuité fut étendue afin d'inclure le Lloyd District à l'est de la ville.
Copenhague, Danemark	La ville a un réseau de pistes cyclables très sécuritaire. Objectif 2012 : que 40 % des citoyens empruntent ce moyen de transport pour aller au travail	Environ 34 % des citoyens utilisent le vélo pour se rendre au travail. Le kilométrage fait par ces cyclistes représente un évitement d'émissions de 90 000 tonnes de CO ₂ /an, qui auraient été générées par des déplacements équivalents en voiture.
Londres, Angleterre	Péage urbain depuis 2003 pour accéder au centre-ville	Investissement des revenus nets dans l'amélioration du transport en commun Amélioration de l'environnement pour piétons et cyclistes Réduction de 20 % du trafic pendant les heures où le péage est en vigueur Réduction d'émissions de 100 000 tonnes de CO ₂ /an
Fribourg-en-Brisgau, Allemagne	Limite de vitesse à 30 km/h Deux tramways desservent la ville. Prix réduits pour le transport en commun Plus de 500 km de pistes cyclables	Réduction de la chaleur anthropique Meilleure qualité de l'air Réduction des émissions de CO ₂
Paris, Nice, Grenoble et Nantes, France	Vélos-taxis Véhicules à assistance électrique	Diminution de la production de chaleur anthropique due au transport Réduction de la pollution atmosphérique
Paris, France	Vélib' - Service de location de vélos - Plus de 20 000 vélos et 1 451 postes - Plus de 350 km de pistes cyclables	Réduction des émissions d'environ 30 000 tonnes de CO ₂ /an Réduction de la chaleur anthropique Amélioration de la qualité de l'air
France, Canada, Italie, États-Unis	Autobus électriques en service dans certaines villes du monde	Réduction de six à huit fois des émissions de GES Émissions directes nulles Réduction de la chaleur anthropique et de la pollution atmosphérique

Sources : Boucher, 2006; Ville d'Ottawa, 2008; Wilson et Barton, 2008; City of Toronto, 2009; City of Chicago, 2008; Portland Parks and Recreation, 2007; Grand Lyon Communauté urbaine, 2009; Communauté urbaine de Lyon, 2009; Boucher, 2007; USEPA, 2007; USEPA, 2008b; École Polytechnique de Montréal, 2005; Société immobilière du Canada, 2009; California Energy Commission, 2009.

6 SYNTHÈSE ET COMPARAISON DES MESURES DE LUTTE AUX ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS

6.1 EXEMPLES D'APPLICATION DES MESURES DE LUTTE AUX ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS

L'utilisation simultanée des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains génère de meilleurs gains de fraîcheur. Par exemple, l'usage de mesures complémentaires favorise la protection globale de l'enveloppe du bâtiment du *rayonnement solaire*, permettant ainsi un meilleur confort thermique dans le bâtiment.

Des exemples d'application pour les bâtiments et l'aménagement des villes sont présentés respectivement aux sections 6.1.1 et 6.1.2. Les figures 10 et 11 montrent l'ensemble des mesures possibles.

Dans l'objectif de limiter les surchauffes estivales, les exemples d'application tiennent compte des nécessités suivantes :

- préserver un microclimat frais autour du bâtiment et dans les milieux urbains;
- contrôler l'apport solaire,
- réduire la chaleur anthropique dans le bâtiment et dans les milieux urbains;
- assurer le confort thermique de l'occupant.

Ces exemples considèrent également quelques variables, dont le climat du milieu urbain, la possibilité de végétalisation et la densité du cadre bâti.

6.1.1 Bâtiments

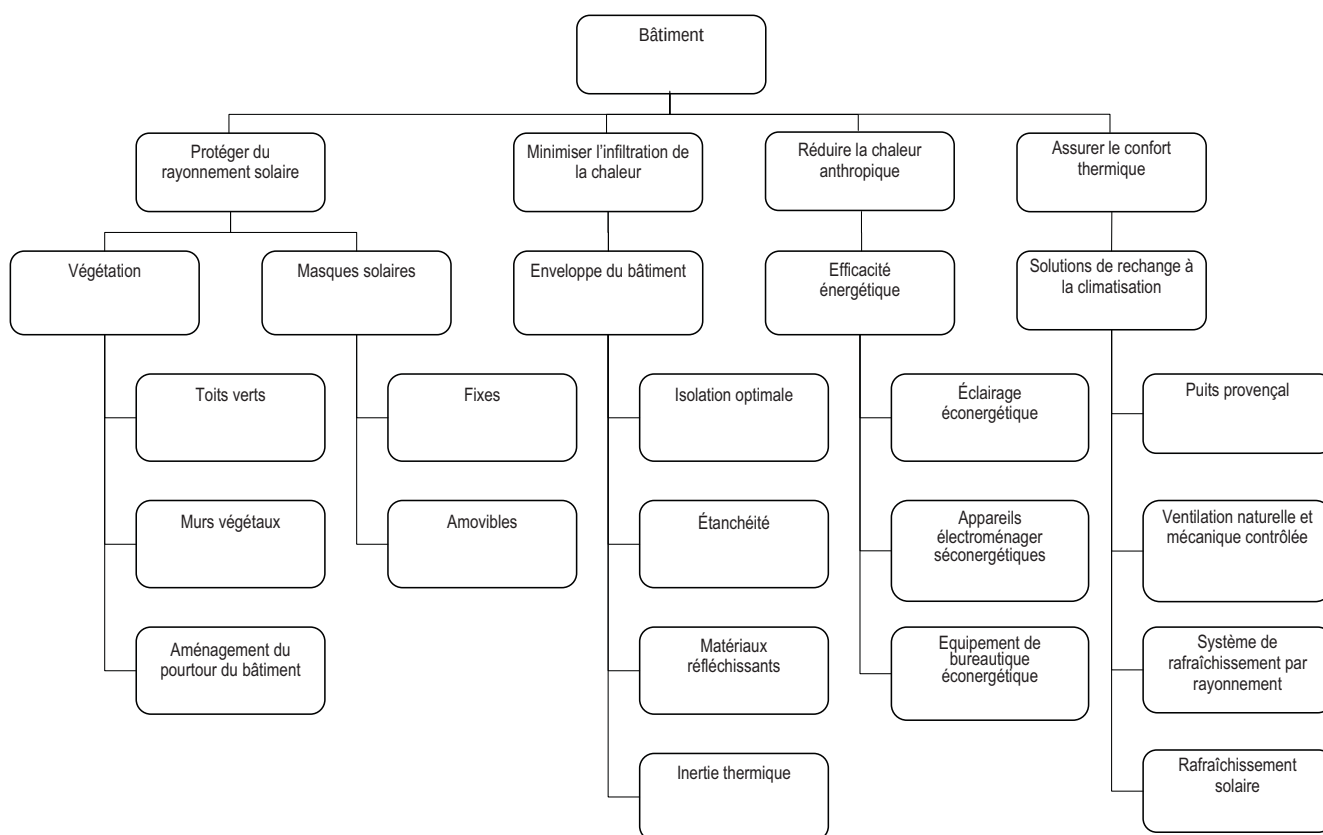
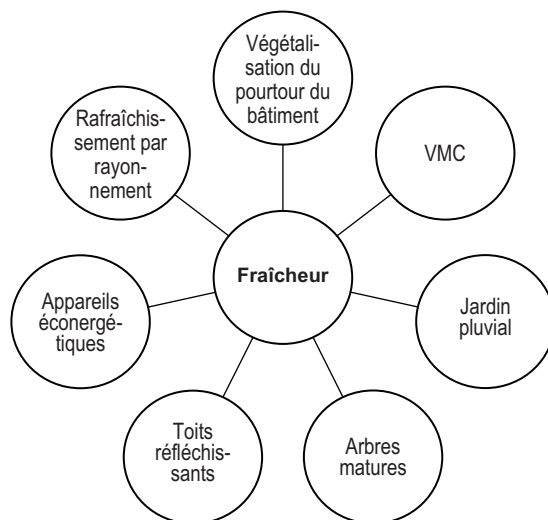


Figure 10 Organigramme des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains concernant les bâtiments

