

**Adapter les quartiers et les bâtiments au  
réchauffement climatique;  
Une feuille de route pour accompagner les  
architectes et les designers urbains québécois**

**Thèse en cotutelle  
Doctorat sur mesure en ambiances physiques  
architecturales et urbaines**

**Catherine Dubois**

Université Laval  
Québec, Canada  
Philosophiae doctor (Ph.D.)

et

Institut National des Sciences Appliquées (INSA)  
Toulouse, France  
Docteur

© Catherine Dubois, 2014



# Résumé

L'augmentation des températures estivales induites par le dérèglement climatique est préoccupante pour les villes des latitudes tempérées froides parce qu'elle exacerbe le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) et réduit le confort thermique à l'intérieur des bâtiments. Le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) sert de cas d'étude. Les architectes et les designers urbains, s'ils acquièrent les connaissances et les compétences adéquates, peuvent être aussi des acteurs clés de l'adaptation au changement climatique. Deux ateliers de travail collaboratifs réunissant architectes, ingénieurs et designers urbains ont fait état de lacunes à ce sujet. La création d'un outil d'aide à la conception (AAC) spécialisé sur la question de l'adaptation du cadre bâti à la chaleur a été envisagée pour résoudre ce problème. Une recension et une catégorisation d'outils d'AAC ont été conduites pour identifier les qualités susceptibles d'atteindre ce but. Pour le confirmer, sept des outils d'AAC recensés ont été testés par 14 étudiants inscrits à un atelier d'architecture de deuxième cycle de l'Université Laval. Les résultats de l'enquête qui comprend une analyse des présentations finales des projets, un questionnaire électronique et deux groupes de discussion conduits avec les étudiants de l'atelier ont mis en évidence la diversité et la pluralité des besoins des utilisateurs d'outils d'AAC. Pour ces raisons, nous proposons une « feuille de route » (FDR) de l'adaptation au changement climatique pour orienter les praticiens à travers la création d'un projet adapté à la hausse des températures estivales. Celle-ci comprend deux volets : le premier cherche à améliorer la compréhension des praticiens des principaux enjeux de l'adaptation au changement climatique par une organisation graphique et systémique des savoirs. Le deuxième cible et hiérarchise des outils d'AAC qui leur permettent d'acquérir ou de parfaire leurs connaissances de manière autonome. Huit entretiens individuels avec des praticiens de la région de Québec ont été conduits pour vérifier l'atteinte de ces objectifs. Les principaux résultats confirment : i) la capacité de la FDR d'améliorer la compréhension des praticiens, ii) l'intérêt des praticiens pour la formule d'autoapprentissage proposée et iii) la présence des qualités recherchées par les utilisateurs d'outil d'AAC dans la FDR.



# Table des matières

<b>RÉSUMÉ</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>V</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>VII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>XI</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>XIII</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>XIX</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>1</b>
<b>PARTIE 1 : CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE</b>	<b>5</b>
<b><u>Chapitre 1. Adapter les villes tempérées froides au changement climatique par le biais de l'architecture et du design urbain</u></b>	<b><u>7</u></b>
<b>1.1 Villes et changements climatiques</b>	<b>7</b>
1.1.1 Le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec	10
1.1.2 Le projet « Changements climatiques et transformation urbaine »	11
<b>1.2 L'îlot de chaleur urbain</b>	<b>12</b>
1.2.1 Causes : facteurs naturels et humains	12
1.2.2 Impacts	21
1.2.3 Les ICU sur le territoire de la CMQ	22
<b>1.3 La ville une échelle d'action clé</b>	<b>25</b>
1.3.1 Mesures d'atténuation et d'adaptation au changement climatique	25
1.3.2 Outils municipaux supportant les mesures d'adaptation « gagnant-gagnant »	28
<b>1.4 Les leviers d'action de l'architecture et du design urbain</b>	<b>38</b>
1.4.1 Forme urbaine	39
1.4.2 Couvert naturel	42
1.4.3 Matériaux de revêtement	45
1.4.4 Architecture	49
<b>1.5 Conclusion du premier chapitre</b>	<b>53</b>

## **Chapitre 2. Architectes et designers urbains, acteurs clés de l'adaptation au changement climatique?** **55**

<b>2.1 Atelier no.1 – définition du système d'indicateurs</b>	<b>56</b>
2.1.1 Préparation	56
2.1.2 Déroulement	58
2.1.3 Résultats et discussion	61
<b>2.2 Atelier no.2 – diagnostic du degré d'exposition à la chaleur</b>	<b>62</b>
2.2.1 Préparation	62
2.2.2 Déroulement	71
2.2.3 Résultats et discussion	76
<b>2.3 Conclusion du deuxième chapitre</b>	<b>81</b>

## **Chapitre 3. Vers une amélioration des connaissances et des compétences des concepteurs urbains et architecturaux** **85**

<b>3.1 Première intuition – un outil d'AAC spécialisé pour solution?</b>	<b>86</b>
<b>3.2 Recension et catégorisation d'outils d'aide à la conception</b>	<b>89</b>
3.2.1 Outils orientés « intentions »	90
3.2.2 Outils orientés « références »	90
3.2.3 Outils orientés « connaissances »	91
3.2.4 Outils orientés « performance »	93
3.2.5 Outils hybrides	96
3.2.6 Résultats et discussion	98
<b>3.3 Deuxième intuition – les outils d'AAC hybrides, les plus porteurs?</b>	<b>98</b>
3.3.1 Présentation de l'atelier	99
3.3.2 Outils d'AAC testés	100
<b>3.4 Démarche expérimentale; une enquête en 3 étapes</b>	<b>100</b>
3.4.1 Analyse des projets finaux	101
3.4.2 Questionnaire électronique	102
3.4.3 Groupes de discussion	104
3.4.4 Résultats et discussion	106
<b>3.5 Conclusion du troisième chapitre</b>	<b>116</b>

<b>PARTIE 2 : PROPOSITION</b>	<b>119</b>
<b><u>Chapitre 4. La feuille de route de l'adaptation au changement climatique</u></b>	<b>121</b>
<b>4.1 Retour sur les principaux enjeux</b>	<b>122</b>
<b>4.2 Feuille de route — présentation</b>	<b>124</b>
4.2.1 Principe	124
4.2.2 Organisation, contenu et qualités recherchées	124
4.2.3 Exemple d'application de la feuille de route	132
<b>4.3 Entretiens individuels — préparation</b>	<b>133</b>
4.3.1 Questionnaire du profil du professionnel répondant	134
4.3.2 Jeu de fiabilisation de la feuille de route	135
4.3.3 Questionnaire sur les qualités de la feuille de route	142
<b>4.4 Entretiens individuels — déroulement</b>	<b>142</b>
4.4.1 Situer et présenter la feuille de route	144
4.4.2 Utiliser la feuille de route pour résoudre un problème de conception	146
4.4.3 Cibler et hiérarchiser les outils d'aide à la conception	149
4.4.4 Interroger directement les professionnels au sujet de la feuille de route	151
<b>4.5 Résultats et discussion</b>	<b>151</b>
4.5.1 Une feuille de route capable d'améliorer la compréhension des professionnels	152
4.5.2 Catégories et types d'outils d'AAC privilégiés par les praticiens	166
4.5.3 Qualités avérées de la feuille de route	172
4.5.4 Intérêt de la formule d'apprentissage proposée par la feuille de route	175
<b>4.6 Conclusion du quatrième chapitre</b>	<b>177</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>181</b>
<b>Principaux apports de la thèse</b>	<b>186</b>
Une réflexion articulée et élaborée autour du besoin des praticiens	187
La production de nouvelles connaissances sur les concepteurs	188
La gestion de la complexité par une organisation des connaissances	189
La création d'outils pédagogiques spécifiques dédiés à cette clientèle	189
<b>Limites et perspectives d'évolution</b>	<b>191</b>

En somme, trois études réparties sur une période de 30 ans démontrent l'existence d'un ICU sur le territoire de la CMQ. Les secteurs présentant une forme urbaine dense et compacte, qui sont dominés par des matériaux de revêtement imperméables dont l'albédo est faible et l'émissivité élevée et qui comprennent peu d'espaces verts et de milieux humides sont déjà les plus affectés par le phénomène. Aussi, bien que la région métropolitaine de Québec fasse partie des latitudes tempérées froides, l'atténuation de l'ICU est un enjeu réel qui doit être adressé reconnaissant la forte probabilité d'un réchauffement des températures estivales dans les années à venir et d'une population peu acclimatée à la chaleur excessive.

### **1.3 La ville une échelle d'action clé**

---

La ville constitue une échelle d'action clé pour répondre aux défis posés par le changement climatique, car des mesures d'atténuation et d'adaptation peuvent y être mises en œuvre assez facilement (Moser et Dilling 2007). La définition de ces deux types de mesures est donnée dans un premier temps, et une revue des principaux outils municipaux favorisant l'adaptation au changement climatique est exposée dans un deuxième temps.

#### **1.3.1 Mesures d'atténuation et d'adaptation au changement climatique**

Les mesures d'atténuation font généralement référence à la mise en œuvre de politiques destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et à renforcer les puits (GIEC 2007a). Elles peuvent être mises en place quel que soit l'endroit, considérant que la majeure partie des émissions de GES est issue de procédés de production et de consommation de combustibles d'origine fossile. À l'échelle d'une ville, les interventions en aménagement du territoire qui orientent le développement urbain de manière à accroître les possibilités, pour un plus grand nombre de personnes, de réaliser des déplacements moins longs, moins nombreux et moins polluants, constituent des mesures d'atténuation significatives (Blais, Boucher, et Caron 2012). Leur potentiel de réduction des émissions de GES est d'autant plus grand dans un contexte comme celui du Canada, où le secteur des transports est le plus grand émetteur.

Les mesures d'atténuation sont donc mises en place pour lutter contre la principale cause du changement climatique. En revanche, elles prouvent leur efficacité sur le long terme étant donné le décalage existant entre le moment des émissions de GES et le temps requis par l'atmosphère pour se stabiliser. Aussi, le changement climatique sera persistant dans les années à venir, et ce, malgré des efforts de réduction des émissions considérables entrepris aujourd'hui (Shaw, Colley, et Connell 2007). Cette situation justifie la nécessité pour les villes de mettre en œuvre des mesures d'adaptation. L'objectif de ces dernières est d'amoinrir la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux effets des changements climatiques réels ou prévus (GIEC 2007a). Dans le cas de la



CMQ, les mesures d'adaptation mises en oeuvre devraient notamment atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Les mesures d'adaptation sont spécifiques au contexte et aux dynamiques locaux. Les solutions les plus adéquates varient en effet beaucoup d'un lieu à l'autre parce qu'elles sont intimement liées à leur contexte géographique, climatique et naturel (ONERC 2010). En prenant pour exemple l'ICU, les mesures d'adaptation rassemblent plusieurs possibilités d'intervention au niveau de la forme urbaine, du couvert naturel et des matériaux (Figure 5). Dans un quartier dense et existant, les possibilités d'insérer des espaces verts conséquents à la trame urbaine sont somme toute limitées, contrairement à un nouveau quartier où l'intégration d'infrastructures vertes<sup>17</sup> est planifiée dès le départ. Le champ d'application des mesures d'adaptation est donc beaucoup plus restreint que celui des mesures d'atténuation qui peuvent être généralisées à l'échelle de la ville. Leur pertinence doit être constamment réévaluée selon le contexte de l'intervention.

À la nécessaire spécificité qu'exige la conception des mesures d'adaptation s'ajoutent d'autres facteurs qui complexifient le processus de sélection. Tout d'abord, les incertitudes relatives à l'évolution exacte du climat et la réelle efficacité des mesures proposées sont problématiques (Desjarlais et al. 2010). À l'heure actuelle, la conception des bâtiments et des infrastructures urbaines est encadrée par des normes de construction issues de données climatiques historiques. Aussi, dans un contexte de changement climatique, ceux-ci pourraient voir leur durée de vie réduite ou se trouver dans l'incapacité de répondre efficacement aux conditions climatiques futures.

