

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ANALYSE DIACHRONIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE  
DE MONTRÉAL EN PÉRIODE ESTIVALE DE 1984 À 2005

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR

PHILIPPE MARTIN

AOÛT 2008

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement mon superviseur Mr Yves Baudouin, Directeur du département de Géographie à l'Université du Québec à Montréal (UQÀM), pour tous ses conseils et sa gentillesse. Je remercie également mon co-directeur Mr Philippe Gachon, Professeur associé et chercheur scientifique à Environnement Canada à Montréal, de son appui tout au long de ce projet; et encore l'équipe de recherche sur les îlots de chaleur de l'UQÀM, à savoir Messieurs Camilo Perez et Julien Leprince pour leurs compléments d'informations et leur bon esprit d'équipe.

Une reconnaissance spéciale à Ouranos qui m'a fourni un bureau afin de réaliser mon étude dans les meilleures conditions, ainsi qu'Environnement Canada pour leurs données météorologiques complémentaires indispensables.

Enfin je tenais à remercier tous les organismes associés au projet global sur les chaleurs accablantes pour leur soutien financier : le Fonds d'Action pour le Changement Climatique (FACC), Ouranos et le Conseil Régional de l'Environnement de Laval (CREL).

## Table des matières

Liste des figures .....	vi
Liste des tableaux .....	x
Liste des acronymes .....	xi
Résumé .....	xiii
Abstract .....	xiv
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>1</b>
Objectif de l'étude .....	7
Hypothèse .....	9
<b>CHAPITRE I : L'ÉTAT DES CONNAISSANCES .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Introduction .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2 Les îlots de chaleur urbains (ICU) .....</b>	<b>10</b>
1.2.1 Terminologie .....	10
1.2.2 Formation et évolution spatio-temporelle des ICU .....	12
1.2.3 Relation entre les îlots de chaleur et le changement climatique .....	18
1.2.4 Les rapports entre les températures de surface et la couverture végétale .....	19
1.2.5 Influence des ICU sur l'environnement et la santé publique .....	22
1.2.6 Les solutions pour ralentir les îlots et leurs différents impacts .....	24
<b>1.3 La télédétection utilisée comme moyen pour l'analyse des ICU .....</b>	<b>27</b>
1.3.1 Terminologie .....	28

1.3.2	Champs d'application .....	28
1.3.3	Les assises .....	30
1.3.4	L'infrarouge thermique (IR) .....	35
<b>1.4</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>38</b>
<b>CHAPITRE II : MÉTHODOLOGIE .....</b>		<b>39</b>
<b>2.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>39</b>
<b>2.2</b>	<b>Territoire d'étude .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3</b>	<b>Acquisition et description des données .....</b>	<b>44</b>
<b>2.4</b>	<b>Démarche méthodologique .....</b>	<b>47</b>
<b>2.5</b>	<b>Analyse en composantes principales pour l'étude diachronique des ICU ..</b>	<b>60</b>
<b>2.6</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>62</b>
<b>CHAPITRE III : RÉSULTATS .....</b>		<b>63</b>
<b>3.1</b>	<b>Les cartes thermiques de la CMM .....</b>	<b>63</b>
<b>3.2</b>	<b>Comparaison des cartes en excluant le cycle saisonnier .....</b>	<b>67</b>
<b>3.3</b>	<b>Analyse temporelle via l'analyse en composantes principales .....</b>	<b>76</b>
<b>CHAPITRE IV :</b>		
<b>DISCUSSION, RECOMMANDATIONS ET DÉVELOPPEMENTS FUTURS ..</b>		<b>78</b>
.....		
<b>4.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>78</b>

<b>4.2 Conditions météorologiques variables</b> .....	79
<b>4.3 Liens entre le NDVI et la distribution spatiale des températures</b> .....	81
<b>4.4 Les chaleurs extrêmes réparties sur le territoire de la CMM</b> .....	101
<b>4.5 Comparaison avec d'autres études dans les métropoles</b> .....	104
<b>4.6 Développements futurs</b> .....	105
<b>4.7 Suggestions ou recommandations pour diminuer la densité et l'intensité des ICU</b> .....	106
<b>CONCLUSION</b> .....	107
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	109
<b>ANNEXE DES CARTES</b> .....	119

## LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.0	Anomalies interannuelles des températures de l'air à la surface du globe, avec et sans l'impact des activités humaines, depuis 1890 à 2000, par rapport à la période 1961-1990 .....	2
1.1	Profil d'un îlot de chaleur urbain d'une ville nord-américaine en été .....	11
1.2	Les différentes valeurs de l'albédo de l'environnement urbain de Montréal en été, échelonnées de 0 à 1 .....	13
1.3	Caractéristiques des îlots de chaleur .....	16
1.4	Description schématique de l'atmosphère urbaine .....	17
1.5	Écart thermique entre deux stations météorologiques le 13 août 2002. (Dorval et Mirabel) .....	17
1.6	Exemple d'image infrarouge d'un arbre grâce à une caméra thermique par la NASA; différence entre la nuit et le jour. ....	20
1.7	Smog au-dessus de la ville de Santiago du Chili .....	22
1.8	Décès reliés aux fortes chaleurs (plus de trois jours) pour les résidents de Chicago (USA), du 10 au 20 juillet 1995.....	23
1.9	Blanchiment d'un toit en Californie dans le but de diminuer la chaleur emmagasinée .....	24
1.10	Toits verts sur l'Hôtel de ville de Chicago (a) et sur un immeuble du centre ville de Montréal (b) .....	26
1.11	Principes de la télédétection .....	27
1.12	Le spectre électromagnétique .....	34
1.13	Onde simple .....	36
2.1	Démarche méthodologique de l'étude .....	40
2.2	Communauté métropolitaine de Montréal .....	41

2.3	Exemples de la superficie couverte par les images de (a) 1984 et (b) 2005 de Landsat 5 au-dessus de la CMM (en bleu) .....	43
2.4	Zone d'étude délimitée par le cadre, pour laquelle toutes les images Landsat seront analysées zone de travail .....	43
2.5	Organigramme résumant les différentes étapes du traitement des images .....	47
2.6	Corrections géométriques d'une image Landsat 5 grâce à l'emplacement du réseau routier .....	51
2.7	(A) Image satellite brute du 27 juillet 2003 non corrigée et (B) même image corrigée géométriquement et géoréférencée par rapport à celle de juin 2005 .....	52
2.8	(A) Format d'origine et (B) nouvelle zone d'étude définie dans un découpage commun .....	53
2.9	(A) Image découpée avant le masque et (B) même image avec le masque .....	55
2.10	Histogrammes de distribution de fréquence des pixels avant (à gauche) et après le masque (à droite) .....	55
2.11	(A) Cartes avant et après (B) le passage du masque qui exclu les valeurs de l'eau et des zones agricoles inutiles à l'étude .....	56
2.12	(A) Carte avant la classification ( <i>étirement</i> ) et (B) après la classification avec plus ou moins un écart type à la moyenne .....	58
3.0	Cartes thermiques de Montréal et ses alentours pour les mois de juin, selon une classification en valeurs brutes (degrés Celsius) .....	64
3.1	Idem figure 3.0 mais pour les mois de juillet .....	65
3.2	Idem figure 3.0 mais pour les mois d'août .....	66
3.3	Cartes thermiques de Montréal de 1984 à 1998 selon une classification utilisant $\pm 1$ à $\pm 4$ écarts types ajoutés à la moyenne spatiale de chaque image .....	68
3.4	Idem figure 3.3 mais pour les années de 2000 à 2005 .....	69
3.5	Les îlots de chaleur de Montréal entre 1984 et 2005 selon un seuil de $+5^{\circ}\text{C}$ par rapport à la moyenne .....	71
3.6	Histogrammes de la superficie au sol des ICU supérieurs à $+ 5^{\circ}\text{C}$ par rapport	

	à la moyenne thermique spatiale, pour les mois de juin, juillet et août .....	73
3.7	Représentation du 98 <sup>ième</sup> percentile dans les températures entre 1984 et 1998 .....	74
3.8	Idem figure 3.9 mais pour les années 2000 à 2005 .....	75
3.9	Comparaison des ACP thermique et NDVI pour les deux seules dates de juin 1984 et de juin 2005 .....	77
4.0	Corrélation entre les valeurs du NDVI et celles de la température le 27 juin 2005, selon un transect AB au centre de Montréal .....	81
4.1	Représentation des ICU par rapport à l'indice de végétation NDVI, entre juin 1984 et juin 2005 .....	83
4.2	Cartes d'ACP des températures (A) et du NDVI (B), pour les couples 1996/1984, 1998/1986 et 2003/1992 dont les valeurs sont supérieures à + 2 écarts types .....	85
4.3	L'exemple de l'arrondissement Saint-Laurent, (a) thermique et (b) NDVI .....	86
4.4	Partie commune des trois ACP thermiques (a) et NDVI (b) .....	87
4.5	Les secteurs de l'arrondissement Saint-Laurent propices à la formation d'îlots de chaleur .....	88
4.6	Exemple de différents types d'occupation du sol au nord-ouest de Pointe-Claire et leurs répercussions sur les températures le 27 juin 2005 .....	89
4.7	L'exemple de Pointe-Claire, (a) thermique et (b) NDVI .....	90
4.8	Partie commune dans les trois ACP thermiques (a) et NDVI (b) .....	91
4.9	ACP NDVI (a) et thermique (b) entre juin 2005 et juin 1984 d'un quartier résidentiel de Pointe-Claire .....	92
4.10	Les secteurs de Pointe-Claire propices à l'augmentation des températures .....	93
4.11	Espace disponible pour dix maisons dans un quartier résidentiel récent de Pointe-Claire entre les années 1960 et 1990 (a) et son plan de zonage (b) ....	94
4.12	L'évolution saine d'un quartier d'Ahuntsic .....	95
4.13	ACP NDVI 1996/1984 (a), 2003/1992 (b) et ACP thermiques 1996/1984 (c), 2003/1992 (d) d'un secteur de l'arrondissement d'Ahuntsic .....	96

4.14	L'évolution saine d'un nouveau quartier au sud de Terrebonne; 90 <sup>ième</sup> percentile des températures (rouge), versus valeurs du NDVI supérieures à la moyenne (vert) entre les dates du 17 juin 1984 et du 20 juin 2000 .....	98
4.15	ACP thermiques 1996/1984 (a), 2003/1992 (b) et ACP NDVI 1996/1984 (c), 2003/1992 (d) d'un nouveau quartier résidentiel au sud de Terrebonne ....	100
4.16	Municipalités de la CMM dont au moins 10% de leur superficie est supérieure à 32°C (en rouge) pour les mois de juin 1984, 1996, 2000 et 2005 .....	101
4.17	Municipalités de la CMM dont la température spatiale a augmenté d'au moins 10 % (en jaune) entre 1984 et 2005 .....	103
4.18	Municipalités de la CMM dont la température spatiale a augmenté d'au moins 10 % (en orange) entre 2000 et 2005 .....	103
4.19	L'importance de la végétation .....	106

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Domaines d'application de la télédétection .....	29
1.2 Types de plates-formes utilisées selon l'orbite et l'altitude .....	30
1.3 Les satellites Landsat mis en opération de 1972 à 2003 par la NASA .....	31
1.4 Bandes TM du Satellite Landsat 5 et principales applications .....	32
2.1 Profil de la CMM selon le nombre d'habitants .....	42
2.2 Données utilisées dans le cadre du projet de recherche .....	45
2.3 Répartition de dix points de contrôle sur la CMM, entre l'image de référence (juin 2005) et une autre image à corriger (ici l'exemple de juillet 1992) .....	52
2.4 Limites des classes et fréquences pour l'exemple du calcul du 90 <sup>ième</sup> percentile de 1986 .....	59
4.1 Temps d'ensoleillement total des images .....	80
4.2 Municipalités dont plus de 10% de leur superficie possèdent des températures supérieures à 32°C (cf. fig. 4.16 p. 101, chiffres en %) .....	102

## LISTE DES ACRONYMES

ACP	Analyse en composantes principales
ASTER	<i>Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
AVHRR	<i>Advanced very high resolution radiometer</i>
BLUHI	<i>Boundary layer urban heat island</i>
CCT	Centre canadien de télédétection
CLUHI	<i>Canopy layer urban heat island</i>
CMM	Communauté métropolitaine de Montréal
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
CREL	Conseil régional de l'environnement de Laval
CREM	Conseil régional de l'environnement de Montréal
DAI	<i>Data Access Interface</i>
DSP	Direction de la santé publique
ERS	<i>European earth resource satellite</i>
ETM+	<i>Enhanced thematic mapper plus</i>
GCM	<i>Global climatic model</i>
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat
GMT	<i>Greenwich mean time</i>
ICU	Ilot de chaleur urbain
IGBP	<i>International geosphere-biosphere program</i>
IHDP	<i>International human dimensions programme on global environmental change</i>
IPCC	<i>Intergovernmental panel on climate change</i>
ISQ	Institut de la statistique du Québec
LST	<i>Land surface temperature</i>
LTAP	<i>Long-term acquisition plan</i>
LUCC	<i>Land use and land cover change</i>
MAMM	Ministère des affaires municipales de la métropole

MODIS	<i>MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	National aeronautics and space administration
NDBaI	<i>Normalized Difference Bareness Index</i>
NDBI	<i>Normalized Difference Build-up Index</i>
NDVI	<i>Normalized difference vegetation index</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>
NOAA	<i>National Oceanic &amp; Atmospheric Administration</i>
OMM	Organisation mondiale de la météorologie
RCM	<i>Regional climatic model</i>
REM	Rayonnement électromagnétique
RMS	<i>Root Mean Square Error</i>
SLC	Scan line corrector
SAR	<i>Synthetic aperture radar</i>
SD	Standard Deviation (Écart type)
SIG	Système d'information géographique
SUHI	<i>Surface urban heat island</i>
TIR	<i>Thermal infrared</i>
TM	<i>Thematic mapper</i>
Tmin/Tmax	Température minimale / Température maximale quotidienne

## RÉSUMÉ

Le changement climatique en cours et à venir, qui se traduit au Canada comme dans la plupart des régions du monde par un climat plus chaud, peut être parfois amplifié en fonction des conditions de surface et notamment dans les zones urbanisées durant la saison estivale. Compte tenu que la moitié de l'humanité vit désormais en ville, l'urbanisation est un enjeu dans le réchauffement global. La grande métropole de Montréal au sud du Québec est une région soumise à une urbanisation propice à la formation d'îlots de chaleur urbains (ICU) qui ont une influence sur le climat régional. La présente étude analyse durant des périodes estivales l'évolution du comportement thermique de Montréal au cours des 20 dernières années (1984-2005), afin d'en dresser le bilan à l'aide d'une série d'images satellites Landsat 5 TM. Suite au traitement de dix images Landsat 5, la localisation et l'amplitude des ICU sur le territoire ont été établies. Les secteurs fortement minéralisés et/ou végétalisés ont été identifiés en explorant la relation entre les températures de surface et l'indice de végétation *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Ainsi on a pu constater que certaines municipalités et/ou arrondissements (ou portions du territoire) présentent des bilans thermiques de surface forts différents. Certains ont vu leur couvert végétal disparaître peu à peu à l'instar de nouvelles constructions, faisant croître la superficie au sol et l'intensité des ICU. D'autres ont en revanche concilié urbanisme et environnement en maintenant les espaces verts, ce qui a limité voire diminué la chaleur à certains endroits. Les résultats montrent aussi que les îlots de chaleur se sont amplifiés au cours des décennies quelque soit le mois ou l'année, en particulier dans la moitié sud-ouest de l'île de Montréal. Ce comportement thermique résulte donc d'une distribution des surfaces végétalisées versus non (ou peu) végétalisées. Dans cette recherche nous démontrons que la corrélation entre ces températures de surface et le NDVI est très forte avec un gradient allant de températures fraîches pour les zones vertes vers des valeurs beaucoup plus chaudes pour les secteurs minéralisés.

### **Mots-clés :**

Îlot de chaleur urbain, télédétection, infrarouge thermique, comportement thermique, indice de végétation NDVI, analyse en composante principale.

## **ABSTRACT**

Undergoing climatic changes, which manifest themselves by a general increase in temperature in Canada as well as most of the planet, can be exacerbated by surface conditions, especially in urban areas during the summer season. Seeing that over half of mankind lives in cities, urbanization has become a fundamental issue in global warming. The metropolitan area of Montreal located in southern Quebec is an example of a region that has been subjected to both climatic upsets as well as a high level of urbanization. The combination of the two factors results in an environment that is favourable to Urban Heat Islands (UHI) which in turn have an effect on the regional climate as well as the surrounding environment. This current study consists of an analysis of Montreal's summer thermal behaviour over the last twenty years (1984-2005) through the processing of Landsat 5 TM images. Results were used to localise and identify the intensity of UHI in this case study. Heavily mineralized and/or vegetated sectors have been recognized by employing a quantitative approach in exploring the relationship between temperature and several indices, including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). We notice that certain municipalities and/or districts differ greatly in terms of thermal dynamics. Some have seen their vegetal covering slowly but surely disappear after the construction of new developments thus leading to a higher ground surface area and more intense UHI. Others, to the contrary, have conciliated urbanization and environment by preserving green areas and have been able to limit or even reduce heat in certain areas. Our results show that UHI have intensified over the last two decades regardless of the month or year, especially in the south-west region of the island of Montreal. Thermal behaviour is therefore a result of the distribution of vegetated versus non vegetated (or very little) surfaces. Within this research, we conclude that a strong positive correlation exists between NDVI and surface temperatures.

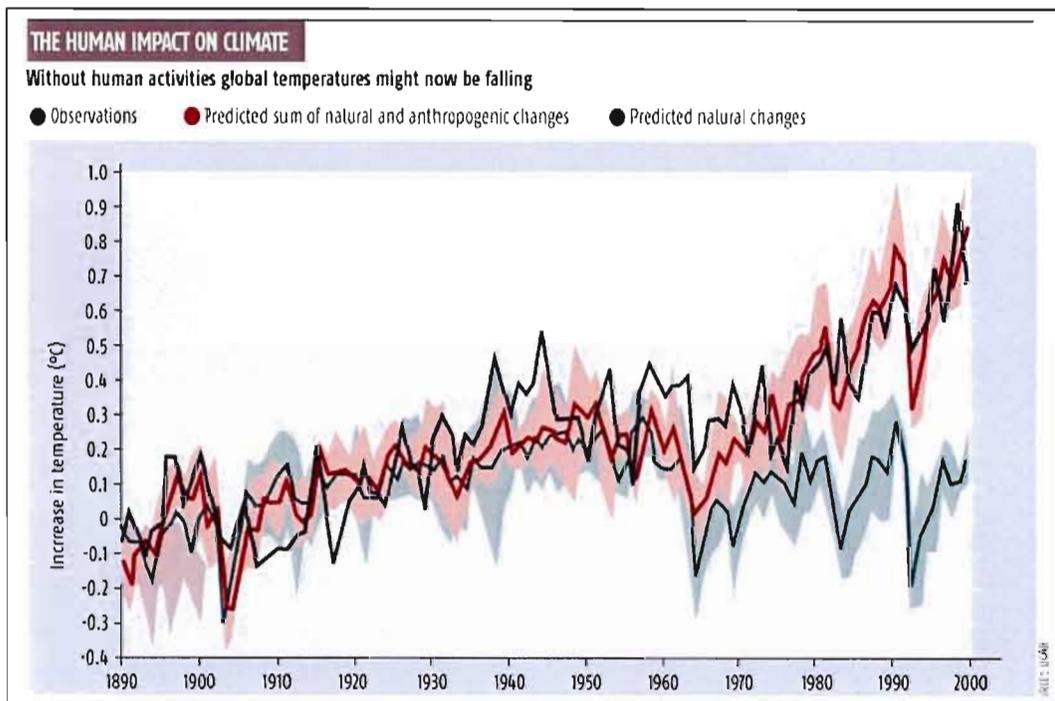
### **Keywords:**

Urban heat island, remote sensing, thermal infrared, thermal dynamic, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Principal Component Analysis (PCA).

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis le début de l'ère industrielle, la hausse des températures annuelles de l'air près de la surface est en partie le résultat de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) et des aérosols dans l'atmosphère, due aux activités humaines (Organisation Mondiale de la Météorologie, i.e. OMM, 2002). En effet, à l'échelle globale, comme le suggère la figure 1.0, la forte industrialisation qui s'est traduite par d'importants rejets de GES (avec une augmentation de 31% entre 1750 et 2000, cf. IPCC, The Scientist Basis, 2001), a été une des principales causes de la hausse de 0,6°C depuis 1890 à travers le monde.

Au cours du dernier siècle, deux périodes de réchauffement marqué ont été observées entre 1910-1945 et surtout entre 1976-2000 (Mann, 2002), comme le suggère la figure 1.0. Il s'agit d'une comparaison de l'évolution des températures avec et sans l'impact des activités humaines. Le 20<sup>ème</sup> siècle ayant enregistré les plus fortes températures depuis 1000 ans (Alverson et *al.*, 2001), les années 1990 ayant constituées la décennie la plus chaude, et 1998 l'année la plus chaude du siècle. C'est ainsi qu'au cours des quatre dernières décennies, la cryosphère a diminué en superficie de 10% environ par rapport aux années 1960 (deMenocal, 2001). Dans le même temps, on a enregistré une hausse de 0,5 à 1% par décennie des précipitations totales et une augmentation du niveau de la mer de 0,1 à 0,2 m.



**Figure 1.0** Anomalies interannuelles des températures moyennes de l'air à la surface du globe, avec l'impact des activités humaines traduites principalement par l'augmentation des gaz à effet de serre, et évolution des températures sans l'impact des activités humaines (depuis 1890 à 2000, par rapport à la période 1961-1990).

Source: *The World's Magazine* (2005).

Sur le territoire canadien, pour la période 1950 à 2003, on a enregistré une diminution du nombre des nuits les plus froides et des journées fraîches ainsi que des jours de gel, traduisant une hausse des températures (Vincent et Mekis, 2006). D'autres études révèlent également pour la même période une augmentation de la fréquence du nombre de jours dont des températures minimales (apparaissant le plus souvent aux dernières heures de la nuit) les plus élevées, et des journées estivales particulièrement chaudes (Bonsal et al., 2001). Entre 1900 et 2003, l'ouest du pays a connu une diminution de la variabilité des températures quotidiennes moyennes, alors qu'une baisse de l'amplitude thermique quotidienne a été observée dans le sud (Vincent et Mekis, 2006). Dans la partie méridionale du pays, une autre étude a révélé une hausse des températures moyennes annuelles de 0,5 à 1,5°C de 1990 à 1998, mais également une hausse des précipitations de 5 à 35% par rapport à la période 1950-1998 (Zhang et al., 2000). Le climat au pays s'est donc graduellement réchauffé avec une augmentation concomitante des précipitations dans la plupart des régions. Cependant, durant

les six dernières décennies dans le sud du Québec, les quantiles élevés des températures maximales ont le plus souvent diminué en été alors que les extrêmes chauds des températures minimales ont augmenté de façon significative (cf. Gachon et *al.*, 2005; Khaliq et *al.*, 2007). Les étés dans le sud du Québec ont donc été plus chauds en raison surtout de l'accroissement des températures de nuit (i.e augmentation des températures minimales), plutôt qu'en raison de l'augmentation de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur durant la journée.

D'après le *troisième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (GIEC - <http://www.ipcc.ch>, 2001), les changements récents et à venir de température seront de plus grande ampleur dans les zones à climat tempéré et polaire que dans les régions plus proches des tropiques, où les variations à l'échelle interannuelle et décennale sont par nature beaucoup plus faibles. Un processus de boucle de rétroaction positive<sup>1</sup> est responsable d'une amplification du réchauffement dans les latitudes de l'hémisphère Nord soumises à un enneigement saisonnier, en particulier au Canada. En effet, des températures plus chaudes font fondre la neige laissant apparaître davantage de surfaces déneigées susceptibles d'emmagasiner la chaleur et ainsi accentuer le réchauffement de l'air près de la surface.

Au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, les projections issues des modèles climatiques globaux suggèrent que la température moyenne annuelle à l'échelle planétaire pourrait augmenter de 1,4 à 5,8°C entre 1990 et 2100 (IPCC, 2001). En raison de sa latitude nordique et de l'ampleur de sa masse continentale, le Canada devrait connaître des taux de réchauffement supérieurs à la plupart des autres régions continentales de l'hémisphère Nord, qui pourraient atteindre selon certains endroits, plus du double de la moyenne hémisphérique, notamment en hiver et dans une moindre mesure en été. Or, durant cette dernière saison, les températures diurnes les plus chaudes sont parfois supérieures à 30°C dans les zones urbaines comme la Communauté Métropolitaine de Montréal (CMM), et on s'attend à ce qu'une élévation de la température estivale de l'air entraîne une augmentation de l'intensité des vagues de chaleur (McMichael et *al.*, 1996). Des simulations réalisées avec un modèle climatique global (GCM) et un

---

<sup>1</sup> Le mécanisme d'interaction entre des processus au sein du *système climatique* est intitulé rétroaction climatique lorsque le résultat d'un processus initial déclenche des changements dans un second processus, lequel, à son tour, influe sur le processus initial. Une rétroaction positive renforce le processus initial, et une rétroaction négative le réduit (IPCC, 2001).

modèle climatique régional (RCM), révèlent une hausse de la fréquence des vagues de chaleur extrême pendant le 21<sup>e</sup> siècle (Kharin et Zwiers, 2000; Bell et *al.*, 2004, respectivement). Ceci pourrait avoir un effet significatif sur la santé publique et les activités socio-économiques au niveau régional en été.

Les épisodes de chaleur extrême nécessitent une adaptation physiologique dépassant parfois les capacités d'accoutumance de certains groupes les plus vulnérables, par exemple les enfants en bas âge, les personnes âgées et les personnes avec une santé déjà fragile. Les vagues de chaleur ont, en général, des effets plus graves dans les centres urbains dont la densité du bâti est plus élevée que dans les banlieues ou les régions rurales, en raison de l'exacerbation de l'intensité et de la durée de la vague de chaleur via d'une part, le phénomène des « **îlots thermiques urbains** », et d'autre part, selon le degré de pollution atmosphérique généralement supérieur dans les villes qu'à la campagne. De tels événements climatiques extrêmes sont de plus en plus étudiés du fait de l'augmentation potentielle de leur fréquence et de leur intensité.

Citons par exemple la canicule particulièrement tragique de l'été 2003 en Europe.

*<sup>2</sup> « Des températures maximales de 35 à 40°C ont été enregistrées régulièrement en juillet 2003, et dans une moindre mesure, en août dans la plupart des pays d'Europe méridionale et centrale, d'Allemagne jusqu'en Turquie. Cette situation est également singulière par sa durée (plus de 20 jours) pendant laquelle l'air très chaud et sec est venu de la Méditerranée. En plus des impacts sans précédent enregistrés sur l'agriculture, la sylviculture ou encore la perte de masse des glaciers alpins, le bilan humain a été le plus fatal en 50 ans. Avec une estimation de plus de 30 000 morts, la canicule<sup>3</sup> de l'année 2003 est l'une des dix catastrophes naturelles les plus graves en Europe pendant les cent dernières années. Les personnes âgées en furent les principales victimes. »*

---

<sup>2</sup> Programme des Nations Unies pour l'Environnement, pré alerte sur les menaces environnementales, impact de la canicule 2003 en Europe (<http://www.grid.unep.ch/>)

<sup>3</sup> On parle de canicule dès lors qu'un organisme non habitué, éprouve de l'inconfort devant des températures inhabituellement élevées.

Les îlots de chaleur urbains résultent de conditions météorologiques particulières liées ou non aux vagues de chaleur estivale, qui sont accentuées par des facteurs spécifiques locaux liés à la densité de milieux bâtis et à l'absence de zones vertes ou ombragées. Il s'agit très certainement de la manifestation climatologique la plus évidente provoquée par l'urbanisation, dont la résultante est l'augmentation de la température locale (Guay et Baudouin, 2005).

Compte tenu du fait que la population urbaine a été multipliée par 20 au cours du 20<sup>e</sup> siècle alors que la population mondiale quadruplait dans le même temps, les zones urbaines abritent aujourd'hui environ trois milliards de personnes, avec un ajout de 20 millions d'individus chaque année. Le nombre de métropoles de plus de dix millions d'habitants est passé de deux dans les années 1950, à 21 à la fin du 20<sup>ième</sup> siècle; pendant le même temps une vingtaine d'agglomérations ont vu leur population s'accroître de cinq à dix millions d'habitants et plus de 250 villes ont atteint de un à cinq millions de personnes. Ces concentrations de zones d'habitations se constituent très rapidement en Amérique latine, en Afrique et en Extrême-orient, alors que 80% de la population vit en zone urbaine dans les pays développés (Dictionnaire Multimédia du Développement Durable, 2006; [www.planeteecologie.org](http://www.planeteecologie.org)). Les populations sont donc de plus en plus concentrées dans les zones urbaines, et la récente vague de chaleur de 2003 en Europe a rappelé à quel point les schémas d'aménagement et le système de santé en général devaient tenir compte des changements actuels et à venir dans la fréquence, l'intensité et la durée des vagues de chaleur estivale.

L'agglomération de Montréal a également connu un accroissement démographique au cours des dernières décennies. Elle se retrouve elle aussi plus vulnérable que par le passé face à ces événements climatiques, via entre autres, la modification majeure du type d'occupation du sol. La population de l'agglomération de Montréal qui accroit, impose une restructuration du bâti et une diminution progressive des espaces verts au sein de la zone urbaine. La région est passée de 1,7 million à 1,8 million d'habitants entre 1981 et 2001, soit 2,1% de taux d'accroissement en 20 ans (DSP, 2003). Plus de 80% de la surface de son territoire sont désormais bâtis ou asphaltés (CREM, 2006), ce qui constitue des facteurs propices à la formation d'îlots de chaleur urbains. Parmi les caractéristiques physiques qui affectent le

climat d'une ville, en dehors de la localisation géographique proprement dite de cette dernière, la densité du bâti, la hauteur des immeubles, l'orientation et la pente des rues, la position et la superficie des espaces verts ou encore la nature des matériaux avec lesquels les bâtiments sont construits sont autant de facteurs qui influencent le climat urbain (Givoni, 1992). Les modifications du type d'occupation du sol à travers notamment l'industrialisation et l'augmentation du nombre de véhicules ainsi que de la superficie routière, contribuent également à une augmentation de la pollution de l'air et à une dégradation de la qualité environnementale.

La zone d'étude correspond à l'île de Montréal et une grande partie de la Communauté Métropolitaine de Montréal (CMM). L'île compte donc près de deux millions d'habitants sur une superficie de 500 km<sup>2</sup>, soit le quart de la population du Québec (densité de 3 625 h/km<sup>2</sup>). La CMM compte quant à elle 3,5 millions de personnes (ISQ et MAMM, 2003).

## Objectif de l'étude

Face aux nouvelles réalités démographique et climatique, la direction de la santé publique (DSP) de Montréal a développé, en partenariat avec d'autres institutions, des programmes de prévention des impacts des vagues de chaleur, ainsi qu'un programme d'avis ou d'alerte de chaleur accablante sur le territoire montréalais (DSP, 2004), afin de prévenir l'exposition dommageable des populations face à ces événements extrêmes <sup>4</sup>.

*« On reconnaît de plus en plus que les vagues de chaleur sont une source de morbidité et de mortalité chez les résidents des villes en zone de climat tempéré, comme celui de Montréal. La chaleur a non seulement des effets directs sur la santé, comme l'épuisement et le coup de chaleur mais, plus important encore, elle a des effets indirects, comme la mortalité par maladie cardiovasculaire chez des personnes déjà atteintes de maladies chroniques. De plus, d'autres groupes de la population courent aussi plus de risques de souffrir de problèmes de santé liés à la chaleur, soit les personnes âgées, les jeunes enfants ou les personnes vivant seules sans réseau de soutien. Également, avec la fréquence accrue des vagues de chaleur due au réchauffement planétaire, ce problème de santé publique ira dans les années futures en augmentant».*<sup>5</sup>

Ce programme de la DSP a pour but de contribuer à une meilleure compréhension des caractéristiques climatiques des îlots thermiques. **L'objectif du projet s'inscrit donc dans ce contexte et consiste à développer une approche souple, économique et applicable à d'autres villes, permettant d'identifier sur une base récurrente, des secteurs vulnérables à la chaleur intense sur le territoire de la CMM, de manière à faciliter la mise en place de stratégies d'intervention lors de canicules.**

---

<sup>4</sup> En 2004, Environnement Canada, la DSP Montréal Centre et le bureau de la Sécurité civile de la ville de Montréal ont défini le terme de vague de chaleur selon les critères météorologiques suivants; Tmax d'au moins 33°C, Tmin de nuit d'au moins 20°C, et ce sur une durée minimale de trois jours consécutifs.

<sup>5</sup> Régie régionale de la santé et des services sociaux de Montréal centre – “*Quand il fait chaud pour mourir*”, Communiqué c2069, 3 juillet 2002, Montréal.

La présente étude fait donc partie intégrante de ce grand projet proposé par la DSP de Montréal et par le département de Géographie de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et financé par plusieurs organismes comme le FACC (Fonds d'Action pour le Changement Climatique), le CREL (Conseil Régional pour l'Environnement de Laval), la CMM, l'UDM et Ouranos. Elle a pour objectifs spécifiques d'extraire les températures de surface au-dessus de la CMM, reconstituées à partir des données thermiques de Landsat 5 TM et d'analyser leur variation spatiale. Elle devra aussi faire les liens entre leur évolution interannuelle et celle des types d'occupation du sol - principalement des espaces verts, par l'intermédiaire d'un indice de végétation, le NDVI. Ainsi, l'intégration et le traitement de différentes sources de données (images satellites, photographies aériennes ou de terrain) devrait améliorer notre connaissance sur l'occurrence et l'ampleur des îlots de chaleur urbains.

## Hypothèse

La présente étude repose sur l'hypothèse que le comportement thermique de Montréal est en partie fonction de l'évolution du type d'occupation du sol, et notamment des pertes ou des gains des espaces verts.

Si l'hypothèse se vérifie, il serait possible par des politiques d'aménagement, de contrer le phénomène en remplaçant les surfaces foncées des toits et les secteurs asphaltés par des surfaces claires et réfléchissantes, ou encore en augmentant la quantité de surfaces végétalisées.

C'est à Montréal, en 1971 qu'une des premières comparaisons urbain - rural a été faite en étudiant les flux de radiation de nuit (Oke, 1971). De nombreuses autres études ont prouvé qu'il existait également un lien entre les îlots de chaleur, néfastes à la santé publique et le changement dans l'occupation du sol (Karaca *et al.*, 1995; Figuerola et Mazzeo, 1998). Est-ce qu'une information fragmentaire et discontinue recueillie sur une période d'environ 20 ans par les images satellites, permettrait d'établir ce lien de cause à effet pour la CMM? Nous supposons aussi que les modifications du comportement thermique situent davantage les secteurs où la température se serait dégradée ou encore améliorée. En d'autres termes, est-il possible de maîtriser les îlots de chaleur urbains par le biais de politiques d'aménagement qui viseraient à faire diminuer la température au-dessus des villes.

Dans la suite, l'état des connaissances sur la compréhension de la dynamique thermique d'une ville sera tout d'abord présenté, suivi dans le deuxième chapitre de la présentation de la méthodologie. Les résultats détaillés sont exposés et analysés dans le chapitre III. La dernière partie présente une discussion et une conclusion générale de l'étude.

# CHAPITRE I

## L'ÉTAT DES CONNAISSANCES

### 1.1 Introduction

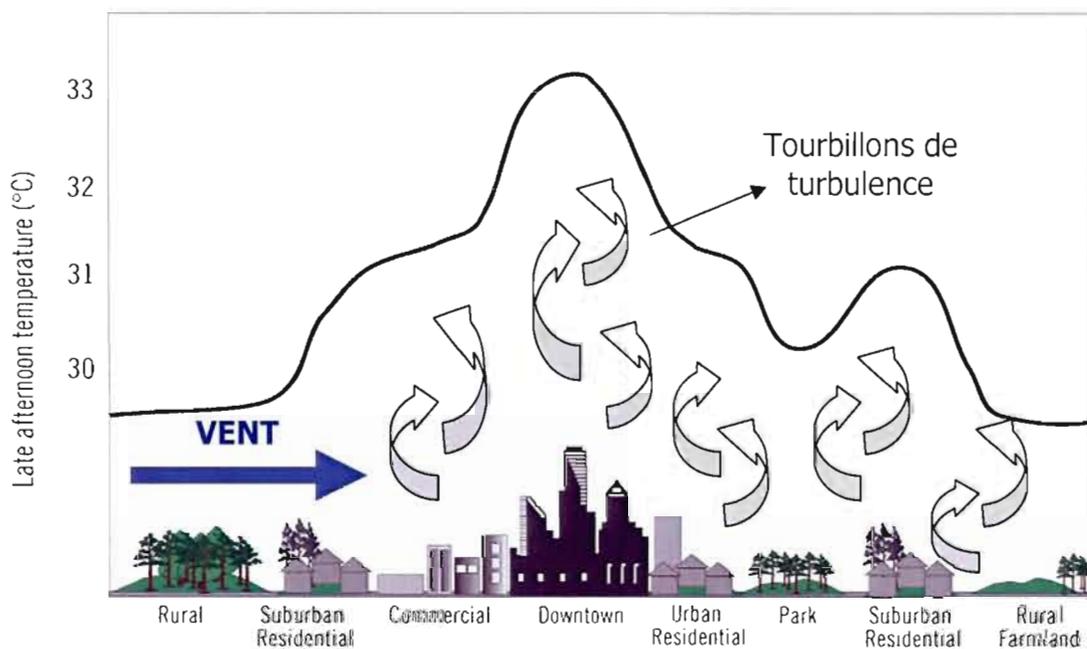
Ce premier chapitre présente une synthèse des connaissances scientifiques acquises à propos du phénomène des îlots de chaleur urbains. Elle analyse les principales caractéristiques de ces derniers, leur évolution dans le contexte de la variabilité du climat, leur influence sur l'environnement et la santé publique, et les solutions proposées pour remédier au phénomène. Par la suite, les différents moyens de détection et l'utilisation des données satellitaires à l'aide de capteurs infrarouges thermiques sont présentés.

### 1.2 Les îlots de chaleur urbains (ICU)

#### 1.2.1 Terminologie

Le terme « *îlot* » correspond à une superficie possédant ses caractéristiques propres par rapport à l'espace environnant et se distingue notamment par une température de surface plus élevée par temps ensoleillé et par vent faible. Il est possible d'étudier les îlots thermiques par rapport à leur intensité ou à leur durée ou par rapport aux impacts sur les secteurs socio-économiques (Beniston et Stephenson, 2004). L'îlot de chaleur urbain (ICU) est aussi défini comme une zone urbanisée caractérisée par des températures estivales de l'air plus élevées que l'environnement immédiat, avec des différences qui varient selon les auteurs entre 5 à 10°C (Heat Island Group, 2004).

La figure 1.1 montre les caractéristiques thermiques typiques d'une ville nord-américaine en fin d'après-midi en été. Il apparaît clairement une distribution en forme de dôme où des écarts de température sont ici de  $+3^{\circ}\text{C}$  entre les zones urbaines et les zones rurales. Le centre-ville est dominé par l'îlot de chaleur alors que les banlieues possèdent des températures plus fraîches à cause des différents matériaux de surface.



**Figure 1.1** Profil d'un îlot de chaleur urbain d'une ville nord-américaine en été. La courbe indique les températures de surface en degrés Celsius.

Source: <http://www.adaptation.nrcan.gc.ca>

Les études sur le climat urbain se penchent depuis longtemps sur ces différences observées pour les températures de l'air ambiant entre les villes et leurs régions rurales aux alentours, qui respectivement décrivent les effets d'un îlot thermique (Landsberg, 1981). Les interactions entre l'atmosphère et la biosphère ainsi que les changements d'occupation du sol,

modifient non seulement les quantités physiques comme les indices de végétation et de biomasse, mais aussi les propriétés thermiques (Huth et *al.*, 2000; Sparks et *al.*, 2002; Shabbar et Bonsal, 2003; Barrow et *al.*, 2004).

La formation des ICU est liée aux caractéristiques particulières des villes. Certains facteurs sont néanmoins communs à tous (Taha et *al.*, 2000) :

- Les matériaux sombres qui augmentent le stockage de chaleur sensible de la ville pendant la journée, réémettent cette chaleur après le coucher du soleil;
- L'effet de serre contribue à augmenter la rétention du rayonnement émis par la surface de la Terre notamment lorsque l'atmosphère urbaine est polluée;
- Dégagement de chaleur sensible, c'est-à-dire une chaleur emmagasinée par les bâtiments et le sol puis transférée vers l'atmosphère. Chaleur latente<sup>6</sup> d'évaporation réduite en raison de faibles surfaces végétales et contenu en eau du sol réduit.

### 1.2.2 Formation et évolution spatio-temporelle des ICU

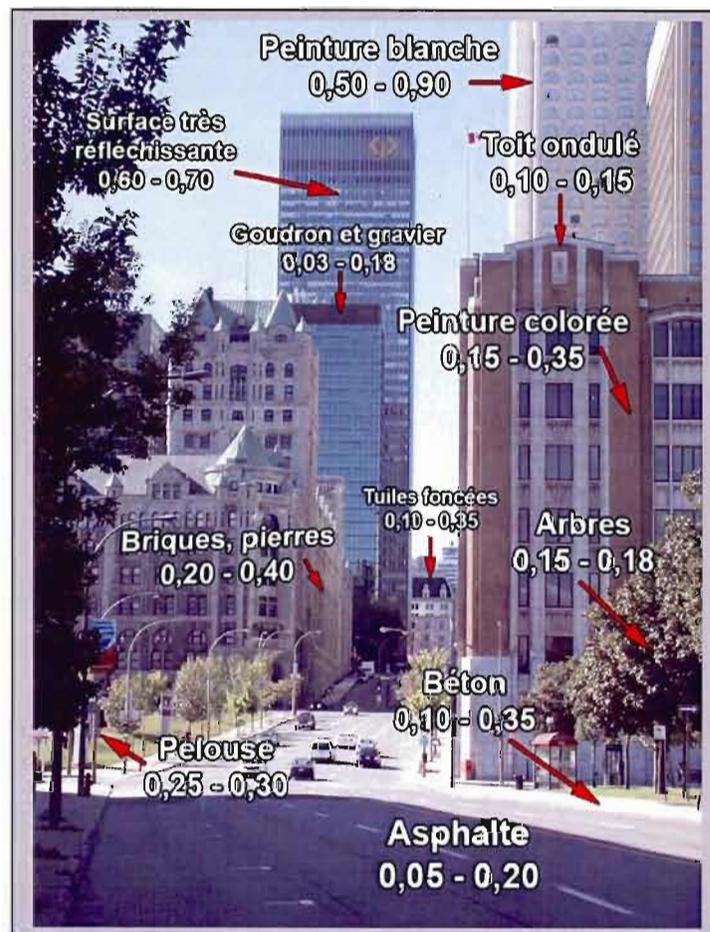
Les températures de surface dépendent des caractéristiques telles que la couleur, la texture, la porosité et l'état de surface (sol nu, présence d'eau ou non etc.) qui modifient la conductivité thermique et l'albédo. Selon sa texture, sa couleur et sa capacité d'absorption d'énergie solaire, une surface aura un albédo<sup>7</sup> plus ou moins propice à la formation d'ICU.