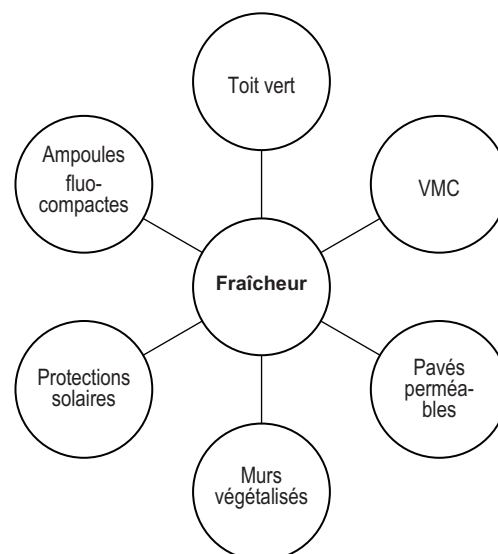
Exemple d'application 1 : Climat estival chaud et humide, îlot de chaleur nocturne et végétalisation autour du bâtiment possible

- **Microclimat frais autour du bâtiment**
Végétalisation du pourtour du bâtiment + jardin pluvial
- **Contrôle de l'apport solaire**
Arbres matures à feuillage caduc + toit réfléchissant
- **Réduction de la chaleur anthropique**
Appareils électroménagers éconergétiques
- **Confort thermique de l'occupant**
Ventilation mécanique contrôlée



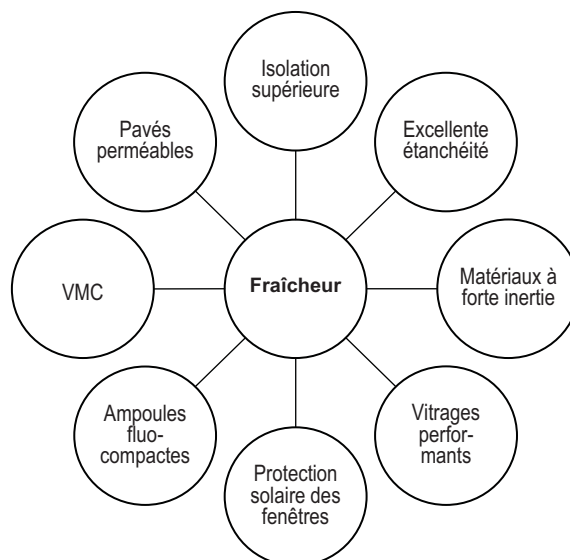
Exemple d'application 2 : Climat estival chaud et humide, îlot de chaleur nocturne et végétalisation du pourtour du bâtiment impossible

- **Microclimat frais autour du bâtiment**
Murs végétalisés + toit vert + pavés perméables
- **Contrôle de l'apport solaire**
Protections solaires pour vitrages et débord de toit
- **Réduction de la chaleur anthropique**
Ampoules fluocompactes
- **Confort thermique de l'occupant**
Ventilation mécanique contrôlée



Exemple d'application 3 : Climat estival chaud et humide, nuits fraîches (surventilation nocturne possible) et végétalisation du pourtour du bâtiment impossible

- **Contrôle de l'apport solaire :**
Protection solaire pour vitrages/débord de toit
- **Microclimat frais autour du bâtiment :**
Pavés perméables
- **Réduction de la chaleur anthropique :**
Ampoules fluocompactes
- **Confort thermique de l'occupant :**
Ventilation mécanique contrôlée + isolation supérieure + étanchéité + forte inertie des matériaux + vitrages performants



6.1.2 Aménagement urbain

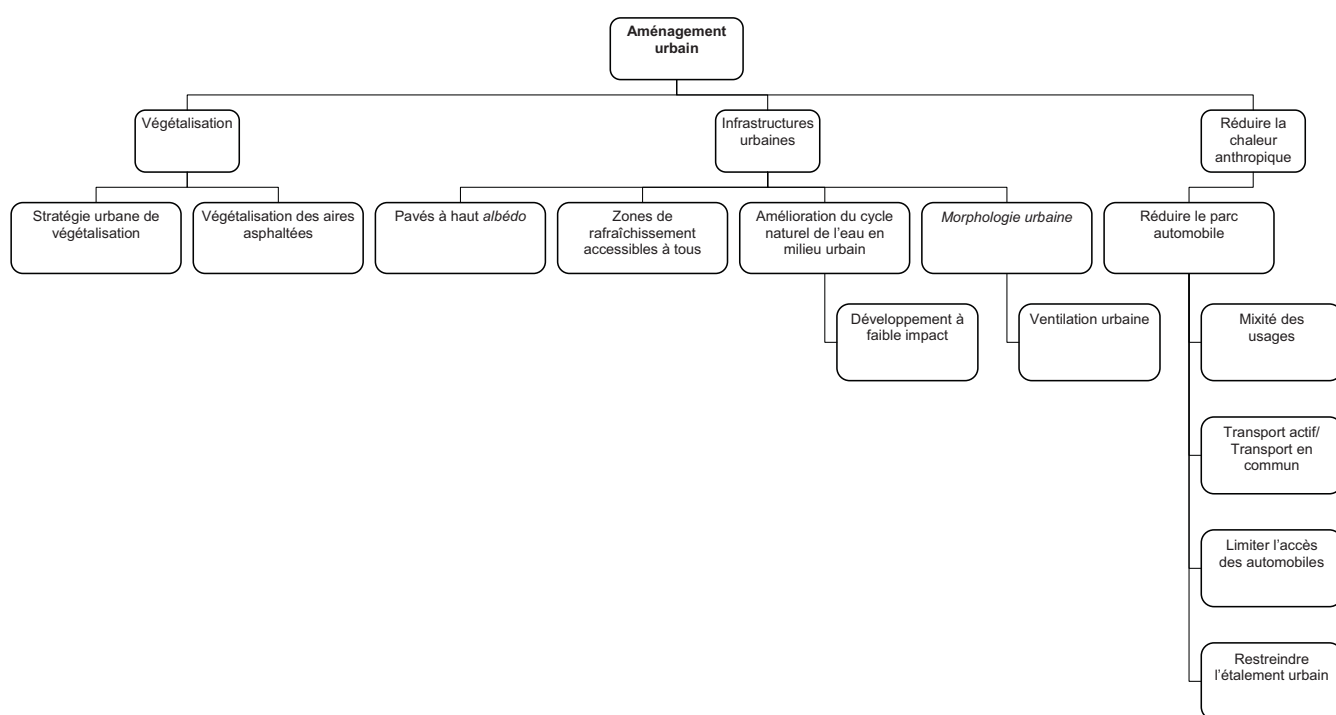
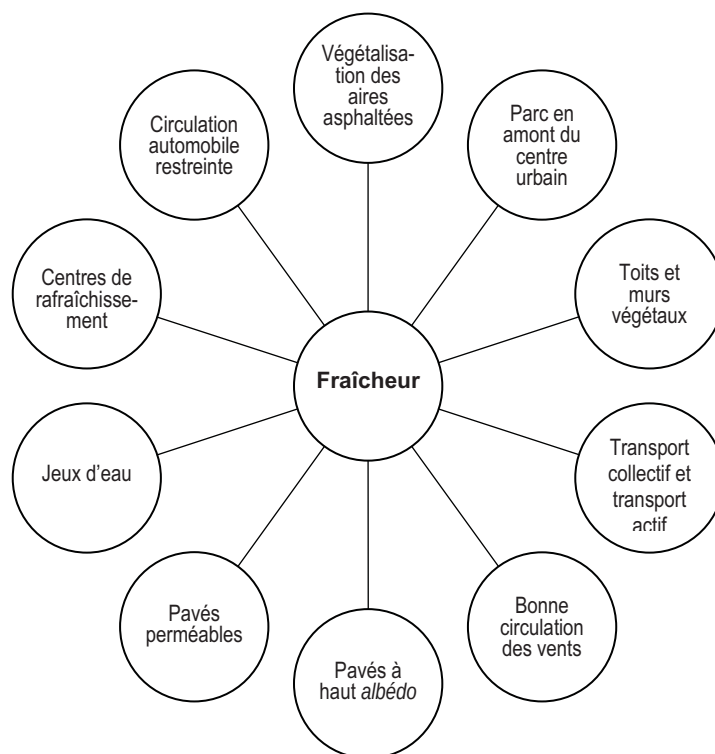


Figure 11 Organigramme des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains concernant l'aménagement urbain