Les délais requis pour la mise en oeuvre des mesures d'adaptation constituent également un obstacle, car plusieurs municipalités ne ressentent pas l'urgence de s'adapter au changement climatique. Elles ont tendance à surestimer leur capacité d'adaptation et à sous-estimer leur vulnérabilité (ONERC 2010). Pourtant, la planification urbaine s'effectue sur le long terme et les retours d'expérience se vivent sur le très long terme (de Perthuis et al. 2010). L'adaptation est un processus de longue haleine.

L'intégration de mesures d'adaptation dans la planification urbaine requiert aussi souvent des investissements considérables aujourd'hui pour des bénéfices escomptés beaucoup plus tard, ce qui ne correspond pas au programme électoral classique. Les techniques et les technologies novatrices, dont l'efficacité reste à prouver, exigent de surcroît des fonds importants (Desjarlais et al. 2010).

---

<sup>17</sup> Infrastructures vertes : réseau d'espaces verts, planifié et géré créant des liens entre l'environnement bâti et l'environnement naturel. Elles sont de taille réduite, bien réparties sur le territoire et intégrées à l'environnement existant. Elles sont également facilement transformables et peuvent servir à plusieurs usages : gestion de l'eau, des écosystèmes, de l'énergie et des transports (sentiers pédestres et cyclables) (Blais, Boucher, et Caron 2012, 40).

L'adoption de certaines mesures d'adaptation peut aussi exiger des modifications réglementaires substantielles au sein de plusieurs entités administratives. Le processus est d'autant long et fastidieux lorsque les modifications doivent être apportées au niveau des instances administratives supérieures (gouvernements nationaux). Dès lors, elles doivent être entérinées par les instances intermédiaires (gouvernements régionaux) avant qu'elles ne puissent prendre effet à l'échelle municipale ce qui engendre des délais supplémentaires.

Enfin, la relation complexe existant entre certaines mesures d'atténuation et d'adaptation constitue un autre obstacle. Ces dernières peuvent tantôt se servir ou au contraire se desservir, car une même mesure peu atténuer l'impact du changement climatique sur la ville tout en provoquant une hausse des émissions de GES. C'est le cas notamment de la climatisation des bâtiments.

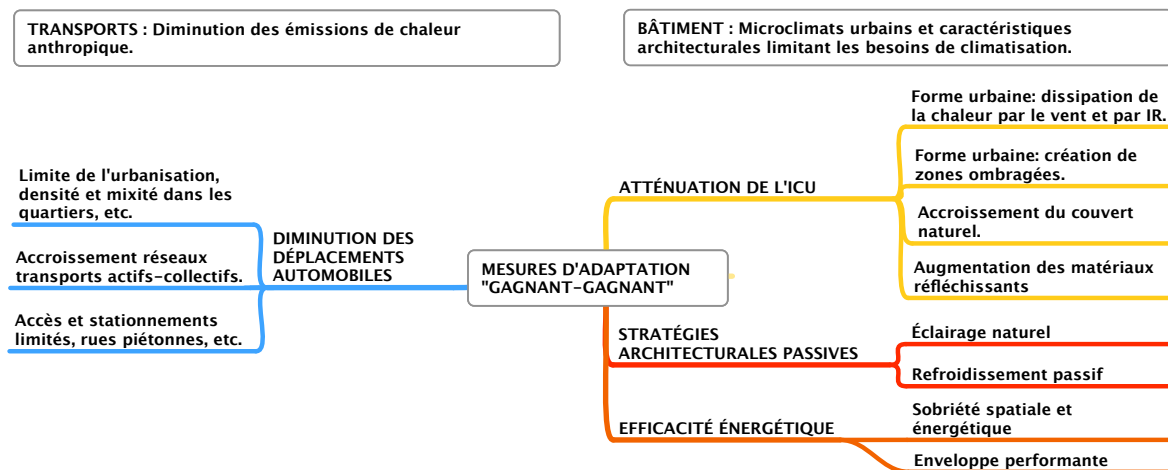
Les mesures d'adaptation se présentent donc sous différentes formes et se distinguent par la gestion de l'incertitude et des aléas qu'elles proposent, les outils qu'elles emploient, leur horizon temporel, les investissements nécessaires, ainsi que par leurs éventuels synergies ou conflits avec d'autres mesures (Hallegatte 2009). Dans le cadre de la lutte au changement climatique, les mesures dites « gagnant-gagnant », des mesures qui ont plusieurs bénéfices, sont particulièrement indiquées. Elles agissent en complémentarité des mesures d'atténuation tout en répondant simultanément à un ou plusieurs risques induits par le changement climatique (Shaw, Colley, et Connell 2007). L'intégration de stratégies bioclimatiques à l'architecture des bâtiments constitue une mesure d'adaptation « gagnant-gagnant » parce qu'elle permet d'une part de réaliser des économies d'énergie, une mesure d'atténuation, et de favoriser l'adaptation du bâti aux conditions climatiques actuelles et futures, une mesure d'adaptation.

La section suivante présente par ailleurs plusieurs outils (de planification, réglementaire, financier et de sensibilisation) qui sont à la portée des municipalités québécoises pour favoriser l'intégration de mesures d'adaptation « gagnant-gagnant ». Elle devrait ainsi mettre en évidence le rôle important que les municipalités ont à jouer dans la lutte au changement climatique.

### 1.3.2 Outils municipaux supportant les mesures d'adaptation « gagnant-gagnant »

L'aménagement du territoire demeure l'un des moyens les plus efficaces de faciliter l'adaptation locale aux changements climatiques. Au fur et à mesure que les changements climatiques s'accroissent, la fréquence et l'ampleur des dangers liés au climat iront également en augmentant, ce qui constitue un défi pour les urbanistes et les décideurs locaux (Richardson et Otero 2012).

Les municipalités peuvent mettre en oeuvre plusieurs mesures d'adaptation de type « gagnant-gagnant » sur leur territoire. Pour les besoins de notre étude, seules les mesures permettant d'atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain sont exposées en détail. Ces dernières touchent à la fois le secteur des transports et du bâtiment (Figure 11). Par exemple, les actions prises pour réduire les déplacements automobiles dans la ville diminuent les émissions de GES et de chaleur anthropique, l'un des quatre facteurs humains contribuant à la formation d'un ICU (Figure 5). La réduction de la consommation énergétique des bâtiments par l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain ou par l'intégration de stratégies architecturales passives et de mesures d'efficacité énergétique agit également à ce niveau. La Figure 11 schématise les modalités d'action en lien avec chaque secteur susceptible d'avoir un effet « gagnant-gagnant » pour les administrations locales.



**Figure 11 : Mesures « gagnant-gagnant » pouvant être supportées par les municipalités.**

Source : Catherine Dubois, 2014.

Les outils dont disposent les municipalités pour favoriser l'adoption de mesures d'adaptation « gagnant-gagnant » sur leur territoire peuvent être rattachés à l'une des catégories suivantes : 1) les outils de planification, 2) règlementaires, 3) de participation, de sensibilisation citoyenne, de financement, de maîtrise foncière et d'intervention.

### ***Les outils de planification***

Le plan d'urbanisme est l'outil de planification le plus important d'une ville. Il établit les lignes directrices de l'organisation spatiale et physique de la municipalité, définit ses objectifs d'aménagement et de développement, les enjeux qui les sous-tendent et les actions qui doivent être prises pour les atteindre. Son champ d'intervention est vaste, mais dans le contexte de la recherche, seuls les aspects liés aux transports, au milieu bâti et à la qualité de l'environnement sont brièvement abordés. Ces éléments exercent en effet une influence sur les émissions de GES ainsi que sur l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

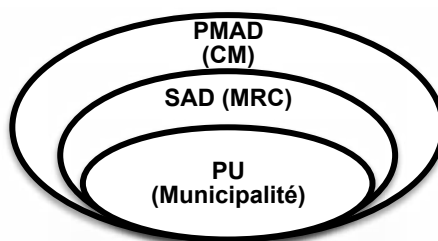
Les mesures d'adaptation « gagnant-gagnant » mises de l'avant par le plan d'urbanisme sont encadrées par des principes d'aménagement généraux. À titre d'exemple, pour réduire les émissions de GES dans les transports et atténuer l'ICU, la Ville de Québec souhaite consolider et densifier les milieux urbains existants, diversifier les activités dans les quartiers et les rendre accessibles autrement qu'en voiture (Ville de Québec 2005). Limiter le développement à l'intérieur du périmètre urbanisé de la ville, favoriser la mixité des usages dans les quartiers, augmenter les densités d'occupation du sol autorisées au sein des pôles d'activité et étendre les réseaux de transports actifs et collectifs, sont des solutions potentielles qui respectent ces grands principes (Tableau 2). La notion de potentiel est toutefois importante, car le plan d'urbanisme est d'abord un outil de planification donnant une direction commune à de multiples décisions sectorielles (habitation, commerce, transport, protection de l'environnement, loisirs, etc.) (Caron 2012). Il guide la prise de décision de la municipalité, mais il est possible que certaines solutions d'adaptation annoncées ne soient pas reprises par les différents outils réglementaires municipaux. Seuls ces outils sont en mesure d'autoriser, de limiter ou de contraindre des actions concrètes supportant la lutte et l'adaptation au changement climatique. Cela dit, l'inscription de l'enjeu climatique en général et de mesures « gagnant-gagnant » en particulier dans les outils de planification témoigne d'une volonté politique d'en tenir compte. Ainsi, bien que la mise en oeuvre d'actions concrètes passe essentiellement par les outils réglementaires, la mise à l'agenda du changement climatique passe d'abord par son intégration dans le plan d'urbanisme. Il est intéressant de noter que le passage de l'inscription à l'action est plus difficile dans bien des cas (Burch 2010; Shaw et al. 2014).

**Tableau 2 : Principes d'aménagement et mesures d'adaptation « gagnant-gagnant » pouvant être énoncés dans un plan d'urbanisme.**

Outils	Échelle <sup>18</sup>			Principes d'aménagements	Mesures d'adaptation potentielles
	V	Q	B		
PU	X			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consolider et valoriser les milieux urbains existants par des projets d'insertion, de requalification ou de reconstruction ainsi que par des opérations de réaménagement urbain pour limiter l'expansion du territoire urbanisé.</li> <li>• Diversifier les activités dans les quartiers de manière à offrir plus de services, de commerces et d'emplois près des lieux de résidence.</li> <li>• Répartir les activités sur le territoire en s'assurant de les rendre accessibles autrement qu'en voiture, notamment par le réseau de transport en commun, la marche et le vélo.</li> <li>• Maintenir et développer la forêt urbaine.</li> <li>• Préconiser le développement des nouveaux quartiers selon les principes des collectivités viables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limiter le développement à l'intérieur du périmètre déjà urbanisé.</li> <li>• Favoriser la mixité des usages dans les quartiers.</li> <li>• Augmenter la densité bâtie au sein des pôles d'activités existants.</li> <li>• Développer les réseaux de transport actifs et collectifs.</li> <li>• Multiplier les plantations d'arbres en bordure des voies de circulation, particulièrement au sein des secteurs les plus denses.</li> <li>• Identifier les aires d'aménagement faisant l'objet d'un PPU ou d'un PAE pour respecter les principes des collectivités viables.</li> </ul>

<sup>18</sup> Échelles d'action des outils : ville entière (V), lotissement ou quartier (Q) bâtiment (B).

De manière à atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain sur son territoire et à diminuer la consommation énergétique des bâtiments, la Ville peut aussi énoncer des principes d'aménagement pour protéger ou mettre en valeur les milieux naturels et humides. Ces milieux permettent de refroidir la température de l'air ambiant par l'évaporation de l'eau et par la protection des surfaces de l'ensoleillement direct. Le PDAD<sup>19</sup> de la Ville de Québec stipule par exemple le désir de maintenir et de développer la forêt urbaine sur le territoire. L'augmentation du couvert végétal dans la ville par la plantation d'arbres en bordure des voies de circulations des quartiers les plus denses est une solution potentielle (Tableau 2). Enfin, le plan d'urbanisme permet également d'identifier les aires d'aménagement nécessitant une planification urbaine beaucoup plus détaillée, notamment lorsque la Ville souhaite qu'elles se développent selon les principes des collectivités viables<sup>20</sup>. Ces aires d'aménagement font alors l'objet d'un PPU<sup>21</sup> ou d'un PAE<sup>22</sup>, des outils de planification et de réglementation plus précis et qui sont présentés à la suite. Ces outils exercent une influence directe sur la manière d'habiter un secteur, d'y prévoir les déplacements et d'y construire des édifices.