---

<sup>6</sup> La chaleur latente correspond à la quantité de chaleur nécessaire à l'unité de masse d'un corps pour qu'il change d'état à température et pression constantes. La chaleur sensible est la quantité de chaleur échangée sans transition de phase physique, entre deux corps formant un système isolé. (<http://www.techno-science.net>).

<sup>7</sup> L'albédo est le rapport entre l'énergie solaire réfléchiée par une surface par rapport à l'énergie solaire incidente pour la partie du spectre allant de 0,3 à 1 $\mu$ m (i.e. visible et proche infrarouge). On utilise une échelle graduée de 0 à 1 ; 0 correspondant au noir sans aucune réflexion, et 1 au miroir parfait sans absorption (*Earth and Space Research*, 2005, <http://www.esr.org>).

Pendant la journée, les sols secs et les surfaces sombres absorbent de grandes quantités de rayonnement solaire incident en raison d'un faible albédo. Ceux-ci se réchauffent intensément et plus rapidement alors que les surfaces humides ou plus claires conservent une température plus fraîche en raison d'un albédo plus élevé (fig. 1.2).



**Figure 1.2** Les différentes valeurs de l'albédo de surface dans un environnement urbain (ex. de Montréal) en été, échelonnées de 0 à 1.

Source: P. Martin, d'après les sources <http://www.ghcc.msfc.nasa.gov>

Le rayonnement solaire incident est d'autant plus absorbé par la surface et/ou le matériau que l'albédo est faible. Selon la conductivité thermique, cette énergie réchauffe le matériau qui restitue cette chaleur à l'air ambiant sous forme de chaleur sensible. La majorité de ce rayonnement est intercepté par les toits et les parois verticales, et une part relativement faible atteint le sol. Chaque corps émet un rayonnement électromagnétique qui dépend de sa température; c'est la loi de Stephan Boltzmann. Le bilan radiatif  $R_{net}$  (cf. équation 1) est la somme des flux incidents de courtes et de grandes longueurs d'onde absorbés par celle-ci, moins l'émission de grandes longueurs d'onde des surfaces (Ackerman et *al.*, 1992). Il est donné par l'équation suivante :

$$R = (K_b + K_d) * (1 - a) - K_l \uparrow + K_l \downarrow \quad (1)$$

où  $K_b$  est le rayonnement solaire (de 0,4 à 1  $\mu\text{m}$ ) direct à la surface de la terre,

$K_d$  est le rayonnement solaire diffus à la surface de la terre,

$a$  est l'albédo moyen de la ville (réflectivité moyenne de courtes longueurs d'onde),

$K_l \uparrow$  est le rayonnement de grandes longueurs d'onde (de 5 à 80  $\mu\text{m}$ ) émis par la ville, et

$K_l \downarrow$  est le rayonnement de grandes longueurs d'onde absorbé par la ville.

Le niveau et la durée d'ensoleillement peuvent être réduits en milieu urbain via les effets d'ombre portée par le tissu urbain, ainsi que par l'absorption et la diffusion dans l'atmosphère dues à la pollution. Cette dernière limite l'énergie solaire incidente et augmente la diffusion dans la basse atmosphère (Earth and Space Research, 2005, ([www.esr.org](http://www.esr.org))). Les courtes longueurs d'onde sont plus affectées par cette diffusion que les autres (ultraviolets et début du spectre visible).

Le bilan d'énergie selon Jacob (1999) suit la loi de conservation de l'énergie. Une partie de l'énergie nette qui arrive à la surface sert à réchauffer le sol par conduction, une autre à l'évaporation de l'eau, une autre à modifier l'atmosphère par convection, une dernière partie, minime par rapport aux autres, sert les mécanismes photochimiques de l'assimilation chlorophyllienne chez les végétaux. Le bilan d'énergie des surfaces naturelles s'exprime par :

Le bilan d'énergie (cf. équation 2):

$$\mathbf{Rn = G + H + LE + J} \quad (2)$$

où Rn est le rayonnement net ( $\text{Wm}^{-2}$ ),

G est la quantité d'énergie utilisée pour la conduction de la chaleur dans le sol ( $\text{Wm}^{-2}$ ),

H est le flux de chaleur sensible ( $\text{Wm}^{-2}$ ),

LE est le flux de chaleur latente ( $\text{Wm}^{-2}$ ), et

J est le stockage de l'énergie par la végétation pour assurer l'activité photosynthétique ( $\text{Wm}^{-2}$ ).

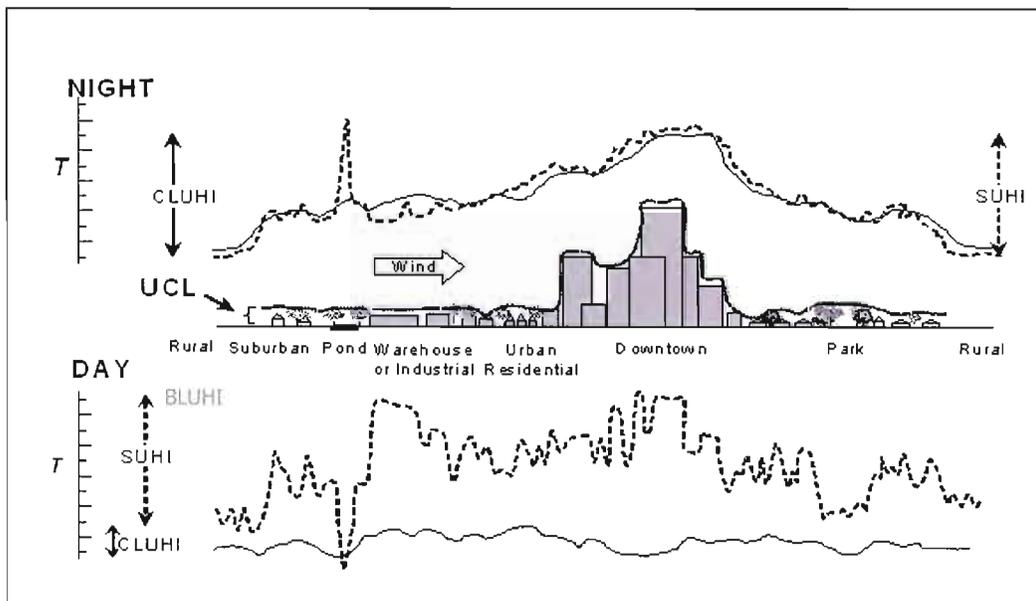
L'écart thermique entre les zones urbaines et les zones rurales est maximal une heure avant le lever du soleil et minimal lorsque le soleil est au zénith. Les îlots des villes se distinguent donc plus particulièrement des campagnes environnantes durant une nuit sans vent (trois ou cinq heures après le coucher de soleil) quand les zones urbaines transmettent à l'atmosphère l'énergie emmagasinée par les routes et les bâtiments la journée (Santamouris et *al.*, 2001).

Il existe trois sortes d'îlots d'après Voogt, 2004;

- Les îlots de chaleur au-dessus de la canopée, c'est-à-dire situés à la cime des arbres et des immeubles (*canopy layer urban heat island*, CLUHI);
- Les îlots de chaleur dans la couche limite atmosphérique (*boundary layer urban heat island*, BLUHI);
- Les îlots de chaleur de surface (*surface urban heat island*, SUHI).

Les deux premiers types d'îlots traduisent un réchauffement de l'atmosphère au-dessus de la surface. Quant à la troisième catégorie, il s'agit d'un réchauffement proprement dit de la surface (cf. fig. 1.3). La couche urbaine de la canopée (CLUHI) est la couche d'air la plus proche de la surface des villes. Au-dessus de celle-ci il y a la couche limite ou « *dôme urbain* », qui varie de 1 km d'épaisseur pendant la journée à quelques centaines de mètres pendant la nuit (Voogt, 2004); c'est la couche atmosphérique dans laquelle l'écoulement est

modifié par la turbulence (flux turbulents de chaleur sensible et latente, et frottements avec la surface). La couche limite est celle dans laquelle l'écoulement est non géostrophique et influencé par le frottement avec la surface et les flux turbulents de chaleur ou d'humidité (cf. fig. 1.1 et 1.4). Les ICU varient donc selon le moment de la journée. On mesure généralement les caractéristiques des couches supérieures des CLUHI et BLUHI à l'aide de radiosondes, tandis que l'on utilise plus facilement la télédétection pour analyser les différences dans les températures de surface.

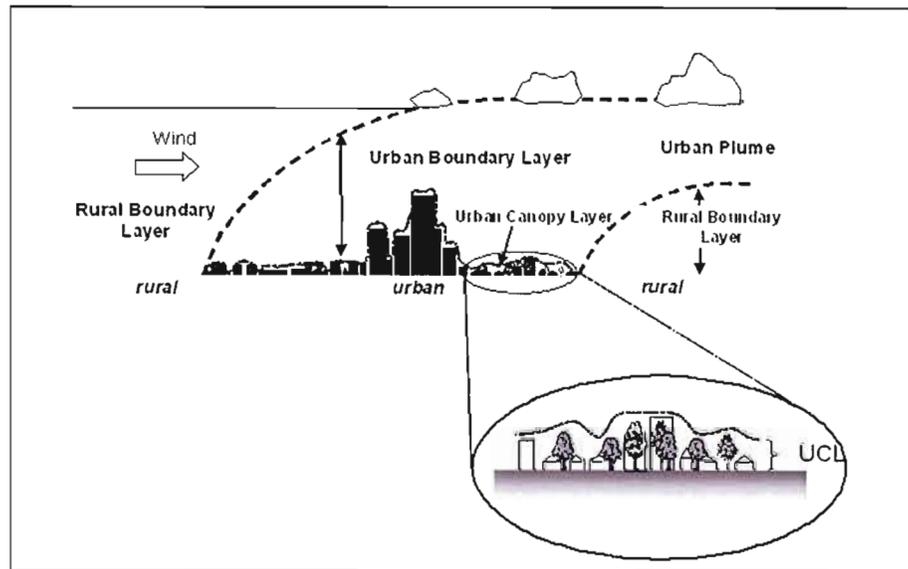


**Figure 1.3** Caractéristiques des îlots de chaleur.

CLUHI : îlot au-dessus de la canopée  
 BLUHI : îlot dans la couche limite  
 SUHI : îlot de surface

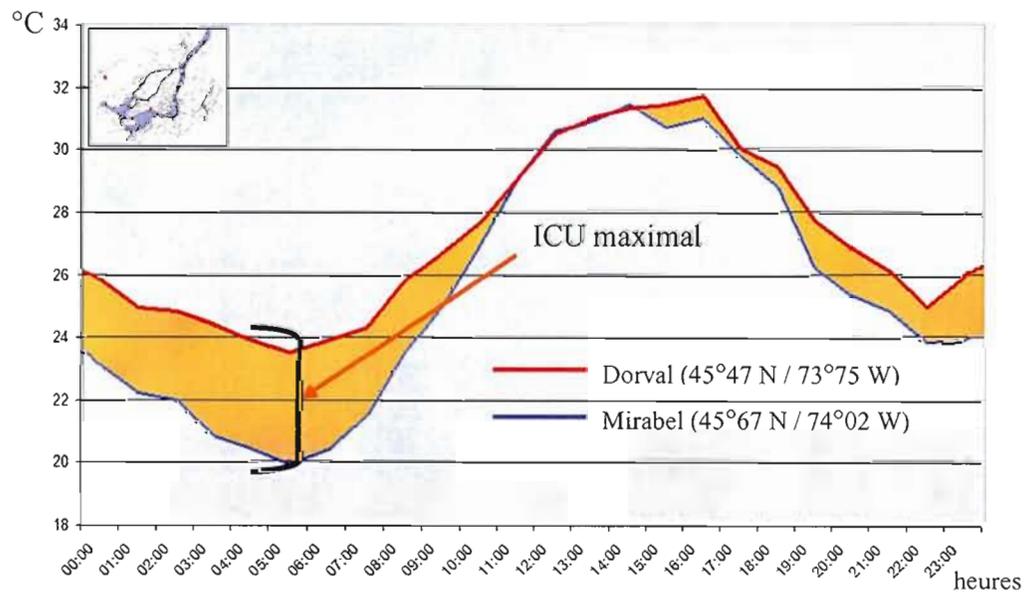
Source: Voogt, 2004

Les îlots de surface se distinguent mieux en dehors des périodes très chaudes de la journée lorsque la chaleur emmagasinée dans le sol est restituée dans l'atmosphère (cf. fig. 1.5).



**Figure 1.4** Description schématique de l'atmosphère urbaine.

Source: Voogt, 2004



**Figure 1.5** Écart thermique entre deux stations météorologiques le 13 août 2002. La station de Dorval située en zone urbaine et de Mirabel en zone rurale.

Données : Environnement Canada

### 1.2.3 La relation entre les îlots de chaleur et le changement climatique

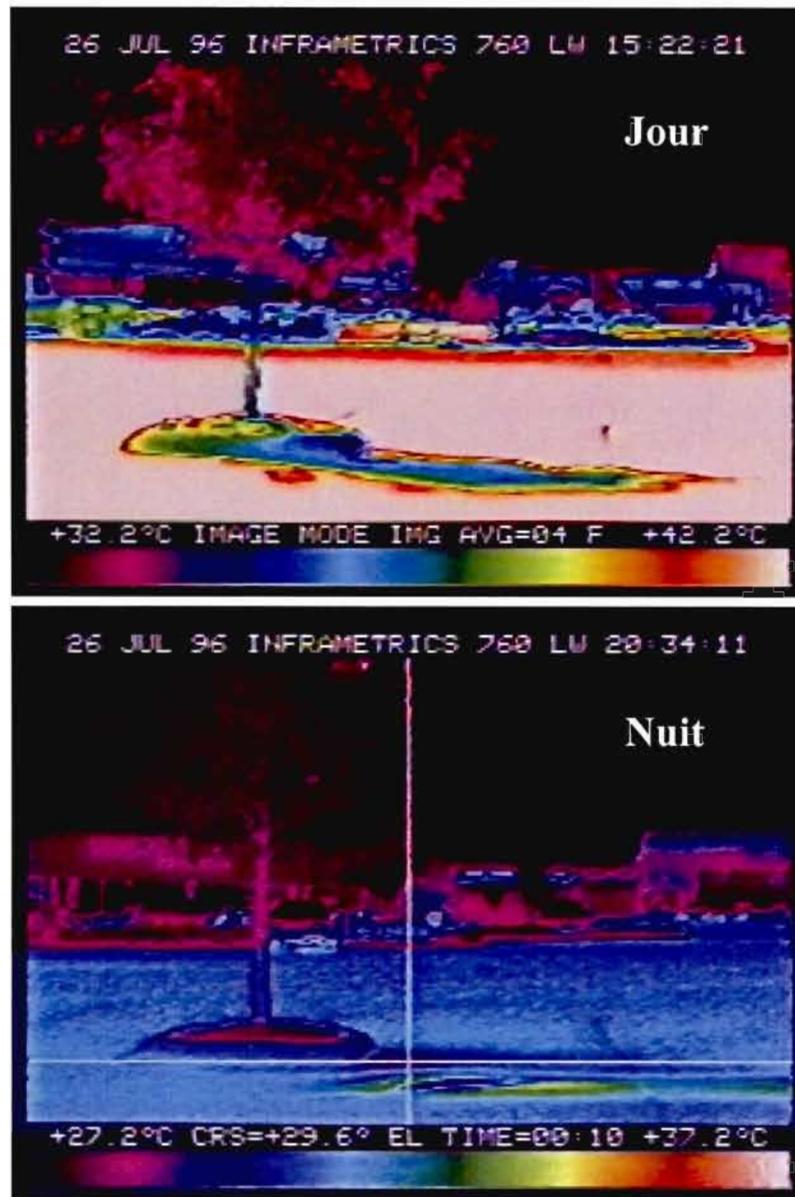
Les îlots thermiques contribuent au réchauffement global car ce sont certes des phénomènes à l'échelle locale, mais ils occupent tout de même une portion significative de la surface terrestre. Il existe des relations à des échelles urbaines, voire régionales :

1. Environ la moitié de la population mondiale est située dans une zone urbaine, et cette proportion devrait augmenter à 61% d'ici 2030, soit près de cinq milliards d'individus (*Food and Agriculture Organization*, 2002 - <http://www.fao.org>). Ceci signifie une demande accrue en énergie nécessaire à l'alimentation des services publics et privés d'une ville, et davantage de personnes exposées à des troubles liés au smog et aux effets des chaleurs accablantes;
2. Les fortes températures au sein d'une ville nécessitent plus d'air climatisé pour les citoyens, contribuant à augmenter les émissions de GES dans l'atmosphère favorables au réchauffement;
3. La plupart des GES qui contribuent au changement global du climat proviennent des zones urbaines et de leurs industries. Ces émissions contribuent également à des modifications du temps et du climat à des échelles locales et régionales (GIEC, 2001).

#### 1.2.4 Les rapports entre les températures de surface et la couverture végétale

Les espaces verts offrent non seulement beaucoup d'ombrage, mais captent aussi une part non négligeable de la chaleur et contribuent ainsi de manière significative à la diminution de la climatisation des bâtiments. L'évapotranspiration qui correspond à la perte d'eau du feuillage ou des racines, participe directement à la baisse des températures de l'air (cf. fig. 1.6) par l'absorption de chaleur latente. Un jour d'été, on estime qu'un grand arbre évapore jusqu'à 1 460 litres d'eau (Hanson et *al.*, 1991). La présence d'arbres favorise donc la formation de zones plus fraîches dans l'environnement urbain et contribue à la réduction de l'effet de serre. Cependant, les arbres limitent les flux radiatifs solaires incidents et le refroidissement nocturne du bâti en limitant les pertes thermiques de surface.

La télédétection des ICU se sert de l'indice normalisé de différence de végétation (**NDVI**; *Normalized Difference Vegetation Index*) comme indicateur de présence ou d'absence végétale afin d'estimer la relation entre la végétation et les températures de surface (*Land surface Temperature*; **LST**). Cette relation a été largement étudiée et documentée car la variabilité spatiale des LST est fortement corrélée de façon négative avec celle du NDVI (Cox et *al.*, 2005). Ces variations sont responsables d'une partie du comportement thermique des ICU. La combinaison des LST et de l'indice NDVI traduit une forte corrélation (Carson et *al.*, 1994; Gillies et Carlson, 1995; Gillies et *al.*, 1997) que l'on retrouve aussi avec celle des conditions d'humidité du sol (Carson et *al.*, 1994 ; Gillies et Carlson, 1995; Gillies et *al.*, 1997; Goward et *al.*, 2002) et l'évapotranspiration de surface (Boegh et *al.*, 1998). Plusieurs méthodes ont été développées afin d'interpréter ce rapport NDVI / LST dont celle de la triangulation utilisant des fonctions de transfert entre le sol, la végétation et l'atmosphère (Carson et *al.*, 1994; Gillies et Carlson, 1995; Gillies et *al.*, 1997).



**Figure 1.6** Exemple d'image infrarouge d'un arbre grâce à une caméra thermique par la NASA; différence entre la nuit et le jour.

Source: <http://science.nasa.gov>

Les différents travaux de recherche sur les températures de surface ont aussi montré que la répartition des flux de chaleur latente et des flux de chaleur sensible sont fonction de la quantité d'eau dans le sol et de la couverture végétale (Owen et *al.*, 1998). Comme il a été suggéré dans les parties 1.2.1 et 1.2.2 sur le bilan radiatif, ce sont les différentes valeurs de l'albédo qui ont un rôle primordial dans les transferts radiatifs entre le sol et l'atmosphère. Ainsi, un plus haut niveau d'échange de chaleur latente est observé dans les zones végétales où les flux d'évapotranspiration maintiennent une certaine fraîcheur, alors que les échanges de chaleur sensible sont plus importants dans les zones très peu végétalisées comme les zones urbaines (Oke, 1982).

Pour des zones caractérisées par une couverture végétale partielle, les propriétés thermiques de surface influencent largement les mesures de température à travers les processus thermiques de conduction, de convection et de radiation. Cependant, des différences dans les températures radiatives entre la canopée de l'espace végétalisé et le sol sont susceptibles d'affecter les mesures de température de surface (Sandholt et *al.*, 2002). L'albédo varie aussi de façon significative selon les espèces végétales, la densité et le stade de développement des plantes (Snyder et *al.*, 1998).

Les résultats de ces études ont beaucoup encouragé les recherches en environnement urbain à travers le monde (Carson et *al.*, 1994; Gallo et Owen, 1998; Gillies et Carlson, 1995; Gillies et *al.*, 1997; Goward et *al.*, 2002; Lo et *al.*, 1997; Weng, 2001).

### 1.2.5 Influence des ICU sur l'environnement et la santé publique

Les vagues de chaleur en période estivale nécessitent une importante consommation d'énergie dans les villes, favorisant une demande de climatisation qui peut parfois représenter un tiers de la consommation totale d'un ménage moyen (Réseau éco-consommation, Belgique, 2004<sup>8</sup>). Ce sont 3 à 8% de la demande électrique urbaine qui sont utilisés pour contrer cet excédent de chaleur (<http://www.futurityinc.com>). Par ailleurs, des journées chaudes favorisent dans la couche BLUHI (partie 1.2.2) la formation d'un smog, soit un mélange de fumée (pollution automobile ou autre) et de vapeur d'eau, dans des conditions de forte stabilité. La figure 1.7 démontre à quoi ressemble une journée de smog important dans une métropole.



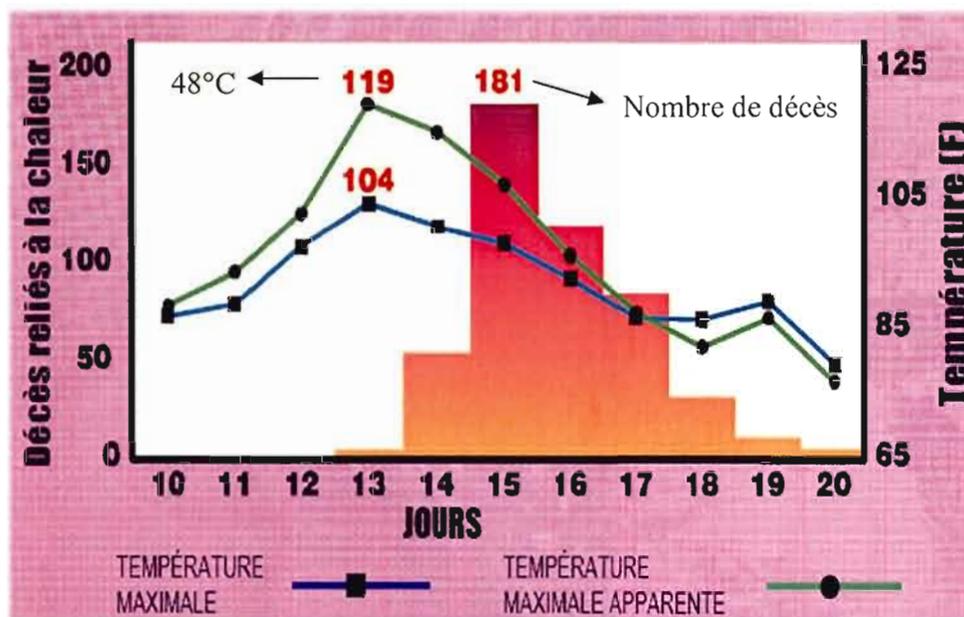
**Figure 1.7** Smog au-dessus de la ville de Santiago du Chili.

Source: <http://www.fuggire.it>

---

<sup>8</sup> Lettre de l'Eco-Consommation n°42, août 2004, *Climatisation ... pollution?* (<http://www.ecoconso.be>)

Les îlots de chaleur ont également un impact direct sur la santé publique en aggravant le stress thermique (transpiration et dilatation des vaisseaux sanguins), les maladies directement imputables aux fortes chaleurs (syncope, épuisement etc.) et le maintien des conditions favorables aux maladies tropicales (virus du Nil ou malaria). Les fortes chaleurs ont aussi une influence sur les personnes atteintes déjà de maladies chroniques (cardiaques par exemple), les personnes âgées, les personnes obèses, les nourrissons et celles vivant dans des logements très insalubres (Auger et Kosatsky, 2002). La figure 1.8 indique une forte corrélation à Chicago lors de canicule de 1995 entre le nombre de décès par jour en été et l'occurrence des fortes températures.



**Figure 1.8** Décès reliés aux forte chaleurs (plus de trois jours) pour les résidents de Chicago (USA), du 10 au 20 juillet 1995.

Source: Drouin, 2003

La température maximale sur ce graphique est celle ressentie par le corps humain, celle à laquelle il faut ajouter la variable de l'humidité traduite par l'indice HUMIDEX (effet combiné de la chaleur et de l'humidité).

### 1.2.6 Les solutions pour ralentir les îlots et leurs différents impacts

La compréhension des mécanismes physiques sous-jacents à la formation des ICU facilite les interventions destinées à contrer le phénomène. Par exemple, le recouvrement des toits ou des espaces de stationnement de couleurs plus claires, voire blanches, augmenterait l'albédo et ainsi la part de chaleur absorbée par la surface serait réduite. La figure 1.9 est un exemple du blanchiment d'un toit en Californie.



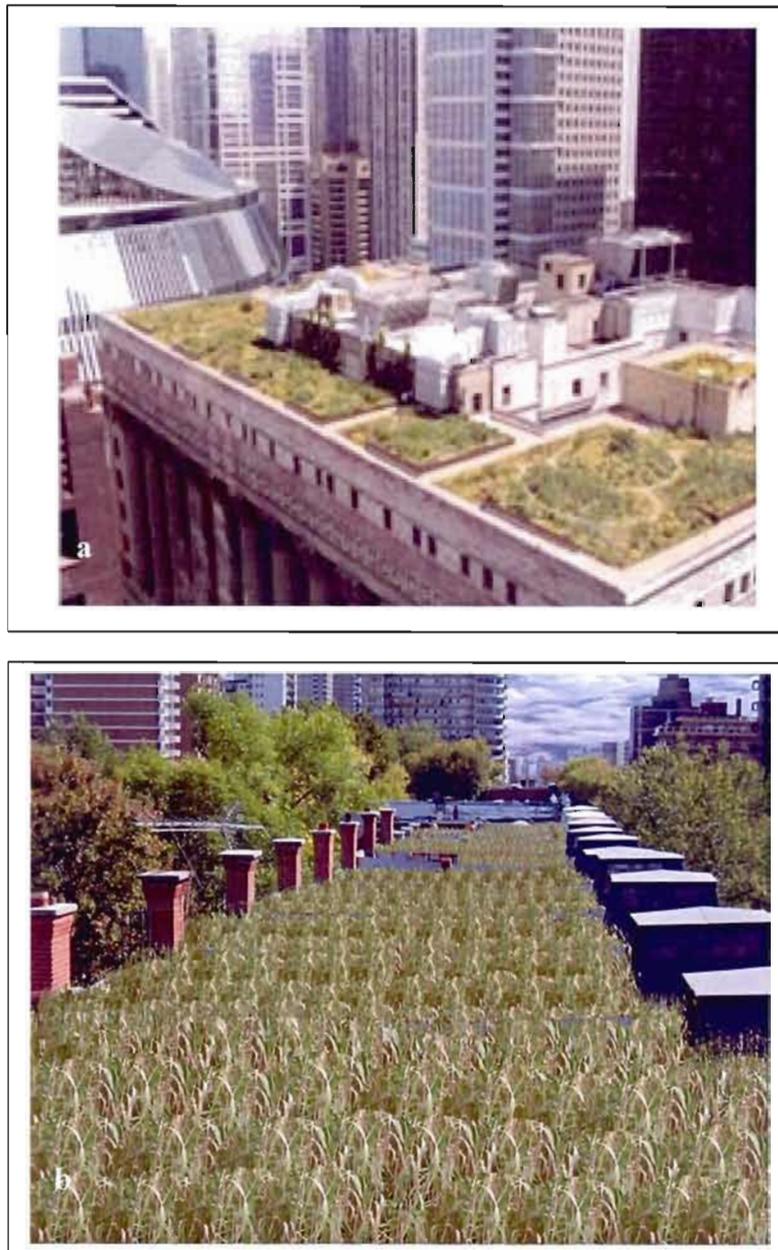
**Figure 1.9** Blanchiment d'un toit en Californie dans le but de diminuer la chaleur emmagasinée.

Source: <http://www.california.com/~positivenergy/hb.html>

Comme suggéré auparavant, certaines études ont prouvé que les conditions de surface d'une ville, tels que l'albédo ou des indices de végétation (NDVI) sont hautement corrélés avec les îlots de chaleur à plusieurs échelles (Cox et *al.*, 2005). L'étude de Chen et *al.*, (2006), a approfondi la question au Delta de Pearl River dans la province de Guangdong au sud de la Chine, en y incluant des indices liés à l'eau (*Normalized Difference Water Index*, NDWI), à la densité au sol (*Normalized Difference Bareness Index*, NDBaI) et au bâti (*Normalized Difference Build-up Index*, NDBI). Les résultats obtenus indiquent que les corrélations entre les indices NDVI, NDWI, NDBaI et la température, sont négatives quand le NDVI est faible, mais elles sont positives entre le NDBI et la température.

Par conséquent des mesures simples peuvent être prises :

- Limiter les grandes surfaces minéralisées et construire une aire de stationnement sur plusieurs niveaux éviteraient l'implantation de vastes étendues asphaltées. On retrouve généralement ces stationnements dans les grandes métropoles;
- Exclure les matériaux de surface emmagasinant fortement la chaleur et privilégier les matériaux clairs (cf. exemple fig. 1.9);
- Planter des arbres autour de bâtiments individuels anciens afin de créer des surfaces plus ombragées et ainsi faire baisser la température, surtout sur les toits et les façades sud, est, et ouest des immeubles. Ces démarches favorisent des économies d'énergie en air conditionné. Utiliser les arbres pour l'ombrage des routes et des stationnements qui se réchauffent pendant les heures chaudes et restituent pendant la nuit la chaleur emmagasinée durant la journée. Également assurer systématiquement la plantation d'arbres à canopée dense dès la construction de nouvelles infrastructures et créer des espaces verts comme les parcs urbains favorisant ainsi le rafraîchissement du voisinage, et à la longue, l'atmosphère urbaine de la ville;
- Promouvoir le recouvrement des toits par la végétation, « *les toits verts* » (cf. fig. 1.10a et 1.10b page suivante) dans le but de réduire l'accumulation de chaleur à l'intérieur des bâtiments. Ceci est valable autant pour les anciennes (autant qu'elles puissent supporter un tel poids supplémentaire) que pour les nouvelles constructions. Ces toits sont beaucoup plus frais que les toits traditionnels car une fraction significative de l'énergie absorbée est utilisée pour l'évaporation de l'eau au lieu du réchauffement des toits et de l'air ambiant.



**Figure 1.10** Toits verts sur l'Hôtel de ville de Chicago (a) et sur un immeuble du centre ville de Montréal (b).

Source: <http://www.greenbuildingsbc.com>  
[www.ecosensual.net](http://www.ecosensual.net)

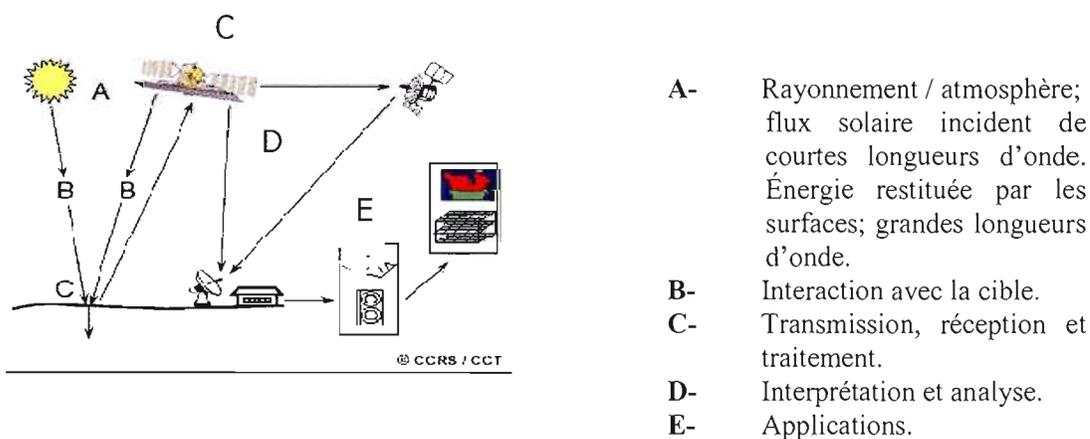
### 1.3 La télédétection utilisée comme moyen pour l'analyse des ICU

L'histoire de la télédétection terrestre a pris toute son importance à partir du lancement du premier satellite civil américain *Earth Resources Technology Satellite (ERTS-1)*, en 1972.

Le territoire tel qu'on l'observe, est ramené à deux aspects: l'occupation du sol et l'utilisation du sol. Le programme LUCC ou *Land Use and Land Cover Change* (IGBP/IHDP<sup>9</sup>) propose un cadre conceptuel et méthodologique pour l'étude des changements d'occupation et d'utilisation du sol à plusieurs échelles géographiques. Les changements sont le résultat de l'action de trois types de facteurs (Turner et al., 1993) :

- Les facteurs socio-économiques (démographie, économie, droit foncier etc.);
- Les facteurs bio-physiques (climat, sols, etc.);
- Les facteurs proximaux ou directs (accessibilité, techniques de cultures, etc.).

D'un point de vue technique, la télédétection implique une interaction entre le rayonnement solaire incident et les cibles, détaillée dans la figure 1.11 ci-dessous.



**Figure 1.11** Principes de la télédétection.

Source: Centre Canadien de Télédétection (CCT), 2002

<sup>9</sup> International Geosphere-Biosphere Programme / International Human Dimensions Programme on Global Environment Change (<http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC/>)

### 1.3.1 Terminologie

La télédétection est la mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié.

- Voici la définition du terme qui désigne la détection à distance;

*«La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. Elle englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information » (CCT, 2002<sup>10</sup>).*

- La définition de Bonn et Rochon, (1996) est également très utilisée;

*«Discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes.»*

### 1.3.2 Champs d'application

Pour toute étude diachronique associée au milieu naturel ou anthropique, la télédétection a rapidement été utilisée dans de nombreux domaines : en démographie (l'expansion urbaine, Karaca et *al.*, 1995), en sciences de l'environnement, en aménagements forestiers (Bernard et *al.*, 1999) et dans l'étude des îlots de chaleur (Streutker, 2002). Le tableau 1.1 dresse l'ensemble de ces domaines.

---

<sup>10</sup> Ressources naturelles du Canada, secteur des sciences de la Terre, Centre Canadien de télédétection, 2002.

**Tableau 1.1** Domaines d'application de la télédétection.

<b>Domaines</b>	<b>Applications</b>
Géosciences	Géologie, pédologie, géomorphologie
Milieu marin et littoral	Qualité de l'eau, circulation océanique, végétation marine
Atmosphère et climat	Météorologie, bilans énergétiques et hydriques
Hydrologie	Comportement et cycles de l'eau
Glaciologie	Suivi des glaciers
Biosphère	Cartographie de la végétation
Espace aménagé	Statistiques agricoles, foresterie, croissance des villes
Archéologie	Cartographie de sites archéologiques
Humanitaire	Pré-alerte de famines; camps de réfugiés
Santé	Prévision des épidémies, relations avec changements globaux
Catastrophes environnementales	Feux de forêts, inondations, marées noires, sécheresses etc.
Changements globaux	Désertification, variations et composition de l'atmosphère
Espaces agraires	Type de culture, irrigation, drainage

Source: IAURIF, 1987 et Pivot, 2002

### 1.3.3 Les assises

En télédétection, chaque unité spatiale a une signature qui lui est propre (Desjardins, 2000), c'est l'unité spectrale qui est basée sur la luminance<sup>11</sup>. La reconnaissance des objets, grâce aux moyens de détection, se fait par la teinte, la forme, la texture et l'arrangement. Ces derniers sont identifiés grâce à des capteurs embarqués sur des plates-formes, généralement un satellite et de plus en plus sur les avions.

<sup>11</sup> La luminance représente l'énergie des radiations émises et/ou réfléchies par un objet pour une longueur d'onde et suivant un angle et une surface donnés (unité: Watt par m<sup>2</sup> et par stéradian, le stéradian définit l'angle de visée, <http://www.nasa.gov>).

**Tableau 1.2** Types de plates-formes utilisées selon l'orbite et l'altitude

Types de plates-formes	Orbite	Altitude
Terrestres	-	quelques dizaines de mètres
Aériennes (avion, ballon)	-	jusqu'à 6 000 m, voire 12 000 m (40 km pour les ballons)
Spatiales	Circulaire Héliosynchrone Géostationnaire	en général 700-900 km obligatoirement 300 – 1 500 km 36 000 km

Source: Caloz, 1992

Le programme Landsat d'observation de la surface terrestre est le plus ancien aux États-Unis. Sept satellites Landsat ont été lancés depuis juillet 1972 (cf. tableau 1.3). Le dernier d'entre eux, Landsat 7, marque une nouvelle orientation dans le programme afin de réduire les coûts d'acquisition des données et augmenter la couverture de la Terre, ceci dans la perspective de recherches concernant le changement global (Caloz et Collet, 2001). En revanche Landsat 7 a connu des difficultés techniques et rend dans certains cas les images peu utilisables.

Les satellites Landsat 5 et 7 évoluent à une altitude moyenne de 705 km, sur des orbites circulaires quasi-polaires caractérisées par une inclinaison de 98,2° (c'est l'héliosynchronisme<sup>12</sup>). Un tour de la Terre dure ainsi 98,9 minutes et ils décrivent 14,5 révolutions par jour. Un cycle orbital complet dure 16 jours.

Ces caractéristiques orbitales ont des conséquences sur l'acquisition des images, à savoir :

- la couverture est complète entre les parallèles 81° Nord et Sud.
- le recouvrement des images s'accroît avec la latitude (7% à l'équateur, 54% à 60° de latitude).

<sup>12</sup> Un satellite héliosynchrone passe à une latitude donnée toujours à la même heure.

**Tableau 1.3** Les satellites Landsat mis en opération de 1972 à 2003 par la NASA

Satellite	Date de lancement	Altitude moyenne	Cycle orbital	Fauchée	Capteurs, canaux et résolution spatiale
Landsat 1	juillet 1972	910 km	18 jours	185 km	Caméra RBV (3 canaux, 80 m) Radiomètre MSS (4 canaux, 80 m)
Landsat 2	janvier 1975	910 km	18 jours	185 km	Caméra RBV (3 canaux, 80 m) Radiomètre MSS (4 canaux, 80 m)
Landsat 3	mars 1978	910 km	18 jours	185 km	Caméra RBV (3 canaux, 80 m) Radiomètre MSS (5 canaux, 80 m)
Landsat 4	juillet 1982	705 km	16 jours	185 km	Radiomètre MSS (5 canaux, 80 m) Radiomètre TM (7 canaux, 30 m)
<u>Landsat 5</u>	janvier 1984	705 km	16 jours	185 km	Radiomètre MSS (5 canaux, 80 m) Radiomètre TM (7 canaux, 30 m) (sauf la bande 6 à 120 m)
Landsat 6	oct. 1993	détruit après lancement			
Landsat 7	avril 1999	705 km	16 jours	185 km	Radiomètre ETM+ (7 canaux, 30 m sauf la bande 6 à 60 m plus un canal panchromatique à 15 m). Radiomètre ETM+ SLC (Scan Line Corrector)
Landsat 7	mai 2003				

Source: <http://www.landsat.org>

Le système ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) fournit depuis 1999 (grâce à deux capteurs successifs) une couverture en continu avec les données du capteur *Thematic Mapper* de Landsat 5 et des missions antérieures de Landsat. Ces caractéristiques améliorées et la performance supérieure de l'instrument TM (cf. tableau 1.4) offrent un plan d'acquisition dénommé LTAP (*long-term acquisition plan*). Ces développements ouvrent la voie à l'étude d'ensemble de données en continu remontant à près de deux décennies, quant à la réalisation du suivi de la dynamique globale et régionale des sols (à l'échelle de 30 m). Il est maintenant possible d'évaluer à la fois les phénomènes naturels et anthropiques (CCT, 2003).

**Tableau 1.4** Bandes TM du Satellite Landsat 5 et principales applications

Bandes	Domaines spectraux (Microns)	EM Région	Applications
1	0.45 - 0.52	Bleu	Cartographie des traits de côtes, différenciation sol-végétation
2	0.52 - 0.60	Vert	Évaluation de la masse végétale
3	0.63 - 0.69	Rouge	Distinction d'absorption de la chlorophylle selon les espèces végétales
4	0.76 - 0.90	Proche IR	Évolution de la biomasse et délimitation des étendues d'eau
5	1.55 - 1.75	IR de courte longueur d'ondes	Végétation et mesure d'humidité du sol; différenciation entre neige et nuage.
6	10.40- 12.50	IR thermique	Cartographie thermique, études sur l'humidité des sols, images de nuit et mesures du stress thermique des plantes
7	2.08 - 2.35	IR de moyennes longueur d'ondes	Cartographie hydrothermale

Source: Gouvernement Australien, Géosciences, 2006, <http://www.ga.gov.au>

Il existe deux modes de captage en télédétection. Le premier mode est le mode passif. Lorsqu'un capteur est conçu pour enregistrer depuis une plate-forme la radiation solaire réfléchi par la Terre, il est passif puisqu'il ne prend des images que du côté de la Terre éclairé par le soleil. Ce mode consiste à utiliser l'irradiance<sup>13</sup> des surfaces qui est fonction de la température du corps noir<sup>14</sup>.