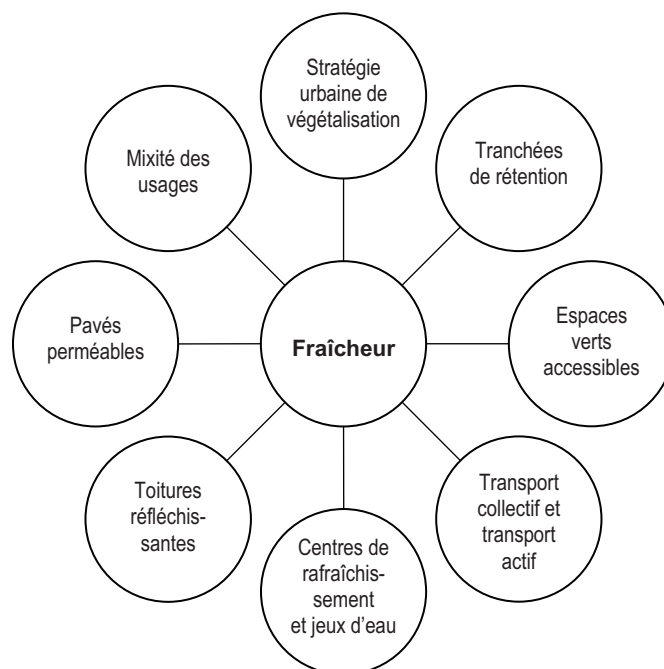
Exemple d'application 1 : Climat estival chaud et humide et centre urbain offrant peu d'espaces de végétalisation

- **Contrôle de l'apport solaire**
Toits verts, murs végétaux, végétalisation des aires asphaltées
- **Microclimat frais**
Pavés perméables et réfléchissants + *morphologie urbaine* permettant la circulation du vent + installations d'eau + parc en amont du centre urbain dans l'axe des vents dominants
- **Réduction de la chaleur anthropique**
Restriction de la circulation automobile, aménagement de corridors cyclistes et piétonniers, transport collectif
- **Confort thermique de l'occupant**
Jeux d'eau + centres de rafraîchissement



Exemple d'application 2 : Climat estival chaud et humide et centre urbain offrant des possibilités de végétalisation

- **Contrôle de l'apport solaire**
Stratégie urbaine de végétalisation
- **Microclimat frais**
Pavés perméables + tranchées de rétention
- **Réduction de la chaleur anthropique**
Restriction de la circulation automobile, aménagement de corridors cyclistes et piétonniers, transport collectif, mixité des usages
- **Confort thermique de l'occupant**
Espaces verts facilement accessibles + jeux d'eau + centres de rafraîchissement



6.2 COMPARAISON DES DIFFÉRENTES MESURES DE LUTTE AUX ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS

Le tableau 13 apporte d'autres spécifications concernant les mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. La comparaison des différentes mesures a été réalisée grâce aux informations recueillies dans la littérature et à la consultation d'experts et de consultants œuvrant dans les domaines concernés.

6.2.1 Critères de comparaison

Les critères de comparaison suivants ont été retenus :

- **Zones de réduction de la chaleur** : Indique si la mesure rafraîchit l'air intérieur des bâtiments, l'air extérieur des villes, ou si elle concerne principalement le confort thermique du citoyen.
- **Durabilité de la mesure** : Indique la durée de l'effet de rafraîchissement de la mesure lorsque maintenue : 10 ans ou moins, de 10 à 25 ans, ou plus de 25 ans.
- **Avantages complémentaires** : Indique si la mesure comporte d'autres avantages directs ou indirects pour la population urbaine. Une meilleure qualité de l'eau (Eau), une meilleure qualité de l'air (Air), une meilleure utilisation de l'espace pour les activités de plein air ou les activités sociales (Loisirs), un encouragement au développement de la biodiversité en milieu urbain (Biodiversité).
- **Accessibilité de la technologie ou du service** : Indique si la technologie ou le service est disponible au Québec.

Il est à noter que le coût n'a pas été retenu comme critère aux fins de la présente étude. Ce sujet sera traité dans une analyse coût-efficacité qui sera publiée ultérieurement.

Tableau 13 Comparaison des différentes mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains

Mesure	Zone de réduction de la chaleur	Durabilité de la mesure avec entretien	Avantage complémentaire	Accessibilité de la technologie et du service au Québec
VÉGÉTATION				
Stratégie de végétalisation urbaine	Ville	Plus de 25 ans	Air et eau Loisirs Biodiversité	Bonne
Plantation ponctuelle d'arbres	Bâtiment et ville	Plus de 25 ans	Air et eau Loisirs Biodiversité	Bonne
Végétalisation des stationnements	Ville	Plus de 25 ans	Air et eau	Bonne
Aménagement du pourtour des bâtiments	Bâtiment et ville	Plus de 25 ans	Air et eau Biodiversité	Bonne
Murs végétaux	Bâtiment et ville	Plus de 25 ans	Air et eau Biodiversité	Bonne
Toits verts	Bâtiment et ville	Plus de 25 ans	Air et eau Loisirs Biodiversité	Bonne
INFRASTRUCTURES URBAINES				
Matériaux réfléchissants pour bâtiments	Bâtiment et ville	De 10 à 25 ans	Air	Bonne
Toits blancs	Bâtiment et ville	De 10 ans à plus de 25 ans (variable selon le type de revêtement choisi)	Air	Bonne
Revêtements de couleur pour toit à haute réflectivité solaire	Bâtiment et ville	Plus de 25 ans	Air	Limitée
Isolation des bâtiments	Bâtiment	Plus de 25 ans	s. o.	Bonne
Inertie thermique	Bâtiment	Plus de 25 ans	s. o.	Bonne

s. o. : sans objet.

Tableau 13 Comparaison des différentes mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains (suite)

Mesure	Zone de réduction de la chaleur	Durabilité de la mesure avec entretien	Avantage complémentaire	Accessibilité de la technologie et du service au Québec
INFRASTRUCTURES URBAINES (SUITE)				
Vitrages performants	Bâtiment	Plus de 25 ans	s. o.	Bonne
Protection solaire pour vitrages	Bâtiment	Moins de 10 ans à plus de 25 ans (variable selon les protections choisies)	s. o.	Bonne
Pavés à hauts <i>albedos</i>	Ville	De 10 ans à plus de 25 ans	Air	Bonne
Peintures pour véhicules à haut <i>albedo</i>	Ville	Moins de 10 ans	Air	Limitée
Morphologie urbaine aérée	Ville	Plus de 25 ans	Air Loisirs	Bonne
Aménagement d'un parc en amont de la ville	Ville	Plus de 25 ans	Air et eau Biodiversité Loisirs	Bonne
Centres de rafraîchissement	Population	Plus de 25 ans	Loisirs	Bonne
Installations d'eau	Bâtiment et ville	Plus de 25 ans	Loisirs	Bonne
Aires aquatiques	Population	Plus de 25 ans	Loisirs	Bonne
GESTION DURABLE DES EAUX PLUVIALES				
Revêtements perméables	Bâtiment et ville	s. o.	Eau	Bonne
Jardin pluvial	Bâtiment et ville	Plus de 25 ans	Eau et biodiversité	Bonne
Bassin de rétention	Ville	Plus de 25 ans	Eau et loisirs	Bonne
Puits d'infiltration	Ville	Plus de 25 ans	Eau	Bonne
Tranchée d'infiltration	Ville	Plus de 25 ans	Eau	Bonne
Chaussée à structure réservoir	Ville	s. o.	Eau	s. o.
Arrosage des pavés avec de l'eau recyclée	Ville	Plus de 25 ans	s. o.	Bonne

s. o. : sans objet.

Tableau 13 Comparaison des différentes mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains (suite)

Mesure	Zone de réduction de la chaleur	Durabilité de la mesure avec entretien	Avantage complémentaire	Accessibilité de la technologie et du service au Québec
RÉDUCTION DE LA CHALEUR ANTHROPIQUE				
Utilisation de lampes fluocompactes	Bâtiment	Moins de 10 ans	s. o.	Bonne
Appareils de bureautique écoénergétiques	Bâtiment	Moins de 10 ans	s. o.	Bonne
Efficacité énergétique des électroménagers	Bâtiment	De 10 à 25 ans	s. o.	Bonne
Réduction du parc automobile dans les centres urbains	Ville	Plus de 25 ans	Air et eau Loisirs	Bonne
Ventilation naturelle	Bâtiment	Plus de 25 ans*	Air intérieur	Bonne
Ventilation mécanique contrôlée	Bâtiment	Plus de 25 ans	Air intérieur	Bonne
Puits provençal	Bâtiment	Plus de 25 ans	s. o.	Bonne
Climatisation solaire	Bâtiment	Plus de 25 ans	s. o.	Limitée
Système de refroidissement par rayonnement	Bâtiment	Plus de 25 ans	s. o.	Bonne

* Si les conditions le permettent.

s. o. : sans objet.

7 SUGGESTIONS

Il ressort de la recension des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains de nombreuses possibilités de création de fraîcheur en milieu urbain. En outre, notre exercice de synthèse et de comparaison a mis en évidence l'utilité d'une application simultanée de ces mesures. En effet, lorsque ces mesures sont utilisées de façon concomitante, leurs bénéfices se multiplient pour apporter de la fraîcheur tant dans un bâtiment que dans une ville, ce qui a pour effet de protéger les populations contre les impacts sur la santé des îlots de chaleur urbains.