**Figure 12 : Emboîtement des outils de planification urbains et régionaux.**

Source : Catherine Dubois, 2014.

Les principes du plan d'urbanisme doivent toutefois respecter ceux des entités administratives supérieures agissant à l'échelle régionale. Les communautés métropolitaines (CM) et les municipalités régionales de comté (MRC) gèrent l'aménagement du territoire régional par l'entremise d'un « plan métropolitain d'aménagement et de développement » (PMAD) ou d'un « schéma d'aménagement et de développement » (SAD). Comme l'illustre la Figure 12, une fois

<sup>19</sup> PDAD : plan directeur d'aménagement et de développement. Il s'agit du plan d'urbanisme de la Ville de Québec.

<sup>20</sup> Une collectivité viable assure la protection de son patrimoine naturel, culturel et bâti. Aménagée à échelle humaine, elle se caractérise notamment par la compacité de sa forme urbaine la mixité des activités, une offre de transport diversifiée et une bonne localisation des activités et des équipements. Elle rend ainsi accessibles à tous des espaces publics de qualité et des espaces verts abondants, une variété de services et un environnement riche en activités économiques, sociales, récréatives et culturelles (Vivre en ville 2012)

<sup>21</sup> PPU : Programme particulier d'urbanisme : composante du plan d'urbanisme qui permet de réaliser une planification détaillée de certains secteurs. Il est entièrement élaboré par la municipalité.

<sup>22</sup> PAE : Règlement sur les plans d'aménagement d'ensemble (PAE) : Le plan est proposé par un promoteur et approuvé par la municipalité sur la base de critères d'évaluation. Il s'applique dans le cas de vastes projets de développement, où les techniques spéciales et la conception innovatrice sont à l'honneur, et où une approche personnalisée par rapport au zonage et à l'aménagement extérieur est tout indiqué (Richardson, G.R.A et Otero, J. 2012)

**Tableau 3 : Précédents et mesures « gagnant-gagnant » mises en oeuvre par certains outils réglementaires municipaux particuliers.**

Outils	Échelle			Mesures d'adaptation « gagnant-gagnant »	Précédents
	V	Q	B		
<b>Zonage</b>	X			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adapter les ratios de stationnement selon la nature des activités d'une même entreprise et selon ses besoins de main-d'oeuvre.</li> <li>• Augmenter le ratio minimum d'espaces verts (0 % à 5 %).</li> <li>• Exiger que la canopée d'arbres matures couvre 40 % des espaces de stationnement.</li> <li>• Construction d'un nouveau bâtiment : ≥ 20 % superficie du terrain libre de construction avec aménagement paysager comprenant plantes, arbustes et arbres.</li> <li>• Pour tous toits plats sont autorisés : toiture végétalisée, écoénergétique ou indice de réflectance solaire (IRS) ≥ 78.</li> <li>• Tout nouveau stationnement ≥ 10 places : espace vert planté aménagé sur ≥ 15 % de leur superficie.</li> <li>• Revêtements aires de stationnement, seuls sont autorisés : béton gris, pavé alvéolé ou matériau dont IRS est ≥ 29.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Arrondissement St-Laurent (Montréal) :</b> Règlement sur les stationnements, plan de foresterie urbaine.</li> <li>• <b>Arrondissement Rosemont-La Petite-Patrie (Montréal) :</b> Règlement sur le verdissement, la perméabilité des sols et les toitures écoénergétiques.</li> </ul>
<b>Cons- truction</b>			X	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Performance énergétique du bâti ≥ 25 % normes du CNÉB<sup>23</sup>.</li> <li>• Tout nouveau bâtiment municipal &gt; 500 m<sup>2</sup>, obligation certification LEED® niveau « or » ou « argent ».</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Vancouver :</b> Règlement de construction mis à jour.</li> <li>• <b>Toronto :</b> Green Building standard – Green roof construction standards.</li> </ul>

<sup>23</sup> Code national de l'énergie pour les bâtiments – Canada 2011 contient des exigences minimales pour la conception et la réalisation de bâtiments éconergétiques.

l'un ou l'autre de ces plans ratifiés, une CM ou une MRC peut, par résolution, obliger une municipalité à inclure dans son plan d'urbanisme un ou plusieurs éléments qu'elles estiment nécessaires. La situation inverse est toutefois impossible. Aussi, dans le cas précis de la Ville de Québec, les mesures d'atténuation énoncées dans son plan d'urbanisme doivent l'être également dans le PMAD de la Communauté métropolitaine de Québec. Ces outils de planification assurent la cohérence des orientations à l'échelle métropolitaine ou régionale. Cela dit, une municipalité peut affirmer son leadership et servir de modèle aux autres. Ce cas de figure se rencontre surtout dans les métropoles où la ville-centre, comme la Ville de Québec, initie une démarche de planification et que d'autres municipalités membres lui emboîtent le pas.

### ***Les outils réglementaires***

Les municipalités peuvent également recourir à plusieurs outils en matière de réglementation pour obliger la mise en oeuvre de mesures d'adaptation « gagnant-gagnant » sur leur territoire. Ces outils concrétisent les intentions de la ville en matière d'occupation du sol et d'usage des bâtiments par le biais de règles, de normes et de critères d'évaluation. Ils peuvent porter sur l'ensemble des quartiers et des bâtiments de la ville; c'est le cas du règlement de zonage<sup>24</sup> et de construction.

Le règlement de zonage est un outil pouvant servir à assurer la mise en oeuvre de mesures de réduction des émissions de GES dans le secteur des transports et du bâtiment et d'atténuation de l'îlot de chaleur urbain. La densité d'occupation du sol, l'emprise des surfaces construites, la manière d'aménager les terrains, notamment les stationnements, la plantation et l'abattage d'arbres, les dimensions, le volume, les matériaux et l'architecture des constructions sont tous des éléments pouvant être contrôlés par le biais de ce règlement. Comme le montre le Tableau 3, plusieurs mesures d'adaptation « gagnant-gagnant » peuvent être ainsi mises en oeuvre sans que l'outil réglementaire vise explicitement ou exclusivement la lutte ou l'adaptation au changement climatique. Dans d'autres cas, comme ceux des arrondissements Rosemont-La Petite Patrie et Saint-Laurent à Montréal, qui font figure de précurseurs québécois, la volonté d'agir dans le dossier climatique est plus affirmée. Dans le premier cas, l'arrondissement a adopté plusieurs dispositions relatives au verdissement, à la perméabilité des sols et aux revêtements de toiture écoénergétiques pour lutter contre le phénomène d'ICU (Ville de Montréal 2013; Ville de Montréal 2014). Dans le deuxième cas, les mesures concernent principalement les stationnements et l'accroissement du couvert végétal (Ville de Montréal 2013; Union des municipalités du Québec 2013).

---

<sup>24</sup> Règlement de zonage : Division du territoire en zones pour en déterminer la vocation, y contrôler l'usage des terrains et des bâtiments ainsi que l'implantation, la forme et l'apparence des constructions (Caron 2012).



**Tableau 4 : Précédents et mesures « gagnant-gagnant » mises en oeuvre par certains outils réglementaires municipaux.**

Outils	Échelle			Mesures d'adaptation « gagnant-gagnant »	Précédents
	V	Q	B		
<b>PIIA et PAE</b>		X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mixité des usages et de l'offre résidentielle obligatoire.</li> <li>• Aménagement des rues favorisant déplacements à pied et à vélo requis.</li> <li>• Implantation, orientation et fenestration favorisant les stratégies architecturales passives requises.</li> <li>• Seuls bâtiments compacts autorisés.</li> <li>• Tout nouveau bâtiment doit être équipé de dispositifs d'ombrage.</li> <li>• Récupération et rétention sur site des 5 premiers mm de pluie obligatoires.</li> <li>• Construction non résidentielle, ≤ 3 étages : ≥ 50 % superficie des stationnements ombragés exigée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La Cité verte (ville de Québec).</li> <li>• Projet Angus – Arrondissement Rosemont La Petite Patrie (Montréal).</li> <li>• Municipalité de Chelsea (Blais, Boucher, et Caron 2012).</li> </ul>
<b>PPCMOI</b>		X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obligation pour le site d'obtenir la certification LEED-ND®.</li> <li>• Aménagement de toitures végétalisées autorisé.</li> <li>• Performance énergétique supérieure aux codes de construction en vigueur.</li> <li>• Nombre maximal de places de stationnement / logement.</li> <li>• Stationnement sous-terrain obligatoire.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bassins du Nouveau Havre (Montréal).</li> <li>• Écoquartier de la Pointe aux lièvres (Ville de Québec).</li> <li>• Écoquartier de la Pointe d'Estimauville (Ville de Québec).</li> </ul>

Seules les municipalités d'envergure ou souhaitant mettre en place sur leur territoire des exigences supérieures en matière de performance énergétique ou environnementale du bâti élaborent leur propre règlement de construction (Caron 2012). C'est le cas notamment des Villes de Toronto et de Vancouver. À Toronto et à Vancouver, plusieurs normes de construction et environnementales ont été adoptées pour réduire la consommation énergétique du parc immobilier et pour lutter en outre contre les îlots de chaleur urbains (City of Toronto 2011; City of Vancouver 2013). Ces normes sont adaptées selon l'usage et la localisation des constructions dans la ville et couvrent plusieurs aspects : aménagement des terrains, matériaux de revêtement, performance énergétique, consommation d'eau, production d'énergie renouvelable, etc. (Tableau 3). À Montréal, Calgary, Waterloo et Ottawa, les villes ont choisi d'agir à titre de citoyen exemplaire en exigeant par voie de règlement que tous les nouveaux bâtiments municipaux obtiennent une certification environnementale<sup>25</sup> indépendante.

Enfin, certains règlements sont élaborés uniquement pour être appliqués à des aires d'aménagement clairement définies : les règlements sur : i) les plans d'implantation et d'intégration architecturale (PIIA)<sup>26</sup>, ii) les plans d'aménagement d'ensemble (PAE) et iii) les projets particuliers de construction, de modification ou d'occupation d'un immeuble (PPCMOI)<sup>27</sup>, sont les principaux outils réglementaires appartenant à cette catégorie. Ces derniers encadrent les mêmes éléments que le règlement de zonage, mais de manière beaucoup plus précise. À titre d'exemple, des seuils minimaux et maximaux peuvent être imposés au niveau de l'emprise au sol des surfaces bâties, perméables et imperméables, des places de stationnement, des densités, de la performance environnementale et microclimatique des constructions, etc. Plusieurs mesures d'adaptation « gagnant-gagnant » sont ainsi mises en oeuvre dans de nouveaux projets d'ensemble urbains comme la Cité Verte (SSQ Immobilier 2009), les écoquartiers de Québec (Ville de Québec 2010a; Ville de Québec 2010b), le projet Angus (SCHL 2010), les Bassins du Nouveau Havre de Montréal (Boucher et al. 2010). Les mesures exposées dans le Tableau 4 ne sont pas exclusives à un outil réglementaire donné; une ville peut en effet exiger des densités bâties plus élevées à proximité d'axes majeurs de transports en commun par le biais d'un PIIA ou par l'entremise d'autres règlements. Seulement pour éviter les redondances, les mesures ne sont présentées qu'une seule fois. Elles sont accompagnées de plusieurs précédents pour illustrer comment certaines municipalités les ont utilisés pour favoriser leur adaptation au changement climatique.

---

<sup>25</sup> Il existe au Canada plusieurs programmes de certification : LEED®, *Living Building Challenge*, *Passivhaus*, etc.

<sup>26</sup> Règlement (PIIA) : identification de certains territoires ou de certaines catégories de projets devant faire l'objet d'une évaluation qualitative au moment d'une demande de permis ou de certificat afin d'assurer la qualité de l'implantation et de l'intégration architecturale et des particularités de chaque situation (Richardson, G.R.A et Otero, J. 2012).

