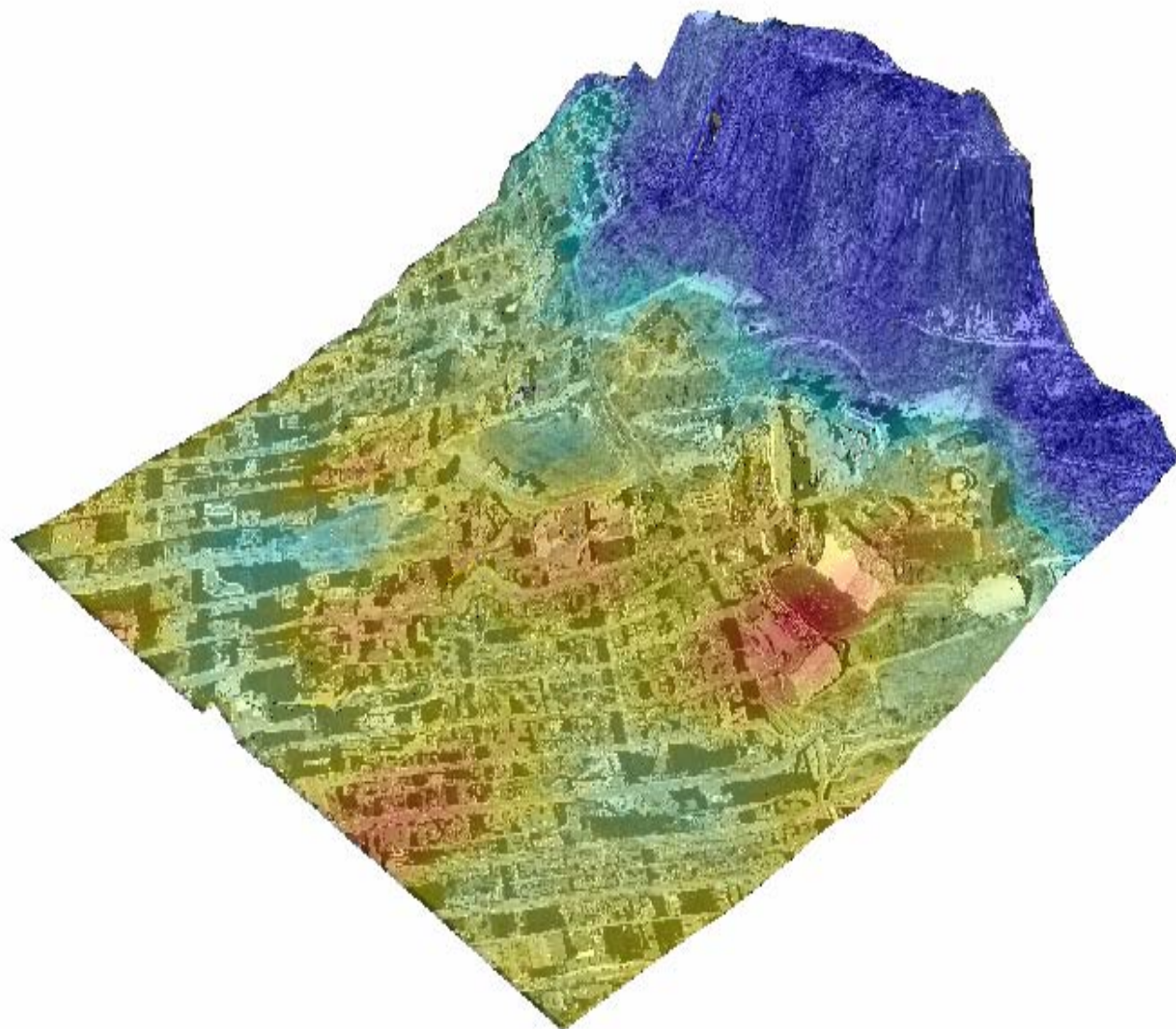


ÉTUDE DES BIOTOPES URBAINS ET PÉRIURBAINS DE LA CMM

Volets 1 et 2 :
Évolution des occupations du sol, du couvert
végétal et des îlots de chaleur sur le territoire de
la Communauté métropolitaine de Montréal
(1984-2005).

Rapport destiné au



François Cavayas, Département de Géographie
Université de Montréal

Yves Baudouin, Département de Géographie
Université du Québec à Montréal



Janvier 2008



Résumé exécutif

La densification du bâti dans les milieux urbanisés et, dans leur périphérie, les nouveaux développements résidentiels, commerciaux et industriels sont à l'origine de changements du climat local. D'une part, l'urbanisation de l'espace engendre la minéralisation des surfaces. Le recouvrement des surfaces par des matériaux, pour la plupart imperméables et peu réfléchissant du rayonnement solaire, accroît les températures de surface et favorise la formation d'îlots de chaleur¹. Les impacts des îlots de chaleur sur la santé de la population, la qualité de l'air et la demande en énergie électrique pour l'alimentation des climatiseurs, sont bien connus. D'autre part, les structures surélevées des bâtiments modifient le régime local des vents. Plusieurs études tendent à démontrer que ces changements du climat modifient aussi le régime local des pluies. Ainsi l'urbanisation de l'espace serait un des facteurs responsables de changements observés ces dernières années. De fait, se produisent des épisodes orageux plus fréquents et plus intenses pendant l'été. Ces orages, combinés à l'imperméabilisation des surfaces, augmentent les risques d'inondations et contribuent aussi à la pollution des cours d'eau et des nappes phréatiques par le lessivage des hydrocarbures et d'autres matières polluantes déposés sur les surfaces imperméables. Un des éléments importants de mitigation de problèmes découlant de ces changements climatiques est le couvert végétal. Des politiques visant la mise à profit des espaces boisés existants dans les secteurs non encore construits et la création de nouveaux espaces verts là où le couvert végétal fait défaut sont nécessaires. Ces politiques doivent s'appuyer sur des connaissances précises de l'état actuel des choses ainsi que sur une bonne compréhension des tendances d'urbanisation.