Bien que cette revue n'ait pas la prétention de remplacer les recommandations des experts des domaines concernés par la lutte aux îlots de chaleur urbains, des suggestions pour la sous-région sud du Québec peuvent en être tirées, soit :

- Prioriser l'application de mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains dans les zones où habitent les populations vulnérables à la chaleur.
- Opter pour des mesures adaptées au climat du Québec, c'est-à-dire qui prennent en compte les climats saisonniers du territoire.
- Réduire la production de chaleur anthropique par l'utilisation de moyens de transport durable, d'énergies renouvelables et d'appareils à haute efficacité énergétique.
- Favoriser le cycle naturel de l'eau dans les milieux urbains par des aménagements permettant l'infiltration de l'eau à la source. Une meilleure disponibilité en eau dans les sols assurera un rafraîchissement des milieux urbains par le processus d'évaporation. L'humidification des sols favorisera également l'approvisionnement des végétaux ainsi que l'évapotranspiration, autre source de rafraîchissement.
- Adopter les principes de l'architecture bioclimatique qui guide l'adaptation du bâtiment aux réalités climatiques estivales du Québec, dont l'utilisation de protections solaires.
- Encourager les initiatives de verdissement à petite et à grande échelle ainsi que la protection des aires boisées. Déterminer les occasions de verdissement urbain, tenir un inventaire du patrimoine forestier urbain, veiller au bon aménagement des végétaux pour optimiser leur croissance et prolonger leur durée de vie.
- Favoriser la ventilation en période estivale dans les bâtiments et les villes, ce qui aura pour effet d'optimiser le confort thermique des occupants et des citoyens.
- Diminuer la dépendance à la climatisation. Utiliser des méthodes passives pour rafraîchir les bâtiments en minimisant la perte interne de fraîcheur, en réduisant la quantité de chaleur qui entre dans un bâtiment, en contrôlant la production de chaleur dans le bâtiment et en assurant une bonne ventilation.
- Aller au-delà des normes établies, car elles sont minimales. Elles peuvent donc être optimisées, notamment pour ce qui est de l'isolation de l'enveloppe des bâtiments et de la ventilation.

Ces mesures méritent donc d'être mises de l'avant dans des programmes de soutien au milieu municipal et aux réseaux de l'éducation et de la petite enfance afin de supporter la lutte aux îlots de chaleur urbains et l'adaptation préventive des programmes et infrastructures aux changements climatiques.

Une stratégie de lutte aux îlots de chaleur urbains doit être basée sur une approche intégrée et multidisciplinaire du développement urbain et nécessite la participation de différents acteurs provenant notamment de la communauté visée (citoyens) ainsi que de différents secteurs, par exemple la santé publique, l'urbanisme, l'architecture, les transports et les ressources naturelles. Enfin, le partage d'informations et de connaissances entre les villes quant à leurs réalisations et à l'évaluation de leurs expériences est également primordial pour assurer une adaptation optimale aux îlots de chaleur urbains.

RÉFÉRENCES

- Agence de l'efficacité énergétique du Québec (2007) Novo-Climat : Confort, Santé, Économies. Accessible au : <http://www.novoclimat.ca/>. Consulté le 26 juin 2009.
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (2009) Dans la cuisine, lavage et froid performants. Accessible au : http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/equipements_electriques/rub1.htm. Consulté le 1^{er} septembre 2008.
- Agence de la santé et des services sociaux de Chaudière-Appalaches (2009) Quand la chaleur devient dangereuse. Accessible au : <http://www.santeetenvironnement.ca/>. Consulté le 26 juin 2009.
- Akbari, H., Berdahl, P., Levinson, R., Miller, S.W.W., Desjarlais, A. (2006) *Cool color roofing materials*. California Energy Commission, Berkeley, CA., 73 p.
- Akbari, H., Konopacki, S. (2004) Energy effects of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada, *Energy*, Vol. 29, No. 2, pp. 191-210.
- Akbari, H., Kurn, D., Bretz, S., Hanford, J. (1997) Peak power and cooling energy savings of shade trees, *Energy and Buildings*, Vol. 25, pp. 139-148.
- Akbari, H., Miller, W. (2006) *Cool-color roofing material: pier final project report*. California Energy Commission, Berkeley, CA., 61 p.
- Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H. (2001) Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas, *Solar energy*, Vol. 70, pp. 95-310.
- Akbari, H., Taha, H. (1992) The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four canadian cities, *Energy*, Vol. 17, No. 2, pp. 141-149.
- Albanese, B., Matlack, G. (1999) Utilization of parking lots in Hattiesburg, Mississippi, Usa, and impact on local streams, *Environmental management*, Vol. 24, No. 2, pp. 265-271.
- Ali, M.M. (2008) Energy efficient architecture and building systems to address global warming, *Leadership and management in engineering*, Vol. 8, pp. 113-23.
- Angers, G. (2007). À la défense des plantes grimpantes. *Journal Le Soleil*, 24 avril 2009.
- Aniello, C., Morgan, K., Busbey, A., Newland, L. (1995) Mapping micro - urban heat islands using Landsat - TM and GIS, *Computers and Geosciences*, Vol. 21, No. 8, pp. 965-969.
- Arizona Solar Center (2009) Passive solar heating and cooling. Accessible au : <http://www.azsolarcenter.com/technology/pas-2.html>. Consulté le 26 juin 2009.
- Armstrong, M.M., Elmahdy, A.H., Swinton M.C., Parekh A. (2008) Sélection de vitrages de fenêtres de type résidentiel pour un rendement énergétique optimal, *Solution constructive*, No. 71, Décembre.
- Asaeda, A., Ca, V.T., Akio Wake, A. (1994) Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere, *Atmospheric environment*, Vol. 30, No. 33, pp. 413-427.
- Backtröm, M., Viklander, M. (2000) Integrated stormwater management in cold climates, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, Vol. 35, No. 8, pp. 1237-1249.

- Baldos, R. (2007) Le puits canadien : une climatisation écologique, *Les Quatre saisons du jardin bio*.
- Balling, R. C., Gober, Jr. P., Jones, N. (2008) Sensitivity of residential water consumption to variations in climate: an intraurban analysis of Phoenix, Arizona, *Water Resour. Res.*, Vol. 44, No. 10.
- Banting, D., Doshi, H., Li, J., Missios, P. (2005) *Report on the environmental benefits and costs of greenroofs for the City of Toronto*. City of Toronto, 88 p.
- Baskaran, B. (2009) Chercheur senior. Conseil national de recherches du Canada. Entretien téléphonique le 20 février 2009.
- Bass, B., Baskaran, B. (2003) *Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaption strategy for urban areas*. National Research Council Canada, Ottawa, 106 p.
- Besancenot, J. (2002) Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines, *Environnement, risques et santé*, Vol. 4, No. 1, pp. 229-240.
- Besancenot, J.-P. (2007) *Santé et changement climatique, la montée de l'inquiétude*. Delachaux Et Niestle, 240 p.
- Boarnet, M.G., Crane, R. (2001) *Travel by design: the influence of urban form on travel*. Oxford University Press. 238 p.
- Bolund, P., Hunhammar, S. (1999) Ecosystem services in urban areas, *Ecological Economics*, Vol. 29, pp. 293-301.
- Bonin-Guillaume, S., Gaudreau, D., Mari, L., Razafiarison, M., Donnarel, G. (2005) Évaluation d'un appareil de brumisation en poste fixe dans un lieu de vie d'un établissement pour personnes âgées dépendantes, *La revue de gériatrie*, Vol. 30, No. 9, pp. 641-650.
- Boucher, I. (2006) Les toits verts, *Urbanité*, septembre, pp. 16-18.
- Boucher, I. (2007) Une pratique d'urbanisme durable : la gestion écologique des eaux de pluie. Gouvernement du Québec. Accessible au : http://www.mamrot.gouv.qc.ca/publications/obse_muni/obse_eaux_pluie.pdf. Consulté le 5 février 2009.
- Boulfroy, E. (2009) Aménagement des ressources forestières. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (CERFO). Entretien téléphonique le 11 mai 2009.
- Bourque, A., Simonet, G. (2007) *Québec*, Chap. 5. Dans : *Vivre avec les changements climatiques au Canada*, Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J., Bush, E., Gouvernement du Canada, Ottawa, pp. 171-226.
- Brattebo, B., Booth, B.D. (2003) Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems, *Water research*, Vol. 37, No. 18, pp. 4369-4376.
- Brown, R.D., Gillespie, T.J. (1995) *Microclimate landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency*. John Wiley and Sons, Chichester, 192 p.
- Ca, V. T., Asaeda, T., Abu, E.M. (1998) Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park, *Energy and Buildings*, Vol. 29, pp. 83-92.