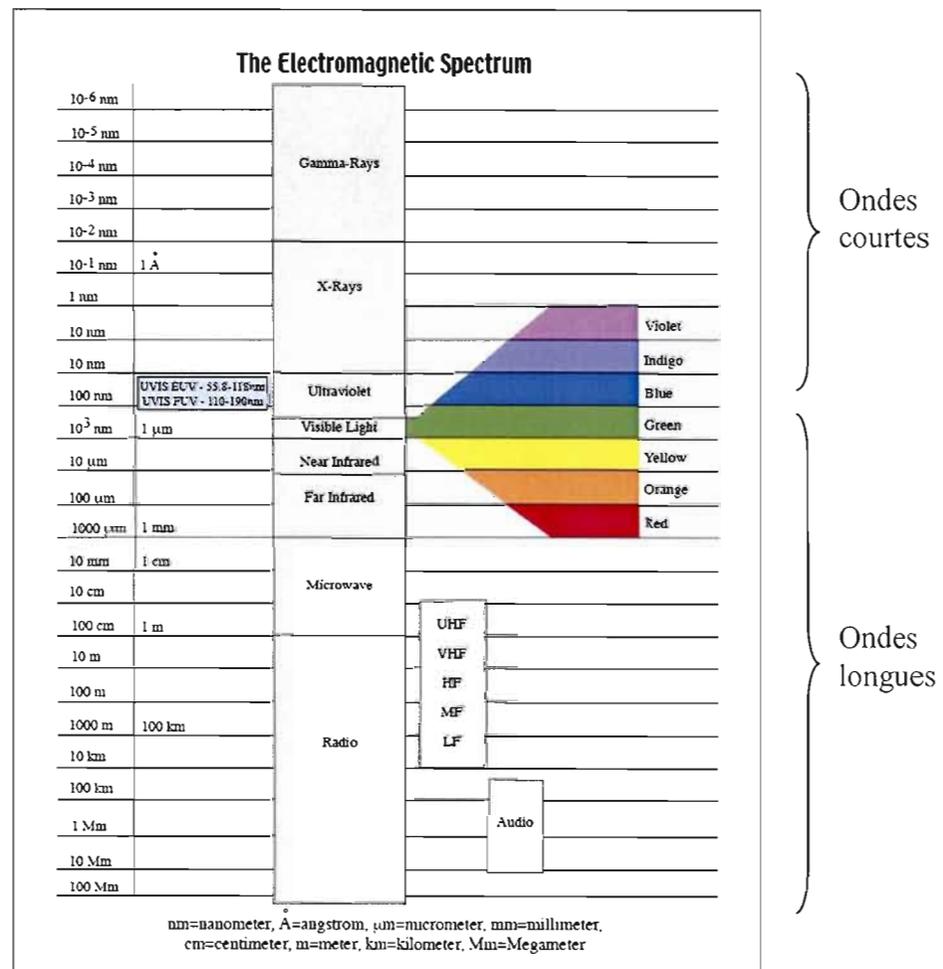
<sup>13</sup> Densité de flux radiant incident sur une surface par unité de longueur d'onde (CCT, 2003).

<sup>14</sup> C'est un modèle utilisé pour représenter le rayonnement électromagnétique (infrarouge, lumière) d'un objet en fonction de sa température. Le corps noir est défini comme étant un objet absorbant totalement la lumière à toutes les longueurs d'ondes (<http://www.solarenergy-thermal.ch>).

*« Les capteurs passifs sont techniquement développés afin de pouvoir détecter l'énergie naturelle réfléchie ou émise par un objet dans la partie du spectre électromagnétique qui va de l'ultraviolet jusqu'aux hyperfréquences passives ».*

*« Les capteurs actifs peuvent se définir comme étant des instruments qui émettent artificiellement de l'énergie sous forme d'impulsion à fréquence temporelle régulière et qui ont la capacité d'enregistrer le signal rétrodiffusé par les objets qui ont été en contact avec cette énergie. En télédétection, ce genre de capteur permet également de produire des images » (Desjardins, 2000).*

Les images sont « captées » puis enregistrées en format matriciel. Les lignes et colonnes qui définissent la matrice et qui selon leur nombre vont déterminer la taille de l'image, sont formées par un nombre précis d'éléments appelés pixels qui correspondent à la plus petite surface au sol détectable par le capteur. La valeur assignée au pixel est fonction de l'intensité du rayonnement de cette surface. Quant à sa dimension, c'est-à-dire le niveau de détail que l'image pourra montrer, elle est déterminée par le capteur. Ainsi, une image est caractérisée par trois éléments principaux : la dimension des pixels (ou résolution spatiale), le niveau de détail dans les portions du spectre électromagnétique utilisé (cf. fig. 1.12) et le niveau de détail dans l'intensité du rayonnement mesuré (ou résolution radiométrique). En plus de ces trois résolutions, un autre concept important en télédétection est celui de la résolution temporelle. Certains satellites ont la possibilité de pointer leurs capteurs en direction du même point lors de différents passages.



**Figure 1.12** Le spectre électromagnétique.

Source: <http://www.nasa.gov>

Les principales zones du spectre mesurées en télédétection sont :

- l'ultraviolet inférieur 10 nm à 0,4 μm (rarement);
- le visible de 0,4 à 0,7 μm;
- l'infrarouge proche, de 0,7 à 1,5 μm;
- l'infrarouge moyen de 1,5 à 3 μm;
- l'infrarouge thermique de 3 à 15 μm;
- les micro-ondes (ou hyperfréquences) de 1 mm à 1 m.

### 1.3.4 L'infrarouge thermique (TIR)

L'adjectif « *infrarouge* » qualifie le rayonnement électromagnétique dont le domaine de longueur d'onde est compris entre celui du rayonnement visible, qui s'achève avec la lumière rouge entre 0,6 et 0,7  $\mu\text{m}$ , et celui des ondes radio-électriques, qui commence conventionnellement à 1 mm, soit 1 000  $\mu\text{m}$ .

Rappelons que la température moyenne globale de la Terre est supposée en équilibre dans le temps. Toute la radiation absorbée par l'atmosphère doit être équilibrée par la radiation terrestre sortante sous forme de rayonnement infrarouge. En d'autres termes, on peut voir la Terre comme un corps noir, cité précédemment, en équilibre radiatif avec le Soleil<sup>15</sup>. L'énergie électromagnétique émise par un corps noir est fonction de sa température d'après la loi de Stephan-Boltzmann (cf. équation 3):

$$E = \sigma T \quad (3)$$

où  $\sigma$  est la constante de Boltzmann, et T est la température de surface en Kelvin.

( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ , E est en  $\text{W}/\text{m}^2$ )

Selon la température du soleil (6 000 degrés Kelvin), presque la moitié de l'énergie émise par le Soleil se situe dans l'infrarouge (jusqu'à 4  $\mu\text{m}$  environ), et dans l'ultraviolet. La Terre émet presque exclusivement dans l'infrarouge, mais à des longueurs d'onde supérieures à 4  $\mu\text{m}$  soit dans le proche infrarouge et l'infrarouge thermique. Les satellites captent la majeure partie du rayonnement électromagnétique émis à la surface de la Terre entre  $-20^\circ\text{C}$  et  $+40^\circ\text{C}$ . La température moyenne de cette dernière ( $15^\circ\text{C}$ ) détermine la longueur d'onde du maximum de l'énergie émise. Il est alors possible de quantifier et visualiser des paramètres climatiques comme l'évolution des îlots de chaleur urbains et des changements de l'utilisation du sol à différentes échelles spatiales (locale et régionale) et temporelles (multidécennale ou à l'intérieur d'un cycle saisonnier).

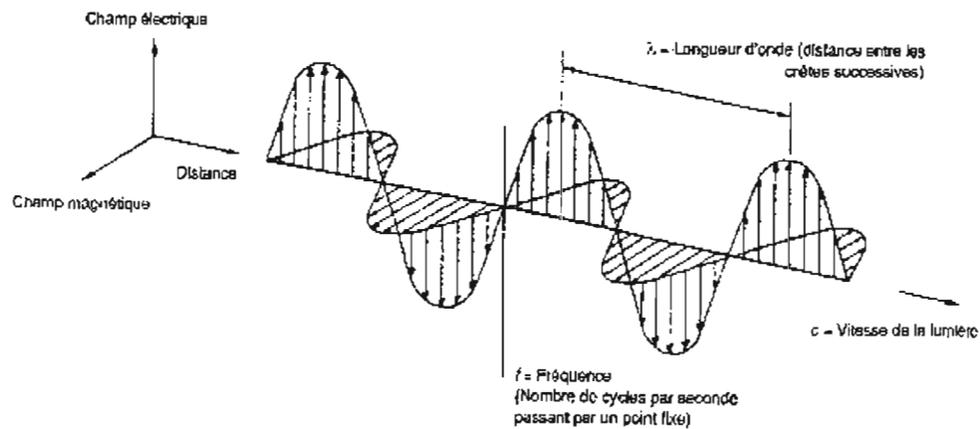
---

<sup>15</sup> Gaussorgues, 1999, La thermographie infrarouge : Principes, technologies, applications, Paris.

L'ensemble du rayonnement électromagnétique (REM) est une énergie qui se propage dans l'espace et qui interagit avec la matière; cette énergie est constituée d'ondes transversales indissociables. Le REM se caractérise par la période qui est le temps  $T$  pendant lequel l'onde effectue une oscillation complète, par la fréquence de l'onde  $\nu$  qui est l'inverse de la période ( $1/T$ ), par la longueur d'onde  $\lambda$  (cf. équation 4) qui est la distance entre deux points homologues sur l'onde, et enfin par la vitesse  $c$  de propagation de l'onde dans l'espace (cf. fig. 1.13). Dans le vide cette vitesse est:  $c = 300\,000\text{ km/s}$ .

La relation entre la vitesse, la longueur d'onde et la fréquence est :  $\lambda = c / \nu$  (4)

L'amplitude exprime l'intensité de l'onde électromagnétique; plus l'amplitude est importante, plus le rayonnement est intense. L'énergie transmise par une onde est également proportionnelle à sa fréquence: plus la fréquence est élevée, et donc plus la longueur d'onde est petite, plus l'énergie est importante.



**Figure 1.13** Onde simple.

Source: Bonn et Rochon, 1992

Le développement des satellites permettant de capter l'infrarouge thermique émis par la surface de la Terre a facilité l'étude des îlots de chaleur urbains à des échelles spatiales de plus en plus précises (Streutker, 2002). Les études des ICU (Balling et Brazell, 1988; Gallo et al., 1993; Gallo et Owen, 1998; Kidder et Wu, 1987; Roth et al., 1989; Streutker, 2002) ont d'abord été conduites grâce à des informations fournies par le système *Advanced Very High Resolution Radiometer* de la *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA AVHRR).

Au départ, la résolution spatiale de 1,1 km de ces données n'était utile que pour une cartographie thermique à échelle grossière. Puis la résolution à 120 m des mêmes données en infrarouge thermique a permis une observation des températures de surface plus détaillée. Carnahan et Larson, (1990), ont par la suite utilisé des données TM TIR afin d'observer à des échelles régionales, les différences de température entre les zones urbaines et les zones rurales dans la région d'Indianapolis aux États-Unis. Weng (2001 et 2003) a examiné les corrélations entre les températures de surface et le type d'occupation du sol à Guangzhou et dans les zones urbaines du delta de Zhujiang en Chine. Streutker (2002) a récemment quantifié les ICU dans la région de Houston au Texas.

Parmi ces études dans certaines villes nord-américaines, celle du Comté de Lucas en Ohio (USA) est un exemple d'une étude comparative entre les températures de surface et le type d'occupation du sol (Zhao, 2002). Cette région est en grande partie industrialisée et les activités humaines sont certainement à l'origine des plus fortes températures que l'on retrouve dans les zones urbaines par rapport aux alentours. Dans ce projet, une image de juillet 2000, qui a été obtenue par les capteurs ETM+ de Landsat 7, ainsi qu'une autre de juillet 1984 obtenue par capteurs TM de Landsat 5, ont été utilisées pour connaître les températures, extraire des informations sur les principaux types d'occupation du sol et ainsi voir l'évolution des ICU sur le Comté de Lucas. Les résultats obtenus indiquent que les zones exceptionnellement chaudes sont toutes des zones urbaines alors que les températures plus basses sont liées à l'eau, aux forêts, aux terres agricoles ou simplement végétalisées.

D'autres études ont suivi la même démarche. Celle de Weidong *et al.*, (2005) s'est basée sur plusieurs sources de données (dont celles de Landsat ETM+ combinées à une classification de l'émissivité de surface) pour calculer les températures de la région de Beijing en Chine entre 1982 et 2000. Les résultats ont une fois de plus démontrés que plus l'indice de végétation est fort, plus les températures auront une tendance à la baisse. Dans la partie urbaine, le NDVI est faible et les LST sont élevées, alors que dans les zones rurales le NDVI est important et les LST sont faibles.

## 1.4 Conclusion

Des écarts importants de température sur des superficies réduites, ne peuvent être créés que par l'influence de l'homme. Les îlots de chaleur urbains sont indéniablement associés à l'organisation spatiale des villes et à la densité d'espaces verts qu'elles offrent. Les secteurs bâtis qui ne sont pas reverdis, deviennent des puits de chaleur dans lesquels cette dernière est emmagasinée à cause des matériaux de surface sombre. La télédétection a la capacité d'observer l'évolution de ces différences de température dans l'espace et dans le temps, offrant ainsi la possibilité aux autorités publiques de mieux comprendre et anticiper la dynamique thermique d'une ville comme Montréal.

Cette présente étude s'appuie sur des études réalisées dans d'autres villes du monde qui ont prouvé un lien direct entre la variation des températures et les modifications des types d'occupation du sol. Nous verrons comment l'agglomération de Montréal répond à ces liens étroits entre les types de surface et les variations de température.

## CHAPITRE II

# MÉTHODOLOGIE

### 2.1 Introduction

La présente étude a pour but d'examiner les températures de surface et les îlots thermiques de la communauté métropolitaine de Montréal afin de mieux comprendre leur dynamique et de faciliter les mesures d'adaptation des intervenants en santé publique. Il s'agit de développer une approche qui identifie sur une base récurrente, l'évolution des secteurs vulnérables à la chaleur intense et aider à identifier les liens avec les changements dans l'occupation du sol. L'hypothèse de départ veut que l'évolution du comportement thermique de Montréal et ses environs ne répond pas seulement aux aléas du climat à travers le temps, mais serait aussi fortement liée à l'évolution du type d'occupation du sol, les espaces végétalisés et les matériaux de surface qui le composent.

Nous présentons dans ce chapitre la zone d'étude et les données utilisées. Les logiciels nécessaires au traitement des données satellitaires et à la manipulation puis à la cartographie de celles-ci seront ensuite énumérés. La démarche méthodologique sera abordée selon les diverses étapes décrites à la figure 2.1.

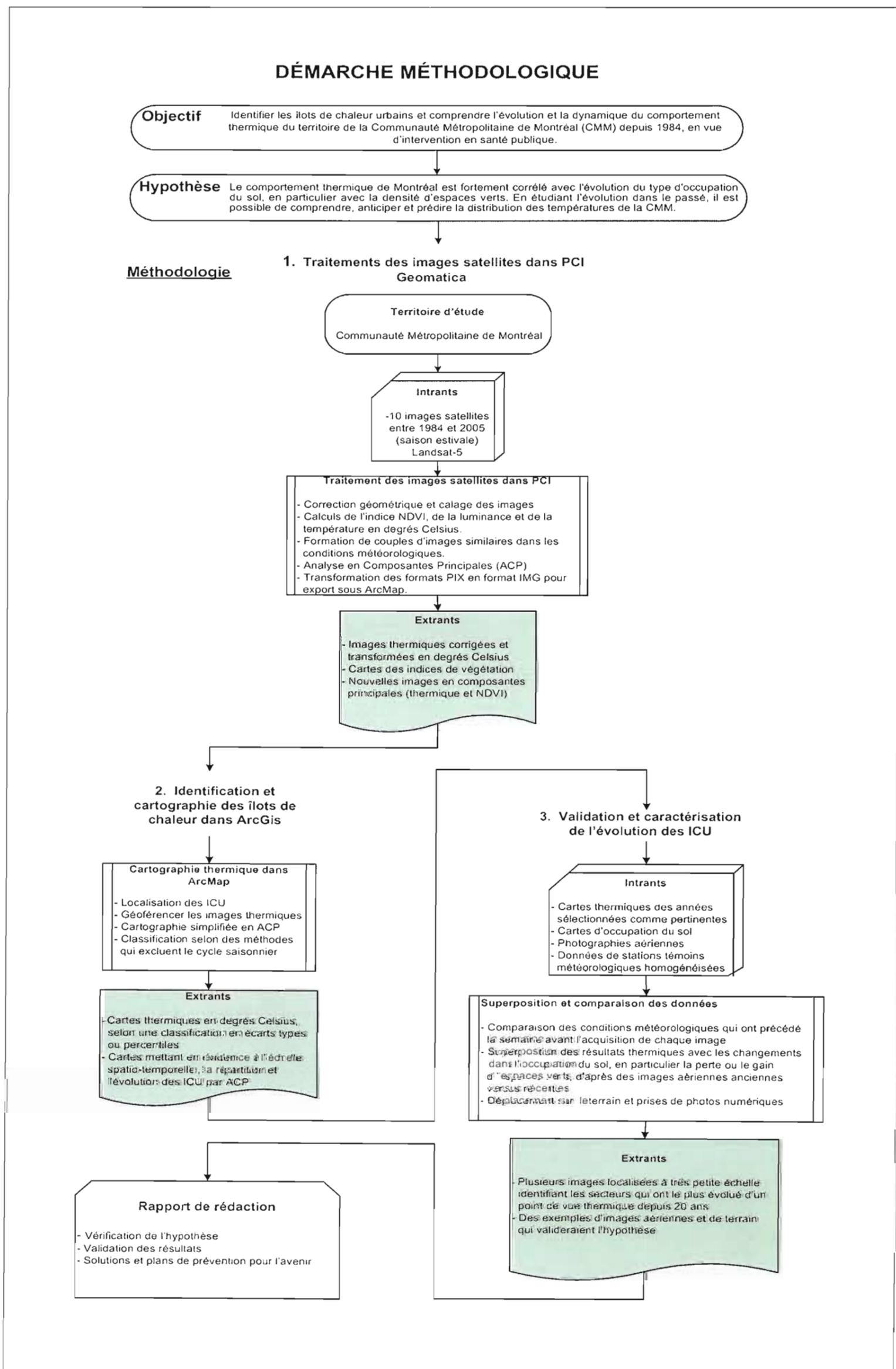
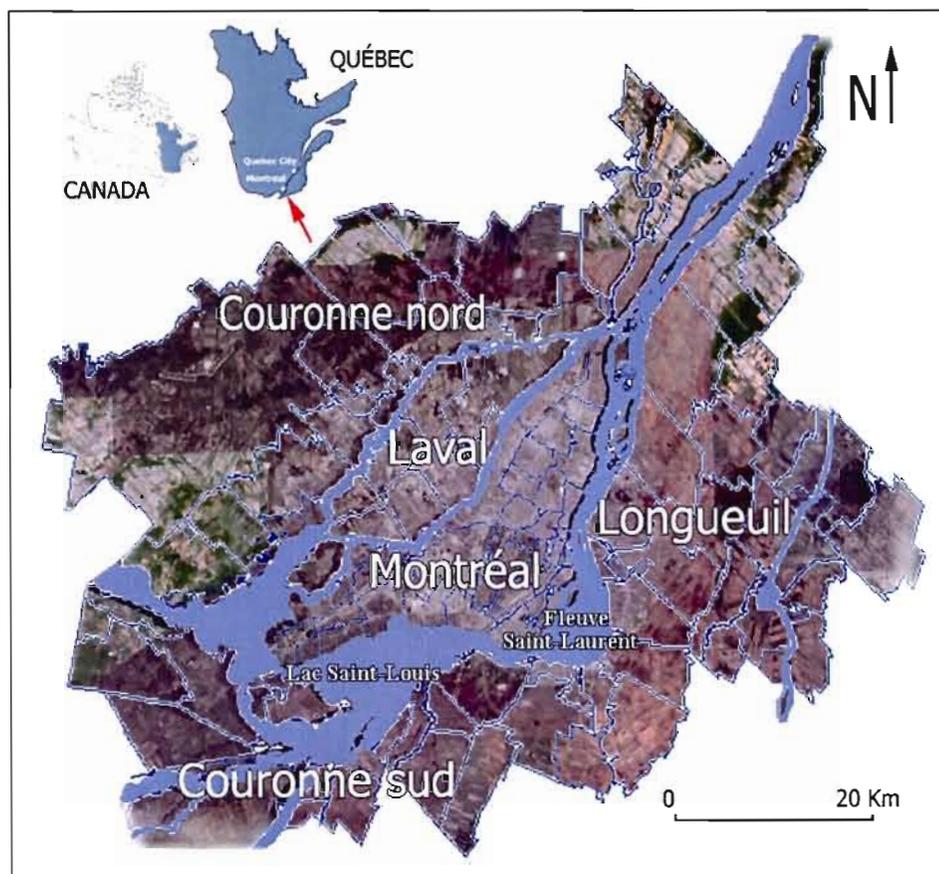


Figure 2.1 Démarche méthodologique

## 2.2 Territoire d'étude

Cette étude s'intéresse à la **Communauté métropolitaine de Montréal** qui comprend 82 municipalités, regroupées en cinq régions : l'agglomération de Montréal, l'agglomération de Longueuil, l'île de Laval, la couronne Nord et la couronne Sud (cf. fig. 2.2). La CMM couvre une superficie totale de 4 024 km<sup>2</sup> située au sud-ouest de la Province de Québec, le long du fleuve Saint-Laurent.



**Figure 2.2** Communauté métropolitaine de Montréal.

Source: Photographie aérienne, moteur de diffusion Google Earth, 2006

Comme l'indique le tableau 2.1, plus de la moitié de la population de la CMM habite le territoire de Montréal. Cette dernière connaît une augmentation de 2,3% du nombre d'habitants depuis dix ans.

**Tableau 2.1** Profil de la CMM selon le nombre d'habitants

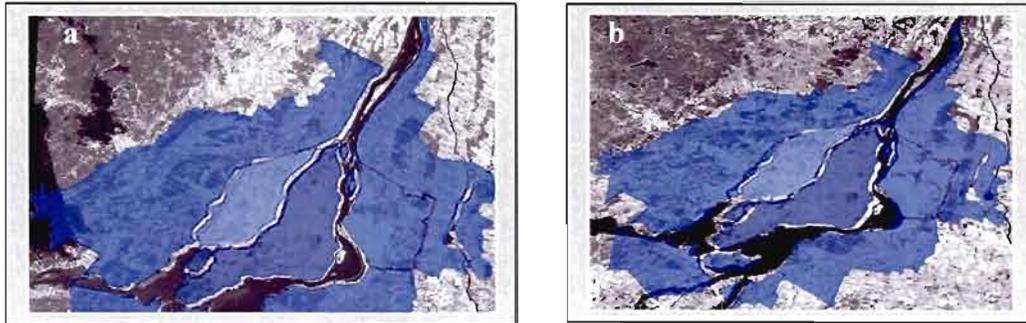
POPULATION DES SECTEURS DE LA COMMUNAUTÉ MÉTROPOLITAINE DE MONTRÉAL (2003)						
SECTEURS	POPULATION (2003)			PART RELATIVE		
<b>MONTRÉAL</b>	1 838 474			53,5%		
LAVAL	354 773			10,3%		
LONGUEUIL	386 229			11,2%		
COURONNE NORD	459 484			13,4%		
COURONNE SUD	397 183			11,6%		
<b>TOTAL CMM</b>	<b>3 436 143</b>			<b>100.0%</b>		

Années	1981	1986	1991	1996	2001	2006
Population	1760122	1819670	1815202	1799296	1851746	1894576

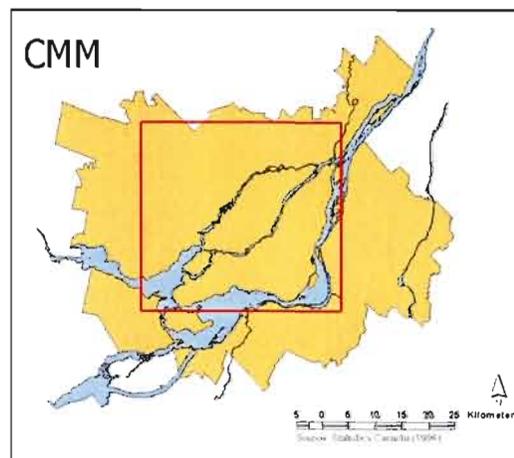
Source: ISQ et MAMM, 2003

L'ensemble des images satellites obtenues pour cette étude ne couvre pas totalement les limites de la CMM (cf. fig. 2.3). Selon les images utilisées, le territoire couvert ne correspond pas systématiquement à l'ensemble de la CMM. Afin d'obtenir une couverture temporelle comparable et homogène dans le temps entre chaque image satellite, notre analyse a été restreinte à la zone présentée à la figure 2.4.



**Figure 2.3** Exemples de la superficie couverte par les images de (a) 1984 et (b) 2005 de Landsat 5 au-dessus de la CMM (en bleu).

Source: Capteur TM Satellite Landsat 5



**Figure 2.4** Zone d'étude délimitée par le cadre (en rouge) pour laquelle toutes les images Landsat seront analysées.

Source: site <http://milute.mcgill.ca>

### 2.3 Acquisition et description des données

Les dix images retenues pour l'étude proviennent du capteur TM du satellite Landsat 5 (cf. tableau 2.2 en jaune). Ce dernier reçoit les données sur sept bandes spectrales distinctes. Les bandes 3 (rouge) et 4 (proche IR) seront utilisées pour le calcul de l'indice de végétation NDVI développé (cf. section 2.5). La bande 6 de l'IR thermique va quant à elle être transformée en valeurs de température apparente en degrés Celsius (cf. section 2.5). Il sera ainsi possible de faire une cartographie thermique de la Ville de Montréal et de la comparer avec le NDVI.

Les couches géographiques du découpage des limites administratives d'arrondissements, du réseau routier, de l'hydrographie et des surfaces agricoles proviennent de la Communauté urbaine de Montréal (CUM). Le réseau routier qui contient l'ensemble des rues, boulevards et autoroutes de Montréal, et la couche géographique des arrondissements servent, dans un premier temps, à géoréférencer une des dix images qui servira de référence aux neuf autres. Par la suite il sera possible d'identifier avec précision les îlots de chaleur à l'échelle des arrondissements et du bâti (120m de résolution, cf. tableau 2.2). Quant aux réseaux hydrographique et agricole, ils ont été soustraits à l'aide d'un masque créé pour les secteurs situés au-dessus de l'eau et des champs cultivés.

**Tableau 2.2** Données utilisées dans le cadre du projet de recherche.

Type de données	Date et source	Projection	Coord. Géo	Path / Row	Particularité
Image capteur TM Satellite Landsat 5	1984-06-17 15:06 (GMT)	UTM 18 NH, D-04 NAD 83	46.03N / 72.94W	14 / 28	Bande thermique 6 120 m de résolution
Image capteur TM Satellite Landsat 5	1986-08-26 14:59 (GMT)	UTM 18 NH, D-04 NAD 83	46.04N / 73,02W	14 / 28	Bande thermique 6 120 m de résolution
Image capteur TM Satellite Landsat 5	1990-07-11 15:04 (GMT)	UTM 18 NH, D-04 NAD 83	46.04N / 74.54W	15 / 28	Bande thermique 6 120 m de résolution
Image capteur TM Satellite Landsat 5	1992-07-25 15:00 (GMT)	UTM 18 NH, D-04 NAD 83	46.04N / 73.03W	14 / 28	Bande thermique 6 120 m de résolution
Image capteur TM Satellite Landsat 5	1996-06-18 14:50 (GMT)	UTM 18 NH, D-04 NAD 83	46.01N / 72.83W	14 / 28	Bande thermique 6 120 m de résolution
Image capteur TM Satellite Landsat 5	1998-08-27 15:16 (GMT)	UTM 18 NH, D-04 NAD 83	45.83N / 72.99W	14 / 28	Bande thermique 6 120 m de résolution
Image capteur TM Satellite Landsat 5	2000/06/20 Pas de donnée (GMT)	UTM 18 NH, D-04 NAD 83	Pas de donnée	Pas de donnée	Bande thermique 6 120 m de résolution
Image capteur TM Satellite Landsat 5	2002/08/13 Pas de donnée (GMT)	UTM 18 NH, D-04 NAD 83	Pas de donnée	Pas de donnée	Bande thermique 6 120 m de résolution
Image capteur TM Satellite Landsat 5	2003-07-15 15:20 (GMT)	UTM 18 NH, D-04 NAD 83	46.03N / 74.46W	15 / 28	Bande thermique 6 120 m de résolution
Image capteur TM Satellite Landsat 5	2005-06-27 15:25 (GMT)	UTM 18 NH, D-04 NAD 83	45.68N / 73.06W	14 / 28	Bande thermique 6 120 m de résolution
Limites administratives d'arrondissements	Ville de Montréal, 2004	MTM, NAD 06			27 arrondissements Ville de Montréal
Réseau routier	Ville de Montréal, 2004	MTM, NAD 06			Routes de Montréal
Réseau hydrographique	Base nationale de données topographiques, 2001	MTM, NAD 06			Fleuves et rivières
Réseau agricole	Ministère de l'agriculture des pêcheries et de l'alimentation du Québec, 1999	MTM, NAD 06			Cultures, jachères
Carte d'occupation du sol	Ville de Montréal, 2001	MTM, NAD 83			16 taxons, Montréal
Données quotidiennes et horaires	Environnement Canada, équipe de Jennifer Milton		Plusieurs stations Au Québec		Permet un contexte météorologique

Chaque image représente un cliché pris à un jour et à un moment précis. Même si l'heure de saisie reste sensiblement la même pour toutes les images, c'est-à-dire environ 15h GMT (*Greenwich Mean Time*) soit 10h heure locale, les journées échantillonnées sont différentes et s'étalent durant la saison estivale. Pour cette raison, des données météorologiques ont été fournies par Environnement Canada dans le but de préciser le contexte météorologique dans lequel les images ont été prises. Elles regroupent sur une semaine la température à 2 m, prises au niveau de « *l'abri Stevenson* », selon les normes de l'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie), le point de rosée, la vitesse du vent à 10 m (hauteur de l'anémomètre), le taux d'humidité relative et la pression atmosphérique de la station de référence. Ces données proviennent de la station météorologique de Dorval à 35,7 m d'altitude, localisée à l'aéroport Pierre Elliott Trudeau à Montréal. Ainsi il sera possible de comparer avec un minimum d'information préalable des journées entre elles, selon leurs similitudes et leurs dissemblances dans les conditions météorologiques (cf. annexe A).

Les données météorologiques vont servir à analyser les conditions atmosphériques précédent ou durant l'acquisition des images satellites. Les figures à l'annexe A (figures A1 à A8) regroupent respectivement ces conditions pour les images de 1984 et 2002, prises à différents moments durant l'été. Premièrement, celle de 1984 a été prise en juin alors que celle de 2002 a été prise en août. À 10h du matin en juin, proche du solstice d'été, l'énergie solaire reçue diffère de celle d'août. De plus le 17 juin 1984 il a légèrement plu dans la nuit. Dans la matinée qui suit, le taux d'évapotranspiration de la végétation (encore humides), les flux de chaleurs latente et sensible ainsi que le taux d'humidité relative sont alors très différents de ceux enregistrés dans l'image d'août 2002, qui semble traduire quant à elle une situation de canicule dans un contexte de fort ensoleillement et de forte chaleur. Le capteur TM du satellite Landsat 5 traduit ces différences dans sa bande de l'infrarouge thermique via la radiance émise par la surface.

## 2.4 Démarche méthodologique

La figure 2.5 illustre les dix étapes du traitement et de l'extraction d'information des images Landsat. Associées aux données contextuelles décrites dans la partie 2.3 (réseaux routier, fluvial et les limites d'arrondissements), les cartes obtenues seront intégrées dans un SIG (Système d'Information Géographique).

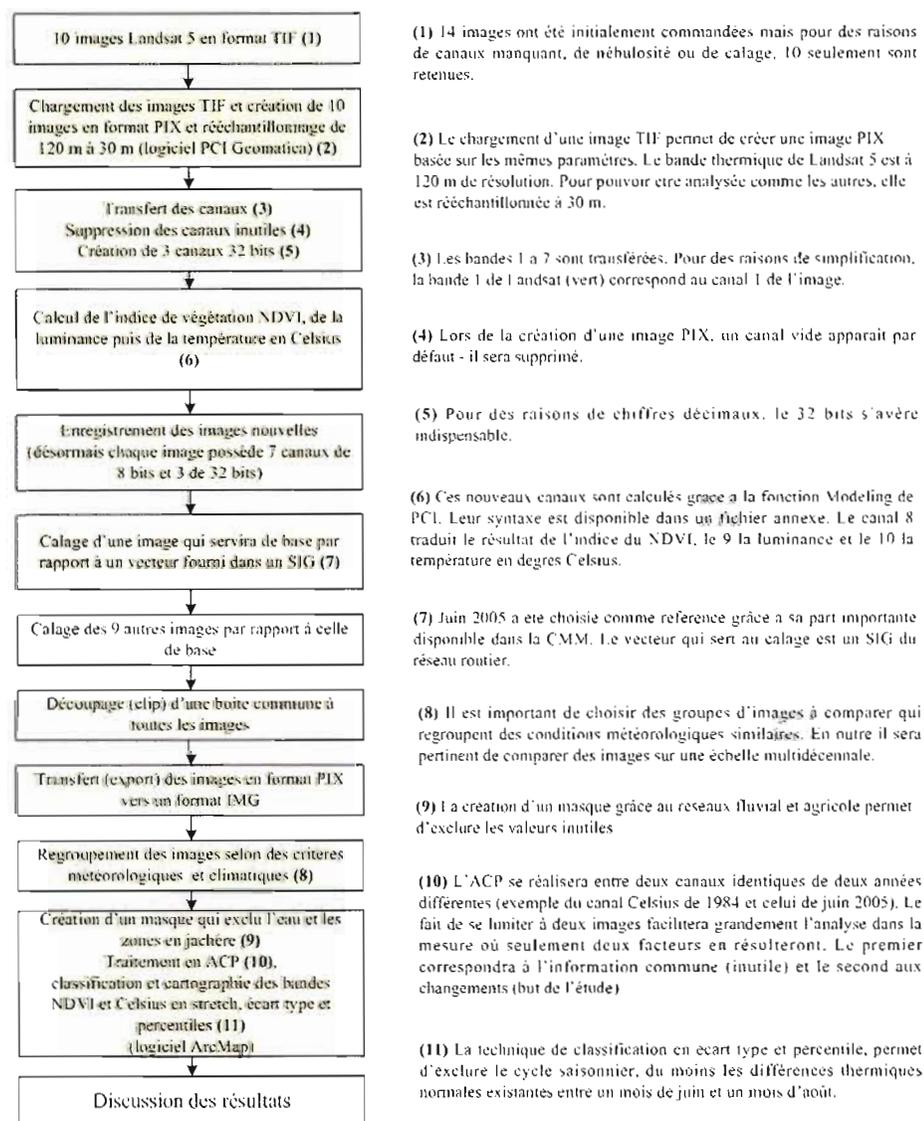


Figure 2.5 Organigramme résumant les différentes étapes du traitement des images.

Les différentes étapes du traitement consistent à;

- **Première étape**

La première étape consiste à convertir les images brutes de format TIF vers un format PIX. Les bandes thermiques seront par la suite rééchantillonnées, par la méthode polynomiale du plus proche voisin, à 30 m de résolution (à partir de la résolution de 120 m) afin d'être comparables aux autres bandes.

- **Deuxième étape**

Il s'agit ici de transférer les canaux un à un: la bande 1 du satellite (vert) correspondra au canal 1 de l'image. Trois canaux supplémentaires doivent être créés et ajoutés à chaque image. Ils seront d'une résolution de 32 bits car ils traduiront les valeurs thermiques et l'indice de végétation caractérisés par des nombres décimaux (à ce stade, chaque image doit donc posséder sept canaux de 8 bits et trois vides de 32 bits).

- **Troisième étape**

Trois nouvelles bandes doivent être créées à partir des bandes originales fournies par Landsat grâce à des calculs sous PCI Geomatica. Ces dernières serviront d'outil pour observer les relations entre l'indice de végétation et les types d'occupation du sol, ainsi que le comportement thermique de Montréal et ses environs.

L'indice choisi pour l'observation du changement du milieu végétal de cette étude est celui du NDVI, car malgré le développement de plusieurs nouveaux indices adaptés aux comportements des sols, le NDVI proposé par Rouse et *al.* (1974), reste celui le plus couramment utilisé et disponible. De récentes études ont démontré les limites de ce dernier qui parfois ne fournit pas d'estimation juste quant à la quantité de végétation (Small, 2002). Ses mesures sont en effet fonctions de la réflexion du visible et du proche infrarouge de la canopée des végétaux, de la réflexion du même spectre depuis le sol et de l'atmosphère, et sont ainsi sujettes à des erreurs d'observation (Yang et *al.*, 1997). Les différentes espèces végétales existantes, qu'il y ait des arbres feuillus ou non, le type d'occupation du sol et l'ombrage contribuent aussi à la sensibilité du NDVI (Jasinski, 1990). Malgré ces limites, le

NDVI s'avère être l'indice de végétation le plus adéquate pour une ville comme Montréal en majorité recouverte d'asphalte. D'autres indices comme le SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) ont été testés mais les résultats sont similaires (Huete, 2004).

L'indice NDVI a été calculé à partir des bandes du visible (0,63 – 0,69  $\mu\text{m}$ ) et celles du proche infrarouge (0,76 – 0,90  $\mu\text{m}$ ) tel que défini dans Caloz et Collet (2001)<sup>17</sup>;

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{PIR} - \text{R})}{(\text{PIR} + \text{R})}$$

où: R = réflectance moyenne dans le canal rouge  
PIR = réflectance moyenne dans le canal infrarouge

Les deux nouvelles bandes (9 et 10) qui ont été créées pour chaque image, seront destinées à la luminance (étape obligatoire pour accéder à la deuxième étape) et à la température. Deux conversions sont utilisées : premièrement convertir les valeurs digitales de la bande Landsat TM TIR en une luminance spectrale, et deuxièmement, convertir cette luminance en température (en considérant l'objet comme un corps noir).

La bande 6 de l'infrarouge thermique du Satellite Landsat 5 mesure la radiance de l'atmosphère, en d'autres termes on parle de luminance (connue également sous le nom de température des corps noirs, cf. section 1.3.4) qui est calculée par la loi de Planck (Dash et *al.*, 2002).

Pour cette étude, la transformation des comptes numériques des pixels en valeurs de température apparente se fait grâce à la formule (cf. équation 5) fournie dans le manuel du satellite<sup>18</sup>. Elle transforme les comptes numériques (CN) de l'image en flux de rayonnement mesuré par le capteur (Ls), tandis que l'équation 6 convertit le flux mesuré en température apparente en degrés Celsius.

---

<sup>17</sup> Régis Caloz et Claude Collet, Précis de télédétection, volume 3, Traitements numériques d'images de télédétection, AUF, 2001, Pages 227 et 229.

<sup>18</sup> NASA (2002), <http://www.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/>

$$L_s = L_{\min} + \left( \frac{L_{\max} - L_{\min}}{CN_{\max} - CN_{\min}} \right) \times (CN - CN_{\min}) \quad (5)$$

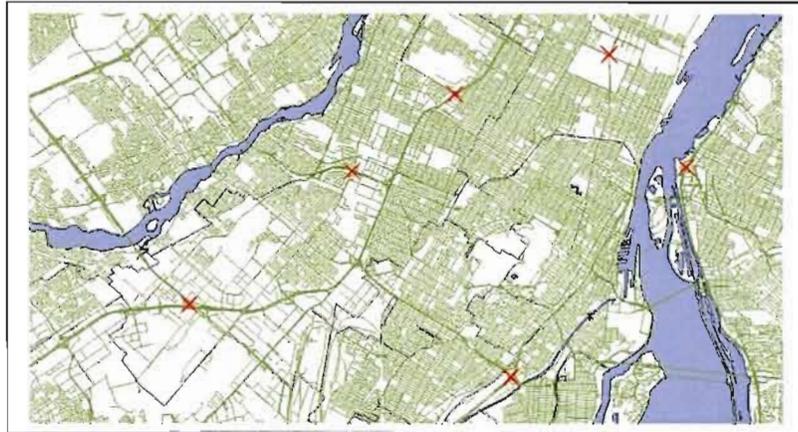
$$T(C) = \frac{k_2}{\left[ \ln \left( \frac{k_1}{L_s} + 1 \right) \right]} - 273 \quad (6)$$

Les coefficients  $k_1$  et  $k_2$  sont des constantes d'unités de flux par des longueurs d'onde équivalentes à 666,09 et 1 282,71 (rappelons que  $1K = 1^\circ C + 273$ ). Les paramètres  $L_{\min}$  et  $L_{\max}$  sont en unités de flux par micromètre et expriment respectivement le niveau le plus bas et le niveau le plus haut du flux mesurable par le capteur. Ces niveaux correspondent aux comptes numériques qui s'établissent de 1 ( $CN_{\min}$ ) à 255 ( $CN_{\max}$ ).

Ces nouvelles bandes sont sauvegardées et à partir de là chaque image possède sept bandes de 8 bits (originales) et trois de 32 bits (créées). La 8<sup>ème</sup> bande est l'indice NDVI, la 9<sup>ème</sup> est la luminance et la 10<sup>ème</sup> celle de la température en degrés Celsius.

- **Quatrième étape**

L'image satellite du 27 juin 2005 est la seule qui regroupe l'ensemble de la CMM au complet (cf. fig. 2.3b). Elle a donc été choisie pour être l'image de référence. Dans le volet *Ortho Engine* de PCI, il est possible de corriger cette image géométriquement et de rehausser les distorsions grâce au vecteur du réseau routier fourni par la CMM (cf. tableau 2.2). Il suffit de prendre une vingtaine de points de contrôle précis (cf. fig. 2.6) et reconnaissables dans les deux images sur l'ensemble de la CMM (intersection de rues, ponts etc.), pour que l'image soit géoréférencée.



Source: Réseau routier de la CMM, Ville de Montréal, 2004 (échelle 1/200000)



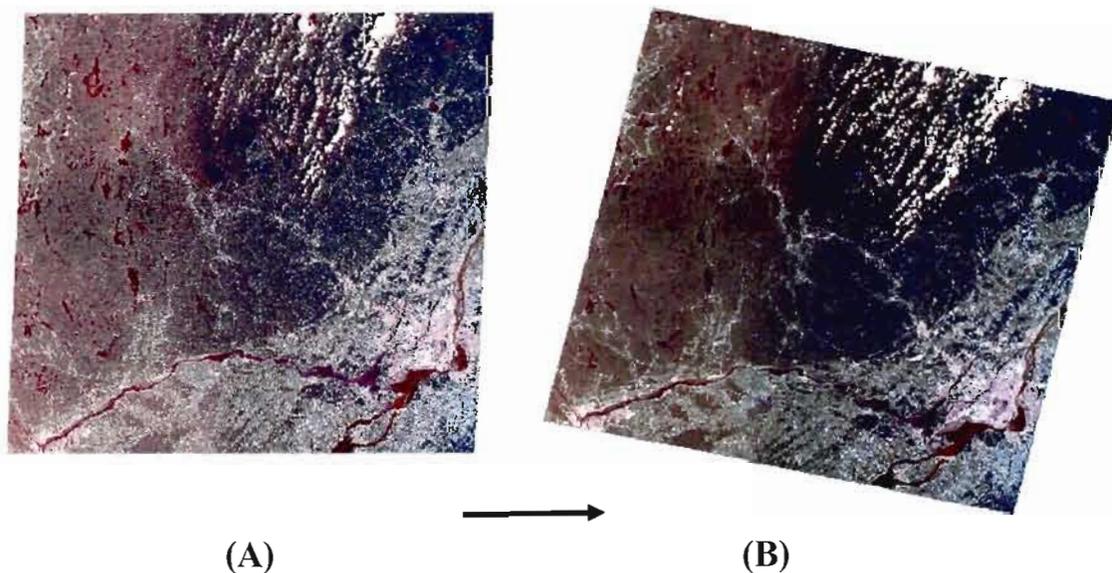
**Figure 2.6** Corrections géométriques d'une image Landsat 5 grâce à l'emplacement du réseau routier.