Le projet « *Biotopes* » décrit dans ce rapport avait un triple objectif : a) dresser un portrait de la situation actuelle des occupations du sol, des boisés, du couvert végétal en général et de l'environnement thermique dans le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM); b) dégager les tendances d'urbanisation de l'espace et établir les relations entre la dynamique de minéralisation des surfaces et les changements de l'environnement thermique, plus particulièrement l'apparition des îlots de chaleur ; c) apporter un premier éclairage sur le rôle que peuvent jouer différentes stratégies de végétalisation dans le contrôle des îlots de chaleur et du ruissellement de surface des eaux pluviales.

Le projet a été initié par le Conseil Régional de l'Environnement de Laval (Guy Garand, directeur) et a été mené par le Département de géographie de l'Université de Montréal

¹ Les îlots de chaleur se définissent comme des zones urbanisées, caractérisées par des températures estivales plus élevées que l'environnement immédiat avec des différences qui varient selon les auteurs de 5 à 10°C.

(François Cavayas, professeur), le Département de géographie de l'Université du Québec à Montréal (Yves Baudouin, professeur et directeur) et l'Institut de recherche en biologie végétale (Michel Labrecque et Yann Vergriete, chercheurs). Le projet comprenait trois volets. Le premier volet, sous la responsabilité du Département de géographie de l'Université de Montréal, portait sur l'évolution des occupations du sol pour le territoire de la CMM depuis les quarante dernières années. Le second volet, sous la responsabilité du Département de géographie de l'Université du Québec à Montréal, s'intéressait à l'évolution de l'environnement thermique et à l'établissement des relations entre le couvert végétal et cet environnement. Ces deux premiers volets reposaient principalement sur les images satellitales en provenance de Landsat². D'autres données ont aussi été utilisées : des données météorologiques, diverses séries de données cartographiques existantes (cartes d'occupation du sol, cartes écoforestières et topographiques) et des photographies aériennes. Le troisième et dernier volet, sous la responsabilité de l'Institut de recherche en biologie végétale, visait à illustrer, à partir d'une revue de littérature, les liens entre le type de couvert végétal et le ruissellement de surface.

Les analyses effectuées dans le premier volet ont montré que les secteurs de la CMM, voués à l'urbanisation (zones blanches) et qui couvrent environ 1650 km², la consommation de l'espace non construit s'est faite à un rythme de l'ordre de 15 km²/an pendant la période 1965-1995. Ce rythme diminue depuis les dix dernières années et se situe à environ 10 km²/an. Tel que prévu, le résidentiel représente l'occupation du sol qui consomme le plus d'espace. Les zones affectées aux activités commerciales et industrielles sont actuellement dans une large mesure occupées causant ainsi une augmentation importante des surfaces imperméables et la prolifération de sites potentiels d'îlots de chaleur. Depuis les années 1960, les boisés à l'intérieur des zones blanches sont en constante diminution. Ainsi de 25% qu'ils occupaient en 1965, ils couvraient moins de 15% en 1995 et leur superficie continue à diminuer jusqu'à nos jours à un rythme qui se situe environ à 7 km²/an. Ces résultats corroborent le constat du Gouvernement du Québec « *le couvert végétal de la région métropolitaine pourrait disparaître d'ici 2029. Les espaces forestiers et végétaux se trouvant à l'intérieur des secteurs voués à l'urbanisation ne font pas l'objet d'une protection particulière à titre d'éléments naturels et risquent de disparaître au profit de l'urbanisation.* » (« *Cadre d'aménagement et orientations gouvernementales* » document déposé en juin 2001 auprès des autorités de la CMM). Dans les zones agricoles protégées (zones vertes), les changements des occupations du sol ne sont pas significatifs ; conséquence sans doute de

² Bien entendu, il aurait été préférable d'utiliser l'imagerie d'un autre satellite ayant une résolution au sol plus fine. Aussi, Landsat représente le seul satellite sur lequel nous puissions nous appuyer pour couvrir la période 1984-2005 et le seul à offrir une bande thermique.

la mise en application de la Loi sur la protection du territoire agricole en 1978. La seule exception cependant sont les boisés. Les documents analysés montrent en effet que la diminution des boisés au courant des dix dernières années suit un rythme comparable à celui dans les zones blanches. Les milieux humides n'occupent qu'une partie infime du territoire de la CMM. Selon les cartes disponibles compilées dans les années 1960, ils couvraient une fraction de 1% du territoire. Dans les zones blanches, le peu qui restait dans les années 1990 est actuellement converti, en partie, en résidences ou autres fonctions urbaines. Les milieux humides qui demeurent encore intacts sont de plus en plus encerclés par les nouveaux développements urbains. Tant pour les boisés que pour les milieux humides, des études approfondies sur les changements de régime hydrique causé par l'urbanisation en périphérie ou par la fragmentation sont nécessaires pour arriver à formuler une série de mesures visant la conservation et la protection adéquates des milieux humides et des boisés.

Nécessairement, le comportement thermique sur le territoire de la CMM suit la tendance de la transformation de l'occupation du sol. Il en ressort, entre autres, au deuxième volet, un changement important de l'environnement thermique traduisant cette augmentation de la surface minéralisée (c'est-à-dire toitures, aires de stationnement, etc.) au détriment de l'espace végétalisé. Par exemple, lors d'une journée du mois de juillet 2005 une différence de près de 12 degrés Celsius a été enregistrée entre le Mont-Royal et l'intersection du boulevard Saint-Laurent et l'avenue Mont-Royal ; pourtant moins d'un kilomètre et demi sépare ces deux secteurs. Les matériaux et les pratiques d'aménagement sont responsables en majeure partie de l'intensité ainsi que des superficies couvertes par les sites potentiels d'îlots de chaleur. En effet, un lien étroit existe entre l'occupation du sol et la température estimée par les données satellitales (coefficient de corrélation de $\approx 0,70$). Les matériaux de surface comportent des albédos³ différents et affectent le milieu environnant. À titre d'exemple, une toiture en goudron et gravier absorbe beaucoup le rayonnement solaire (albédo faible de 0.03-0.18) comparativement à une toiture réfléchissante (albédo de 0.60-0.70). Par conséquent, plus les matériaux de surface absorberont de l'énergie, plus leur température de surface augmentera. Les banlieues et les régions périurbaines possèdent elles aussi leurs sites potentiels d'îlots de chaleur, ce n'est plus juste l'apanage des centres-villes. Toutefois, nous remarquons que certains arrondissements et municipalités ont su s'en prémunir tandis que d'autres ont amplifié la situation. Des pratiques d'aménagement adaptées comme la conservation d'arbres matures et la plantation de feuillus, dès la fin des projets domiciliaires, contribuent considérablement à la baisse le contexte thermique