- California Energy Commission (2009) California's Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings. Title 24, Part 6, of the California Code of Regulations. Accessible au : <http://www.energy.ca.gov/title24/>. Consulté le 12 avril 2009.
- Canadian Association for Physicians for the Environment (CAPE) (1995) The greenhouse effect and global climate change. Accessible au : <http://www.cape.ca> Consulté le 26 juin 2009.
- Cappe, M. (2003) *Péage urbain : l'exemple de Londres en Angleterre*. Infrastructures Canada, Ottawa, 35 p.
- Carter, T., Keeler, A. (2008) Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems, *Journal of environmental management*, Vol. 87, No. 3, pp. 350-363.
- Cavayas, F., Baudouin, Y. (2008) Étude des biotopes urbains et périurbains de la CMM. Conseil régional de l'environnement de Laval (CRE Laval). Accessible au : <http://www.cmm.qc.ca/biotopes/>. Consulté le 14 novembre 2008.
- Centre d'écologie urbaine de Montréal (2008) Îlots de fraîcheur. Accessible au : <http://www.ecologieurbaine.net/projet/ilots-de-fraicheur>. Consulté le 26 juin 2009.
- Chan, C.F., Lebedeva, J., Otere, J., Richardson, G. (2007) *Urban heat island: a climate change adaptation strategy for Montreal*. Climate change action partnership, McGill University School of Urban Planning, Montréal, 78 p.
- Chiesura, A. (2004) The role of urban parks for the sustainable city, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 68, No. 1, pp. 129-138.
- City of Chicago (2008) Monitoring the rooftop garden's benefits. Accessible au : <http://egov.cityofchicago.org/city/webportal/>. Consulté le 30 octobre 2008.
- City of Toronto (2009). Making Policy. Accessible au : <http://www.toronto.ca/greenroofs/policy.htm>. Consulté le 23 avril 2009.
- Commission de santé et de la sécurité au travail du Québec (CSST) (2004) *Guide de prévention des coups de chaleur*. 19 p.
- Communauté urbaine de Lyon (2008) *Aménagement et eaux pluviales sur le territoire du grand Lyon : guide à l'usage des professionnels Lyon*. Grand Lyon, communauté urbaine, 51 p.
- Conseil national de recherches du Canada (CNRC) (2002) Le gouvernement du Canada annonce que la multiplication des toitures-jardins réduirait grandement les gaz à effet de serre et améliorerait la qualité de l'air, Communiqués de presse, 9 octobre 2002, Ottawa. Accessible au : <http://www.reno.nrc-cnrc.gc.ca/fra/actualites/cnrc/2002/10/09/toitures-jardins.html>. Consulté le 11 février 2009.
- Conseil régional de l'environnement de Montréal (2007) *Lutte aux îlots de chaleur urbains*. Le Conseil, Montréal, 54 p.
- Coutts A.M., Beringer J., Tapper N. (2008) Changing urban climate and CO2 emissions: implications for the development of policies for sustainable cities, *Urban Policy and Research*, In Press.

- Craul, P.J. (1994) Soil compaction on heavily used sites, *Journal of Arboriculture*, Vol. 20, No. 2, pp. 69-74.
- Cyr, J.-F., Marcoux, C., Deutsch, J.C., Lavallée, P. (1998) L'hydrologie urbaine : nouvelles problématiques, nouvelles approches de solutions, *Revue des sciences de l'eau*, No. spécial, pp. 51-60.
- DeNardo, J.C., Jarrett, A.R., Manbeck, H.B., Beattie, D.J., Berghage, R.D. (2005) Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs, *Trans. ASAE*, Vol. 48, pp. 1491-1496.
- Déoux, S., Déoux, P. (2004) *Guide de l'Habitat Sain*. Medieco Editions, 537 p.
- Dimoudi, A., Nikolopoulou, M. (2003) Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits, *Energy and Buildings*, Vol. 35, No. 1, pp. 69-76.
- Dixsaut, G. (2005) Vague de chaleur et climatisation : revue bibliographique, *Bise*, Vol. 16, No. 3, pp. 1-6.
- Donglian, S., Pinker, R.T. (2004) Case study of soil moisture effect on land surface temperature retrieval, *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, Vol. 1, No. 2, pp. 127-130.
- École polytechnique de Montréal (2005) L'École Polytechnique de Montréal inaugure les pavillons Lassonde, les premiers « bâtiments durables » érigés par une institution d'enseignement au Québec - Un investissement de 104,9 M\$. Accessible au : <http://www.polymtl.ca/carrefour/article.php?no=2077>. Consulté le 9 mars 2009.
- Endreny, T. (2008) Naturalizing urban watershed hydrology to mitigate urban heat-island effects, *Hydrological processes*, Vol. 22, No. 3, pp. 461-463.
- Energy film Insulation (2008). Accessible au : <http://www.energyfilminsulation.com/>. Consulté le 26 juin 2009.
- Energy star (2009) Reflective roof products for consumers. Accessible au : http://www.energystar.gov/index.cfm?c=roof_prods.pr_roof_products. Consulté le 26 juin 2009.
- English, P., Fitzsimmons, K., Hoshiko, S., Margolis, H., McKone, T.E., Rotkin-Ellman, M., Solomon, G., Trent, R., Ross, Z. (2007) *Public health impacts of climate change in California: community vulnerability assessments and adaptation strategies: report No. 1: heat-related illness and mortality, Information for the Public Health Network in California*. California Department of Public Health, Salt Lake City, 49 p.
- Environmental Prediction in Canadian Cities (EPiCC) (2008) Measurement: sites. Accessible au : <http://www.epicc.uwo.ca/measurement/>. Consulté le 26 juin 2009.
- Environnement Canada (2009) Archives nationales d'information et de données climatologiques. Accessible au : http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada_f.html?&. Consulté le 2 juin 2009.
- Evergreen (2008) Liste de plantes recommandées. Accessible au : <http://www.evergreen.ca/plantesindigenes/lists/index.php>. Consulté le 14 octobre 2008.

- Fanger, P.O. (1982) *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. R.E. Krieger Publishing company, Malabar, Florida, 244 p.
- Fischetti, M. (2008) Green roofs, living cover, *Scientific American*, Vol. 298, pp. 104-105.
- Fischler, R., Lewis, P. (2005) Aménagement urbain et transport actif : enjeux et perspectives. Université McGill, Université de Montréal, Montréal, 7 p. Accessible au : <http://www.inspq.qc.ca/aspx/docs/jasp/presentations/2005/JASP2005-TransportActif-Fischler-Lewis.pdf>. Consulté le 11 octobre 2008.
- Fouad, A.O. (2007) *Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics : étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec*. Mémoire de maîtrise en science de l'architecture, Université Laval, Québec, 151 p.
- Frazer, L. (2005) Paving paradise: the peril of impervious surface, *Environmental Health Perspectives*, Vol. 113, pp. 456-462.
- Fuamba, M. (2009) Professeur de l'école Polytechnique de Montréal. Entretien téléphonique le 19 mai 2009.
- Gagné, A., Dufour, S., Saulnier, M., St-Louis, M. (2008) *Le guide des options écologiques, une exclusivité de l'APCHQ : des options claires pour construire vert*. Association provinciale des constructeurs d'habitations du Québec (APCHQ), 47 p.
- Gauthier, J., Morais, J.A., Mallet, L. (2005) Impact des vagues de chaleur en gériatrie et risques associés aux médicaments, *Pharmactuel*, Vol. 38, No. 3, pp. 123-133.
- Gilbert, J.K., Clausen, J.C. (2006) Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut, *Water research*, Vol. 40, No. 4, pp. 826-832.
- Gill, S.E., Handley, J.F., Ennos, A.R., Pauleit, S. (2007) Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure, *Built Environment*, Vol. 33, pp. 115-133.
- Gill, S.E., Handley, J.F., Ennos, A.R., Pauleit, S., Theuray, N., Lindley, S.J. (2008) Characterising the urban environment of UK cities and towns: a template for landscape planning, *Landscape and urban planning*, Vol. 87, pp. 210-222.
- Godmaire, H., Demers, A. (2009) *Eaux usées et fleuve Saint-Laurent : problèmes et solutions*. Union St-Laurent Grands Lacs, Eau secours, Montréal, 21 p.
- Golden, J.S., Kaloush, K. (2006) Meso-scale and micro-scale evaluations of surface pavement impacts to the urban heat island effects, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 37-52.
- Gouvernement du Québec (2009) Portail du gouvernement du Québec. Accessible au : www.gouv.qc.ca/. Consulté le 10 janvier 2009.
- Grand Lyon Communauté urbaine (2009) *Un mur végétal dépolluant*. Accessible au : <http://www.grandlyon.com/Un-mur-vegetal-depolluant.3190.0.html>. Consulté le 13 février 2009.
- Grand Toulouse Communauté urbaine (2008) Guide de gestion des eaux de pluie et de ruissellement. Accessible au : <http://www.grandtoulouse.org/index.php?pagecode=376>. Consulté le 12 novembre 2008.

