

Université de Montréal

**LE TOIT COMME OUTIL DE RÉGULATION ENVIRONNEMENTALE :
LE CAS MONTRÉALAIS**

par
Zoubeir Azouz

Faculté de l'Aménagement

Mémoire présenté à la Faculté de l'Aménagement
en vue de l'obtention du grade de M.Sc.A.
en Aménagement

Décembre 2014

© Zoubeir Azouz, 2014

Résumé

Cette recherche s'inscrit dans le cadre du programme interdisciplinaire de recherche *Ignis Mutat Res*¹ et vise à éclairer l'univers de l'architecture sur la capacité des toits à amener des solutions efficaces aux problématiques environnementales dans un contexte urbain dense et à forte consommation d'énergie (Prochazka et Breux, 2011). La volonté de réduire l'empreinte écologique des villes est aujourd'hui bien présente dans le monde de la recherche architecturale et urbaine (Venetoulis et Talberth, 2008), ayant ainsi fait preuve de son importance (Barrett, Birch, Cherrett et Wiedmann, 2005). Pourtant, la réduction de l'empreinte écologique des villes serait une approche globale difficile à quantifier économiquement (Van den Bergh et Verbruggen, 1999). Le manque de méthodologie standardisée fait en sorte que les travaux sur le sujet empruntent des démarches qui ne dépassent pas l'étape exploratoire (Uhde, 2009). Dans ce contexte, le mémoire porte sur l'élaboration d'un dispositif numérique d'évaluation des potentialités des toits horizontaux comme un outil d'aide à la décision pour les interventions urbaines visant à réduire l'empreinte écologique des villes, en utilisant le cas de Montréal. Ce type de toit est abordé comme un territoire d'investigation en contribution aux préoccupations liées à la gestion de l'eau et à l'atténuation des îlots de chaleur. Plus précisément, cette recherche porte sur trois secteurs de l'île de Montréal. Ces échantillons correspondent à deux types de formes urbaines (résidentielle versus commerciale ou industrielle) et sont décortiqués dans le but d'identifier les déséquilibres entre les espaces naturels, faisant référence aux espaces verts (jardins, parcs et canopées) et les étendues minérales occasionnées par l'urbanisation. Ces rapports exprimés en superficies démontrent que l'étendue des toits est assez considérable pour compenser le manque d'espaces naturels en ville. La végétalisation des toits à l'échelle d'un secteur pourrait donc atténuer considérablement les problèmes environnementaux liés aux îlots de chaleur et à la gestion du ruissellement des eaux de pluie. La stratégie consistant à explorer l'hypothèse des 50 % de naturel versus 50 % de minéral pourrait contribuer grandement à l'autonomisation des villes et à la diminution de leurs dépendances vis-à-vis des ressources fossiles.

Mots-clés : empreinte écologique, toit végétal, îlot de chaleur, eau de pluie.

¹Le programme interdisciplinaire de recherche *Ignis Mutat Res : L'épiderme aérien des villes au regard de la question de l'énergie et des modes de vie : « Learning from » Chicago, Montréal, Paris.* (2011-2013), Ministère français de la Culture et de la Communication et Atelier International du Grand Paris.

Abstract

This research is part of the interdisciplinary research program *Ignis Mutat Res*² and aims to inform the world of architecture on the potential of roofs to bring effective solutions to environmental problems in a dense urban setting with high energy consumption (Prochazka and Breux, 2011). The need to reduce the ecological footprint of cities is now greatly present in the world of architectural and urban research (Venetoulis and Talberth, 2008), having previously demonstrated its importance (Barrett, Birch, Cherrett and Wiedmann, 2005). However, the reduction of the ecological footprint of cities remains a difficult global approach to quantify economically (Van den Bergh and Verbruggen, 1999). The lack of standardized methodology maintain the studies on the subject at a perpetual exploratory stage (Uhde, 2009). In this context, the research focuses on the development of a digital system to assess the horizontal roofs' potentiality as a decision making support tool for urban interventions to reduce the ecological footprint of cities, using in this case the city of Montreal. This type of roof is considered as an area of investigation in relation to concerns associated to water management and mitigation of heat islands. Moreover, this research focuses on three areas of the island of Montreal. These samples correspond to two types of urban typologies (residential versus commercial or industrial) which are dissected in order to identify imbalances between natural, referring here to green areas (gardens, parks and canopies) and mineral surfaces caused by urbanization. These balances or imbalances expressed in ratios between types of surfaces demonstrate that the roof area is broad enough to compensate for the lack of natural areas in the city. Roof greening across a sector could therefore significantly reduce the environmental issues associated with heat islands and managing runoff of rainwater. The strategy brought forward is to explore the hypothesis of a balance of 50 % of green versus a 50 % of mineral, which could contribute greatly to the empowerment of cities and the reduction of their fossil fuel dependency.

Keywords : ecological footprint, green roof, heat island, rainwater.

²The interdisciplinary research program *Ignis Mutat Res : The Urban Roofscapes in regard to Energy and Ecosystemic services : « Learning from » Chicago, Montreal, Paris.* (2011-2013), French Ministry of Culture and Communication and the *Atelier International du Grand Paris*.

Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des annexes.....	ix
Introduction.....	1
Chapitre 1 : Les problématiques environnementales des villes à forte consommation d'énergie en relation avec les toits urbains.....	4
1.1 Les types et fonctions du toit urbain.....	4
1.1.1 Les types de toits.....	4
1.1.2 Les usages potentiels des toits	6
1.2 Les enjeux environnementaux associés aux toits.....	7
1.2.1 L'empreinte écologique et la biocapacité des villes	7
1.2.2 Le phénomène d'îlot de chaleur.....	11
1.2.3 Le phénomène de ruissellement.....	13
1.3 L'état d'avancement des potentialités des toits face à ces enjeux	15
1.3.1 Économiser de l'énergie	16
1.3.2 Atténuer les îlots de chaleur.....	16
1.3.3 Ralentir le ruissellement	17
Chapitre 2 : La contribution des toits montréalais face aux défis environnementaux.....	19
2.1 Les problématiques environnementales de Montréal	19
2.1.1 L'empreinte écologique	20
2.1.2 Le phénomène d'îlot de chaleur.....	21
2.1.3 Le ruissellement des eaux de pluie	24
2.2 L'état de l'art des toits plats montréalais.....	26
2.2.1 L'évolution historique des toits montréalais.....	27
2.2.2 L'avènement des <i>plex</i> et la généralisation des toits plats	28
2.2.3 Des toits innovants à Montréal : retour d'expériences.....	30

Chapitre 3 : Objectifs de recherche et méthodologie	33
3.1 Les toits envisagés comme un instrument d’analyse urbaine.....	34
3.1.1 Identification de trois secteurs	34
3.1.2 Objectif 1 : calculer la superficie des toits.....	37
3.1.3 Objectif 2 : identifier la contribution environnementale des toits	39
3.2 Méthodologie : la synthèse des données collectées sur les secteurs étudiés	41
3.2.1 La collecte des données	41
3.2.2 Le croisement des données par la visualisation volumique	43
3.2.3 La mise à profit des observations sous forme systémique	44
Chapitre 4 : Présentation des résultats	46
4.1 L’objet de la recherche : trois secteurs situés sur l’île de Montréal	46
4.2 Les données collectées sur trois secteurs	51
4.3 Vérification et relevé de données complémentaires.....	54
4.3.1 Vérification des superficies.....	54
4.3.2 Présentation des données de températures et hydrométriques.....	58
Chapitre 5 : Portrait et potentialités des toits	65
5.1 Analyse des données	65
5.1.1 Comparatif des superficies.....	65
5.1.2 Les îlots de chaleur	66
5.1.3 Les eaux de ruissellement	66
5.2 Intégration des actions environnementales par la simulation des toits	67
5.2.1 La synthèse des données sous forme systémique	67
5.2.2 Simuler la diminution des îlots de chaleur.....	70
5.2.3 Simuler la gestion des eaux de pluie par les toits	77
Conclusion	79
Bibliographie	83
Annexes	xi

Liste des tableaux

Tableau 1 – Empreinte écologique et biocapacité par pays	10
Tableau 2 – Synthèse des connaissances sur les types de toits plats en relation avec l’effet d’îlot de chaleur et les eaux de ruissellement	44
Tableau 3 – Les données collectées auprès de la Ville de Montréal sur les trois secteurs	51
Tableau 4 – Synthèse des superficies déterminées à partir des maquettes numériques.....	54
Tableau 5 – Pourcentage des superficies minérales et naturelles sur les trois secteurs	54
Tableau 6 – Synthèse des données de températures sur les trois secteurs	59
Tableau 7 – Synthèse des volumes d’eau collectés sur les trois secteurs	60
Tableau 8 – Comparaison des superficies naturelles manquantes pour atteindre l’objectif des 60 % par rapport aux superficies de toits.....	70
Tableau 9 – Proportion de superficie naturelle afin d’atteindre l’équilibre de 50 %.....	71
Tableau 10 – Situation actuelle des superficies naturelles et minérales des secteurs à la situation possible avec la contribution des toits.....	72
Tableau 11 – Estimation de la baisse de température sur les trois secteurs.....	72
Tableau 12 – Estimation des volumes d’eau de ruissellement, d’infiltration et d’évapotranspiration sur les trois secteurs	77
Tableau 13 – Estimation des volumes d’eau retenus sur les trois secteurs, selon les types d’aménagement de toits	78

Liste des figures

Figure 1 – Détrempe de Vittore Carpaccio (1465-1525, Italie).....	5
Figure 2 – Empreinte écologique et biocapacité par région	9
Figure 3 – Tendances en température moyenne à la surface terrestre	12
Figure 4 – Modifications des paramètres hydrologiques dus à l’urbanisation	14
Figure 5 – Les atouts des toits végétalisés	15
Figure 6 – Effet de la végétation en milieu urbain.....	17
Figure 7 – L’empreinte écologique des villes canadiennes de Vancouver à Halifax	20
Figure 8 – L’impact des îlots de chaleur à Montréal	22
Figure 9 – La relation entre la température et l’indice de végétation à Montréal.....	23
Figure 10 – La gestion des eaux pluviales à Montréal.....	25
Figure 11 – Le système unitaire vs séparatif : le circuit montréalais de l’eau pluviale.....	25
Figure 12 – Illustration d’un système constructif répandu à Montréal	29
Figure 13 – Le « Transect »	35
Figure 14 – Trois exemples de densités et formes urbaines sur l’île de Montréal.....	36
Figure 15 – Comparaison de l’immeuble de grande hauteur, des maisons de ville et des bâtiments collectifs pour une même densité bâtie à l’échelle d’un l’îlot de même dimension.....	39
Figure 16 – Les systèmes d’information géographique sur l’interface ArcGIS	41
Figure 17 – Extrait des orthophotographies.....	42
Figure 18 – Extrait des cartographies des températures	42
Figure 19 – Imprimé-écran de l’interface Rhino3d représentant la maquette numérique	43
Figure 20 – Localisation des trois secteurs sur l’île de Montréal sur une image satellite	47
Figure 21 – Vue aérienne et image satellite du secteur Pointe-Claire	48
Figure 22 – Vue aérienne et image satellite du secteur Anjou	49
Figure 23 – Vue aérienne et image satellite du secteur centre-ville	50
Figure 24 – Relevé des températures sur les trois secteurs.....	53
Figure 25 – Représentation du secteur Pointe-Claire	55
Figure 26 – Représentation du secteur Anjou.....	56
Figure 27 – Représentation du secteur centre-ville.....	57

Figure 28 – Illustration graphique des températures moyennes des secteurs	59
Figure 29 – Illustration graphique des quantités d’eau de ruissellement.....	60
Figure 31 – Représentation du secteur Anjou : synthèse des données des températures et hydrométriques	62
Figure 32 – Représentation du secteur centre-ville : synthèse des données des températures et hydrométriques	63
Figure 33 – Illustration graphique des températures moyennes des secteurs en fonction des superficies minérales et naturelles	68
Figure 34 – Illustration graphique des quantités d’eau d’infiltration, de ruissellement et d’évapotranspiration, en fonction des superficies minérales et naturelles.....	69
Figure 35 – Représentation du secteur Pointe-Claire, zones industrielle et résidentielle : la contribution des toits pour atteindre 50 % de superficies naturelles et 50 % des superficies minérales	74
Figure 36 – Représentation du secteur Anjou, zones industrielle et résidentielle : la contribution des toits pour atteindre 50 % de superficies naturelles et 50 % des superficies minérales	75
Figure 37 – Représentation du secteur centre-ville, zones commerciale et résidentielle : la contribution des toits pour atteindre 50 % de superficies naturelles et 50 % des superficies minérales	76

Liste des annexes

Annexe 1 – Références de localisation mondiales de l’île de Montréal.	xi
Annexe 2 – Les données collectées auprès de la Ville de Montréal sur les trois secteurs.....	xii
Annexe 3 – Relevé des superficies déterminées à partir des maquettes numériques.	xii
Annexe 4 – Calcul des superficies minérales et naturelles sur les trois secteurs.....	xiii
Annexe 5 – Relevé des températures sur les trois secteurs.....	xiii
Annexe 6 – Calcul des volumes d’eau de ruissellement sur les trois secteurs.	xiv
Annexe 7 – Situation actuelle des superficies naturelles et minérale des secteurs à la situation possible avec la contribution des toits: 60 % de superficie naturelle versus 40 % de superficie minérale.....	xiv
Annexe 8 – Situation actuelle des superficies naturelles et minérale des secteurs à la situation possible avec la contribution des toits: 50 % de superficie naturelle versus 50 % de superficie minérale.....	xv
Annexe 9 – Estimation des volumes d’eau de ruissellement, d’infiltration et d’évapotranspiration	xvi
Annexe 10 – Estimation des volumes d’eau retenus sur les trois secteurs, selon les types d’aménagement de toits: toits collecteurs, toits extensifs et intensifs	xvii

Remerciements

Je remercie ma directrice de recherche, Madame Marie Lessard pour son soutien à chaque instant, également pour avoir défendu mon parcours universitaire et m’ avoir transmis une base solide en méthodologie de recherche.

Je remercie ma codirectrice, Madame Alena Prochazka, de m’ avoir donné l’ opportunité de proposer ce sujet dans le cadre de la recherche multidisciplinaire *Ignis Mutat Res* et de m’ avoir introduit à son réseau de chercheurs qui fut profitable à mes travaux.

Je remercie Monsieur Benoit Gariépy, mon interlocuteur principal de la Ville de Montréal, qui m’ a introduit à ses collègues de la division des Données Géospatiales, dans le cadre de ma collecte des données sur les toits, sans qui ce mémoire n’ aurait pas été aussi enrichissant.

Introduction

Ce mémoire part d'une interrogation sur la capacité des toits à amener des solutions efficaces aux problématiques environnementales, dans un contexte urbain dense et à forte consommation d'énergie. L'étude porte sur Montréal et vise d'abord à faire le portrait encore inexistant de ses toits. Elle cherche aussi à identifier l'éventuelle influence des toits sur le déséquilibre environnemental en milieu urbain. Enfin, elle veut générer un dispositif numérique d'évaluation/simulation des potentialités des toits, en contribution à la régulation naturelle des écosystèmes urbains.

Cette recherche s'inscrit dans le cadre des travaux *Ignis Mutat Res* sur l'épiderme aérien des villes au regard de la question de l'énergie et des modes de vie. Les rencontres *Ignis Mutat Res* de l'Institut des Sciences de l'Environnement de l'Université du Québec à Montréal amorcent les bases d'un groupe de travail conjoint entre ses chercheurs et la Ville de Montréal, dans le but de générer des échanges de connaissances architecturales et urbaines communes.

Après la tenue de deux colloques à Paris sur la question des toits de Montréal, Chicago et Paris, dont l'un conjointement avec la Ville de Paris, et l'autre avec l'équipe élargie de la recherche *Ignis*, ce mémoire souhaite contribuer à sensibiliser les architectes et urbanistes dans le but d'intégrer cette « cinquième façade urbaine » dans la réflexion et l'expérimentation d'opportunités de réduction de dépenses d'énergie et de pollution, et d'atténuation de leurs impacts sur les changements climatiques. Nous avons eu plusieurs rencontres avec les membres de la division de la Géomatique de la Ville de Montréal. En nous communiquant des informations géospatiales relatives aux toits sur l'île de Montréal, les interlocuteurs rencontrés³ nous ont permis de faire un suivi et un traitement de données brutes qu'ils avaient recueillies à travers leur pratique professionnelle. L'analyse de ces données permettra de proposer, par la suite, un point de vue scientifique porteur d'innovation.

³ B. Gariépy, architecte, Section Expertise technique en bâtiment, Direction des stratégies et transactions immobilières de la Ville de Montréal, S. Sananikone, ingénieur, Direction des infrastructures et R. Mongeau, arpenteur-géomètre, chef de l'Équipe de la cartographie et des levés spéciaux, Division de la Géomatique de la Ville de Montréal.

L'appropriation de ce territoire aérien est envisagée dans ce mémoire à l'image du réseau souterrain montréalais. L'idée d'une ville intérieure a fait son chemin, celui de traverser plusieurs édifices par leurs sous-sols interconnectés, participant au réseau urbain montréalais à part entière :

La ville intérieure qui s'est développée au centre-ville de Montréal est un levier extraordinaire pour permettre à ce milieu de s'affirmer à l'échelle internationale comme un modèle de la nouvelle centralité mise de l'avant par la stratégie de développement durable.(Observatoire de la Ville Intérieure, 2006)

Il s'agit de s'inspirer de cette particularité souterraine spécifique à l'identité de Montréal, en proposant une image novatrice de la ville par ses toits, en prenant en compte leurs différents usages et leurs utilités potentielles. Cette singularité peut contribuer à l'évolution du paysage aérien de Montréal. Ce territoire peut couvrir plus de 30 % des surfaces horizontales d'une ville (Oberndorfer et al., 2007). Mais qui dit espace non utilisé dit surface disponible. Les contraintes d'une société en croissance poussent les planificateurs à se réinventer et à porter un regard nouveau sur cet espace insolite. C'est une surface privilégiée puisqu'elle est en hauteur et offre donc une vue dégagée, en retrait de la résonance de la rue. Ce dégagement permet de s'échapper du rythme effréné de la ville :

Par la rêverie et l'imaginaire, le toit dépasse les limites géométriques. Ouvrir le toit nourrit l'impression de faire partie d'un ordre plus vaste auquel on appartient. C'est reconnaître le besoin d'habiter un cosmos ouvert, et renouer le lien avec l'Univers. (Paquot, 2003)

Ce mémoire contient cinq chapitres :

1. En premier lieu, en vue d'atténuer l'empreinte écologique des villes à forte consommation d'énergie dans un contexte de crise écologique mondiale (Wackernagel et Rees, 1996), nous étudierons le potentiel des toits à amener des solutions environnementales.
2. Puis, l'étude contextuelle portera sur l'empreinte écologique de Montréal et sur la manière dont les toits peuvent proposer des solutions concrètes à l'échelle du territoire urbain. Plus précisément, deux paramètres environnementaux en rapport avec les toits sont retenus pour cette étude : les îlots de chaleur et le volume d'eau de ruissellement. Les toits visés

par cette recherche sont de configuration horizontale, caractéristique de la majorité du tissu construit de Montréal.

3. Une méthodologie de recherche est développée en conséquence : collecte de données sur plusieurs typologies de bâtiments de l'île de Montréal, élaboration d'hypothèses, échantillonnage (3 secteurs montréalais), analyse et extrapolation des données.
4. Ensuite, les résultats de la recherche seront illustrés à l'aide d'une maquette numérique d'évaluation/simulation des toits dans les trois secteurs choisis.
5. Puis, des pistes de solution environnementales concrètes offertes par les toits seront proposées.

En conclusion, nous ferons un sommaire des connaissances exposées dans ce mémoire et nous reviendrons sur la viabilité des solutions environnementales proposées par les toits. Puis, des pistes d'investigations seront proposées en continuité avec notre démarche exploratoire sur le potentiel des toits urbains.

Dans dix ans, tout le monde aura fait quelque chose avec son toit.

(J.-C. Cayla, Conseiller en aménagement, Service de la mise en valeur du territoire, Ville de Montréal, janvier 2012)

Chapitre 1 : Les problématiques environnementales des villes à forte consommation d'énergie en relation avec les toits urbains

Dans ce mémoire, la réduction de l'empreinte écologique de grandes villes est explorée à travers les potentialités des toits horizontaux. Cette approche par les toits est assimilée aux enjeux du design urbain, intégrant la conservation de l'environnement et la viabilité urbaine. Dans le sens où la réflexion et la pratique du design urbain se sont appropriées des notions d'écologie (éco-urbanisme, collectivités vertes, etc.) et ont mis en avant la concertation entre les acteurs (Lessard, 2010). Les deux variables à définir et à mettre en corrélation sont alors les toits et l'empreinte écologique. Dans ce chapitre, les variables sont définies et mises dans le contexte des villes denses et de leur situation actuelle. Dans un premier temps, les spécificités urbaines du toit horizontal seront définies et mises en relation avec la notion d'empreinte écologique d'une ville. De cette étude, deux phénomènes environnementaux serviront d'instruments de mesure : l'indice d'îlot de chaleur et le coefficient de ruissellement. Les recherches à ce sujet dans le monde seront illustrées par ces deux marqueurs environnementaux.

1.1 Les types et fonctions du toit urbain

Le toit est une surface recouvrant un édifice : « Couverture, ouvrage isolant un bâtiment par le haut, notamment fait d'un ou plusieurs versants pentus soutenus par une charpente : Toit de chaume, de tuiles, d'ardoises » (Larousse). La première fonction du toit est de protéger du soleil ou de la pluie. Cette fonction lui attribue des qualités d'abri, d'isolation, de robustesse et de pérennité. C'est ce rôle bien établi qui régule les normes de construction des toits des villes à travers le monde, en offrant à leurs habitants des espaces bien isolés, à l'abri du froid et des intempéries. Maintenant que les enjeux écologiques sont éminemment présents et que la population des villes ne cesse d'augmenter, la surface des toits, plats et pentus, se trouve à être revisitée, repensée et surtout valorisée, sans négliger ses qualités premières qui restent primordiales, la protection et l'isolation.

1.1.1 Les types de toits

Lorsque l'on demande à un enfant de dessiner une maison, on s'attend à une forme connue de tous, celle d'un rectangle surmonté d'un triangle. D'après Nils Ballhausen (2006, p. 52 et 53), l'élément décisif d'un dessin d'une maison est le triangle. Cette forme identifie la maison par son toit. Ce toit triangulaire désigne le toit en pente, une typologie développée en plusieurs variations

dans le monde et dont l'optimisation fut le résultat d'itérations depuis l'époque du Néolithique (Kozlowski et Desbrosse, 2001). Dans le contexte de concentration urbaine forte, cette typologie présente des difficultés d'appropriation de par sa géométrie. La pente rend peu utilisable l'espace des combles dont la superficie perdue devient un manque à gagner pour les citoyens. L'avènement des mansardes au 17^e siècle en France est un exemple de compromis géométrique: des combles brisés (Larousse) dont les pièces aménagées sont appelées « appartements mansardés ». Parallèlement, les toitures-terrasses correspondent communément à une architecture au climat tempéré : les premières maisons urbaines, à *patio*, sont à toiture plate et ont été construites en Mésopotamie depuis le quatrième millénaire (Joannès, 2001). Les premières appropriations des terrasses sur les toits sont identifiées dans les peintures vénitiennes, comme illustrée sur le détail de la peinture de Carpaccio (figure 1) : une plateforme en bois posée délicatement sur un toit en pente pour gagner de l'espace supplémentaire. D'après Christopher Alexander, cet ajout vénitien appelé *altana* est un lieu social qui permet de « prendre un repas, un bain de soleil ou pour regarder les étoiles ». Il s'agit d'une surélévation construite depuis plus de 700 ans et qui s'est généralisée comme un *pattern* de manière empirique (Alexander, 1977). La pose de cette structure supplémentaire sur le toit décrit un facteur de progrès urbain. La solution de l'*altana* s'est imposée durablement et a répondu à un besoin spatial. Au-delà de la création de superficies supplémentaires en hauteur, cette manière de s'approprier les toits est observée à travers ce mémoire dans le but d'identifier des procédés urbains générateurs de solutions face aux problématiques environnementales.

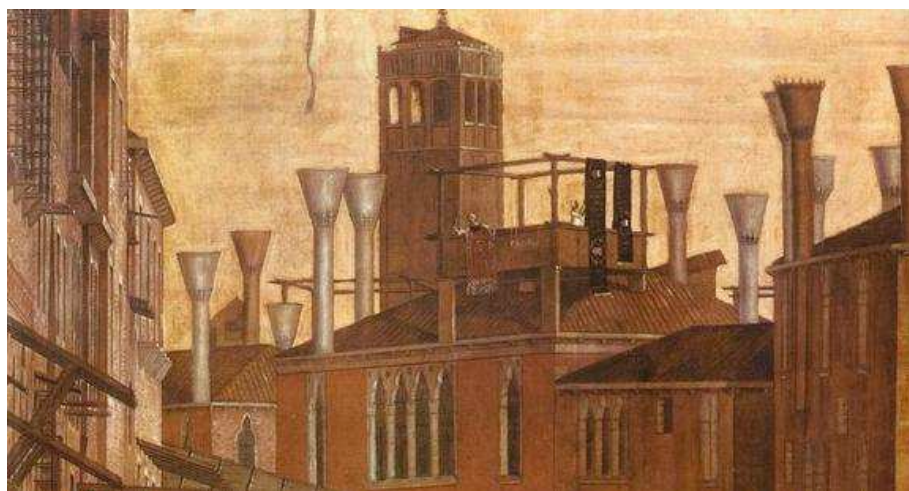


Figure 1 – Détrempe de Vittore Carpaccio (1465-1525, Italie)
La guérison du Fou (détail), Galerie de l'Académie, Venise

1.1.2 Les usages potentiels des toits

Les multiples usages des toits urbains font désormais partie des préoccupations des projets d'architecture et d'urbanisme durables, particulièrement dans un contexte de changements climatiques accélérés par la réduction de la biodiversité et de la diminution des matières fossiles et de pressions foncières. Ces usages contribuent à atténuer l'impact des îlots de chaleur, réduisent la consommation d'énergie des bâtiments et participent à la gestion du ruissellement des eaux de pluie. Ils peuvent aussi permettre d'accroître les surfaces habitables et d'élargir les espaces de jardin, ou de loisirs, autant de potentialité que de surfaces à développer. Cinq types de toitures sont identifiés :

- Les toits récepteurs, dans le but d'atteindre l'efficacité énergétique : les capteurs solaires, les installations éoliennes, les cheminées solaires et autres dispositifs de ventilation naturelle, recyclage, traitement, mutualisation des services et autres. (Wong, 2006)
- Les toits conviviaux, habités ou surélevés: la superposition des fonctions ou l'approche « ville dans la ville » par la surélévation, l'ajout d'un ou plusieurs étages. C'est un contexte propice à la requalification des bâtiments existants et à la valorisation architecturale par l'affectation de nouvelles fonctions sur les toitures de bâtiments en friche, ce qui augmente la surface habitable et infrastructure en hauteur. (Gariépy, 2012)
- Les toits végétalisés, qui se subdivisent en deux catégories : les toits extensifs, soit une plus fine épaisseur de terre et des plantes résistantes, généralement non accessibles, et les toits intensifs ou semi-intensifs, soit une plus grande épaisseur de terre, souvent un système d'irrigation sophistiqué et des plantes adaptées à ce procédé. (Jacquet, 2011)
- Les toits nourriciers qui contribuent à une activité de production vivrière et agricole en milieu urbain à part entière, où les produits se retrouvent dans le circuit alimentaire citoyen. Cela permet de s'interroger sur le système de consommation établi et sur les excès de distances parcourues par les aliments consommés quotidiennement. (Trottier, 2008)
- Les toits équipements, dont les édicules ont un impact esthétique et sur la santé: antennes, champs magnétiques, systèmes mécaniques, etc. (Fournier, 2010)

Certaines de ces catégories de toits sont liées à la problématique des enjeux environnementaux : ils contribuent à la régulation naturelle des villes en transformant l'énergie solaire ou en récupérant l'eau de pluie. Les toits récepteurs participent aussi à l'autonomie des villes en mettant

cet apport énergie-eau au profit de l'équilibre ville-nature : en créant des toits verts, producteurs de nourriture, dans un contexte de densité urbaine où le peu de terrains vacants fait l'objet de spéculations foncières qui ne laissent pas de place au développement de nouveaux jardins.

1.2 Les enjeux environnementaux associés aux toits

La surconsommation d'énergie amène une multitude de défis de société qui incitent à repenser l'espace. Cette pression croissante à laquelle les grandes villes font face évolue au regard des réalités changeantes des territoires et des écosystèmes, telles que la saturation des espaces limitrophes, la pression foncière, la rareté des terrains constructibles et la réduction des réserves de parcelles nourricières sur la planète, qui sont toutes des contextes où l'usage des toits peut participer à la densification urbaine (Secchi et Vigano, 2010). Ces enjeux auxquels les grandes villes du monde font face sont mesurés par leur empreinte écologique. Cette notion correspond à un indicateur qui permet de mesurer « la surface de terre et le volume d'eau biologiquement actif requis pour produire les ressources renouvelables que la population utilise, et qui inclut l'espace nécessaire pour les infrastructures et la végétation qui absorbe le dioxyde de carbone rejeté » (WWF International, 2010, p. 8). Dans le cas d'une urbanisation forte, ces espaces nécessaires ne sont pas mobilisés et des phénomènes environnementaux négatifs apparaissent à cause d'une activité humaine excessive vis-à-vis de son milieu naturel. Dans la situation actuelle, il est indispensable de repenser, redéfinir et maximiser l'espace urbain par les toits, pour ainsi offrir des solutions concrètes et durables aux problèmes environnementaux et énergétiques.

1.2.1 L'empreinte écologique et la biocapacité des villes

Le Global Footprint Network définit l'empreinte écologique comme « la surface biologiquement productive de terre et d'eau dont un individu, une population humaine ou une activité a besoin pour produire les ressources qu'il consomme et absorber les déchets qu'il génère en utilisant les technologies et les pratiques de gestion des ressources existantes » (Zuinen, 2010, p. 6 et 7).

Ce terme renvoie à l'utilisation qui est faite de la surface terrestre. Il englobe des ressources (renouvelables ou fossiles) utilisées et des déchets provenant de cette utilisation. Ces paramètres sont calculés et exprimés en hectares globaux (hag). La productivité de cette superficie est associée à la productivité moyenne de la planète : « un hectare global est un hectare avec une capacité de production de ressources et d'absorption de déchets correspondant à la moyenne mondiale » (WWF International, 2006, p. 14). L'impact environnemental représente l'ensemble

des modifications sur l'environnement générées par cette activité humaine. Plus la population mondiale produit et consomme, plus son impact environnemental augmente (Melquiot, 2003). Réduire l'empreinte écologique d'une ville permet donc de réduire l'impact de son activité sur son environnement. Le défi mondial est celui d'inciter les mégapoles à réduire leur consommation d'énergie et à être plus vigilantes vis-à-vis de leurs ressources naturelles, alors que leur modèle de prospérité vise à en produire plus afin d'alimenter leur croissance économique. Plus précisément : « si la croissance économique est forte, ce serait causé par une production croissante et abondante d'énergie ; inversement, une diminution de la production d'énergie provoquerait un ralentissement de la croissance économique. Cette thèse est notamment soutenue par Jean-Marc Jancovici, consultant et expert en thématique énergie-climat » (Le Gargouille, *Énergie et Croissance de l'économie*, 2012).

La figure 2 ci-dessous met en lumière le déséquilibre auquel le monde fait face actuellement. Pour chaque région, la barre pleine illustre la dépense d'énergie, alors que celle en pointillé marque sa capacité à offrir une ressource (ce qui caractérise la biocapacité d'une région). Dans les cas où la barre pleine dépasse la barre en pointillé, la région se trouve donc en déficit (-), et inversement les régions où la barre en pointillé dépasse la barre pleine, la région dispose de réserves (+).