³ Fraction de la lumière et de l'énergie reçue qui réfléchit ou qui diffuse un corps non lumineux.

favorisant ainsi un mieux être pour la population. De plus, l'ajout de zones tampons végétalisées entre des secteurs commerciaux et/ou industriels, près des zones résidentielles, seraient hautement souhaitables. Afin d'illustrer ces propos, nous retrouvons annexé à ce document, 188 documents cartographiques qui abordent le comportement thermique actuel (27 juin 2005) et son évolution (1984 vs 2005), en liaison avec l'étendue du couvert végétal, exprimée par l'indice de végétation actuel (27 juin 2005) et son évolution (1984 vs 2005) pour chacun des arrondissements/villes de Montréal et pour douze autres composantes⁴ de la CMM. Les cartes d'évolution thermique et d'indice de végétation illustrent les changements survenus entre deux dates : 17 juin 1984 et 27 juin 2005. Les cartes d'évolution thermique montrent les secteurs s'étant réchauffés (maximum de +16,96 °C) ou refroidis (maximum de -11,04 °C). Des cartes régionales de la CMM de type *affiche*, pour ces quatre thèmes, sont également disponibles.

Le troisième volet conclut que toute stratégie de végétalisation, considérée isolément, peut difficilement régler le problème du ruissellement de surface, mais que les perspectives offertes par la combinaison des stratégies de verdissement devraient nous inciter à adopter dès aujourd'hui des mesures de végétalisation du milieu urbain. Et si l'on souhaite obtenir des résultats marqués, il faut entreprendre une démarche de végétalisation audacieuse. Une telle démarche devrait mettre à profit une intervention concrète des pouvoirs publics ainsi que l'établissement de nouvelles normes pour les constructions et l'élaboration de mesures fiscales liées à l'émission d'écoulement de surface, tel que cela est pratiqué dans certains pays.

Le rapport est divisé en deux parties. La première est consacrée aux études effectuées dans les deux premiers volets (occupation du sol et environnement thermique). La deuxième partie porte sur l'étude effectuée dans le troisième volet (stratégies de végétalisation).

⁴ Boisbriand, Deux-Montagnes, Laval, Chomedey, Duvernay, Saint-Vincent-de-Paul, Laval-Ouest, Pont-Viau, Laval-des-Rapides, Saint-François, Laval-sur-le-Lac, Sainte-Dorothée, Fabreville, Sainte-Rose, Auteuil, Vimont, Longueuil et Repentigny.

Remerciements des partenaires

Le projet « *Biotopes* » a été initié par M. Guy Garand du Conseil Régional de l'Environnement de Laval (directeur). Ce projet a été rendu possible grâce à une contribution du Fonds d'action québécois pour le développement durable (FAQDD) et de son partenaire financier le gouvernement du Québec, ainsi que du Ministère des Affaires municipales et des Régions, de la Ville de Laval et de la Conférence régionale des élus de Laval. Notons aussi la contribution en ressources humaines et matérielles de la Ville de Montréal et de la Communauté Métropolitaine de Montréal (CMM).

L'étude sur les îlots de chaleur et les indices de végétation a également bénéficié d'une subvention⁵ auprès du programme fédéral du Fonds d'action pour les changements climatiques (FACC), du consortium Ouranos et Horizons Sciences. Cette étude a profité de supports scientifiques d'Environnement Canada et du consortium Ouranos, ainsi que du support logistique (données) du Centre de Sécurité civile de la Ville de Montréal.

L'étude sur l'évolution de l'occupation du sol a été réalisée par François Cavayas (professeur) du Département de géographie de l'Université de Montréal et son équipe (R. Cissokho, N. El-Hadji, M.-C. Jutras-Perreault et J. Komgep) ; celle sur les îlots de chaleur et les indices de végétation par Yves Baudouin (professeur et directeur) du Département de géographie de l'Université du Québec à Montréal et son équipe (S. Chalal, C. Houle, J. Leprince, P. Martin, C. Pérez, N. Saker) ; et enfin l'étude sur les stratégies de verdissement par Michel Labrecque et Yann Vergriete (chercheurs) de l'Institut de recherche en biologie végétale du Jardin Botanique de Montréal. Notons la contribution très importante de Mme Stéphanie Bourgeault du Conseil Régional de l'Environnement de Laval à la coordination du projet, la recherche de documents nécessaires à la réalisation du projet auprès des MRC et des municipalités, l'organisation des conférences qui ont eu lieu tout le long de ce projet, et la promotion du projet.

Nous tenons donc à remercier l'ensemble des organismes mentionnés pour leurs supports financiers, scientifiques et logistiques, ainsi que les étudiants qui y ont contribué.

Yves Baudouin et François Cavayas

⁵ Il s'agit d'une demande de subvention conjointe déposée en 2004 avec le Département de Géographie de l'Université du Québec à Montréal et la Direction de la Santé Publique de Montréal (DSP). Le projet avait pour titre: *Identification des secteurs vulnérables à la chaleur intense dans une métropole canadienne en vue d'interventions et d'études ciblées en santé publique.*

TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures	8
Liste des tableaux	10
1. Mise en contexte	11
2. But et objectifs	13
3. Présentation du milieu	14
4. Évolution des occupations du sol (1966-2007).....	16
4.1 Objectifs.....	16
4.2 Méthodologie	16
4.2.1 Formation de la série diachronique des données.....	17
4.2.2 Prétraitements des données cartographiques	19
4.2.3 Prétraitements des images satellitales	25
4.2.4 Analyses comparatives.....	27
4.3 Résultats.....	31
4.3.1 Bilan 1966-1994	31
4.3.2 Bilan dans les zones blanches 1994-2005	33
4.3.3 Évolution des peuplements forestiers 1994-2005	37
4.3.4 Évolution des milieux humides 1994-2005	40
4.4 Génération d'indicateurs.....	42
4.4.1 Convertir une carte d'occupation en degré d'imperméabilité	43
4.4.2 Analyser les pressions d'urbanisation sur les milieux naturels.....	44
4.5 Conclusions et recommandations	45
5. Îlots de chaleur et indice de végétation	47
5.1 Objectifs.....	47
5.1.1 Précisions sur quelques termes	47
5.1.2 Les facteurs et les conséquences	50
5.2 Méthodologie	54
5.2.1 Vérification des conditions météorologiques	56
5.2.2 Acquisition des images.....	59
5.2.3 Corrections géométriques	60
5.2.4. Vérification des valeurs thermiques obtenues avec celles des stations météorologiques	61
5.2.5 Application des masques visant à exclure le réseau hydrographique et les zones agricoles	61
5.2.6 Traitement des données.....	63
5.3 Résultats.....	69
5.3.1 Les documents cartographiques	69
5.3.2 Les îlots de chaleur	74
5.4 Recommandations.....	84
6. Études de cas.....	88
6.1 Développement commercial (Repentigny)	88
6.2 Développement industriel (arrondissement Saint-Laurent).	88
6.3 Développement résidentiel (Longueuil).....	89
6.4 Développement d'un terrain de golf (arrondissement Saint-Laurent).....	91
6.5 À la recherche d'une meilleure précision des températures estimées par les données Landsat.....	91
Références	100
Annexe 1 : Données utilisées.....	103

Représentations cartographiques de la Communauté métropolitaine de Montréal (document séparé) :

Annexe 2 : Les îlots de chaleur (2005) et l'évolution thermique (1984-2005)

Annexe 3 : Les indices de végétation (2005) et son évolution (1984-2005)

Liste des figures

Figure 3.1 : Territoire de la CMM et divisions administratives	14
Figure 3.2 : Division du territoire de la CMM en zones agricoles protégées (vert), zones urbanisées (blanc) et surfaces aquatiques (cyan)	15
Figure 4.1 : Approche méthodologique, Volet 1	16
Figure 4.2 : Cartes du CLUMP reclassifiées.	22
Figure 4.3 : Double système de taxinomie de CLUMP pour 1981.	23
Figure 4.4 : Mosaïque des cartes de l'inventaire forestier du MRNF (1994).	24
Figure 4.5 : Cartes d'occupation du sol.	25
Figure 4.6 : Problèmes avec les nuages	26
Figure 4.7 : Problèmes de classification découlant des conditions climatiques différentes d'une année à l'autre.	26
Figure 4.8 : Exemples d'images classifiées intégrées dans la série de données diachroniques.	27
Figure 4.9 : Vue en « vol d'oiseau » d'une partie de la couronne Nord et de Laval	29
Figure 4.10 : Vue en « vol d'oiseau » d'une partie de la couronne Sud et de Longueuil.	30
Figure 4.11 : Changements des occupations du sol entre 1966 et 1994 à l'intérieur des zones blanches.	32
Figure 4.12 : Nouveaux développements jusqu'à 1994	33
Figure 4.13 : Étendue des terrains vacants en 1994 selon leur affectation (carte MAMM).	34
Figure 4.14 : Occupation actuelle (2005) des terrains vacants tels qu'établis en 1994 par la carte MAMM.	35
Figure 4.15 : Nouveaux développements jusqu'à 2005	36
Figure 4.16 : Évolution du couvert forestier (1994-2005) pour l'ensemble du territoire de la CMM	38
Figure 4.17 : Illustrations des changements, repérées dans le couvert forestier en zone verte (orthophotographies 2005)	39
Figure 4.18 : Évolution du couvert forestier (1994-2005) dans certaines unités administratives de la CMM	40
Figure 4.19 : Changement repéré dans une terre humide à partir de l'image Landsat 2005 dans la zone verte de la Ville de Laval (orthophoto 2005)	41
Figure 4.20 : Changements repérés dans les terres humides à partir de l'image Landsat 2005 dans la zone blanche (orthophotos 2005).	42
Figure 4.21 : Carte du degré d'imperméabilité des sols : le Mont Royal et ses environs (vue à vol d'oiseau de l'ouest de l'île de Montréal).....	44
Figure 4.22 : Pressions d'urbanisation de plus en plus importantes exercées sur un milieu humide	45
Figure 4.23 : Changements des occupations du sol tel que perçus sur des images satellitales à haute résolution	45
Figure 5.1 : Variation des températures de surface dans le milieu urbain (île de Montréal) ..	48
Figure 5.2 : Données météorologiques de la semaine du 12 au 17 juin 1984 de la station de Dorval (Pierre Elliot-Trudeau).	57
Figure 5.3 : Données météorologiques de la semaine du 22 au 27 juin 2005 de la station de Dorval (Pierre Elliot-Trudeau).	58
Figure 5.4 : Illustration de l'opération de correction géométrique ; image de référence juin 2005.....	61
Figure 5.5 : Stations météorologiques d'Environnement Canada.	62
Figure 5.6 : Masquage du réseau hydrographique et des zones agricoles (en gris).....	62
Figure 5.7 : Exemple de production cartographique du NDVI pour le 27 juin 2005.	64
Figure 5.8 : Exemple de production cartographique des îlots de chaleur pour 2005.	66
Figure 5.9 : Températures estimées pour deux dates (1984 et 2005) et leurs différences.	68