Source: Capteur TM Satellite Landsat 5, 27 juin 2005

Il s'agit ensuite de rectifier les neuf autres images Landsat de la même manière grâce à cette référence commune. Dans ce cas, la transformation se fait à l'aide d'une autre image de référence (juin 2005). Les images sont recadrées dans une approche dite «polynomiale, selon la méthode de l'algorithme du plus proche voisin» avec une résolution des pixels de 30 m par 30 m pour toutes les bandes incluant aussi la bande du thermique (qui a été rééchantillonnée). Selon le manuel *Précis de télédétection*, (cf. p. 50, Caloz et Collet, 2001), la moyenne des résidus ou des erreurs RMSE (*Root Mean Square Error*) doit être inférieure à 0.4 pixel pour que les résultats soient des plus significatifs (cf. tableau 2.3).

**Tableau 2.3** Répartition de dix points de contrôle sur la CMM, entre l'image de référence (juin 2005) et une autre image à corriger (ici l'exemple de juillet 1992).

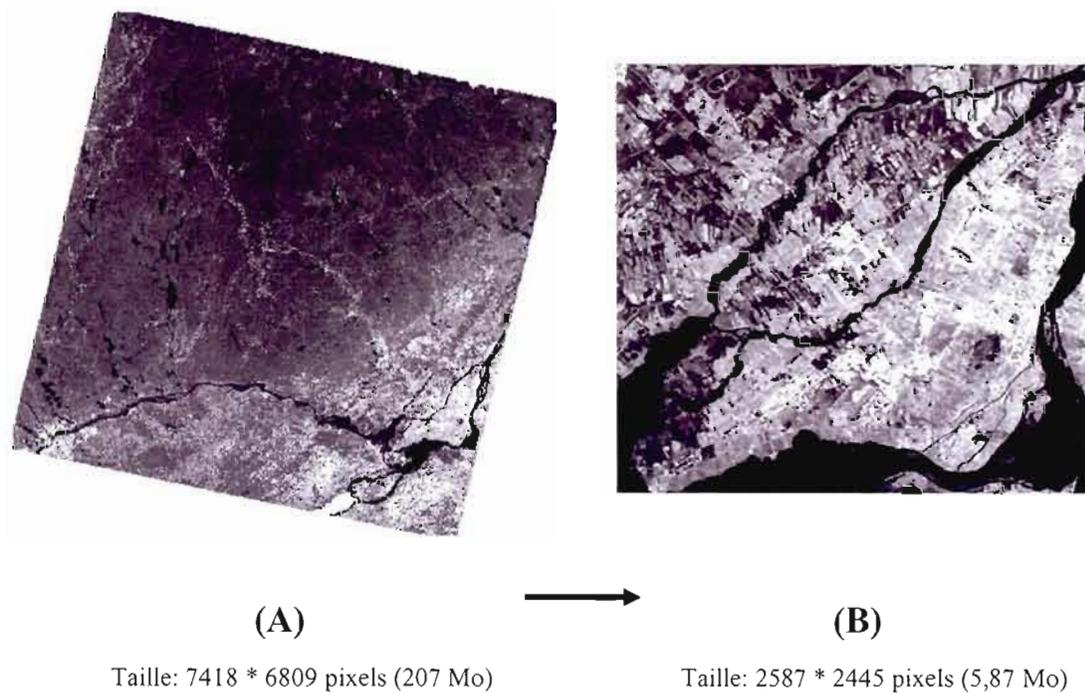
Point	X source	Y source	X Map	Y Map	Résidus
1	6305.5	2744.5	629985.469	5086664.531	0.11
2	5856.5	5043.5	602985.000	5021805.938	0.44
3	4655.5	4050.5	573644.766	5058195.000	0.14
4	6197.5	4070.5	618855.469	5048355.000	0.06
5	5954.5	4716.5	607845.000	5030833.594	0.19
6	5305.5	4286.5	511345.469	5047364.531	0.24
7	4909.5	5160.5	574455.469	5024055.000	0.07
8	5724.5	3637.5	607545.000	5063924.063	0.33
9	5588.5	4618.5	597674.647	5035904.531	0.25
10	5157.5	4901.4	583305.000	5030176.172	0.14
					<b>Total RMSE 0.197</b>



**Figure 2.7** (A) Image satellite brute du 27 juillet 2003 non corrigée et (B) même image corrigée géométriquement et géoréférencée par rapport à celle de juin 2005.

Source: Capteur TM Satellite Landsat 5, bandes 1 à 7, 27 juillet 2003.

Après avoir obtenu une correction géométrique et géoréférencé les images, on crée une sous-image (un clip sur une sous région) qui couvre une surface au sol plus restreinte (cf. fig. 2.8). Ces nouvelles délimitations vont être réalisées uniquement pour les bandes utilisées, c'est-à-dire celles du NDVI (8) et celle de la température (10).



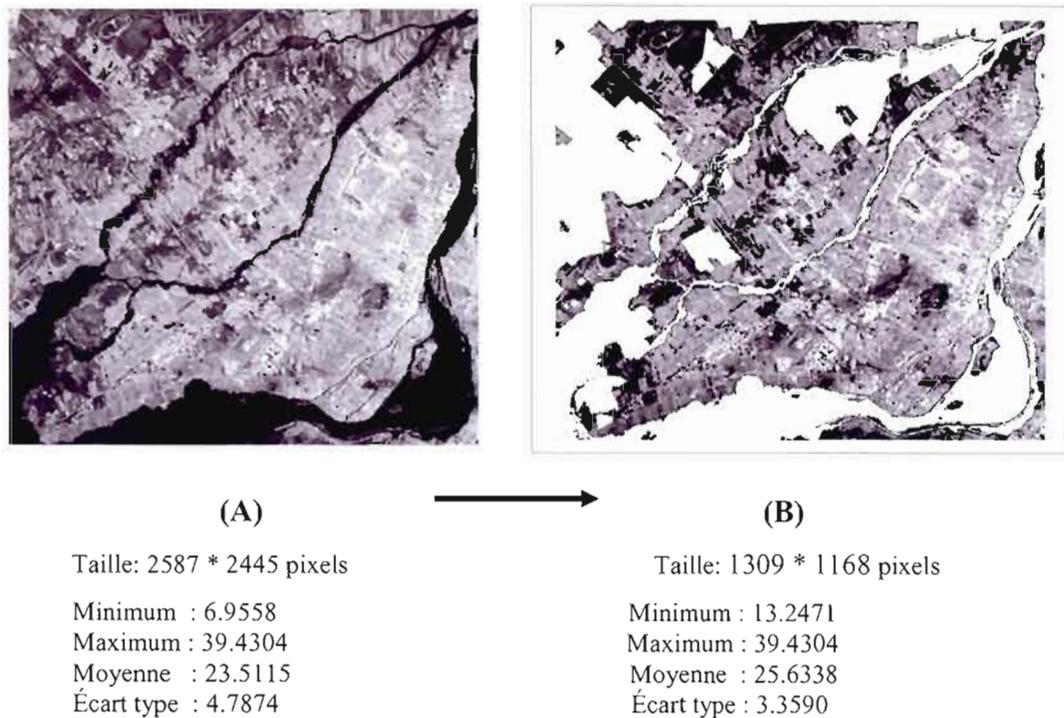
**Figure 2.8** (A) Format d'origine et (B) nouvelle zone d'étude définie dans un *clip* commun.

Source: Capteur TM Satellite Landsat 5, bande 10 créée (°C), 20 juin 2000.

Une fois les images obtenues, celles-ci doivent être sauvegardées et exportées d'un format PIX (PCI) vers un format IMG (ArcMap), afin de poursuivre les étapes subséquentes dans un logiciel différent.

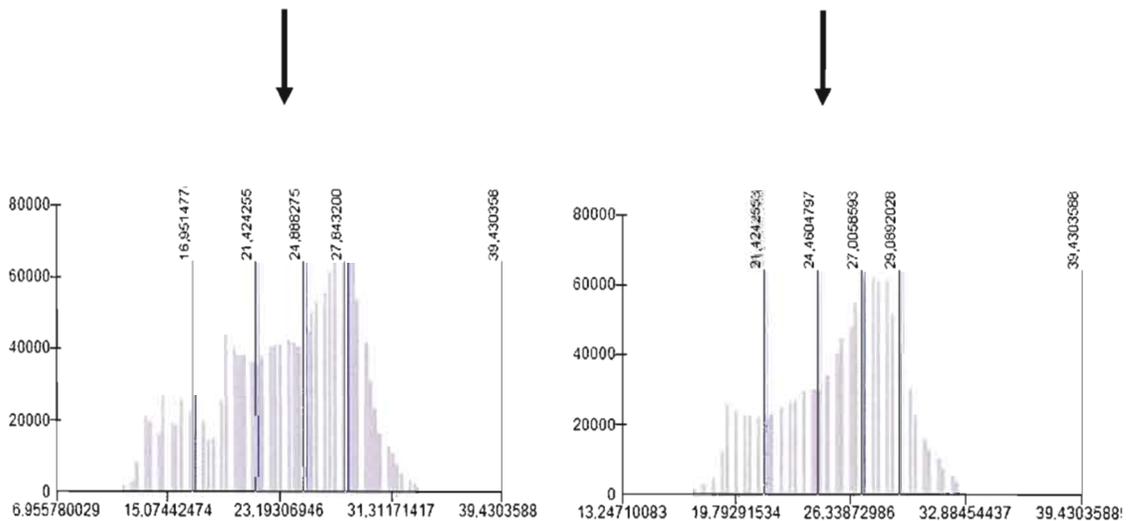
- **Cinquième étape**

À la différence de l'étude de Guay (2003) qui se basait sur une seule image satellite de Landsat 7 de la CMM (11 août 2001), notre étude suit l'évolution interannuelle du comportement thermique des îlots de chaleur à travers une série de 10 images prises pendant la saison estivale. Pour les raisons citées ultérieurement, des masques sont créés afin d'exclure les valeurs au-dessus de l'eau et des zones agricoles (cf. fig. 2.9 et 2.10).



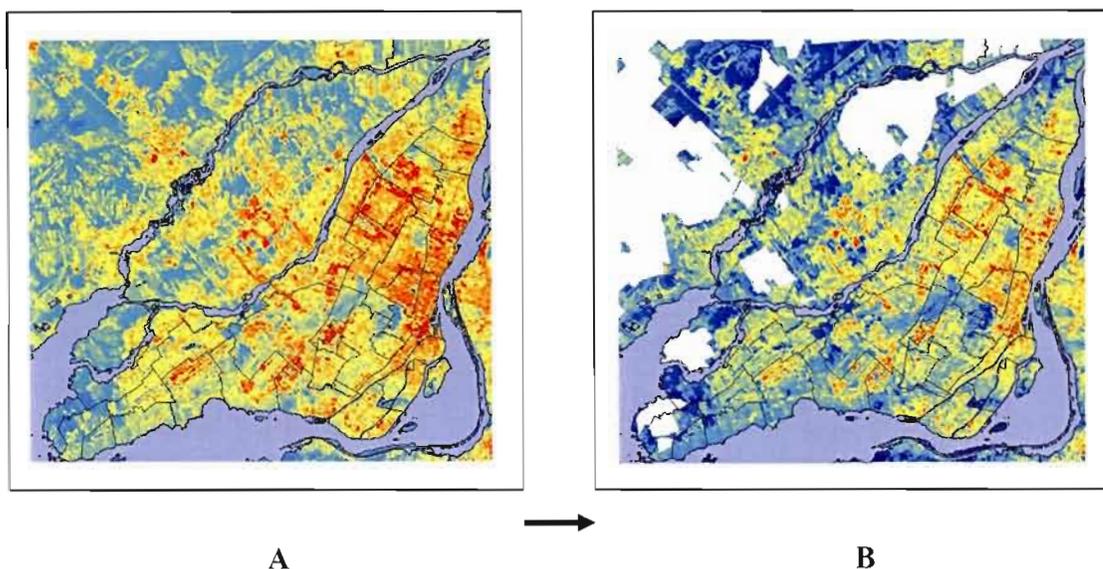
**Figure 2.9** (A) Image délimitée avant le masque et (B) même image avec le masque.

Source: Capteur TM Satellite Landsat 5, bande 10, 18 juin 1996.



**Figure 2.10** Histogrammes de distribution de fréquence des pixels avant (à gauche) et après le masque (à droite). Nombre de pixels en ordonnée et degrés Celsius en abscisse.

Après l'application du masque, la valeur minimale passe de 6,95 à 13,24°C pour cette image, l'écart type de 4,78 à 3,35 et la moyenne est rehaussée de 23,51°C à 25,64°C. La figure 2.10 montre ce changement dans la distribution de fréquence des pixels pour la zone d'étude. Les différences de température entre les zones urbanisées se distinguent clairement après l'application du masque (cf. fig. 2.11).



**Figure 2.11** (A) Cartes avant et après (B) l'application du masque qui exclut les valeurs de l'eau et des zones agricoles inutiles à l'étude.

Source: Capteur TM Satellite Landsat 5, bande 10, 18 juin 1996

- **Sixième étape (classification)**

Ces images ont été prises de juin à août. Ainsi on ne peut pas prendre seulement les valeurs brutes en considération, car un mois de juin peut être plus chaud qu'un mois de juillet selon les conditions météorologiques du moment. Nous devons donc classer l'information en valeurs relatives, par rapport à la moyenne thermique de chaque image.

Pour ce faire deux méthodes vont être utilisées : celle des écarts type et celle des centiles ou *percentiles*. Il sera alors possible de réaliser des cartes choroplèthes (i.e. qui illustrent les variations et l'intensité d'un phénomène par des plages de couleurs), utiles pour l'interprétation de l'information (Palsky, 1996).

- L'écart type (cf. équation 7) est la mesure de dispersion la plus couramment utilisée en statistique. Il mesure la dispersion autour de la moyenne.

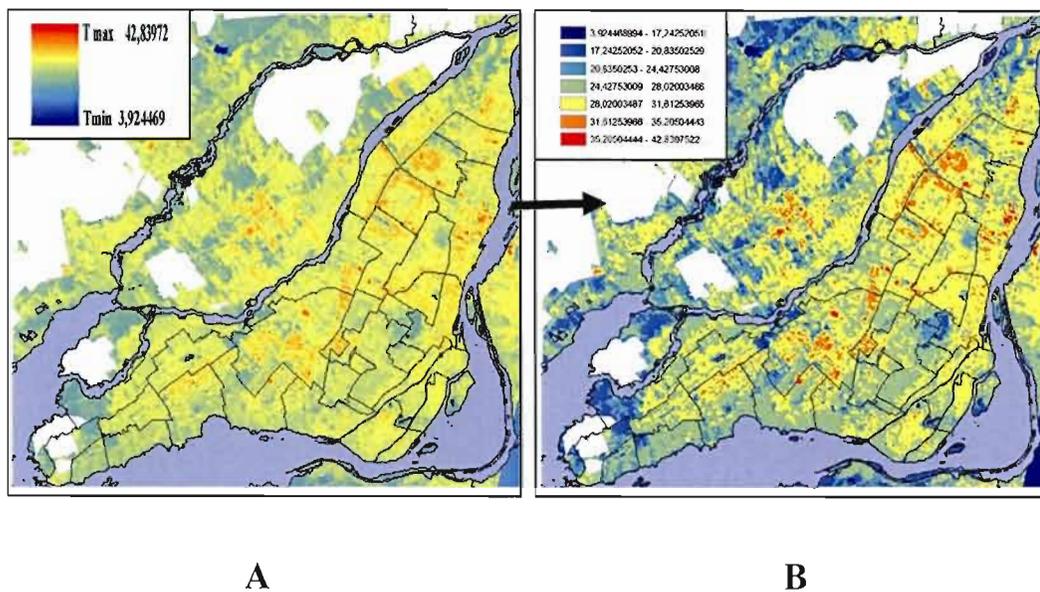
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - X)^2}{n}} \quad (7)$$

Où :

$\sigma$  = Racine carrée de la variance  
 $n$  = nombre d'observations  
 $x$  = valeur individuelle dans l'ensemble de données  
 $X$  = moyenne

Prenons l'exemple d'une image dont la température moyennée à partir de tous les pixels serait de 25°C. L'écart type obtenu pour cette journée serait par exemple de 2,5. La classification selon un écart type serait une première classe à 25, puis la seconde jusqu'à 27,5 ( $1\sigma$ ) puis la troisième jusqu'à 30 ( $2\sigma$ ) etc. Il en est de même pour les classes situées avant la moyenne, avec une allant jusqu'à 25, une autre seulement jusqu'à 22,5 ( $-1\sigma$ ), une autre à 20 ( $-2\sigma$ ) et ainsi de suite.

Ainsi les zones beaucoup plus chaudes que la tendance centrale, c'est-à-dire les îlots de chaleur, vont se distinguer plus facilement du reste que si les plages de couleur sont définies aléatoirement par intervalle s'étirant depuis le minimum jusqu'au maximum de température (cf. fig. 2.12).



**Figure 2.12** (A) Carte avant la classification (*étirée*) et (B) après la classification avec plus ou moins un écart type à la moyenne.

Source: Capteur TM Satellite Landsat 5, bande 10, 18 juin 1996

- **Les percentiles**

En statistique descriptive un centile correspond à chacune des 99 valeurs qui divisent les données triées en 100 parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/100 de l'échantillon. La dénomination anglaise – *percentile* – s'utilise souvent.

- le 1<sup>er</sup> centile sépare le 1 % inférieur des données.
- le 98<sup>e</sup> centile sépare les 98 % inférieurs des données.

Prenons ici l'exemple de l'image de 1986 pour le 90<sup>ième</sup> percentile. Grâce à la formule du 9<sup>ième</sup> décile ou du 90<sup>ième</sup> percentile, il est possible de trouver la valeur seuil propre à chaque image, qui séparera les 10% des valeurs les plus chaudes du reste.

**Tableau 2.4** Limites des classes et fréquences pour l'exemple du calcul du 90<sup>ème</sup> percentile de 1986.

Limite des classes	Fréquence (pixels)	Fréquence cumulée
7.4527 - 9.7398 °C	294	294
9.7398 - 12.0268 °C	2 400	2 694
12.0268 - 14.3139 °C	12 463	15 157
14.3139 - 16.6010 °C	103 391	118 548
16.6010 - 18.8881 °C	244 480	363 028
18.8881 - <b>21.1751</b> °C	303 027	<b>666 055</b>
21.1751 - 23.4622 °C	305 256	<b>971 311</b>
23.4622 - 25.7493 °C	46 663	1 017 974
25.7493 - 28.0363 °C	1 399	1 019 733
28.0363 - 30.3234 °C	146	1 019 519

Les valeurs du tableau 2.4 sont obtenues grâce au logiciel ArcMap. Ce dernier délimite dix classes distinctes qui vont par la suite permettre de définir le seuil du percentile que nous recherchons, c'est-à-dire ici le 90<sup>ème</sup> percentile (ou 90p).

La formule à attribuer au calcul d'un percentile est la suivante (cf. équation 8);

$$V \text{ sup} + \left( \text{Int} \times \left( \frac{P - V \text{ inf } \Sigma}{V \text{ sup } \Sigma - V \text{ inf } \Sigma} \right) \right) \quad (8)$$

où

- $V \text{ sup}$  = Valeur supérieure de la classe (en rouge)
- $\text{Int}$  = Intervalle entre les classes, qui est de **2.2871**
- $P$  = Le 90<sup>ème</sup> percentile est égal à **917 569.8** car il y a 101 952 pixels (soit 10%), il se trouve donc entre les fréquences cumulées de **666 055** et **971 311** dans le tableau.
- $V \text{ inf } \Sigma$  = Valeur inférieure des fréquences cumulées (en bleu)
- $V \text{ sup } \Sigma$  = Valeur supérieure des fréquences cumulées (en vert)

Donc, le 90<sup>ème</sup> percentile pour 1986 est égal à :

$$21.1751 + \left( 2.2871 \times \left( \frac{917569.8 - 666055}{971311 - 666055} \right) \right)$$

$$= \mathbf{23,0595 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Pour l'image acquise le 26 août 1986, le 90<sup>ème</sup> centile correspond au seuil thermique de 23,05°C. Pour cette étude qui cherche à localiser les zones les plus chaudes, des résultats plus précis sont obtenus grâce au 98<sup>ème</sup> percentile.

## **2.5 Analyse en composantes principales (ACP) pour une étude diachronique des ICU**

Les algorithmes de classification assignent automatiquement une classe à chaque pixel, à partir des moyennes ou intervalles de classes prédéterminées. Des méthodes expérimentales ont été appliquées pour étudier ces phénomènes d'îlots thermiques : en comparant les stations urbaines et rurales (Figuerola et Mazzeo, 1998), en analysant les longues séries de température (Karaca et *al.*, 1995), via un transect effectué au sein d'une ville (Montavez et *al.*, 2000) et via l'utilisation des satellites (Lee, 1998).

L'analyse en composantes principales (ACP), qui permet de réaliser des analyses multivariées, est utilisée pour notre étude afin de faire ressortir le changement dans la végétation et les températures. En télédétection on l'utilise avant les traitements numériques proprement dits tels que le filtrage ou l'analyse d'images diverses. Elle consiste à calculer la moyenne temporelle ou spatiale d'un échantillon, établie à partir d'un critère donné, comme par exemple des anomalies thermiques (Lillesand et Kiefer, 1987). Les images d'une même scène enregistrée suivant les différentes bandes spectrales du capteur sont hautement corrélées. Le but de l'analyse en composantes principales, compte tenu de l'abondance

d'information à traiter, est d'éliminer la redondance entre les bandes et de condenser ces données originelles en de nouveaux groupements de façon à ce qu'ils ne présentent pas de corrélation entre eux, et soient ordonnés en termes de pourcentage de variance apportée par chaque composante (Scanvic, 1983). Ainsi, la première composante principale contient les informations relatives à la variance maximale, la deuxième contient les informations relatives à la variance suivante, etc. Le processus est répété jusqu'à l'obtention de la n-ième et dernière composante principale. Les pertes d'informations diminuent d'une étape à la suivante (Jensen, 1986).

Les différentes opérations de l'ACP sont (cf. Richards, 1986) :

- Le calcul des matrices de covariance et de corrélation de l'image multispectrale; ce sont des matrices dont la dimension est égale au nombre des canaux spectraux de l'image;
- Le calcul des valeurs et vecteurs propres de la matrice de covariance (selon l'algorithme de Jacobi);
- Le calcul des composantes principales de l'image multispectrale; le nombre des composantes est au plus égal à celui des canaux spectraux.

L'étude de Piwowar et LeDrew (1997) a permis grâce aux ACP d'identifier les différentes conditions de la glace arctique entre 1978 et 1987. Les résultats ont montré que les ACP jouent un rôle primordial dans l'identification des modes de variation et de changement d'une séquence d'images multi-temporelles. Naizot et *al.* (2004) ont également utilisé la méthode des ACP sur une série de trois dates d'images Landsat 5 TM au-dessus de la région de la Camargue dans le sud de la France. Cette méthode a permis de séparer les structures permanentes de la végétation, de leurs variations annuelles. Les cartes obtenues ont fait apparaître les systèmes d'irrigation mis en place par l'homme.

L'ACP est une fonction statistique préprogrammée sous PCI. Elle sera par la suite appliquée sur des bandes thermiques d'une part, et d'autre part sur les bandes du NDVI, selon des paires définies à partir des différentes images disponibles. Ces paires seront établies selon les similitudes météorologiques entre les dates (cf. section 2.3), et l'ACP permettra d'analyser l'évolution synchrone des images.

Dans la suite, les résultats seront présentés selon des plages de couleurs. Les changements positifs (rafraîchissement ou re-végétalisation) seront dans la gamme du bleu alors que les changements négatifs (réchauffement ou perte de surface végétale) seront dans celle du rouge.

## 2.6 Conclusion

Beaucoup de facteurs seraient à prendre en considération pour déterminer de façon exhaustive le devenir des températures et des îlots de chaleur. Il faudrait retenir par exemple les fluctuations des niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent qui entoure la ville, la force et la direction des vents dominants, qui localement varient selon les modifications du type d'occupation du sol (effet Venturi<sup>19</sup>), ou encore les ratios entre les superficies recouvertes d'asphalte, de goudron, de gravier, de verdure et autres caractéristiques de surface. Dans notre étude, reposant principalement à l'échelle régionale sur des informations ponctuelles à travers deux décennies, ce sont principalement les indices de végétation, observables à grande échelle grâce aux satellites, qui semblent être les plus en mesure de contrôler les températures de surface, via les changements dans les flux radiatifs de chaleur latente et de chaleur sensible.

---

<sup>19</sup> Lorsque l'air rencontre un étranglement (immeubles par exemple), il se produit une accélération pour conserver le débit initial. C'est cette accélération que l'on nomme « l'effet Venturi », nom de son inventeur italien.

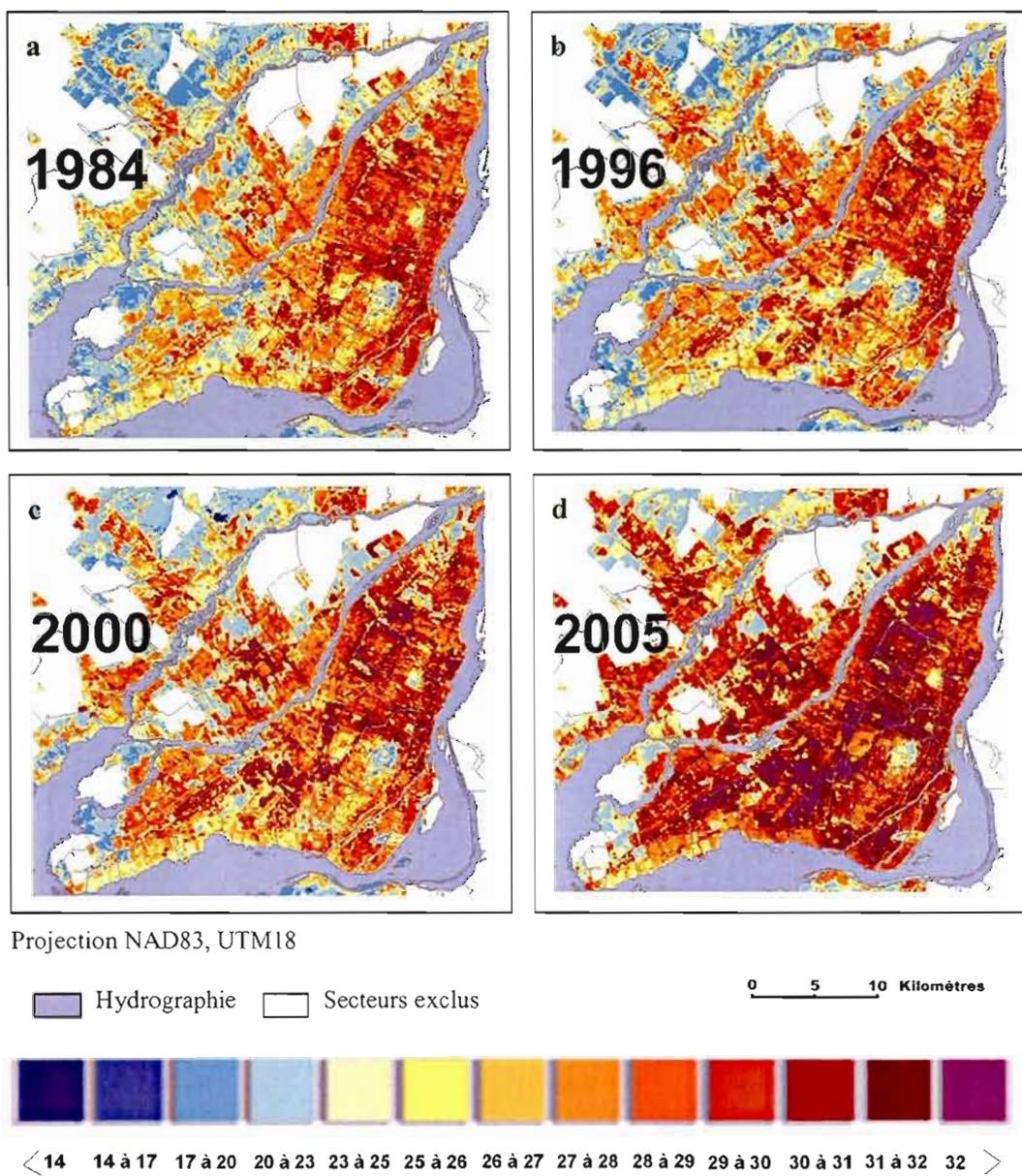
## CHAPITRE III

### RÉSULTATS

#### 3.1 Les cartes thermiques de la CMM

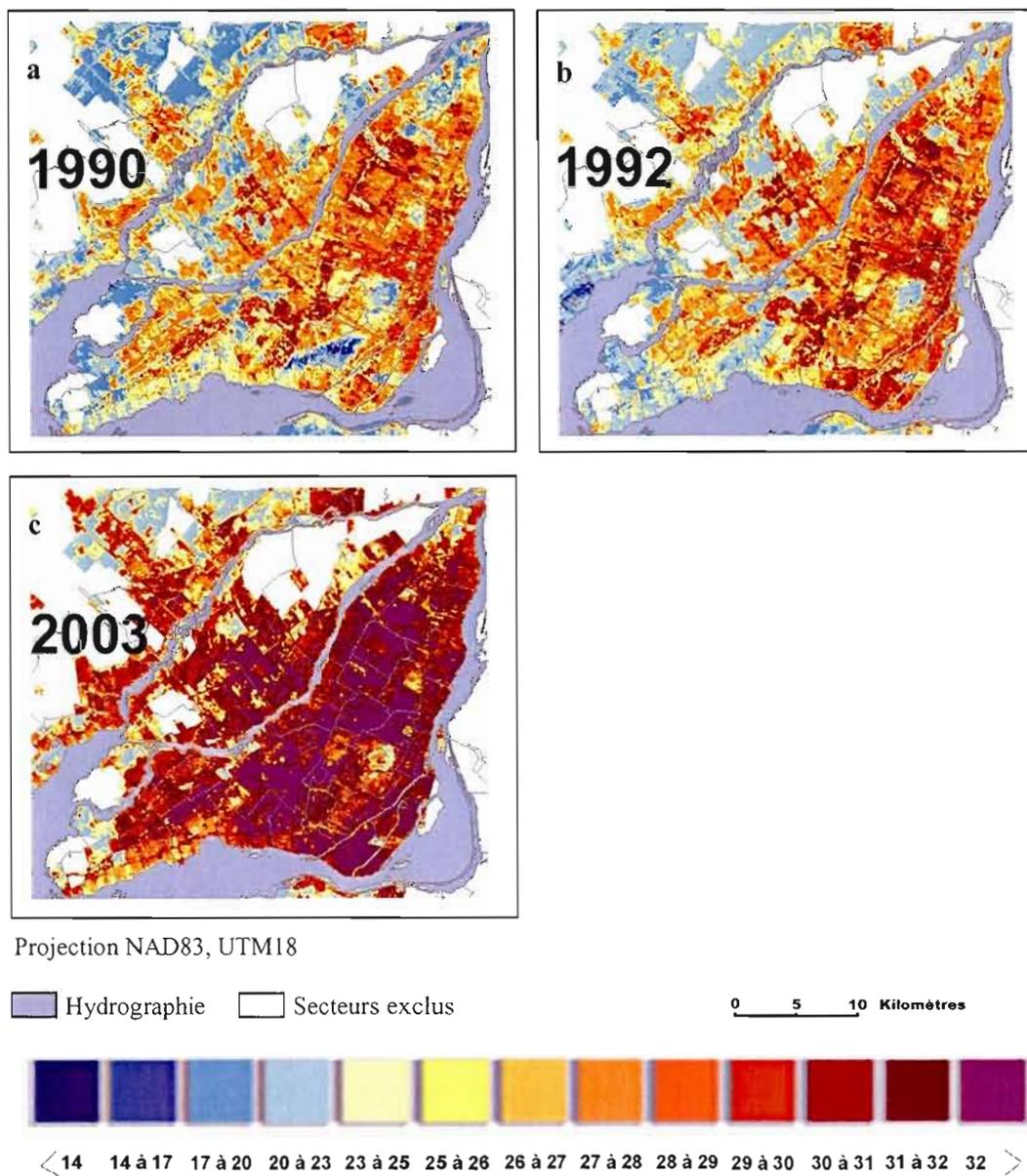
Dans cette section, des séries de cartes sont réalisées afin de permettre une visualisation claire de la dynamique thermique de Montréal et ses environs. Les figures 3.0 à 3.2, présentent la répartition des températures sur les dix dates sélectionnées, durant les mois de juin, juillet et août, respectivement. Dans un premier temps, il s'agit de déterminer la répartition spatiale des températures et non pas seulement l'ampleur de celles-ci. La classification en plages de couleurs de ces premières figures est identique pour chacune des dates retenues, sans distinction entre un mois de juin ou un mois d'août. En violet, sur les trois séries de cartes, apparaissent les zones favorisant une chaleur accablante pour le corps humain, soit les valeurs supérieures à 32°C. *Il est important de rappeler qu'Environnement Canada (Montréal) utilise le seuil thermique de 33°C sur plus de 3 jours consécutifs sans atteindre le seuil de 20°C la nuit, afin d'émettre une alerte pour la chaleur accablante.* Une telle classification simplifie une visualisation rapide de la répartition des températures et une comparaison des dates entre elles.

Ces images montrent (sans pour le moment tenir compte des conditions météorologiques (cf. Annexe A), que les plages de température maximum se situaient principalement dans la moitié nord de l'île de Montréal il y a 20 ans (en particulier vers le plateau Mont-Royal). Aujourd'hui, non seulement ces maximums ont gagné en intensité, mais ils se retrouvent également vers le sud de l'île de Montréal et au centre de Laval. Les valeurs brutes issues des bandes thermiques révèlent une intensification des températures maximum au cours des deux dernières décennies et ceci quelque soit les mois pendant la saison estivale. Les mois d'août sont moins chauds que les mois de juin, et quelque soit l'année considérée.



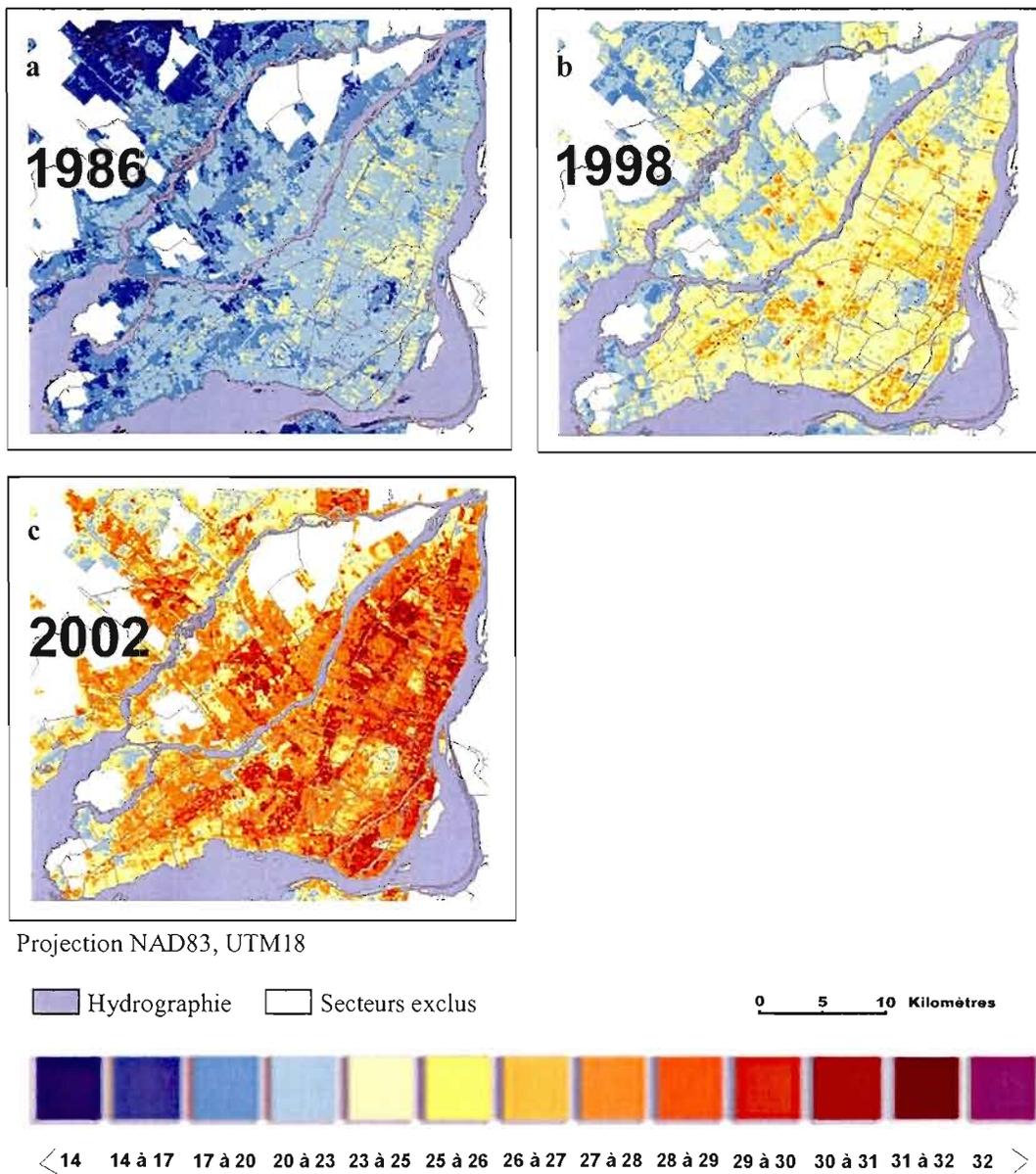
**Figure 3.0** Cartes thermiques de Montréal et ses alentours pour les mois de juin, selon une classification en valeurs brutes (degrés Celsius).

Source: bandes thermiques issues du capteur TM de Landsat 5, (a) 17 juin 1984, (b) 18 juin 1996, (c) 20 juin 2000, (d) 27 juin 2005.



**Figure 3.1** Idem figure 3 mais pour les mois de juillet.

Source: bandes thermiques issues du capteur TM de Landsat 5, (a) 11 juillet 1990, (b) 25 juillet 1992, (c) 15 juillet 2003.