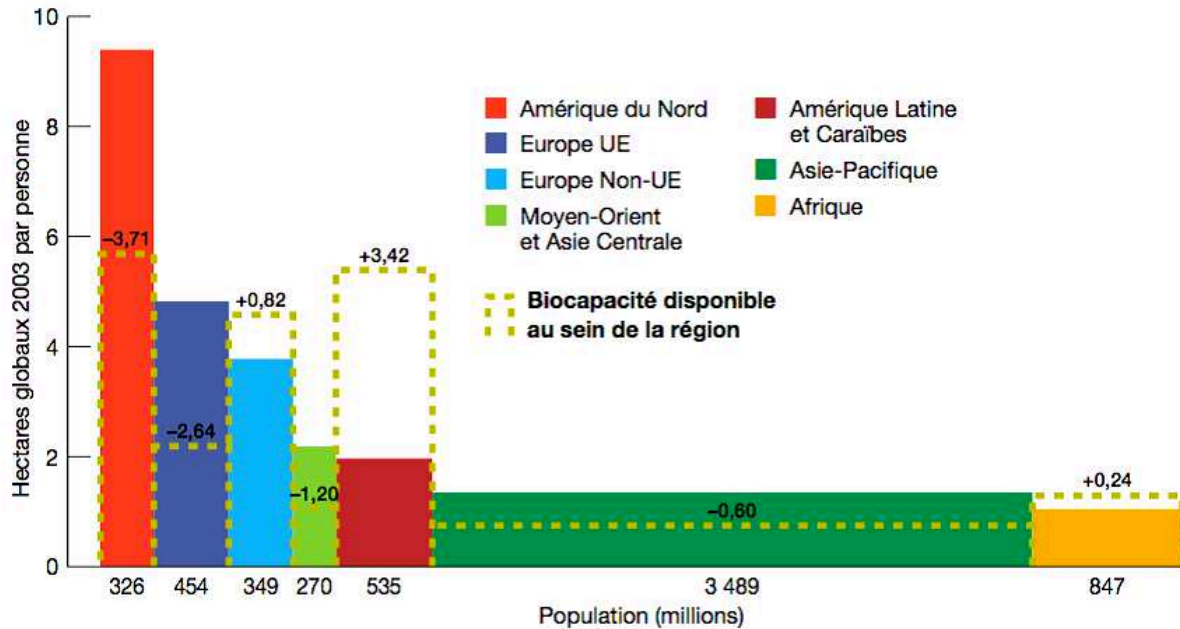


Figure 2 – Empreinte écologique et biocapacité par région
(WWF International, 2006)

Footprint reduction occurs at many levels. For example, building form, site design and regional location strongly influence resource consumption during construction and throughout its lifecycle. Capital outlays can be offset through reduced operational costs over the life of the development. The cities, power plants and homes we build today will either lock society into damaging over-consumption beyond our lifetimes, or begin to propel this and future generations towards sustainable living.
(Leape, 2007, p. 1 et 17)

Les études du Global Footprint Network (WWF International, 2006), synthétisées dans le tableau 1 à la page 10, permettent de révéler que la forte empreinte écologique du Canada est compensée par sa biocapacité, un graphique équivalent à celui du Brésil qui bénéficie aussi de sa biocapacité : la forêt amazonienne. Cependant, l’empreinte écologique des États-Unis dépasse largement la capacité de son territoire, autant que les autres pays à forte consommation de l’hémisphère nord. Les graphiques des pays émergents illustrent à leur tour que l’accélération de la consommation d’énergie atteint proportionnellement (habitants/superficie) celle des États-Unis (tableau 1). Le sentiment d’urgence s’installe lorsque l’empreinte écologique dépasse la biocapacité de la planète dans les années 1980, créant ainsi un système déficitaire depuis trente

ans (MAB⁴, 2011). D'un point de vue global, les pays créditeurs ne peuvent désormais plus compenser avec leurs ressources naturelles pour aider les pays à forte empreinte écologique, et les solutions environnementales actuelles ne permettent pas un virage assez rapide pour réduire leur dette (Pacteau et Joussaume, 2010). La croissance urbaine est liée directement à l'empreinte écologique des villes. Dans le contexte d'une croissance plutôt certaine de la population mondiale et par conséquent celle des citoyens, il est indispensable de réévaluer le fonctionnement des villes en vue d'atténuer leur impact écologique.

	Empreinte Ecologique totale (millions de gha)	Empreinte Ecologique par personne (gha/personne)	Biocapacité (gha/personne)	Réserve ou déficit (-) écologique (gha/personne)
<i>Monde</i>	14 114	2,2	1,8	-0,4
Etats-Unis d'Amérique	2 819	9,6	4,7	-4,8
Chine	2 152	1,6	0,8	-0,9
Inde	802	0,8	0,4	-0,4
Fédération de Russie	631	4,4	6,9	2,5
Japon	556	4,4	0,7	-3,6
Brésil	383	2,1	9,9	7,8
Allemagne	375	4,5	1,7	-2,8
France	339	5,6	3,0	-2,6
Royaume-Uni	333	5,6	1,6	-4,0
Mexique	265	2,6	1,7	-0,9
Canada	240	7,6	14,5	6,9
Italie	239	4,2	1,0	-3,1

Tableau 1 – Empreinte écologique et biocapacité par pays
(WWF International, 2006)

Cet enjeu sera de plus en plus présent autour du monde, à mesure que le déficit ne cesse d'augmenter et que les ressources se dégradent dans l'incapacité de se régénérer assez vite pour pallier la demande. La solution réside dans une multitude de facettes du mode de vie citoyen ; comme l'explique James Leape, directeur général du World Wildlife Fund (WWF International, 2006), la localisation géographique et la densité des villes influencent grandement la consommation d'énergie. L'accroissement de la population citadine mondiale accélère le déséquilibre ville-nature et ceci devient exponentiel lorsque ces concentrations urbaines sont localisées dans l'hémisphère nord.

⁴Le Programme autour de l'Homme et la biosphère (*The Man and Biosphere program - MAB*) est un programme scientifique intergouvernemental visant à établir une base scientifique pour améliorer les relations homme-nature au niveau mondial. Source : UNESCO.

La rareté des espaces naturels en milieu urbain faisant référence aux espaces verts (jardins, parcs et canopées) et la concentration de l'activité humaine par km² influencent la situation environnementale des villes à forte consommation d'énergie. Dans ce contexte, deux phénomènes environnementaux en relation avec les toits sont retenus pour cette étude : le phénomène d'îlot de chaleur et les eaux de ruissellement. La spécificité des toits plats à Montréal pourrait être un raccourci potentiellement intéressant pour faciliter l'atténuation de son empreinte écologique. En effet, les toits montréalais interceptent de l'énergie solaire et accumulent des eaux de pluie. Si les toits sont réduits à leur simple fonction de couverture, ils deviennent des amplificateurs de phénomènes environnementaux négatifs. Pourtant, l'énergie solaire et l'eau de pluie peuvent être interceptées par les toits et peuvent devenir profitables de différentes manières. Traiter les toits dans ce sens peut renverser les effets environnementaux négatifs en effets positifs.

1.2.2 Le phénomène d'îlot de chaleur

Un îlot de chaleur correspond à l'augmentation des températures maximales diurnes et nocturnes de l'air et des surfaces minérales en milieu urbain (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie - ADEME, 2014). Ce phénomène est mesuré par l'albédo : un facteur d'émission qui identifie la capacité de réflexion de l'énergie solaire sur cette surface. Ce coefficient se situe entre 0 et 1. Lorsque l'on s'approche de la valeur 1, l'énergie solaire est réfléchiée en totalité, appelée : miroir parfait (Taillet, Villian et Febvre, 2009). Une toiture recouverte communément par une membrane minérale ou en gravier correspond à un albédo de 0,1 à 0,2. Un coefficient d'albédo faible illustre la mauvaise réflectance d'une toiture qui emmagasine la chaleur, en absorbant le rayonnement du soleil, d'où l'effet d'« îlot » ou de zone accumulée de chaleur.

L'augmentation de ce phénomène à travers le monde, tel qu'illustrée à la figure 3 (page 12), est une réalité alarmante à laquelle les grandes villes tentent de remédier (Intergouvernemental Panel on Climate Change - IPCC, 2013). Les îlots de chaleur urbains sont des microclimats artificiels qui sont la résultante de l'activité humaine et de l'urbanisation. Ce phénomène fait diminuer l'humidité dans l'air et perturbe la circulation convective de l'air, diminuant ainsi les précipitations à certaines périodes plus stables et les augmentant à d'autres périodes, créant donc des orages et averses d'intensité de 20 % à 30 % plus forte (Duchêne-Marullaz, 1980). Plus on goudronne et construit, plus on empêche la régulation naturelle de la température par la

végétation. Ces îlots de chaleur n'ont pas seulement une répercussion sur l'échelle globale du réchauffement climatique, ce sont aussi un fléau pour les villes, en appauvrissant la qualité de l'air, en augmentant la pollution, les risques de canicule et de *smog*, et par conséquent la consommation d'énergie attribuée aux climatiseurs (Colombert, 2008).

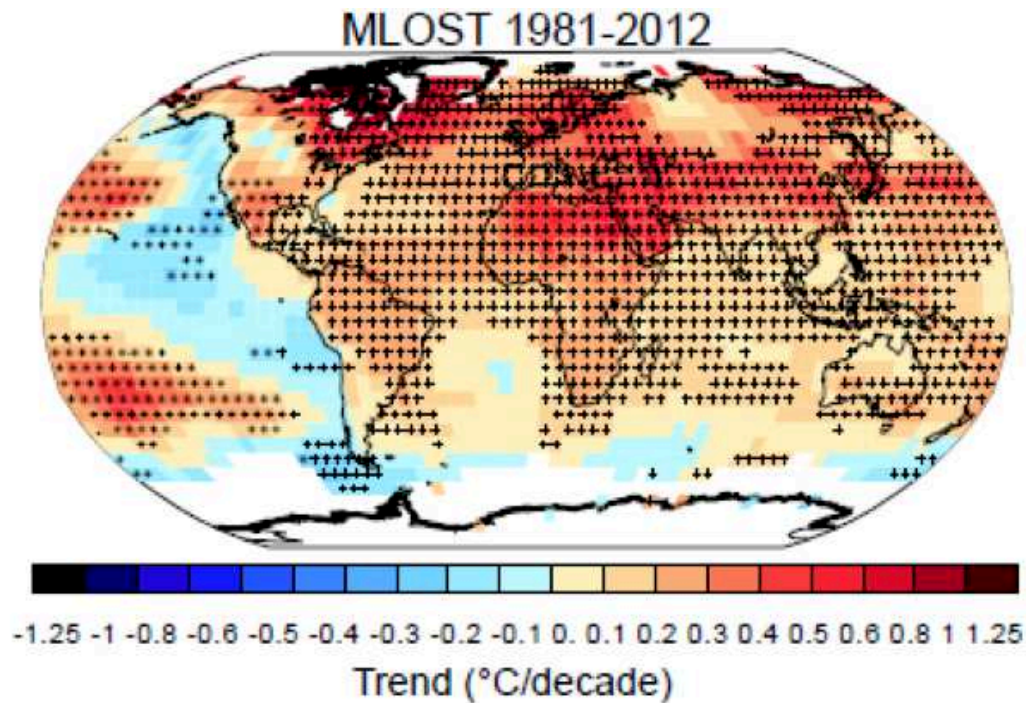


Figure 3 – Tendances en température moyenne à la surface terrestre
(IPCC, 2013)

Les facteurs urbains identifiés par Colombert (2008, p. 105 et 106) comme ayant un rôle important sur l'augmentation du phénomène d'îlot de chaleur renvoient au tissu urbain, soit les « bâtiments, pavage, végétation, sol naturel ou surface d'eau. La couverture du sol, avec sa part de sols artificiels et de sols nus, enherbés ou végétalisés » et le tissu construit, soit « la géométrie urbaine, hauteur et largeur des bâtiments, entre ces derniers, largeurs des rues, et les matériaux utilisés pour construire la ville. » Ces *épidermes* font l'objet d'analyses et sont transformés pour participer à la régulation de la température des villes. Selon les études de Wilmers (1988), une surface végétalisée a une influence sur une distance effective autour de celle-ci. Manin (2007) confirme cette observation en avançant que l'impact sur la température ambiante d'une surface végétalisée est d'environ 300 mètres autour de cette surface. Cette étude permet d'avancer que la portée d'un toit végétalisé dépasse sa propre superficie et peut avoir un

effet sur ses alentours immédiats, notamment en ce qui concerne la température environnante jusqu'à l'échelle d'un îlot urbain.

1.2.3 Le phénomène de ruissellement

Le phénomène d'îlot de chaleur étant étudié précédemment, le phénomène de ruissellement correspond à la seconde problématique environnementale sur lequel sera basée cette recherche. Il se définit comme la quantité et le débit d'eau de pluie qui ruisselle sur les surfaces urbaines imperméabilisées. Cette eau s'évacue dans le système d'égout ou s'infiltré dans le sol naturel. L'accroissement de la superficie imperméabilisée en milieu dense amplifie les risques d'inondation et impacte sur les milieux naturels, sur les cours d'eau et sur le renouvellement des nappes phréatiques. La figure 4 à la page 14 permet de visualiser l'impact de l'urbanisation sur le ruissellement des eaux de pluie : l'étude révèle que les eaux de pluie s'infiltrent dans le sol naturel, par opposition aux milieux urbains denses (résidentiels et industriels) dont l'imperméabilisation du sol oscille entre 30 % et 100 %. Par conséquent, la superficie imperméable a un impact sur l'équilibre naturel. Ces conclusions sont préoccupantes lorsque ces résultats sont comparés à l'impact de l'imperméabilisation sur les cours d'eau. D'après les études de Schueler (2008), à partir de 10 % d'imperméabilisation, on note un impact direct du niveau de pollution sur les cours d'eau de la baie de Chesapeake aux États-Unis. Entre 25 % et 60 % d'imperméabilisation, les cours d'eau deviennent non viables pour la plupart des espèces de poissons. Si l'impact est significatif pour la vie aquatique, il est aussi important sur l'environnement des résidents des grandes villes (Stephens et al., 2002).

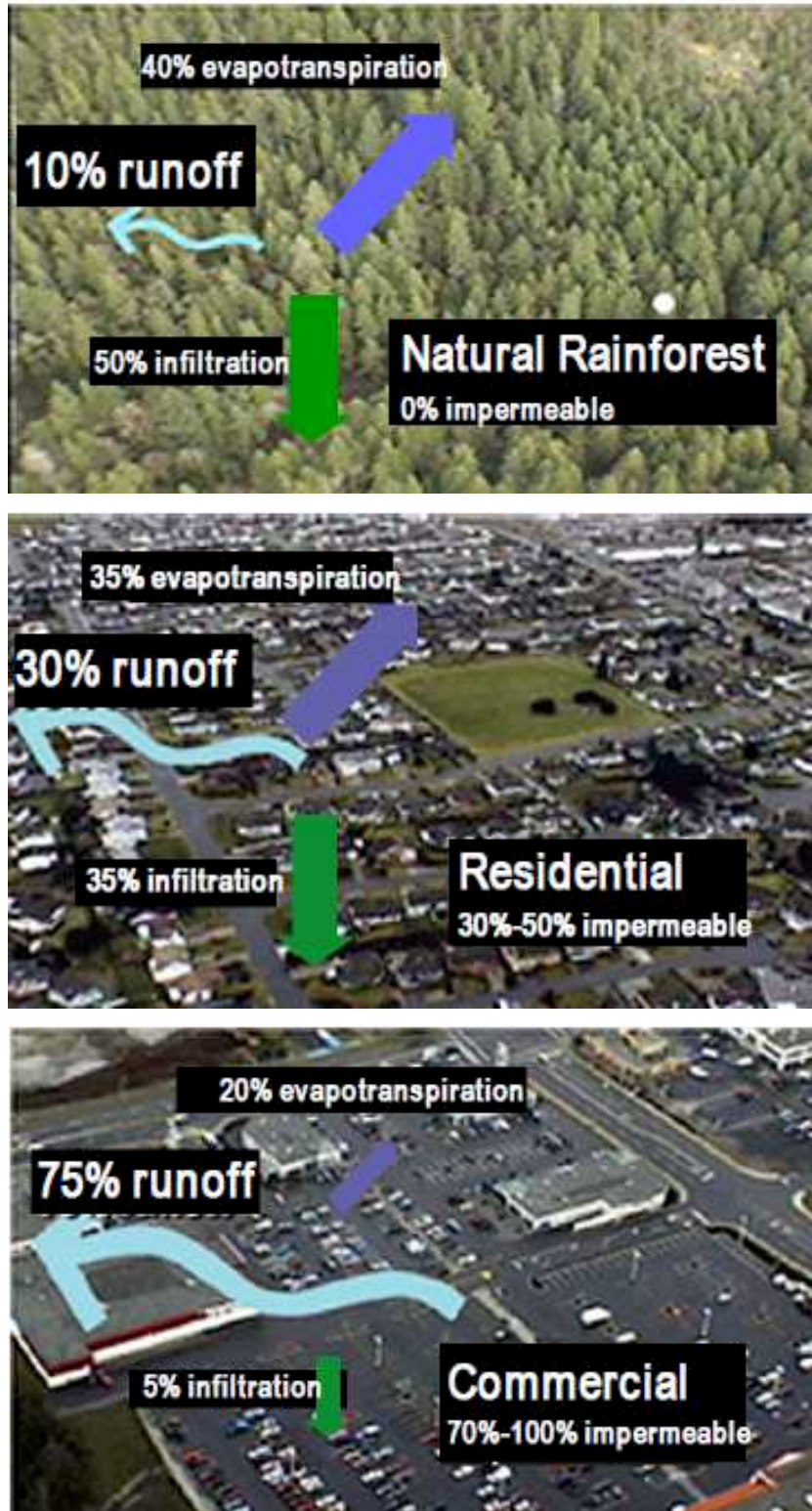


Figure 4 – Modifications des paramètres hydrologiques dus à l'urbanisation
(Stephens et al., 2002, p. 2)

1.3 L'état d'avancement des potentialités des toits face à ces enjeux

Si les toits sont réduits à leur simple fonction de couverture, ils deviennent des amplificateurs de phénomènes environnementaux négatifs. Un toit dont la finition n'est pas traitée de manière à réfléchir efficacement les rayons du soleil, produit des îlots de chaleur : le toit absorbe les rayons solaires sous forme de chaleur, ce qui participe au réchauffement de la température urbaine. Ce même toit est étanche et accélère le ruissellement de l'eau jusqu'à la saturation du sol naturel et des canalisations souterraines. Les phénomènes d'îlot de chaleur et de ruissellement des eaux de pluie sont des problématiques écologiques liées aux toits qui illustrent le déséquilibre entre l'activité humaine et la capacité de son territoire. Dans ce contexte, les toits sont considérés comme une composante urbaine qui participe à ces phénomènes négatifs : ils emmagasinent le rayonnement solaire accélérant ainsi le réchauffement urbain et évacuent l'eau de pluie dans les réseaux jusqu'à saturation du système d'égout et du sol naturel. L'appropriation des toits peut renverser la donne en offrant une superficie aménageable en contribution à l'équilibre entre l'activité humaine et espace naturel nécessaire en ville. Les potentialités des toits aménagés sont illustrées sur la figure 5 qui montre les répercussions positives des toits aménagés.



Figure 5 – Les atouts des toits végétalisés
(Ernst & Young et associés, 2009, p. 5)

Ces aspects positifs sont développés selon trois volets : l'énergie économisée par ces types de toits, leur capacité à réduire les îlots de chaleur et leur capacité à ralentir le ruissellement des eaux de pluie.

1.3.1 Économiser de l'énergie

La qualité d'isolation du toit est en relation directe avec l'énergie économisée pour la climatisation et pour le chauffage. Le toit permet d'isoler et sert de régulateur naturel pour maintenir la température du bâtiment en hiver comme en été. Les études conduites par Laroche, Mitchell et Péloquin (2004) rejoignent celles d'Ernst & Young et associés (2009) pour confirmer que la création de toits aménagés, tels que les toits verts, entraîne une diminution de la consommation d'énergie, ce qui par la suite entraîne une réduction des gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques. Plusieurs villes dans le monde, conscientes de ces enjeux, ont relevé le pari en investissant dans les toits verts. Entre 1996 et 1997, la ville de Bâle, en Suisse, comprend 85 000 m² de toitures végétalisées. Il en résulte une économie de 4 GW par an (Ernst & Young et associés, 2009).

1.3.2 Atténuer les îlots de chaleur

Selon l'étude de l'Atelier parisien d'urbanisme (APUR) (2012), un toit horizontal au revêtement de type bitumineux peut excéder les 50 °C en plein soleil, ce qui contribue à l'augmentation de la température moyenne des villes. La végétalisation des villes, la contribution des parcs et l'abondance de la canopée urbaine (ou le « couvert arborescent » en milieu urbain) contribuent à diminuer de manière naturelle à ce fléau des villes (Ville de Montréal, *Plan d'action canopée 2012-2021*, 2013). En effet, en agissant telle qu'expliquée à la figure 6 (page 17), la végétation absorbe les rayons solaires et renouvelle la qualité de l'air, en rejetant dans l'atmosphère de la vapeur d'eau. Selon le Conseil national de recherche du Canada (CNRC) (2002), avec l'hypothèse de 6 % des toitures de la ville de Toronto végétalisées, soit 6,5 km², il y aurait une réduction de 1 °C de l'effet d'îlot de chaleur urbain, entraînant ainsi une baisse de 5 % de la demande en électricité pour la climatisation et la réfrigération, ce qui constitue une économie d'énergie substantielle.

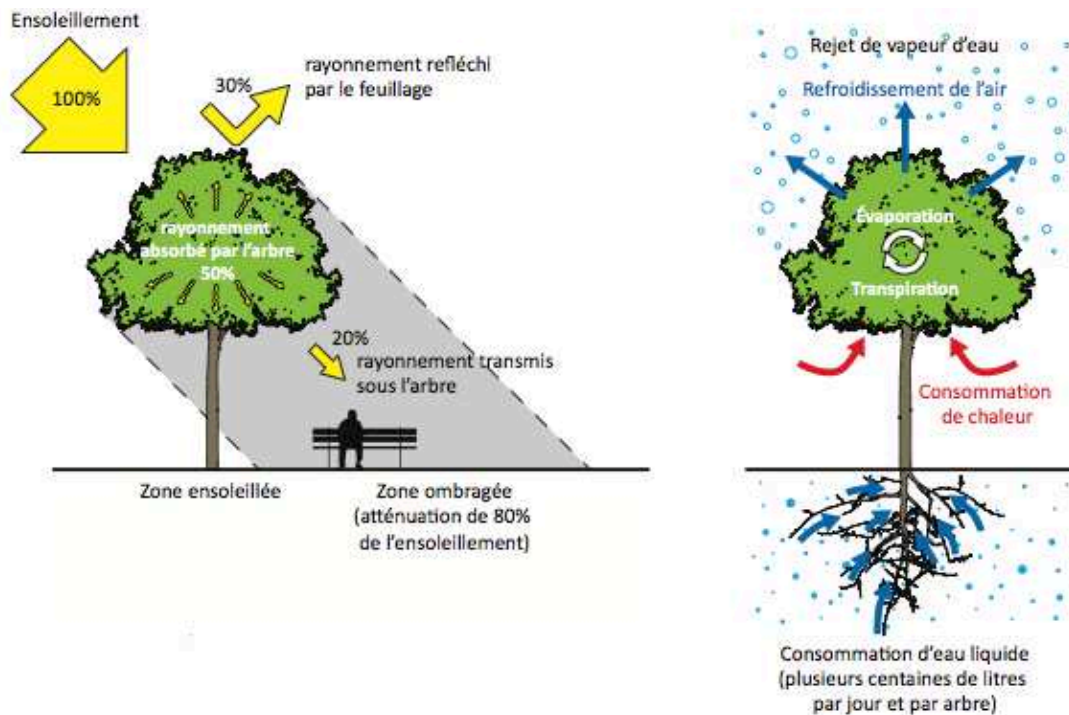


Figure 6 – Effet de la végétation en milieu urbain
(Atelier Parisien d'Urbanisme, 2012)

1.3.3 Ralentir le ruissellement

Pour ce qui est de l'enjeu de la réduction du ruissellement dans les grandes villes, les études du ADIVET⁵(2007) et du CSTB⁶ (2007) démontrent qu'un toit vert avec une épaisseur entre 6 et 10 cm peut retenir jusqu'à 50 % des précipitations annuelles et peut donc empêcher d'évacuer cette eau dans le système de canalisation de manière significative, sans compter une économie entre 5 % et 10 % des coûts de traitement, car cette eau est jumelée à des eaux grises qui doivent être traitées avant d'être évacuées dans le sol naturel. Cette même étude explique qu'en cas d'orage, les toits verts retiennent entre 50 % et 75 % des précipitations. Ce retard d'écoulement permet au système d'égout de se désengorger progressivement. D'autre part, le système de rétention draine les eaux de pluie et réduit considérablement les agents polluants par les plantes. L'eau retenue s'évapore par la suite en partie, ce qui contribue aussi à la réduction des îlots de chaleur.

⁵Association pour le Développement et Innovation sur la Végétalisation Extensive des Toitures.

⁶Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

Dans ce chapitre, la réduction de l’empreinte écologique des grandes villes a été envisagée à travers un aménagement approprié des toits. Les études référencées précédemment révèlent que l’effet d’îlot de chaleur et le ruissellement de l’eau de pluie peuvent être régulés par les toits. Ces phénomènes environnementaux observés dans le monde sont connus aussi à Montréal. Toutefois, il n’existe pas, à ce jour, de portrait des toits de Montréal, d’où l’objectif de cette recherche d’en dresser un et de se questionner sur l’impact sur les îlots de chaleur et sur le volume d’eau de ruissellement que peuvent avoir les toits montréalais.

Chapitre 2 : La contribution des toits montréalais face aux défis environnementaux

Dans le chapitre précédent, nous avons effectué un survol des enjeux des grandes villes et abordé les potentialités des toits à apporter des solutions à ces problèmes environnementaux. Où en sont les recherches et les solutions mises en place à l'heure actuelle pour améliorer l'empreinte écologique de Montréal ? L'analyse de la situation montréalaise permettra d'identifier la manière de mettre les toits à contribution des défis environnementaux. Une première partie sera consacrée à l'état des connaissances sur l'empreinte écologique de Montréal et plus précisément, sur la situation environnementale actuelle dégradée par l'effet d'îlot de chaleur et le ruissellement des eaux de pluie. Les études qui ont servi de point de référence dans ce portrait des toits de Montréal sont les travaux sur les îlots de chaleur de Guay et Baudouin (2005) du Département de géographie de l'UQAM, et les études sur la rétention des eaux de pluie de Gariépy (2012) et ceux de Anquez et Herlem (2011) de la Chaire de responsabilité sociale et de développement durable, de l'environnement et des parcs, à l'Université du Québec à Montréal. Puis, nous dresserons le portrait des typologies des toits montréalais en observant leur évolution historique et en distinguant la prédominance des toits plats ayant la capacité d'influencer la situation environnementale étudiée précédemment. Ensuite, nous relaterons un ensemble de projets d'aménagements de toits plats dont les retombées environnementales ont été avérées.

2.1 Les problématiques environnementales de Montréal

Les îlots de chaleur et le ruissellement des eaux de pluie sont les indicateurs environnementaux retenus pour observer comment nous pouvons mettre à contribution l'influence des toits. Ces effets négatifs pourraient réellement être inversés : l'énergie solaire et l'eau de pluie peuvent devenir profitables. Ces superficies horizontales, que nous présenterons dans la deuxième partie de ce chapitre, aggravent les problématiques environnementales de Montréal alors qu'elles peuvent être mises à profit. L'énergie solaire peut être interceptée communément par des panneaux photovoltaïques posés sur des toits mieux isolés, le volume d'eau de ruissellement peut être aussi retenu avec des bassins de rétention d'eau installés sur le toit. Ces installations peuvent dépasser la volonté d'un citoyen isolé consciencieux de son environnement immédiat pour prendre la dimension d'un outil de planification territoriale.

2.1.1 L’empreinte écologique

La majorité des villes canadiennes, comme indiqué dans la figure 7 ci-dessous, ont mené une analyse exhaustive de leur empreinte écologique (Wilson et Anielski, 2005). Il n’est pas évident de pouvoir estimer les impacts économiques des dommages causés à l’environnement et d’identifier les solutions pour pallier la surconsommation. Ceci s’explique aussi par le manque de données sur le sujet (Van den Bergh et Verbruggen, 1999).

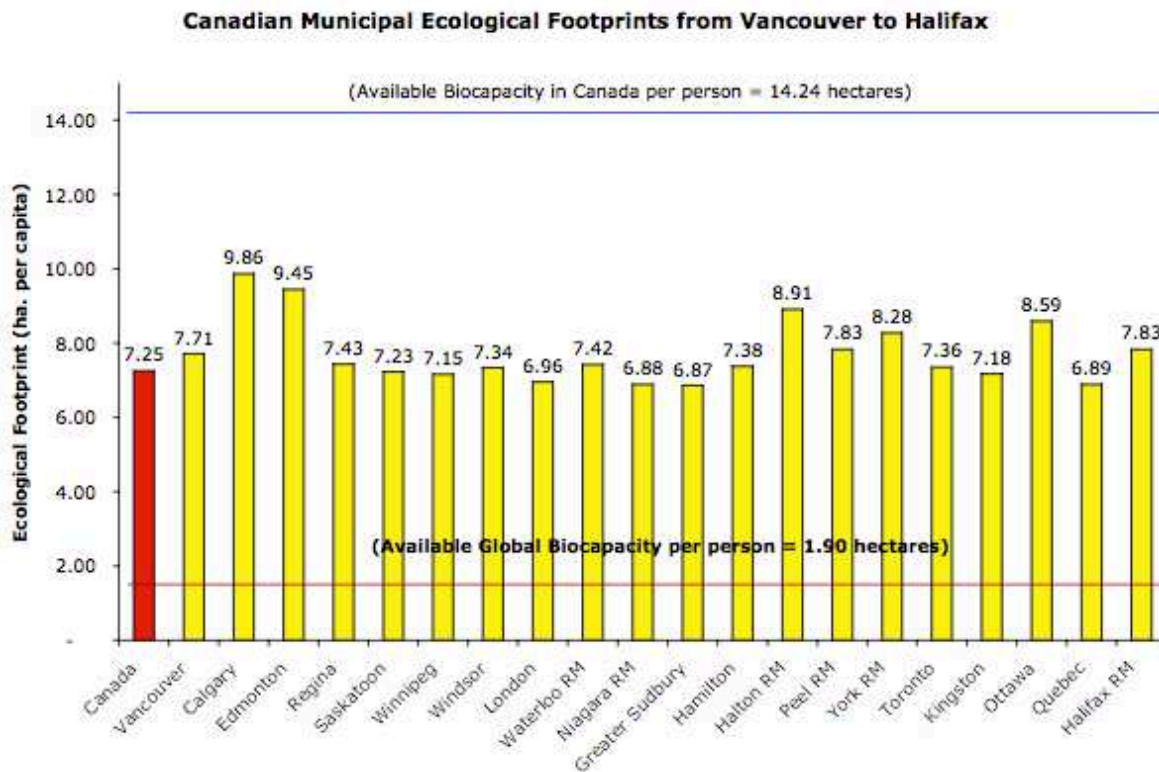


Figure 7 – L’empreinte écologique des villes canadiennes de Vancouver à Halifax (Wilson et Anielski, 2005)

Cependant, les organismes comme Équiterre (2013) ou le Ministère québécois du développement durable (2013) sont actifs à sensibiliser les citoyens à réduire leur empreinte écologique à l’échelle individuelle, selon le type de logement, l’alimentation, les achats, le transport et les déchets. L’environnement est un sujet qui préoccupe les Montréalais (Conseil régional de l’environnement Montréal, 2008) et les institutions souhaitent répondre à ces inquiétudes en offrant des solutions concrètes (Ville de Montréal, Conseil d’agglomération, 2010).

L'empreinte écologique de Montréal n'a toutefois pas encore été calculée à l'échelle de la ville (Uhde, 2009). Plusieurs paramètres se rattachant à cette empreinte ont pu être quantifiés lors de plusieurs études approfondies, mais malheureusement un portrait global n'a pu être tracé à ce jour (Uhde, 2009). Il a été établi que 80 % de la superficie de la ville est minéralisée (Anquez et Herlem, 2011), par rapport à une moyenne de 60 % des superficies des grandes villes américaines (Akbari, Menon et Rosenfeld, 2009). Il est donc pertinent de se pencher sur les effets directs de tant de sols minéralisés additionnés avec la superficie des toits plats sur les phénomènes d'îlots de chaleur et de ruissellement.

2.1.2 Le phénomène d'îlot de chaleur

Les îlots de chaleur à Montréal sont cartographiés par le gouvernement du Québec qui offre un portrait très clair de la situation à travers un outil de localisation qu'il rend accessible à tous (Gouvernement du Québec, 2013). Les données sont suffisantes pour permettre de cibler les zones à risques et de déterminer les zones où intervenir en priorité pour le bien-être des citoyens. La méthode de calcul des îlots de chaleur dépeinte plus haut à l'échelle des grandes villes dans le monde est appliquée à Montréal par les études de Guay et Baudouin (2005). Ces derniers estiment que la température sur l'ensemble du Québec augmentera d'au moins de 2 °C à 3 °C d'ici la fin du siècle, ce qui aura un impact direct sur la santé des citoyens, sur la consommation de l'énergie et de l'eau, et de ce fait, sur la pollution et sur l'empreinte écologique globale de Montréal. Selon la Ville de Montréal (2010), les journées au-dessus de 30 °C augmenteront de 12 jours par année à partir de 2010, et de 46 jours par années entre 2030 et 2040. Anquez et Herlem (2011) quantifient aussi l'impact des îlots de chaleur à Montréal et affirment que 1540 décès prématurés par année sont causés par la pollution atmosphérique résultant de ce phénomène. Le Plan de développement durable de la collectivité montréalaise 2010-2015 (Ville de Montréal, 2010) vise à améliorer la qualité de l'air, à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à améliorer la protection de la biodiversité, des milieux naturels et des espaces verts. Ceci en augmentant les surfaces végétales et la canopée montréalaise de 20 % à 25 % (Ville de Montréal, Conseil d'agglomération, 2010). En effet, la canopée transmet des indices pertinents sur la situation environnementale d'une zone urbaine. En juin 2007, l'indice de canopée⁷ de

⁷ « L'indice de canopée est le rapport entre, d'une part, la sommation des superficies des couronnes d'arbres ou groupes d'arbres projetés au sol (la canopée) et d'autre part, la superficie totale de l'agglomération. »
Ville de Montréal, Direction des grands parcs et du verdissement, *Plan d'action canopée 2012-2021*

l'agglomération de Montréal, déterminé à partir de photographies aériennes, s'élevait à 20,3 %. Ces données sont essentielles pour anticiper la formation des îlots de chaleur. Pour preuve, la figure 8 ci-dessus illustre précisément l'impact sur la température ambiante des secteurs dont la végétation urbaine est quasi ou peu existante, comme les secteurs industriels.