Figure 5.10 : Exemples de cartes du comportement thermique.....	69
Figure 5.11 : Localisation des îlots de chaleur le 27 juin 2005.....	70
Figure 5.12 : Localisation des secteurs thermiquement modifiés entre le 17 juin 1984 et le 27 juin 2005.	71
Figure 5.13 : Représentation de l'indice de végétation du 27 juin 2005.....	72
Figure 5.14 : Localisation des secteurs comportant une modification de l'indice de végétation le 17 juin 1984 et le 27 juin 2005.	73
Figure 5.15 : Répartition des températures de l'image du 27 juin 2005 ainsi que les îlots de chaleur à partir de 32°C.....	74
Figure 5.16 : Proportion des villes et arrondissements de Montréal comportant des superficies entre 32-33°C et au-dessus de 33 °C.	75
Figure 5.17 : Exemple d'îlots de chaleur intra-urbain dans l'arrondissement Saint-Laurent. .	76
Figure 5.18 : Situation actuelle et comportement thermique	77
Figure 5.19 : Proportion des villes et arrondissements de la CMM comportant des superficies (proportions en %) au-dessus de 32°C et des NDVI au-dessus de 0.....	79
Figure 5.20 : Proportion des villes et arrondissements de la CMM comportant des superficies (proportions en %) au-dessus de 32°C et des NDVI entre 0-0,25; 0,25-0,50; 0,50-0,75; 0,75-1,0.	80
Figure 5.21 : Proportion des villes et arrondissements de la CMM comportant des superficies (en %) au-dessus de 32°C et des NDVI au-dessus 0,25.....	81
Figure 5.22 : Coupe à Montréal illustrant la relation entre la température et le NDVI	83
Figure 5.23 : Divers solutions concrètes pour contrôler le comportement thermique	87
Figure 6.1 : Cas d'un centre commercial avec une forte minéralisation.....	88
Figure 6.2 : Cas d'une industrie avec une forte minéralisation.....	89
Figure 6.3 : Cas d'un nouveau développement résidentiel (Longueuil)	90
Figure 6.4 : Effets du nouveau développement résidentiel (figure 6.3) sur le comportement thermique du milieu	90
Figure 6.5 : Secteur de l'arrondissement Saint-Laurent situé à proximité de l'usine Bombardier (2005).....	91
Figure 6.6 : Effets de l'émissivité sur les températures apparentes.	93
Figure 6.7 : Variation saisonnière de la température en 2001 : milieux urbanisés.....	98
Figure 6.8 : Variation saisonnière de la température en 2001 : milieux ruraux	99

Liste des tableaux

Tableau 4.1 : Série chronologique de données utilisées pour le Volet 1.....	18
Tableau 4.2 : Système de taxinomie des cartes CLUMP (1966; 1971 et 1976).....	21
Tableau 4.3 : Double système de taxinomie de CLUMP pour l'inventaire de 1981.	22
Tableau 4.4 : Terrains à vocation non forestière, inventaire forestier MRNF.	24
Tableau 4.5 : Catégories des cartes d'occupation du sol.....	25
Tableau 4.6 : Coefficients d'imperméabilisation en fonction des occupations du sol.....	43
Tableau 5.1 : Liste des images acquises.	59
Tableau 5.2 : Longueur d'onde de chacune des bandes de Landsat 4 et Landsat-5 (TM). ...	59
Tableau 5.3 : Qualité de la correction géométrique (points de contrôle) de juillet 1992 ; image de référence juin 2005.....	60
Tableau 5.4 : Proportion des superficies des municipalités et/ou arrondissements ayant des températures de plus de 32°C et un indice de végétation de plus de 0.	82
Tableau 6.1: Émissivités de surface (compilation de plusieurs publications).....	92
Tableau 6.2 : Calcul de la luminance au sol (bande thermique)	94
Tableau 6.3 : Données météorologiques et résultats de la calculatrice de la NASA.....	94
Tableau 6.4 : Transformations des valeurs numériques des images thermiques de Landsat en températures apparentes des objets visés par le capteur.....	95
Tableau 6.5 : Différences entre températures apparentes et températures au sol.	96
Tableau 6.6 : Températures de différentes occupations du sol.....	97

1. Mise en contexte

Presque la moitié de la population à l'échelle planétaire vit actuellement dans les villes et les mégalo­poles et tout indique que dans les années 2030 plus de 60% y vivra (United Nations, 2004). Il est donc normal que les questions de la qualité de l'environnement physique des villes, de l'impact de l'urbanisation sur le climat, l'hydrologie, la pollution de l'air, et par ricochet, sur la santé et le bien-être des citoyens ainsi que sur la qualité des écosystèmes, préoccupent de plus en plus. On connaît actuellement que la densification du bâti dans les milieux urbanisés et, dans leur périphérie, les nouveaux développements résidentiels, commerciaux et industriels sont à l'origine de changements du climat local (Arnfield, 2003). D'une part, l'urbanisation de l'espace engendre la minéralisation des surfaces. Le recouvrement des surfaces par des matériaux, pour la plupart imperméables et peu réfléchissant du rayonnement solaire, accroît les températures de surface et favorise la formation d'îlots de chaleur⁶. Les impacts des îlots de chaleur sur la santé de la population, la qualité de l'air et la demande en énergie électrique pour l'alimentation des climatiseurs, sont bien connus. D'autre part, les structures surélevées des bâtiments modifient le régime local des vents (augmentation de la rugosité des surfaces, création de canyons). Plusieurs études tendent à démontrer que ces changements du climat modifient aussi le régime local des pluies. Plusieurs études tendent à démontrer que ces changements du climat modifient aussi le régime local des pluies. Ainsi l'urbanisation de l'espace serait un des facteurs responsables de changements observés ces dernières années. De fait, se produisent des épisodes orageux plus fréquents et plus intenses pendant l'été (Changnon et Westcott, 2002; Diem, 2008). Ces orages, combinés à l'imperméabilisation des surfaces, augmentent les risques d'inondations et contribuent aussi à la pollution des cours d'eau et des nappes phréatiques par le lessivage des hydrocarbures et d'autres matières polluantes déposés sur les surfaces imperméables (Chester et Gibbons, 1996). Un des éléments importants de mitigation de problèmes découlant de ces changements climatiques est le couvert végétal (e.g. Booth *et al.*, 2002; Rosenzweig *et al.* 2006; Sailor 2006). Des politiques visant la mise à profit des espaces boisés existants dans les secteurs non encore construits et la création de nouveaux espaces verts là où le couvert végétal fait défaut sont nécessaires. Ces politiques doivent s'appuyer sur des connaissances précises de l'état actuel des choses ainsi que sur une bonne compréhension des tendances d'urbanisation.

⁶ Les îlots de chaleur se définissent comme des zones urbanisées, caractérisées par des températures estivales plus élevées que l'environnement immédiat avec des différences qui varient selon les auteurs de 5 à 10°C.