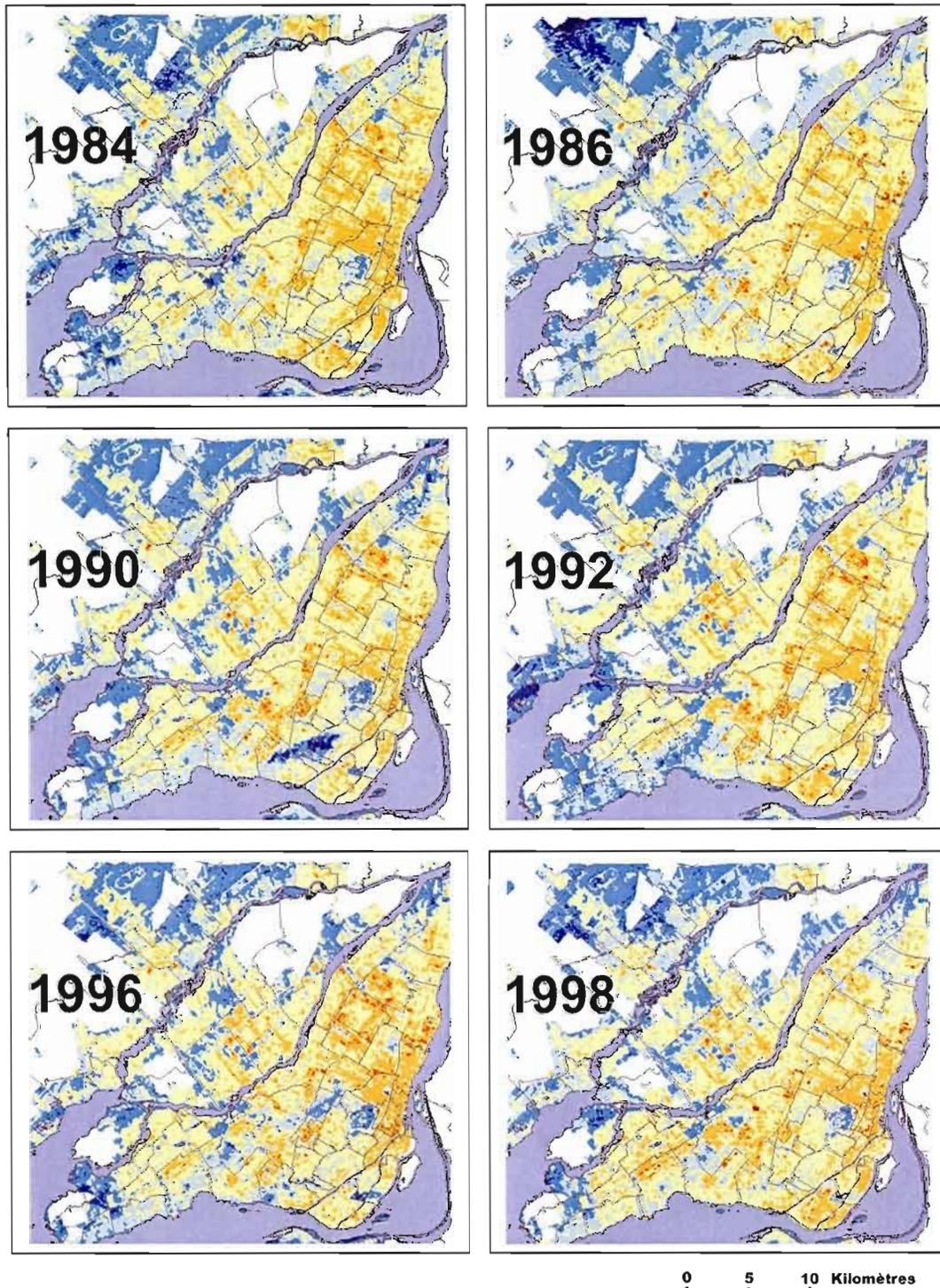


**Figure 3.2** Idem figure 3 mais pour les mois d'août.

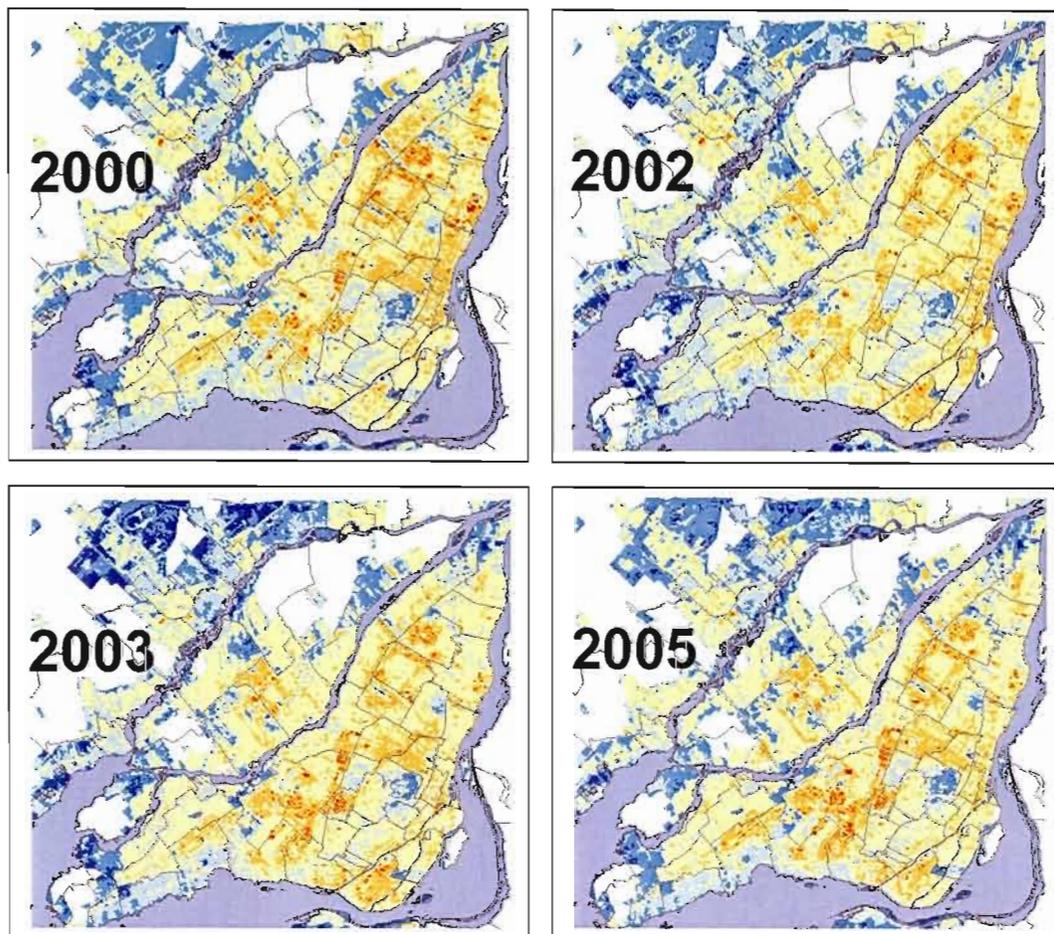
Source: bandes thermiques issues du capteur TM de Landsat 5, (a) 26 août 1986, (b) 27 août 1998, (c) 13 août 2002.

### 3.2 Comparaison des cartes en excluant le cycle saisonnier

Une classification en écarts types (Smith, 1986), exclue le cycle saisonnier (cf. fig. 3.3 et 3.4). La couleur jaune clair détermine la moyenne thermique spatiale propre à chaque acquisition d'image par le satellite. On établit les intervalles de couleur selon l'ajout ou le retrait de 1 à 4 écarts types de la moyenne. La redistribution des maximums vers le sud-ouest de l'île de Montréal ainsi que sur le centre de Laval s'observe comme dans le cas de la classification précédente. À partir de 1998, une nouvelle classe apparaît dans les températures maximales pour les mois de juin et juillet. En effet, le seuil de 4 écarts types supérieurs à la moyenne (en violet) est atteint dans les années récentes. Cette classe qui n'existait pas auparavant, représente une augmentation des maximums locaux. C'est aussi le cas pour les températures minimales où la classe de - 4 écarts types à la moyenne (bleu foncé) va disparaître et indiquer de ce fait une augmentation des températures minimales.



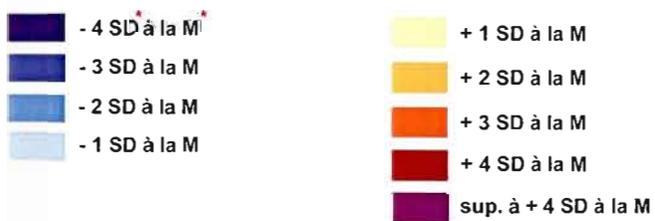
**Figure 3.3** Cartes thermiques de Montréal et ses alentours de 1984 à 1998 selon une classification utilisant  $\pm 1$  à  $\pm 4$  écarts types ajoutés à la moyenne spatiale de chaque image.



Projection NAD83, UTM18

 Hydrographie  Secteurs exclus

0 5 10 Kilomètres



(SD = Standard Deviation ie. Écart Type, M = Moyenne)

**Figure 3.4** Idem figure 3.5 mais pour les années de 2000 à 2005.

Source: bandes thermiques issues du capteur TM de Landsat 5, des années 1984 à 2005.

Comme les flots de chaleur correspondent à des zones significativement plus chaudes que les secteurs alentours, soit selon les auteurs de 5 à 10°C, des cartes utilisant un premier seuil de +5°C par rapport à la moyenne sont réalisées. Cette classification, selon des intervalles absolus fixes, est appliquée aux deux mois de juin 1984 et juin 2005, la plus ancienne et la plus récente respectivement. La figure 3.5, représente les valeurs thermiques de ces deux images selon cette classification continue au seuil de + 5°C. Étant donné que seulement deux échantillons sont représentés, l'ensemble de la CMM peut être cartographié.

Celle-ci permet de mettre en évidence les points suivants :

- L'image la plus ancienne (i.e. 1984), suggère une distribution thermique de la région de Montréal plus homogène que la période plus récente (i.e. 2005).
- Dans la période la plus récente, les ICU chauds sont désormais situés dans la partie méridionale de l'île de Montréal alors que dans certains secteurs du plateau Mont-Royal, ils semblent avoir diminués.

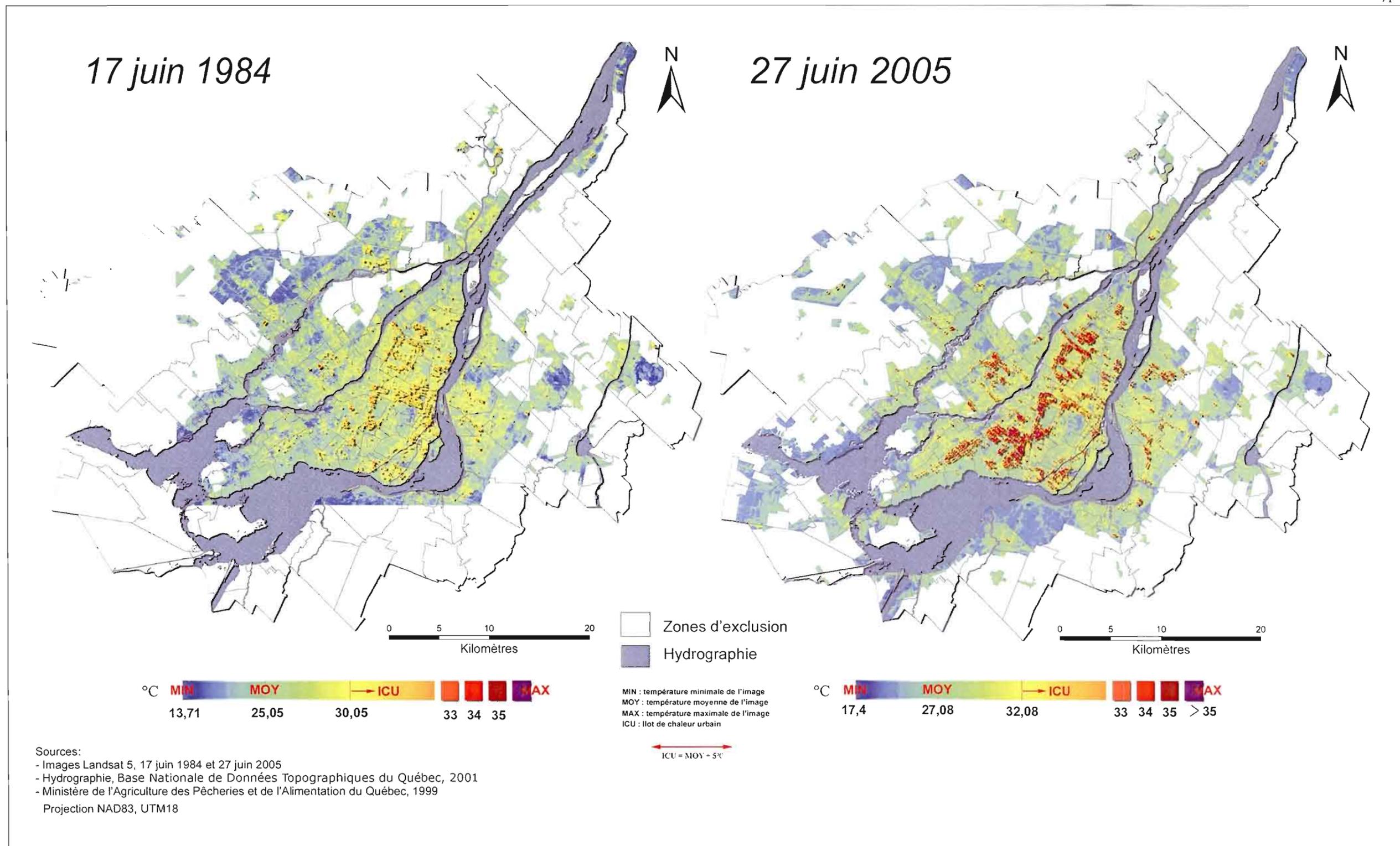
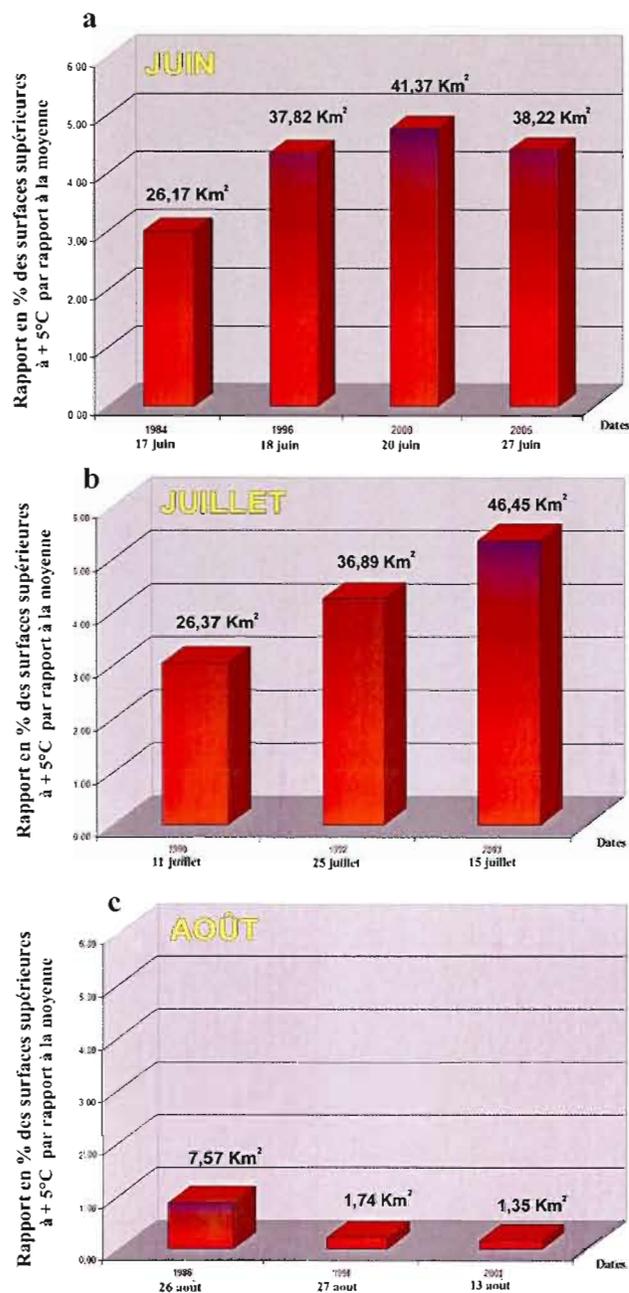


Figure 3.5 Les îlots de chaleur à Montréal entre 1984 et 2005 selon un seuil de +5°C par rapport à la moyenne

Pour chacune des années, le pourcentage de superficie couverte par les ICU au seuil de  $+5^{\circ}\text{C}$  au-dessus de la moyenne spatiale est calculé. La superficie des îlots au sol augmente pour les mois de juin et juillet au cours du temps, mais diminue pour les mois d'août. Entre les périodes de juin (cf. fig. 3.6a) et de juillet (cf. fig. 3.6b), les secteurs dont la température est d'au moins  $5^{\circ}\text{C}$  supérieure à la moyenne se situaient au-delà de  $25\text{ km}^2$  de superficie au sol jusqu'à la fin des années 1980, pour dépasser ensuite les  $35\text{ km}^2$  dans la décennie 1990, voire plus de  $40\text{ km}^2$  en 2000 (juin) et 2005 (juillet). En ce qui concerne les mois d'août (cf. fig. 3.6c), le seuil de  $+5^{\circ}\text{C}$  ne semble plus être adéquat pour définir un îlot thermique. Les variations spatiales de température sont plus faibles et l'écart thermique est amoindri. À ce seuil, seulement  $7,57\text{ km}^2$  au sol de la zone d'étude étaient propices à la formation d'ICU en 1986, contre  $1,35\text{ km}^2$  en 2002. C'est largement inférieur à 1% de l'ensemble du territoire étudié.

Afin de mieux faire ressortir les maximums locaux (ou  $T_{\text{max}}$ ) sur une région donnée, on isole ceux-ci en utilisant la méthode des percentiles. Les figures 3.7 et 3.8 représentent les 2% des températures les plus élevées pour chacune des images prises individuellement, c'est-à-dire le 98<sup>ième</sup> percentile. Selon cette classification, certains secteurs ne semblent plus faire partie des secteurs les plus chauds au seuil de 98%, comme dans le cas du plateau Mont-Royal (i.e. après les années 1990). Il en est de même pour le centre-ville dès les années 2000. Il est important de noter qu'en juin 1984, le 98<sup>ième</sup> percentile était obtenu à  $31^{\circ}\text{C}$  alors qu'il était de  $34^{\circ}\text{C}$  en juin 2005. Par ailleurs, le vent est un des facteurs les plus déterminants dans la dynamique des ICU. **Compte tenu du fait que les images ont été obtenues sans prendre en compte le facteur vent, cette analyse reste à faire.** On peut noter une similitude dans la distribution du 98<sup>ième</sup> percentile pour les deux dates de vents de secteur ouest (1990 et 2000), et une structure unique pour la seule date de vent de secteur nord-est (1996).



**NB:** Rappelons que la surface totale de la zone d'étude est de 867,39 Km<sup>2</sup>.

**Figure 3.6** Histogrammes de la superficie au sol des ICU supérieurs à + 5°C par rapport à la moyenne thermique spatiale de chaque image, pour les mois de juin, juillet et août.

Source: Statistiques obtenues par les bandes thermiques issues du capteur TM de Landsat 5, pour les mois de juin (a), juillet (b) et août (c).

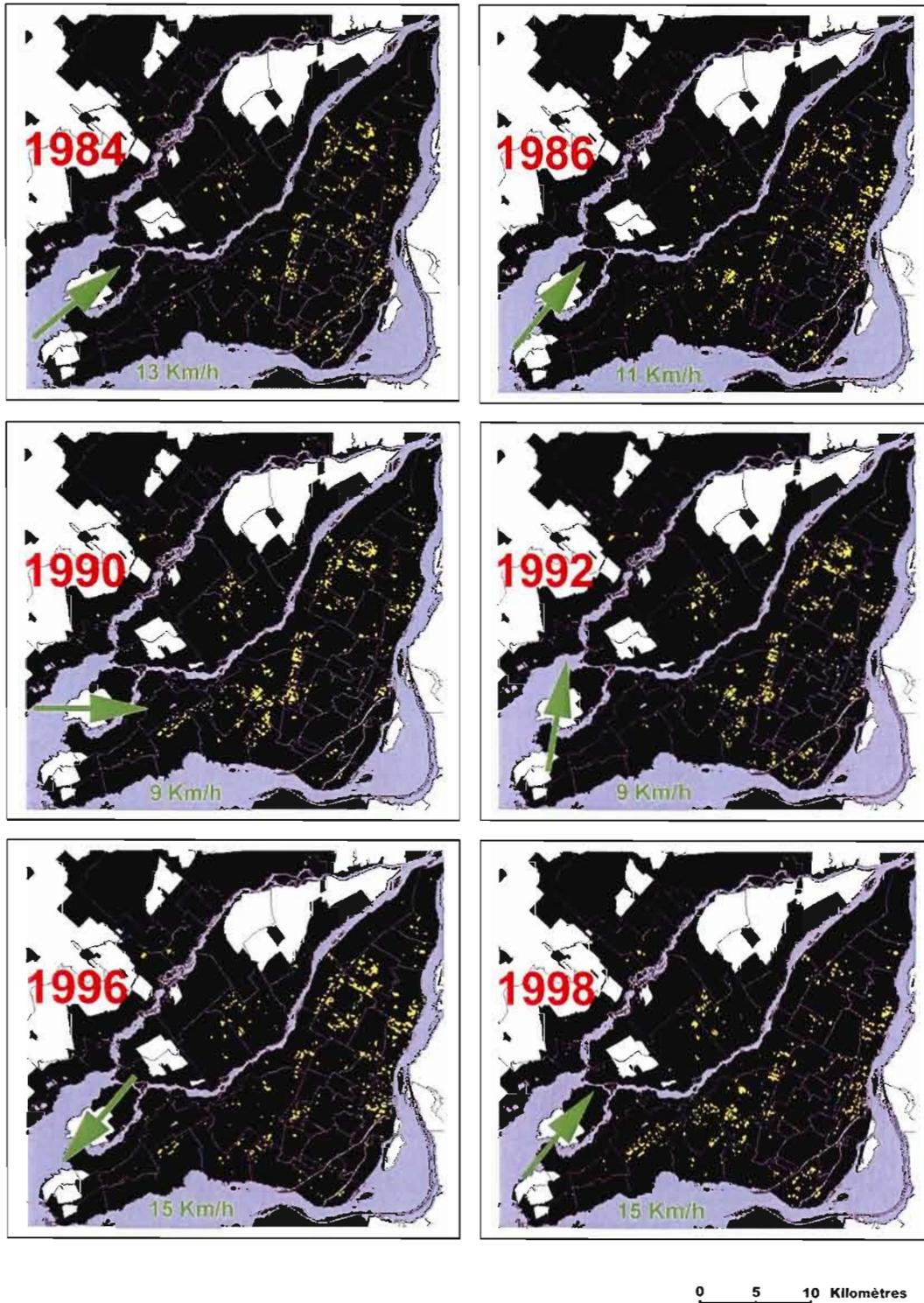
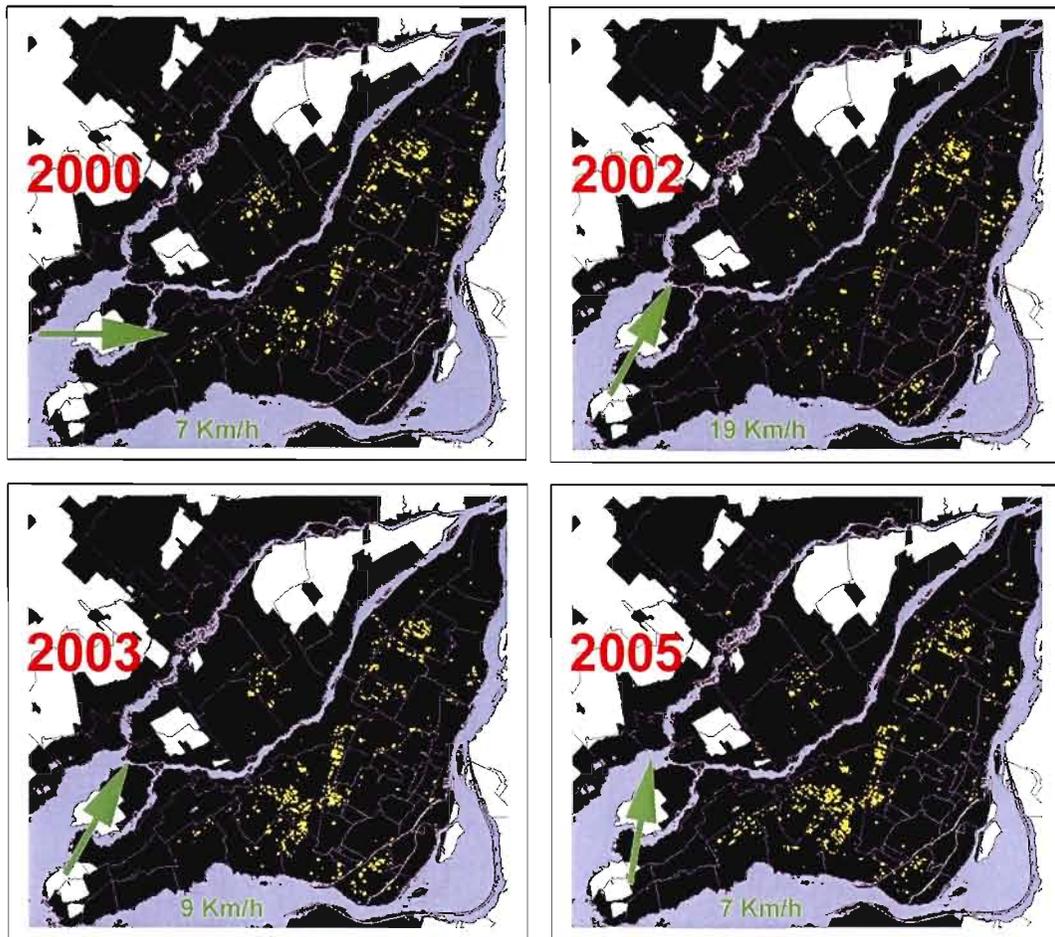


Figure 3.7 Représentation du 98<sup>ième</sup> percentile dans les températures entre 1984 et 1998.



Projection NAD83, UTM18

 Hydrographie  Secteurs exclus



 98<sup>ième</sup> percentile

 Vitesse et direction du vent (km/h) dominant à la station de Dorval (32,5 m)  
(Environnement Canada)

**Figure 3.8** Idem figure 3.9 mais pour les années 2000 à 2005.

Source: bandes thermiques issues du capteur TM de Landsat 5, des années 1984 à 2005.

Les trois critères de classification ont révélé des convergences dans la distribution des températures. Les plus forts ICU apparaissent tôt dans l'été (juin et juillet) et il y a globalement une opposition entre le comportement thermique d'il y a 20 ans et celui d'aujourd'hui. Les Tmax se situent dorénavant principalement dans la moitié sud-ouest de l'île, résultant ainsi d'une augmentation des surfaces au sol propices à la formation d'ICU.

### **3.3 Analyse temporelle via l'analyse en composantes principales**

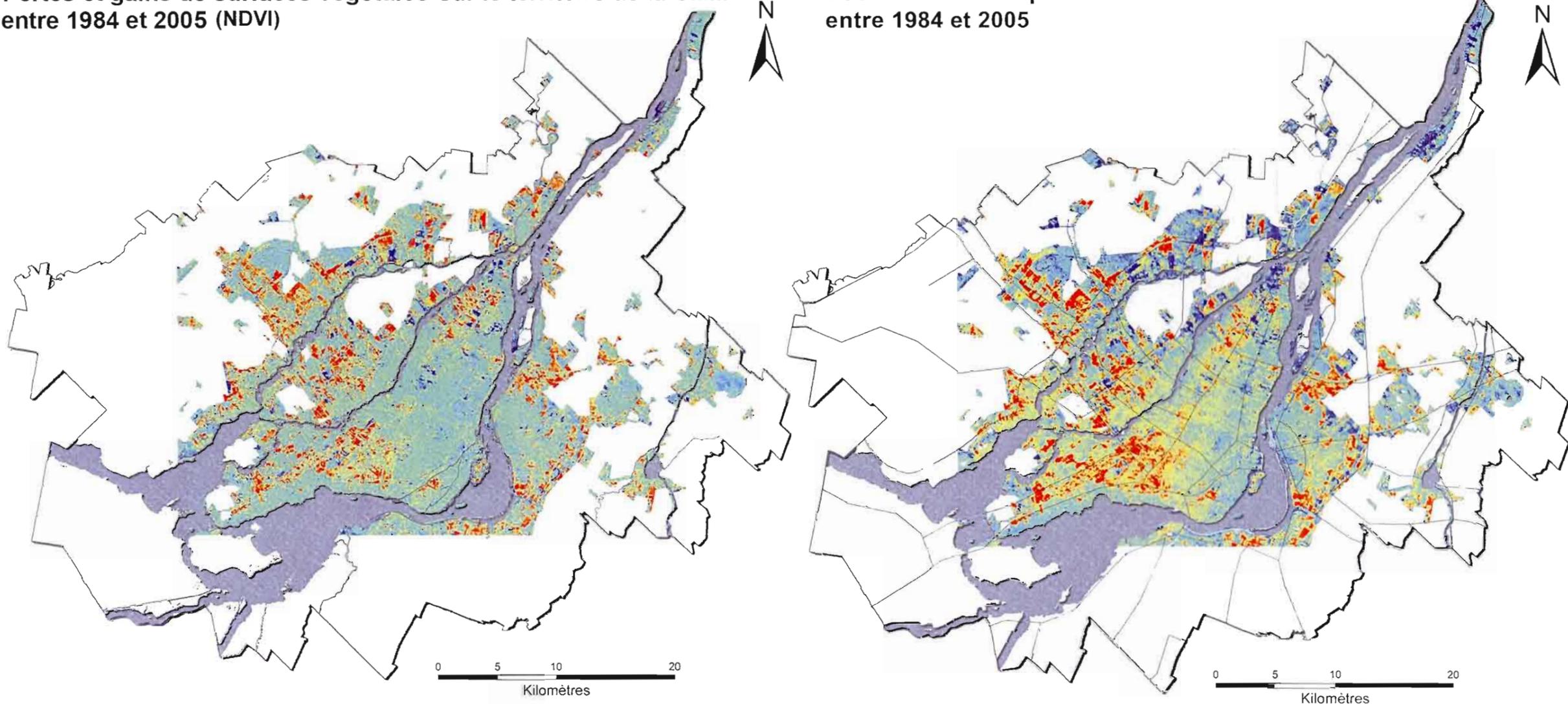
Les résultats obtenus selon des classifications par la méthode des écarts types ou encore en percentiles sont comparés ou complétés en utilisant des analyses en composantes principales (ACP). Ces dernières ont été réalisées d'une part sur les bandes thermiques de chaque image, et d'autre part, sur les bandes de l'indice de végétation. Ceci est réalisé dans le but d'analyser les regroupements potentiels sur le territoire.

Les bandes thermiques de deux dates (exemple de 1984 et de 2005) ont été isolées puis réunies dans une nouvelle image fictive de quatre bandes dont elles occupent les deux premières. Après l'application de la méthode ACP, la troisième bande est remplacée par une image traduisant la redondance de l'information entre les deux dates, alors que dans la quatrième bande, c'est la différence qui est mise en évidence, et c'est cette différence qui nous intéresse (cf. fig. 3.9). La même démarche est faite pour le NDVI des mêmes dates.

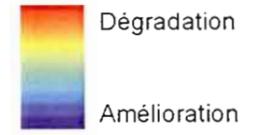
La figure 3.9 expose les résultats de ces ACP, avec ici encore les dates de juin 1984 et juin 2005 pour les bandes thermiques et le NDVI. La similitude entre les deux cartes est frappante; les variations du comportement thermique de Montréal semblent suivre celles de la végétation. Là où il y a perte de végétation, il y a réchauffement et là où la végétation a poussé ou est devenue plus mature, il y a diminution des températures les plus chaudes. Les variations des températures et de la végétation semblent fortement corrélées qualitativement. Les secteurs en rouge dans l'ACP thermique représentent les zones en réchauffement. Rappelons que l'ACP indique seulement des changements ou comportements similaires ou opposés d'une image à l'autre. Ceci signifie qu'une zone dans l'ACP thermique en bleu n'est pas forcément plus froide qu'une représentée en rouge.

### Pertes et gains de surfaces végétales sur le territoire de la CMM\* entre 1984 et 2005 (NDVI)

### Évolution des températures sur le territoire de la CMM\* entre 1984 et 2005



#### Évolution de la végétation



Zones de la CMM exclues  
Hydrographie

#### Évolution des températures



Zones de la CMM exclues  
Hydrographie  
Routes principales

ACP

Sources  
- Images Landsat 5, 17 juin 1984 et 27 juin 2005  
- Hydrographie, Base Nationale de Données Topographiques du Québec, 2001  
- Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 1999  
\* : Communauté Métropolitaine de Montréal

Détection des changements par analyse en composantes principales (facteur 2)

Projection NAD83, UTM18

Données NDVI fournies par Julien Leprince

Figure 3.9 Comparaison des ACP thermique et NDVI pour les deux seules dates de juin 1984 et juin 2005

## CHAPITRE IV

### DISCUSSION, RECOMMANDATIONS ET DÉVELOPPEMENTS FUTURS

#### 4.1 Introduction

Les effets de l'urbanisation sur l'augmentation des températures moyennes journalières de l'air à deux mètres ont été estimés de l'ordre de 0,1 à 0,4°C à l'échelle annuelle (selon les données observées) durant le siècle dernier à l'échelle de l'Amérique du Nord (Jones, 1994). Les modifications de la couverture végétale, notamment le déboisement, en raison de l'expansion urbaine, ainsi que l'importante augmentation du trafic routier, contribuent grandement à la pollution de l'air et à la dégradation de la qualité environnementale et climatique des aires urbaines.

Dans le contexte de la CMM, les analyses des images thermiques ont montré que, selon différentes méthodes de classification, des secteurs chauds continuent de se développer année après année, en particulier dans la moitié sud-ouest de l'île de Montréal. Les conditions météorologiques de chacune des images ont été considérées afin de mieux comprendre les différences pouvant exister dans la dynamique thermique au cours des décennies. Un lien évident apparaît dans les résultats entre le NDVI et la distribution spatiale des températures quelque soit les dates. Ce chapitre intitulé « Discussion, recommandations et développements futurs » expose non seulement les facteurs qui ont contribué aux variations de cette dynamique thermique de Montréal et ses alentours, mais aussi des exemples d'aménagement possible et facilement réalisable pour contrer l'effet des îlots de chaleur. Ceci permettra d'offrir des solutions plausibles aux décideurs afin d'orienter les intervenants en santé publique et en aménagement urbain.

## 4.2 Conditions météorologiques variables

L'interprétation des données thermiques d'images satellites, c'est-à-dire de l'intensité et de la distribution spatiale des températures au-dessus d'une région, n'est pas chose facile étant donné la divergence dans la force et la direction des vents, la pression atmosphérique, le fait qu'il ait plu ou non etc. Des fiches techniques de conditions météorologiques ont été créées en annexe pour chaque date (voir annexe A, *fiches techniques*).

Les ACP doivent tenir compte d'un minimum de similitude dans les conditions atmosphériques qui ont précédé l'acquisition des images. L'évolution des principales variables y est retracée pour la semaine dans laquelle chaque scène a été enregistrée (état du ciel, taux d'humidité relative, température, vitesse du vent, pression barométrique et le point de rosée). En effet, si le satellite est passé au-dessus de l'île de Montréal quelques heures après de fortes pluies, ses capteurs ne vont pas réagir de la même façon lorsqu'il est passé après plusieurs jours de fort ensoleillement. L'évapotranspiration des plantes sera beaucoup plus forte et les pelouses bien plus vertes. De même que les zones situées dans de petites dépressions géographiques accumuleront plus de chaleur par une journée ensoleillée sans vent qu'avec des vents soutenus, au-delà de 11 km/h (Morris et Simmonds, 2001).

En ce qui concerne l'indice de végétation NDVI, même si les mêmes mois ont été comparés afin de respecter le cycle saisonnier et l'état de croissance de la plante, certains mois de juin peuvent être variables (variabilité interannuelle) en termes d'avancement ou d'évapotranspiration des plantes. Le fait qu'il y ait un manque de pluie ou à l'inverse de fortes précipitations aura un impact sur le stress hydrique des végétaux.

Le décalage du levé de soleil, ou diminution du jour et de la durée d'ensoleillement (cf. tableau 4.1) diffère de juin à août. En revanche le satellite passe toujours approximativement à la même heure de Greenwich (autour de 15h). Par conséquent, aux passages du satellite en août, les matériaux de surface ont eu moins de temps pour emmagasiner la chaleur, réduisant la probabilité d'apparition de secteurs propices à la formation d'ICU.

**Tableau 4.1** Temps d'ensoleillement total des images.

Images par années	Heure d'acquisition (h/mn)	Lever du soleil (h/mn)	Temps d'ensoleillement depuis l'heure d'acquisition
17-juin-84	10h06	5h05	5h01
26-août-86	9h59	6h08	<b>3h51</b>
11-juil-90	10h04	5h16	4h48
25-juil-92	10h00	5h30	4h30
18-juin-96	9h50	5h05	4h46
27-août-98	10h16	6h09	<b>4h07</b>
20-juin-00	manquant	5h05	manquant
13-août-02	manquant	5h52	manquant
15-juil-03	10h20	5h20	5h00
27-juin-05	10h25	5h34	4h51

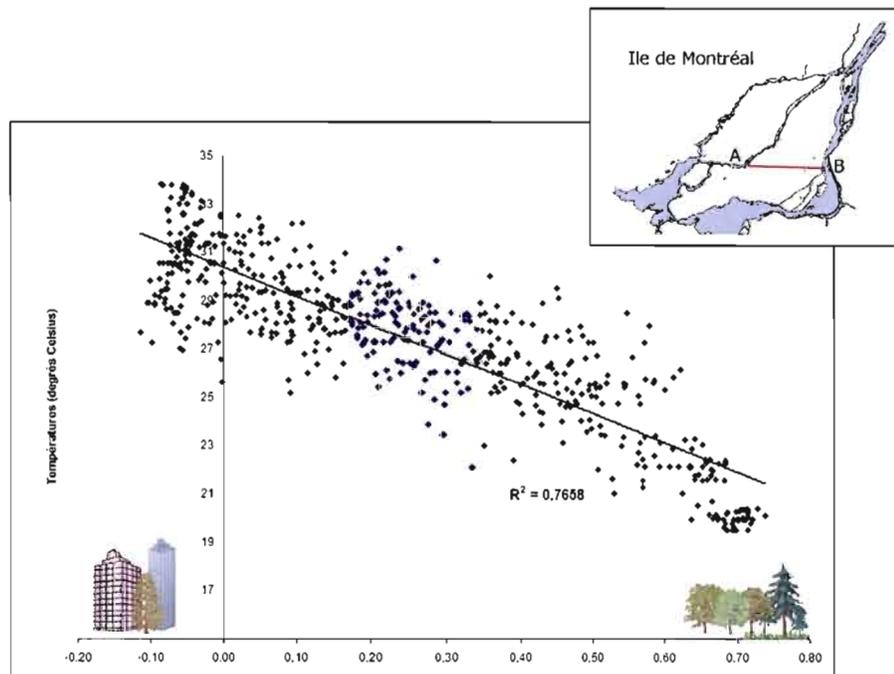
Ainsi trois paires d'images vont être formées afin d'y observer le changement dans le temps;

Les conditions météorologiques qui prévalaient le 17 juin 1984 ainsi que celles du 18 juin 1996, sont à l'origine du premier regroupement avec des températures autour de 25°C. Le 26 août 1986 et le 27 août 1998 sont sous des conditions cycloniques par temps clair, avec des taux d'humidité relative proches de 100% et des températures avoisinant les 20°C: ces deux dates seront le deuxième regroupement le plus pertinent. Quant à la date de 1992, elle va être regroupée avec 2003 car la journée précédente a été totalement ensoleillée et les températures ont dépassé rapidement les 20°C à 11 heures du matin (voir Annexe A).

Les regroupements ont été faits selon les conditions météorologiques les plus similaires, sans qu'elles soient nécessairement toutes propices à la formation des ICU. Les conditions les plus favorables auraient été dix images prises sous des journées ensoleillées depuis 24 heures et sans vent (Kassomenos et Katsoulis, 2006; Kim et Baik, 2002). En effet leurs études sur Athènes et Sydney ont montré que les ICU s'atténuent fortement lorsque les vents soufflent à plus de 11 km/h ou que la couverture et l'opacité nuageuse dépassent trois octets.

### 4.3 Liens entre le NDVI et la distribution spatiale des températures

Les ACP sur les images thermiques et NDVI suggèrent que l'évolution est synchrone entre les températures et la végétation. Ceci signifie que les secteurs boisés en 1984, qui ont perdu une partie de leur couvert végétal en 2005, se distinguent par la couleur rouge alors que ceux qui se sont améliorés par le reverdissement, se traduisent en bleu. Les zones qui n'ont pas changé apparaissent dans des couleurs pâles de jaune et de vert.



**Figure 4.0** Corrélation entre les valeurs du NDVI et celles de la température le 27 juin 2005, selon un transect AB au centre de Montréal.

Source; bande NDVI et bande thermique du 27 juin 2005, Landsat 5 TM

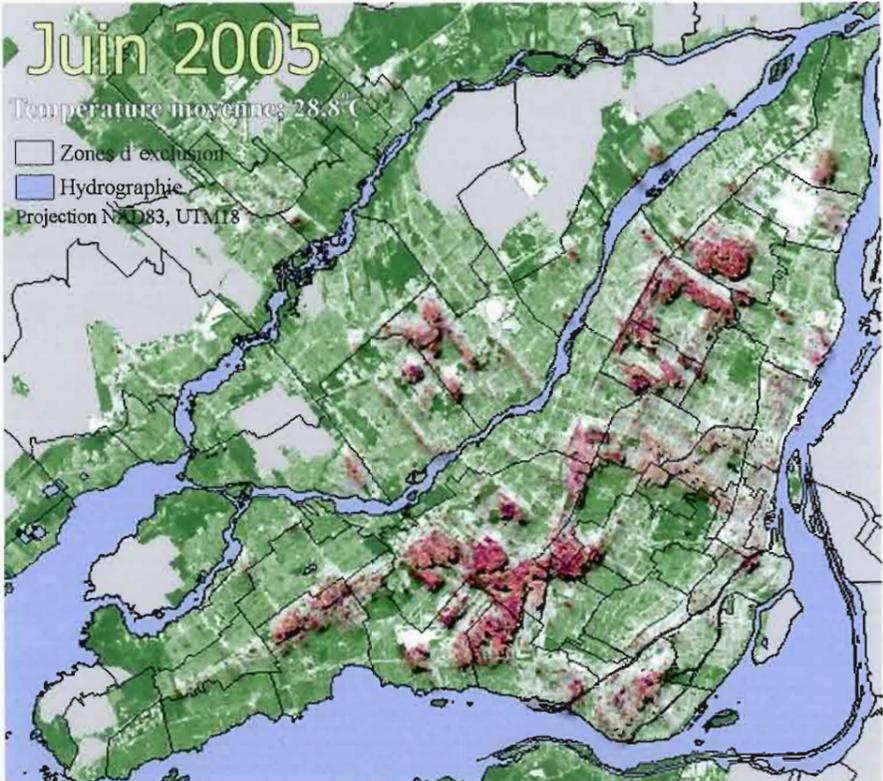
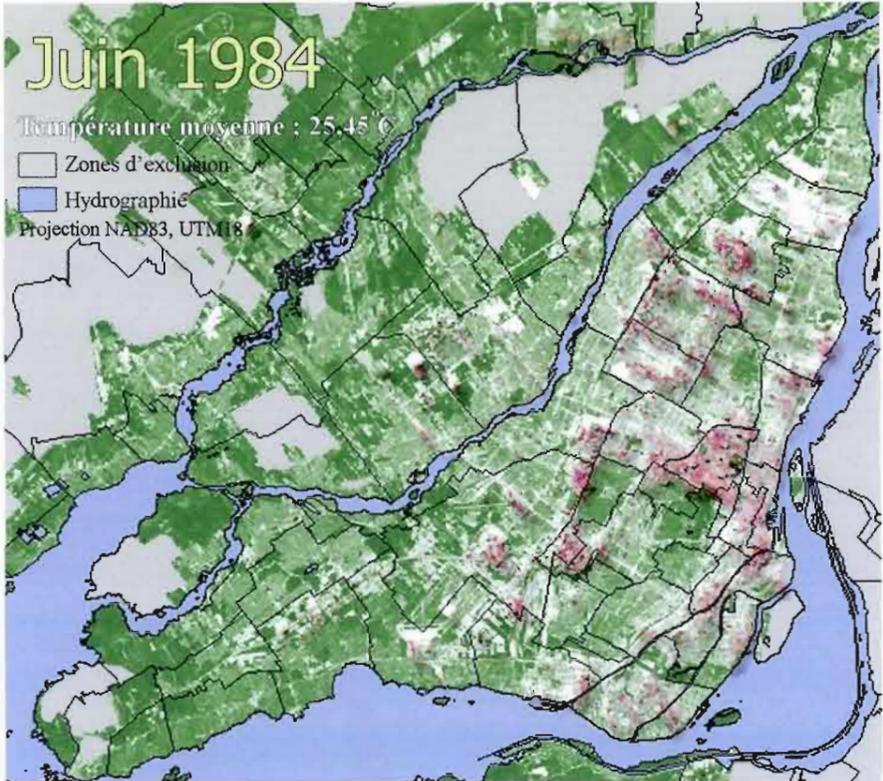
La figure 4.0 permet d'analyser la corrélation entre l'évolution de la couverture végétale et la dynamique thermique de Montréal selon un transect sur l'île de Montréal en juin 2005. Ce transect se compose de 400 pixels ou valeurs dont l'axe des abscisses représente les valeurs du NDVI (de -1 à +1) et celui des ordonnées celles des températures. La corrélation négative (cf. équation 9) est élevée (0,76) et confirme le lien entre l'augmentation des températures locales et la diminution des espaces verts.

$$LST = -12,13NDVI + 30,38 \quad (9)$$

(LST pour *Land Surface Temperature* = température de surface)

Cette forte relation de dépendance entre température et végétation se confirme également en isolant et en superposant les ICU de plus de 5°C supérieurs à la moyenne spatiale de chaque image, et les valeurs du NDVI, pour les mois de juin 1984 et 2005 (cf. fig. 4.1). Les zones blanches qui traduisent des secteurs dépourvus de végétaux (généralement des secteurs industriels), abritent les plus forts ICU alors que les espaces densément végétalisés n'en abritent aucun.