<sup>27</sup> Règlement (PPCMOI) : permet, à certaines conditions, qu'un projet soit réalisé malgré le fait qu'il déroge à l'un ou l'autre des règlements d'urbanisme. Il permet d'encadrer le développement urbain au cas par cas (Alain Caron et Blais 2008).

**Tableau 5 : Précédents et mesures « gagnant-gagnant » supportées par les outils de participation et de sensibilisation citoyenne, d'intervention, de financement et de maîtrise foncière.**

Outils	Mesures d'adaptation « gagnant-gagnant »	Précédents
<b>Participation et sensibilisation citoyenne</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Site Internet des solutions de mobilité en temps réel.</li> <li>• Projets de design participatif – intégration des cheminements pédestres et cyclables dans un quartier.</li> <li>• Conseils pour la réduction de la consommation d'énergie.</li> <li>• Cartographie des projets supportant l'efficacité énergétique.</li> <li>• Vitrine technologique : lieu public de diffusion et d'animation sur les principes de l'architecture durable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Live Green Toronto Map.</b> (City of Toronto 2013a).</li> <li>• <b>Vancouver :</b> « Green Building audio tours ». (City of Vancouver 2012).</li> <li>• <b>Montréal :</b> Maison du développement durable (2012).</li> <li>• <b>Beloeil :</b> Centre Nature-Action (Nature-Action Québec 2011).</li> </ul>
<b>Financement et maîtrise foncière</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Financement des TC, des vélos en libre-service.</li> <li>• Crédit de taxe pour les immeubles intégrant des équipements pour vélos.</li> <li>• Subvention pour la densification douce d'un terrain.</li> <li>• Aide financière pour travaux d'amélioration de l'efficacité énergétique ou pour obtenir une certification environnementale.</li> <li>• Participation financière, cession de terrains pour la réalisation de bâtiments exemplaires.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Toronto :</b> Home Energy Loan Program (City of Toronto 2014).</li> <li>• <b>Vancouver :</b> Green Building and renovating program (City of Vancouver 2012).</li> <li>• <b>Victoriaville :</b> habitation durable. (Ville de Victoriaville 2013).</li> <li>• <b>Québec :</b> Subvention et prêt sans intérêt au CCE Frédéric Back (Boucher et al. 2010).</li> </ul>
<b>Intervention</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soutien (formation et services) d'employés municipaux pour des projets en efficacité énergétique et de production d'ER.</li> <li>• Guide destiné aux professionnels du bâtiment sur la construction et la rénovation écologique.</li> <li>• Construction de bâtiments municipaux exemplaires.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Toronto :</b> Better Buildings Partnership (City of Toronto 2013b).</li> <li>• <b>Québec :</b> Bibliothèque de Charlesbourg</li> <li>• <b>Gatineau :</b> Centre sportif (Boucher et al. 2010).</li> </ul>

***Les outils de participation, de sensibilisation citoyenne, de financement, de maîtrise foncière et d'intervention.***

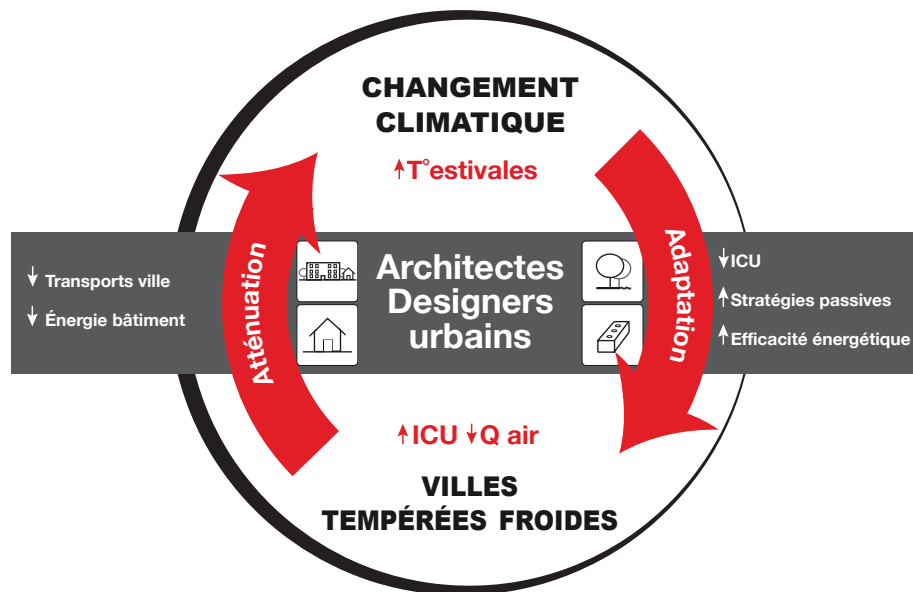
Pour inciter leurs habitants à mettre en oeuvre des mesures d'adaptation « gagnant-gagnant », les Villes peuvent aussi choisir la voie de la sensibilisation et de la participation citoyenne, encourager et appuyer certaines actions par le biais d'incitatifs financiers, fiscaux et fonciers ou contribuer directement à la réalisation de projets d'aménagement urbain ou architectural exemplaires (Tableau 5). Ces outils fonctionnent sur la base d'une adhésion volontaire.

Les initiatives municipales existantes sont variées et nombreuses en la matière, mais exigent des niveaux d'investissement passablement différents. En effet, l'apport financier requis pour la constitution d'un site Internet présentant les solutions d'écomobilité sur le territoire est moindre que l'accord d'un crédit de taxes aux propriétaires effectuant des travaux d'amélioration de la performance énergétique de leur résidence et beaucoup moindre encore que la construction d'un bâtiment municipal modèle. La mise en oeuvre des mesures d'adaptation par le biais de ces outils est donc moins certaine qu'elle ne l'est avec les règlements, du moins à court terme. En revanche, l'adhésion de la population aux démarches entreprises par la Ville pour s'adapter au changement climatique est indispensable. Les outils de participation, de sensibilisation citoyenne, d'intervention, de financement et de maîtrise foncière doivent donc être complémentaires aux outils de planification et de réglementation.

La Ville est une échelle d'action clé pour lutter et s'adapter au changement climatique. La recension des différentes catégories d'outils dont disposent les municipalités québécoises pour supporter ou pour encadrer la mise en oeuvre de mesures d'adaptation « gagnant-gagnant » l'a démontrée. Elle a aussi mis en évidence que dans ce contexte la Ville doit coordonner simultanément des actions privées et publiques tout en respectant les orientations gouvernementales nationales, régionales et métropolitaines. Cette coordination, complexe compte tenu du nombre, de la diversité et des dynamiques entre les acteurs impliqués, exige des ressources conséquentes pour agir. Pour consentir à cet investissement important, la Ville doit considérer l'adaptation au changement climatique comme un enjeu majeur de développement. Autrement, les mesures mises en oeuvre demeureront, comme la plupart des mesures exposées dans les tableaux 2 à 5, individuelles et ponctuelles. Pourtant, la Ville devra adopter des plans d'adaptation dans les années à venir puisqu'elle pourrait être particulièrement affectée par le changement climatique et parce qu'elle est capable d'agir pour les freiner et les amoindrir. En attendant que ces plans soient élaborés, les architectes et les designers urbains peuvent contribuer à l'adaptation des villes au changement climatique comme l'explique la section suivante.

## 1.4 Les leviers d'action de l'architecture et du design urbain

Les architectes et les designers urbains sont des acteurs potentiels de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique. D'un côté, leurs décisions influencent les émissions de GES dans le secteur des transports et du bâtiment. De l'autre, elles facilitent ou entravent la formation d'un îlot de chaleur urbain, favorisent ou non l'intégration de stratégies passives et de mesures d'efficacité énergétique aux constructions (Figure 13). Plus largement, ces décisions contribuent à la qualité de vie dans les villes, car atténuer l'îlot de chaleur urbain consiste avant tout à améliorer les microclimats urbains. De même à l'échelle architecturale, concevoir un bâtiment bioclimatique et efficace énergétiquement concourt à créer des espaces intérieurs confortables pour loger les citoyens sans avoir recours aux systèmes mécaniques et électriques.



**Figure 13 : Schéma du potentiel d'action des architectes et des designers urbains sur l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.**

*Source : Catherine Dubois, 2014.*

L'aménagement urbain et l'architecture occupent de fait une position stratégique pour travailler à l'adaptation des villes au changement climatique parce qu'ils sont en mesure de faire le pont entre les connaissances scientifiques et les débats sociaux, d'analyser en finesse les vulnérabilités urbaines et de prendre en compte les subtilités du système urbain (Hague 2009; Bedsworth et Hanak 2010; Blanco et al. 2009; Neuvel et van den Brink 2009). Les professionnels disposent de « quatre leviers d'action » pour mettre en oeuvre des mesures d'adaptation « gagnant-gagnant » dans leurs projets urbains et architecturaux. Ces leviers sont : la forme urbaine, le couvert naturel, l'architecture et les matériaux de revêtement. Le potentiel d'atténuation et d'adaptation au

changement climatique relatif à chaque levier d'action, qui est appuyé par les résultats de plusieurs études, est présenté à la suite.

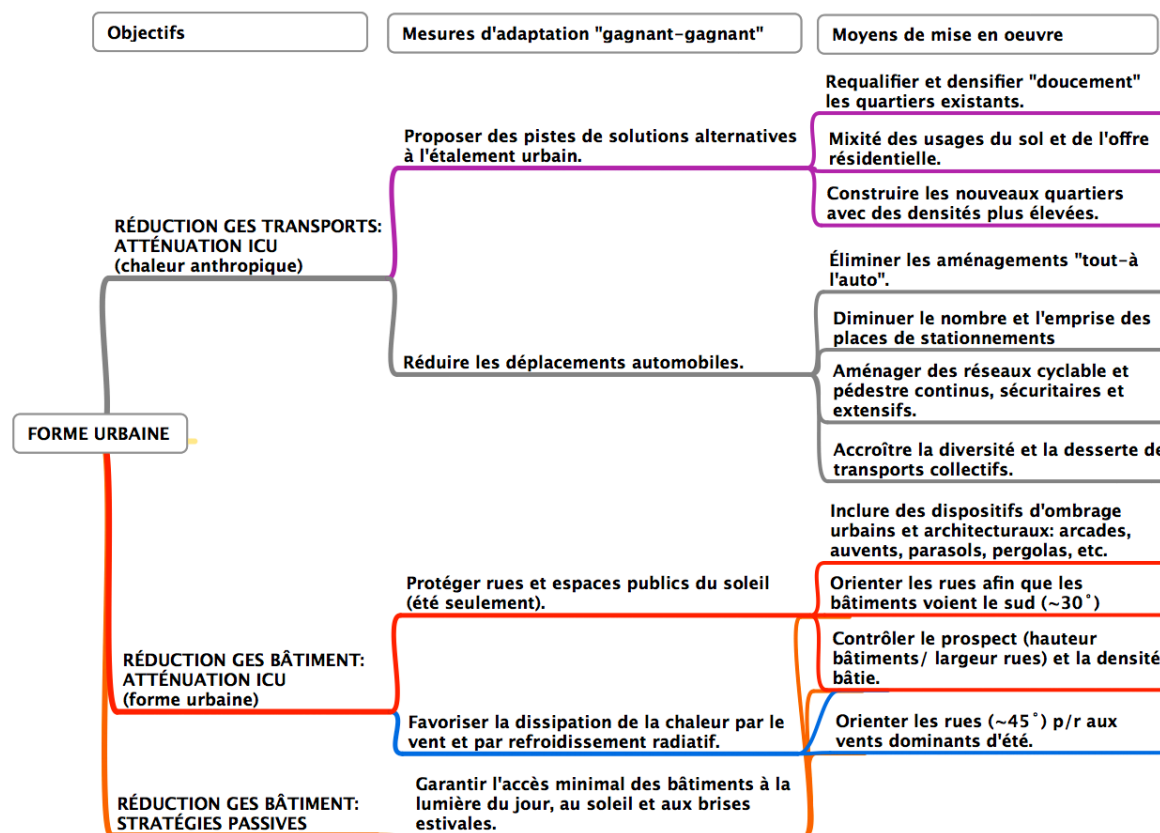
### 1.4.1 Forme urbaine

Le premier levier d'action rassemble les interventions sur la forme urbaine. De manière à lutter contre le changement climatique et à réduire l'exposition des villes des latitudes tempérées froides à la hausse des températures estivales, les architectes et les designers urbains peuvent en effet agir sur la forme urbaine pour : 1) réduire les émissions de GES et de chaleur anthropique dans le secteur des transports, 2) diminuer la production de GES dans le secteur de la construction par l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain et 3) par l'intégration de stratégies architecturales passives (Figure 14).