- Greater London Authority (2008) *London climate change adaptation strategy : draft report*. London, 113 p.
- Gregory, J.H., Dukes, M.D., Jones, P.H., Miller, G.L. (2006) Effect of urban soil compaction on infiltration rate, *Journal of soil and water conservation*, Vol. 61, No. 3, pp. 117-123.
- Health Scotland, greenspace scotland, Scottish Natural Heritage and Institute of Occupational Medicine (2008) *Health impact assessment of greenspace: a guide*. Greenspace Scotland, Stirling, 74 p.
- Heisler, G.M., Grimmond, S., Grant, R.H., Souch, C. (1994) Investigation of the influence of Chicago's urban forests on and air temperature within residential neighborhoods, *Northeaster Forest Experiment*, Vol. 186, pp. 19-40.
- Herzog, B. (2007) *Le puits canadien*. Eyrolles Environnement. 116 p.
- Hollmuller, P., Lachal, B., Zraggen, J.-M. (2005) Rafraîchissement de bâtiments par déphasage thermique contrôlé, *CISBAT'05, Lausanne*, septembre, pp. 317-322.
- Honjo, T., Takakura, T. (1990) Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas, *Energy and Buildings*, Vol. 15, pp. 443-446.
- Horrobin, B. (2008) *Optimizing the safe application of shade using crime prevention through environmental design (C.P.T.E.D.)*. Conférence présenté dans le cadre du Forum 'Where's the Shade' à London le 29 septembre 2008, Windsor Police Service, London, 21 p.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (2001) *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 881 p.
- Ihara, T. (2006) Energy conservation and urban heat island mitigation effects by solar reflective coating to an automobile. International workshop on countermeasures to urban heat islands (Tokyo, Japan) August 3rd, 2006, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 35 p. Accessible au : http://www.iea.org/Textbase/work/2006/heat/5-f_ihara.pdf. Consulté le 12 février 2009.
- Institut de la statistique du Québec (2004) Si la tendance se maintient : Perspectives démographiques, Québec et régions 2001-2015. Accessible au : http://www.stat.gouv.qc.ca/publications/demograp/pdf/tendance2001_2051.pdf. Consulté le 19 décembre 2008.
- Institut de la statistique du Québec (2005) Proportion de ménages qui disposent de certaines composantes de l'équipement ménager et d'une maison de campagne, Québec, Ontario et Canada, 1972-2005. Accessible au : http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/societe/famls_mengs_niv_vie/patrm_equip/4equip_pourcent.htm. Consulté le 16 juin 2009.
- Jacques, L., Kosatsky, T. (2005) Commentaires faisant suite à la parution de l'article : Dixsaut, G. (2005) Vague de chaleur et climatisation : revue bibliographique, *Bise*, Vol. 16, No. 3, pp. 1-6.
- James, W. (2002) Green roads: research into permeable pavers, *Stormwater*, March/April, pp. 48-50.

- Johnston, J., Newton, J. (2004) *Building green: a guide to using plants on roofs, walls and pavements*. Ecology Unit, London, 95 p.
- Jour de la Terre Québec (2008) Fiche technique du mur végétal de l'espace fraîcheur. 2 p. Accessible au : http://www.jourdelaterre.org/DATA/ARTICLE/208_132.pdf. Consulté le 13 décembre 2008.
- Kingsbury, N., Dunnett, N. (2008) *Planting green roofs and living walls*. 2nd Ed., Timber Press, 336 p.
- Konopacki, S., Gartland, L., Akbari, H., Rainer, I. (1998) *Demonstration of energy savings of cool roofs*. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, LBNL-40673.
- Lachal, B., Soutter, C., Weber, W. (2004) Il est possible de garantir le confort d'été sans recourir à la climatisation, *La revue durable*, No. 9, février-mars.
- Lachance, G., Baudouin, Y., Guay, F. (2006) Étude des îlots de chaleur montréalais dans une perspective de santé publique, *Bulletin d'information en santé environnementale (BISE)*, Vol. 17, No. 3, pp. 1-5.
- Lakshmi, V., Zehrhuhs, D., Jackson, T. (2000) Observations of land surface temperature and its relationship to soil moisture during SGP99, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. IEEE 2000 International*, Vol. 3, pp. 1256-1258.
- Lalonde, G. (2009) Directeur technique, Association des Maîtres Couvreur du Québec (AMCQ). Entretien téléphonique le 13 mai 2009.
- Laplace, X. (2009) Spécialiste des toitures végétales. Entretien téléphonique le 9 avril 2009.
- Lawlor, G., Société canadienne d'hypothèques et de logement (2006) *Toits verts : manuel de ressources destiné aux décideurs municipaux*. Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL), Ottawa, 146 p.
- Lawrence Berkeley National Laboratory (2000) High temperatures. Accessible au : <http://heatisland.lbl.gov/HighTemps/>. Consulté le 26 juin 2009.
- Lessard, G., Boulfroy, E. (2008) *Les rôles de l'arbre en ville*. Centre collégial de transfert de technologie en foresterie de Sainte-Foy (CERFO), Québec, 21 p.
- Levinson, R., Berdahl, P., Akbari, H. (2005) *Solar spectral properties of pigments, or how to design a cool nonwhite coating*. Presented at Cool Roofing, Cutting Through the Glare, Atlanta, GA, May 12.
- Levy, A.W. (1978) *CBD-192-F. Éclairage intérieur et économie de l'énergie*. Conseil national de recherche du Canada. Accessible au : http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd192_f.html. Consulté le 12 novembre 2008.
- Liébard, A., DeHerde, A. (2005) *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Le Moniteur, Paris, 776 p.
- Liu, K.K.Y. (2002) *Energy efficiency and environmental benefits of rooftop gardens*. National Research Council Canada, Ottawa, 12 p.
- Liu, K., Bass, B. (2005) *Performance of green roof systems*. National Research Council Canada, Ottawa, 18 p.

- Luber, G., McGeehin, M. (2008) Climate change and extreme heat events, *American Journal of Preventive Medicine*, Vol. 35, pp. 429-435.
- Luxmore, D., Jayasinghe, M.T.R., Mahendran, M. (2005) Mitigating temperature increases in high lot density sub-tropical residential developments, *Energy and Buildings*, Vol. 37, pp. 1212-1224.
- Mailhot, A., Duchesne, S. (2005) Impacts et enjeux liés aux changements climatiques en matière de gestion des eaux en milieu urbain, *VertigO*, Hors-série no. 1, pp. 1-9.
- Maillard, P.-L. (2009) Association canadienne du ciment. Entretien téléphonique le 10 mars 2009.
- Manning, M.M., Elmanhy, A.H., Swinton, M.C., Pareck, A. (2008) Choix d'un vitrage à faible émissivité pour une performance énergétique optimale, *Home Builder*, Vol. 21, No. 2, pp. 1-4.
- McEvoy, D., Lindley, S., Handley, J. (2006) Adaptation and mitigation in urban areas: synergies and conflicts, *Municipal Engineer*, Vol. 159, pp. 185-191.
- McPherson, G., Simpson, J.R., Peper, P.J., Mco, S.E., Siao, Q. (2005) Municipal forest benefits and costs in Five US Cities, *Journal of Forestry*, Vol. 103, No. 8, pp. 411-416.
- McPherson, E.G. (1994) *Cooling urban heat islands with sustainable landscapes*. In: The ecological city: preserving and restoring urban biodiversity, Rowntree, R.A., Platt, R.H., Muick, P.C., The University of Massachusetts Press, Amherst, pp. 151-171.
- McPherson, E. G., Muchnick, J. (2005) Effect of street tree shade on asphalt concrete pavement performance, *Journal of arboriculture*, Vol. 31, No. 6, pp. 303-310.
- McPherson, G.E., James, R., Simpson, J.R., Scott, K.I. (2001) Actualizing microclimate and air quality benefits with parking lot shade ordinances, *Wetter und Leben*, Vol. 4, pp. 98.
- Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. (2006) Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, Vol. 77, No. 3, pp. 217-226.
- Miller, R. (2009) Spécialiste horticole. Conférence sur les toitures végétales lors du Salon toits verts et jardins de ville. Entretien téléphonique le 9 avril 2009.
- Milwaukee Metropolitan Sewerage District (MMSD) (2007) *Summary of nonpoint source technology analysis*, Chap. 4. In: State of the art report, pp. 4.1-4.90.
- Ministère des Affaires municipales et du Logement de l'Ontario (2004) *Étude de cas 8 : infrastructure de toits verts, ville de Toronto*. Dans : Édifier des collectivités fortes : étude d'initiatives ontariennes d'assainissement de l'air. Accessible au : [http://www.mah.gov.on.ca/Page3498.aspx#Cas %208](http://www.mah.gov.on.ca/Page3498.aspx#Cas%208). Consulté le 10 octobre 2008.
- Ministère du développement durable et des parcs (MDDEP) (2006) Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2003 et évolution depuis 1990. Accessible au : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/ges/2003/index.htm>. Consulté le 11 octobre 2008.
- Monterusso, M.A., Rowe, D.B., Rugh, C.L. (2005) Establishment and persistence of sedum spp. and native taxa for green roof applications, *HortScience*, Vol. 40, pp. 391-396.