Les études portant sur l'état actuel du couvert végétal, les relations entre occupation du sol et environnement thermique et les stratégies de verdissement en liaison avec le problème du ruissellement de surface dans le contexte de la Communauté Métropolitaine de Montréal (CMM) sont plutôt rares. Mentionnons à titre d'exemple l'étude effectuée en 1989 par l'Université de Sherbrooke pour le compte de la Communauté Urbaine de Montréal (CUM)⁷ : « *Évaluation de la qualité des biotopes urbains par télédétection satellitaire* ». Cette étude mettait en évidence le lien étroit entre les types d'occupation du sol et l'environnement thermique local sur le territoire de l'Île de Montréal. Ce lien était expliqué par la proportion du couvert végétal par type d'occupation du sol (résidentiel, commercial, industriel, etc.) et la température de surface. Ainsi une occupation du sol tel un centre commercial ou un site industriel avec une faible proportion de couvert végétal affichera des températures de surface élevées et pourrait être le siège d'un îlot de chaleur. L'étude concluait que la présence d'espaces verts en milieu urbain est un élément clé pour contrôler l'environnement thermique.

Le projet « *Biotopes* » décrit dans ce rapport avait un triple objectif : a) dresser un portrait de la situation actuelle des occupations du sol, des boisés, du couvert végétal en général et de l'environnement thermique dans le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM); b) dégager les tendances d'urbanisation de l'espace et établir les relations entre la dynamique de minéralisation des surfaces et les changements de l'environnement thermique, plus particulièrement l'apparition des îlots de chaleur ; c) apporter un premier éclairage sur le rôle que peuvent jouer différentes stratégies de végétalisation dans le contrôle des îlots de chaleur et du ruissellement de surface des eaux pluviales.

Dans cette partie du rapport nous décrivons les travaux effectués et les principaux résultats obtenus dans deux volets thématiques : a) analyse de l'évolution de l'occupation du sol ; b) analyse de l'évolution de l'environnement thermique en liaison avec l'évolution du couvert végétal. Pour étudier cette évolution nous nous sommes principalement servis d'images provenant des satellites Landsat-5 et Landsat-7, les seules qui permettaient de couvrir avec des données adéquates une période d'une vingtaine d'années (de 1984 à nos jours) favorisant ainsi une meilleure compréhension des impacts de l'urbanisation de l'espace.

⁷ Étude réalisée sous la coordination de Guy Garand, aujourd'hui directeur général du CRE de Laval.

2. But et objectifs

Le but est d'offrir aux municipalités, aux MRC et à la région métropolitaine un portrait clair de la situation actuelle de l'occupation du sol, du couvert végétal ainsi que du comportement thermique de la CMM.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

Comparer le taux d'occupation de couvert végétal entre les années 1984 et 2005 sur le territoire de la CMM;

Corréler les biotopes (faible densité du bâti, zone industrielle, espaces verts, zone agricole) avec l'évolution du couvert végétal et les îlots potentiels de chaleur;

Faire des recommandations sur les mesures à prendre pour mitiger les effets d'une augmentation de la minéralisation du territoire et par le fait même de l'imperméabilisation du sol et de l'augmentation de la présence des îlots de chaleur.

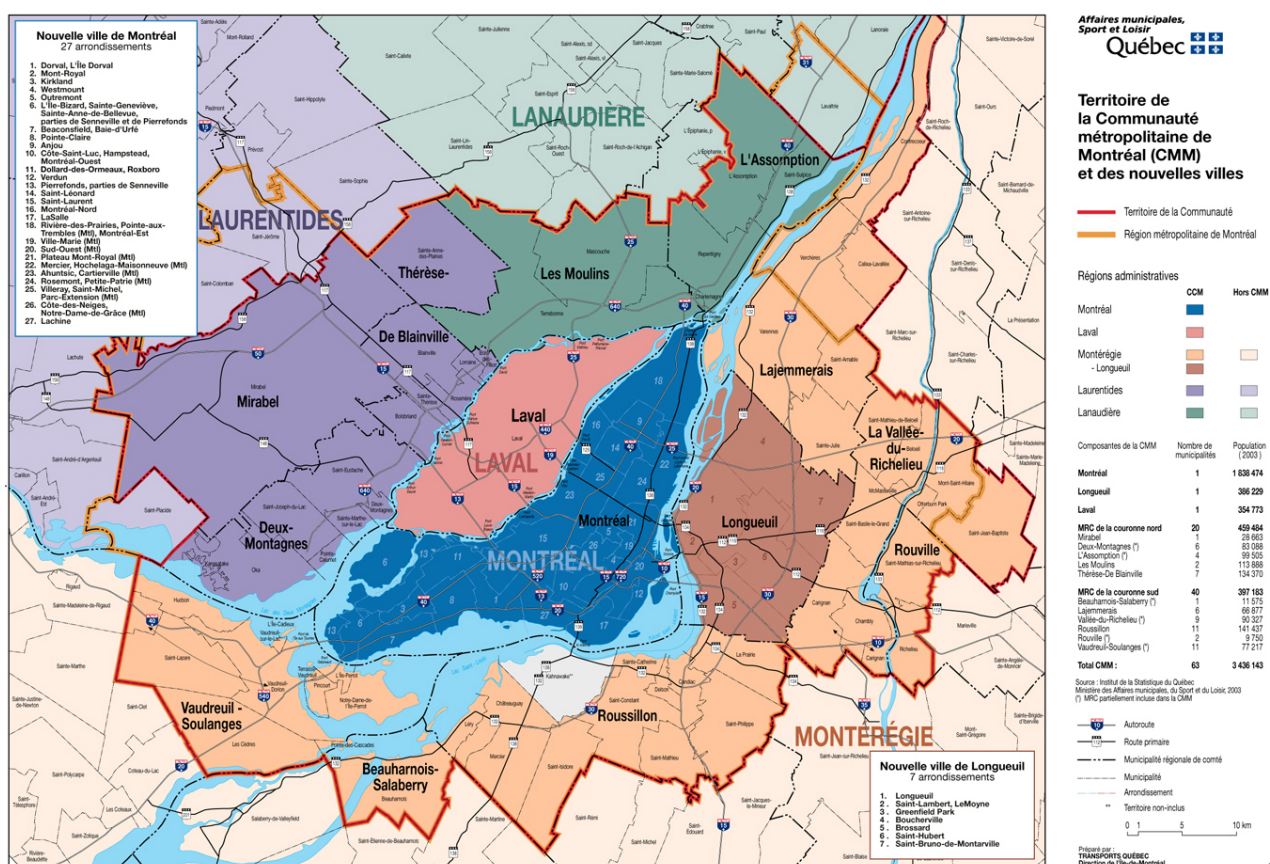
Notre projet comprend deux volets :

Volet 1 : Évolution de l'occupation du sol entre 1985 et 2005 sur le territoire de la CMM;

Volet 2 : Corrélation des changements d'occupation du sol et du couvert végétal en lien avec le comportement thermique de la CMM.