La forme urbaine est déterminante de l'intensité d'un îlot de chaleur urbain parce qu'elle modifie la vitesse et l'écoulement du vent, l'exposition solaire et le refroidissement radiatif (section 1.2.1). Ces facteurs influencent la vitesse à laquelle une ville se réchauffe et se refroidit. Plusieurs mesures d'adaptation « gagnant-gagnant » peuvent être intégrées au niveau de la forme urbaine pour supporter l'un ou l'autre des objectifs généraux (Figure 14). En revanche, elles ne sont pas toutes appropriées selon le contexte d'intervention. La plupart des mesures permettant d'atténuer l'impact du secteur des transports sur le changement climatique peuvent être mises en oeuvre dans les quartiers existants et dans les nouveaux quartiers. Les actions visant à limiter la formation d'un ICU ou à supporter l'intégration de stratégies architecturales passives sont toutefois restreintes aux nouveaux quartiers seulement. Il est en effet improbable qu'un professionnel ait l'autorité de démolir, ne serait-ce que partiellement, un quartier pour faciliter la pénétration des brises estivales ou pour faciliter le chauffage solaire passif des constructions préservées.

La Figure 14 montre par exemple qu'un designer peut proposer des pistes de solution alternatives à l'étalement urbain pour réduire les émissions de GES dans le secteur des transports et atténuer l'ICU en militant i) pour une densification douce des quartiers existants et ii) pour un accroissement de la mixité des usages et de l'offre résidentielle. Le caractère « militant » est très important considérant que les interventions sur la forme urbaine sont soumises à un cadre réglementaire conséquent comme l'a exposé la section précédente. Toujours avec ce même objectif, le professionnel peut aussi contribuer à la réduction des déplacements automobiles dans la ville en réduisant l'emprise au sol des stationnements et en soutenant l'aménagement de réseaux pédestres et cyclables continus, sécuritaires et extensifs.



**Figure 14 : Contributions potentielles de la forme urbaine à la mise en oeuvre de mesures d'adaptation « gagnant-gagnant ».**

Source : Catherine Dubois, 2014.

Le designer urbain a aussi la capacité de réduire les émissions de GES des bâtiments en mettant en oeuvre des mesures d'atténuation de l'îlot de chaleur urbain, car il influence leur demande énergétique. Les bâtiments climatisés situés dans les secteurs soumis à un ICU présentent en effet une consommation énergétique accrue l'été et moindre l'hiver (Bozonnet 2005). Un projet de recherche a démontré par ailleurs que les bâtiments situés au centre d'Athènes, là où l'intensité de l'ICU atteint en moyenne 10 °C, ont des charges de refroidissement deux fois plus élevées et une réduction de 25 % du COP<sup>28</sup> minimum de leurs systèmes de climatisation, contrairement aux bâtiments situés à la périphérie de la ville (Santamouris et al. 2001).

L'été, protéger partiellement les rues et les espaces publics de l'ensoleillement direct ou favoriser la dissipation de la chaleur par le vent et le refroidissement radiatif constituent deux mesures d'adaptation « gagnant-gagnant ». Les moyens de mise en oeuvre sont nombreux et dans plusieurs cas, supportent simultanément plusieurs mesures d'adaptation (Figure 14). C'est le cas du contrôle

<sup>28</sup> COP : le coefficient de performance est le rapport de la capacité de réfrigération nette et de la quantité d'énergie utilisée.

du prospect<sup>29</sup> et de la densité bâtie qui permettent de réduire les émissions de GES dans le bâtiment par l'atténuation de l'ICU et par le support à l'intégration de stratégies architecturales passives. À cet égard, une recherche portant sur les relations existant entre la géométrie des rues canyons et les microclimats urbains des villes des latitudes tempérées a mis en évidence à partir d'un modèle numérique, qu'un prospect compris entre 0,4 et 0,6 et une densité bâtie<sup>30</sup> variant entre 0,2 et 0,4 permettaient d'offrir aux piétons un certain degré de protection contre le froid l'hiver et de dissiper la chaleur l'été. Ces valeurs ne se retrouvent ni dans les villes européennes compactes ( $H/L = 0,75$  à  $1,7$ ) ni dans les villes nord-américaines caractérisées par un noyau dense et des banlieues dispersées ( $H/L=1,15$  à  $3,3$ ). Les premières sont néanmoins plus performantes sur le plan microclimatique (Oke 1988b).

Les parties les plus anciennes de la communauté métropolitaine de Québec ont un prospect moyen ( $H/L$ ) variant entre 0,7 et 1,2 et une densité bâtie comprise entre 0,4 et 0,5<sup>31</sup>. Les quartiers plus récents montrent des valeurs bien inférieures; le prospect moyen se situe entre 0,1 et 0,3 et la densité bâtie est inférieure à 0,2<sup>32</sup> (Després et al. 2014). Aussi selon l'étude d'optimisation des microclimats urbains de Oke (1988b) et dans un contexte de changement climatique, les municipalités membres de la CMQ auraient avantage à préconiser la densification douce des quartiers de banlieue et à limiter toute densification obtenue par la construction d'édifices de grande hauteur. Le quartier de Limoilou est un précédent intéressant : le prospect moyen est d'environ 0,4 et la densité bâtie de 0,35 (fiche D de l'annexe 2). Ces valeurs respectent les critères de la précédente étude. Cela dit, toute intervention sur la forme urbaine est complexe et contradictoire; les enjeux économiques, sociaux, culturels et politiques sont nombreux. Par exemple, l'optimisation des microclimats hivernaux et estivaux des villes tempérées est selon Oke, conflictuelle comme le souligne l'extrait suivant :

The essence of planning and design is making choices between alternatives. The objectives and the structures they dictate are in conflict; shelter is best provided by narrow streets and compactness, whereas dispersion demands separation and low building density. Warmth is promoted by compactness but access by openness (Oke 1988b).

Dans le contexte précis de l'adaptation au changement climatique, les choix effectués au niveau de la forme urbaine sont particulièrement critiques pour l'intégration de stratégies architecturales passives puisqu'ils déterminent l'accès des bâtiments à la lumière du jour, au soleil et aux brises

<sup>29</sup> Prospect : rapport entre la hauteur moyenne des bâtiments (H) et la largeur moyenne d'une rue canyon (L).

<sup>30</sup> Densité bâtie : rapport entre l'emprise au sol d'un bâtiment et la surface de la parcelle (d'après (Oke 1988b). Cette définition diffère de celle employée par d'autres chercheurs qui font plutôt référence à l'emprise au sol du bâti. Cette dernière définition est reprise ultérieurement dans cette thèse.

<sup>31</sup> Valeurs calculées dans les quartiers St-Jean-Baptiste et St-Sauveur.

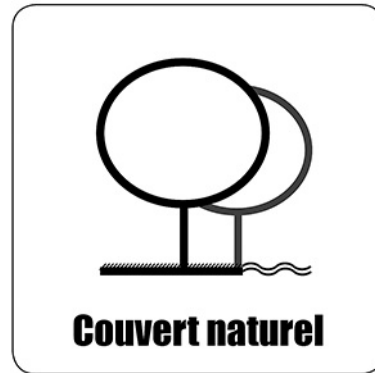
<sup>32</sup> Valeurs calculées dans les quartiers Beauport (banlieue de première couronne) et St-Rédempteur (banlieue de deuxième couronne).



estivales (Figure 14). Ces stratégies sont présentées plus en détail dans la section 1.4.4 consacrée au levier d'action « architecture ». La contribution potentielle du levier d'action « forme urbaine » à la réduction des GES dans le secteur du bâtiment n'est donc pas à négliger.

### 1.4.2 Couvert naturel

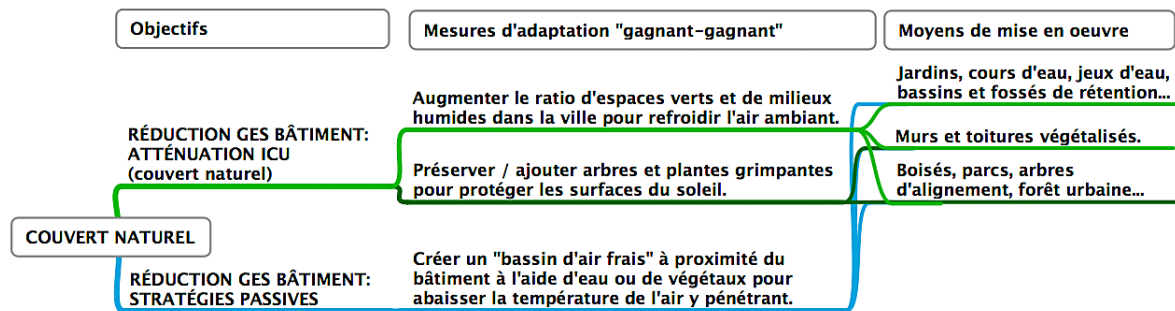
Les architectes et les designers urbains peuvent également recourir à un deuxième levier d'action, le couvert naturel, pour favoriser l'atténuation et l'adaptation des villes au changement climatique. Toute intervention permettant de préserver et d'augmenter le couvert naturel dans la ville peut en effet contribuer à la réduction des émissions de GES dans le bâtiment et à leur adaptation aux températures estivales plus élevées par 1) l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain et 2) par leur participation au refroidissement passif des bâtiments.



L'eau et les végétaux sont en mesure d'abaisser naturellement la température de l'air ambiant par les phénomènes concomitants d'évaporation et d'évapotranspiration. Ils permettent également d'amoindrir l'élévation de la température des surfaces lorsque ces dernières se trouvent à l'ombre d'arbres, de couvre-sol ou de plantes grimpantes (section 1.2.1). Pour les villes des latitudes tempérées froides, les arbres caducs doivent être privilégiés afin de garder la possibilité d'utiliser le soleil pour chauffer passivement les bâtiments pendant la saison hivernale. Contrairement aux mesures d'adaptation touchant la forme urbaine, celles appartenant au levier d'action « couvert naturel » sont beaucoup plus souples, car leur mise en oeuvre se prête à des échelles très variées (parc, rangé d'arbre, toiture végétalisée, etc.). L'extrait suivant est par ailleurs révélateur à ce sujet :

In many existing urban areas where the built form is already established, it is not feasible to create large new greenspaces. Thus, greenspace will have to be added creatively by making the most of all opportunities, for example through the greening of roofs, building façades, and railway lines, street tree planting, and converting selected streets into greenways (Gill et al. 2007).

Le levier d'action « couvert naturel » offre aux architectes et aux designers urbains trois principales mesures d'adaptation « gagnant-gagnant » (Figure 15). Cette figure met également en évidence que les trois mesures emploient pour la plupart les mêmes moyens de mise en oeuvre. Recourir au levier d'action « couvert naturel » pour adapter la ville au changement climatique est donc pertinent et judicieux. En guise d'exemple, la plantation d'arbres à proximité du bâtiment : 1) augmente le ratio d'espaces verts dans la ville, 2) protège les surfaces environnantes de l'ensoleillement direct et 3) crée un bassin d'air frais qui permet d'abaisser la température de l'air entrant dans le bâtiment.



**Figure 15 : Contributions potentielles du couvert naturel à la mise en oeuvre de mesures d'adaptation « gagnant-gagnant ».**

Source : Catherine Dubois, 2014.