- Moran, A., Hunt, B., Smith, J. (2007) *Hydrologic and water quality performance from greenroofs in Goldsboro and Raleigh*. North Carolina. Green Roof for Healthy Cities, Washington, pp. 1-11.
- Niachou, A. (2001) Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance, *Energy and Buildings*, Vol. 33, pp. 719-729.
- Nikolopoulou, M. (2004) *Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain : une approche bioclimatique*. Center for Renewable Energy Sources, 64 p.
- Novitski, B. (2008) Verdant surfaces. Continuing Education Center. Accessible au : <http://continuingeducation.construction.com/article.php?L=5&C=440>. Consulté le 26 juin 2009.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R.R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K.K.Y., Rowe, B. (2007) Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions and services, *BioScience*, Vol. 57, No. 10, pp. 823-833.
- Oke, T.R. (1982) The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 108, pp. 1-24.
- Oke, T.R. (1987) *Boundary layer climates*. 2nd ed., Routledge, London, 474 p.
- Oke, T.R. (1988) Street design and urban canopy layer climate, *Energy and Buildings*, Vol. 11, pp. 103-113.
- Oliva, J.P., Courgey, S. (2006) *La conception bioclimatique : des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation*. Terre vivante, 240 p.
- Organisation mondiale de la santé (OMS) (2007) Climat et santé. Accessible au : <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs266/fr/index.html>. Consulté le 3 novembre 2008.
- Osborne, W.C., Turner, C.G. (1956) *Woods: guide pratique de ventilation*. Dunod, 238 p.
- Pachauri, R.K., Reisinger, A. (2007) *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. GIEC, Genève, 103 p.
- Parisi, A.V., Kimlin, M.G., Wong, J.C.F., Wilson, M. (2000) Personal exposure distribution of solar erythemal ultraviolet radiation in tree shade over summer, *Phys. Med. Biol.*, Vol. 45, pp. 349-356.
- Paroli, R.M., Gallagher, J. (2008) Les toits verts, les toits blancs et les toits haute performance : distinguer les faits de la fiction, *Canadian Property Management : B.C./Alberta Edition*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-4.
- Perez Arrau, C. (2007) Cinq exemples de terrains de jeux synthétiques et de températures associées par une image thermique Landsat 5. UQÀM, Montréal, 23 p. Accessible au : http://www.urbanheatlands.com/Synthetic_turf_Montreal.pdf. Consulté le 13 décembre 2008.
- Pigeon, G., Lemonsu, A., Masson, V., Hidalgo, J. (2008) De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville, *La Météorologie*, No. 52, pp. 39-47.

- Pinho, A., Pedro, J.B., Coelho, A.B. (2003) *The influence of the built environment in microclimatic variations*. The 20th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Santiago, CHILE, 9-12 November, 6 p.
- Plante, C. (2009) Transport en commun gratuit proposé aux travailleurs du centre-ville. *La Tribune*, 5 mai 2009.
- Pomerantz, M. (1999) Benefits of cooler pavements. Heat Island Group. Accessible au : <http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/Pavements/Overview/>. Consulté le 17 novembre 2008.
- Portland Parks & Recreation, Healthy Parks, Healthy Portland (2007) *Urban forest action plan*. 20 p.
- Portail Québec (2009) Les zones climatiques. Accessible au : <http://www.gouv.qc.ca/portail/quebec/pgs/commun/portrait/geographie/climat/zonesclimatiques/?lang=fr>. Consulté le 26 juin 2009.
- PortlandOnline (2004) 2004 stormwater management manual. Bureau of Environmental Services, City of Portland, Oregon. Accessible au : <http://www.portlandonline.com/BES/index.cfm?c=35122&>. Consulté le 17 novembre 2008.
- Potvin, A. (2008) *Étude portant sur le potentiel d'utilisation du chauffage solaire passif et le contrôle de la surchauffe estivale*. Groupe conseil Technosim inc., Rattachement : École d'architecture, Université Laval, Québec.
- Quénol, H., Bridier, S., Vergne, O., Dubreuil, V. (2007) Apport de la géomatique pour la caractérisation de l'Illet de Chaleur Urbain à Rennes (France). Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 avril, INPE, pp. 5467-5469.
- Raymond, E.L., Bouchard, A., Gagnon, V. (2006) *La gestion du risque de chaleur accablante ou extrême dans l'agglomération de Montréal*. Centre de sécurité civile, Ville de Montréal, 18 p.
- Réseau National de Surveillance. Aérobiologique (R.N.S.A.) (2009) *Guide d'information de la végétation en ville*. Le réseau, St-Genis l'Argentière, France, 68 p.
- Ressources naturelles Canada (2004) Un temps de changement : les changements climatiques au Québec, un climat en constante transformation. Accessible au : http://adaptation.nrcan.gc.ca/posters/qc/qc_02_f.php. Consulté le 13 novembre 2008.
- Ressources naturelles Canada (2009) Guide d'achat ENERGY STAR. Accessible au : <http://oee.nrcan.gc.ca/publications/equipement/m27-01-2227f.cfm?attr=12>. Consulté le 1^{er} avril 2009.
- Rhônealénergie Environnement (2009) Les techniques du froid solaire. Accessible au : <http://www.raee.org/climatisationsolaire/fr/techniques.php>. Consulté le 1^{er} avril 2009.
- Rose, O. (2009) Président du Centre d'Écologie Urbaine de Montréal. Entretien téléphonique le 14 mai 2009.
- Rosenfeld, A.H., Romm, J.J., Akbari, H., Pomerantz, M. (1998) Cool communities: strategies for heat islands mitigation and smog reduction, *Energy and Buildings*, Vol. 28, pp. 51-62.

- Rosenzweig, C., Solecki, W.D., Parshall, L., Chopping, M., Pope, G., Goldberg, R. (2005) Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey, *Environmental Hazards*, Vol. 6, pp. 51-62.
- Rowntree, R.A., Nowak, D.J. (1991) Quantifying the role of urban forests in removing atmospheric carbon dioxide, *J. Arboric.*, Vol. 17, pp. 269-275.
- Rushton, B. T. (2001) Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads, *J. Water Resour. Plng. and Mgmt*, Vol. 127, No. 3, pp. 172-179.
- Ryerson University (2005) *Report on the environmental benefits and costs of greenroofs for the City of Toronto*. City of Toronto, 88 p.
- Salomon, T., Aubert, C. (2004) *La fraîcheur sans clim*. Terre Vivante, Paris, 160 p.
- Sandifer, S., Givoni, B. (2002) *Thermal effects of vines on wall temperatures, comparing laboratory and field collected data*. Proceedings of the annual conference of the American Solar Energy Society, Reno, NV., June 15-20, 6 p.
- Santamouris, M. (2001) *Energy and climate in the urban built Environment*. Earthscan Publishers, 412 p.
- Santé Canada (2006) *Prévention du cancer de la peau*. Santé Canada, Ottawa, 2 p.
- Shashua-Bar, L., Hoffman, M. E. (2000) Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees, *Energy and Buildings*, Vol. 31, No. 3, pp. 221-235.
- Smargiassi, A., Kestens, Y., Fournier, M., Mololey, M., Kosatsky, T. (2009) *Modelling of time-related variations of surface temperatures for the detection and monitoring of urban heat islands*. Projet de recherche financé par le Fonds vert dans le cadre de l'Action 21 du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.
- Smeesters, E. (2008) Un jardin pluvial pour retenir et filtrer l'eau de pluie, *La Maison du 21^e siècle*, automne, pp. 74.
- Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) (2005) Un jardin pluvial pour mieux gérer les eaux de ruissellement dans votre cour. Accessible au : http://www.cmhc-schl.gc.ca/fr/co/enlo/ampa/ampa_005.cfm. Consulté le 17 novembre 2008.
- Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) (2009) Rattrapage des fenêtres haute performance. Accessible au : http://www.cmhc-schl.gc.ca/fr/prin/coco/toenha/coeceaen/coeceaen_038.cfm. Consulté le 26 juin 2009.
- Société immobilière du Canada (2009) Bienvenue à Benny Farm. Accessible au : <http://www.bennyfarm.org/fr/home.php>. Consulté le 17 mars 2009.
- Solecki, W.D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J., Wiencke, M. (2005) Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey, *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, Vol. 6, No. 1, pp. 39-49.
- Statistique Canada (2002) Enquête sur la consommation d'énergie par les bâtiments commerciaux et institutionnels. Accessible au : http://www.statcan.gc.ca/cgi-bin/imdb/p2SV_f.pl?Function=getSurvey&SDDS=2943&lang=fr&db=imdb&adm=8&dis=2. Consulté le 14 décembre 2008.