La différence entre ces deux images doit être nuancée. Il a été démontré qu'il existe bien un lien entre la densité du bâti et de la végétation et l'augmentation des contrastes locaux de température. Cependant, le fait de se baser sur un couple d'images, réduit considérablement la marge d'erreur dans le retard ou l'avancement de l'état d'éclosion des plantes. Malgré le fait que les journées soient proches dans les dates d'acquisition, l'apparition du printemps et de l'été peut différer d'une année à l'autre. Il en est de même pour d'autres variables comme la force et la direction du vent qui sont forcément différentes entre chaque image et qui peuvent amoindrir le signal ICU sans pour autant modifier celui du NDVI. Il serait intéressant dans des travaux futurs d'analyser ces liens sur tous les mois et beaucoup d'années.



végétation -1 NDVI +10°C/moyenne  
nulle NDVI dense icu

Source: bandes thermiques et NDVI créées du capteur ETM+ de Landsat 5, 17 juin 1984 et 27 juin 2005  
Figure 4.1 Représentation des ICU par rapport à l'indice de végétation NDVI, entre juin 1984 et juin 2005.

Le lien entre la répartition des plus fortes températures et celle des zones les moins végétalisées a été analysé via deux nouvelles cartes. Les trois paires d'ACP (trois périodes) citées précédemment sont superposées sur le même fond de carte pour les températures et le NDVI. Seules les valeurs maximales supérieures à 2 écarts types à la moyenne (2SD) ont été retenues pour les deux variables.

Les deux cartes obtenues sont très ressemblantes (cf. fig. 4.2). Elles indiquent que des zones ont non seulement subi un déboisement continu durant les trois périodes, mais ont aussi enregistré une hausse constante des températures les plus chaudes. Une fois encore, la différence est très nette entre l'ouest et l'est de la zone étudiée.

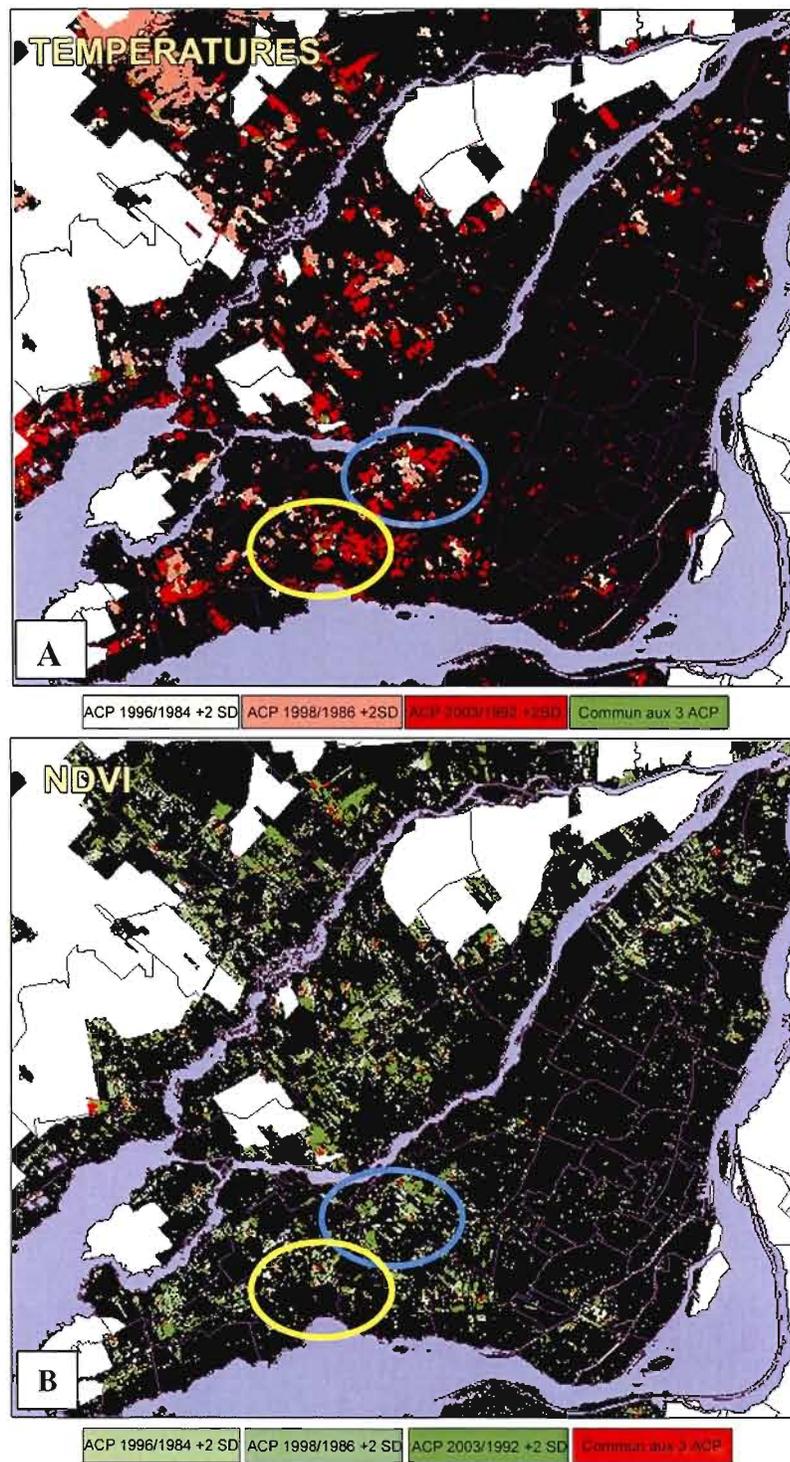
Deux secteurs se distinguent dans ces extrêmes locaux. Ils se situent dans la partie ouest de Montréal. Ces exemples sont pris en compte afin de mieux comprendre le rapport entre la dynamique thermique et la végétation :

- Le premier exemple est celui du sud de l'arrondissement Saint-Laurent, signalé dans le cercle bleu;
- Le deuxième exemple sera la ville de Pointe-Claire situé plus au sud encore dans le cercle jaune.

Des agrandissements ciblés et des comparaisons d'images aériennes et de photos de terrain vont étayer l'étude de ces exemples « *d'urbanisation propices aux îlots thermiques* ».

Puis deux exemples d'urbanisation saine seront développés par la suite.

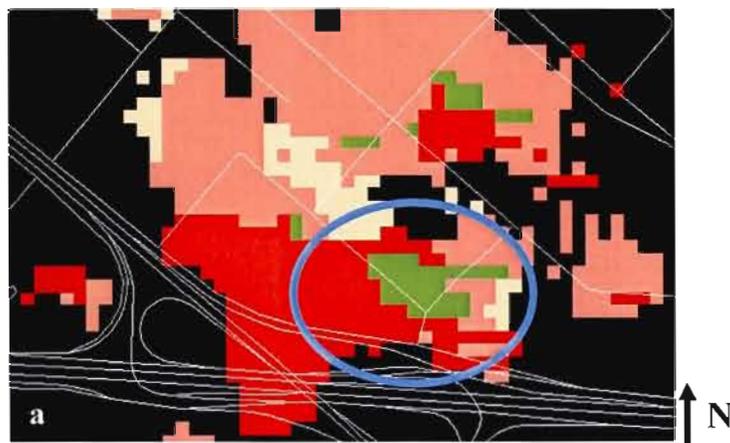
- Exemple de Terrebonne au nord de l'île de Laval;
- Exemple encore d'Ahuntsic sur l'île de Montréal.



**Figure 4.2** Cartes d'ACP des températures (A) et du NDVI (B), pour les couples 1996/1984, 1998/1986 et 2003/1992 dont les valeurs sont supérieures à + 2 écarts types.

Source: bandes thermiques issues du capteur TM de Landsat 5, des années 1984 à 2005

L'arrondissement  
Saint-Laurent



Zones de changement positif (Celsius) traduites dans l'ACP 1996/1984, supérieures à 2 écarts types à la moyenne de l'image

Zones de changement positif (Celsius) traduites dans l'ACP 1998/1986, supérieures à 2 écarts types à la moyenne de l'image

Zones de changement positif (Celsius) traduites dans l'ACP 2003/1992, supérieures à 2 écarts types à la moyenne de l'image

Zones de changement positif (Celsius) traduites dans les 3 ACP citées ci-dessus



Zones de perte de végétation (NDVI) traduites dans l'ACP 1996/1984, supérieures à 2 écarts types à la moyenne de l'image

Zones de perte de végétation (NDVI) traduites dans l'ACP 1998/1986, supérieures à 2 écarts types à la moyenne de l'image

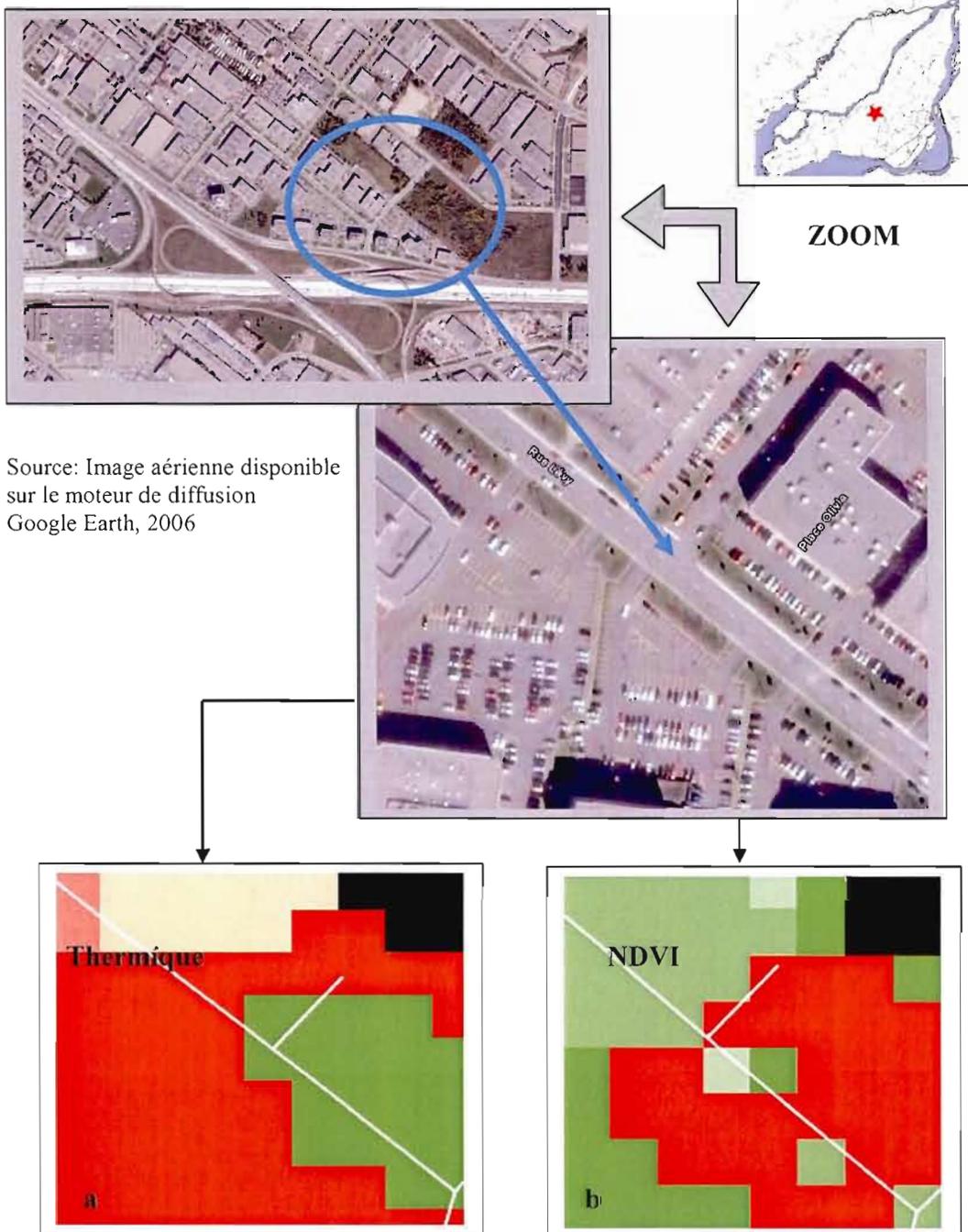
Zones de perte de végétation (NDVI) traduites dans l'ACP 2003/1992, supérieures à 2 écarts types à la moyenne de l'image

Zones de perte de végétation (NDVI) traduites dans les 3 ACP citées ci-dessus

**Figure 4.3** L'exemple de l'arrondissement Saint-Laurent, (a) thermique et (b) NDVI.

Source: bandes thermiques issues du capteur TM de Landsat 5, des années 1984 à 2005

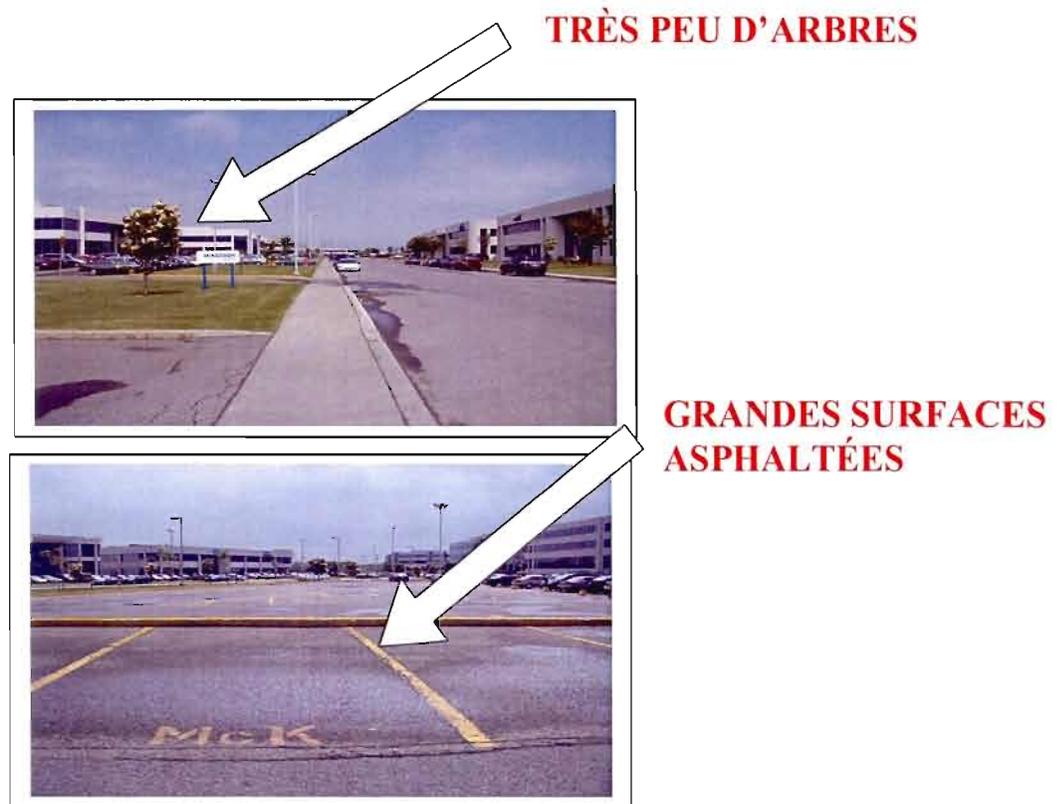
Sud de l'arrondissement Saint-Laurent; image aérienne, 2006



**Figure 4.4** Partie commune des trois ACP thermiques (a) et NDVI (b).

Source: à partir des bandes thermiques et NDVI issues du capteur TM de Landsat 5

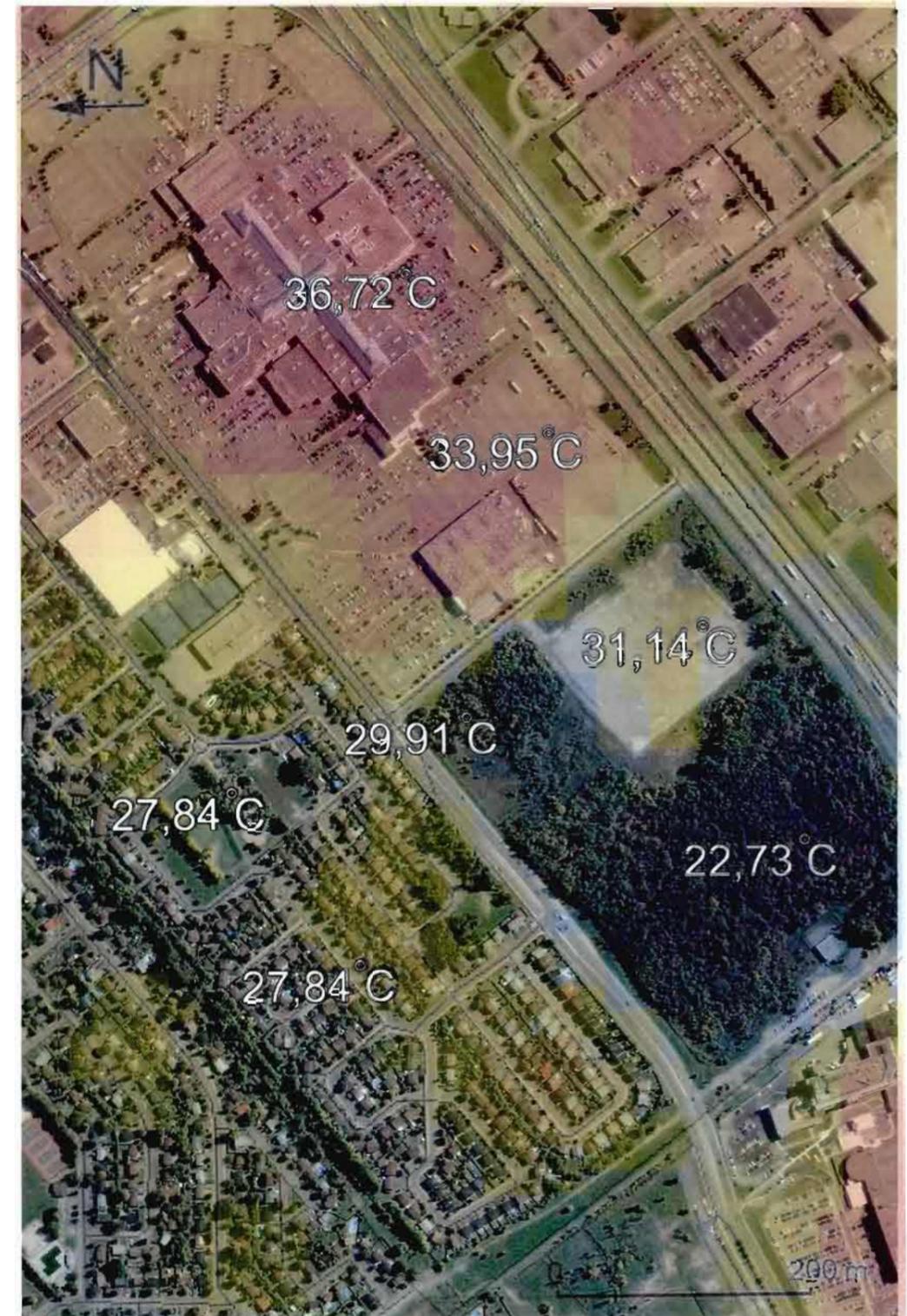
Sur le terrain, ce secteur signalé comme très chaud, déboisé et en constant réchauffement, est constitué d'asphalte et de larges bâtiments industriels.



**Figure 4.5** Les secteurs de l'arrondissement Saint-Laurent propices à la formation d'îlots de chaleur.

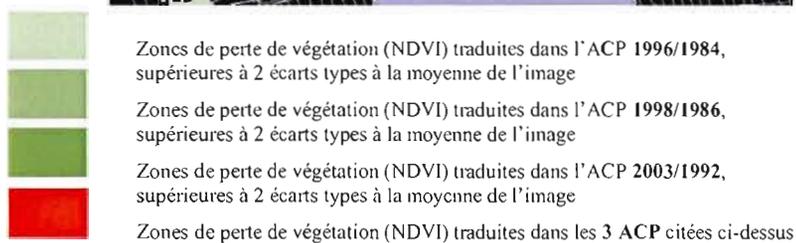
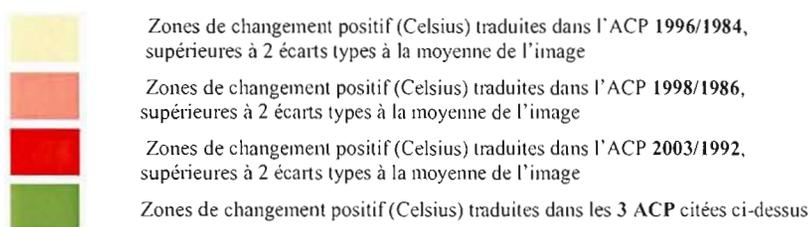
Source: P. Martin, 25 mai 2006

La figure 4.6 est un autre exemple de fortes variations de la température existant proche de la surface, en fonction des différents types d'occupation du sol (jusqu'à 14°C d'amplitude). Il s'agit d'un espace situé entre Pointe-Claire et Kirkland à l'ouest de l'île de Montréal, (exemple du 27 juin 2005). La valeur 22,73°C représente un parc densément boisé et celle de 27,84°C un quartier résidentiel végétalisé. Celle de 29,91°C est la valeur enregistrée sur les routes principales, 31,14°C pour un stationnement de terre alors que 33,95°C est un stationnement d'asphalte. Enfin 36,72°C correspond à la valeur thermique record d'un grand centre commercial (centre d'achat Fairview).



Source: bande thermique créée du capteur ETM+ de Landsat 5, 27 juin 2005 et Google Earth, 2006  
Figure 4.6 Exemple de différents types d'occupation du sol au nord-ouest de Pointe-Claire et leurs répercussions sur les températures, le 27 juin 2005.

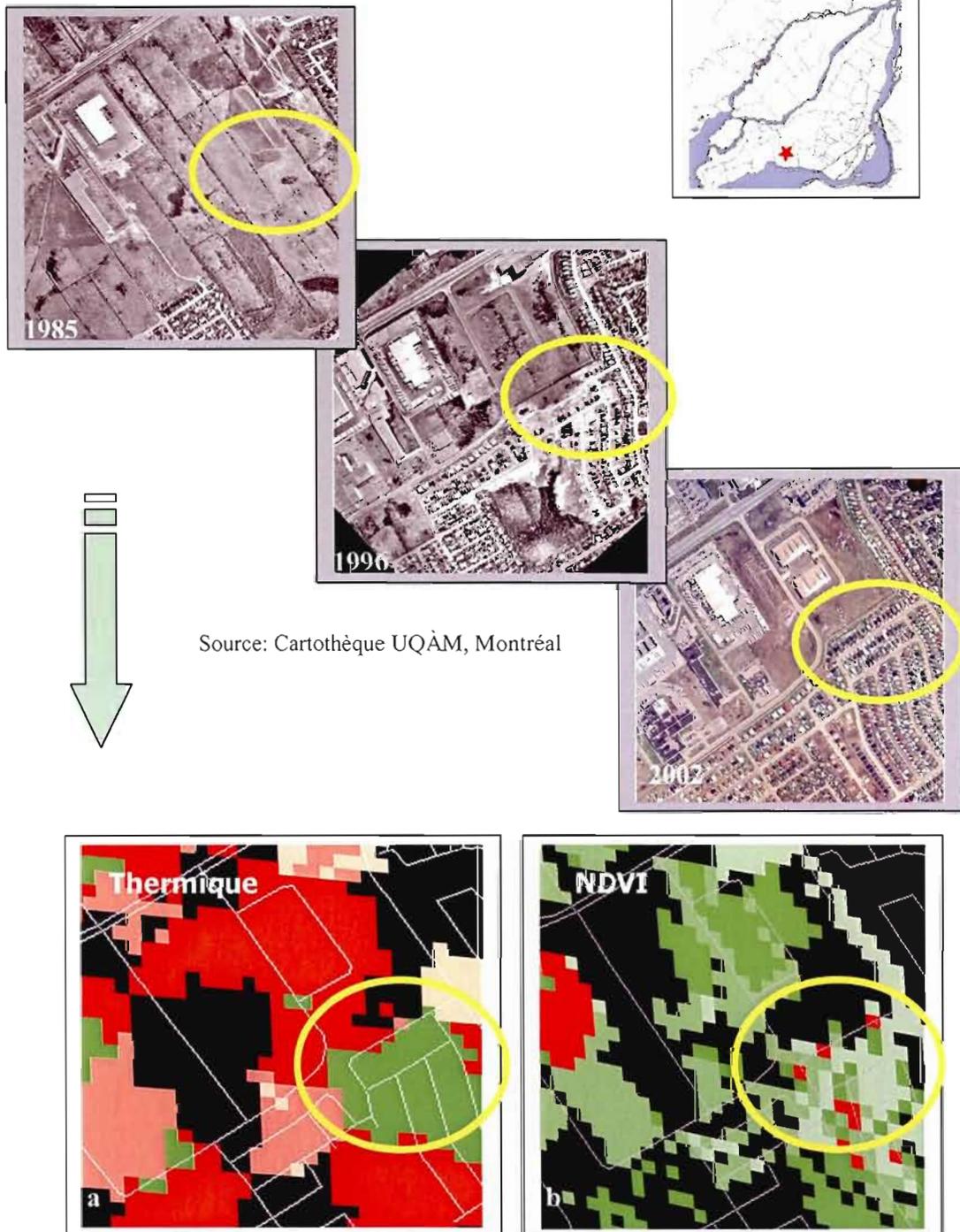
L'arrondissement de  
Pointe-Claire



**Figure 4.7** L'exemple de Pointe-Claire, (a) thermique et (b) NDVI.

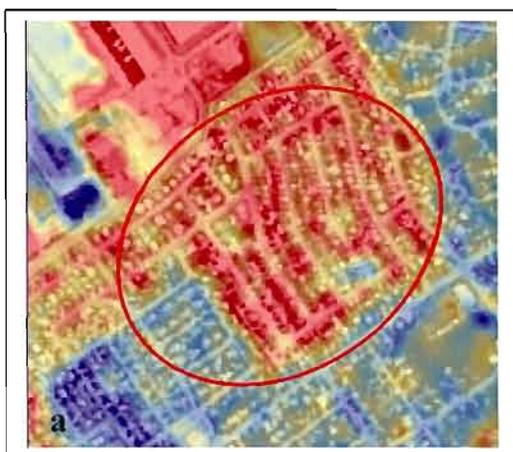
Source: bandes thermiques issues du capteur TM de Landsat 5, des années 1984 à 2005

Pointe-Claire; images aériennes

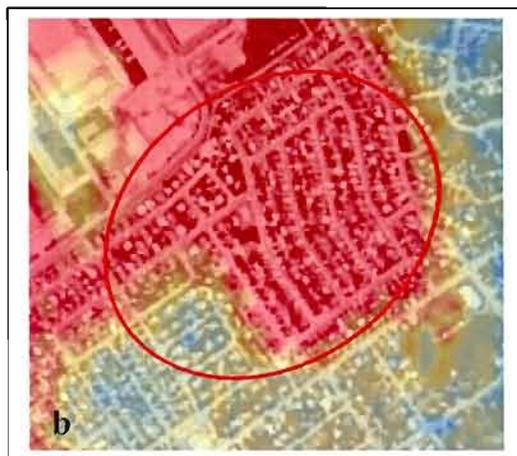


**Figure 4.8** Partie commune dans les trois ACP thermiques (a) et NDVI (b).

Source: à partir des bandes thermiques et NDVI issues du capteur TM de Landsat 5



La figure 4.9a montre que les six nouvelles rues de ce quartier résidentiel de Pointe-Claire ont provoqué la perte, à travers deux décennies, de la majeure partie du couvert végétal.



L'impact sur le thermique est net (cf. fig. 4.9b); ce nouvel espace résidentiel se détache du reste de l'ensemble de l'arrondissement par des températures qui augmentent par rapport à la décennie précédente.

**Figure 4.9** ACP NDVI (a) et thermique (b) entre juin 2005 et juin 1984 d'un quartier résidentiel de Pointe-Claire.

Source: à partir des bandes thermiques et NDVI issues du capteur TM de Landsat 5, 17 juin 1984 et 27 juin 2005.

Les agrandissements sur les ACP thermiques et NDVI de la figure 4.10 indiquent donc une forte perte du couvert végétal à l'instar d'un nouveau quartier construit à partir de 1996, ce qui a provoqué une hausse continue des températures sur près de 10 km<sup>2</sup> (en vert fig. 4.10a).

Cette rue fut la première construite dans ce quartier. Elle a été achevée en 1996 (cf. fig. 4.10 p. 98). Il aura fallu attendre dix ans (2006) pour que des premiers arbres soient plantés ...



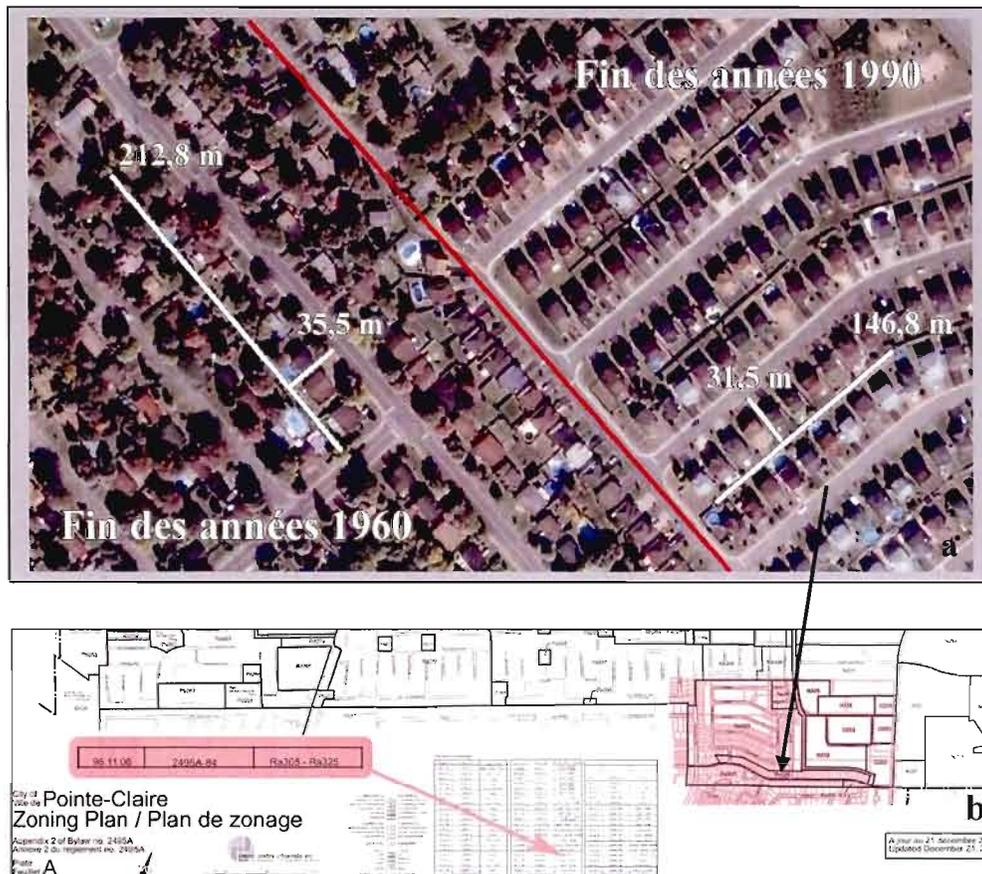
Un arbre pour trois maisons

**Figure 4.10** Les secteurs de Pointe-Claire propices à l'augmentation des températures.

Source: P. Martin, 17 mai 2006

Les images aériennes de la même figure montrent qu'une zone végétalisée a été remplacée par des habitations, ce qui se traduit évidemment par un fort signal dans l'ACP du NDVI. L'image aérienne de 1996 montre que la rue Dorchester, prise comme exemple, a été construite et terminée la même année (vérifiable dans le plan de zonage fig. 4.11 en bas). En se rendant sur place, cette rue datant de dix ans aujourd'hui, semble avoir été terminée récemment tellement la végétation est inexistante. Du moins quelques arbres semblent avoir été fraîchement plantés quelques jours auparavant. De plus si l'on regarde le plan de zonage de ce quartier en détail, on s'aperçoit qu'en 30 ans, les surfaces disponibles pour construire dix maisons ont diminué d'un tiers environ. Une seule rue sépare le début et la fin de cette période. À la fin des années 1960, la ville autorisait la construction de dix maisons sur environ 212 m de distance. Fin des années 1990, pour le même nombre d'habitations, la distance permise semble être passée autour de 146 m. Sans compter qu'il en est de même pour les jardins individuels qui sont passés de 35 à 31 m de longueur. Il y a donc eu un rétrécissement des lotissements.

L'espace végétal détruit, sans être reconstruit et l'accroissement de la densité urbaine sont à l'origine de l'apparition d'un nouvel îlot de chaleur qui fait désormais partie des zones chaudes de la CMM.



**Figure 4.11** Espace disponible pour dix maisons dans un quartier résidentiel récent de Pointe-Claire entre les années 1960 et 1990 (a) et son plan de zonage (b).

Source: <http://www.pointeclaire.ville.montreal.qc.ca>

Les exemples du sud de l'arrondissement Saint-Laurent et d'un quartier résidentiel récent de Pointe-Claire sont synonymes d'urbanisation propice à la formation d'ICU.

### Une urbanisation saine : l'exemple du nord-est d'Ahuntsic, photos aériennes



Source: cartotheque, UQAM, Montréal



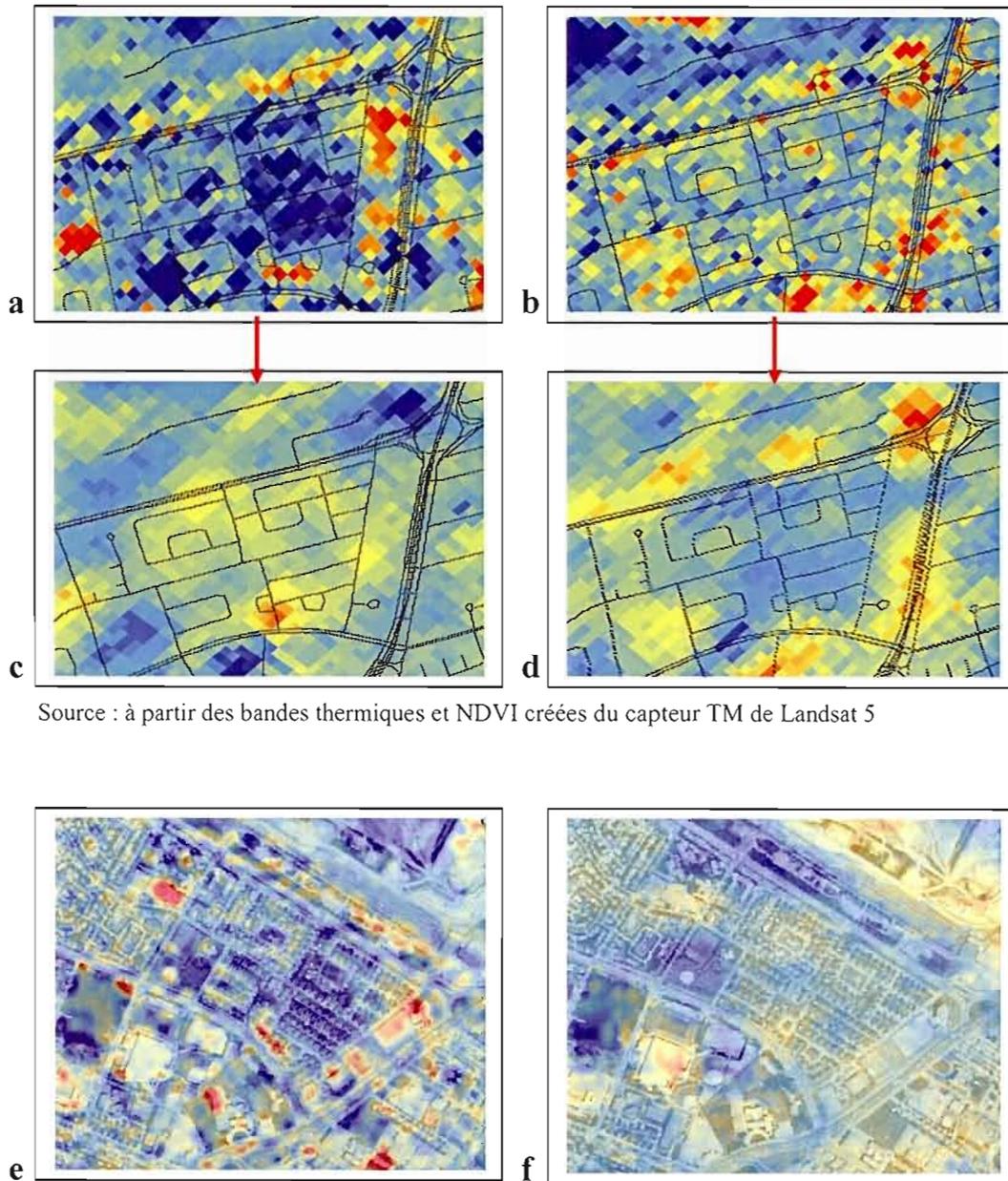
Source: Image aérienne disponible sur le moteur de diffusion Google Earth, 2006



Source: Prise de photo depuis le toit d'un immeuble d'Ahuntsic, P. Martin, 27 mai 2006.

**Figure 4.12** L'évolution saine d'un quartier d'Ahuntsic.

## Ahuntsic (suite)



Source : à partir des bandes thermiques et NDVI créées du capteur TM de Landsat 5

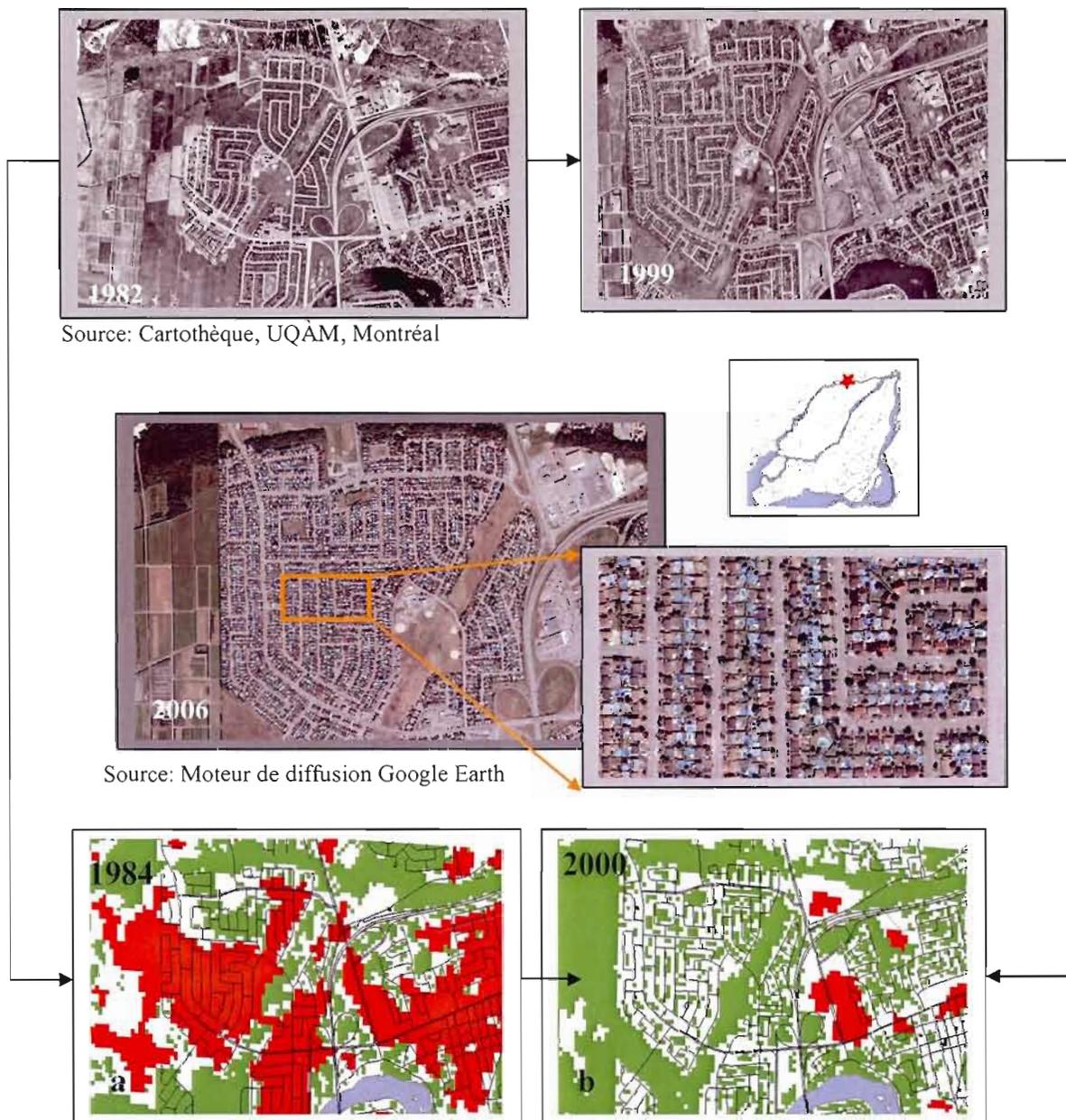
**Figure 4.13** ACP NDVI 1996/1984 (a), 2003/1992 (b) et ACP thermiques 1996/1984 (c), 2003/1992 (d) d'un secteur de l'arrondissement d'Ahuntsic. Complément d'information des résultats avec l'ACP NDVI 2005/1984 (e) et NDVI 2005/1984 (f).

Source: à partir des bandes thermiques et NDVI issues du capteur TM de Landsat 5, 17 juin 1984 et 27 juin 2005.