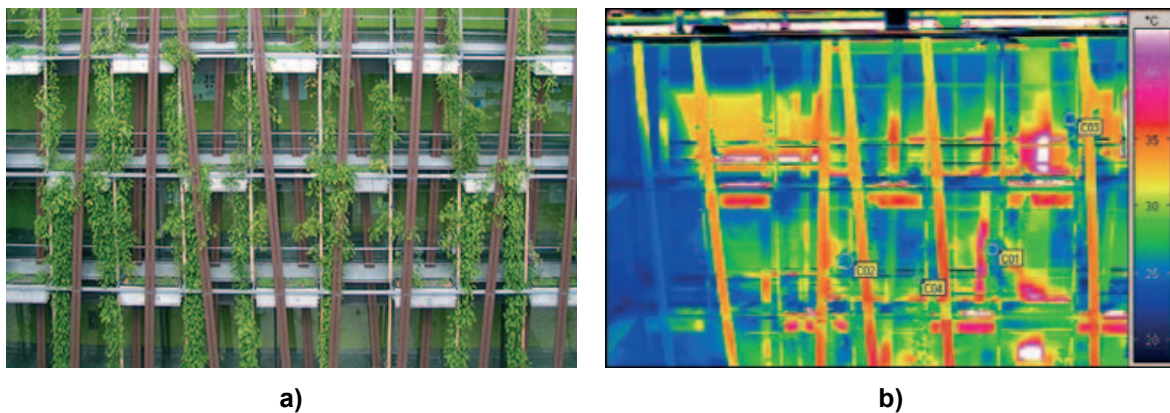
Utiliser l'évaporation de l'eau pour rafraîchir l'air ambiant des villes constitue un moyen de mettre en oeuvre deux des trois mesures d'adaptation du levier d'action « couvert naturel » (Figure 15). Rappelons toutefois que son efficacité est tributaire de la température et de l'humidité de l'air ambiant; les climats chauds et secs présentent les conditions optimales. À l'inverse, les climats chauds et humides devraient éviter ce type de solutions, car l'ajout d'humidité accroît l'inconfort des citoyens. Puisque les conditions climatiques de la région métropolitaine de Québec l'exposent à des épisodes de chaleur humide estivaux, les surfaces évaporatives (bassins, jeux d'eau, fossés de rétention, etc.) devraient donc être ajoutées avec parcimonie. Les zones ombragées et bien aérées sont plus adaptées à ce genre de conditions.

Nishimura et al. (1998) ont étudié l'effet rafraîchissant d'installations d'eau artificielles (étang, cascade artificielle et brumisateurs) localisées au sein d'espaces urbains relativement restreints. En faisant des relevés *in situ* (température ambiante, humidité relative et vitesse du vent) dans un parc de la ville d'Osaka, les chercheurs ont rapporté une réduction de la température ambiante d'environ 3 °C du côté sous le vent d'une cascade et de brumisateurs sur une distance pouvant atteindre 35 mètres à certains moments de la journée.

Sun & Chen (2012) ont quant à eux apprécié la capacité de plans d'eau d'atténuer un ICU en termes d'intensité et d'efficacité. Cent quatre-vingt-dix-sept plans d'eau de la ville de Beijing ont ainsi été examinés selon les 4 critères suivants : surface, géométrie, distance par rapport au centre de la ville et densité bâtie environnante. Les résultats soulignent que la surface des plans d'eau est responsable des plus grandes variations d'intensité de l'ICU, mais qu'elle n'est pas déterminante de leur efficacité. Ainsi à surface équivalente, la multiplication de petits plans d'eau disséminés dans la ville procurerait un rafraîchissement supérieur à celui produit par quelques plans d'eau majeurs. Les résultats ont aussi démontré l'importance de la densité bâtie au pourtour des plans d'eau, car certains de forme et de surface similaires, n'ont pas refroidi l'air ambiant de la même manière.

Un architecte peut également utiliser l'évaporation de l'eau, l'évapotranspiration et le feuillage des plantes pour protéger les surfaces du rayonnement solaire (Figure 15) et participer au refroidissement passif d'un bâtiment. À cet égard, un modèle numérique créé pour simuler l'ajout de murs végétalisés aux édifices résidentiels et commerciaux de Tokyo a révélé que cette mesure d'atténuation de l'ICU provoque une réduction de la température de l'air ambiant de 0,2 à 1,2 °C et des économies d'énergie (climatisation) variant entre 4 et 40 % (Kikegawa et al. 2006).

L'Institut de Physique Berlin-Adlershof (Figure 16) emploie l'eau et les végétaux pour réduire sa consommation d'énergie. Des plantes grimpantes ont été intégrées sur certaines des façades de l'Institut pour le protéger du soleil et pour améliorer les microclimats intérieurs et extérieurs grâce à l'évapotranspiration des plantes (Schmidt 2006). Comme le montre la Figure 16b, la température des surfaces vitrées situées derrière le dispositif de végétalisation (couleur bleue : 20 à 25 °C) est inférieure à celles des différentes parties qui le composent (couleurs jaune, orangé et rouge : 31 à 36 °C). Le chercheur rapporte également une évapotranspiration moyenne variant entre 5,4 et 11,3 mm d'eau par jour entre les mois de juillet et de septembre 2005 pour la façade sud (Figure 16a). Ce taux d'évapotranspiration correspond en moyenne à 157 kWh d'énergie économisée pour la climatisation du bâtiment par jour.



**Figure 16 : Façade végétalisée de l'Institut de Physique Berlin-Adlershof.**

*Source : Hochschule Neubrandenburg, 2011.*

Plusieurs études ont démontré l'efficacité des mesures de végétalisation pour amoindrir l'impact de la hausse des températures estivales sur les villes de moyenne et de grande importance. À partir d'un modèle énergétique urbain développé pour l'agglomération de Manchester<sup>33</sup>, Gill et al. (2007) ont démontré que l'ajout de 10 % d'espaces verts au centre-ville et dans les secteurs résidentiels de haute densité permettait de réduire les températures maximales de surfaces (2,4 °C à 2,5 °C en 2080) à un niveau inférieur ou à égale à la période 1961-1990 (27,9 °C). Ces températures seraient

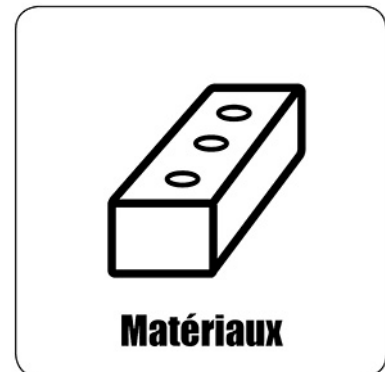
<sup>33</sup> The models were run for the baseline 1961–1990 climate, as well as for the UKCIP02 Low and High emissions scenarios for the 2020s, 2050s, and 2080s (Hulme et al., 2002).

autrement amenées à augmenter compte tenu du réchauffement climatique. Ils ont également mis en évidence qu'une réduction de 10 % du couvert naturel dans les mêmes secteurs se traduirait par une hausse de la température maximale des surfaces variant entre 7 °C et 8,2 °C en 2080.

Rosenzweig et al. (2006) ont évalué et comparé l'efficacité de différentes mesures d'adaptation appartenant aux leviers d'action « couvert naturel » et « matériaux » pour atténuer l'effet d'ICU sur le territoire de la région métropolitaine de New York. L'étude a utilisé un modèle régional du climat (MM5) en combinaison de données météorologiques, satellitaires et géospatiales pour simuler l'impact de chaque mesure sur la température des surfaces et sur celle de l'air ambiant. Les résultats ont établi que les mesures de végétalisation (plantations, toitures végétalisées, parcs, etc.) étaient plus efficaces pour rafraîchir les surfaces qu'une augmentation de leur albédo; la plantation d'arbres en bordure de trottoir étant le moyen de mise en oeuvre le plus performant. En revanche, compte tenu du contexte fortement urbanisé de New York, seuls 17 % du territoire pourrait accueillir de nouveaux arbres tandis que 64 % est propice au remplacement des matériaux de revêtement existants par de nouveaux à l'albédo plus élevé. Ce contexte explique les résultats de l'étude; la plantation d'arbres prise isolément réduirait l'intensité de l'ICU de moins de 0,1 °F alors que la combinaison de plusieurs mesures de végétalisation et de remplacement de matériaux en diminuerait l'intensité de 0,4 °F. Ces résultats rappellent par ailleurs l'importance de choisir les mesures d'adaptation en fonction d'un contexte donné.

### 1.4.3 Matériaux de revêtement

Le troisième levier d'action rassemble toutes les interventions relatives au choix des matériaux de revêtement urbains. Pour contrer le changement climatique et réduire l'exposition des villes des latitudes tempérées froides à la hausse des températures estivales, les architectes et les designers urbains peuvent en effet utiliser les matériaux pour réduire les émissions de GES dans le bâtiment en : 1) atténuant l'îlot de chaleur urbain et 2) en contribuant aux stratégies architecturales passives (Figure 17).

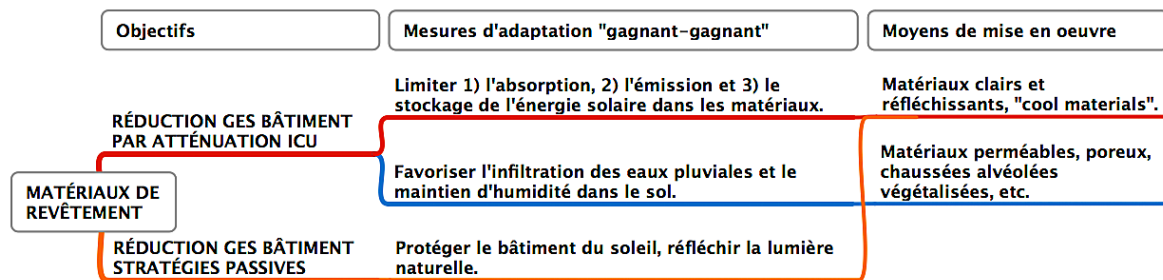


Les matériaux de revêtement participent à la formation d'un îlot de chaleur urbain à deux niveaux : ils modifient la part d'énergie solaire réfléchie, stockée et réémise dans l'atmosphère et altèrent l'infiltration des eaux pluviales dans le sol (section 1.2.1). Limiter l'absorption, l'émission et le stockage de l'énergie solaire dans la ville peut être réalisé en faisant un choix de matériaux de revêtement adaptés (Figure 17). Cette mesure « gagnant-gagnant » peut être facilement mise en oeuvre dans le cadre de nouvelles interventions ou d'interventions sur l'existant. L'exposition des matériaux de revêtement aux intempéries et aux écarts de températures particulièrement

importants dans les régions tempérées froides (60 à 70 °C) a en effet pour conséquence de restreindre leur durée de vie. À titre d'exemple, les toitures doivent souvent être remplacées tous les 20 à 30 ans selon les matériaux utilisés (Toiture Expert 2012). De même, les chaussées à revêtement souple (asphalte) se conservent généralement de 25 à 30 ans lors de leur construction, alors que les nouvelles couches ne perdurent guère au-delà de 14 ans (Transports Québec 2013). Dans le cadre du changement climatique, la durée de vie des chaussées pourrait être néanmoins réduite comme l'explique l'extrait suivant :

Les changements climatiques entraîneront vraisemblablement, une augmentation des cycles de gel-dégel, une modification de la profondeur du gel dans le sol et un accroissement de la présence d'eau sur la chaussée qui accentuent certains phénomènes de dégradation des revêtements (Desjarlais et al. 2010).

L'obligation de remplacer régulièrement les matériaux de revêtement des toitures et des chaussées constitue donc une opportunité majeure pour favoriser l'adaptation des villes tempérées froides à la hausse des températures estivales. De plus, puisque les toitures et les chaussées représentent plus de 60 % des surfaces horizontales situées dans les zones urbaines (toits 20 à 25 % et chaussées 40 %) (Akbari, Menon, et Rosenfeld 2009) l'étendue des mesures d'adaptation du levier d'action « matériaux » est sans équivoque.