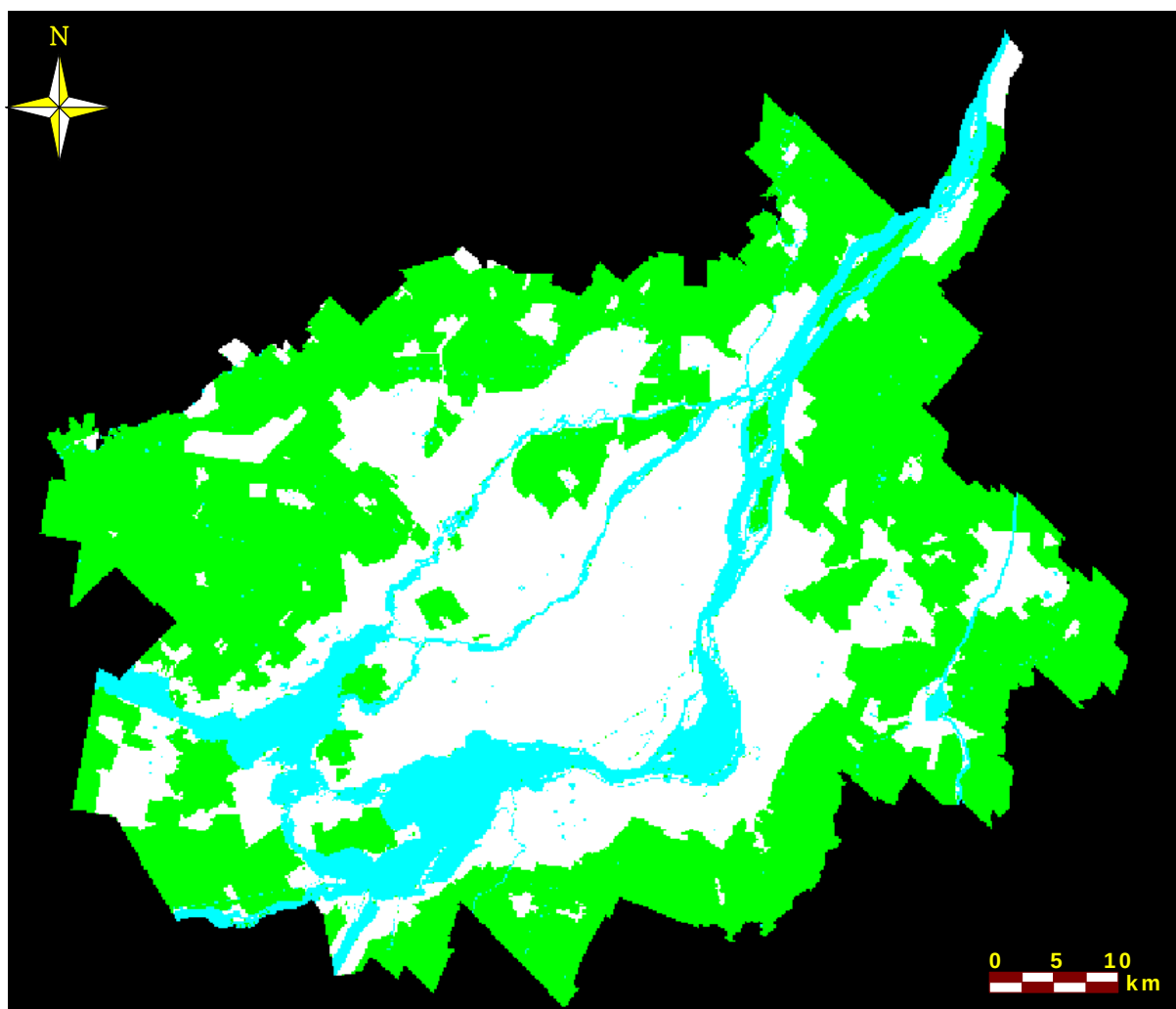
3. Présentation du milieu

Le territoire à l'étude est celui de la Communauté Métropolitaine de Montréal (Figure 3.1). Il s'agit d'un territoire d'environ 4 360 km². Nous y retrouvons 14 Municipalités régionales de comté (entièrement ou partiellement incluses) et 82 Municipalités locales (source : <http://www.cmm.qc.ca>). La population estimée pour 2007 est de 3,6 millions d'habitants. Mises à part les surfaces aquatiques qui représentent un peu plus de 10% du territoire, le reste est partagée entre les terres agricoles protégées (zones vertes), environ 58%, et les terres urbanisées ou en devenir (zones blanches), environ 42%. La figure 3.2 montre cette division du territoire de la CMM.



(Source : Affaires municipales, Sports et Loisir, 2003)

Figure 3.1 : Territoire de la CMM et divisions administratives



(Source : MAPAQ, 1999)

Figure 3.2 : Division du territoire de la CMM en zones agricoles protégées (vert), zones urbanisées (blanc) et surfaces aquatiques (cyan)

4. Évolution des occupations du sol (1966-2007)

4.1 Objectifs

Les objectifs de ce volet thématique étaient les suivants :

- 1) faire le bilan des changements des occupations du sol entre 1984 et 2005 ; et
- 2) générer des indicateurs utiles à l'analyse des impacts de ces changements sur l'environnement.