L'arrondissement d'Ahuntsic est un bon exemple d'urbanisation « saine » pour l'environnement. L'image de 1982 de la figure 4.14 semble représenter un champ à l'abandon où le minéral domine plus que le végétal (carrière). Un reboisement, planté dès la première décennie et représenté en bleu dans l'ACP NDVI 1996/1984, se fait rapidement ressentir dans la deuxième ACP thermique de 2003/1992, une fois que la végétation ait reboisé le milieu. Des arbres matures, en l'occurrence ici des érables âgés d'au moins dix ans, recouvrant la majeure partie des routes et offrant un ombrage permanent pendant les mois de forte chaleur, favorisent la baisse des températures. Les ACP thermiques et NDVI de 2005 sur 1984 (cf. fig. 4.15), confirment le fait que ce reboisement simultané à la construction d'un nouveau quartier résidentiel d'Ahuntsic, favorise à moyen mais aussi à long termes des températures plus fraîches pendant de fortes chaleurs.

Un autre cas d'urbanisation qui limite la formation d'ICU est relevé plus au nord de la zone d'étude. Il s'agit ici du sud de Terrebonne situé entre Laval et la Couronne Nord de la CMM. Les ACP y ont en effet révélé un rafraîchissement dans un nouveau quartier résidentiel, qui présente cependant une légère différence.

### Autre exemple d'une saine urbanisation : Terrebonne sud



**Figure 4.14** L'évolution saine d'un nouveau quartier au sud de Terrebonne; 90<sup>ième</sup> percentile des températures (rouge), versus valeurs du NDVI au 50<sup>ième</sup> percentile (vert) entre les dates du 17 juin 1984 et du 20 juin 2000.

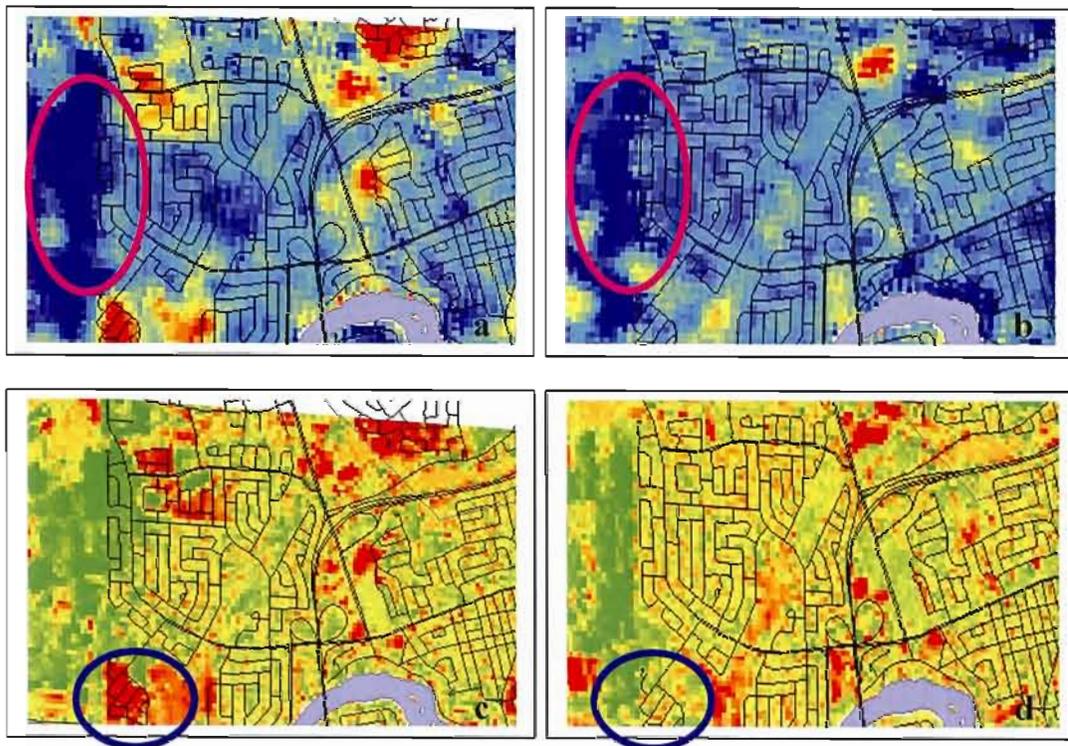
Source: à partir des bandes thermiques et NDVI issues du capteur TM de Landsat 5, 17 juin 1984 et 20 juin 2000.

La figure 4.14 montre la construction d'un quartier à Terrebonne entre 1982 et 1999. Ces dates ont été choisies pour la disponibilité des images aériennes au-dessus de cette zone. Les dates les plus proches dont nous disposions afin d'observer l'évolution étaient les années de 1984 et de 2000. En superposant seulement les 10% des valeurs thermiques les plus chaudes (90<sup>ième</sup> percentile) avec les valeurs du NDVI supérieures à la moyenne de l'image (environ 0.3), un lien apparaît une fois de plus entre ces deux variables. En 1984 alors qu'il ne faisait que la moitié de sa superficie d'aujourd'hui, ce quartier faisait déjà partie des zones les plus chaudes de la région de Montréal. Ceci étant dû en majeure partie au fait que les terres vouées aux futures constructions étaient majoritairement à nu. Puis lors de l'aménagement du quartier, des arbres ont été plantés simultanément. Ainsi ce secteur de Terrebonne ne fait plus partie des zones les plus chaudes de la CMM.

L'image aérienne de 2006 (cf. fig. 4.14 au centre) révèle que chaque habitation de ce secteur résidentiel s'est dotée au cours des années d'une piscine individuelle. Il y en a presque autant que de maisons. Rappelons que l'albédo d'une étendue liquide de type étang ou lac est de l'ordre de 0,02 à 0,04. Ainsi, un nombre cumulé et suffisamment élevé de bassins, est susceptible d'avoir un effet sur les températures en absorbant en grande partie l'énergie solaire incidente et modifiant par de-là le bilan radiatif.

Ces résultats se confirment dans les ACP thermiques et NDVI (cf. fig. 4.15). Là où la végétation s'est étendue (en vert dans les ACP NDVI) les températures ont baissé (en bleu dans les ACP thermiques). La photographie aérienne de 1982 (cf. fig. 4.14 en haut), montre que la partie ouest du nouveau secteur prêt à être construit, est fortement minéralisée. À l'inverse, les quelques habitations construites à l'écart au sud-ouest du quartier (cercle bleu, cf. fig. 4.15), ont été construites sur un champ de verdure.

Ainsi dans la première décennie, les ACP ont traduit une perte végétale ayant pour conséquence un gain de chaleur. Puis cette urbanisation saine a rétabli un bon équilibre dans la deuxième décennie quand la végétation est devenue mature (cf. fig. 4.15d).

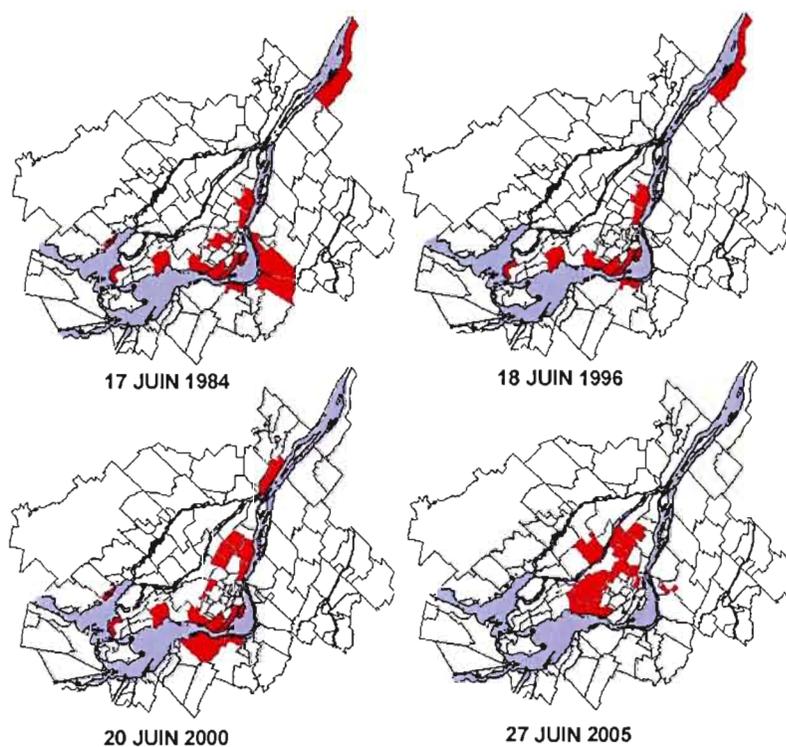


**Figure 4.15** ACP thermiques 1996/1984 (a), 2003/1992 (b) et ACP NDVI 1996/1984 (c), 2003/1992 (d) d'un nouveau quartier résidentiel au sud de Terrebonne.

Source: à partir des bandes issues du thermique et du NDVI du capteur TM de Landsat 5, des années 1984, 1992, 1996 et 2003.

#### 4.4 Les chaleurs extrêmes réparties sur le territoire de la CMM

Le tableau 4.2 fournit la liste des municipalités de la CMM dont les températures ont dépassé les 32°C sur les quatre mois de juin étudiés. Il s'agit de celles qui ont enregistré ce seuil sur au moins 10% de leur territoire. Des traitements de ces bases de données sont effectués par la suite en langage SQL (*Structured Query Language*). Ces résultats cartographiés sont fournis à la figure 4.16.



0 5 10 Kilomètres N ↑

Projection NAD83, UTM18

**Figure 4.16** Municipalités de la CMM dont au moins 10% de leur superficie est supérieure à 32°C (en rouge) pour les mois de juin 1984, 1996, 2000 et 2005.

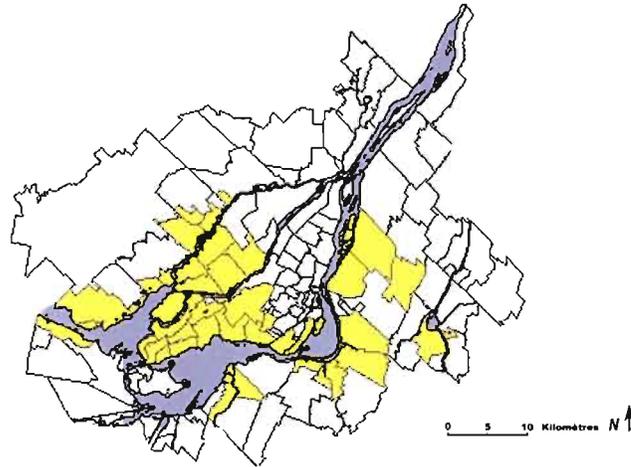
Source: Traitements SQL des statistiques des bandes thermiques sur les mois de juin 1984, 1996 2000 et 2005.

**Tableau 4.2** Municipalités dont plus de 10% de leur superficie possèdent des températures supérieures à 32°C (cf. fig. 4.16 p. 101, chiffres en %).

MUNICIPALITÉS	17-juin-84	18-juin-96	20-juin-00	27-juin-05
REPENTIGNY			10,99	
ANJOU			16,74	25,54
SAINT LEONARD			17,21	29,57
VERDUN	15,48	36,76	48,08	
LASALLE	30,4	26,06	30,33	
MONT ROYAL			10,12	24,56
LACHINE	18,93	17,65	19,46	15,9
POINTE CLAIRE	30,59	37,91	35,82	
SENNEVILLE	25,17	26,41	14,78	
SAINTE CATHERINE	31,73	23,68	32,6	
KAHNAWAKE			18,6	
POINTE CALUMET	19,49		22,19	
Montréal: Saint-Michel			10,36	24,52
Montréal: Sud-Est	11,1	11,33	16,34	
Montréal: Mercier	14,54	17,53	19,99	
BROSSARD	10,89			
SAINT LAMBERT	10,97			
CONTRECOEUR	23,48	20,95		
LA PRAIRIE	11,9			
Montréal: Côte-des-Neiges	27,32			
GREENFIELD PARK				10,49
MONTREAL NORD				15,64
SAINT PIERRE				11,18
SAINT LAURENT				29,61
DORVAL				10,97
Laval: Pont-Viau, Laval-des-Rapides				13,22
Montréal: Centre-ville				16,82
Montréal: Plateau Mont-Royal				18,14
Montréal: Villeray				24,77

L'île de Montréal est indiscutablement la zone qui regroupe le plus de secteurs de températures extrêmes (32°C). Certains apparaissent à partir des années 2000 dans la partie sud-ouest comme Dorval, l'arrondissement Saint-Laurent et Lachine.

Un deuxième traitement cherche à isoler les municipalités dont la température moyenne dans l'ensemble de leur superficie a augmenté d'au moins 10% entre juin 1984 et juin 2005, puis entre 2000 et 2005. Ce calcul est fait par rapport à la moyenne spatiale des températures de la région de Montréal. Exemple d'une municipalité qui serait passée de 20 à 22°C, par rapport à une moyenne thermique spatiale de la CMM identique (cf. fig. 4.17 et 4.18).

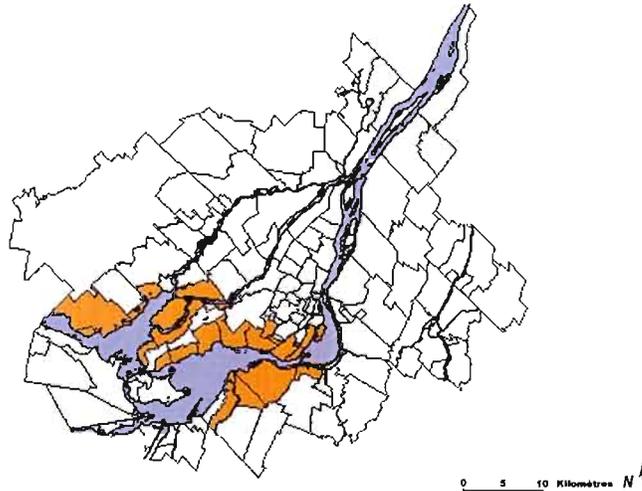


Projection NAD83, UTM18

**Figure 4.17** Municipalités dont la température spatiale a augmenté d'au moins 10 % entre 1984 et 2005 selon une moyenne thermique spatiale de la CMM rapportée à la même valeur.

Source: Traitements SQL des statistiques des bandes thermiques sur les mois de juin 1984 et 2005.

Une différence sud-ouest / nord-est est évidente. C'est respectivement une tendance au réchauffement versus un état stationnaire entre les municipalités de ces deux zones. Si l'on regarde l'évolution thermique des cinq dernières années seulement (cf. fig. 4.18), seuls les arrondissements qui bordent le fleuve Saint-Laurent dans sa partie sud sont concernés par cette hausse des températures.



Projection NAD83, UTM18

**Figure 4.18** Municipalités dont la température spatiale a augmenté d'au moins 10 % entre 2000 et 2005 selon une moyenne thermique spatiale de la CMM rapportée à la même valeur.

Source: Traitements SQL des statistiques des bandes thermiques sur les mois de juin 2000 et 2005.

## 4.5 Comparaison avec d'autres études dans les métropoles

Plusieurs études à travers les métropoles du monde ont analysé le phénomène des îlots thermiques;

- La première retenue a été réalisée par Abbateo en 1998 sur la ville de Rome en Italie. Trois images satellites de la ville ont été choisies selon des conditions météorologiques et des saisons différentes puis comparées sur toutes les bandes. Des types d'occupation du sol ont été analysés avec neuf images ERS-1 SAR.PRI avec les bandes thermiques et celles du NDVI. Les résultats obtenus traduisaient une bonne combinaison entre les données de température et celles de NDVI. Les conclusions de cette étude se rapprochent de la présente sur Montréal dans le sens où un lien entre la végétation et la température a été établi.
- Une autre étude par Rigo et Parlow (2003) sur les ICU de surface au-dessus de la ville de Basel en Suisse, a été faite également grâce à l'imagerie satellitale. Plusieurs images entre 1984 et 1999 ont été analysées à travers les saisons. Des régressions ont été établies entre les températures et le NDVI. Les résultats obtenus ont permis de comprendre la part d'influence de la végétation sur le thermique. En effet, ces derniers indiquaient un coefficient de régression allant de 0,01 (faible) pour le printemps à 0,36 pour l'été, soulignant une fois de plus l'importance de la végétation sur le comportement thermique de la zone d'étude.
- Dans le dernier cas, l'étude de Cox et *al.* (2005) sur la métropole de New York, utilisant la méthode du *downscaling*, a permis de montrer qu'à l'échelle régionale, les variables clés de la dynamique thermique se sont avérées être les variations du NDVI et de l'albédo de surface. À des échelles locales, la densité du bâti et la forme des rues jouaient le rôle principal dans les variations des ICU de surface. Ces résultats ont été obtenus grâce à trois images satellites de jour de Landsat ETM+, une image ASTER de jour ainsi qu'une image MODIS de nuit sont analysées.

Dans notre étude visant à identifier les secteurs vulnérables à la chaleur accablante à Montréal, l'analyse en composantes principales a été utilisée. Elle a non seulement permis d'observer une forte similitude entre l'évolution de la végétation et celle de la température, confirmant ainsi les mêmes résultats obtenus dans les autres études, mais en plus elle a permis d'observer le changement même au sein de ces deux variables.

#### **4.6 Développements futurs**

Cette étude a confirmé les liens étroits entre la perte du couvert végétal et le réchauffement des températures, et entre l'amélioration du couvert végétal et la baisse des températures. À une échelle plus fine comme de l'aéroporté, il serait possible d'approfondir ces liens qualitatifs identifiés entre le NDVI et les images thermiques. Ils pourraient ainsi être mieux compris car dans notre étude nous n'avons pas tenu compte des différentes espèces d'arbres qu'abritent nos villes. Quel serait le type d'arbre qui viendrait le mieux contrebalancer l'impact thermique de nouvelles constructions, prenant en compte sa vitesse de croissance ou l'épaisseur de sa canopée (qui offrirait un maximum d'ombrage). Combien d'arbres, parmi ces espèces sélectionnées, devrait-on replanter sur un nouveau secteur construit dépendamment de sa taille?

Des images aériennes à haute résolution pourraient donc venir affiner les résultats à l'échelle d'une maison ou d'un angle de rues. L'imagerie aéroportée thermique apporterait des éléments à l'échelle locale en complémentarité des informations obtenues à des échelles régionales.

## 4.7 Suggestions ou recommandations pour diminuer la densité et l'intensité des ICU

Le phénomène des ICU touche l'ensemble des villes du monde. Les résultats ont montré qu'il est possible d'amoindrir les effets de la chaleur en maintenant un maximum d'espaces verts. Des campagnes de sensibilisation pourraient être menées dans le but de faire comprendre l'importance de protéger la végétation, que ce soit la pelouse de son propre jardin ou les parcs de la ville. L'importance également de choisir des couleurs claires pour les façades d'habitations ou installer des toitures végétales. Les îlots de chaleur naissent de l'urbanisation et doivent donc être une priorité pour l'environnement et la santé publique.

Il est nécessaire que toute nouvelle construction prenne en compte, dans son plan d'aménagement, un reverdissement dès les premières étapes de construction. Ainsi, le texte de Frédéric Back, exposé un temps sur sa sculpture d'un arbre mort devant la station de métro Mont-Royal sur l'île de Montréal (cf. fig. 4.19), résume la voie vers laquelle les villes doivent s'orienter pour conjuguer un environnement sain avec une population urbaine épargnée des fortes chaleurs.

### L'œuvre de Frédéric Back



Figure 4.19 L'importance de la végétation.

Source: P. Martin 20 juillet 2006

## CONCLUSION DE L'ÉTUDE

L'urbanisation galopante qui touche la plupart des pays du monde pousse les villes à maintenir un environnement sain. Dans un contexte de climat en réchauffement, les vagues de chaleur pourraient être de plus en plus dommageables pour l'homme et son environnement là où la densité urbaine est la plus forte. Des secteurs chauds, recouverts d'asphalte et largement bâtis, se différencient des zones rurales ou du moins végétalisées et plus fraîches, par ce que nous appelons communément les îlots de chaleur urbains.

Les îlots de chaleur urbains de Montréal ont été analysés à travers une série de dix images satellites Landsat 5 TM entre 1984 et 2005 en saison estivale. Pour ce faire, les températures de surface et l'indice de végétation NDVI ont été calculés pour chacune des dates sélectionnées. L'application de masques sur les images, excluant les champs agricoles et l'hydrographie, a permis de rehausser les moyennes spatiales de chacune d'entre elles. L'utilisation de l'analyse statistique en composantes principales a permis quant à elle de faire ressortir le changement par rapport aux secteurs qui ont peu, voire pas évolué. Cette ACP, appliquée sur une série d'images Landsat, similaires dans les conditions météorologiques à 10h30, a donc séparé les zones stables ou en évolution selon les changements synchrones du couvert végétal et des températures.

Les résultats ont montré que la moitié Ouest de la zone d'étude a subi un changement significatif qui se traduit par une perte prononcée de la végétation et par une hausse des températures. La moitié Est reste quant à elle dans un état plus ou moins stationnaire depuis deux décennies. Ce changement a donc révélé que certains secteurs (en majorité industriels), se sont réchauffés alors qu'ils perdaient une partie de leurs espaces verts. L'inverse s'est vérifié également concernant des secteurs reboisés ou re-végétalisés et qui semblent avoir enregistré une baisse de leurs températures. Au fil du temps, les développements industriels, autoroutiers ou résidentiels dans l'Ouest et le Sud, ont favorisé la création de nouveaux ICU dépassant parfois en intensité les plus anciens (sous des conditions météorologiques les plus propices à leur formation).

En analysant certains plans d'urbanisme et des relevés in-situ, puis en comparant les résultats obtenus via l'imagerie Landsat avec des images aériennes ou des photos prises sur le terrain, nous sommes en mesure de confirmer les résultats de certaines études dans d'autres métropoles. Toutefois, compte tenu de la résolution à 30m (originale à 120m pour la bande thermique), l'information recueillie ne donne qu'une valeur spatiale pour l'ensemble d'un groupe de maisons. Une étude approfondie via l'imagerie aéroportée haute résolution permettrait de compléter l'information satellitaire. Il serait également pertinent d'analyser le contexte historique des changements de température sur l'île de Montréal et analyser les images selon une similarité plus précise dans les conditions météorologiques. En effet, les images utilisées ont été fournies sans tenir compte du contexte météorologique propre à la formation des ICU.

La présence de végétation apparaît donc être une variable clé du comportement thermique de Montréal à une échelle régionale. Ces résultats pourraient s'avérer utiles dans le domaine de l'immobilier ou aux décideurs de la CMM afin d'incorporer d'avantage d'arbres à toute nouvelle construction, ou simplement en ajouter aux plus anciennes. La direction de la santé publique (DSP) pourrait ainsi mieux identifier les secteurs les plus vulnérables lors de canicule, et ainsi cibler dans un contexte de prévention, les groupes de personnes les plus exposées aux problèmes de fortes chaleurs. Les services de transport, de communication et les services de loisir doivent tenir compte aussi de cette évolution spatio-temporelle, qui conjuguée à un réchauffement global menace et risque de nuire d'avantage au bien être de la population en milieu urbain.

Il apparaît donc nécessaire de développer une approche souple, économique et reproductible par toutes les villes, permettant de localiser et d'anticiper la variation des îlots de chaleur en les confrontant à un ensemble de données socio-économiques (densité de personnes vivant seules, d'un certain âge etc.). Ceci faciliterait non seulement la mise en place de plans d'intervention et de prévention de fortes chaleurs vis à vis des personnes les plus vulnérables, mais aussi serait susceptible de favoriser une harmonisation saine entre la densité du bâti et les zones végétalisées et offrir ainsi une meilleure qualité de vie aux populations urbaines.

## RÉFÉRENCES

- Abbate, G. 1998. «Heat Island Study in the Area of Rome by Integrated Use of ERS-SAR and LANDSAT TM». Earthnet online, European Space Agency.
- Ackerman, S. A., R. A. Frey, and W. L. Smith. 1992. «Radiation budget studies using collocated observations from Advanced Very High Resolution Radiometer, High-Resolution Infrared Sounder/2, and Earth Radiation Budget Experiment instruments». *J. Geophysic. Res.* 97: 11513—11525.
- Alverson, K., G. W. Moore, P. Holdsworth and J. Cole. 2001. «Improving Climate Predictability and Understanding Decadal Variability using Proxy Climate Data». *CLIVAR Exchanges* No.19.
- Auger, N. et T. Kosatsky. 2002. «Chaleur accablante». Direction de la Santé Publique de Montréal-centre, 34 p.
- Balling, R. C., and S. W. Brazell. 1988. «High resolution surface temperature patterns in a complex urban terrain». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1289–1293.
- Barrow, E., B. Maxwell et P. Gachon. (eds) 2004. «Climate variability and change in Canada: past, present and future». *ACSD Science Assessment Series* No. 2. Toronto: Meteorological Service of Canada, Environment Canada, 144 p.
- Bell, J. L., L. C. Sloan, and M. A. Snyder. 2004. «The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observation and climate model simulation for Basel, Switzerland». *Global Planet Change* 44: 73-81.
- Beniston, M., and D. B. Stephenson. 2004. «Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions». *Global Planet Change* 44, 1-9.
- Bernard, A., A. Viau., et L. Bouthillier. 1999. «Surveillance d'indicateurs d'aménagement forestier écoviable à l'aide d'images Landsat-TM». *Journal Canadien de Télédétection*, Vol. 25, No 5, p. 448-446.
- Betts, A., J. Ball, A. Beljaars, M. Miller, and P. Viterbo. 1996. «The land surface – atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives». *Journal of Geophysical Research*, 101, 7209–7225.
- Boegh, E., H. Soegaard, N. Hanan, P. Kabat, and L. Lesch. 1998. «A remote sensing study of the NDVI–Ts relationship and the transpiration from sparse vegetation in the Sahel based on high resolution satellite data». *Remote Sensing of Environment*, 69, 224–240.

- Bonn, F., et G. Rochon. 1992. «Précis de télédétection, Volume 1. Principes et méthodes». PUQ/AUPELF, 498 p.
- \_\_\_\_\_ 1996. «Précis de télédétection. Volume 1. Principes et méthodes». PUQ/AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.
- Bonsal, B. R., X. Zhang, L. A. Vincent and W. D. Hogg. 2001. «Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada». *Journal of Climate* 14: 1959–1976.
- Caloz, R. 1992. «Système d'Information Géographique». EPFL, DGR, Lausanne, 138 p.
- \_\_\_\_\_ et C. Collet. 2001. «Précis de télédétection, Traitements numériques d'images de télédétection». Université des réseaux d'expression française UREF/AUPELF, p. 227-229.
- Carnahan, W. H., and R. C. Larson. 1990. «An analysis of an urban heat sink». *Remote Sensing of Environment*, 33, 65–71.
- Carson, T. N., R. R. Gillies, and E. M. Perry. 1994. «A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover». *Remote Sensing Reviews*, 9, 161–173.
- CCT (Centre canadien de télédétection). 2002 et 2003. Ressources naturelles du Canada, secteur des sciences de la Terre.
- Chen, X. L., H. M. Zhao, P. X. Li, Z. Y. Yin. 2006. «Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes». *Remote sensing of environment*, 104 (2): 133-146 p.
- Cox, J., S. Hodges, L. Parshall, C. Rosenzweig, and W. D. Solecki. 2005. «Skin of big apple, Characterizing the surface heat island of New York City and integration with MM5 climate model». EPA Conference Call, January 26<sup>th</sup>, 2005.
- CREM. 2006. Mémoire du Conseil Régional de l'Environnement de Montréal, Lutte aux îlots de chaleur (<http://www.cremtl.qc.ca/index.php?id=475>).
- Dash, P., F. M. Gottsche, F. S. Olesen, and H. Fischer. 2002. «Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends». *International Journal of Remote Sensing*, 23 (13), 2563–2594.
- De Bonon, A., G. Giuliani, S. Kluser, and P. Peduzzi. 2004. «Pré Alerte sur les Menaces Environnementales, Impacts de la canicule 2003 en Europe». *Programme des Nations Unies pour l'Environnement*, 4 p.
- deMenocal, P.B., 2001. «Cultural responses to climate change during the late Holocene». *Science*, 292, 667-673.

- Desjardins, R. 2000. «La télédétection: perspective analytique». Éditions ESTEM, Paris, 226 p.
- Drouin, L. 2003. «Direction de prévention et de santé publique de Montréal», *Annual Report on the Health of the population, Risk management and health, A modern-day safety net*, 12 pages.
- DSP (Direction de Santé Publique de Montréal). Choinière, R., J. Massie, C. Paradis. 2003. «Le portrait statistique de la santé des Montréalais». Régie régionale de la santé et des services sociaux de Montréal-Centre.
- \_\_\_\_ (Direction de santé publique de Montréal) Drouin, L. 14 mai 2003. «Les espaces verts, une préoccupation de santé publique!»
- \_\_\_\_ (Direction de santé publique de Montréal) Drouin, L. 2004. «Plan de mesures d'urgence : épisode de chaleur accablante 2004».
- Figuerola, P. I. and N. A. Mazzeo. 1998. «Urban–rural temperature differences in Buenos Aires». *International Journal of Climatology* 18: 1709–1723. Gallo, K., A. McNab.
- Gachon, P., A. St-Hilaire, T. Ouarda, V. T. V. Nguyen, C. Lin, J. Milton, D. Chaumont, J. Goldstein, M. Hessami, T. D. Nguyen, F. Selva, M. Nadeau, P. Roy, D. Parishkura, N. Major, M. Choux, and A. Bourque. 2005. «A first evaluation of the strength and weaknesses of statistical downscaling methods for simulating extremes over various regions of eastern Canada». *Sub-component, Climate Change Action Fund (CCAF)*, Environment Canada, Final report, Montréal, Québec, Canada, 209 pp.
- Gallo, K. P., and J. D. Tarpley. 1993. «The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect». *Journal of Applied Meteorology*, 32, 899–908.
- \_\_\_\_\_ and T. W. Owen. 1998. «Assessment of urban heat island: A multi-sensor perspective for the Dallas-Ft. Worth, USA region». *Geocarto. International*, 13, 35–41.
- Gaussorgues, G. 1999. «La thermographie infrarouge : Principes, technologies, applications. Paris».
- Gillies, R. R., and T. N. Carlson. 1995. «Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models». *Journal of Applied Meteorology*, 34, 745–756.
- \_\_\_\_\_ J. Cui, W. P. Kustas, and K. S. Humes. 1997. «A verification of the “triangle” method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation index (NDVI) and surface radiant temperature». *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3145–3166.

- Givoni, B. 1992. «Climatic aspects of urban design in tropical regions». *Atmospheric Environment*, Vol. 26B, No. 3, p. 397-406.
- Goward, S. N., Y. Xue, and K. P. Czajkowski. 2002. «Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model». *Remote Sensing of Environment*, 79, 225–242.
- Guay, F. 2003. «Relation entre la localisation des îlots de chaleur urbains et le type d'occupation du sol de la ville de Montréal». Mémoire de Maîtrise, Université du Québec à Montréal (UQAM).
- \_\_\_\_\_ et Y. Baudouin. 2005. «Portrait des îlots de chaleur urbains à Montréal». *FrancVert, Le webzine environnemental*, Vol. 2 No3, 10 pages.
- Hanson, R., R. W. Chase, E. B. Roberts, and D. W. Moody. 1991. «Evapotranspiration and Droughts, in Paulson. Compilers, National Water Summary 1988-89--Hydrologic Events and Floods and Droughts: U.S». *Geological Survey Water-Supply Paper 2375*, p. 99-104.
- Heat Island Group. 28 novembre 2004. «Climate Science for climate scientist, real climate». 12p.
- Huete, A. R. 2004. «Remote sensing of soils and soil processes. In Remote Sensing for Natural Resources Management and Environmental Monitoring». *Manual of Remote Sensing*, ed. S. Ustin, 3 edition, Chapter 1:1-48. John Wiley & Sons, Inc.
- Huth, R., J. Kysely, L. Pokorna. 2000. «A GCM simulation of heatwaves, dry spells, and their relationships to circulation». *Climate Change* 46, 29-60.
- IAURIF. 1987. *Téledétection spatiale et microclimat*. IAURIF, Paris, 190 p.
- IPCC, 2001. Climate Change. The IPCC Scientific Basis. Intergovernmental Panel of Climate Change, Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, D. K. Maskell, and C. A. Johnson. United Nation Environmental Programme.
- ISQ et MAMM (Institut de la Statistique du Québec et Ministère des affaires municipales de la métropole). édition 2003. «Perspectives démographiques». Québec et régions, 2001-2051.
- Jacob, F. 1999. *Utilisation de la téledétection courtes longueurs d'onde et infrarouge thermique à haute résolution spatiale pour l'estimation des flux d'énergie à l'échelle de la parcelle agricole*. «Institut National de la Recherche Agronomique». Avignon, 268 p.

- Jasinski, M. F. 1990. «Sensitivity of the Normalized Difference Vegetation Index to subpixel canopy cover, soil albedo, and pixel scale». *Remote Sensing of Environment*, 32, 169–187.
- Jensen, J. R. 1986. «Introductory Digital Image Processing». *A Remote Sensing Perspective*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. p. 379.
- Jones, P. D. 1994. «Hemispheric surface air temperature variability—A reanalysis and update to 1993». *Journal of Climate*, 7, 1794–1802.
- Karaca, M., M. Tayanc, and H. Toros. 1995. «Effects of urbanization on climate of Istanbul and Ankara». *Atmospheric Environment*, Vol. 29, No 23, p. 3411-3421.
- Karl, T. R., J. F. Brown, J. J. Hood, and J. D. Tarpley. 1993. «The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect». *Journal of Applied Meteorology*, 32, 899–908.
- Kassomenos, P. A., and B. D. Katsoulis. 2006. «Mesoscale and macroscale aspects of the morning Urban Heat Island around Athens, Greece». *Meteorological. Atmospheric. Physics.*, 67, 1-10.
- Khaliq M. N., P. Gachon, A. St-Hilaire, T. B. M. J. Ouarda and B. Bobée. 2007. «Southern Quebec (Canada) summer-season heat spells over the 1941–2000 period: an assessment of observed changes». *Theoretical and Applied Climatology*, 88,83-101.
- Kharin, V., and F. W. Zwiers. 2000. «Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM». *Journal of Climate*, 13, 3760-3788.
- Kidder, S. Q., and H. T. Wu. 1987. «A multispectral study of the St. Louis area under snow-covered conditions using NOAA-7 AVHRR data». *Remote Sensing of Environment*, 22, 159–172.
- Kim, Y. H., and J. J. Baik. 2002. «Maximum urban heat island intensity in Seoul». *Journal of Applied Meteorology*, 41, 651-659.
- Landsberg, H. E. 1981. «The Urban Climate». New York: Academic Press.
- Larson, R. C., and W. H. Carnahan. 1997. «The influence of surface characteristics on urban radiant temperatures». *Geocarto. International*, 12, 5–16.
- Lee, H. Y. 1998. «An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of the Urban Heat Island». *Atmospheric Environmental*. 27B, p 1699-1720.

- Lillesand, T. M., and R. W. Kiefer. 1987. «Earth resource satellites». *Chapter 9 in Remote sensing and image interpretation*. New York.
- Lo, C. P., Quattrochi, D. A., and Luvall, J. C. 1997. «Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect effect». *International Journal of Remote Sensing*, 18(2), pp. 287-304.
- Mann, M. E. 2002. «Climate Reconstruction: The Value of Multiple Proxies». *Science*. 297: 1481-1482.
- McMichael, A. J., A. Haines, R. S. Kovats, and R. Slooff. 1996. «Climate Changes and Human Health». WHO, Geneva.
- Montàvez, J. P., A. J. Rodriguez, and J. I. Jiménez. 2000. «A Study of the Urban Heat Island of Granada». *Journal of Climatology*. 20, p 899-911.
- Morris, C. J. G., and I. Simmonds, 2001. «Quantification of the influence of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city». *Journal of Applied Meteorology*. v40 i2. 169-182.
- Naizot, T., A. Y., Dervieux A., Thioulouse J. M., F. Bellan M. F. 2004. «Une nouvelle analyse multi-temporelle d'images satellitaires, les résidus de l'ACP. Un cas d'étude: une série d'images Landsat Thematic Mapper de la Camargue, France». *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, n°10, Taylor & Francis, 1925–1938.
- Oke, T. R. and East, C. 1971. «The Urban Boundary Layer in Montreal, Boundary-Layer». *Meteorology*. 1, 411-37.
- OMM (Organisation Mondiale de Météorologie). 2002. «Press Release: WMO statement on the status of the global climate in 2002: Global surface temperatures second warmest on record, return to El Niño conditions». WMO-No. 684, World Meteorological Organization, Switzerland.
- Owen, T. W., T. N. Carlson, and R. R. Gillies. 1998. «An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization». *International Journal of Remote Sensing*, 19, 1663–1681.
- Palsky, G. 1996. «Des chiffres et des cartes. Naissance et développement de la cartographie quantitative au 19<sup>e</sup> siècle». Paris, CTHS.
- Pivot, F. 2002. «Télédétection : principes, méthodes et applications». Université Laval, Département de Géographie, cours 1, 14 p.

- Piwowar, J. M. and E. F. LeDrew. 1997. *Principal Components Analysis of Arctic Ice Conditions Between 1988 and 1995 as Observed from the SSM/I Data Record*. Proceedings, Geomatics in the Era of RADARSAT (GER) '97, 25-29 May 1997, Ottawa Canada, 250-253.
- Régie régionale de la santé publique et des services sociaux de Montréal centre. Communiqué c2069. 3 juillet 2002. *Quand il fait chaud pour mourir*.
- Richards, J. A. 1986. «Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction, Springer-Verlag».
- Rigo G., and E. Parlow. 2003. «Multitemporal analysis of the radiation temperature of the urban surface heat island in the city of Basel». *Workshop Remote Sensing of Urban Areas Regensburg*.
- Roth, M., T. R. Oke, and W. J. Emery. 1989. «Satellite derived urban heat islands from three coastal cities and the utilisation of such data in urban climatology». *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1699–1720.
- Rouse, J. W., R. W. Haas, A. Schell, D. W. Deering, and J. C. Harlan. 1974. «Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation». NASA / GSFCT Type III Final Report, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 164 p.
- Sandholt, I., K. Rasmussen, and J. Andersen. 2002. «A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status». *Remote Sensing of Environment*, 79, 213–224.
- Santamouris, M., ADNOT, URBACOOOL. 2001. «Energy efficient cooling systems & techniques for urban buildings. Handbook». *Reference Manual*. Project Contrat N.XVII/4.1031/Z/98-224, 225 p.
- Scanvic, J-Y. 1983. «Utilisation de la télédétection dans les sciences de la Terre». BRGM, Manuels et Méthodes. N°7, 158 p.
- Schmugge, T., S. J. Hook, and C. Coll. 1998. «Recovering surface temperature and emissivity from thermal infrared multispectral data». *Remote Sensing of Environment*, 65, 121–131.
- Schulz, M., 2002. «The tempo of climate change during Dansgaard-Oeschger interstadials and its potential to affect the manifestation of the 1470-year climate cycle». *Geophys. Res. Lett.*, 29 (1), 10.1029/2001GL013277.
- Shabbar, A. and B. Bonsal. 2003. «An assessment of changes in winter cold and warm spells over Canada». *Natural Hazards* 29, 173-188.

- Small, E. 2002. *Comparison of Evapotranspiration Estimates from the Surface Energy Balance Algorithm (SEBAL) and Flux Tower Data, Middle Rio Grande Basin*. AGU Annual Fall Conference, Dec. 6-10, San Francisco, CA.
- Smith, R. M. 1986. «Comparing traditional methods for selecting class intervals on choropleth maps». *Professional Geographer*, 38 (1), 62– 67.
- Snyder, W. C., Z. Wan, Y. Zhang, and Y. Z. Feng. 1998. «Classification based emissivity for land surface temperature measurement from space». *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2753–2774.
- Sparks, J., D. Changnon, J. Stark. 2002. «Changes in the frequency of extreme warm-season surface dewpoints in Northeastern Illinois: Implications for cooling-system design and operation». *Journal of Applied Meteorology* 41, 890-898.
- Streutker, D. R. 2002. «A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas». *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, No 13, p.2595-2608.
- Taha, H., S. Chang, and H. Akbari. 2000. «Meteorological And Air Quality Impacts Of Heat Island Mitigation Measures In Three U.S. Cities». LBNL-44222. Berkely, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- The World's magazine No. 1. 12 février 2005. «The human impact on climate». *Science et technologie*, News Service.
- Turner, M. S., M. White, and J. E. Lidsey. 1993. *Departments of Physics and of Astronomy & Astrophysics*, The University of Chicago, Illinois 60637-1433. NASA/Fermilab Astrophysics Center, Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois 60510-0500.
- Vincent, L.A., and É. Mekis. 2006. «Changes in Daily and Extreme Temperature and Precipitation Indices for Canada over the 20th Century». *Atmosphere - Ocean*. vol. 44, n°2, pp. 177-193.
- Voogt, J. A. 2004. *Application of a 3-D urban surface-sensor sun model to estimate urban thermal anisotropy for a range of urban geometries*. 5<sup>th</sup> Symposium of the Urban Environment, American Meteorological Society, 23-26 Aug. 2004 Vancouver, BC, Canada.
- Weidong, L., J. Chongping, J. Xiaoyan, Z. Jiqin. 2005. «Relationship between NDVI and the urban heat island effect in Beijing area of China». *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability II*. Edited by Gao, Wei; Shaw, David R. Proceedings of the SPIE, Volume 5884, pp. 518-529 (2005).

- Weng, Q. 2001. «A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China». *International Journal of Remote Sensing*, 22, 1999–2014.
- \_\_\_\_\_. 2003. «Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 555–566.
- Wiley, J., C. P. Lo, D. A. Quattrochi, and J. C. Luvall. 1997. «Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect». *International Journal of Remote Sensing*, 18, 287–304.
- Yang, W., L. Yang, and J. W. Merchant. 1997. «An analysis of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebraska, USA». *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2161–2180.
- Zhang, X., L. A. Vincent, W. D. Hogg, and A. Niitsoo. 2000. «Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century». *Atmosphere Ocean*, 38, 395–429.
- Zhao, L. 2002. «Observed Urban Heat Island in Lucas County Using Remote Sensing». *Arid Land Geography*, 25(1), 90-95.