**Figure 17 : Contributions potentielles des matériaux de revêtement à la mise en oeuvre de mesures d'adaptation « gagnant-gagnant ».**

Source : Catherine Dubois, 2014.

Plusieurs études ont démontré l'efficacité de certains matériaux de revêtement, caractérisés par un albédo et une émissivité élevés, d'amoinrir l'intensité d'un îlot de chaleur urbain (Akbari, Pomerantz, et Taha 2001; Doulos, Santamouris, et Livada 2004; Rosenfeld et al. 1998; Taha, Hammer, et Akbari 2002; Santamouris, Synnefa, et Karlessi 2011) . Les revêtements de toiture de couleur claire, comme les membranes élastomère EPDM blanche, présentent un albédo étant parfois 12 fois plus élevé que celui du même matériau, mais de couleur noire (Tableau 1). Les écarts de température mesurés entre la surface de ces toitures sont respectivement de 45 °C et de 14 °C (Liu 2006 dans Forkes 2010). L'albédo des chaussées de béton et d'asphalte est

généralement compris entre 0,04 et 0,45. L'été, la température à la surface de ces matériaux peut varier entre 48 °C et 67 °C (US EPA 2008; Doulos, Santamouris, et Livada 2004).

Les « cool materials » sont des matériaux qui incorporent des pigments colorés, mais qui présentent des propriétés radiatives similaires aux revêtements de couleur claire. Leur apparence est donc trompeuse. La température à la surface des « cool materials » est en effet inférieure à celle des matériaux standard similaires (couleur et texture) lorsqu'ils sont soumis au rayonnement solaire. À partir de mesures prises l'été à Athènes sur 10 enduits différents, Synnefa et al. (2007) ont démontré que la température à la surface des enduits classiques était de 10 °C supérieurs à celle des enduits de type « cool » de la même couleur. À La Rochelle, Doya (2010) a relevé des écarts de température compris entre 2 et 8 °C pendant 10 à 20 % du temps d'exposition pour des peintures de type « cool » appliquées sur des façades.

À l'échelle urbaine, les matériaux de revêtement caractérisés par un albédo et une émissivité élevés contribuent à la réduction de la température de l'air ambiant et de l'ICU et ainsi à l'amélioration du confort thermique extérieur (Synnefa, Santamouris, et Apostolakis 2007; Akbari, Menon, et Rosenfeld 2009). Plusieurs projets de recherche ont par ailleurs démontré la performance de nouveaux enduits colorés apposés sur des chaussées asphaltées existantes (Kinouchi et al. 2004; Synnefa et al. 2011; Wan et al. 2009). Les résultats révèlent une augmentation sensible de l'albédo des chaussées, une diminution de la température de surface comprise entre 5 °C et 17 °C et une diminution de la température ambiante pouvant atteindre 5 °C lors de journées chaudes et sans vent. Santamouris et al. (2012) ont quant à eux évalué l'impact d'un revêtement de chaussée de type « cool » de 4500 m<sup>2</sup> sur les températures ambiantes mesurées dans un parc d'Athènes. Les réductions maximales relevées l'été s'élèvent à 1,9 °C.

Comme le rappelle la Figure 17, l'application de « cool materials » sur les murs et les toitures d'un bâtiment améliore sa capacité de se protéger du soleil. Ce moyen de mise en oeuvre contribue au refroidissement passif du bâtiment. Il a notamment pour effet de réduire la consommation et la demande énergétique de pointe requises par la climatisation et d'augmenter le niveau de confort dans les bâtiments non climatisés (Akbari et Konopacki 2005; Levinson et al. 2005; Zinzi, Carnielo, et Agnoli 2012). Plusieurs expériences conduites en Floride et en Californie sur des résidences unifamiliales ont par ailleurs démontré que l'apposition d'un enduit blanc sur des toitures existantes avait réduit la consommation d'électricité dédiée à la climatisation de 2 % à 63 % (Konopacki et al. 1998).

L'ensemble de ces résultats a toutefois été obtenu à des latitudes bien inférieures à celles des villes tempérées froides qui doivent composer avec un climat beaucoup plus rigoureux, des

accumulations de neige importantes et des étés plus courts. Les données expérimentales colligées dans le cadre du projet « Cool Roofs » de la Commission européenne ont pourtant démontré l'impact positif de ce type de toiture pour des bâtiments situés jusqu'à la latitude de Londres (51° 30' N) (Synnefa et Santamouris 2012). Ces derniers ne subiraient pas d'augmentation significative de leur consommation d'énergie l'hiver (Moghaddaszadeh Ahrab et Akbari 2013), car : 1) l'albédo d'une couverture enneigée est supérieure à celle des « cool roofs », 2) ce type de toiture est surtout efficace lorsque l'angle d'incidence du rayonnement solaire est élevé, or il ne l'est pas dans les latitudes tempérées l'hiver sans compter que les heures d'ensoleillement y sont passablement réduites pendant cette saison.

Les matériaux de revêtement des chaussées peuvent également atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain en favorisant l'infiltration des eaux pluviales *in situ* (Figure 17). Les chaussées perméables<sup>34</sup>, poreuses<sup>35</sup>, celles qui ont la capacité de retenir l'eau (« *water retaining materials* ») et les chaussées alvéolées végétalisées, utilisent l'évaporation de l'eau pour abaisser la température à leur surface et celle de l'air ambiant. Les pores, voire les interstices présents dans ces matériaux permettent à l'eau de pluie de s'infiltrer directement dans le sol. Il existe plusieurs matériaux perméables, poreux et qui sont en mesure de retenir l'eau : béton, asphalte, céramique, pavage autobloquant et unités de plastique ou de béton interconnectées remplies de gravier (Hunt et Collins 2008). Le potentiel de rafraîchissement de l'air de chaque matériau est largement dépendant de ses caractéristiques et des conditions limites dans lesquelles ont lieu les expérimentations. Santamouris (2013), dans un état de l'art sur le sujet, relève plusieurs résultats contradictoires. Il cite en exemple Yilmaz et al. (2008) qui rapportent des températures supérieures à la surface d'une chaussée de béton perméable comparativement à une chaussée de béton ordinaire et l'équipe de Hoyano et al. (2011) qui conclut au contraire que les premières demeurent plus fraîches de 4 °C. En revanche, le potentiel de rafraîchissement des pavés végétalisés est corroboré par de nombreuses études; la température mesurée à leur surface étant bien inférieure à tout autre matériau de revêtement utilisé pour les chaussées (Takebayashi et Moriyama 2012; Herb et al. 2008). Aussi, bien que l'impact réel des matériaux perméables ou poreux sur l'atténuation de l'ICU ne soit pas démontré hors de tout doute, ils constituent néanmoins une solution acceptable pour réduire le ruissellement et amoindrir le risque d'inondations urbaines.

Au niveau des propriétés thermiques des matériaux de revêtement, les mesures d'adaptation sont beaucoup plus limitées. Plusieurs matériaux utilisés pour la construction d'infrastructures et des chaussées sont caractérisés par une inertie thermique élevée. Ces matériaux, dont le béton est sans doute le plus représentatif, sont choisis la plupart du temps pour leur capacité structurelle, leur

---

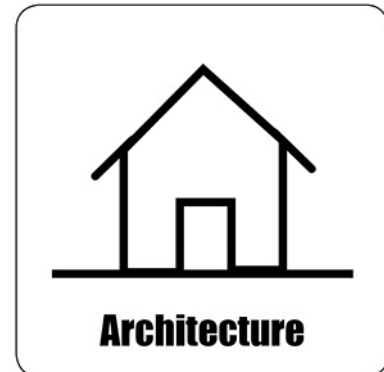
<sup>34</sup> L'eau traverse le matériau par une série de pores ou de trous interconnectés.

<sup>35</sup> L'eau ne traverse pas forcément le matériau, mais peut s'y déposer dans les pores.

faible coût et leur durabilité. Leur remplacement par des matériaux de faible inertie (bois, acier, etc.) est souvent impossible dans l'état actuel des choses. Aussi, pour limiter l'absorption de chaleur par ce type de matériaux, les architectes et les designers urbains devraient travailler sur leurs propriétés radiatives (albédo élevé), limiter leur exposition au rayonnement solaire direct par des dispositifs d'ombrage architecturaux ou naturels et faciliter le refroidissement radiatif par des interventions au niveau de la forme urbaine.

#### 1.4.4 Architecture

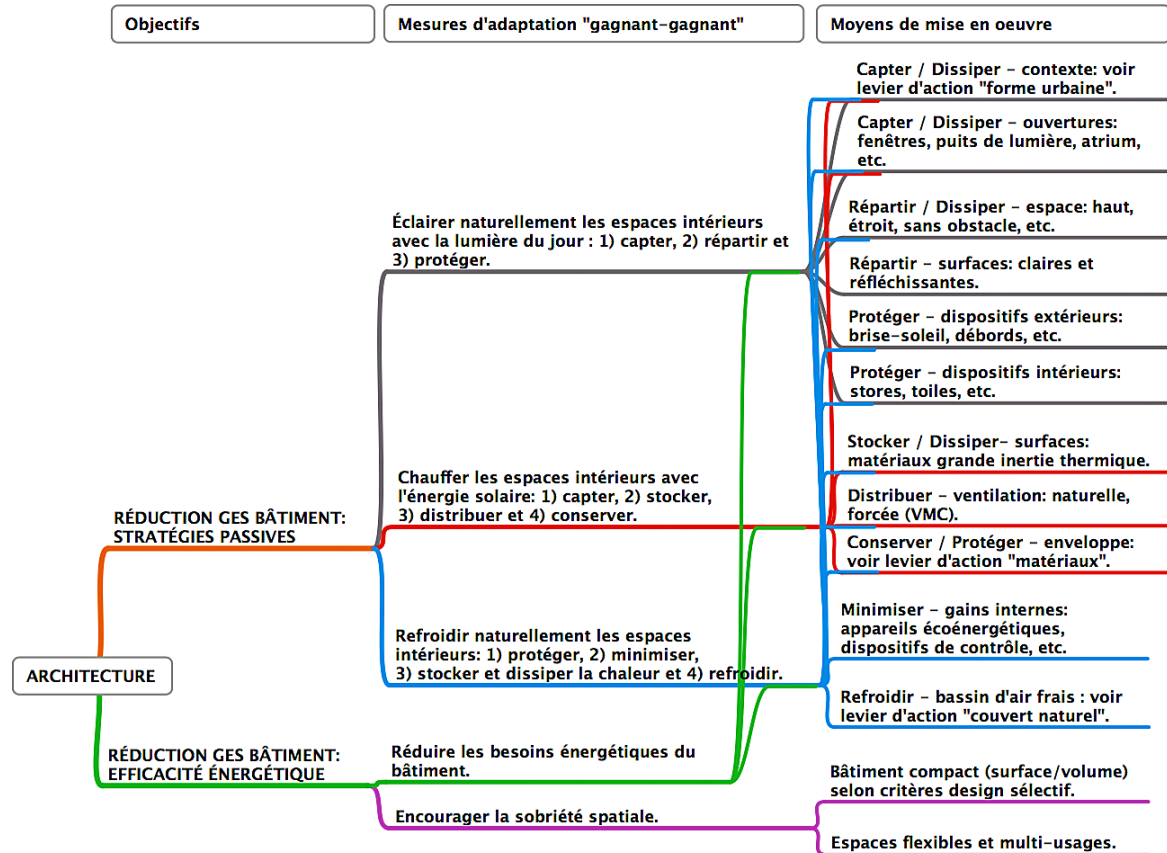
Le quatrième levier que les professionnels du bâtiment peuvent utiliser pour lutter et s'adapter au changement climatique est l'architecture proprement dite. Les contributions potentielles de l'architecture à la mise en oeuvre de mesures d'adaptation « gagnant-gagnant », sont la réduction des émissions des GES dans le bâtiment par 1) l'intégration de stratégies architecturales passives et 2) par l'amélioration de l'efficacité énergétique des constructions (Figure 18).