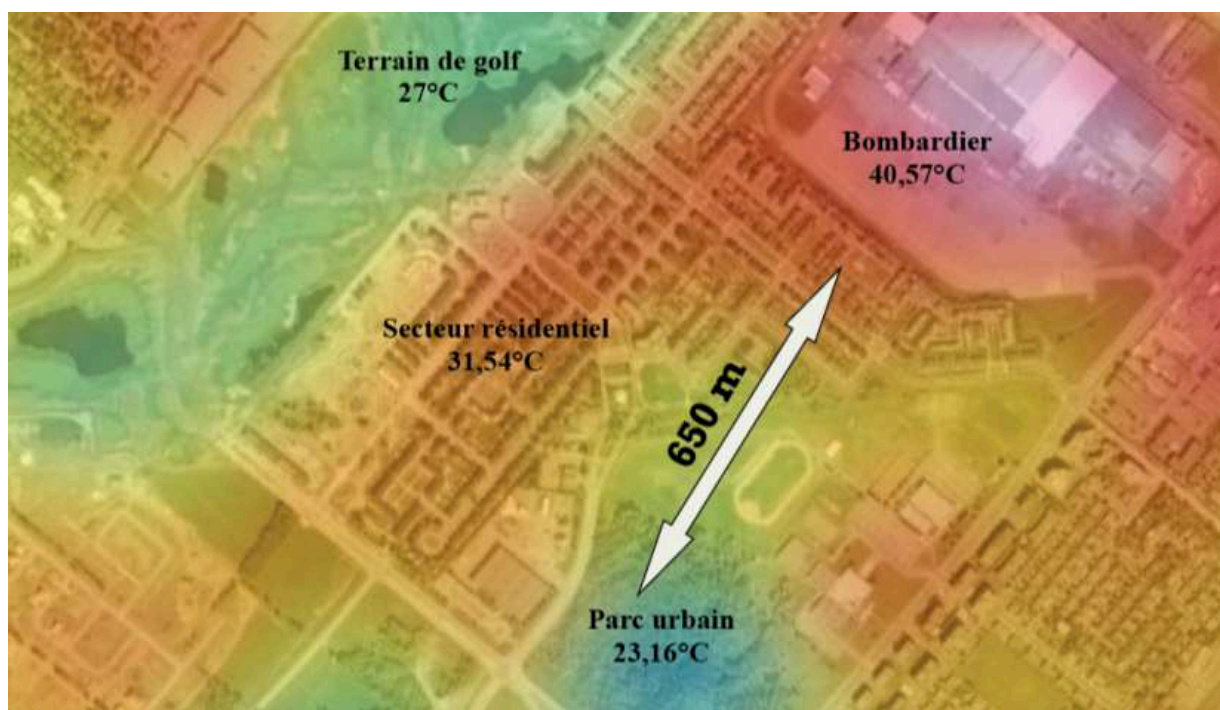


Figure 8 – L'impact des îlots de chaleur à Montréal
Bande thermique Landsat-5 superposée à Google Earth, 2006
(Martin, Baudouin, Beauchemin et Gagnon, 2007)

La zone dont la température est artificiellement haute (40,57 °C) est juxtaposée à un espace vert (23,16 °C) qui participe à compenser cette situation de déséquilibre thermique. Les espaces verts, aussi appelés « îlots de fraîcheur », comme illustrés sur la figure 9 (page 23), sont absolument essentiels à la régulation de la température en milieu urbain. Cependant, la figure 9 montre aussi que la température ne baisse que dans les zones autour du parc urbain (secteur résidentiel) et ne suffit pas à corriger le manque de végétalisation du secteur industriel avoisinant.

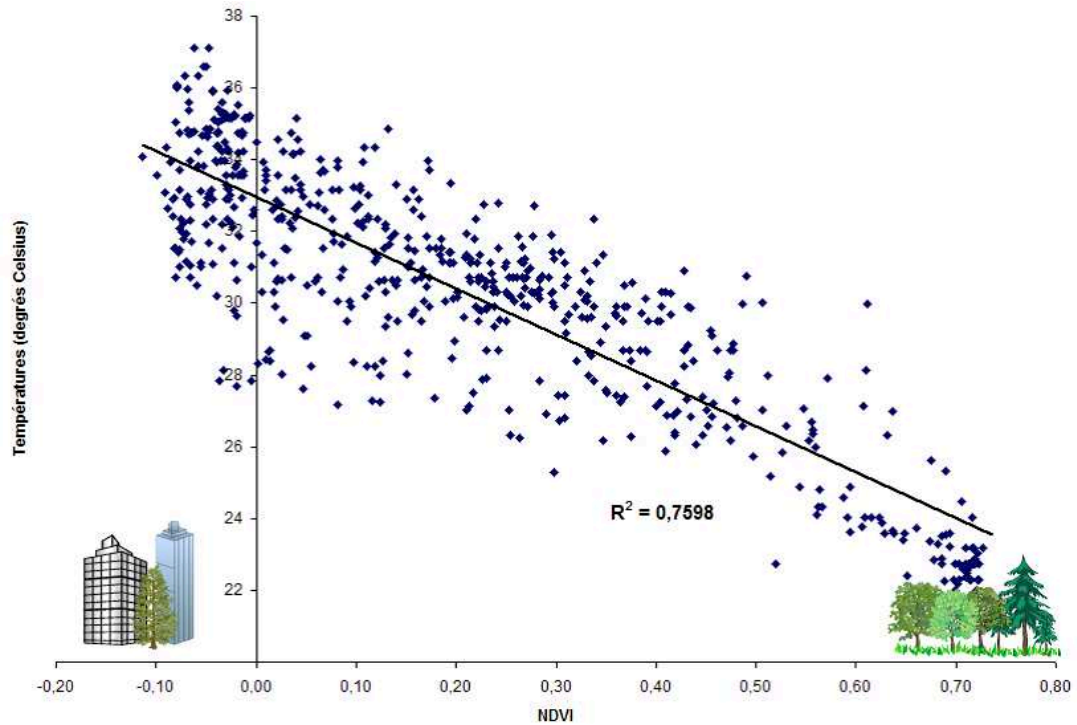


Figure 9 – La relation entre la température et l’indice de végétation à Montréal
(Martin, Baudouin, Beauchemin et Gagnon, 2007)

Les espaces verts contribuent à minimiser le rayonnement solaire qui peut être emmagasiné par les toits sous forme de chaleur. Cependant, cette superficie végétale n’est pas assez fournie pour corriger ce phénomène et le recul de la superficie des espaces verts est lié à la construction des terrains vacants jusqu’alors boisés : « la minéralisation de la ville se poursuit, rencontrant de plus en plus de résistance de la part des écologistes » (Ville de Montréal, Plan d’action canopée 2012-2021). En compensation, Cavayas et Baudouin (2008) proposent des solutions concrètes, telles que la végétalisation des toits, ou leur couverture avec des matériaux blancs pour réfléchir les rayons du soleil. Ils discutent aussi du revêtement global des villes, incluant les revêtements des toits comme des façades des édifices et des sols imperméables. Convaincus des bienfaits du verdissement, Anquez et Herlem (2011) expliquent que recouvrir un mur exposé au soleil de plantes adaptées au climat québécois pourrait réduire la température de ce mur de 20 °C, si on le compare à un mur de façade habituel.

2.1.3 Le ruissellement des eaux de pluie

L'étude de la précipitation révèle la spécificité climatique et géographique de Montréal. Lors de la dernière décennie, la précipitation annuelle à Montréal correspondait à 979 mm, soit 764 mm de pluie et 218 mm de neige (Environnement Canada, 2013). Ces précipitations augmenteront de 15 % au milieu du siècle selon la Ville de Montréal (2010). L'augmentation du volume d'eau de ruissellement à Montréal est causée non seulement par l'augmentation des précipitations, mais aussi par une imperméabilisation des sols, ce qui a pour impact le réchauffement des eaux de pluie qui augmente à son tour la température des cours d'eau, la saturation du système d'égouts, l'augmentation du risque d'inondation, de pollution et de l'érosion. Dans le chapitre précédent, nous avons décrit, de façon générale, ce que le taux de ruissellement peut avoir comme impact sur un milieu urbain. Mais qu'en est-il à Montréal où le taux d'imperméabilisation des sols est de 80 % ? (Anquez et Herlem, 2011) Les écosystèmes commencent à se dégrader après 10 % d'imperméabilisation ; de plus, entre 25 % et 60 %, les cours d'eau deviennent non viables pour la plupart des espèces de poisson (Schueler, 2008). La situation est urgente et cause des dommages considérables à l'environnement. Il est important aussi de se rendre compte du fait qu'en plus du 80 % d'imperméabilisation des sols, le climat froid fait geler le sol une partie de l'année, diminuant son coefficient de perméabilité naturelle. D'autre part, les sels de déglacage des routes et les sites d'enfouissement deviennent des sources très importantes de pollution des nappes phréatiques, comme expliquent Labrecque et Vergriete (2006) dans cet exemple sur le climat de la ville de Toronto qui se rapproche de celui de Montréal.

Une étude de Howard et Haynes (1997), effectuée dans la région de Toronto, révèle que seul 45 % du sel appliqué dans le bassin versant étudié est ensuite récupéré, ce qui en laisse la majeure partie pénétrer les couches d'eau souterraine. Cette étude laisse entendre qu'en une vingtaine d'années seulement, les concentrations en chlore des eaux souterraines dépasseront largement les normes acceptables de potabilité de l'eau. Selon Eyles (1997), le sel de déglacage des routes ainsi que les sites d'enfouissement seraient en fait responsables de 95 % de la charge contaminante des eaux souterraines urbaines dans la région de Toronto.

(Labrecque et Vergriete, 2006, p. 16)

La perméabilité des sols naturels contribue à la gestion du volume d'eau de ruissellement, mais ne suffit pas à désengorger le système de canalisation de l'île de Montréal. Il est prévu que ce réseau souterrain puisse faire face à cette quantité d'eau de pluie, évacuée parallèlement à la collecte des

eaux usées. Comme illustré sur les figures 10 et 11, le réseau de gestion des eaux pluviales montréalais est constitué de deux systèmes, l'un séparatif, dans la partie ouest de l'île, et l'autre unitaire, dans la partie est.

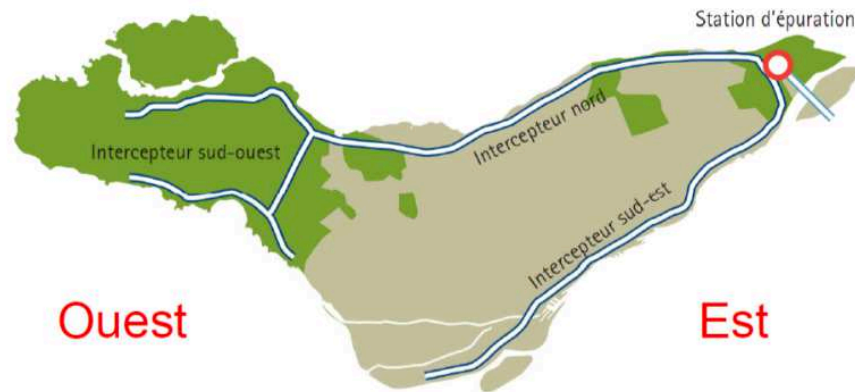
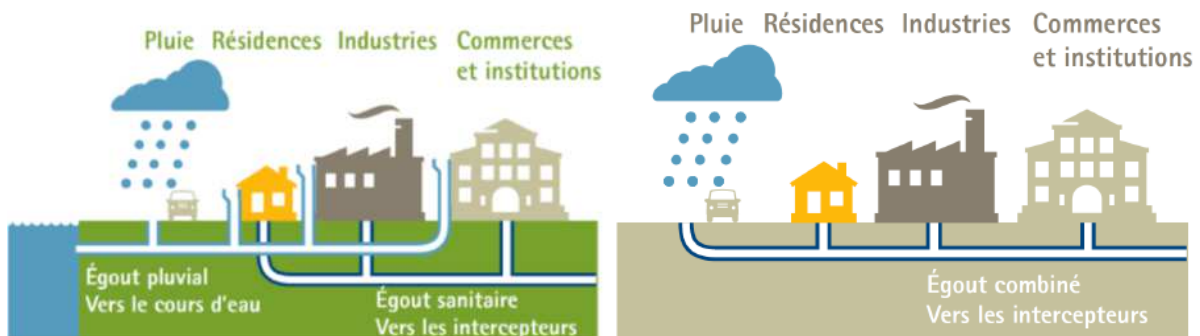


Figure 10 – La gestion des eaux pluviales à Montréal⁸



Le réseau séparatif à l'ouest

Réseau d'égout composé de deux réseaux distincts qui servent, l'un au transport des eaux usées et l'autre au transport des eaux pluviales.

Le réseau unitaire à l'est

Réseau d'égout recevant aussi bien les eaux pluviales que les eaux usées.

Figure 11 – Le système unitaire vs séparatif : le circuit montréalais de l'eau pluviale
(Ville de Montréal, *Gestion de l'eau*, 2010)

⁸« La Direction de l'eau, créée en 2005, est issue d'une volonté formelle de la Ville de structurer la gestion des activités liées au service de l'eau : production, distribution et assainissement. Cette entité administrative comprend 6 usines de production d'eau potable situées sur le territoire de l'île de Montréal, une Station d'épuration des eaux usées, ainsi que la Direction de la gestion stratégique des réseaux d'eau. » - Ville de Montréal, *Gestion de l'eau*. (2010)

La surface boisée de l'île de Montréal a diminué de 11 % entre 1986 et 2001. En effet, le développement immobilier a déséquilibré le rapport espaces naturels et superficies imperméabilisés. La rétention des eaux pluviales par les arbres n'est que de 21 % en 2001 dans la région métropolitaine de Montréal et elle est particulièrement faible dans le centre-ville, soit 2,2 % (Labrecque et Vergriete, 2006, p. 8).

L'eau accumulée sur la superficie des toitures horizontales n'est pas potable, donc impropre à la consommation. Elle est néanmoins utile pour les besoins domestiques. Cette quantité d'eau de pluie peut être mise à profit dans la conservation des milieux naturels et des espaces verts. La rétention des eaux de pluie est une approche qui est adoptée par les instances publiques et des règlements voient le jour afin de contrôler le débit d'eau collecté par les toits (Ville de Montréal, 2010). De plus, le Plan de développement durable de la collectivité montréalaise 2010-2015 (Ville de Montréal, 2010) vise à améliorer la qualité des eaux de ruissellement qui se déversent dans les cours d'eau en favorisant le captage, la rétention et l'infiltration des eaux de pluie à la source. La Ville devra développer un programme de sensibilisation des citoyens afin de faire évoluer les mentalités dans ce sens.

2.2 L'état de l'art des toits plats montréalais

En première partie de ce chapitre, nous avons identifié les principaux enjeux environnementaux en relation avec les toits à Montréal : le phénomène d'îlot de chaleur et le ruissellement des eaux de pluie. Ces toits horizontaux accentuent ces problèmes environnementaux lorsqu'ils ne sont pas aménagés. Pourtant, ces toits pourraient présager un potentiel environnemental intéressant. La première mesure serait d'améliorer la couverture du toit pour réfléchir les rayons du soleil, ce qui permettrait d'atténuer l'augmentation de la température urbaine. La seconde mesure est celle de pouvoir récupérer l'eau de pluie afin d'en profiter et de la restituer dans le réseau d'égout de manière graduelle. La troisième intervention permettrait de compenser le manque d'espaces verts en végétalisant les toits. Mais, quel impact ces mesures pourraient avoir un impact sur le territoire de l'île de Montréal ? Cette superficie est-elle assez conséquente pour renverser la situation environnementale ? Afin d'y répondre, il est indispensable d'observer l'évolution des toits plats et de les recenser afin de s'assurer qu'ils sont dominants sur l'île de Montréal.

2.2.1 L'évolution historique des toits montréalais

Le paysage de toits plats est spécifique à Montréal, mêlant diverses époques, à l'exception de certains quartiers historiques et monuments, tels que le Vieux-Montréal qui compte plusieurs édifices de la fin du 19^e siècle dont les toits sont en pente, par exemple le Marché Bonsecours (1847), ou encore plus rarement ceux de la moitié du 21^e siècle, dont l'édifice de la Banque Royale (1926-28). On retrouvait à l'extérieur du Vieux-Montréal, les édifices résidentiels d'influence française couverts d'un toit à deux pentes ou à mansarde qui ont été rattrapés par l'expansion progressive de la ville et qui aujourd'hui font partie du Centre-ville. D'abord, la modénature des toits sur l'île de Montréal est le résultat d'une identité architecturale héritée tout au long de son histoire. Montréal et ses alentours représentent l'une des premières installations européennes dans cette région du continent américain (Rémillard et Merrett, 2007). Dès le début du 19^e siècle, une présence française importante, puis anglaise s'est manifestée par des édifices couverts de toits à deux pans ou mansardés (Benoît et Gratton, 1991). Certains quartiers sont composés de maisons unifamiliales du 20^e siècle avec des toits en pente comme les maisons *war-time* et les *bungalows*. Ce type de construction isolée de référence française est constitué en majorité de bois. Le sol sablonneux en bordure du fleuve Saint-Laurent et la difficulté de transporter de la pierre ont imposé le bois comme le matériau de construction principal (Patri-Arch, 2005). Ce toit à deux pans est une référence historique qui s'est perpétué selon les époques et qui n'a pas beaucoup évolué, hormis les techniques de construction récentes. Des quartiers entiers constitués de constructions neuves de style néoclassique comme Bois-Franc, sont couverts de ce type de toit.

Parallèlement, le toit plat à fausse mansarde a évolué avec la mutation de la manière d'habiter des citadins. Wiebe (2012) indique qu'un recensement datant de 2006 identifie 40 % des logements privés occupés à Montréal sont des immeubles à appartements de moins de 5 étages. La plupart de ces ensembles résidentiels ont été construits entre les années 1950 et 1971 afin de répondre à la population grandissante d'après-guerre et se sont poursuivis avec les baby-boomers, passant à 1,2 million d'habitants, correspondant à une augmentation de 80 % de plus. Ces édifices résidentiels dits « intercalés » ont été ornés occasionnellement de fausses mansardes en guise de décoration (Potvin, 2008). « Ce type architectural, générique, permet cependant une intense appropriation puisque la variation des ornements (balcons, balustrades, escaliers et

amortissements) permet d'infinies combinaisons, surtout entre les mains de petits artisans constructeurs. » (Noppen, 2006, p. 62-63). Cette architecture a dû répondre aussi à la concentration de la population grandissante en zone urbaine et devient progressivement dépouillée et rationnelle.

2.2.2 L'avènement des *plex* et la généralisation des toits plats

D'après Bernard Vallée (Marsolais, 2007), le toit plat a commencé à être construit en 1875, lors de la révolution industrielle qui a vu arriver une nouvelle population de travailleurs. Le territoire aérien de l'île est constitué de quartiers complets où dominent les toits plats des maisons unifamiliales, des *plex*⁹, des *walk-ups*¹⁰, et des bâtiments industriels à grande surface. La firme de consultants en patrimoine et architecture Patri-Arch (2005) a identifié, par exemple, que les quatre configurations résidentielles ou commerciales les plus répandues dans l'arrondissement du sud-ouest de l'île ont toutes des toits plats : la maison de plain-pied, le duplex à unités, avec un escalier intérieur ou extérieur, le triplex avec un escalier intérieur ou extérieur et le multiplex résidentiel ou commercial (Arrondissement du sud-ouest, 2005). Parmi les nouveaux arrivants, ceux d'entre eux qui avaient connaissance d'une technique utilisée dans les villes ouvrières anglaises qui consistait à construire des duplex en série et à couvrir la toiture de couches de feutre, de goudron et de gravier, procédé typique du quartier de Saint-Henri ou du Centre-Sud. Le triplex à toit plat a commencé à être construit vers 1890 répondant au besoin de densification l'habitat résidentiel pour accompagner le développement de Montréal. Le triplex se distingue du duplex en étant construit en retrait de la rue avec un escalier extérieur. « L'immeuble montréalais est un parallélépipède de trois étages, érigé à l'aide d'une structure de bois lambrissée de brique d'argile sur toutes les faces exposées » (Potvin, 2008, p. 84). De 1900 à 1980, la majorité de ces constructions érigées depuis la révolution industrielle jusqu'à l'influence du style international sont constituées d'un toit plat comme illustré à la figure 12 (page 29). Le toit plat à drain central est le type de toiture dominant. Ce type de toiture est une composante essentielle de la « montréalité » (Potvin, 2008, p. 81).

⁹ « L'immeuble de type *plex* est la famille de types architecturaux les plus répandus dans l'arrondissement du Sud-Ouest » : les duplex, triplex et multiplex. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7757,86095731&_dad=portal&_schema=PORTAL – consulté le 3 juillet 2014

¹⁰ Les appartements *walkup* accessible sans ascenseur. Repéré à <http://www.thefreedictionary.com/walk-up+apartment> – consulté le 3 juillet 2014

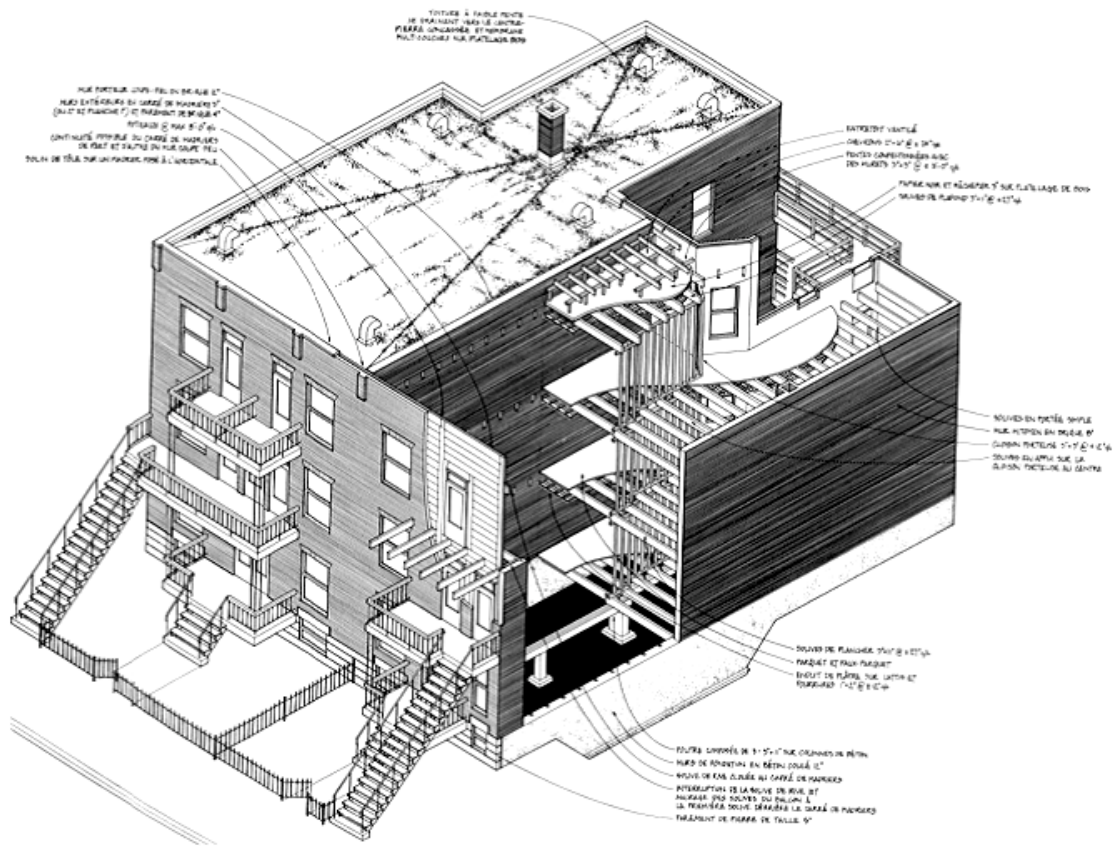


Figure 12 – Illustration d’un système constructif répandu à Montréal
(Auger et Roquet, 1998)

Le *plex* est constitué de carrés de bois, matériau caractéristique du savoir-faire des artisans et entrepreneurs montréalais. Cette charpente laisse supposer que la structure des *plex* n’est pas surdimensionnée et ne pourrait pas recevoir la surcharge de poids que nécessite une toiture végétale. Mais, celle-ci pourrait néanmoins supporter des bacs de terre ou de rétention d’eau en périphérie de la toiture et au droit des murs porteurs. Ceci permet de faciliter la transmission des charges supplémentaires sur le toit jusqu’aux fondations. Ces aménagements ont été possibles par le biais des technologies d’isolation. Mais, il est toujours aussi délicat d’intervenir sur un toit sans causer des complications en voulant renouveler l’étanchéité existante sans causer d’infiltrations d’eau.

Malgré ces obstacles techniques, des aménagements de toits sont effectués couramment en ouvrant l’arrière du *plex* pour y installer un étage supplémentaire avec plancher ou mezzanine

permettant l'accès au toit. Des règlements d'urbanisme ont vu le jour à cet effet, imposant que la mezzanine ne dépasse pas 40 % de la superficie du toit et qu'elle soit pas visible à partir de la rue au niveau du piéton.

2.2.3 Des toits innovants à Montréal : retour d'expériences

Les toits horizontaux dominent le paysage aérien de l'île de Montréal (Linteau, 1992, p.76) : cette affirmation met en évidence l'étendue potentielle qui pourrait contribuer à amener des solutions environnementales. D'après l'Institut national de santé publique du Québec (Uhde, 2009, p. 21), « 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). D'autres parts, le portail du Bâtiment Durable au Québec, affirme que « la récupération de l'eau de pluie permet d'éviter le gaspillage et contribue à limiter la pollution et les dommages causés par les débordements d'égouts en réduisant le débit d'eau envoyé dans le réseau des eaux usées lors des grandes averses » (Pronovost, 2012). Fort de ces deux constats, la superficie des toits plats est envisagée comme une stratégie pour résoudre les problèmes environnementaux que connaît l'île de Montréal.

Les toits blancs

L'exemple du règlement d'urbanisme de l'arrondissement de Rosemont-La Petite-Patrie impose le dépôt d'un permis lors de la réfection d'un toit existant ou la construction d'un nouveau bâtiment. Et ces travaux de transformation doivent intégrer un revêtement blanc pour aider à la réduction des îlots de chaleur. Voici un exemple des bénéfices écologiques et économiques de l'aménagement des toits blancs :

Le Collège Rosemont possède un toit blanc de plus de 3 000 m², il permet de rafraîchir l'air extérieur et celui des classes de cours (CRE de Montréal, 2008, p. 46 ; Potvin, 2008). Même si le coût du toit blanc s'est élevé à 20 % plus cher qu'une toiture conventionnelle, en combinant plusieurs mesures d'aménagement (toit blanc, toit vert couvrant une superficie de 930 mètres carrés) le Collège Rosemont a réduit ses coûts liés à la demande d'énergie de 40 % (Anquez et Herlem, 2011, p. 15).

Les toits végétalisés

Citons aussi le cas de la toiture végétalisée du centre culturel de Côtes-des-Neiges qui révèle la portée de ce type d'intervention. À la construction de cet édifice inauguré en 1983, la terrasse devait être accessible au public, mais est demeurée plusieurs années inutilisable en raison de l'îlot

de chaleur provoqué par le revêtement. La réappropriation de ce lieu a été possible en aménageant un espace végétalisé pour le plaisir des visiteurs du centre culturel. Cet ajout a nécessité une étude approfondie de la structure existante et de son revêtement. Malgré tout, sa structure d'origine n'a pas nécessité de renfort, car les surcharges provoquées par l'isolation supplémentaire, le système de drain et les bacs de matière organique recevant les plantes ont été calculées en conséquence lors de la construction (Gariépy 2012).

Environnement Canada a installé une petite station météo pour mesurer l'effet des toits verts sur les îlots de chaleur urbains. Selon certaines études, si de 4 % à 6 % de la surface du centre-ville était végétalisée, la température baisserait de 1 °C à 2 °C. (Marchal, 2012)

Les toits récupérateurs d'eau

La récupération des eaux de pluie pour le surfacage de la glace de l'aréna à Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension est une mise à profit inédite du toit. Le financement gouvernemental est à hauteur de 175 000 \$ et permettra de couvrir la période d'observation des retombées environnementales, sociales et économiques. À l'issue de ce projet pilote, un rapport sera établi sous forme de recommandations pour les 34 arénas dont les installations de surfacage sont à rénover.

L'essai mené dans cet arrondissement comprend deux volets : la récupération d'au moins 90 % des eaux de pluie provenant de la toiture et la création d'un bassin de rétention naturel au centre d'un espace vert public. En effet, l'eau tombant sur le toit de l'aréna sera captée, prétraitée, puis envoyée dans un réservoir ; elle sera ensuite filtrée avant de voyager à l'intérieur d'un chauffe-eau instantané pour finalement être utilisée par la surfaceuse. Le potentiel d'économie d'eau représenterait 1 088 000 litres par année ou plus de 30 % de la consommation présentement requise. (Ville de Montréal, Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension, 2013)

Ces projets expérimentaux intègrent le toit horizontal comme un instrument porteur d'innovation architecturale et urbaine, mais ne sont pas inscrits dans une opération urbaine à l'échelle du territoire. Et c'est d'autant plus vrai dans le cas des toits verts : « mis à part quelques projets sur des bâtiments municipaux, des universités ou sur une partie du Palais des congrès, les toits verts sont loin de se multiplier » (Marchal, 2012). Citons le toit vert de la Biosphère et celui de la Maison du développement durable, la serre sur le toit du Palais des congrès de Montréal et le

terrain de sport couvrant le réservoir d'eau McTavish. Force est de constater que ces expériences restent isolées et que les mesures de suivi manquent pour examiner la capacité des toits à générer des solutions environnementales à l'échelle urbaine.

Dans ce chapitre, nous avons étudié les problématiques environnementales connues à Montréal : les îlots de chaleur et le ruissellement des eaux de pluie. Ensuite, nous avons dressé le portrait des toits montréalais et nous avons observé la prédominance de la typologie horizontale sur l'île. Plusieurs exemples de projets d'aménagements des toits incitent à penser qu'ils amènent une contribution environnementale conséquente à l'échelle d'un édifice. Cependant, nous nous interrogeons sur la capacité de ces surfaces horizontales à avoir une influence suffisamment importante à l'échelle urbaine pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur et réduire le volume d'eau de ruissellement. Pour ce faire, nous allons élaborer une méthodologie dans le but d'approfondir nos connaissances sur les toits montréalais et pour tenter d'en évaluer la potentialité.

Chapitre 3 : Objectifs de recherche et méthodologie

Lors du chapitre précédent, nous avons identifié l'étendue des toits plats montréalais et la manière de les mettre à contribution face aux défis environnementaux. Cependant, nous ne savons pas si le fait d'aménager ces toits peut engendrer un impact environnemental significatif. Est-il pertinent de mettre en relation la superficie des toits avec la température urbaine ou la quantité d'eau de ruissellement ? Pour répondre à cela, l'analyse portera d'abord sur l'évaluation de la superficie des éléments urbains sur divers quartiers de l'île de Montréal, combinant plusieurs types de bâtiments. La superficie des toits (variable quantitative) sera calculée et comparée avec les superficies minérales et naturelles sur divers secteurs. Tout au long de cette analyse, la superficie minérale fait référence aux espaces bâtis, à la voirie, aux espaces de stationnement de surface (incluant les stationnements hors rue et les aires de manœuvre) dont le sol a été couvert d'une matière imperméabilisée, alors que la superficie naturelle fait référence aux espaces verts constitués d'un sol perméable incluant les jardins privés, parcs publics et canopées d'arbres. Les toits non aménagés seront inclus dans la catégorie des espaces minéralisés et les toits végétalisés seront référencés dans la catégorie des espaces naturels. Ensuite, nous mettrons en relation ces superficies avec les températures relevées et les taux de ruissellement déduits par le taux de terrain naturel. Ces comparaisons permettront d'identifier si la part végétale existante est suffisante pour compenser les méfaits de la part minérale et de distinguer les situations urbaines optimales de celles qui présentent un déséquilibre environnemental.

Rappelons que d'après l'Institut National de Santé Publique du Québec (2009, p. 21), « 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). Ensuite, les toits blancs ayant un impact moins significatif (Jacquet, 2011) à l'échelle d'un secteur, l'étude sera portée sur la contribution des toits végétalisés (variable qualitative). En ce qui concerne la gestion du volume d'eau de ruissellement, des bacs de collecteurs d'eau peuvent être installés sur les toits pour ralentir le ruissellement jusqu'à 100 %, ce qui permet de soulager les systèmes de canalisation (Gariépy, 2012). Alors que les toits végétalisés (comme celui du pavillon Lassonde à l'École Polytechnique Montréal) retiennent de 50 % (intensifs) à 90 % (extensifs) des eaux de pluie, ce qui représente de grandes économies de traitement des eaux. Nous verrons aussi que plus le toit est performant, plus son épaisseur et son poids augmentent. D'où l'importance d'adapter la

structure des édifices qui supporteront l'aménagement de ces toits. À partir des variables (quantitative et qualitative) identifiées ci-dessus, nous tenterons de révéler que l'aménagement des toits peut contribuer à la régulation de la température et à la gestion des eaux de ruissellement, en créant un élan écologique intégrant la cohabitation ville-nature.