## Sites Web

- |  |   |
|--|---|
| Gouvernement du Canada, Changement Climatique, impacts et adaptation:<br><a href="http://www.adaptation.nrcan.gc.ca">http://www.adaptation.nrcan.gc.ca</a> | Geographic information systems and mapping software:<br><a href="http://www.esri.com">http://www.esri.com</a>   |
| Site officiel de l'État de Californie (USA):<br><a href="http://www.california.com">http://www.california.com</a>  | Food and agricultural organization:<br><a href="http://www.fao.org">http://www.fao.org</a>  |
| Advancing understanding and predictions of climate variability:<br><a href="http://www.cdc.noaa.gov">http://www.cdc.noaa.gov</a>                           | Site italien avec articles sur les grandes villes comme Santiago du Chili:<br><a href="http://www.fuggire.it">http://www.fuggire.it</a>                     |
| Communauté métropolitaine de Montréal:<br><a href="http://www.cmm.qc.ca">http://www.cmm.qc.ca</a>  | Firme spécialisée dans l'analyse et l'utilisation de l'information environnementale:<br><a href="http://www.futurityinc.com">http://www.futurityinc.com</a> |
| Dictionnaire multimédia du développement durable:<br><a href="http://www.ecobase21.org">http://www.ecobase21.org</a>                                       | Land Use and Cover Change:<br><a href="http://www.geo.ucl.ac.be">http://www.geo.ucl.ac.be</a>   |
| Earth and space research:<br><a href="http://www.esr.org">http://www.esr.org</a>   |   |

Géosciences de l'Australie,  
Gouvernement Australien:  
<http://www.ga.gov.au>

Global Hydrology and climate center:  
<http://www.ghcc.msfc.nasa.gov>

Les toits verts en Colombie Britannique:  
<http://www.greenbuildingsbc.com>

Site officiel des satellites américains  
Landsat:  
<http://www.landsat.org>

Goddard Space Flight Center, NASA:  
<http://www.gsfc.nasa.gov>  
Groupe intergouvernemental sur le  
changement climatique (CIEC):  
<http://www.ipcc.ch>

Montreal integrated land use transport  
equity model:  
<http://www.milute.mcgill.ca>

National Aeronautics and Space  
Administration (NASA):  
<http://www.nasa.gov>

National Oceanographic and Atmospheric  
Administration website:  
<http://www.noaa.gov>

Logiciel PCI Géomatica;  
<http://www.pcigeomatics.com>

Dictionnaire multimédia du  
développement durable, 2006:  
<http://www.planetecologie.org>

Filière de la NASA:  
<http://www.science.nasa.gov>

Site scientifique sur l'énergie solaire:  
<http://www.solarenergy-thermal.ch>

Reportages et grands dossiers sur les  
questions scientifiques:  
<http://www.techno-science.net>

Organisation mondiale de la météorologie;  
déclaration de l'OMM  
sur l'état du climat mondial en 2001:  
<http://www.wmo.ch>

Réseau consommation de Belgique:  
<http://www.ecoconso.be>

Site écologique nord américain:  
<http://www.ecosensual.net>

Site sur le programme international  
Géosphère/Biosphère:  
<http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC>

Navigateur urbain, images satellites haute  
résolution de Montréal:  
<http://www.navurb.com>

Site officiel de la Ville de Pointe-Claire,  
Montréal:  
<http://www.pointeclaire.ville.montreal.qc.ca>

Site sur l'environnement et la canicule de  
2003 en Europe:  
<http://www.grid.unep.ch/>

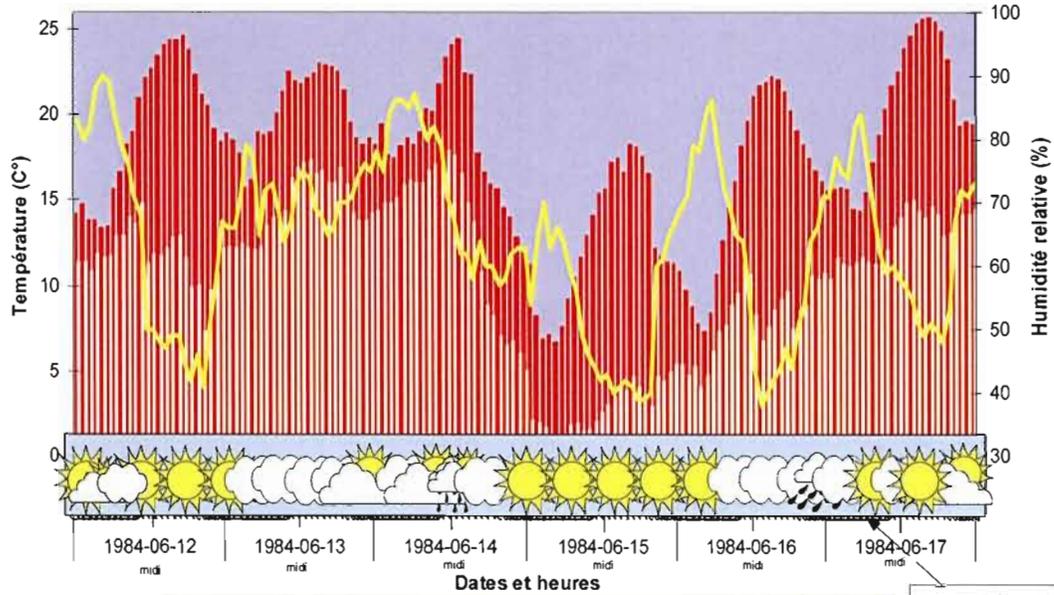
# ANNEXE A

## Fiches techniques des images; Conditions météorologiques

17	juin	1984
26	août	1986
11	juillet	1990
25	juillet	1992
18	juin	1996
27	août	1998
20	juin	2000
13	août	2002
15	juillet	2003
27	juin	2005

Données météorologiques de la station de Dorval à 35,7 m

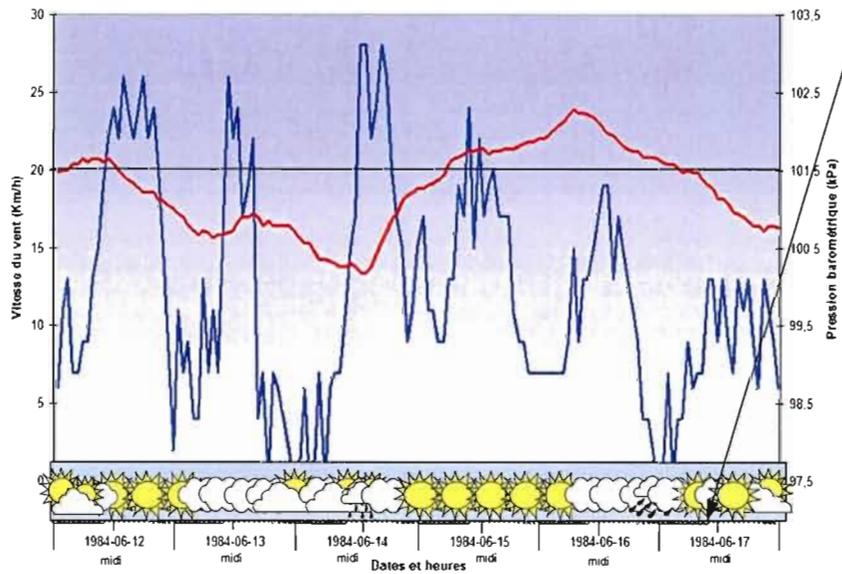
Semaine du 12 juin au 17 juin 1984



■ Température (°C)    ■ Point de rosée (°C)    — Humidité relative (%)

Acquisition de l'image 1984/06/17 15:06:19

(Environnement Canada)



— Vitesse du vent (km/h)    — Pression (kPa)

Figure A.1 Données météorologiques de la semaine du 12 au 17 juin 1984 à Dorval

Données météorologiques de la station de Dorval à 35,7 m

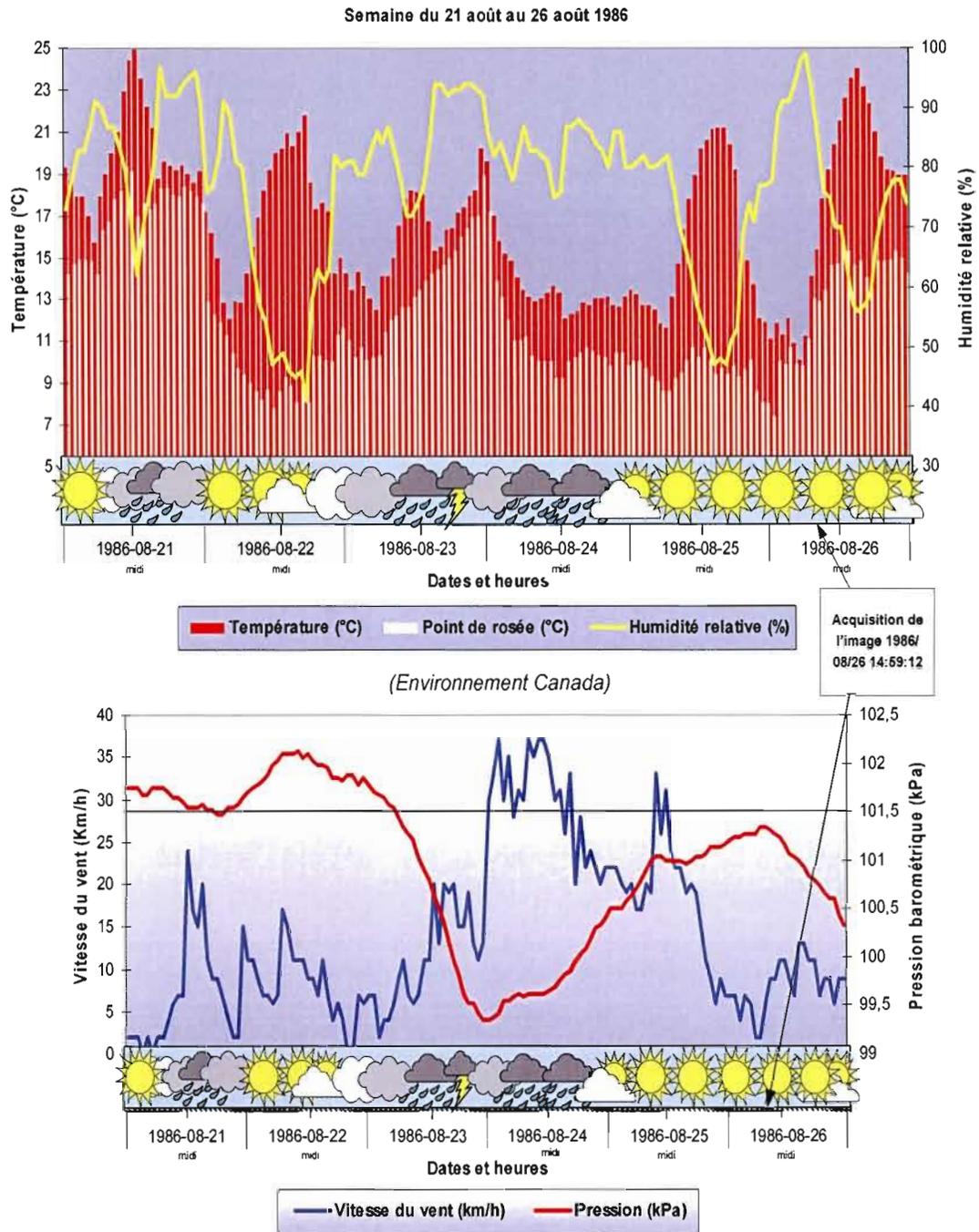


Figure A.2 Données météorologiques de la semaine du 21 au 26 août 1986 à Dorval

Données météorologiques de la station de Dorval à 35,7 m

Semaine du 6 juillet au 11 juillet 1990

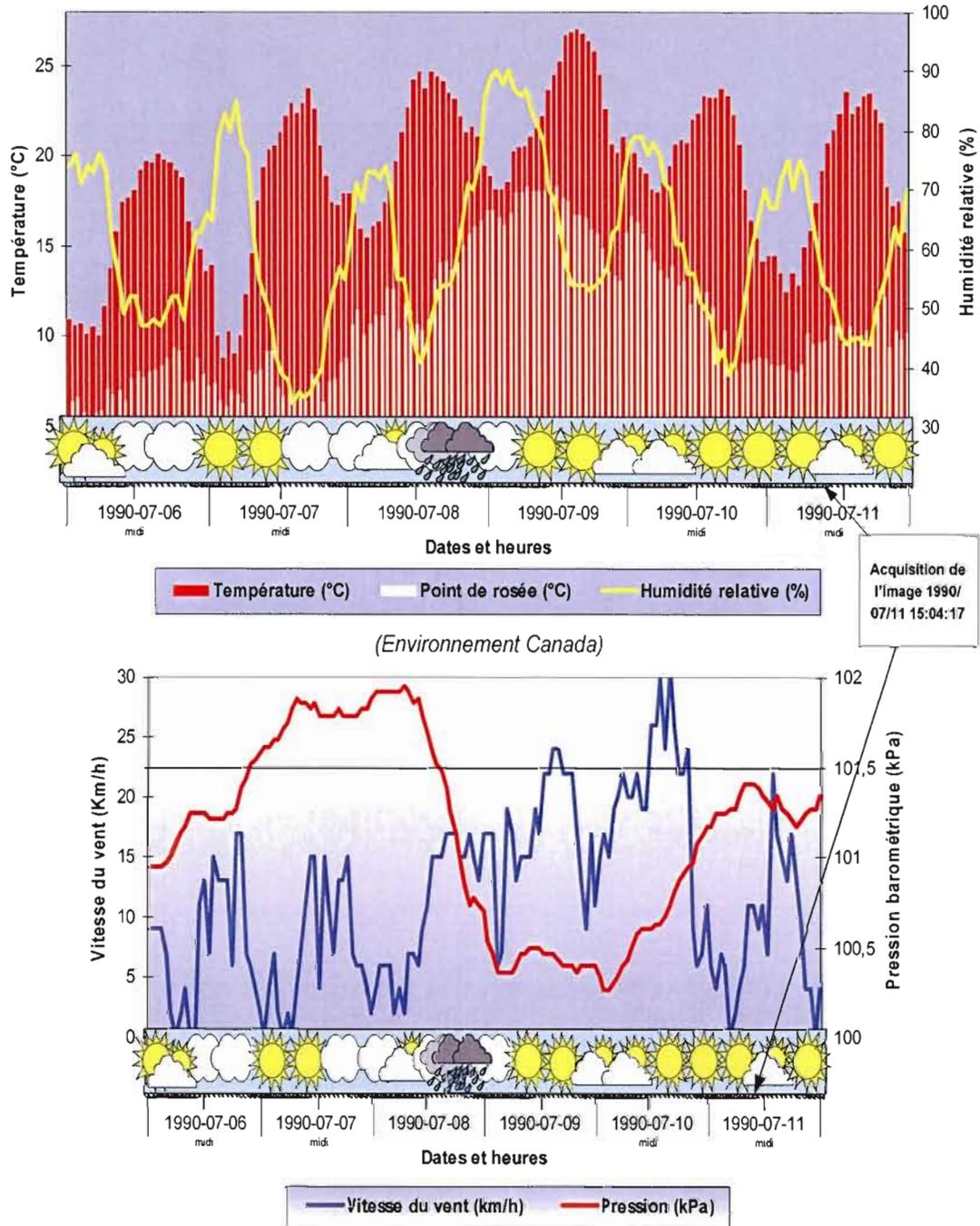
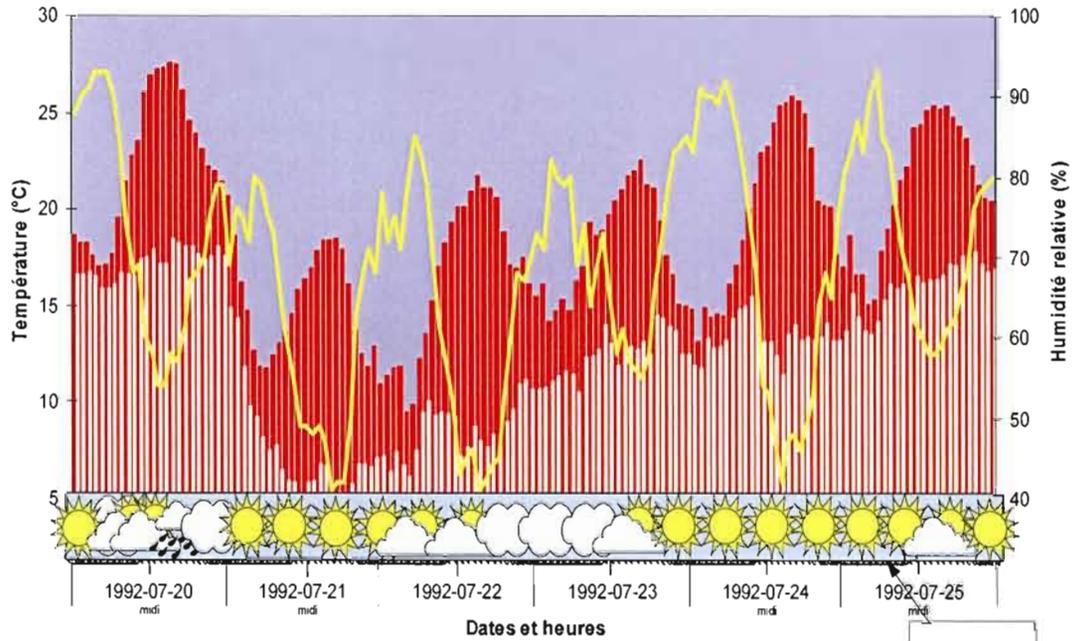


Figure A.3 Données météorologiques de la semaine du 6 au 11 juillet 1990 à Dorval

Données météorologiques de la station de Dorval à 35,7 m

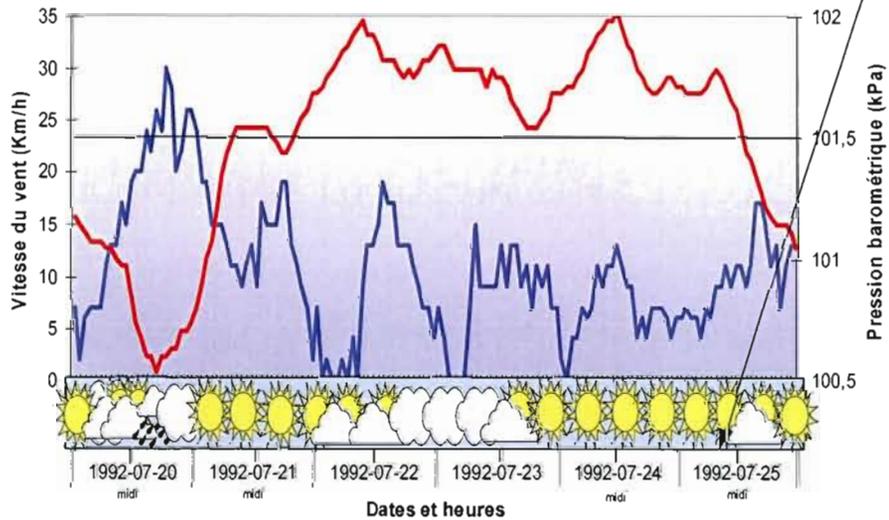
Semaine du 20 juillet au 25 juillet 1992



■ Température (°C)    ■ Point de rosée (°C)    — Humidité relative (%)

Acquisition de l'image 1992/07/25 15:00:50

(Environnement Canada)

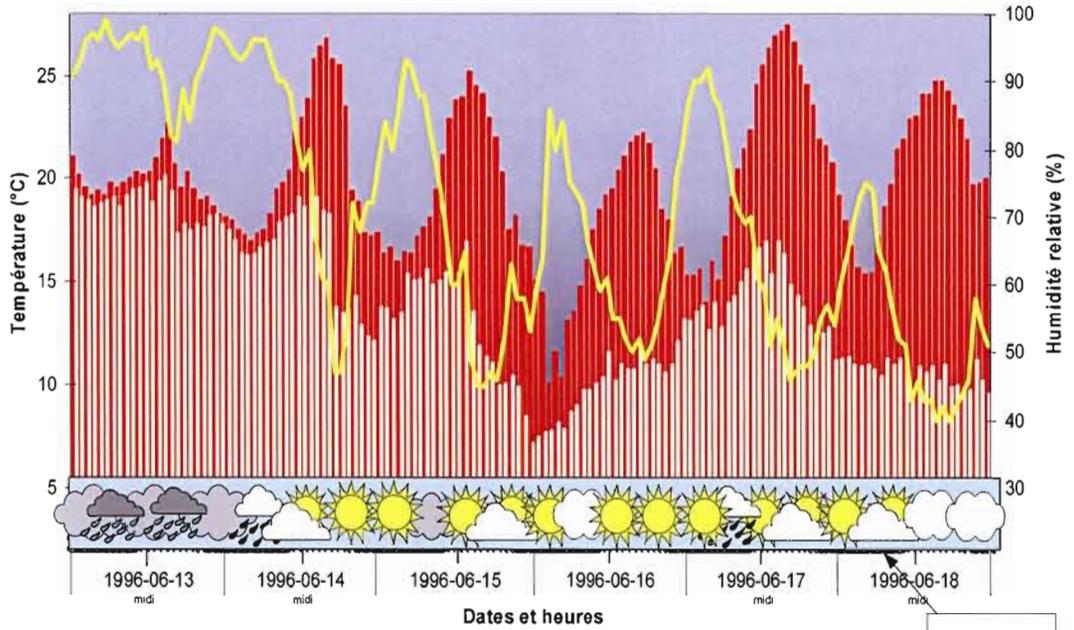


— Vitesse du vent (km/h)    — Pression (kPa)

Figure A.4 Données météorologiques de la semaine du 20 au 25 juillet 1992 à Dorval

Données météorologiques de la station de Dorval à 35,7 m

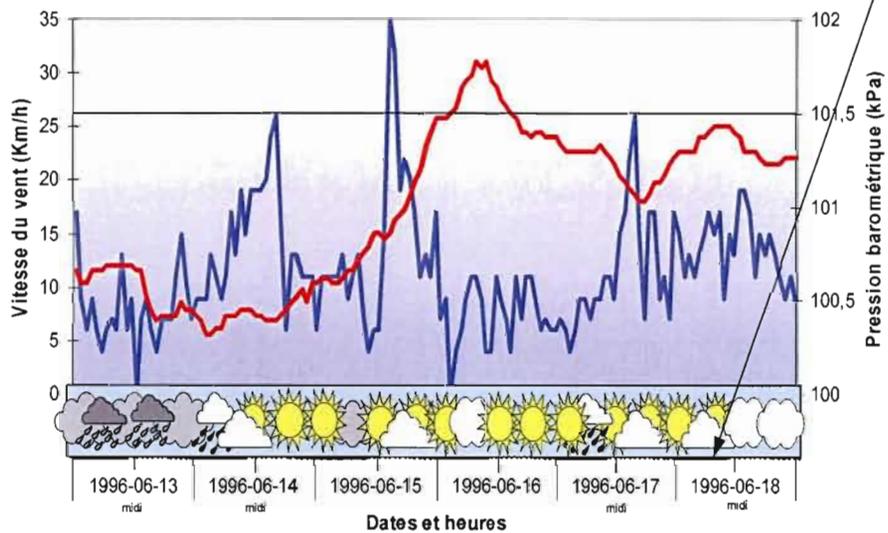
Semaine du 13 juin au 18 juin 1996



■ Température (°C)    — Point de rosée (°C)    — Humidité relative (%)

Acquisition de l'image 1996/06/18 14:50:58

(Environnement Canada)



— Vitesse du vent (km/h)    — Pression (kPa)

Figure A.5 Données météorologiques de la semaine du 13 au 18 juin 1996 à Dorval

Données météorologiques de la station de Dorval à 35,7 m

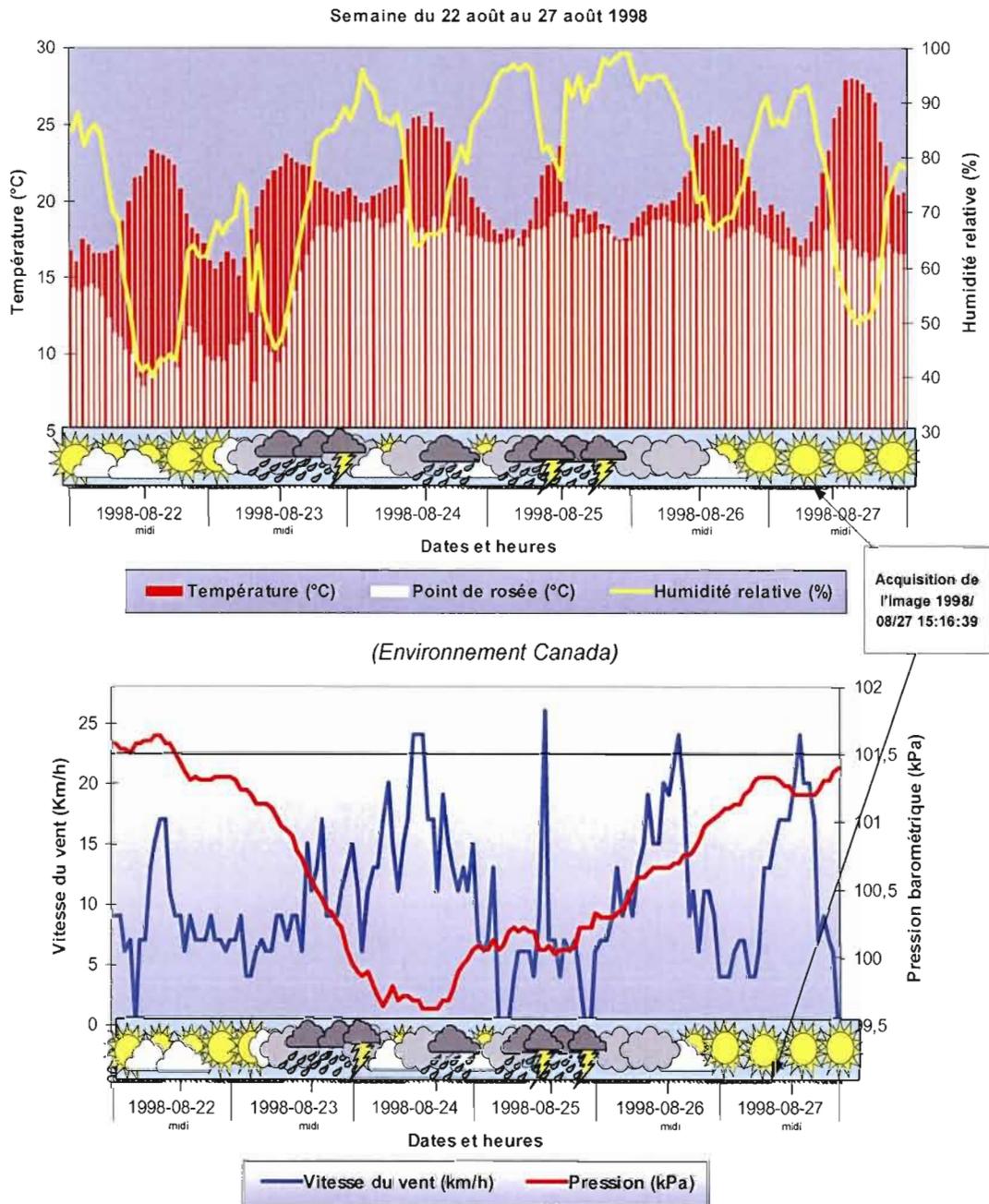


Figure A.6 Données météorologiques de la semaine du 22 au 27 août 1998 à Dorval

Données météorologiques de la station de Dorval à 35,7 m

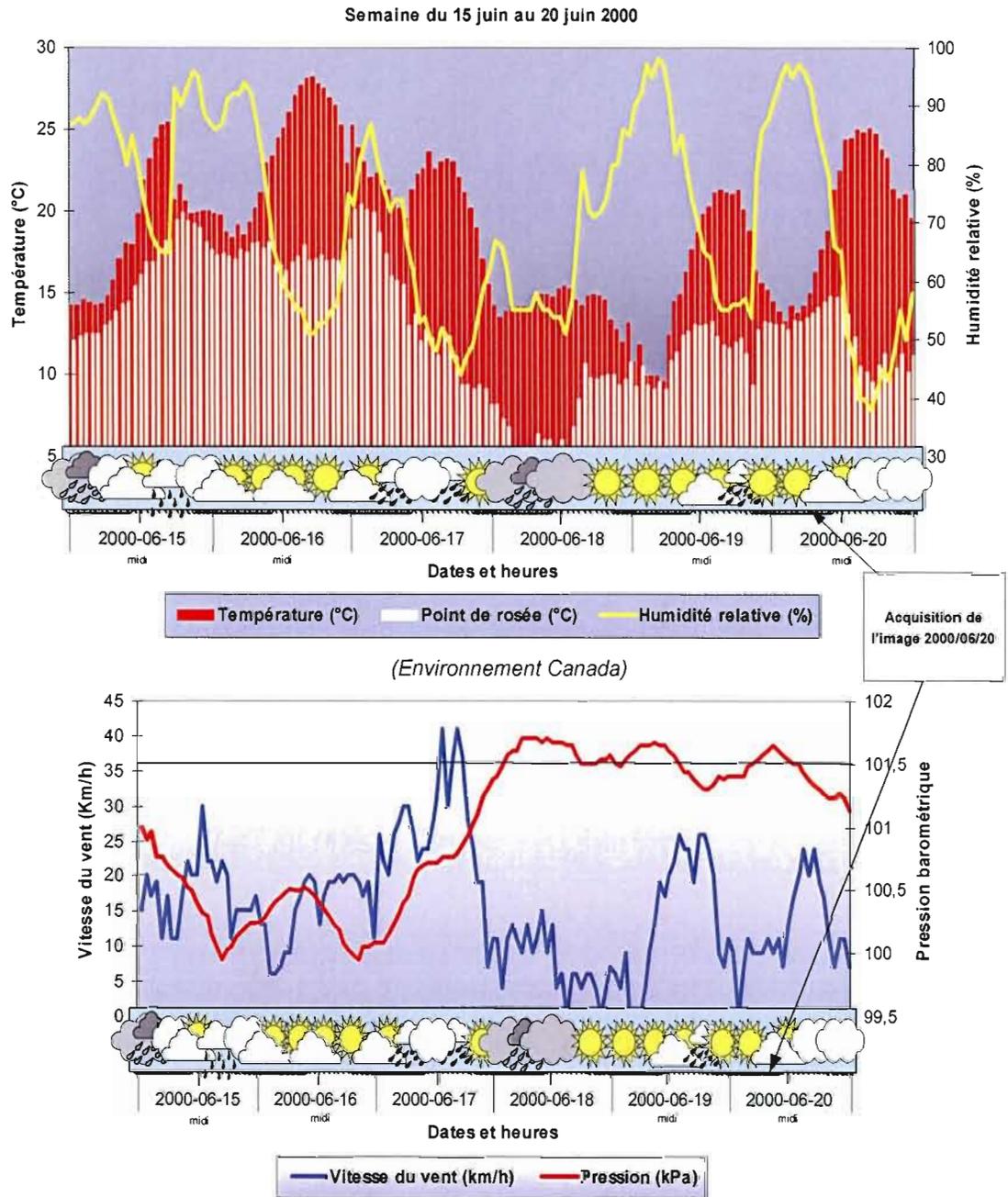


Figure A.7 Données météorologiques de la semaine du 16 au 20 juin 2000 à Dorval

Données météorologiques de la station de Dorval à 35,7 m

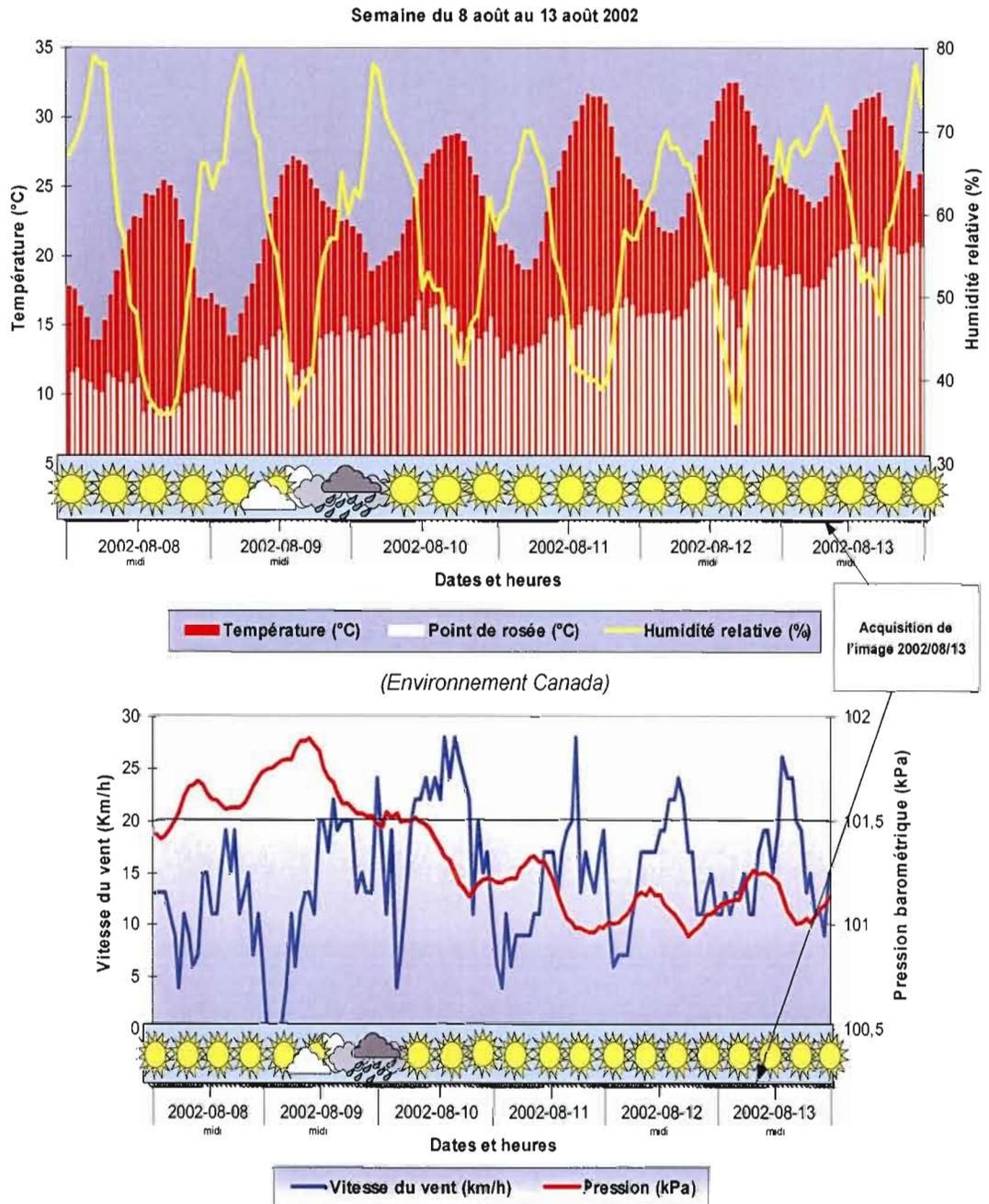
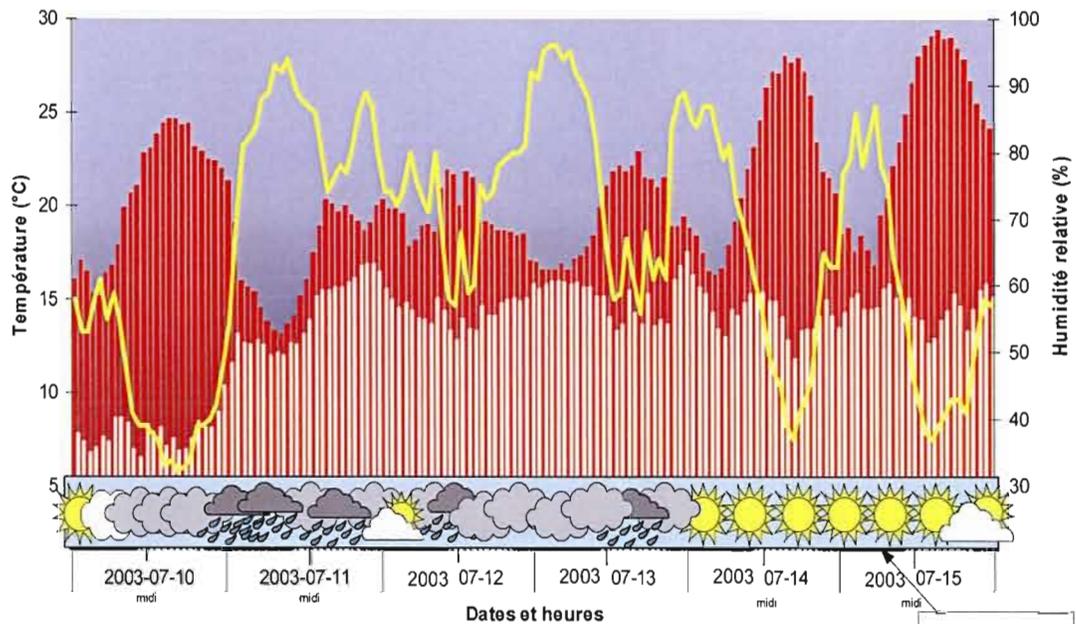


Figure A.8 Données météorologiques de la semaine du 8 au 13 août 2002 à Dorval

Données météorologiques de la station de Dorval à 35,7 m

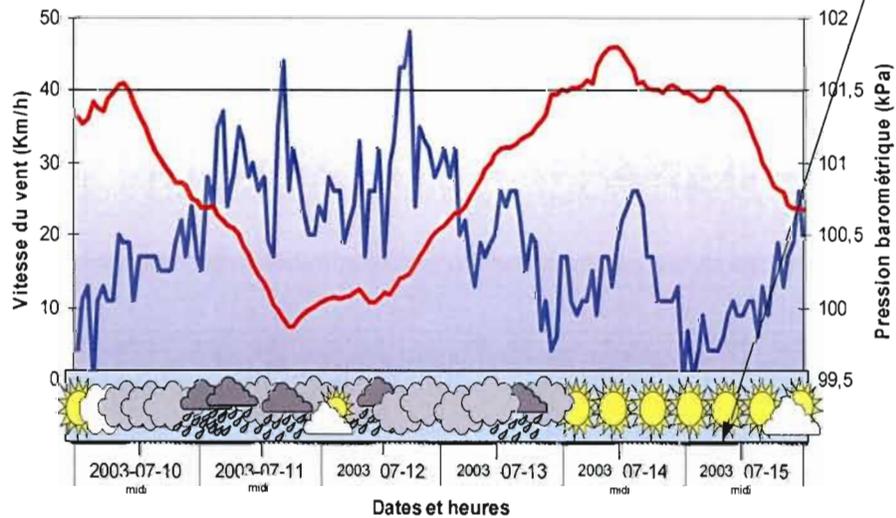
Semaine du 10 juillet au 15 juillet 2003



■ Température (°C)    — Point de rosée (°C)    — Humidité relative (%)

Acquisition de l'image 2003/07/15 15:20:33

(Environnement Canada)



— Vitesse du vent (km/h)    — Pression (kPa)

Figure A.9 Données météorologiques de la semaine du 10 au 15 juillet 2003 à Dorval

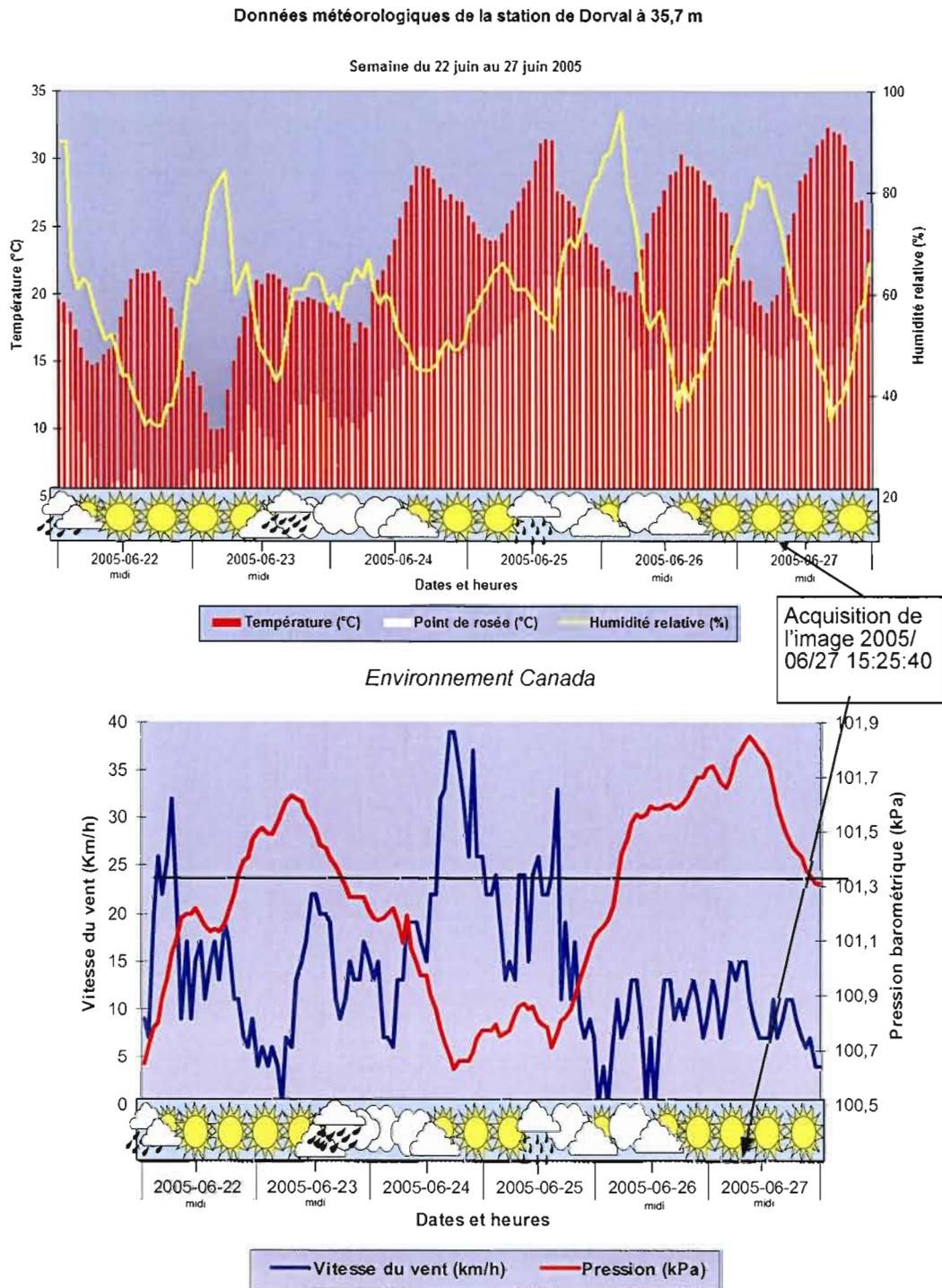


Figure A.10 Données météorologiques de la semaine du 22 au 27 juin 2005 à Dorval