Les choix architecturaux sont déterminants des besoins énergétiques d'un bâtiment. L'orientation, la forme, la compacité, l'enveloppe, les équipements et le rapport d'un bâtiment avec l'extérieur sont des caractéristiques qui influencent les gains et les déperditions thermiques. Ils agissent également sur la capacité du bâtiment de créer des espaces confortables sans avoir recours aux systèmes mécaniques et électriques par le biais des trois stratégies passives suivantes : l'éclairage naturel, le chauffage solaire et le refroidissement passifs. L'échelle d'intervention de l'architecture est moindre que celle de la forme urbaine, mais elle s'applique en revanche à un très grand nombre de constructions à court, moyen et long terme. À ce sujet, Smith et Levermore (2008) insistent sur la responsabilité des designers d'anticiper aujourd'hui les conditions climatiques futures, car la durée de vie moyenne des bâtiments s'établit entre 20 et 100 ans.

Employer l'architecture pour favoriser l'adaptation au changement climatique, par l'introduction de stratégies passives et de mesures d'efficacité énergétique, requiert l'apport de plusieurs mesures d'adaptation complémentaires. En effet, comme l'illustre la Figure 18, l'objectif de réduire les besoins énergétiques du bâtiment peut être notamment atteint par la mise en oeuvre des stratégies d'éclairage naturel, de chauffage solaire et de refroidissement passifs. En guise d'exemple, le contexte naturel et urbain d'un bâtiment détermine sa capacité de capter l'énergie solaire pour se chauffer, la lumière du jour pour s'éclairer et le vent pour se rafraîchir. La dimension, la répartition et l'orientation des ouvertures du bâtiment sont aussi capitales au fonctionnement des trois stratégies. La Figure 18 expose plusieurs autres situations semblables.





**Figure 18 : Contributions potentielles de l'architecture à la mise en oeuvre de mesures d'adaptation « gagnant-gagnant ».**

Source : Catherine Dubois, 2014.

Les nombreuses synergies mises en évidence par la Figure 18, soulignent aussi l'importance pour l'architecte d'adopter un mode de conception holistique. L'architecture bioclimatique repose en effet sur l'adéquation entre le climat, le bâtiment et l'occupant. Les stratégies passives permettent d'optimiser les apports de l'environnement extérieur par le biais de l'architecture, pourvu que les occupants y soient actifs. Leur interaction avec le bâtiment est souvent essentielle et leur capacité de s'adapter à des conditions intérieures plus fluctuantes tout autant. La conception d'un bâtiment bioclimatique est donc plus exigeante que celle d'un bâtiment classique. En revanche, elle peut engendrer des économies d'énergie pouvant aller jusqu'à 75 % voire davantage en comparaison des pratiques actuelles, et ce, sans coûts supplémentaires ou avec un coût supplémentaire minime (GIEC 2007b).

Dans un contexte d'atténuation des changements climatiques dans les villes tempérées froides, l'implantation de moyens supportant le chauffage solaire passif ainsi que la sobriété spatiale et énergétique des constructions est essentielle étant donné la rigueur du climat. Au Québec, le chauffage représente près des deux tiers de la demande actuelle d'énergie (Desjarlais et al. 2010).

Dans un contexte d'adaptation au changement climatique, ces villes doivent toutefois développer des stratégies à l'échelle urbaine et architecturale pour s'ajuster aux températures estivales plus élevées. Le refroidissement passif est la principale stratégie permettant d'y arriver, mais l'éclairage naturel est aussi appelé à jouer un rôle important.

Les méthodes pour refroidir passivement un bâtiment se résume en quatre principes : i) réduire les températures extérieures par le contrôle des microclimats urbains (leviers d'action « forme urbaine », « couvert naturel » et « matériaux »), ii) le protéger du rayonnement solaire pendant la saison chaude, iii) minimiser les gains thermiques internes et iv) dissiper la chaleur par la ventilation naturelle. Seules les mesures d'adaptation « gagnant-gagnant » relatives au levier d'action « architecture » sont toutefois présentées dans cette section.

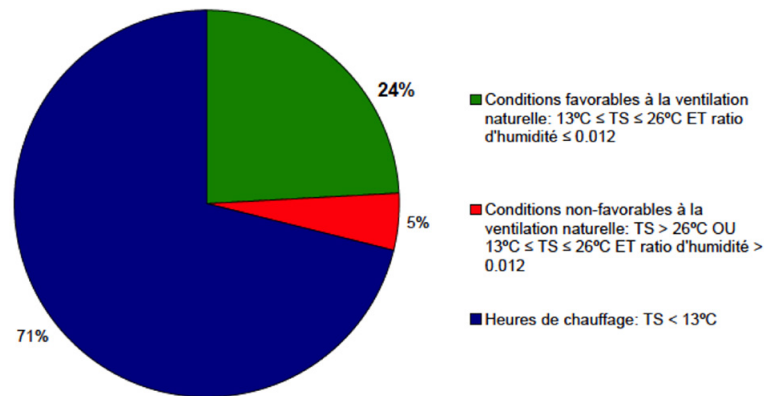
Protéger le bâtiment de l'ensoleillement direct l'été serait le moyen passif le plus performant pour minimiser les impacts négatifs du changement climatique sur le confort des occupants et sur sa consommation d'énergie. De manière plus exacte, l'implémentation de dispositifs d'ombrage contrôlés par les occupants serait la manière la plus efficace d'adapter les immeubles résidentiels anglais à la hausse des températures estivales. C'est du moins l'une des conclusions de l'étude menée à Oxford par Gupta et Gregg (2012). Les chercheurs ont en effet testé l'efficacité de plusieurs mesures d'adaptation à la hausse des températures estivales : matériaux réfléchissants, murs et toitures végétalisés, double-peau, augmentation de l'isolation et de l'étanchéité de l'enveloppe, ventilation naturelle, hybride, mécanique, etc. Ces résultats ont été obtenus à partir de simulations thermiques dynamiques effectuées sur 4 bâtiments représentatifs des banlieues anglaises. Les données climatiques employées par les simulations sont celles du « *UK Climate Change Projections 2009* <sup>36</sup> ».

Minimiser les gains thermiques internes par le biais de l'architecture se résume à prioriser les appareils écoénergétiques, à instaurer des dispositifs de contrôle des systèmes mécaniques et électriques et à optimiser l'éclairage naturel des bâtiments (Figure 18). Les systèmes d'éclairage artificiel courants produisent de la lumière et de la chaleur parce qu'ils sont généralement peu efficaces. L'éclairage naturel, allié au contrôle de l'éclairage artificiel, permet de réduire cette chaleur et de réaliser de substantielles économies d'énergie. De fait, les charges d'éclairage des bureaux éclairés naturellement requièrent jusqu'à 25 % de moins de densité de puissance installée ( $W/m^2$ ) et consomment jusqu'à la moitié moins d'électricité pour l'éclairage grâce à l'emploi de systèmes de contrôle lumineux appropriés (Travaux publics Canada, 2002).

---

<sup>36</sup> <http://ukclimateprojections.metoffice.gov.uk/>

L'architecture influence également la capacité d'un bâtiment de dissiper la chaleur qu'il a accumulée en son sein par le biais de la ventilation naturelle. D'après une étude réalisée par Boivin (2007), les conditions climatiques actuelles de la région de Québec seraient favorables à la ventilation naturelle des bâtiments 24 % du temps d'occupation annuelle (Figure 19). Dans un contexte de réchauffement climatique, cette proportion pourrait toutefois changer. Deux études britanniques suggèrent à cet effet que la ventilation naturelle est une mesure d'adaptation viable pour les 50 prochaines années au minimum, mais guère au-delà de 2080 (Holmes et Hacker 2007; Gupta et Gregg 2012). Il n'existe pas d'étude comparable pour le climat québécois, mais la réduction de l'efficacité à long terme de la ventilation naturelle pourrait aussi être avérée si la température et l'humidité de l'air ambiant devenaient l'été trop élevées. En revanche, l'augmentation des températures annuelles pourrait aussi étendre la période de refroidissement au printemps et à l'automne. Cette hypothèse doit cependant être vérifiée.



**Figure 19 : Distribution annuelle de la demande énergétique des bâtiments en fonction de la température extérieure de la région de Québec.**

Source : Boivin, 2007.

Les systèmes de climatisation sont un moyen efficace de réduire la température interne des bâtiments et de maintenir les occupants dans des conditions confortables sans égard pour les conditions climatiques extérieures actuelles et futures. Ils ne constituent pas une mesure d'adaptation « gagnant-gagnant » pour autant. Tout d'abord, la plupart des systèmes de climatisation emploient des fluides frigorigènes (HCFC, HFC), des gaz à effet de serre, pour produire l'air frais (Déoux 2004). Cette production alimente aussi le phénomène d'îlot de chaleur urbain parce qu'elle provoque des rejets d'air chaud dans l'atmosphère de la ville (INSPQ 2010; Kikegawa et al. 2006). En outre, les systèmes de climatisation requièrent un apport d'énergie pour fonctionner, qui souvent est issu de combustibles d'origine fossile (Klein et Tol 1997; Smith et Levermore 2008). À cet égard, le Québec fait figure d'exception puisque 98 % de son électricité est d'origine hydroélectrique (Hydro-Québec 2013). En revanche, une dépendance trop importante des systèmes de climatisation accroît la vulnérabilité de la population par rapport au changement

climatique, car certains événements météorologiques extrêmes peuvent endommager les réseaux de distribution d'électricité et donc priver les bâtiments de leur seul moyen de se rafraîchir (Roaf, Crichton, et Nicol 2009). À cet égard, les régions de Montréal et de New York se souviennent encore des graves répercussions qu'engendrèrent des pannes majeures d'électricité causées dans un cas par une tempête de verglas<sup>37</sup> et dans l'autre par la foudre<sup>38</sup>.

Étant donné le besoin d'adapter les bâtiments à la hausse des températures estivales et reconnaissant : 1) que la climatisation n'est pas une mesure « gagnant-gagnant » et 2) que la ventilation naturelle prise isolément ne sera pas en mesure de les refroidir passivement indéfiniment, quelles sont les solutions valables qui sont offertes par le levier « architecture »? D'abord, tous les moyens contribuant au refroidissement passif (protection, minimisation, ventilation, etc.) et à l'efficacité énergétique des constructions peuvent constituer de telles solutions (Figure 18). De même, l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain, obtenue par la manipulation des trois autres leviers d'action, est souhaitable. Enfin, l'adoption par les architectes d'un mode de conception intégré, réalisé en collaboration avec des collègues ingénieurs, designers et gestionnaires, constitue aussi une solution éprouvée pour garantir le confort des occupants d'un bâtiment l'été sans contrevenir aux mesures de lutte au changement climatique.

## 1.5 Conclusion du premier chapitre

Le premier chapitre a fait état du contexte et des principaux enjeux de la recherche : l'adaptation des villes tempérées froides au changement climatique. Bien que ce dernier soit un phénomène mondial, les villes y participent en raison des grandes quantités de gaz à effet de serre (GES) émises sur leur territoire. Elles présentent également une sensibilité particulière à l'égard de plusieurs des impacts appréhendés du changement climatique. Dans le cas précis des villes des latitudes tempérées froides, la hausse des températures estivales, qui exacerbe le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU), a été identifiée comme étant particulièrement préoccupante. L'ICU a de nombreux impacts sanitaires, énergétiques et environnementaux. Les principaux facteurs déterminant sa formation et son intensité ont été présentés. La Communauté métropolitaine de Québec (CMQ), une métropole des latitudes tempérées froides sert de contexte à la recherche. La présentation de trois études réparties sur trente ans démontre que certains secteurs sont déjà affectés par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Leur situation pourrait empirer avec la hausse des températures estivales moyennes et extrêmes. L'atténuation de l'ICU est donc un enjeu important pour les villes tempérées froides. Les bâtiments et les espaces publics sont conçus d'abord pour lutter contre les hivers rigoureux. Les adapter à des étés plus longs et plus chauds

---

<sup>37</sup> [http://archives.radio-canada.ca/environnement/catastrophes\\_naturelles/clips/1326/](http://archives.radio-canada.ca/environnement/catastrophes_naturelles/clips/1326/)

<sup>38</sup> <http://www.cnn.com/2003/US/08/14/power.outage/>