3.1 Les toits envisagés comme un instrument d'analyse urbaine

La superficie des toits plats montréalais n'étant pas connue, elle est néanmoins estimée globalement à 80 km² de toits, soit 16 % de la superficie de l'île (Gariépy, 2012). Traiter la totalité des toits de l'île de Montréal représente un travail de recensement considérable au regard du temps d'élaboration de ce mémoire. De ce fait, le premier objectif est celui de révéler l'étendue des toits sur divers secteurs localisés sur l'île. Ces échantillons sont envisagés comme base pour élaborer notre méthodologie de recherche, mais ne prétendent pas être représentatifs de l'ensemble des toits sur l'île. Cependant, ils permettront d'acquérir une meilleure compréhension de la spécificité des toits montréalais dans les zones résidentielles, commerciales et industrielles.

3.1.1 Identification de trois secteurs

L'identification des secteurs a été convenue suite à plusieurs discussions avec des professionnels de la division de la Géomatique de la Ville de Montréal. Lors de ces échanges, des secteurs potentiels ont été envisagés pour l'étude, tels qu'Ahuntsic, Frontenac, Pie IX, Lachine, Griffintown, Westmount, Mile-End, le Plateau et le centre-ville. La décision de concentrer notre investigation sur trois secteurs a été prise selon les typologies prépondérantes observées sur l'île. (Patri-Arch, 2005) Ces secteurs sont identifiés selon les trois seuils de densité élaborés par Per et Arpa (2007, p. 15) à l'image du *Transect* représenté sur la figure 13 :

- Inférieur à 50log/ha : densité faible associée aux zones périurbaines (maisons individuelles),
- de 50 log/ha à 100 log/ha : zone urbaine à faible densité (duplex, maisons en rangée)
- de 100 à 300 log/ha : zones urbaines à moyenne densité (triplex, walk-ups et immeubles)

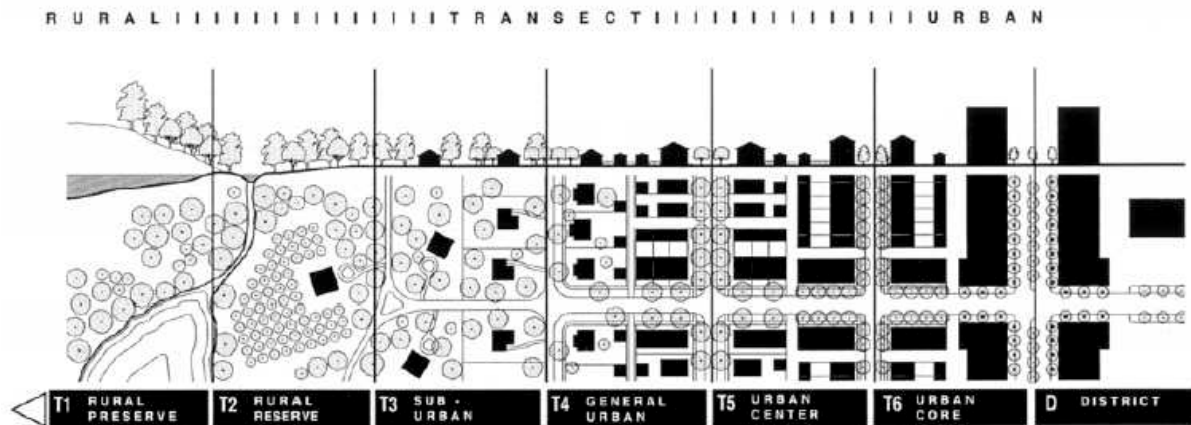


Figure 13 – Le « Transect »
 (Transect, Center for applied Transect Studies, 2008)

L'analyse des trois secteurs est effectuée selon leur coefficient d'emprise au sol (CES). Ce coefficient correspond au rapport entre l'emprise au sol total des bâtiments et la surface de l'îlot sur lequel ils sont implantés (Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région d'Île-de-France, IAURIF, 2005). Si nous choisissons d'analyser les secteurs en fonction de ce coefficient en plus de la densité d'occupation, c'est parce que celui-ci nous permet d'observer la relation entre les espaces bâtis et les espaces naturels. Nous retrouvons à Montréal cette concordance entre le CES des espaces bâtis qui augmente et la canopée des arbres qui se réduit progressivement. Ce constat est perceptible à travers les trois exemples de secteurs illustrés à la figure 14 (page 36), où la canopée est beaucoup moins fournie lorsque le CES est élevé. Le CES de ces secteurs peut être mis aussi en relation directe avec les îlots de chaleur et le ruissellement des eaux de pluie : tel que détaillé à la figure 8, page 22 (Martin, Baudouin, Beauchemin et Gagnon, 2007) et la figure 4 (page 14) (Stephens et al., 2002, p. 2), plus les espaces naturels sont rares en milieu urbain, plus les phénomènes environnementaux négatifs sont accentués.



Le centre-ville (densité et CES élevés)



Anjou (densité et CES moyens)



Pointe-Claire (densité et CES faibles)

Figure 14 – Trois exemples de densités et formes urbaines sur l'île de Montréal
(bing.com)

3.1.2 Objectif 1 : calculer la superficie des toits

Les données publiques, cadastrales, géospatiales et autres informations cartographiées¹¹ représentent des quantités d'informations importantes qui nous permettent de recenser la superficie des constituantes urbaines suivantes : les étendues naturelles dont la canopée des arbres, les parcs et jardins (publics et privés) ; et les étendues imperméabilisées, dont la voirie (chaussées, rues, intersections, trottoirs) et les stationnements. Cependant, ces données ne permettent pas de calculer la superficie des toits. Si l'emprise au sol d'un édifice peut correspondre à la superficie de son toit, cette information pourrait être connue grâce à l'abondance des données cadastrales disponibles : « Le cadastre du Québec représente votre propriété sur un plan et l'identifie par un numéro de lot. Ce plan montre les mesures, la superficie, la forme et la position de votre propriété par rapport aux propriétés voisines. » (MERN, Ministère de l'Environnement et des Ressources Naturelles, 2014). Mais, ces informations décrivent chaque morceau construit de manière isolée et ne tiennent pas compte de la superficie des toits comme un ensemble. De plus, ces données bidimensionnelles ne permettent pas de distinguer les toitures horizontales de celles en pentes. Mesurer la totalité des périmètres bâtis présentant les toits demeure un travail de tâtonnement et de recension empirique qui ne peut être mené que par un procédé opératoire rigoureux.

La complexité réside aussi dans la quantité d'informations à assimiler pour se faire une idée globale d'un contexte urbain. Ces données cadastrales et aériennes ne permettent pas de distinguer visuellement les variations de hauteur des toits. Les hauteurs sont identifiées sur le cadastre par des valeurs altimétriques. Mais, celles-ci peuvent être multiples et varient souvent d'un édifice à l'autre, rendant la lecture des hauteurs peu aisée à comprendre. En effet, l'interprétation virtuelle de la hauteur de plusieurs édifices dans un même secteur permettrait une reconstitution volumique des données urbaines des toits et donnera par conséquent l'opportunité de révéler leurs capacités à être mis en valeur. Également, la cartographie aérienne est un outil précieux qui permet de décrire le paysage urbain en projection, mais qui présente aussi des limites de précision : la canopée des arbres dépasse généralement les espaces bâtis. De ce fait, elle occulte une partie des toits et engendre des erreurs dues au manque de visibilité de l'emprise des toits. Pour quantifier la superficie en mètres carrés des toits plats, nous allons ainsi faire appel

¹¹ Les données collectées sont issues de la division la Géomatique de la Ville de Montréal.

aux acquis de la modélisation numérique tridimensionnelle. Certes, la gestion de données en trois dimensions n'est pas en soi une grande nouveauté. Les progrès technologiques dans les années 1990 ont accéléré l'émergence de ce procédé (Banaszak et Koehl, 2008). Des modèles numériques constitués de volumes simples (Unger, 2009) ou plus élaborés (Jochem, Höfle, Rutzinger et Pfeifer, 2009) sont communément disponibles sous forme de données ouvertes et téléchargeables en ligne. Néanmoins, la mise en œuvre d'une maquette numérique en trois dimensions d'un territoire requiert des connaissances de cette technologie (Banaszak et Koehl, 2008). Malgré les programmes publics (Kassner, Koppe, Shüttenberg et Bareth, 2008), tel que la mise en ligne de la maquette du centre-ville de Montréal par la Division de la Géomatique de la Ville de Montréal, ou privés, tel le projet Terra Dynamica 1 en France, il n'est pas aisé de manipuler ces modèles 3D pour en extraire les composantes géométriques virtuelles assimilables aux toits. Les trois maquettes numériques que nous mettrons en place pourront spécifier ces composantes, ce qui nous permettra de connaître la superficie réelle des toits dans les trois secteurs. Les toits seront représentés en tenant compte de leurs hauteurs par rapport au niveau du sol. La reconstitution des variations de hauteurs des toits donnera l'occasion de visualiser leur contexte urbain, notamment pour mieux comprendre la relation entre les toits, la densité des secteurs étudiés et le coefficient d'emprise au sol des bâtiments. La reconstitution des hauteurs des toits nous informera sur la densité des secteurs et le CES nous informera sur l'étendue des toits. La figure 15 (page 39) illustre l'influence de la variation des hauteurs des formes urbaines par rapport à l'impact des toits à l'échelle d'un îlot.

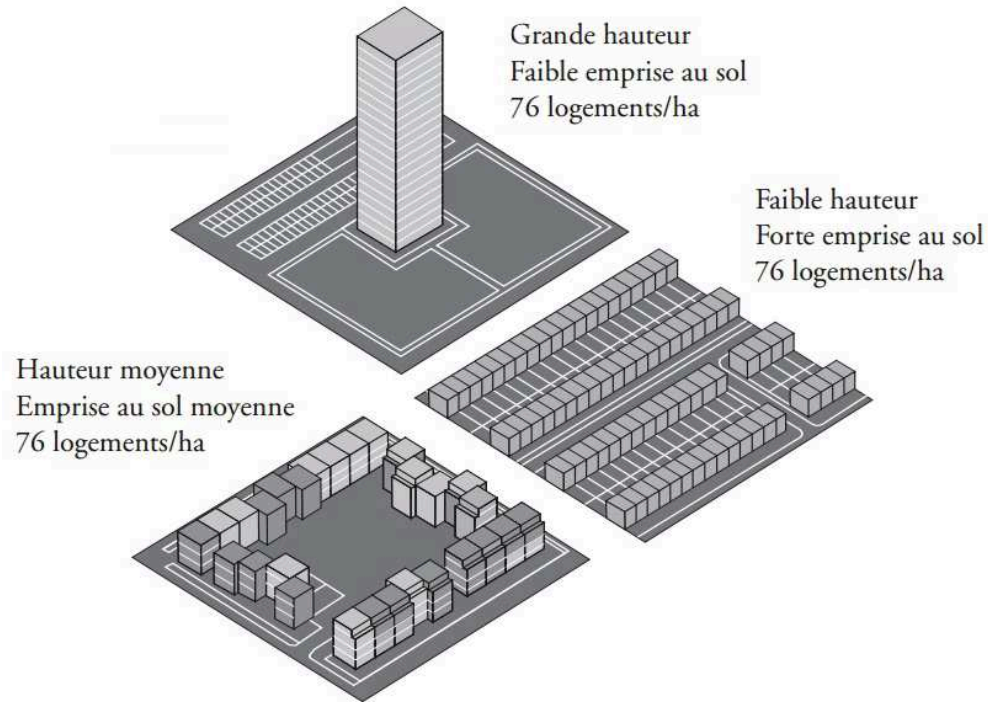


Figure 15 – Comparaison de l'immeuble de grande hauteur, des maisons de ville et des bâtiments collectifs pour une même densité bâtie à l'échelle d'un îlot de même dimension

Source : Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région d'Île-de-France, 2005

Ces formes urbaines ont une superficie de toit qui varie selon le CES : la superficie des toits augmente si le CES augmente. Par conséquent, le calcul de la superficie des toits nous permettra de valider les constats suivants. Ils deviennent catalyseurs d'effet environnementaux négatifs lorsqu'ils ne sont pas aménagés pour les contrer (Atelier parisien d'urbanisme, 2012). Ou, au contraire, ils ont la capacité d'être des régulateurs écosystémiques lorsqu'ils sont aménagés de manière adéquate (Ernst & Young et associés, 2009).

3.1.3 Objectif 2 : identifier la contribution environnementale des toits

Les superficies calculées seront mises en relation avec l'apport du végétal et du sol naturel en milieu urbain (Atelier parisien d'urbanisme, 2012 ; Stephens et al., 2002, p. 2). De ces relations, nous identifierons la situation urbaine où l'équilibre entre les espaces bâtis et les espaces naturels est optimal, ou au contraire, lorsque les phénomènes environnementaux sont attribués au déséquilibre entre ces deux éléments. C'est à cette étape-ci que nous proposons la contribution des toits pour réguler ces déséquilibres. Toutefois, comment peut-on proposer un aménagement approprié de ces toits ? Les toits sont soumis à une contrainte structurelle additionnelle dans le

cas de la végétalisation (Marchal, 2012). Pour ce qui est des toits blancs, aucun renfort n'est nécessaire pour la structure, étant donné que l'intervention ne touche que l'étanchéité et la finition du toit. Nous distinguons donc deux types de toits horizontaux :

- Le toit qui présente la capacité d'être aménagé : il peut recevoir une charge supplémentaire grâce à la structure surdimensionnée de l'édifice qui le supporte. Cette structure est habituellement constituée de béton ou d'acier. Les propriétaires de ces types d'édifices existants peuvent éventuellement installer un jardin intensif ou extensif sur leur toit, tout en tenant compte de l'épaisseur de terre préconisée par un ingénieur (Marchal, 2012).

- Le toit qui ne présente pas la capacité d'être aménagé : il a besoin d'un renforcement structurel pour permettre l'aménagement d'un jardin dont la surcharge ne génèrera pas un risque d'effondrement de l'édifice. À Montréal, d'après le constructeur Samcon (2014), un édifice « brique et bois » possède une structure de bois et la majorité des constructions de quatre étages ou moins sont de ce type. Cela signifie qu'ils ne peuvent pas supporter une charge additionnelle sans que les travaux structurels adéquats soient effectués. Ce qui permet d'affirmer que les bâtiments surmontés de ce type de toit demanderaient à être consolidés en raison de leur capacité portante limitée (Godin, 2012). Cosgrove estime, quant à lui, que la majorité des bâtiments montréalais demanderaient à être renforcés (Marshall, 2012).

Ceci dit, nous ne traiterons pas du procédé constructif et des coûts de renforcement de la structure et analyserons plutôt dans un même ensemble, les deux types de toits. Soit, ceux qui peuvent être aménagés immédiatement et ceux qui pourraient l'être en renforçant leur structure. Nous qualifions cet ensemble de « toits théoriquement aménageables ». À ce stade, différencier les toits supportés par une structure permettant un aménagement immédiat de ceux dont la structure ne le permet pas pourrait contraindre à éliminer des occasions de verdissements partiels réalisables. Ces occasions de verdissements fragmentaires sont peut-être isolées, de petite taille ou évolutives, mais elles pourraient amener leurs contributions une fois accumulées en nombre. Signalons à cet effet qu'il est commun de voir installer sur des toits quelques bacs (Godin, 2012) posés sur les appuis structurels (colonnes), en attendant peut-être de vouloir couvrir la totalité de la toiture de végétation ou d'avoir les moyens de faire les travaux nécessaires.

3.2 Méthodologie : la synthèse des données collectées sur les secteurs étudiés

L'intérêt environnemental des toits ayant été démontré précédemment (Cavayas et Baudouin, 2008; Anquez et Herlem, 2011), notre procédé opératoire permettra de quantifier et de qualifier l'apport environnemental de ces types d'aménagements en vue de réguler la température citadine et le volume d'eau de ruissellement.

3.2.1 La collecte des données

Lors de cette étude, des données ont été collectées et plusieurs types d'informations brutes ont été recueillis :

A) les données fournies par la Ville de Montréal correspondent aux données de base pour calculer la superficie des toits plats : des cartographies et informations cadastrales extraites du logiciel *ArcGIS* (figure 16) et des orthophotographies issues de vols aériens (figure 17, page 42).

Des cartographies complémentaires de chaque secteur ont été collectées à partir des données géospatiales disponibles en ligne sur le site du PMAD¹².

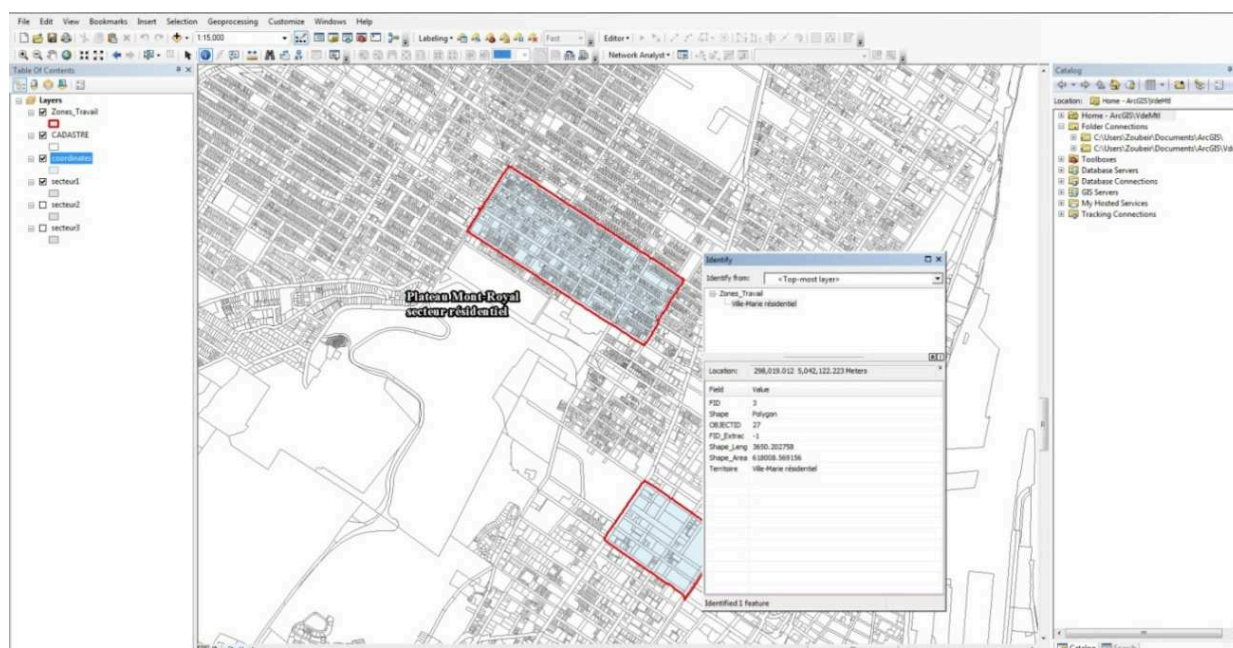


Figure 16 – Les systèmes d'information géographique (SIG) sur l'interface ArcGIS permettant de collecter les données cadastrales des trois secteurs au format Shapefile.

¹² Plan Métropolitain d'Aménagement et de Développement (2013) Repéré à <http://pmad.ca/> – consulté le 12 octobre 2013

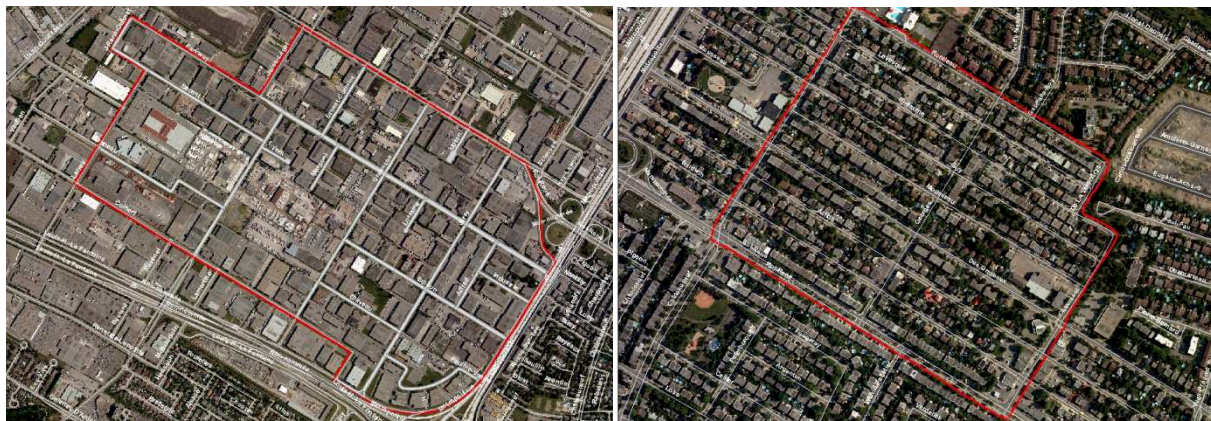


Figure 17 – Extrait des orthophotographies

Les encadrés rouges correspondent aux périmètres des quartiers résidentiels ou industriels localisés dans le secteur Anjou. Des contours seront tracés autour des canopées des arbres, autour de la voirie pour en connaître la superficie.

B) Les données fournies par l'UQAM¹³ décrivent la température relevée sur les trois secteurs, comme illustré sur la figure 18 (juin 2011). Nous avons notamment observé que la température et l'indice de végétation à Montréal sont liés. (Cavayas et Baudouin, 2008)



Figure 18 – Extrait des cartographies des températures

(Anjou : industriel versus résidentiel) allant du bleu clair (>17 °C) au bleu foncé (>42 °C)
(Cavayas et Baudouin, 2008)

¹³ Auprès M. Yves Baudouin, professeur et géographe à l'Université du Québec à Montréal

3.2.2 Le croisement des données par la visualisation volumique

Afin de répondre au premier objectif, celui d'identifier la superficie des toits, des espaces minéralisés et des espaces naturels sur les trois secteurs, nous avons reconstitué leurs contextes urbains dans une maquette numérique selon les deux étapes suivantes :

- La validation de la fiabilité des données collectées par le croisement des plans de cadastre, des orthophotographies et des données géospatiales. De par leur nature, les données collectées proviennent de sources différentes et ne sont pas centralisées. Les photographies aériennes présentent une distorsion focale qui ne permet pas de les superposer parfaitement au cadastre. Et le cadastre n'a pas la précision d'un relevé topographique. Ces données, une fois superposées, révèlent un désaxage qui devient source d'erreur. La synthèse de ces données bidimensionnelles permettra d'éliminer les informations approximatives et permettra de consolider les connaissances géospatiales des trois secteurs.

- La modélisation des bâtiments en trois dimensions : ce processus permet de visualiser les données traitées à la première étape dans chacun des trois secteurs. L'utilisation de la représentation tridimensionnelle nous a permis de distinguer les toits des bâtiments par rapport à leur emprise au sol. Les éléments issus de la représentation bidimensionnelle tels que le cadastre ou la photographie aérienne ne donnent pas la possibilité de distinguer clairement ces deux éléments. La maquette numérique nous permet de traiter les données cadastrales et aériennes de manière à reconstituer le contexte urbain, les variations de hauteurs, comme illustré en vert sur la figure 19.

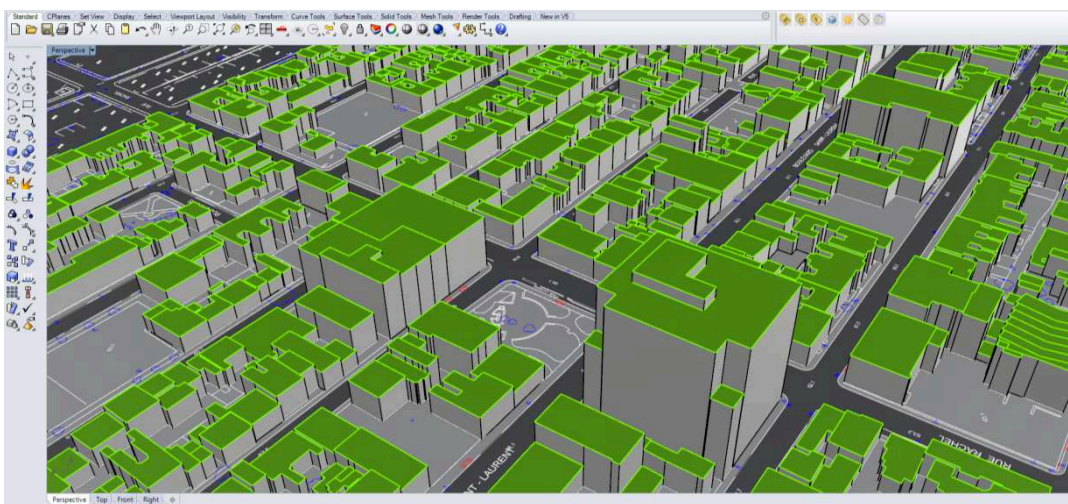


Figure 19 – Imprimé-écran de l'interface Rhino3D représentant la maquette numérique du secteur résidentiel du centre-ville avec les toits plats identifiés en couleur verte

La maquette numérique devient alors un instrument de mesure interactif qui permet d'apprécier les opportunités d'aménagement sur les toits. Ce procédé opératoire nous permet de sélectionner les composantes urbaines reconstituées virtuellement et de connaître leurs superficies.

3.2.3 La mise à profit des observations sous forme systémique

Afin de répondre à notre deuxième objectif, celui d'évaluer si la superficie des toits est assez conséquente pour influencer le rapport entre l'espace minéral et l'espace naturel, nous procédons d'abord à la synthèse de nos connaissances sur les types de toits plats. Cette étape nous permettra de simuler les scénarios de régulation des toits à partir des critères issus de la revue de littérature et répertoriés selon le tableau 2 :

Type de toit plat	Surcharge	Travaux	Température (°C)	Rétention d'eau (%)	Valeur environnementale
Foncé ¹⁴	aucune	à rénover en totalité	80	0	négative
Blanc ¹⁵	matériau d'étanchéité	l'étanchéité à revoir	45	0	positive
Extensif ¹⁶	50 et 100 kg/m ²	structure à renforcer	29	30	très positive
Intensif	> 400 kg/m ²	structure à consolider	29	60	excellente
Collecteur d'eau ¹⁷	1m ³ d'eau = 1 tonne	structure à consolider	26	90	assez positive

Tableau 2 – Synthèse des connaissances sur les types de toits plats en relation avec l'effet d'îlot de chaleur et les eaux de ruissellement lors d'une journée ensoleillée à température ambiante de 26 °C

(Azouz, 2014, d'après les travaux de Fischetti, 2008 ; Liu et Bass, 2005 ; Potvin, 2008 ; Anquez et Herlem, 2011 ; Gariépy, 2012 ; Morrill, Bales et Conklin, 2005 ; Michot, 2007 et Stephens et al., 2002)

¹⁴ Le toit "foncé" est constitué de couches de feutre, de goudron et de gravier (Potvin, 2008)

¹⁵ Le toit "blanc" correspond au revêtement blanc permettant au toit de réfléchir les rayons du soleil (Anquez et Herlem, 2011)

¹⁶ Les toits "extensifs" et "intensifs" : évaluation de la surcharge à capacité maximale en eau en considérant l'évapotranspiration. (Michot, 2007 et Stephens et al., 2002)

¹⁷ Les toits "collecteurs" sont aménagés avec des bacs de rétention d'eau. (Gariépy, 2014)

Les toits foncés sont considérés comme l'état actuel de toits dans les secteurs étudiés. Les toits blancs réfléchissent les rayons solaires et par conséquent, permettent de baisser la température sur le toit (de 80 °C à 45 °C), mais cela est peu suffisant comparé à la végétalisation (de 80 °C à 29 °C). Cette donnée nous permet d'affirmer que les toits végétalisés permettraient de faire baisser la température ambiante moyenne des secteurs de manière plus importante que les toits blancs. L'apport des toits végétalisés (extensifs et intensifs) permettra de transformer l'emprise des espaces construits en une superficie naturelle afin de compenser la pénurie d'espaces verts en milieu urbain. En effet, si nous ne pouvons pas végétaliser plus de zones au sol, il est tout à fait possible de les installer sur les toits. Les bacs de collecteurs d'eau permettront de récupérer les volumes d'eau de pluie afin de réduire le ruissellement. Ces analyses mettront en évidence des problématiques environnementales à l'échelle des trois secteurs.

La mise en relation des critères urbains avec les types d'aménagements simulés sur les toits nous permettrait d'appréhender des situations complexes à d'autres endroits de l'île de Montréal. Le processus correspond alors à une modélisation de ce que nous avons observé à travers une situation réelle et met à profit les conclusions tirées de cette observation sous forme systémique : le modèle systémique s'appuie sur l'extrapolation et la perception globale de la contribution des toits. Il est alors appliqué à des situations similaires, tout en présupposant que les résultats seront identiques. La validation des phénomènes environnementaux régulés par le biais des toits se réalise « par la comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité ». Ainsi, les trois secteurs servent de base de connaissances et peuvent être employés comme un outil d'aide à la décision pour le design urbain.

Le chapitre suivant exposera les résultats de cette méthodologie en vue de proposer une solution systémique permettant de pronostiquer des impacts environnementaux dans d'autres secteurs sur l'île de Montréal, voir transposable dans d'autres villes dont les problématiques urbaines et environnementales sont similaires.

Chapitre 4 : Présentation des résultats

Les objectifs et la méthodologie ont mené à la mise en place d'un procédé opératoire qui permettra d'aborder et analyser les secteurs retenus de manière à saisir leurs particularités. Nous présenterons les données collectées et celles que nous avons établies de manière à révéler des configurations urbaines spécifiques et des résultantes environnementales distinctes pour chacune des typologies.

4.1 L'objet de la recherche : trois secteurs situés sur l'île de Montréal

L'île de Montréal est identifiée à partir des références de localisation mondiales (cf. Annexe 1). Sa superficie est d'environ 500 km² (482.8 km²)¹⁸. Elle comprend 16 villes, soit la ville de Montréal avec ses 19 arrondissements, et 15 villes liées, regroupées au sein de l'agglomération de Montréal. Sa population est de 1,9 million d'habitants (1 887 983 d'habitants)¹⁹. Les trois secteurs retenus sont situés à l'ouest, au centre et à l'est de l'île tel qu'illustré à la figure 20. Au sud-ouest de l'île se trouve Pointe-Claire, Anjou se situe au nord-est et le centre-ville à l'est. Chacun de ces secteurs est constitué d'une bande résidentielle et d'une zone commerciale ou industrielle dont les caractéristiques sont décrites ci-dessous :

- **Pointe-Claire** (l'ouest de l'île) : une zone urbaine associée aux zones périurbaines à très faible densité, avec un CES faible autour de 20 %. Le secteur résidentiel inférieur à 50 log/ha est constitué de maisons individuelles dont le toit est majoritairement pentu. Le secteur industriel est constitué d'entrepôts commerciaux de deux à trois étages de hauteur, couverts d'un toit plat de tailles allant de 3,000 m² à 15,000 m².
- **Anjou** (l'est de l'île) : une zone urbaine à faible densité, avec un CES moyen estimé à environ 50 %. Le secteur résidentiel de 40 log/ha à 100 log/ha est constitué de duplexes et de maisons en rangée à toits majoritairement plats. Le secteur industriel est constitué de compagnies installées dans des entrepôts commerciaux de deux étages de hauteur, couverts d'un toit plat et de tailles allant de 1,000 m² à 10,000 m².

¹⁸ Repéré à http://www.imtl.org/montreal_en_chiffres.php

¹⁹ Repéré à http://www.geomondiale.fr/noms_geographiques/name.php?uni=-804451&fid=901&c=canada
– consulté le 24 janvier 2013

- **Le centre-ville** (le centre de l'île) : une zone urbaine de densité moyenne à forte, avec un CES pouvant aller jusqu'à 80 %. Le secteur résidentiel du centre-ville est constitué de triplex, walk-ups et immeubles résidentiels de 100 à 300 log/ha surmontés en majorité de toits plats. Le secteur commercial du centre-ville (incluant la Place Ville-Marie) est constitué d'un réseau commercial souterrain, de plusieurs commerces localisés au niveau des rues et d'étages supérieurs constitués de tours à bureaux allant jusqu'à une vingtaine d'étages.