- Sundseth, K., Raeymaekers, G. (2006) *Biodiversity and natura 2000 in urban areas, nature in cities across Europe: a review of key issues and experiences*. IBGE/BIM, Bruxelles, 70 p.
- Synnefa, A., Santamouris, M., Apostolakis, K. (2007) On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment, *Solar Energy*, Vol. 81, No. 4, pp. 488-497.
- Taha, H. (1995) Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the south coast air basin, *Atmospheric Environment*, Vol. 31, No. 11, pp. 1667-1676.
- Taha, H. (1997) Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat, *Energy and Buildings*, Vol. 39, No. 11, pp. 1167-1174.
- Taha, H., Konopacki, S., Gabersek, S. (1996) *Modeling the meteorological and energy effects of urban heat islands and their mitigation: a 10 region study, report LBNL-44222*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA., 51 p.
- Thibault, N., Létourneau, E., Girard, C., (2004) *Si la tendance se maintient : perspectives démographiques, Québec et régions 2001-2015*. Institut de la statistique du Québec, 38 p.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (1997) *Conservation design for stormwater management: a design approach to reduce stormwater impacts from land development and achieve multiple objectives related to land use*. Sediment and Stormwater Program, 228 p.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2001) *Our built and natural environments: a technical review of the interactions between land use, transportation, and environmental quality*. EPA, 93 p.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2006) *Excessive heat events guidebook*. USEPA, Washington, DC, 52 p.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2007) *Reducing stormwater costs through low impact development (LID) strategies and practices*. USEPA, Washington, DC, 37 p.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2008a) Ground-level ozone: health and environment. USEPA. Accessible au : <http://www.epa.gov/air/ozonepollution/health.html>. Consulté le 26 juin 2009.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2008b) *Reducing urban heat islands: compendium of strategies, urban heat island basics*. USEPA, Washington, DC, 19 p.
- Urban, J. (2008) *Growing the urban forest*. In : City of Toronto, Tree Symposium: healthy trees for a beautiful city, 20 p.
- Urbatod.com (2009) Transit oriented development. Accessible au : <http://www.urbatod.org/p1.htm>
- Vergriete, Y., Labrecque, M. (2007) *Rôle des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain: revue de littérature et tentative d'extrapolation au contexte montréalais*. Conseil régional de l'environnement de Montréal, Montréal, 35 p.

- Ville d'Ottawa (2008) Programme ARBRE. Accessible au : http://www.ottawa.ca/residents/healthy_lawns/forestry/tree_program/index_fr.html. Consulté le 25 octobre 2008.
- Ville de Montréal (2005) *Politique de l'arbre de Montréal*. La Ville, Montréal, 30 p.
- Vivre en ville (2004) *Vers des collectivités viables*. Éditions Vivre en ville, Québec, 637 p.
- Voogt, J.A. (2002) Urban heat island, *Encyclopedia of global environmental change*, Vol. 3, pp. 660-666.
- Voogt, J.A. (2009) *How researchers measure urban heat islands*. University of Western Ontario, London, ON, 34 p.
- Wang, G., Macera, C.A., Scudder-Soucie, B., Schmid, T., Pratt, M., Buchner, D., Heath, G. (2004) Cost analysis of the built environment: the case of bike and pedestrian trails in Lincoln Neb, *Am J Public Health*, Vol. 94, No. 4, pp. 549-553.
- Watkins, R., Palmer, J., Kolokotroni, M. (2007) Increased temperature and intensification of the urban heat island: implications for human comfort and urban design, *Built Environment*, Vol. 33, pp. 85-96.
- Wendel, A.M., Dannenberg, A.L., Frumkin, H. (2008) Designing and building healthy places for children, *International Journal of Environment and Health*, Vol. 2, No. 3/4, pp. 338-355.
- Wilson, I., Barton, T. (2008) First Commercial Installation of Silva Cells in Kelowna, BC. City of Kelowna. Accessible au : http://www.deepproot.com/pdfs/PNW_Trees_article.pdf. Consulté le 12 février 2009.
- Winkelman, T.J. (2005) Whitetopping performance in Illinois, *Physical Research Report*, No. 148.
- Xiao, Q.F., McPherson, E.G., Simpson, J.R., Ustin, S.L. (1998) Rainfall interception by Sacramento's urban forest, *Journal of Arboriculture*, Vol. 24, No. 4, pp. 235-244.
- Yamada, K., Funaki, T., Honda, S., Sugihara, M. (2001) Study of diffuse source pollution management for land use and drainage system planning, *Water Sci Technol.*, Vol. 44, No. 7, pp. 203-208.
- Yamagata, H., Nasu, M., Yoshizawa, M., Miyamoto, A., Minamiyama, M. (2008) Heat island mitigation using water retentive pavement sprinkled with reclaimed wastewater, *Water science & technology*, Vol. 57, No. 5, pp. 763-771.
- Younger, M., Morrow-Almeida, H.R., Vindigni, S.M., Dannenberg, A.L. (2008) Built environment, climate change, and health: opportunities for co-benefits, *American Journal of Preventive Medicine*, Vol. 35, pp. 517-526.

ANNEXE 1

Mots-clés utilisés pour la recherche sur bases de données Medline, Embase, RUDI, Avery Index to Architectural Periodicals, Human Population & Natural Resource Management, Environmental Engineering Abstracts, Google Scholar, Google.

Français

Air
Albédo
Allergies
Aménagement urbain
Arbres
Architecture
Architecture bioclimatique
Asphalte
Bâtiments, bâtiment durable
Béton
Canyons urbains
Capacité thermique
Chaleur
Climat chaud
Climatisation, climatisation solaire
Climat urbain, microclimat(s) urbain(s)
Confort thermique
COV
Design urbain, urbanisme, aménagement du territoire
Efficacité énergétique
Environnement urbain
Espaces végétalisés
Étalement urbain
Foresterie urbaine
Îlot(s) de chaleur urbain(s)
Impacts
Gestion des eaux pluviales
Géométrie urbaine
Mesures de lutte aux îlots de chaleur
Microclimat(s) urbain(s)
Morphologie urbaine
Murs végétaux
Ombrage, Ombre
Pavé perméable, poreux
Puits canadien
Québec
Santé, santé publique
Surfaces
Température
Toit(s) vert(s)
Toits réfléchissants, toits blancs
Transport(s) en commun
Transport(s) actif(s)
Urban
Urbanisme durable
Vague de chaleur
Végétation
Verdissement urbain
Ville

Anglais

Air
Albedo
Allergies
Built environment
Trees
Architecture
Bioclimatic architecture
Asphalt
Buildings, green building
Concrete,
Street Canyon, urban canyon
Heat storage
Heat
Hot climate
Cooling, solar cooling
Urban climate, microclimate(s)
Thermal comfort
VOC
Urban planning, landscaping, design

Energy efficiency
Urban environment
Green spaces, green areas
Urban sprawl
Urban forest
Urban heat island(s)
Impacts
Stormwater management
Urban geometry
Urban heat islands mitigation strategies
Urban microclimate(s)
Urban morphology
Green walls, living walls
Shading, Shadow
Permeable, Porous pavement
s. o.
Québec
Health, Public health
Surfaces
Temperature
Green roofs, rooftop vegetation
Reflective roofs, white roofs, cool roofs
Mass transport, public transport
Active transport
Urban
Sustainable urban planning
Heat wave
Vegetation
Urban greening
City

***Institut national
de santé publique***

Québec