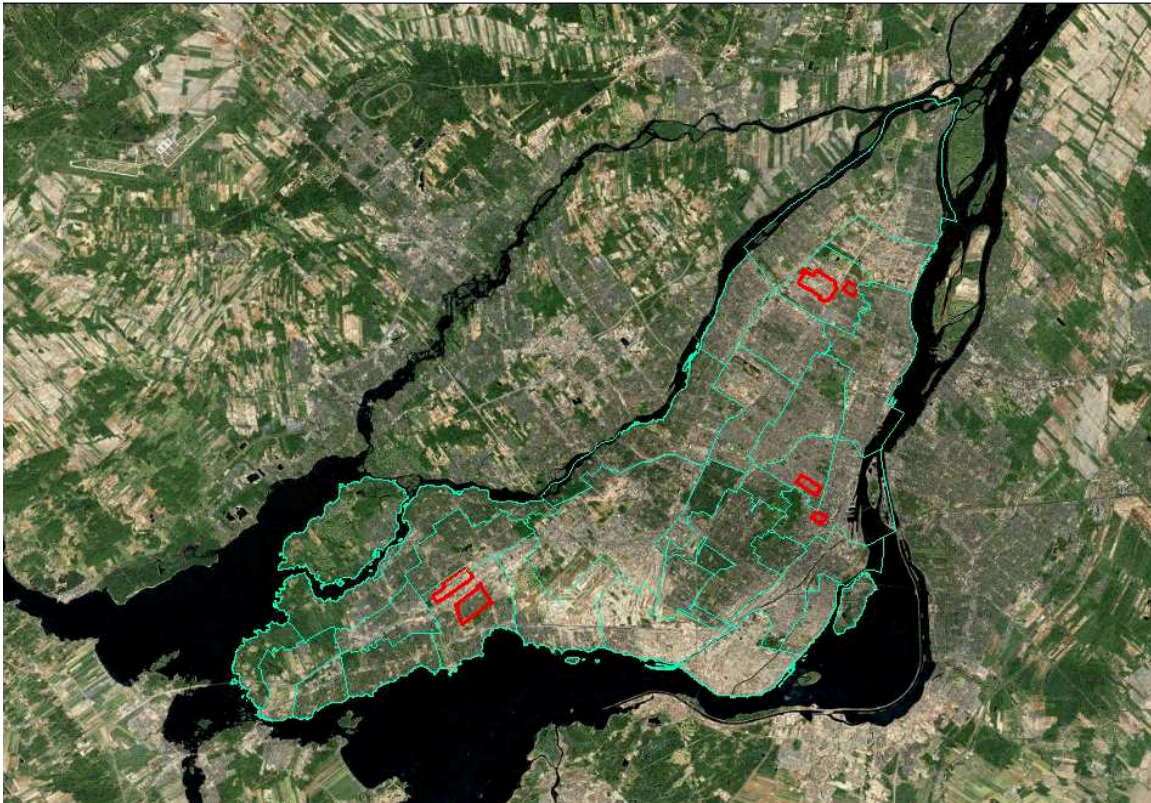


Figure 20 – Localisation des trois secteurs sur l'île de Montréal sur une image satellite

L'accessibilité aux données sur ces secteurs auprès de la Division de la Géomatique de la Ville de Montréal et la prise de mesures des îlots de chaleur²⁰ effectuée par vol aérien au-dessus de ceux-ci a aussi influencé cette sélection. Plusieurs plans de vol ont en effet été effectués par la CMM au-dessus de ces secteurs entre le mois d'avril 2009 et le mois de juin 2010 (Communauté métropolitaine de Montréal, 2009). Des images aériennes (orthophotographies) ont été créées à partir des prises de vues réalisées lors de ces vols. Les données relatives à ces secteurs sont donc assez conséquentes pour permettre d'effectuer une analyse comparative substantielle.

²⁰ Mesures effectuées par M. Yves Baudouin, professeur au département de Géographie de L'UQAM

Secteur : Pointe-Claire

Superficie totale : 3,46 km²

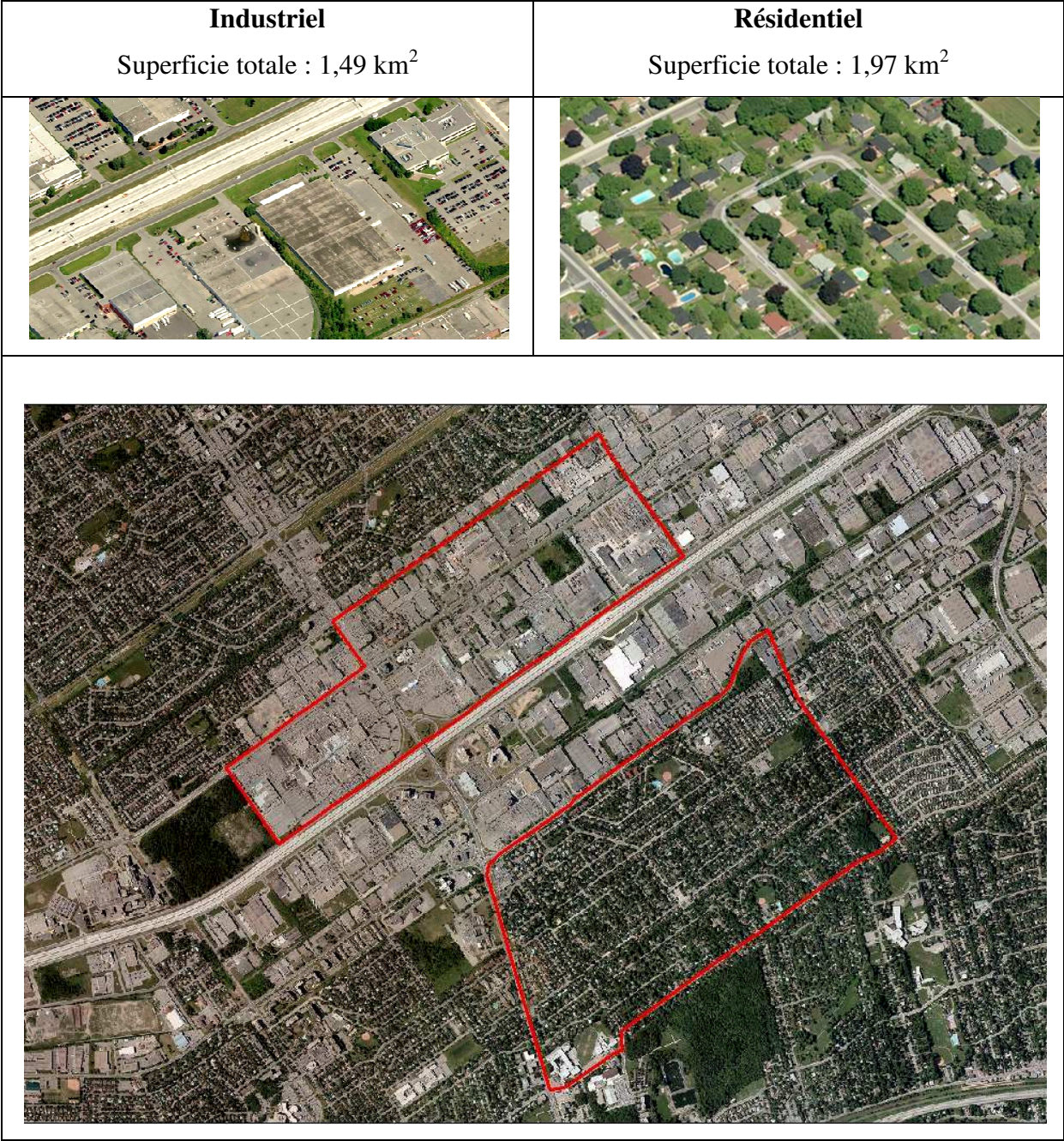


Figure 21 – Vue aérienne et image satellite du secteur Pointe-Claire

Secteur : Anjou

Superficie totale : 2,29 km²

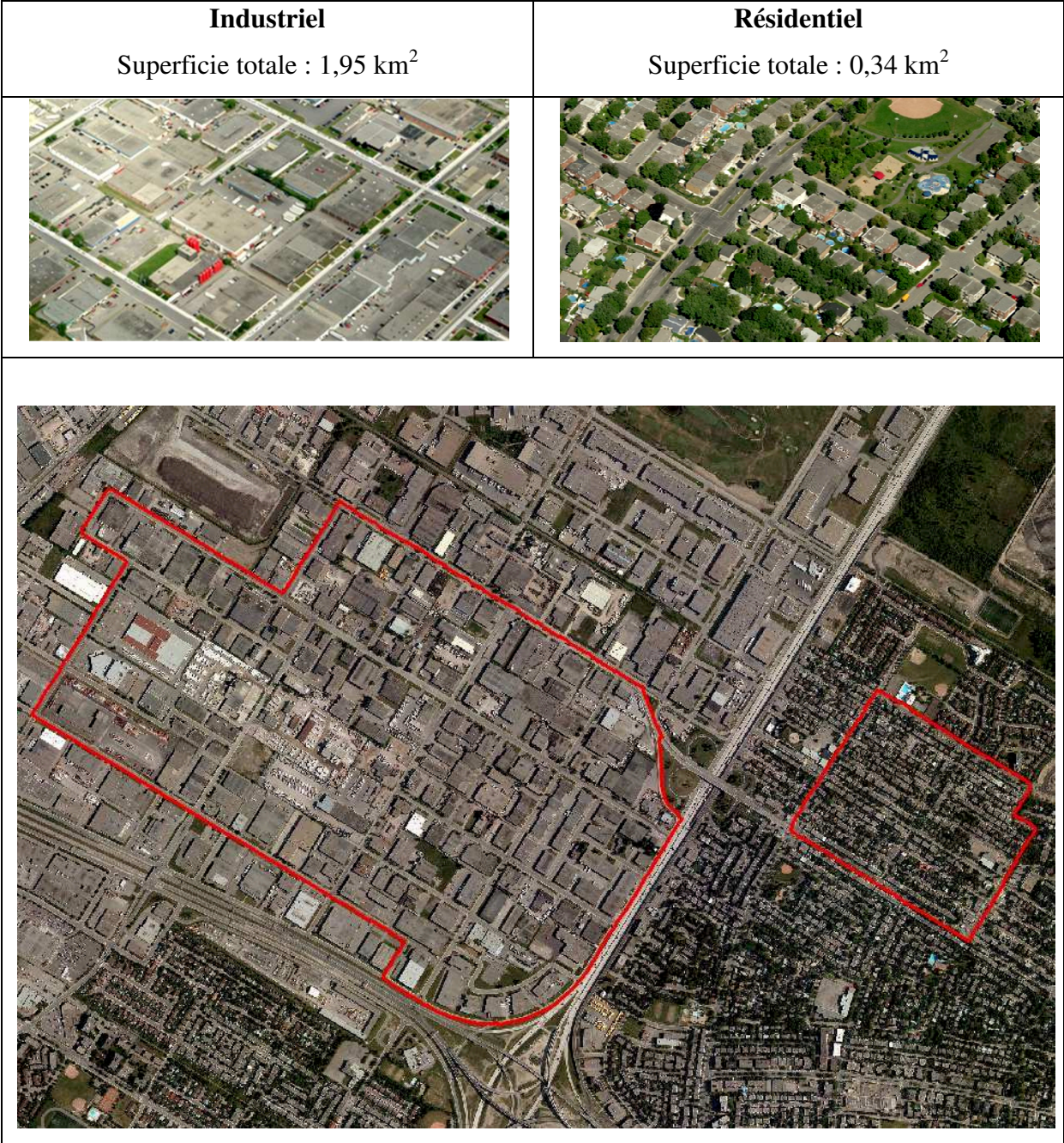


Figure 22 – Vue aérienne et image satellite du secteur Anjou

Secteur : Centre-ville

Superficie totale : 0,90 km²

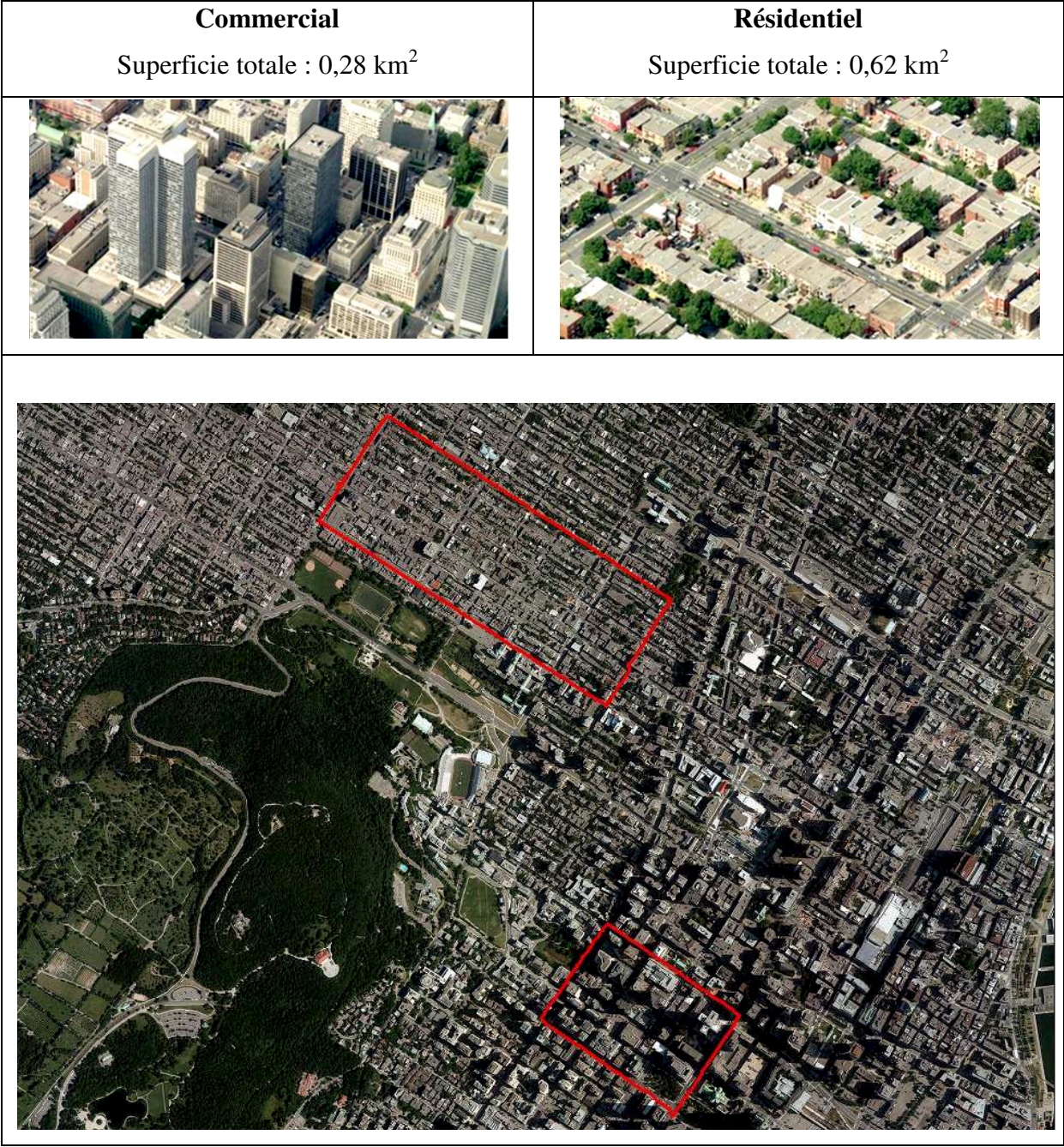


Figure 23 – Vue aérienne et image satellite du secteur centre-ville

Bien que les trois secteurs aient chacun une zone résidentielle et une zone commerciale ou industrielle distinctes, leurs constitutions présentent des inégalités importantes. Tout d’abord, la plus grande différence concerne la densité : le secteur Pointe-Claire a la densité la plus faible (inférieure à 50 log/ha) par opposition au centre-ville où la densité y est la plus forte (de 100 à 300 log/ha). Par conséquent, le CES du secteur Pointe-Claire y est le plus faible (20 %) et celui du centre-ville le plus haut (80 %). Dans les zones résidentielles tout comme dans les zones commerciales ou industrielles, la forme urbaine diffère selon chaque secteur : à Pointe-Claire, les espaces bâtis sont constitués de maisons unifamiliales, à Anjou ce sont des maisons en rangées et au centre-ville des immeubles résidentiels. De même pour les espaces commerciaux, les immeubles de bureaux sont situés en centre-ville, tandis que les activités qui nécessitent de grandes surfaces de manœuvre et d’entreposage sont implantées dans les zones à faible densité en périphérie (secteur Pointe-Claire).

4.2 Les données collectées sur trois secteurs ²¹

Secteurs	Proportion du bâti	Proportion de la canopée	Proportion de la voirie	Proportion résiduelle
Pointe-Claire, zone résidentielle	13,27 %	30,0 %	N/D	N/D
Pointe-Claire, zone industrielle	23,09 %	3,9 %	N/D	N/D
Anjou, zone résidentielle	23,58 %	11,8 %	23,3 %	53 %
Anjou, zone industrielle	32,41 %	1,7 %	8,5 %	59 %
Centre-Ville, zone résidentielle	42,14 %	10,6 %	28,4 %	29 %
Centre-Ville, zone commerciale	33,53 %	4,3 %	30,1 %	36 %

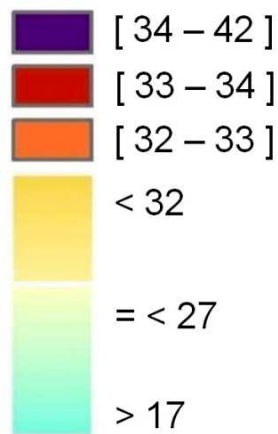
Tableau 3 – Les données collectées auprès de la Ville de Montréal sur les trois secteurs
Division de la Géomatique (Sananikone et Mongeau, 2013)

Comme exposé dans le tableau 3, la disparité entre les secteurs est illustrée par le pourcentage d’éléments urbains selon deux catégories : les superficies minéralisées (imperméabilisées et les

²¹Données collectées par l’entremise de B. Gariépy, architecte, Direction des stratégies et transactions immobilières à la Ville de Montréal, auprès de la division de Géomatique, courtoisie de S. Sananikone et R. Mongeau

superficiés naturelles (végétales). Les valeurs surlignées en vert correspondent aux valeurs les plus basses pour la proportion minérale et les plus hautes pour la proportion naturelle. Au contraire, les valeurs surlignées en rouges sont les plus hautes pour la proportion minérale et les plus basses pour la proportion naturelle. Il est question d'observer ultérieurement comment ces proportions peuvent influencer la situation environnementale des secteurs. Les pourcentages des superficies décrites dans le tableau 3 sont issus du tableau détaillé correspondant à l'annexe 2.

En complément des valeurs de superficies, nous avons relevé les températures sur ces mêmes secteurs sur la figure 24, selon la légende suivante en degrés Celsius :



L'objet de l'analyse des îlots de chaleur permet alors d'examiner les secteurs dont la hausse de température est problématique et de pouvoir estimer les aménagements des toits végétalisés en vue de réguler ces hausses de température.

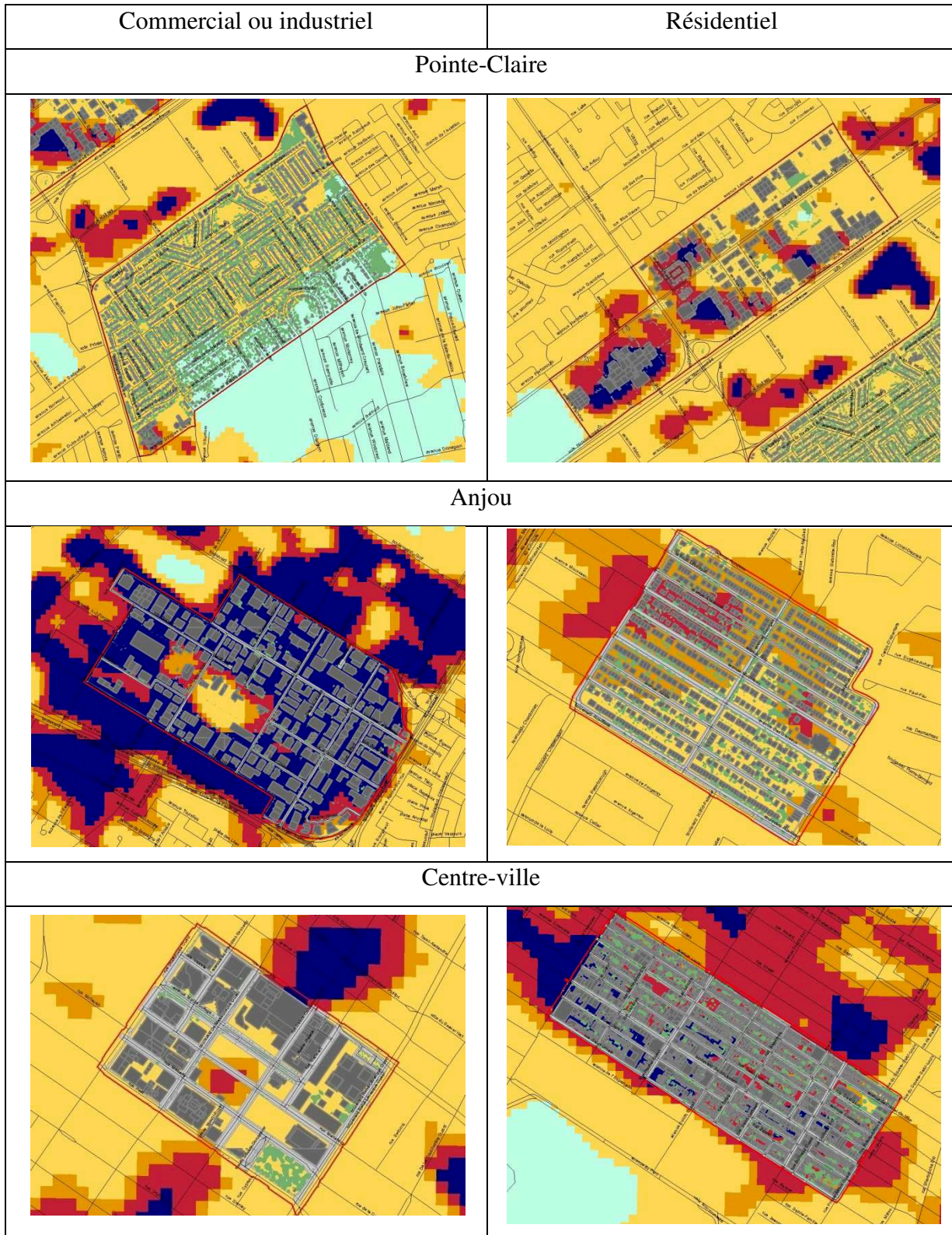


Figure 24 – Relevé des températures sur les trois secteurs
(Cavayas et Baudouin, 2008)

4.3 Vérification et relevé de données complémentaires

4.3.1 Vérification des superficies

Après la collecte des données auprès de la Ville de Montréal sur les trois secteurs (tableau 3), nous avons procédé à la vérification des différentes valeurs de superficies. Par le biais des maquettes numériques, nous avons déterminé et isolé un ensemble de superficies dans les catégories suivantes : toits, espaces verts, canopée, voirie et stationnements (tableau 4). Ces superficies sont représentées sous forme d'aplats de couleur restitués sur le plan des secteurs respectifs (figures 25, 26 et 27). Pour effectuer ce relevé, nous nous sommes basés sur le croisement de l'image aérienne et du cadastre. Les valeurs obtenues ont ensuite été comparées à celles collectées auprès de la Ville de Montréal. Si la plupart des chiffres sont en corrélation, certaines valeurs sont toutefois divergentes, notamment la superficie du bâti au centre-ville. Nous baserons donc la suite de notre analyse sur les chiffres que nous avons déterminés.

secteurs	usage	totale	toiture	parcs et jardins	canopée	voirie	stationnements
		%	%	%	%	%	%
Pointe-Claire	résidentiel	100	13	68	27	14	4
	commercial	100	24	8	3	12	55
Anjou	résidentiel	100	24	39	10	27	9
	commercial	100	32	12	1	12	44
Centre-Ville	résidentiel	100	46	17	10	25	12
	commercial	100	42	8	4	42	8

Tableau 4 – Synthèse des superficies déterminées à partir des maquettes numériques

Les pourcentages des superficies décrites dans le tableau 4 sont issus du tableau détaillé en mètre carré correspondant à l'annexe 3

Le tableau 4 nous permet de distinguer clairement la proportion des superficies naturelles par rapport aux superficies minérales, tel que présenté sur le tableau 5:

secteurs	usage	total	naturel	minéral
		%	%	%
Pointe-Claire	résidentiel	100	68	32
	industriel	100	8	92
Anjou	résidentiel	100	39	61
	industriel	100	12	88
Centre-Ville	résidentiel	100	17	83
	commercial	100	8	92

Tableau 5 – Pourcentage des superficies minérales et naturelles sur les trois secteurs

Les pourcentages des superficies décrites dans le tableau 5 sont issus du tableau détaillé correspondant à l'annexe 4



Figure 25 – Représentation du secteur Pointe-Claire (calcul des superficies)

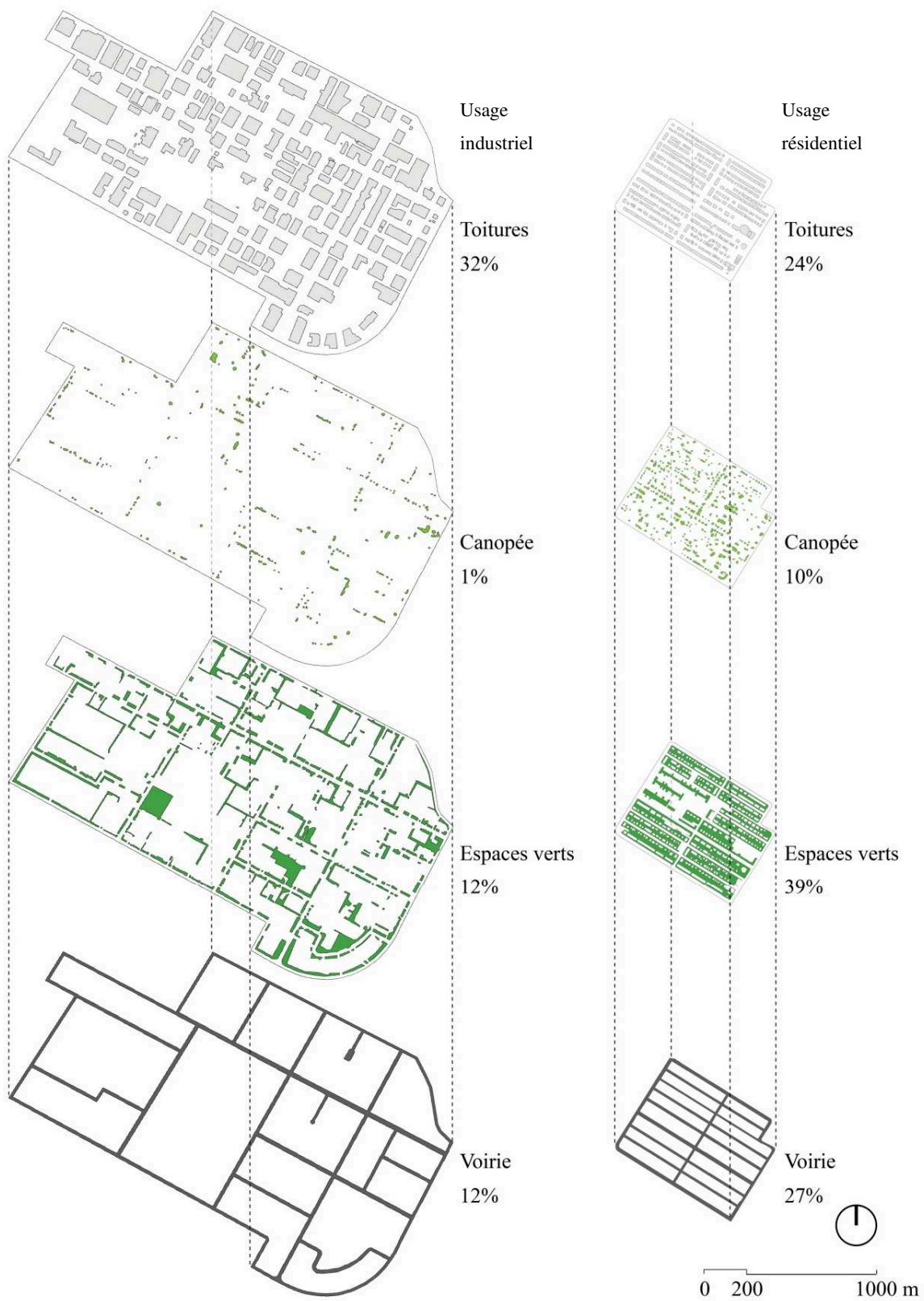


Figure 26 – Représentation du secteur Anjou (calcul des superficies)

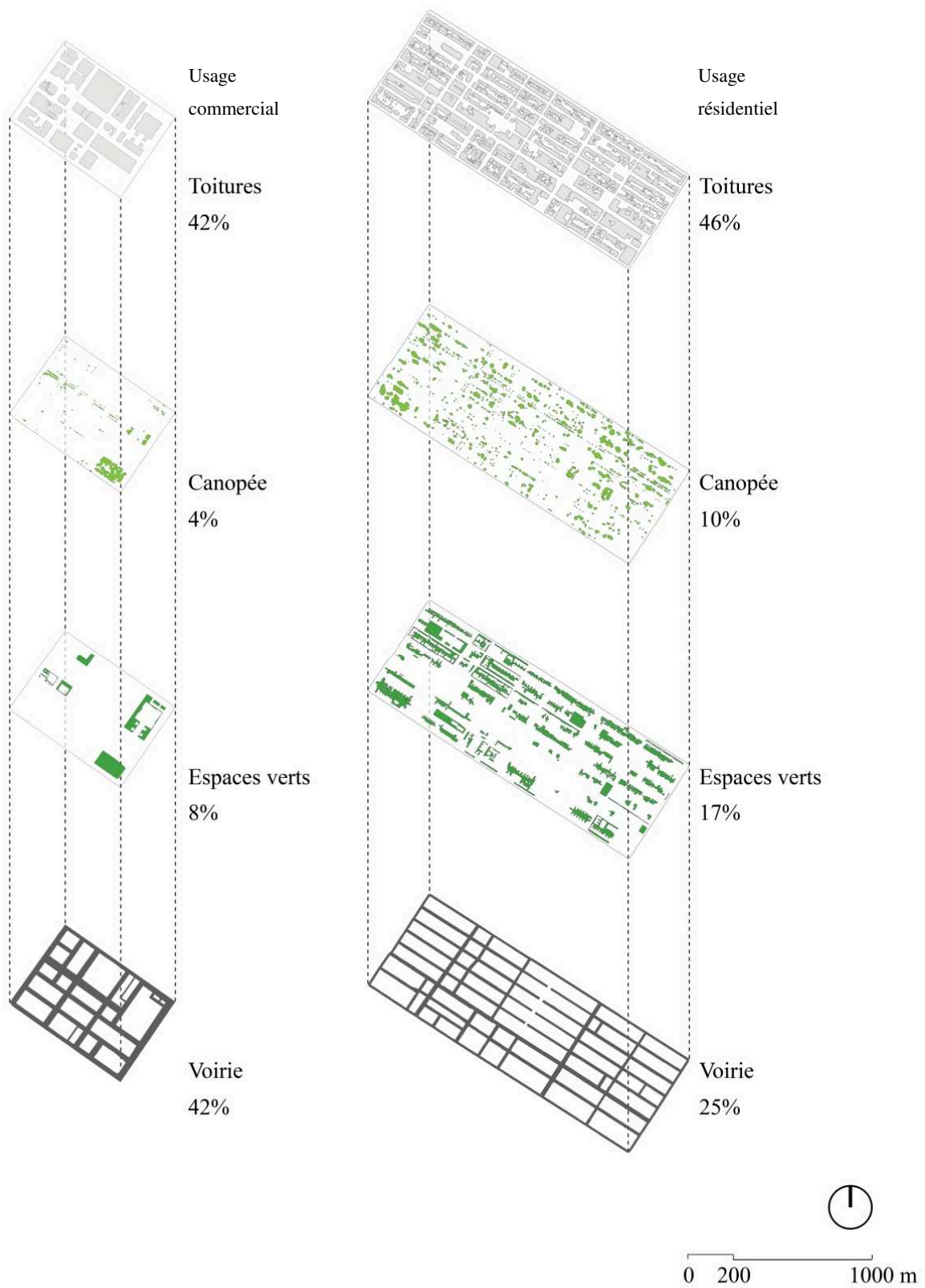


Figure 27 – Représentation du secteur centre-ville (calcul des superficies)

4.3.2 Présentation des données de températures et hydrométriques

La synthèse des données a été représentée sous forme de deux graphiques (figures 28 et 29) afin d'observer les concordances entre les valeurs et en vue d'en tirer un rapport évident entre les proportions de superficies minérales et naturelles vis-à-vis des variations de température et des volumes d'eau de ruissellement. Ces données ont été croisées avec les données issues de la revue de littérature, notamment celles de Martin, Baudouin, Beauchemin et Gagnon (2007) et Stephens et al. (2002). Afin d'effectuer ces croisements, nous avons regroupé les informations que nous avons sur les pourcentages de superficie naturelle et les températures moyennes de chaque secteur dans un graphique (figures 28 et 29). Les pourcentages de superficie minérale sont représentés en abscisse et les pourcentages de surface naturelle en ordonnée. Les secteurs ont été situés sur le graphique selon leurs proportions minérales et naturelles. Par exemple, le secteur résidentiel d'Anjou a une température moyenne de 31,2 °C et taux de ruissellement de 49 %, pour une proportion minérale de 61 % et naturelle de 39 %.

Les données de température (tableau 6) et hydrométriques (tableau 7) des trois secteurs ont été reportées sur les maquettes numériques afin de visualiser et de comparer leurs situations environnementales. Ces données sont illustrées par des représentations en plan pour facilitant la lecture et la mise en relation des différentes données entre les secteurs de Pointe-Claire (figure 30), d'Anjou (figure 31), et du centre-ville (figure 32). Ces représentations en plan décrivent :

- la vue aérienne isolée correspondant à la configuration de chaque secteur
- la synthèse des composantes urbaines dont la voirie (en gris foncé), les aires de manœuvre et de stationnement (en gris), les bâtiments (en gris pâle), les jardins publics et privés (en vert) et la canopée des arbres (en vert clair)
- la synthèse des superficies de toits recevant les l'eau de pluie (en bleu) par rapport à la totalité de la superficie de chaque secteur (en bleu pâle)
- la synthèse des températures dans chaque secteur selon la légende des températures exprimées en couleurs allant de moins de 17 °C à 42 °C (Cavayas et Baudouin, 2008).

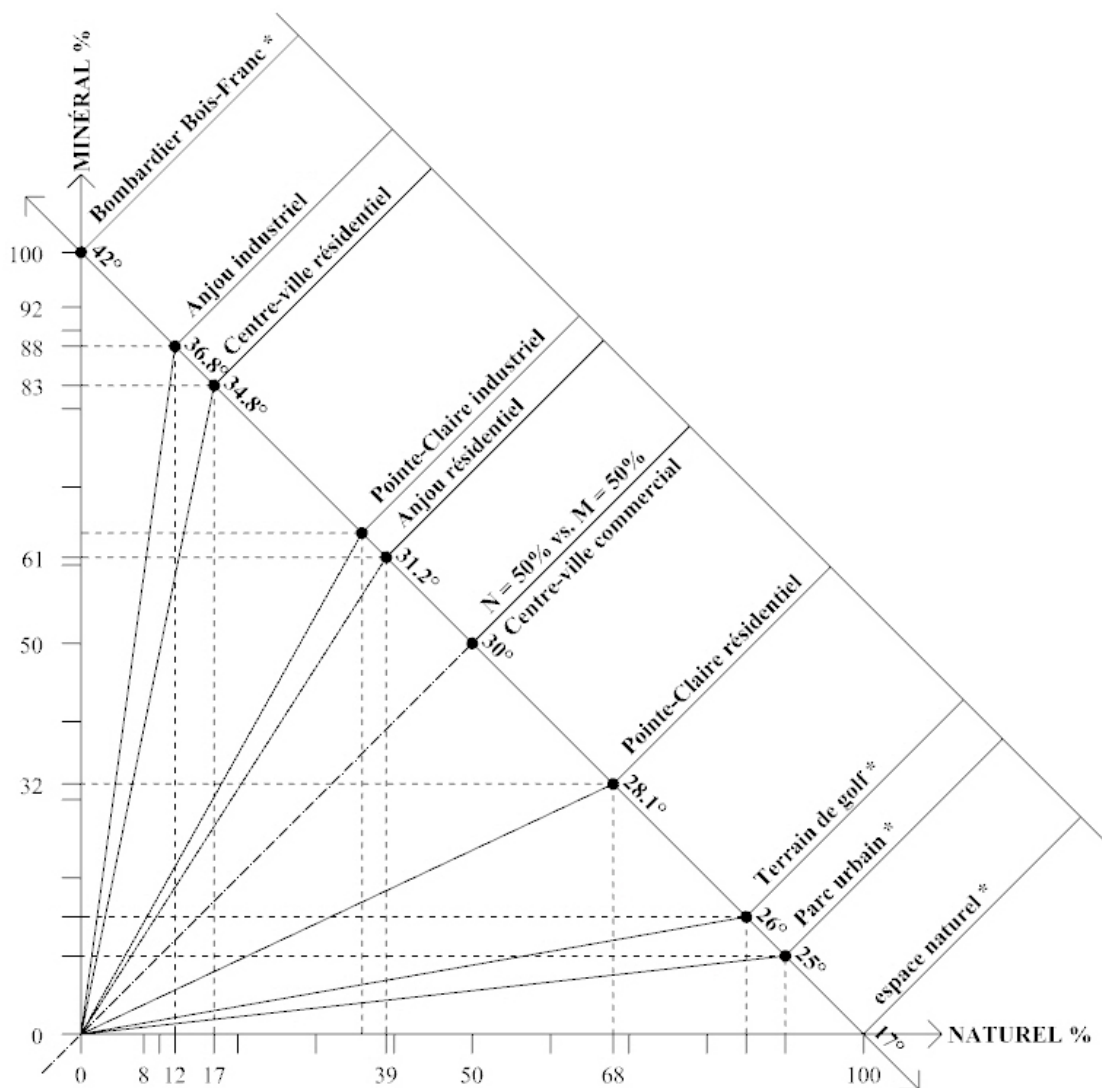


Figure 28 – Illustration graphique des températures moyennes des secteurs en fonction des superficies minérales et naturelles (Martin, Baudouin, Beauchemin et Gagnon, 2007)

secteurs	usage	17°C < t ≤ 27°C	27°C < t ≤ 32°C	32°C < t ≤ 33°C	33°C < t ≤ 34°C	34°C < t = 42°C	t°C moy.
		%	%	%	%	%	
Pointe-Claire	résidentiel	20	78	1	1	-	28,1
	industriel	-	50	17	21	11	31,8
Anjou	résidentiel	-	47	42	11	-	31,2
	industriel	-	4	4	12	79	36,8
Centre-Ville	résidentiel	-	2	6	60	33	34,8
	commercial	-	88	7	5	1	30,0

Tableau 6 – Synthèse des données de températures sur les trois secteurs (Cavayas et Baudouin, 2008). Les pourcentages des superficies décrites dans le tableau 6 sont issus du tableau détaillé en mètres carrés correspondant à l'annexe 5.

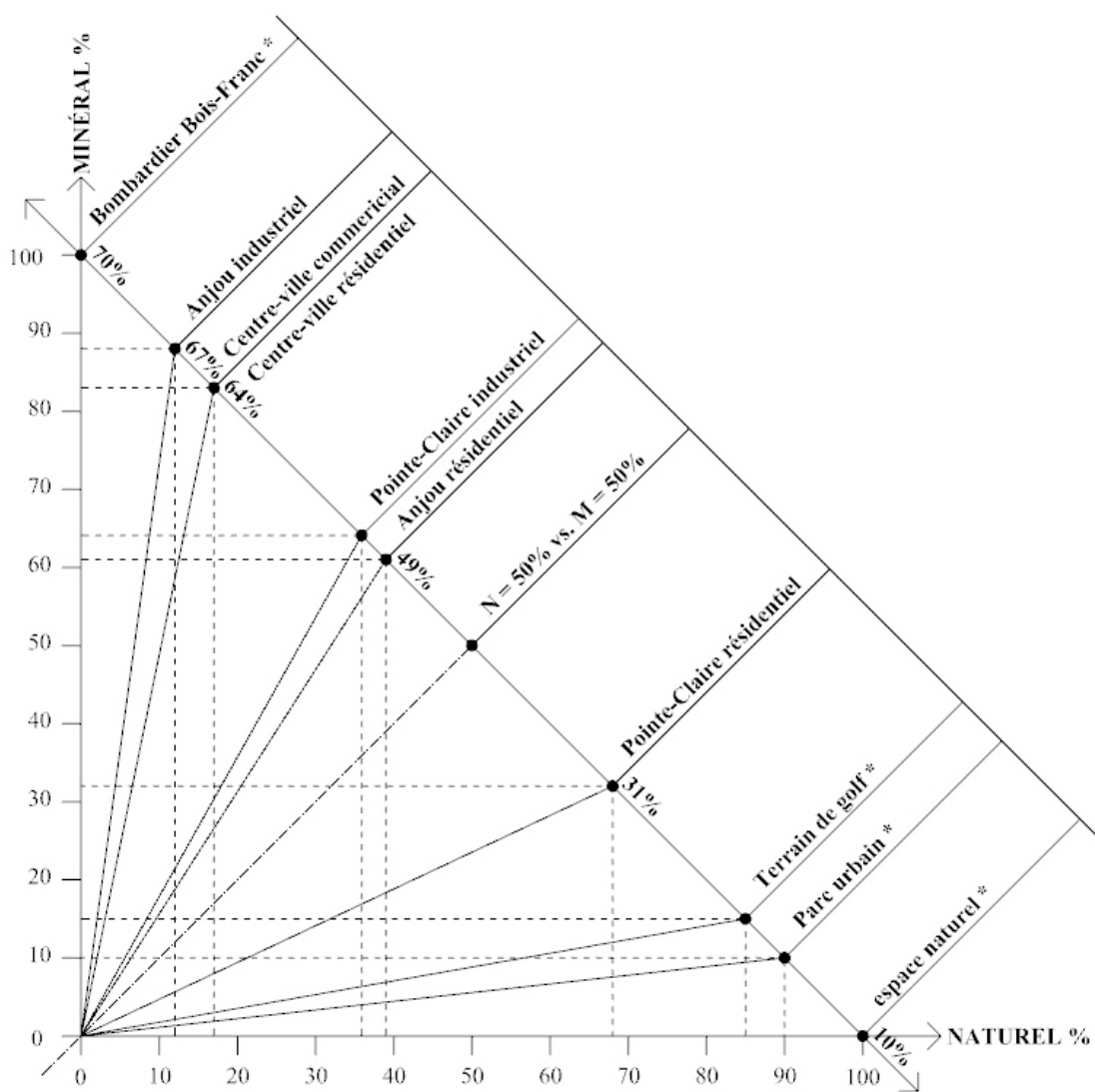


Figure 29 – Illustration graphique des quantités d’eau de ruissellement en fonction des superficies minérales et naturelles (Stephens et al., 2002)

secteurs	usage	volume d'eau de pluie total/an	volume d'eau de ruissellement total/an	sup. totale des toits / sup. de la parcelle
		m3	%	%
Pointe-Claire	résidentiel	2 032 560	31	13
	industriel	1 548 604	70	24
Anjou	résidentiel	335 168	49	24
	industriel	2 020 949	67	32
Centre-Ville	résidentiel	646 107	64	46
	commercial	262 803	70	42

Tableau 7 – Synthèse des volumes d’eau collectés sur les trois secteurs

Les pourcentages des volumes décrits dans le tableau 7 sont issus du tableau des volumes détaillés en mètres carrés dans l'annexe 6

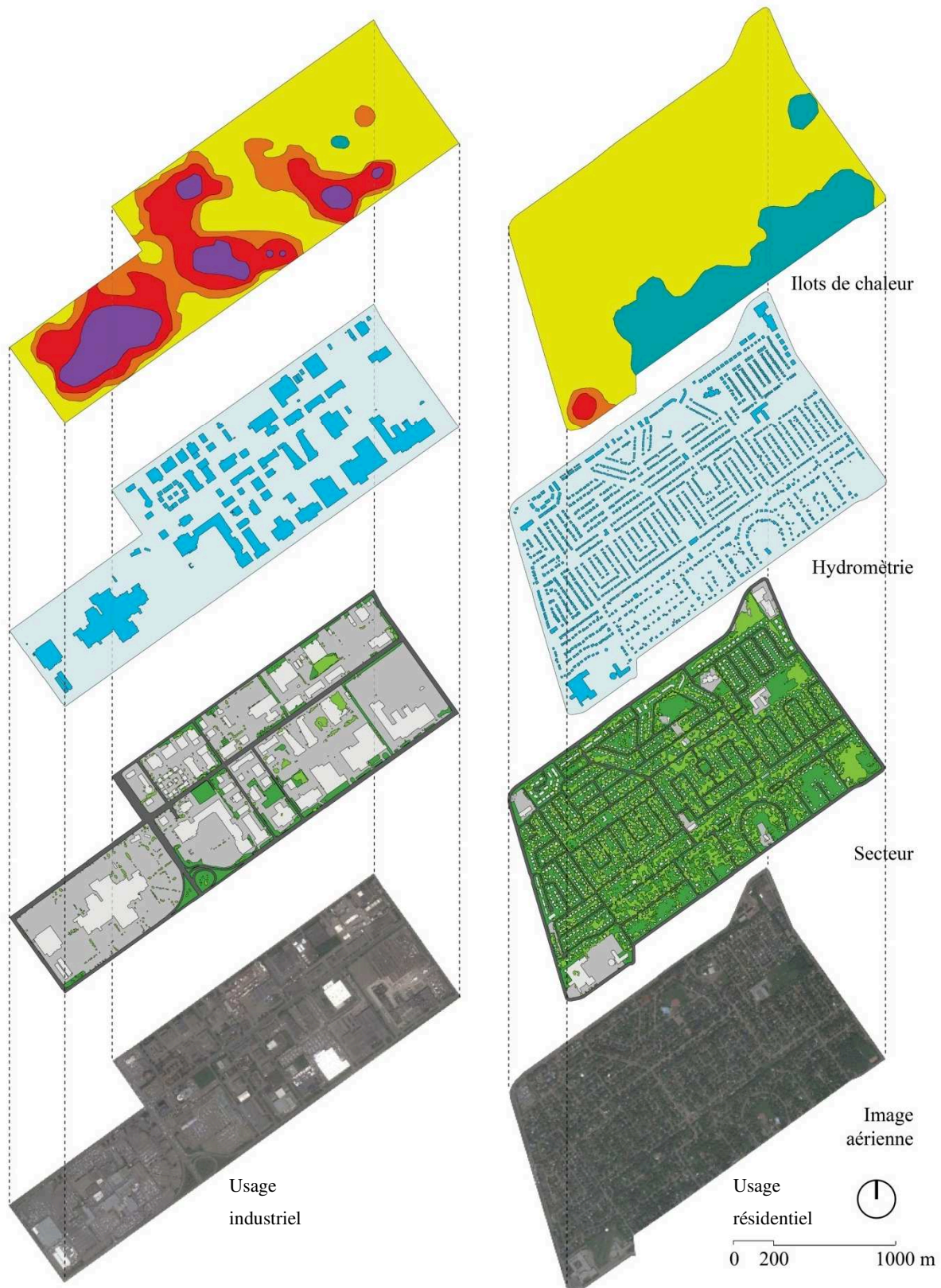


Figure 30 – Représentation du secteur Pointe-Claire : synthèse des données des températures et hydrométriques

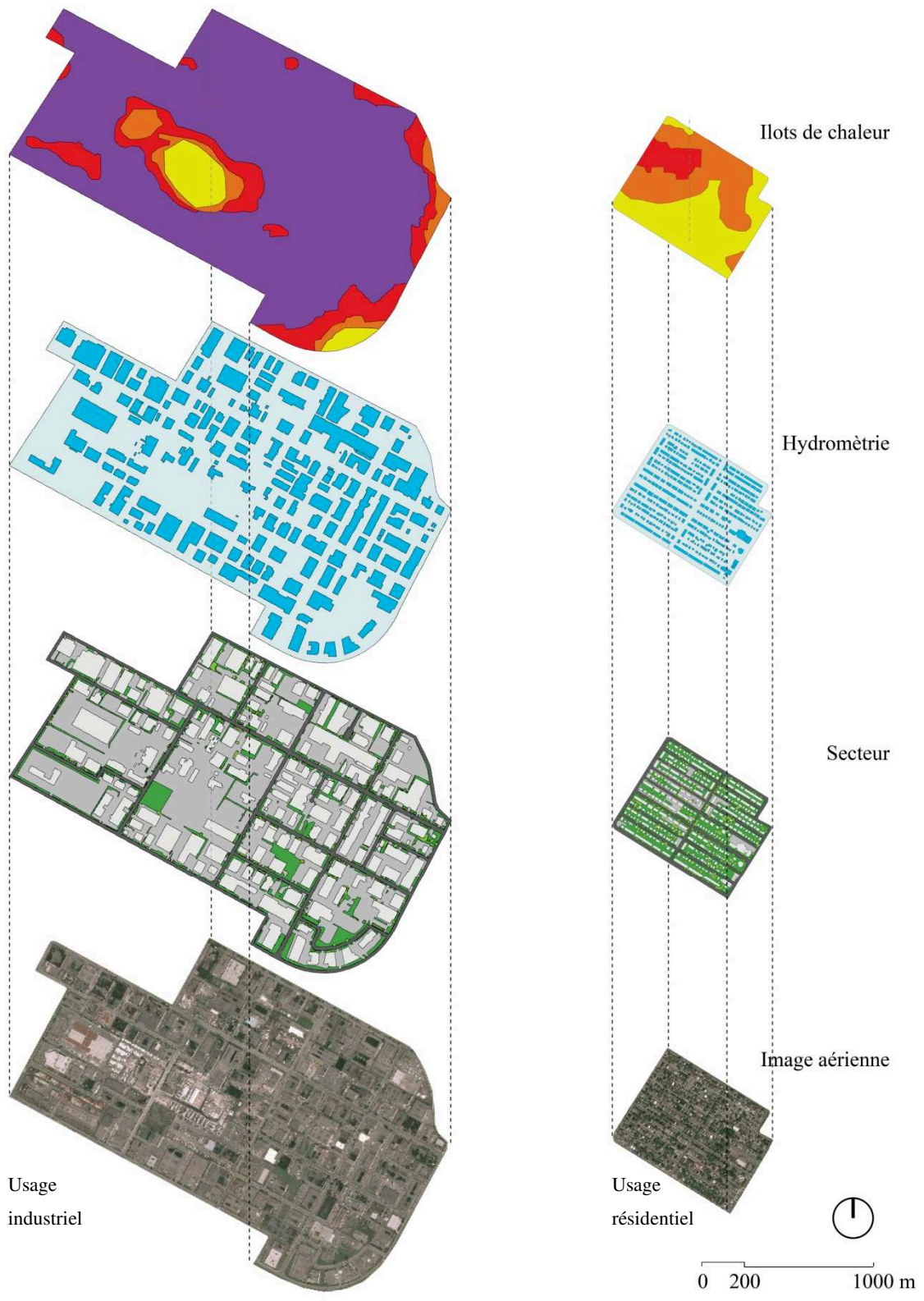


Figure 30 – Représentation du secteur Anjou : synthèse des données des températures et hydrométriques

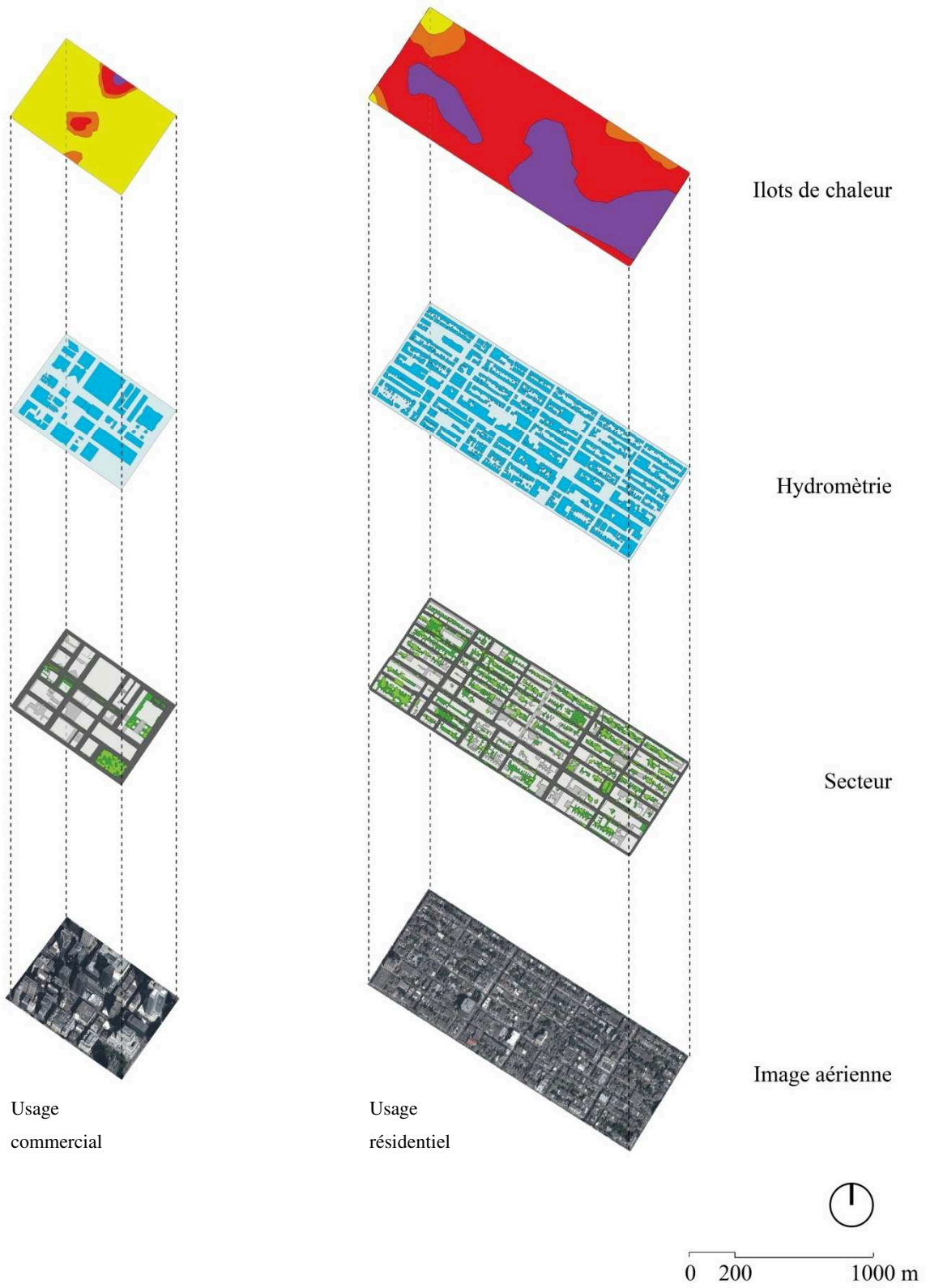


Figure 31 – Représentation du secteur centre-ville : synthèse des données des températures et hydrométriques

La collecte et le traitement des données ont permis de déterminer la proportion des superficies minérales et naturelles sur les trois secteurs étudiés. Parallèlement, nous avons synthétisé les données de température et hydrométriques afin que nous puissions les mettre en relation avec ces superficies. Ces étapes répondent surtout à notre premier objectif, celui de calculer la superficie des toits et de connaître leur envergure par rapport aux parcelles étudiées. Lors du prochain chapitre, nous analyserons les similitudes et les différences entre les secteurs. Les comparaisons seront basées sur des pourcentages étant donné que les superficies des parcelles ne sont pas identiques. Cette analyse des données permettra de converger vers l'origine des phénomènes environnementaux optimaux ou négatifs. À partir de cela, nous dresserons le portrait des toits théoriquement aménageables sous forme de plusieurs scénarios destinés à atténuer les effets environnementaux négatifs et nous constaterons si l'impact de ces aménagements est assez conséquent pour améliorer la condition des secteurs en difficulté.

Chapitre 5 : Portrait et potentialités des toits

L'étude sur la contribution des toits débute par la comparaison des proportions des superficies minérales et naturelles sur les trois secteurs. Une fois que nous aurons répertorié les différentes situations entre ces deux variables, nous croiserons nos observations avec les données de températures et hydrométriques étudiées précédemment, notamment avec les travaux de Martin, Baudouin, Beauchemin et Gagnon (2007) et Stephens et al. (2002). À partir de cette analyse, les toits seront examinés comme un instrument pour réguler les températures moyennes et les taux de ruissellement de chaque secteur. Cette analyse permettra d'établir un modèle environnemental théorique qui sera utilisé comme base pour dresser le portrait des toits théoriquement aménageables. Une fois que les simulations seront effectuées, nous répondrons au deuxième objectif, celui d'affirmer si l'aménagement des toits peut avoir un impact conséquent.

5.1 Analyse des données

5.1.1 Comparatif des superficies

À première vue, nous remarquons sur le tableau 4 que d'une manière générale, en considérant l'ensemble des superficies présentes dans les secteurs analysés (toits, canopée, espaces verts, voirie et stationnement), les espaces résidentiels présentent un pourcentage de superficie de toits moins grand que les espaces commerciaux. Prenons l'exemple du secteur Pointe-Claire, où la superficie des toits représente 13 % de la superficie totale de la parcelle contre 24 % dans la zone industrielle. À l'inverse, les pourcentages d'espace naturels (espaces verts et canopée) sont plus importants dans les espaces résidentiels que dans les zones industrielles : 68 % d'espace naturel et 27 % de canopée dans le secteur résidentiel de Pointe-Claire, contre 8 % d'espace naturel et 3 % de canopée dans le secteur industriel. Les espaces minéralisés (imperméabilisés) sont quant à eux beaucoup plus nombreux dans les secteurs commerciaux où ils sont utilisés comme lieux d'entreposage, de manœuvre ou de stationnement. Nous remarquons aussi que le centre-ville présente un cas à part, car les différences entre les secteurs résidentiel et commercial y sont moins grandes : les pourcentages de superficies de toits y sont plus importants et les zones végétalisées sont beaucoup plus rares. Ce cas particulier pourrait être justifié par la taille réduite du secteur qui ne permet pas de garantir un relevé des températures de manière fidèle à la réalité. D'après cette analyse, nous remarquons la pertinence de regrouper ces superficies selon deux catégories

présentées au tableau 5 (page 54) : minérale (superficie imperméable) et naturelle (superficie perméable).

5.1.2 Les îlots de chaleur

À partir des températures mesurées, nous avons calculé une moyenne pour chaque secteur proportionnellement à la superficie de chaque tranche de température, tel que spécifié sur le tableau 6 (page 59). Prenons l'exemple du secteur Anjou résidentiel : 47 % de la parcelle a une température située entre 27 °C et 32 °C, soit une moyenne de 29,5 °C; 42 % de la parcelle a une température située entre 32 °C et 33 °C, soit une moyenne de 32,5 °C; 11 % de la parcelle a une température située entre 33 °C et 34 °C, soit une moyenne de 33,5 °C. Ainsi, la moyenne globale de la parcelle est de 31 °C. Comme l'indiquent les relevés des températures sur les trois secteurs, le secteur résidentiel de Pointe-Claire présente les températures les plus basses mesurées sur les zones étudiées (28,1 °C en moyenne), alors que le secteur industriel d'Anjou présente les plus hautes (36,8 °C en moyenne). En mettant en relation ces informations avec le tableau des pourcentages des superficies naturelles et minérales sur chaque secteur (tableau 5), nous observons que les parcelles en question sont aussi celles qui présentent respectivement les pourcentages les plus hauts et bas de superficies naturelles : plus les secteurs sont végétalisés, moins les îlots de chaleur se forment et plus la température est optimale. Le recoupement de ces données confirme que la formation des îlots de chaleur est causée par un manque d'espaces naturels.

5.1.3 Les eaux de ruissellement

Les données hydrométriques recueillies correspondent au volume d'eau de pluie accumulée chaque année sur les secteurs. Les pourcentages présentés sur le tableau 7 (page 60) décrivent les volumes d'eau de ruissellement évacués dans les réseaux de canalisations. Afin d'obtenir ces valeurs, nous avons considéré que le taux de ruissellement dans les terrains naturels est à hauteur de 10 %, que le taux d'évapotranspiration est de 40 % et le taux d'infiltration est de 50 %. Alors que le taux de ruissellement des surfaces minérales est de 75 %, avec une évapotranspiration de 20 % et une infiltration de 5 % (Stephens et al., 2002). Prenons l'exemple du secteur résidentiel de Pointe-Claire : 31 % de l'eau de pluie est évacuée dans le système de canalisations. Et comme nous avons pu l'observer précédemment dans ce secteur, la proportion de la superficie naturelle par rapport à la superficie minérale joue un rôle important dans l'accumulation de l'eau de

ruissellement. Nous observons que dans les secteurs industriels, le volume d'eau de ruissellement est beaucoup plus conséquent : le volume d'eau de ruissellement dans la zone industrielle de Pointe-Claire est plus de deux fois plus grand (70 %) que celui de la zone résidentielle (31 %). Dans ce même secteur, les toits représentent 13 % de la superficie totale de la zone résidentielle et 24 % de la zone industrielle. Lors de l'étape de simulation, ces toits seront envisagés comme une alternative pour réduire le ruissellement des eaux de pluie.

5.2 Intégration des actions environnementales par la simulation des toits

5.2.1 La synthèse des données sous forme systémique

Le recouplement des données analysées (figures 28 et 29) avec les travaux de Martin, Baudouin, Beauchemin et Gagnon (2007) et Stephens et al. (2002), nous permet de dresser un portrait (figures 33 et 34) qui informe sur la modification de la température ambiante et le taux de ruissellement d'un secteur, en fonction de sa superficie minérale (imperméable) et naturelle (perméable). Mise à part la zone résidentielle de Pointe-Claire, nous observons que les secteurs sont en déséquilibre : la proportion minérale de ces secteurs est nettement supérieure à la proportion naturelle. La zone industrielle de Pointe-Claire et la zone commerciale du centre-ville sont les situations les plus critiques avec une proportion minérale de 92 % contre une proportion naturelle de 8 %. Ces déséquilibres seront réduits en attribuant les toits à la part naturelle par la végétalisation. La simulation des toits permettra d'identifier leur réelle contribution et d'apprécier si celle-ci est considérable ou peu influente à l'échelle d'un secteur. Ces simulations pourraient être applicables ultérieurement à toute situation urbaine sur l'île de Montréal et éventuellement à n'importe quelle ville dans le monde.

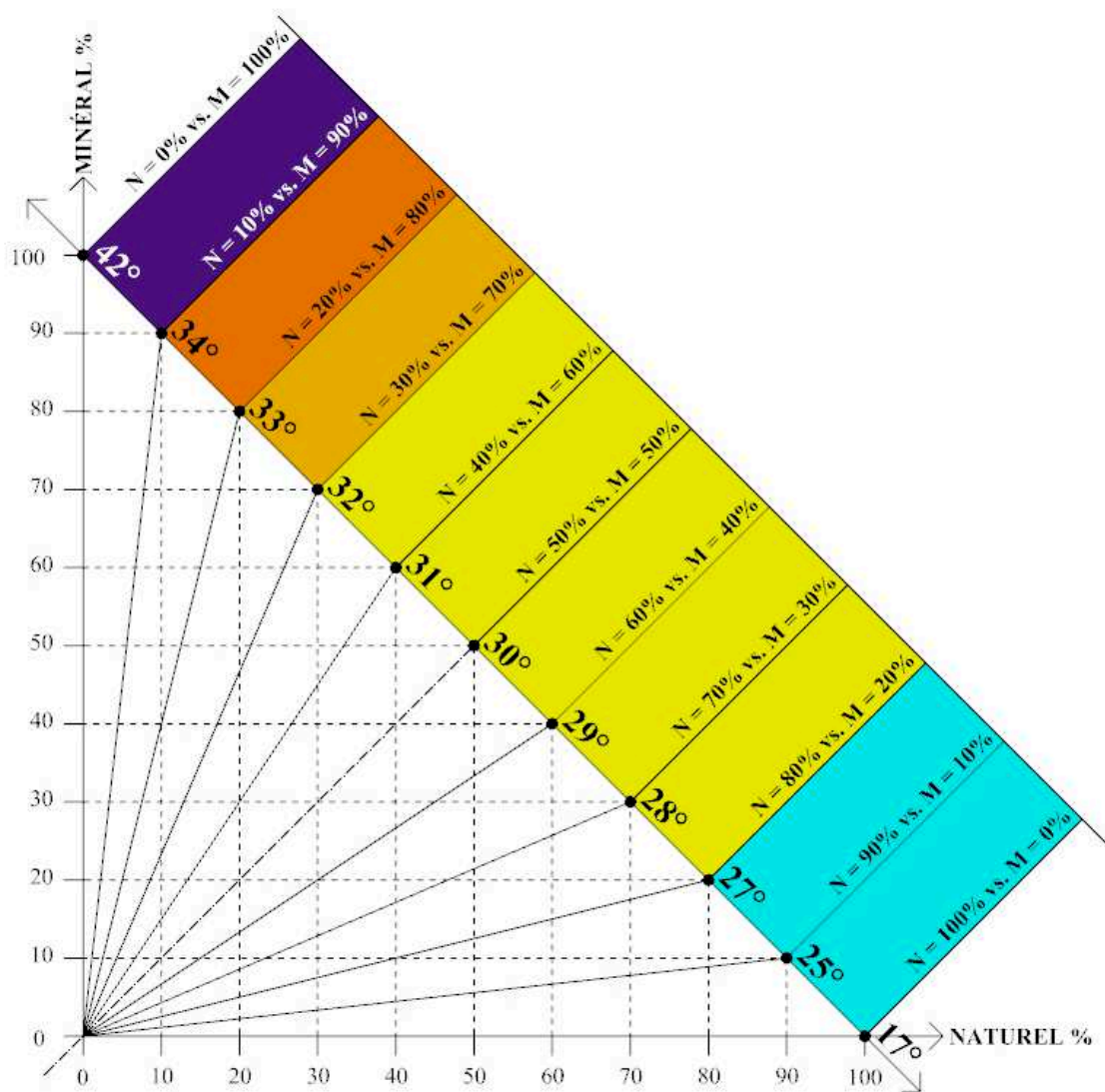


Figure 32 – Illustration graphique des températures moyennes des secteurs en fonction des surfaces minérales et naturelles
 (Azouz, 2014, d’après les travaux de Martin, Baudouin, Beauchemin et Gagnon, 2007)

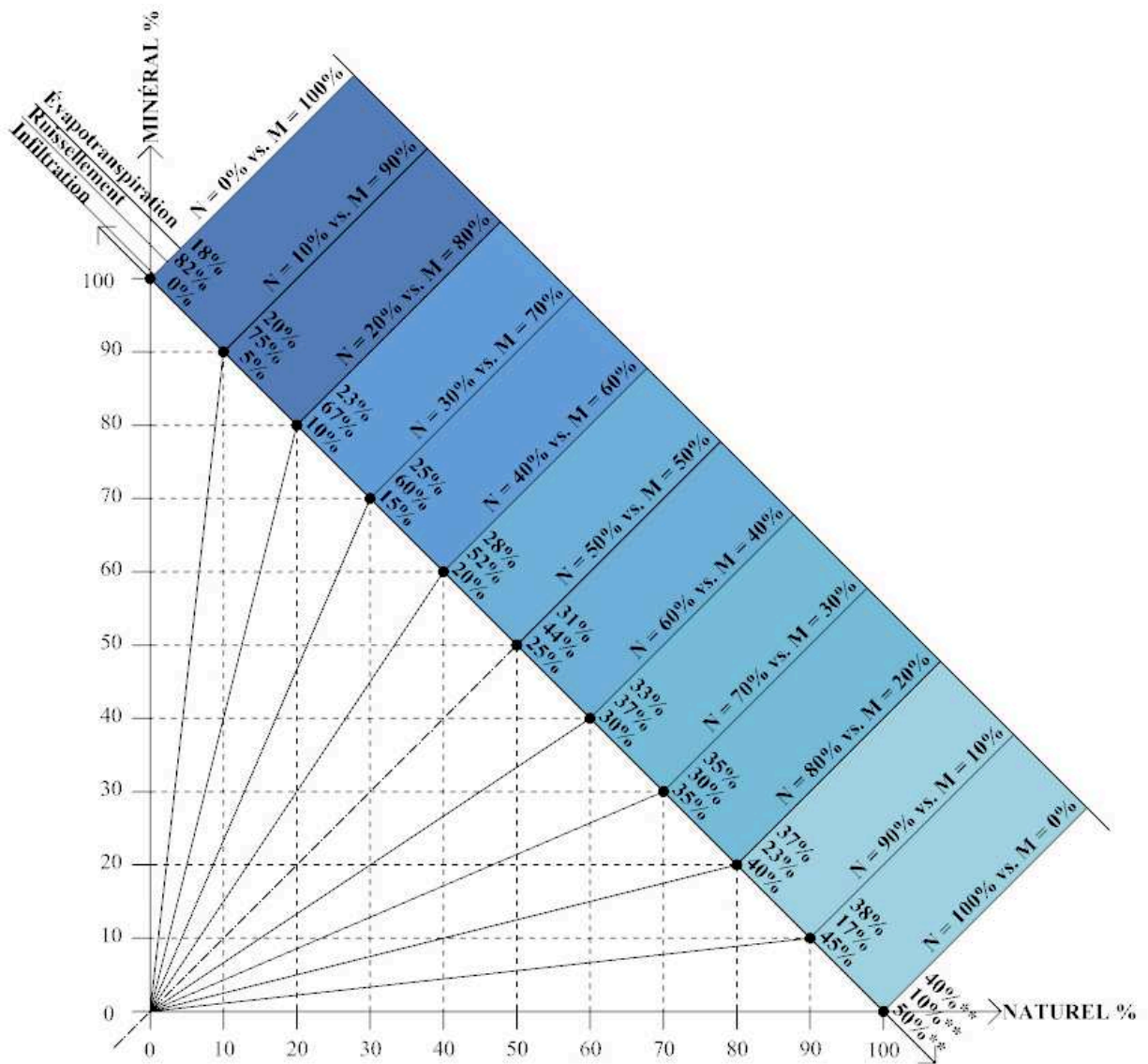


Figure 33 – Illustration graphique des quantités d’eau d’infiltration, de ruissellement et d’évapotranspiration, en fonction des superficies minérales et naturelles
 (Azouz, 2014, d’après les travaux de Stephens et al., 2002)

5.2.2 Simuler la diminution des îlots de chaleur

Les figures 33 et 34 permettent d'affirmer que pour diminuer les phénomènes d'îlots de chaleur et de ruissellement, la situation optimale serait celle d'augmenter la superficie d'espace naturel dans les secteurs. En effet, plus la végétation est réduite dans un secteur, plus la formation des îlots de chaleur augmente. Nous avons pu constater précédemment que le secteur résidentiel de Pointe-Claire était très peu concerné par la formation d'îlots de chaleur, avec 68 % de superficie naturelle (tableau 8) et ne sera pas étudié lors de la simulation des toits. En référence à ce secteur dont la situation est optimale, la proportion envisagée comme objectif pour les autres secteurs correspond à 60 % de superficie naturelle pour 40 % de superficie minérale. Afin d'atteindre cette proportion, nous avons identifié les superficies naturelles manquantes et nous les avons comparées avec la superficie des toits tels que décrits dans le tableau 8.

secteurs	usage	situation actuelle		situation optimale		sup. nat. manquante vs toits	
		sup. naturelle	sup. minérale	sup. naturelle	sup. minérale	sup. nat.	sup. toiture
		%	%	%	%	%	%
Pointe-Claire	résidentiel	68	32	-	-	-	13
	industriel	8	92	60	40	52	> 24
Anjou	résidentiel	39	61	60	40	21	< 24
	industriel	12	88	60	40	48	> 32
Centre-Ville	résidentiel	17	83	60	40	43	< 46
	commercial	8	92	60	40	52	> 42

Tableau 8 – Comparaison des superficies naturelles manquantes pour atteindre l'objectif des 60 % par rapport aux superficies de toits

Les pourcentages des superficies décrites dans le tableau 8 sont issus du tableau détaillé dans l'annexe 7

Ce calcul révèle qu'une telle proportion n'est pas réalisable dans plusieurs secteurs dont la superficie naturelle est quasi inexistante: 90 % de superficie minérale pour la zone industrielle d'Anjou et la zone commerciale du centre-ville. En général, nous constatons que la superficie des toits se situe en dessous des superficies manquantes. Par exemple, la superficie de toiture disponible (24 %) de la zone industrielle de Pointe-Claire, atteint à peine la moitié de la superficie à compenser (52 %) en superficie naturelle. De ce fait, la superficie des toits ne suffit pas pour atteindre les 60 % de superficie naturelle vis-à-vis du pourcentage élevé de superficie minérale.

D'après l'évaluation des superficies de toits, un objectif de 50 % d'espace naturel versus 50 % d'espace minéral semble plus réaliste dans le but d'obtenir un compromis entre densité urbaine et zones naturelles. Les 50 % d'espaces naturels seraient atteints par les toits végétalisés. D'après le tableau 2 (page 44), nous considérons que la température des toits végétalisés, qu'ils soient extensifs ou intensifs, est identique (29 °C) et influence la régulation de la température dans les secteurs de la même manière. À la suite de cela, nous avons calculé la différence entre la superficie naturelle et la superficie minérale dans les trois secteurs, tels qu'illustrés dans le tableau 9.

secteurs	usage	naturel	minéral	différence
		%	%	%
Pointe-Claire	résidentiel	68	32	-18
	industriel	8	92	42
Anjou	résidentiel	39	61	11
	industriel	12	88	38
Centre-Ville	résidentiel	17	83	33
	commercial	8	92	42

Tableau 9 – La proportion de superficie naturelle à convertir afin d'atteindre l'équilibre de 50 %

La zone industrielle de Pointe-Claire et la zone commerciale du centre-ville sont celles qui présentent le plus gros déséquilibre entre superficie minérale et naturelle. Par opposition, la zone résidentielle d'Anjou est proche de l'équilibre des 50 % minéral-naturel avec seulement 11 % manquants.

La simulation de la contribution des toits (tableau 10) est représentée par les figures 35, 36 et 37 et nous a permis d'établir que pour les secteurs Anjou (résidentiel) et Centre-ville (résidentiel et commercial), la végétalisation des toits serait suffisante pour obtenir l'équilibre idéal de 50 % de superficie naturelle. Quant aux secteurs Pointe-Claire et Anjou zone (industrielle), si les superficies de toits ne suffisent pas à rétablir cet équilibre, elles contribuent néanmoins à diminuer considérablement la formation des îlots de chaleur : la superficie naturelle atteindrait 32 % pour le secteur Pointe-Claire (zone industrielle) et 45 % pour le secteur Anjou (zone industrielle).

secteurs	usage	situation actuelle		situation optimale		sup. nat. manquante vs toits		équilibre possibles par les toits	
		sup. nat.	sup. min.	sup. nat.	sup. min.	sup.nat. m.	sup. toits	sup. nat.	sup. min.
		%	%	%	%	%	%	%	%
Pointe-Claire	résidentiel	68	32	-	-	-	13	-	-
	industriel	8	92	50	50	42	> 24	32	68
Anjou	résidentiel	39	61	50	50	11	< 24	50	50
	industriel	12	88	50	50	38	> 32	45	55
Centre-Ville	résidentiel	17	83	50	50	33	< 46	50	50
	commercial	8	92	50	50	42	= 42	50	50

Tableau 10 – Situation actuelle des superficies naturelles et minérales des secteurs comparés à la situation possible avec la contribution des toits

Les pourcentages des superficies décrites dans le tableau 10 sont issus du tableau détaillé dans l'annexe 8. L'intégration des données des trois secteurs sur les figures 33 et 34, nous a amené à déterminer les liens entre le pourcentage de superficie naturelle et la température dans chaque secteur : tous les 10 % de surface végétale en plus (pourcentage par rapport à la totalité de la parcelle) font en sorte de rafraîchir la température moyenne de la parcelle de 1 °C (tableau 11).

secteurs	usage	t°C avant	t°C après	diff. t°C
		moy.	moy.	moy.
Pointe-Claire	résidentiel	28,1	-	-
	industriel	31,8	31,8	-
Anjou	résidentiel	31,2	30,0	1,2
	industriel	36,8	30,5	6,3
Centre-Ville	résidentiel	34,8	30,0	4,8
	commercial	30,0	30,0	-

Tableau 11 – Estimation de la baisse de température sur les trois secteurs après la simulation des toits à partir de la figure 33

Ces rapports confirment que la hausse de température et celle du volume d'eau de ruissellement sont reliées directement à l'augmentation de la superficie minérale et vice-versa.

- Pointe-Claire (résidentiel) : avec 68 % de superficie naturelle, c'est la zone qui ne présente pas de problèmes d'îlots de chaleur.
- Pointe-Claire (zone industrielle) : le pourcentage des toits est le plus bas des zones industrielles étudiées (24 %) y compris la zone commerciale du centre-ville, opposé à la superficie minérale la plus haute (92 %). La contribution des toits ne suffirait pas à atteindre l'équilibre des 50 % superficies minérales versus 50 % naturelles.
- Centre-ville (zone résidentielle) : cette zone a un faible pourcentage de superficie naturelle (17 %) et le plus haut pourcentage de toitures (46 %) sur les trois secteurs. Par conséquent, la contribution des toits serait considérable avec une baisse de température de 4,8 °C.
- Centre-ville (zone commerciale) : bien que ce soit une zone dont la superficie naturelle est la plus faible (8 %), la température y est exceptionnellement optimale (30 °C). Cette température correspond à une superficie naturelle de 50 %. Ce cas isolé pourrait être justifié par la taille réduite de l'échantillon qui ne permet pas d'assurer un relevé des températures de manière fidèle à la réalité.
- Anjou (zone résidentielle) : la zone résidentielle (31,2 °C) est similaire au secteur résidentiel (31,54 °C) étudié par Martin, Baudouin, Beauchemin et Gagnon (2007), ce qui nous permet de valider la fiabilité de notre analyse.
- Anjou (zone industrielle) : d'après les résultats obtenus, cette zone serait celle qui bénéficierait le plus de la contribution des toits. La baisse de la température serait d'environ 6,3 °C.

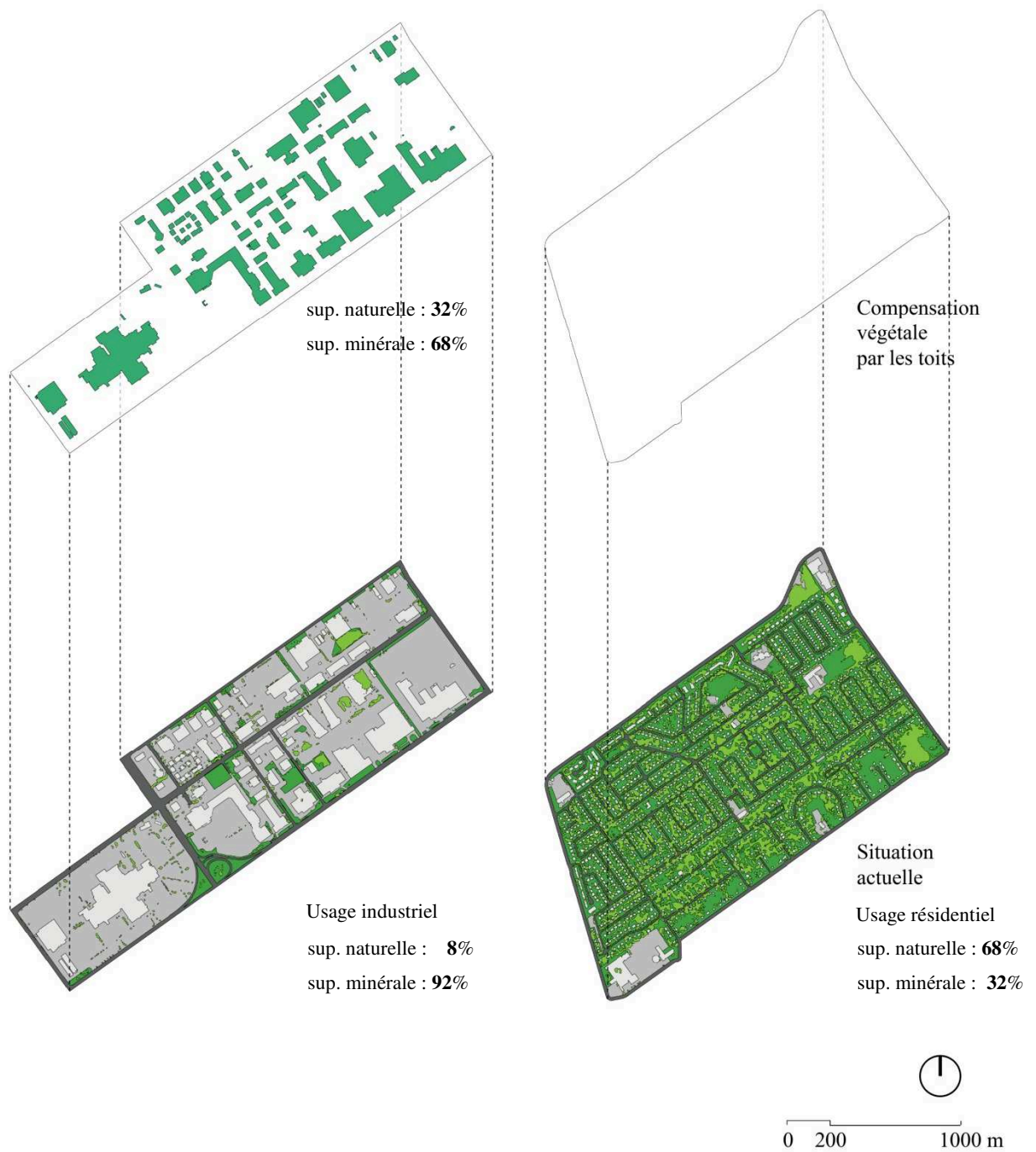


Figure 34 – Représentation du secteur Pointe-Claire, zones industrielle et résidentielle : la contribution des toits pour atteindre 50 % de superficies naturelles et 50 % des superficies minérales

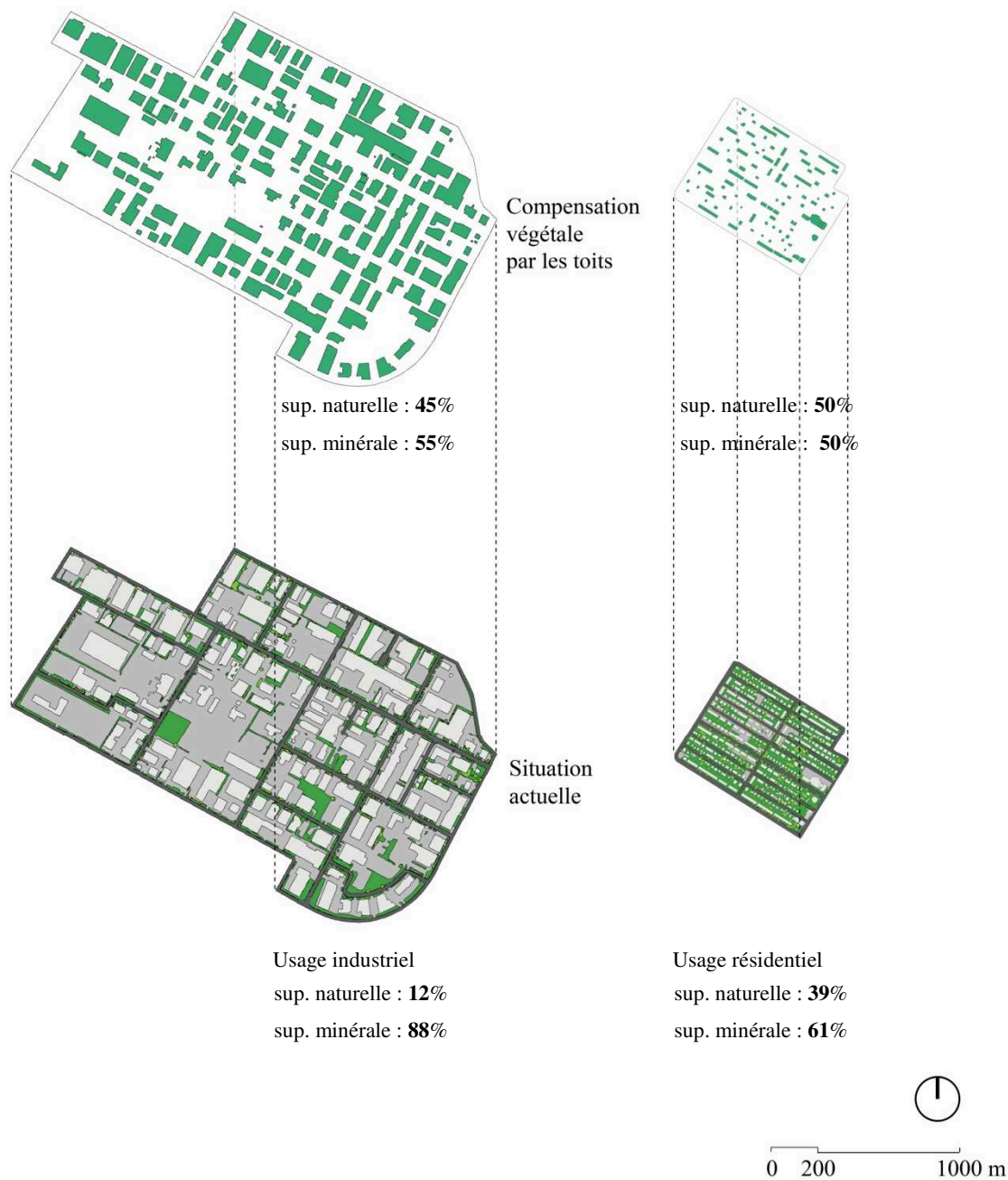


Figure 35 – Représentation du secteur Anjou, zones industrielle et résidentielle : la contribution des toits pour atteindre 50 % de superficies naturelles et 50 % des superficies minérales

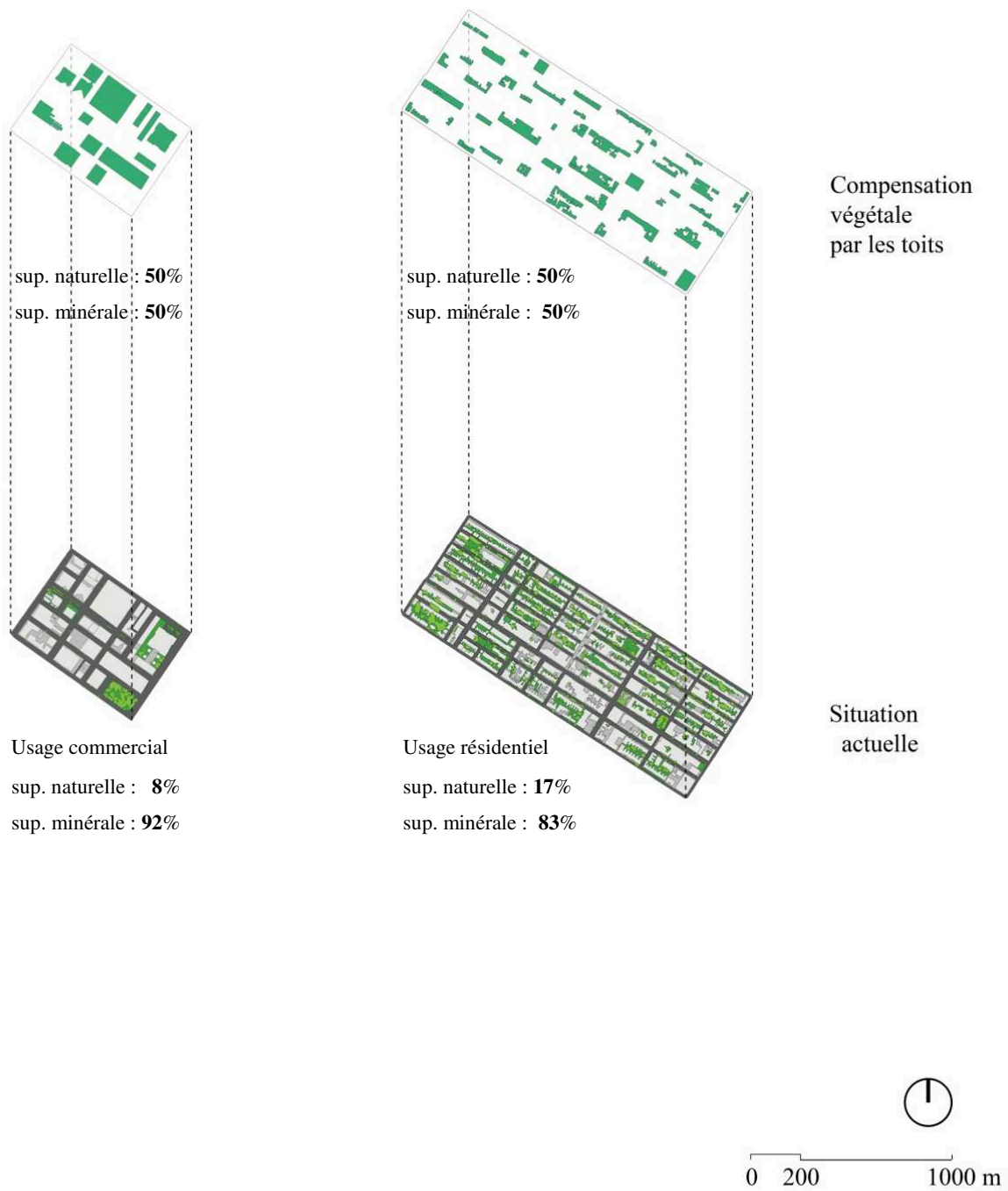


Figure 36 – Représentation du secteur centre-ville, zones commerciale et résidentielle : la contribution des toits pour atteindre 50 % de superficies naturelles et 50 % des superficies minérales

5.2.3 Simuler la gestion des eaux de pluie par les toits

À partir des données que nous avons recueillies (tableau 2, page 44) nous avons pu établir les pourcentages d'eau allant actuellement dans les réseaux de canalisation. Par conséquent, nous avons déterminé le volume d'eau potentiellement récupérable grâce aux superficies des toits mobilisés. Ces toits mobilisés pour atteindre l'équilibre des 50 % de superficie naturelle sont utilisés comme base pour évaluer les volumes d'eau récupérés par les toits collecteurs. Nous considérons que la capacité de ces toits collecteurs d'eau de pluie est de 90 % de la superficie totale des toits. D'autre part, contrairement à une surface naturelle, une surface minérale absorbe très peu les eaux de ruissellement. L'intérêt des superficies naturelles est que l'eau est absorbée par le sol et n'a alors plus à être acheminée dans les canalisations. Une surface végétale de type intensif retient 60 % de l'eau de ruissellement et une surface de type extensif en retient 30 %. En nous basant sur la simulation effectuée, nous avons établi une estimation des pourcentages d'eau que l'on pourrait absorber par les toits végétalisés. La figure 34 et le tableau 12 révèlent les pourcentages d'eau de ruissellement, d'infiltration et d'évapotranspiration établis pour la situation actuelle de chaque secteur. Afin d'effectuer cette estimation, nous nous sommes basés sur la valeur annuelle de précipitation à Montréal (1 mètre/an environ).

secteurs	usage	total/an		
		vol. eau ruis. *	vol. eau infiltrée **	vol. eau évapo. ***
		%	%	%
Pointe-Claire	résidentiel	30,7	35,7	33,6
	industriel	69,7	8,7	21,6
Anjou	résidentiel	49,4	22,7	27,9
	industriel	67,0	10,6	22,5
Centre-Ville	résidentiel	64,1	12,6	23,4
	commercial	69,8	8,6	21,6

Tableau 12 – Estimation des volumes d'eau de ruissellement, d'infiltration et d'évapotranspiration sur les trois secteurs

(Azouz, 2014, à partir des travaux de Stephens et al., 2002)

* le taux de ruissellement dans la zone minérale est de 75 % et de 10 % dans la zone naturelle.

** le taux d'infiltration dans la zone minérale est de 5 % et de 50 % dans la zone naturelle.

*** le taux d'évapotranspiration dans la zone minérale est de 20 % et de 40 % dans la zone naturelle.

Les pourcentages des superficies décrites dans le tableau 12 sont issus du tableau détaillé correspondant à l'annexe 9.

secteurs	usage	sup. des toits	vol. récupérable	volume d'eau retenu	
		après simulation	toits collecteurs	intensif	extensif
		%	%	%	%
Pointe-Claire	résidentiel	-	-	-	-
	industriel	24	22	15	7
Anjou	résidentiel	11	10	6	3
	industriel	32	29	19	10
Centre-Ville	résidentiel	33	30	20	10
	commercial	42	38	25	13

Tableau 13 – Estimation des volumes d’eau retenus sur les trois secteurs, selon les types d’aménagement de toits : toits collecteurs, toits extensifs et intensifs d’après les données du tableau 2 (page 44)

Les pourcentages des superficies décrites dans le tableau 13 sont issus du tableau détaillé correspondant à l'annexe 10

D’après le tableau ci-dessus, il apparaît que les toits collecteurs permettent de récupérer le plus de volume d’eau, soit de 10 % à 38 % des eaux qui ruissellent chaque année sur les toits. Toutefois, de par leur revêtement, ces toits ne peuvent pas être considérés comme un apport de superficie naturelle en vue d’atteindre l’équilibre des 50 %. En ce qui concerne le volume d’eau retenu par les mêmes superficies sous forme de toits végétalisés, les toits intensifs retiennent deux fois plus de volume d’eau que les toits extensifs. Cette affirmation est aussi justifiée par la différence d’épaisseur de terre sur ces types de toits (cf. tableau 2, page 44). D’après cette étude sur les eaux de ruissellement, les toits mobilisés peuvent soulager les réseaux de canalisation de manière conséquente. La végétalisation de ces toits permet d’infiltrer en moyenne 8,6 % d’eau de pluie pour les toits extensifs et 17 % pour les toits intensifs. Ultérieurement, ces toits végétalisés peuvent intégrer aussi des bacs pour collecter de l’eau pour ses propres besoins d’irrigation. Il serait pertinent de mesurer la température des toits après arrosage, ce qui permettrait de rafraîchir davantage la température ambiante d’un secteur.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de notre étude sur les toits qui nous a menée vers une solution systémique dans le but d’atténuer les effets d’îlots de chaleur et de réduire le volume d’eau de ruissellement. À partir de l’analyse des données recueillies précédemment concernant les rapports de superficies entre les zones minérales et végétalisées, nous avons pu estimer à quel point la prise de conscience de l’impact environnemental des toits peut influencer l’équilibre ville-nature.

Conclusion

Ce dernier chapitre vise à présenter un sommaire des connaissances générées à travers ce mémoire, en revenant sur les premières interrogations qui ont mené à une revue de littérature sur l'empreinte écologique des villes à forte consommation d'énergie et plus précisément sur les phénomènes environnementaux liés aux toits (les îlots de chaleurs et le ruissellement des eaux de pluie). Nous aborderons aussi la démarche méthodologique développée pour révéler le potentiel des toits à amener des solutions tangibles à ces problématiques environnementales, à travers la collecte et l'analyse de données urbaines sur trois secteurs situés sur l'île de Montréal. Nous reviendrons également sur les résultats présentés et nous offrirons des pistes d'investigations pour encourager davantage la collecte d'informations dans ce sens en vue de préciser, enrichir, contredire ou élargir le sujet sur les potentialités des toits à amener des solutions propices à l'innovation urbaine.

Ce mémoire aborde les enjeux environnementaux des villes à forte consommation d'énergie. Dans ce contexte, nous nous intéressons aux toits horizontaux comme un instrument qui permettrait d'atténuer l'empreinte écologique des villes denses. Afin de répondre à ces interrogations, nous avons recensé les écrits permettant de mettre en lumière le contexte environnemental actuel des villes denses en retenant deux phénomènes environnementaux liés aux toits : les îlots de chaleur et le ruissellement des eaux de pluie. Les études référencées au premier chapitre révèlent que les toits horizontaux peuvent contribuer à l'atténuation de ces deux marqueurs environnementaux négatifs. Les pistes de solutions énoncées attribuent un potentiel important de réduction de l'empreinte écologique par l'aménagement des toits plats.

Dans le second chapitre, nous établissons des similarités entre la situation environnementale montréalaise et celles connues dans d'autres villes denses. Comme ailleurs, l'impact écologique lié aux îlots de chaleur et à la gestion du ruissellement des eaux de pluie sont aussi des problématiques environnementales présentes à Montréal. Dans ce contexte, nous avons dressé un portrait des toits montréalais susceptibles d'être mobilisés afin d'atténuer ces phénomènes. Il en ressort que les toits plats sont prédominants sur l'île. Cette étendue pourrait donc assumer un rôle intéressant à l'échelle urbaine. D'autre part, plusieurs projets prototypes d'édifices dont les toits ont été mis à contribution ont révélé selon nos simulations que leur empreinte écologique est

bien plus faible que celle d'un édifice dont le toit n'a pas été aménagé. L'usage des toits présage donc un potentiel environnemental intéressant à explorer.

La méthodologie de recherche mise en place nous a mené vers la collecte de données urbaines sur trois secteurs échantillons. Le troisième chapitre décrit alors le procédé opératoire à travers lequel nous avons identifié un rapport entre les superficies minérales et végétales de chaque secteur, et la manière dont nous l'avons mis en relation avec les températures relevées et les taux de ruissellement. Le croisement des données puisées dans les études de Cavayas et Baudouin (2008) et de Stephen (2002) a été effectué par le biais d'une maquette numérique tridimensionnelle de trois secteurs où chaque composante urbaine fut répertoriée avec précision : toiture, parcs et jardins, canopée, voirie et espaces de stationnement à partir des données disponibles à la Ville de Montréal. Ces classements ont permis de discuter de la part végétale existante dans chaque secteur et évaluer si celle-ci est suffisante pour compenser les méfaits de la part minérale due à l'urbanisation excessive. Ils ont aussi donné la possibilité de révéler et de comparer les situations urbaines fortement végétalisées à celles qui présentent un déséquilibre minéral-naturel. Les données collectées ont servi ensuite de références pour simuler l'impact environnemental de l'aménagement des toits dans ces mêmes secteurs.

Au chapitre 4, les résultats de la recherche sont illustrés à l'aide de deux graphiques systémiques d'évaluation/simulation des toits dans les trois secteurs étudiés. L'élaboration de ces graphiques nous permet de visualiser et de mettre en relation des étendues minérales et naturelles d'un secteur. Ces graphiques démontrent que les problématiques urbaines liées aux îlots de chaleur et ruissellement des eaux de pluie sont accentuées par le déséquilibre entre ces superficies minérales et naturelles. Citons l'exemple du secteur résidentiel de Pointe-Claire qui ne présente pas de problèmes d'îlots de chaleur ou de ruissellement, avec un sol naturel à hauteur de 68 % environ. À l'autre extrême, dans le cas du secteur industriel de Pointe-Claire qui ne présente que 8 % environ de sol naturel, le verdissement des toits permettrait de contribuer à l'équilibre entre minéral et naturel, en élevant ce pourcentage au quadruple de sa valeur initiale : 32 %. D'après le comparatif des superficies, le ratio que nous pourrions envisager par le verdissement des toits dans les secteurs en déséquilibre serait un rapport de 50 % de superficie minérale et de 50 % de

superficie naturelle. Un tel verdissement influencerait positivement les indicateurs de température et d'hydrométrie.

Les résultats de la simulation des toits pour compenser les déséquilibres minéral-naturel dans les secteurs sont présentés au chapitre 5. Ces simulations nous ont permis d'élaborer des scénarios pour optimiser la situation dans chaque secteur. Si les superficies de toits ne suffisent pas à rétablir cet équilibre 50 % minéral - 50 % naturel dans certaines situations urbaines, elles contribuent toutefois à diminuer la formation des îlots de chaleur et le volume d'eau de ruissellement : avec le verdissement des toits, la superficie de surfaces naturelles atteindrait 32% pour le secteur Pointe-Claire (zone industrielle) et 45 % pour le secteur Anjou (zone industrielle). La simulation des toits permet d'identifier leur réelle contribution et d'apprécier si celle-ci est considérable ou peu influente à l'échelle d'un secteur. Ces scénarios nous permettent d'anticiper des réactions environnementales dans d'autres secteurs sur l'île de Montréal.

Les toits participent aux écosystèmes urbains à part entière, sous forme de catalyseurs négatifs, ou au contraire, sous forme de régulateurs. Les pistes de solutions élaborées par notre étude pourraient être aussi transposables dans d'autres villes dont les contextes urbains sont similaires aux trois secteurs étudiés. Le toit peut concourir à l'amélioration des modes de vie et son aménagement peut contribuer à atténuer les problématiques environnementales et urbaines, plutôt que de se cantonner au rôle passif d'une couverture. Ainsi, la simulation de l'impact de diverses stratégies d'appropriation des toits marque une mutation écoresponsable du bâti urbain avec l'utilisation du numérique comme outil d'aide à la décision. Cependant, l'interaction entre le designer et l'interface numérique reste à être développée dans une étape ultérieure à partir des idées suivantes :

- mettre à l'épreuve la validité de la maquette numérique dans son efficacité à simuler un scénario optimal selon les données urbaines introduites ;
- envisager un mode de représentation tridimensionnel de l'ensemble des simulations à l'aide d'une légende propre à chaque composante urbaine ;
- mesurer et comparer les avantages écologiques, économiques et sociaux ;
- modéliser les données issues des études des bâtiments et secteurs urbains ciblés ;

- déployer ces modèles à l'échelle d'un territoire en vue d'identifier des scénarios d'interventions urbaines efficaces.

La maquette numérique pourrait ainsi accompagner les actions urbaines, mais ce procédé peut aussi s'étendre aussi aux villes à haute consommation d'énergie. Les évaluations/simulations des toits pourraient être générées à partir d'une carte interactive de l'île de Montréal accessible en ligne sous forme de données ouvertes. La Ville de Montréal envisage ce travail de recension et de mise en commun des données et des retours d'expériences, telle que la cartographie des toits végétalisés à l'image de la carte interactive des toits à Chicago²², ou les cartes des toits parisiens établies par l'APUR (2012). Cependant, la constitution de ce répertoire de l'usage précis des toits fait face à des contraintes de collecte d'informations d'ordre privé.

Dans le but d'affiner davantage les données sur l'intégration de la nature en milieu urbain, les pistes d'investigation peuvent aussi être celles d'identifier l'apport des surfaces verticales constituant les façades. En effet, ces murs vivants sont de véritables écosystèmes verticaux qui peuvent participer à l'équilibre entre les surfaces vivantes et perméables grâce à leur végétalisation et les surfaces minéralisées et imperméables propres au milieu urbain. Concluons avec cette pensée d'Hubert Reeves :

« À défaut de posséder un toit plat ou faiblement incliné, il y a aussi l'option des murs végétaux. Avant que l'on parle de ces jardins verticaux, déjà le lierre ou la vigne vierge grimpaient à l'assaut des murs. Dorénavant, les aménagements végétaux des murs amorcent ou renforcent ces corridors biologiques favorables aux insectes et même aux oiseaux que toute ville doit favoriser. On leur prête aussi d'assurer une régulation thermique du bâtiment. Les murs antibruit gagneraient souvent à être masqués par un écran végétal : de futurs chefs-d'œuvre ? Souvent, les murets de séparation des propriétés pourraient être tapissés de végétaux. Remarque : certaines haies sont aussi infranchissables qu'un mur et souvent bien plus belles. »
(Reeves, 2007)

²² City of Chicago, Repéré à <https://data.cityofchicago.org> – consulté le 24 mai 2013

Bibliographie

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). (Janvier 2014). *Observatoire des Plans Climat-Energie Territoriaux, Identifier et maîtriser les risques associés aux Îlots de Chaleur Urbains.*

Repéré à <http://observatoire.pcet-ademe.fr/action/fiche/69/identifier-et-maitriser-les-risques-associes-aux-ilots-de-chaleur-urbains-icu> – consulté le 12 février 2014

Akbari, H., Menon, S. et Rosenfeld, A. H. (2009). *Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO².* *Climatic Change*, 94 (3-4), 275-286.

Alexander, C. (1977). *A Pattern Language : Towns, Buildings, Construction.* États-Unis : Oxford University Press.

Anquez, P. et Herlem, A. (Avril 2011). *Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions.* Chaire de responsabilité sociale et de développement durable de l'UQAM. p.16.

Arrondissement du sud-ouest, Direction de l'Aménagement Urbain et des services aux entreprises, Division – Urbanisme. (Décembre 2005). *Étude typomorphologique de l'arrondissement du sud-ouest rapport de synthèse.* p. 24.

Repéré à

http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/arrond_sou_fr/media/documents/synthese_developpement_sud_ouest.pdf – consulté le 20 août 2013

Association pour le Développement et Innovation sur la Végétalisation Extensive des Toitures (ADIVET). (Novembre 2007). *Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées.* FFB Étanchéité, CSFE, SNPPA, UNEP. Édition n° 2.

Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR). (Décembre 2012). *Les îlots de chaleur urbain à Paris, Phase 1.* Paris, France.

Auger, J. et Roquet, N. (1998). *Mémoire des bâtisseurs du Québec : répertoire illustré de systèmes de construction du XVIIIe siècle à nos jours*. Montréal : Éditions du Méridien.

Ballhausen, N. (2006). *Dessine-moi un toit, L'architecture d'aujourd'hui*. 364, 52-57.

Banaszak, O., Koehl, M. (1^{er} trimestre 2008). *Dossier SIG : vers la généralisation de la 3D*. *Revue XYZ*. 114, 50. Repéré à http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/27/84/77/PDF/XYZ_114_SIG_banaszak_Koehl.pdf – consulté le 28 janvier 2013

Barrett, J., Birch, R., Cherrett, N. et Wiedmann, T. (2005). *Exploring the application of the Ecological Footprint to sustainable consumption policy*. York, UK : Journal of Environmental Policy and Planning, Stockholm Environment Institute, University of York. 303, 316.

Benoît, M. et Gratton, R. (1991). *Pignon sur rue : Les quartiers de Montréal*. Montréal, Québec : Guérin littérature. 2e éd., 393.

Cavayas, F. et Baudouin, Y. (Janvier 2008). *Études des biotopes urbains et périurbains de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). Évolution des occupations du sol, du couvert végétal et des îlots de chaleur sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal (1984-2005)*. Rapport destiné au Conseil régional de l'environnement de Laval, réalisé par l'Université de Montréal et l'Université du Québec à Montréal. Montréal, volet 1, p. 76.

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). (Décembre 2007). *Les toitures végétalisées une contribution au développement durable - Dominique Thibaud*. Webzine.

Colombert, M. (Décembre 2008). *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Paris. France.

Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2009). Photographies aériennes d'avril 2009. Repéré à <http://cmm.qc.ca/geomatique/ortho-avril-2009/> – consulté le 16 mai 2013

Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2013). *Orthophotographie d'avril 2013*. Repéré à <http://cmm.qc.ca/geomatique/ortho-avril-2013/> – consulté le 12 novembre 2013

Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2013). *Plan Métropolitain d'Aménagement et de Développement*. 2013. Repéré à <http://pmad.ca/> – consulté le 23 janvier 2014

Conseil National de recherches du Canada en collaboration avec Environnement Canada (CNRC). (Hiver 2002). *Un projet pour quantifier les avantages des terrasses-jardins*.7(1).

Conseil régional de l'environnement de Montréal (CRE de Montréal). (2008). *Les matériaux réfléchissants et perméables pour contrer les îlots de chaleur urbains*. p. 20.

Repéré à <http://www.cremtl.qc.ca/fichiers-cre/files/pdf991.pdf> – consulté le 17 septembre 2013

Dictionnaire *Larousse de la langue française*, Repéré à <http://www.larousse.fr> – consulté le 5 février 2013

Duchêne-Marullaz, P. (1980). *Recherche exploratoire en climatologie urbaine*. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). p. 86.

Environnement Canada. (Février 2013). *Normales climatiques au Canada 1971-2000*. Repéré à http://www.climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_f.html?stnID=5415&lang=f&dCode=1&province=QUE&provBut=&month1=0&month2=12 – consulté le 10 décembre 2013

Équiterre (Août 2013). *Gagner en réduisant son empreinte écologique pour la rentrée*. Repéré à <http://www.equiterre.org/communique/gagner-en-reduisant-son-empreinte-ecologique-pour-la-rentree>. – consulté le 22 janvier 2014

Ernst & Young et associés. (2009). *Étude pour la définition d'une démarche de développements des toitures végétalisées*. Nice Côte d'Azur, Direction de l'Environnement.

Fischetti, M. (2008). *Green roofs*. Living cover. 298(5), 104-5.

Fournier, L. (Octobre 2010). *Les toits verts : une plus-value pour les citoyens, le toit vert de l'hôtel de ville de Chicago*. Montréal, Québec : La Press. Repéré à <http://www.lapresse.ca/le-soleil/vivre-ici/maison/201010/29/01-4337598-toits-verts-une-plus-value-pour-les-citadins.php> – consulté le 13 juin 2014

Gariépy, B. (Octobre 2012). La Nature, *source d'innovation pour une métropole durable ?* Ville de Montréal au Symposium de la Ville de Paris, France. Section développement et soutien technique, Direction des stratégies et transactions immobilières, Ville de Montréal.

Godin, P. (2012). *Implanter un jardin en bacs sur les toits, Guide pour les milieux institutionnel et commercial*. Montréal, Québec : Centre d'écologie urbaine de Montréal. p. 11. Repéré à <http://www.ecologieurbaine.net/documentation/guide-techniques-documents/11-guide-sur-lagriculture-urbaine/file>. – consulté le 11 juin 2014.

Gouvernement du Québec. (2013). *Îlots de chaleur/fraîcheur urbains et température de surface*. Repéré à <http://www.donnees.gouv.qc.ca/?node=/donnees-details&id=2f4294b5-8489-4630-96a1-84da590f02ee> – consulté le 12 décembre 2013

Guay, F. et Baudouin, Y. (2005). *Portrait des îlots de chaleur urbains à Montréal*. Montréal : Franc Vert. 4 p. Repéré à <http://www.francvert.org/pages/23articleportraitdesilotsdechaleur.asp> – consulté le 18 juillet 2013

Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France (IAURIF). (Juin 2005). *Note rapide sur l'occupation au sol*. Paris, France : 383. Repéré à http://www.iaurif.org/fileadmin/Etudes/etude_214/nr_383_Apprehender_la_densite_2.pdf – consulté le 12 février 2013

Institut National de Santé Publique du Québec. (Juillet 2009). *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*. Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels. Repéré à http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/988_MesuresIlotsChaleur.pdf – consulté le 11 février 2013.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (Septembre 2013). *Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Stockholm.

Jacquet, S. (2011). *Résumé du mémoire présenté à l'école de technologie supérieure, Performance énergétique d'une toiture végétale au centre-ville de Montréal*. Le Centre Écologique Urbain de Montréal. Repéré à <http://www.ecologieurbaine.net/node/1214> – consulté le 25 avril 2014

Joannès, F. (2001). *Dictionnaire de la civilisation mésopotamienne*. France, Paris.

Jochem, A., Höfle, B., Rutzinger, M., et Pfeifer, N. (2009). *Automatic Roof Plane Detection and Analysis in Airborne Lidar Point Clouds for Solar Potential Assessment*. *Sensors* 9, 5241-5262. doi:10.3390/s90705241, ISSN 1424-8220.

Kassner, R., Koppe, W., Schüttenberg, T., et G Bareth. (2008). *Analysis of the solar potential of roofs by using official lidar data*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B4. Beijing, 399-403.

Kozłowski, J. et Desbrosse, R. (Septembre 2001). *Les habitats préhistoriques. Des australopithèques aux premiers agriculteurs*. Édition Broché.

Labrecque, M. et Vergriete, Y. (2006). *Étude des biotopes urbains et périurbains de la CMM, Volet 3 : synthèse des indicateurs de rétention des eaux par les végétaux et possibilité d'application, en milieu urbain et périurbain, sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal*. Conseil régional de l'environnement de Laval.

Laroche, D., Mitchell A.M. et Péloquin, S. (30 juin 2004). *Les toits verts aujourd'hui ; c'est construire le Montréal de demain*. Mémoire présenté à l'office de consultation publique de Montréal dans le cadre du nouveau plan d'urbanisme 2004.

Leape, J. (2007). *Toward a Preferred Future Understanding Calgary's Ecological Footprint*. The City of Calgary, Automne 2007, 1-17.

Le Gargouille. (Juillet 2012). *Énergie et croissance de l'économie : quel lien entre elles ?*
Repéré à <http://le.gargaillou.over-blog.net/article-energie-et-croissance-de-l-economie-quel-lien-entre-elles-108698251.html> – consulté le 12 février 2013

Lessard, M. (Automne 2010). *Analyse de milieu et design urbain, URB 6751*. Institut d'urbanisme. Faculté de l'aménagement, Université de Montréal.
Repéré à http://www.vrm.ca/syllabus/URB6751_A10.pdf – consulté le 18 février 2014

Linteau, P.-A. (1992). *Brève histoire de Montréal, Montréal*, éd. Boréal, 189 pages.

Liu, K.Y. et Bass, B. (Mai 2005). *Performance of green roof systems*. Cool Roofing Symposium, Atlanta, GA., U.S.A. 5/12/2005, May 01, 2005, 1-18.

Manin, A. (2007). *Améliorer le climat urbain grâce aux petits espaces verts*. Bulletin Electronique Allemagne. n° 350. Repéré à <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/50740.htm> – consulté le 19 mars 2014

Marchal, M. (Octobre 2012). *Les toits verts poussent peu à Montréal*.
Repéré à <http://journalmetro.com/actualites/montreal/157624/les-toits-verts-poussent-peu-a-montreal/#> – consulté le 27 janvier 2013.

Marsolais, C. (Octobre 2007). *Les origines du toit plat montréalais*. Montréal, Québec : La Presse, le 17 octobre 2007. Repéré à <http://maison.lapresse.ca/architecture/200710/17/01-871031-les-origines-du-toit-plat-montrealais.php> – consulté le 28 février 2014

Martin, P., Baudouin, Y., Beauchemin, M. et Gagnon, S. (2007). *Tendance historique 1984-2005 de l'ICU à Montréal via l'imagerie Landsat et les stations météorologiques*. p. 19.

Melquiot, P. (2003). *Dictionnaire sur l'environnement, 1.001 mots et abréviations de l'environnement et du développement durable*. Édition RECYCONSULT, 192 pages. ISBN : 2-9520542-0-7

Michot, H. (2007). *Les types de toitures végétales*. Repéré à <http://toit-vegetal.com/types.php> –consulté le 27 juin 2014

Ministère de l'Environnement et des Ressources Naturelles (MERN). (2014). *La réforme du cadastre québécois, 2014*. Repéré à <http://www.mern.gouv.qc.ca/foncier/cadastre/> – consulté le 8 juin 2014

Ministère Québécois du Développement Durable. (2013). *Calcule ton empreinte écologique*. Repéré à <http://www.mddep.gouv.qc.ca/jeunesse/jeux/questionnaires/empreinte/questionnaire.htm> - consulté le 10 décembre 2013

Morrill, J.C., Bales, R.C. et Conklin, M.H. (2005). *Estimating Stream Temperature from Air Temperature: Implications for Future Water Quality*. Journal of Environmental Engineering. Vol. 131, No. 1, Janvier 2005, 139-146.

Repéré à <https://eng.ucmerced.edu/people/rbales/CV/PubsM/98>– consulté le 10 février 2014

Noppen, L. (2006). *Les architectes 'montréalistes': La quête du caractère métropolitain dans le projet architectural résidentiel contemporain*.

Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Kohler, M., Liu, K. K. Y., and Rowe, B. (2007). *Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services* *BioScience*. 57, 823-833.

Observatoire de la Ville Intérieure. (2006). Repéré à <http://www.observatoiredelavilleinterieure.ca/mission.html> –consulté le 11 mars 2013

Pacteau, C. et Joussaume, S. (2010). *Climate change and health: a challenge for research*. Workshop on public health, surveillance and climate change - Conference Proceedings, INVS.

Paquot, T. (2003). *Le toit, Seuil Du Cosmos*. Alternatives. Paris, France.

Patri-Arch. (2005). Firme de consultants en patrimoine et architecture pour l'Arrondissement du Sud-Ouest, Direction de l'Aménagement Urbain et des services aux entreprises, Division – Urbanisme, *Étude typomorphologique de l'arrondissement du Sud-Ouest rapport de synthèse*. Décembre 2005, p.24. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/arrond_sou_fr/media/documents/synthese_developpement_sud_ouest.pdf – consulté le 18 avril 2013

Per, A et Arpa, J. (2007). *Density Projects*. Spain. a+ t Ediciones.

Potvin, L. (2008). *Entre le vert et le blanc*. Journal de Rosemont-La Petite-Patrie, 17 Juillet 2008. Repéré à <http://www.journalderosemont.com/Construction-et-immobilier/2008-07-17/article-929944/Entre-le-vert-et-le-blanc/1> – consulté le 4 mars 2014

Prochazka, A., Breux, S. (2011). *L'épiderme aérien des villes au regard de la question de l'énergie et des modes de vie : Prospective des formes et des stratégies architecturales et urbaines*. « Learning from » Chicago, Montréal, Paris. Programme interdisciplinaire de recherche Ignis Mutat Res : « Penser l'architecture, la ville et le paysage au prisme de l'énergie ». Ministère de la Culture et de la Communication (France) et Atelier International du Grand Paris.

Pronovost, F. (2012). *Récupération de l'eau de pluie : des avantages écologiques et financiers*, Le portail du Bâtiment Durable, Voir Vert. Repéré à <http://www.voirvert.ca/communaute/blogues/francis-pronovost/recuperation-1%E2%80%99eau-pluie-avantages-ecologiques-et-financiers> – consulté le 13 juin 2014

Reeves, H. (Mai 2007). *La prairie sur le toit*. Canoe.ca. Repéré à <http://fr.canoe.ca/techno/chroniques/hubertreeves/archives/2007/05/20070529-081904.html> – consulté le 23 juillet 2013

Rémillard, F. et Merrett, B. (2007). *L'architecture de Montréal : Guide des styles et des bâtiments*. Sainte-Adèle, Qc, Éditions Café Crème, 240 p. (ISBN 978-2-923644-00-4)

Samcon, Compagnie de construction. (2014). Repéré à <http://www.samcon.ca/foire-aux-questions.html> – consulté le 11 juin 2014

Secchi, B. et Vigano, P. (2010). *Paris Métropole 2021, la construction d'une stratégie*. Atelier International du Grand Paris, Densifier le pavillonnaire. Paris, France, studio 09, plaquette 6.

Schueler, T. (2008). *Technical support for the bay-wide runoff reduction method*. Chesapeake stormwater network.

Stephens, K. A. et al. (2002). *Stormwater planning. A Guidebook for British Columbia*. British Columbia Ministry of Water, Land and Air Protection, Vancouver, C.-B.

Taillet, R., Villain, L. et Febvre, P. (2009). *Dictionnaire de physique*. ed. De Boeck. ISBN :9 782 804 102 4872 804 102 483, p. 15

The Man and Biosphere program (MAB). (Juillet 2011). *To promote sustainable urban development and improve the relationship between cities and ecosystems of which they are a part*. Repéré à http://www.unesco.org/new/en/media-services/single-view/news/urban_connections/ – consulté le 22 février 2013

Transect. *Center for applied Transect Studies*. Repéré à http://www.transect.org/rural_img.html – consulté le 16 mai 2013

Trottier, A. (Mai 2008). *Toitures végétales : implantation de toits verts en milieu institutionnel, Étude de cas : UQAM*. Repéré à <http://www.ecologieurbaine.net/node/1215>

Uhde, S. (2009). *L'empreinte écologique : revue de littérature et analyse critique. Cahier technique et méthodologique*. Service des statistiques sectorielles et du développement durable. Institut de la statistique du Québec. Québec.

Unger, J. (2009). *Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database*, International Journal of Environment and Pollution, Vol. 36, No.1/2/3, 59 – 80.

Van den Bergh, J. et Verbruggen, H. (1999). *Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the ecological footprint*. Department of Spatial Economics and Institute for Environmental Studies, Amsterdam, Netherlands, Ecological Economics. 29(1) p. 61–72.

Venetoulis, J., Talberth, J. (2008). *Refining the ecological footprint*. Environment, Development and Sustainability. Oakland, CA. 10, 441-469.

Ville de Chicago, *Chicago "Adding Green to Urban Design" Plan*.

Repéré à http://www.cityofchicago.org/city/en/depts/dcd/supp_info/green_urban_design.html
– consulté le 18 juin 2013

Ville de Montréal, Le conseil d'agglomération. (2010). *Le Plan de développement durable de la collectivité montréalaise 2010-2015*. Montréal, Québec.

Repéré à <http://ville.montreal.qc.ca/developpementdurable>– consulté le 22 janvier 2013

Ville de Montréal. (Septembre 2004). *Le plan d'Urbanisme de la Ville de Montréal. Partie III – Le document complémentaire*. Montréal, Québec. 48 p.

Ville de Montréal, Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension (Décembre 2013). Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=8638,96097666&_dad=portal&_schema=PORTAL&id=8190&ret=/pls/portal/url/page/arrond_vsp_fr/rep_annonces/rep_actualites/coll_actualites – consulté le 6 mai 2013

Ville de Montréal, Direction des grands parcs et du verdissement. (2013). *Plan d'action canopée 2012-2021*. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/GRANDS_PARCS_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PAC_JUIN_2012_FINAL.PDF –consulté le 3 mai 2013.

Ville de Montréal. (2010). *La gestion de l'eau*. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=6497,85605591&_dad=portal&_schema=PORTAL – consulté le 10 janvier 2013

Wackernagel, M et Rees, W. (1996). *Our Ecological Footprint. Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publisher. ISBN: 9780865713123

Wiebe, R. (Mars 2012). *Les « plex » de Montréal – omniprésents et uniques en leur genre*. Le Conference Board du Canada. Repéré à http://www.conferenceboard.ca/economics/hot_eco_topics/default/12-0327/les_%C2%AB_plexes_%C2%BB_de_montr%C3%A9al_%E2%80%93_omnipr%C3%A9sents_et_uniques_en_leur_genre.aspx – consulté le 18 avril 2013

Wilmers, F. (1988). *Greenfor Melioration of Urban Climate*. Energy and Buildings. 11, 289-299.

Wilson, J., Anielski, M. (Janvier 2005). *Ecological Footprints of Canadian Municipalities and Regions*. Report prepared for the Canadian Federation of Canadian Municipalities by Anielski Management Inc., Edmonton, Canada.

Wong, R. (2006). *A Comparison of Combustion Technologies for Electricity Generation. 2006 Update Including a Discussion of Carbon Capture and Storage in an Ontario Context*. The Pembina Institute. Alberta, Canada.

WWF International. (2006). *Rapport planète vivante 2006*. Global Footprint Network. Gland, Suisse, 1-17.

WWF International. (2010). *Rapport Planète Vivante 2010*. Global Footprint Network. Gland, Suisse.

Zuinen, N., et Gouzée N. (2010). *Biocapacité et empreinte écologique des modes de vie : des indicateurs pour la politique de développement durable ?* Bureau fédéral du Plan, Bruxelles, ed. Henri Bogaert.

Annexes

Nom complet	Île de Montréal
Code de Pays Principal	CA (Canada)
Code administratif de premier ordre	10 (Québec)
Code Régional de fonte de caractères	1 (Amériques / Europe de l'Ouest)
Identifiant Exclusif	-569542
Identifiant Unique de Nom	-804451
Latitude en degrés décimaux	45.5
Longitude en degrés décimaux	(-)73.666667
Latitude en degrés, minutes et secondes	45° 30' 00" N
Longitude en degrés, minutes et secondes	73° 40' 00" W
Coordonnées du Système de Référence de Quadrillage Militaire	18TXR0416939361
Référence Graphique des Opérations Conjointes	NL18-09
Classement	T (Lieu du type hypsographique)
Code de Désignation	ISL (île)
Type de Nom	N (Nom de la norme BGN)
Nom d'utilisateur avec Gazetteer	ILEDEMONTREAL
Nom complet avec caractères QWERTY	Ile de Montréal
Date d'Édition	14/12/1993

Annexe 1 – Références de localisation internationales de l'île de Montréal.

Repéré à http://www.geomondiale.fr/noms_geographiques/name.php?uni=-804451&fid=901&c=canada
consulté le 24 janvier 2013

secteurs	usage	totale		bâti		canopée		voirie (1)		sup. résiduelle	
		m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%
Pointe-Claire	résidentiel	1 972 880	100	261 770	13	592 500	30	n/d	n/d	n/d	n/d
	industriel	1 486 425	100	343 161	23	58 624	4	n/d	n/d	n/d	n/d
Anjou	résidentiel	342 072	100	80 675	24	40 279	12	79 868	23	181 528	53
	industriel	1 949 006	100	631 630	32	33 583	2	166 543	9	1 150 832	59
Centre-Ville	résidentiel	618 009	100	260 403	42	65 571	11	175 431	28	182 174	29
	commercial	276 373	100	92 679	34	11 950	4	83 222	30	100 472	36

Annexe 2 – Les données collectées auprès de la Ville de Montréal sur les trois secteurs
Division de la Géomatique (Sananikone 2013).

secteurs	usage	totale		toiture		espaces naturels		canopée		voirie		stationnements	
		m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%
Pointe-Claire	résidentiel	2 032 560	100	269 891	13	1 385 053	68	550 787	27	291 485	14	86 132	4
	industriel	1 548 604	100	375 419	24	126 017	8	51 777	3	192 558	12	854 610	55
Anjou	résidentiel	335 168	100	81 735	24	131 765	39	32 260	10	91 795	27	29 873	9
	industriel	2 020 949	100	649 714	32	249 650	12	27 898	1	233 132	12	888 453	44
Centre-Ville	résidentiel	646 107	100	298 393	46	108 495	17	63 305	10	160 301	25	78 918	12
	commercial	262 803	100	110 189	42	21 042	8	10 852	4	110 393	42	21 179	8

Annexe 3 – Relevé des superficies déterminées à partir des maquettes numériques.

- La superficie brute des toits correspond à l'emprise des espaces bâtis.
- La voirie correspond à l'ensemble des chaussées, rues, intersections et trottoirs.
- Les espaces de canopée se superposent aux autres surfaces, leurs pourcentages sont donc indépendants des autres valeurs.

secteurs	usage	total		naturel		minéral	
		m2	%	m2	%	m2	%
Pointe-Claire	résidentiel	2032560	100	1 385 053	68	647 507	32
	industriel	1548604	100	126 017	8	1 422 587	92
Anjou	résidentiel	335168	100	131 765	39	203 403	61
	industriel	2020949	100	249 650	12	1 771 299	88
Centre-Ville	résidentiel	646107	100	108 495	17	537 612	83
	commercial	262803	100	21 042	8	241 761	92

Annexe 4 – Calcul des superficies minérales et naturelles sur les trois secteurs.

secteurs	usage	17°C < t =< 27°C		27°C < t =< 32°C		32°C < t =< 33°C		33°C < t =< 34°C		34°C < t = 42°C		t°C
		m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	moy.
Pointe-Claire	résidentiel	405 873	20	1 592 824	78	20 681	1	13 183	1	-	-	28,1
	industriel	4 531	0	773 198	50	266 828	17	326 950	21	177 097	11	31,8
Anjou	résidentiel	-	-	158 258	47	140 927	42	35 891	11	-	-	31,2
	industriel	-	-	87 101	4	90 709	4	248 462	12	1 594 677	79	36,8
Centre-Ville	résidentiel	-	-	11 200	2	37 568	6	386 605	60	210 651	33	34,8
	commercial	-	-	230 551	88	17 150	7	12 943	5	2 160	1	30,0

Annexe 5 – Relevé des températures sur les trois secteurs (Baudouin 2011)

secteurs	usage	volume d'eau de pluie total/an		volume d'eau de ruissellement						sup. totale des toits / sup. de la parcelle		vol. d'eau récupérable sur les toits/sup. totale	
		m3	%	zone minérale		zone naturelle		total/an		m2	%	m3	%
				m3	%	m3	%	m3	%				
Pointe-Claire	résidentiel	2 032 560	100	485 631	75	138 505	10	624 136	31	269 891	13	242 901	12
	industriel	1 548 604	100	1 066 940	75	12 602	10	1 079 542	70	375 419	24	337 877	22
Anjou	résidentiel	335 168	100	152 552	75	13 177	10	165 729	49	81 735	24	73 562	22
	industriel	2 020 949	100	1 328 474	75	24 965	10	1 353 439	67	649 714	32	584 743	29
Centre-Ville	résidentiel	646 107	100	403 209	75	10 850	10	414 059	64	298 393	46	268 554	42
	commercial	262 803	100	181 321	75	2 104	10	183 425	70	110 189	42	99 170	38

Annexe 6 – Calcul des volumes d'eau de ruissellement sur les trois secteurs.

secteurs	usage	situation actuelle				situation optimale				comparatif : sup. nat. manquante vs toits			
		sup. naturelle		sup. minérale		sup. naturelle		sup. minérale		sup. nat. manquante		sup. toiture	
		m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%
Pointe-Claire	résidentiel	1 385 053	68	647 507	32	-	#	-	#	-	#	269 891	13
	industriel	126 017	8	1 422 587	92	929162	60	619442	40	803 145	52	375 419	24
Anjou	résidentiel	131 765	39	203 403	61	201101	60	134067	40	69 336	21	81 735	24
	industriel	249 650	12	1 771 299	88	1212569	60	808380	40	962 919	48	649 714	32
Centre-Ville	résidentiel	108 495	17	537 612	83	387664	60	258443	40	279 169	43	298 393	46
	commercial	21 042	8	241 761	92	157682	60	105121	40	136 640	52	110 189	42

Annexe 7 – Situation actuelle des superficies naturelles et minérale des secteurs à la situation possible avec la contribution des toits: 60% de superficie naturelle versus 40% de superficie minérale

secteurs	usage	situation actuelle				situation optimale				comparatif : sup. nat. manquante vs toits				équilibre possibles par les toits			
		sup. naturelle		sup. minérale		sup. naturelle		sup. minérale		sup. nat. manquante		sup. toiture		sup. naturelle		sup. minérale	
		m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%	m2	%
Pointe-Claire	résidentiel	1 385 053	68	647 507	32	-	#	-	#	-	#	269 891	13	-	#	-	#
	industriel	126 017	8	1 422 587	92	774302	50	774302	50	648 285	42	375 419	24	501436	32	1 047 168	68
Anjou	résidentiel	131 765	39	203 403	61	167584	50	167584	50	35 819	11	81 735	24	167 584	50	167 584	50
	industriel	249 650	12	1 771 299	88	1010475	50	1010475	50	760 825	38	649 714	32	899364	45	1 121 585	55
Centre-Ville	résidentiel	108 495	17	537 612	83	323054	50	323054	50	214 559	33	298 393	46	323 054	50	323 054	50
	commercial	21 042	8	241 761	92	131402	50	131402	50	110 360	42	110 189	42	131402	50	131 402	50

Annexe 8 – Situation actuelle des superficies naturelles et minérale des secteurs à la situation possible avec la contribution des toits: 50% de superficie naturelle versus 50% de superficie minérale

RUISSELLEMENT

secteurs	usage	volume d'eau de pluie total/an		volume d'eau de ruissellement					
				zone minérale		zone naturelle		total/an	
		m3	%	m3	%	m3	%	m3	%
Pointe-Claire	résidentiel	2 032 560	100	485 631	75	138 505	10	624 136	30,7
	industriel	1 548 604	100	1 066 940	75	12 602	10	1 079 542	69,7
Anjou	résidentiel	335 168	100	152 552	75	13 177	10	165 729	49,4
	industriel	2 020 949	100	1 328 474	75	24 965	10	1 353 439	67,0
Centre-Ville	résidentiel	646 107	100	403 209	75	10 850	10	414 059	64,1
	commercial	262 803	100	181 321	75	2 104	10	183 425	69,8

INFILTRATION

volume d'eau infiltrée					
zone minérale		zone naturelle		total/an	
m3	%	m3	%	m3	%
32 375	5	692 527	50	724 902	35,7
71 129	5	63 009	50	134 138	8,7
10 170	5	65 883	50	76 053	22,7
88 565	5	124 825	50	213 390	10,6
26 881	5	54 248	50	81 128	12,6
12 088	5	10 521	50	22 609	8,6

EVAPOTRANSPIRATION

volume d'eau par évapotranspiration					
zone minérale		zone naturelle		total/an	
m3	%	m3	%	m3	%
129 501	20	554 021	40	683 523	33,6
284 517	20	50 407	40	334 924	21,6
40 681	20	52 706	40	93 387	27,9
354 260	20	99 860	40	454 120	22,5
107 522	20	43 398	40	150 920	23,4
48 352	20	8 417	40	56 769	21,6

Annexe 9 – Estimation des volumes d'eau de ruissellement, d'infiltration et d'évapotranspiration selon les travaux de Stephen (2002).

COLLECTEURS

secteurs	usage	sup. des toits après simulation		vol. d'eau récupérable sur les toits collecteurs	
		m2	%	m3	%
Pointe-Claire	résidentiel	-	-	-	-
	industriel	375,419	24	337,877	22
Anjou	résidentiel	35,819	11	32,237	10
	industriel	649,714	32	584,743	29
Centre-Ville	résidentiel	214,559	33	193,103	30
	commercial	110,360	42	99,324	38

INTENSIFS

		sup. des toits après simulation		vol. d'eau retenu par les toits intensifs	
		m2	%	m3	%
		-	-	-	-
		375,419	24	225,251	15
		35,819	11	21,491	6
		649,714	32	389,829	19
		214,559	33	128,735	20
		110,360	42	66,216	25

EXTENSIFS

		sup. des toits après simulation		vol. d'eau retenu par les toits intensifs	
		m2	%	m3	%
		-	-	-	-
		375,419	24	112,626	7
		35,819	11	10,746	3
		649,714	32	194,914	10
		214,559	33	64,368	10
		110,360	42	33,108	13

Annexe 10 – Estimation des volumes d'eau retenus sur les trois secteurs, selon les types d'aménagement de toits: toits collecteurs, toits extensifs et intensifs d'après les données du tableau 2.