4.2 Méthodologie

La figure 4.1 montre l'approche méthodologique suivie afin de faire le bilan des changements des occupations du sol. Les différentes étapes sont décrites en détail dans les sections qui suivent. Concernant la génération d'indicateurs, une recherche bibliographique a été effectuée afin de trouver les liens déjà établis entre certains facteurs environnementaux, tel l'imperméabilité des sols, et les occupations du sol. À l'aide de nos cartes d'occupations du sol nous avons par la suite transposé ces relations à la réalité de la CMM afin de dresser des cartes illustrant ces indicateurs. Les résultats des travaux dans ce domaine, somme toute préliminaires, sont montrés et commentés dans la section 4.4.

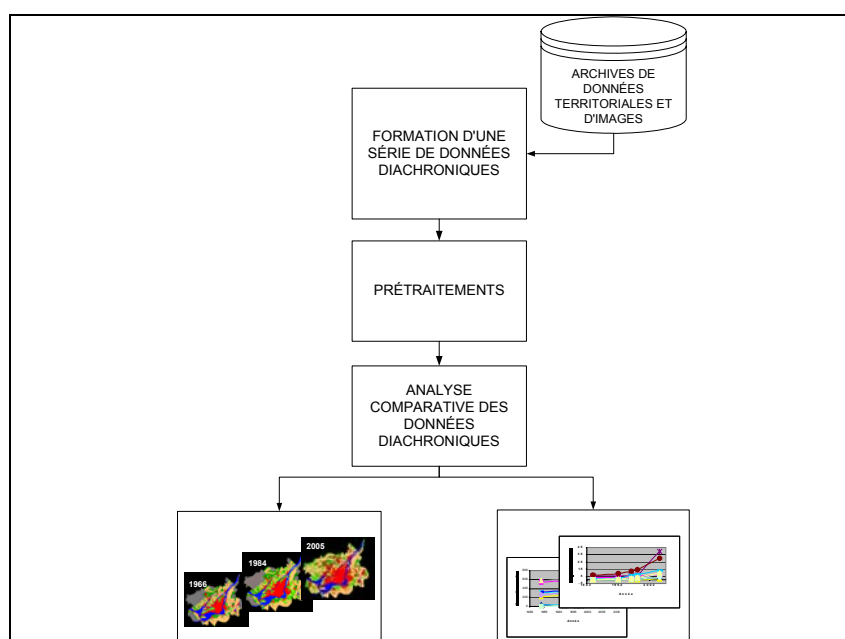


Figure 4.1 : Approche méthodologique, Volet 1

4.2.1 Formation de la série diachronique des données

La recherche en premier lieu dans les archives des différents organismes participants à ce projet a permis de trouver divers documents (cartes, photos, images satellitales) utiles à la réalisation de cette étude. Le tableau 4.1 en présente la liste en fonction de l'année de leur publication (cartes) ou d'acquisition (imagerie), leurs caractéristiques, leur source ainsi que leur utilisation soit dans l'étape de l'analyse ou comme données de validation des résultats des analyses.

Bien qu'il eût prévu de faire le bilan des changements de l'occupation du sol entre 1984-2005, nous avons décidé de reculer dans le temps jusqu'aux années 1960. Avec la mise en vigueur de la Loi sur la protection du territoire agricole en 1978, ce recul était nécessaire pour mieux comprendre l'évolution des deux zones : la zone verte (protégée) et la zone blanche (périmètre d'urbanisation). La disponibilité des cartes d'occupation du sol numériques du CLUMP (tableau 4.1) couvrant une grande partie du territoire de la CMM rendait ceci possible. Les autres cartes retenues pour nos analyses comprenaient : la série des cartes écoforestières du MRNF (23 feuillets) ainsi que la carte des occupations du sol du MAMM (périmètre urbanisé). Les cartes écoforestières ont surtout servi pour faire le bilan des changements du couvert forestier de la CMM tandis que la carte d'occupation du sol, pour pouvoir établir le taux annuel de conversion de l'espace non construit à l'intérieur du périmètre urbain. La série d'images satellitales indiquées dans ce tableau a pour la plupart servi à l'analyse. Finalement les orthophotographies numériques et les cartes topographiques ont été utilisées pour contrôler les résultats des analyses. Il est à noter que d'autres documents mis à notre disposition via le CRE de Laval, telles les cartes forestières en format papier (1984), des photos en format papier des certaines municipalités (numérisées et orthorectifiées au laboratoire de télédétection de l'U. de M.), des plans et des schémas d'aménagement ont été aussi utilisés occasionnellement pour résoudre certains conflits d'interprétation des documents utilisés pour l'analyse.

Année	Type de document	Source	Utilisation
1966 (vers)	Carte d'occupation du sol (format numérique, échelle de compilation: 1/50 000)	Canada Land Use Monitoring Program (CLUMP; http://geogratias.cgdi.gc.ca/)	Analyse
1971	Carte d'occupation du sol (format numérique, échelle de compilation: 1/50 000)	Canada Land Use Monitoring Program (CLUMP; http://geogratias.cgdi.gc.ca/)	Validation
1976	Carte d'occupation du sol (format numérique, échelle de compilation: 1/50 000)	Canada Land Use Monitoring Program CLUMP; http://geogratias.cgdi.gc.ca/)	Document écarté de l'analyse car il présente des incohérences
1981	Carte d'occupation du sol (format numérique, échelle de compilation: 1/50 000)	Canada Land Use Monitoring Program (CLUMP; http://geogratias.cgdi.gc.ca/)	Analyse
1984	Image satellitale : TM-Landsat-5	UQÀM	Validation
1986	Image satellitale : TM-Landsat-5	UQÀM	Validation
1990	Image satellitale : TM-Landsat-5	UQÀM	Validation
1992	Image satellitale : TM-Landsat-5	UQÀM	Validation
1994	Image satellitale : TM-Landsat-5	UQÀM	Validation
1994	Orthophotographies numériques du MRNF (résolution 1 m)	U. de M.	Validation
1994 (vers)	Carte d'occupations du sol (périmètre urbanisé) du MAMM (format numérique ; échelle de compilation 1/50 000)	U. de M.	Analyse
1994	Cartes écoforestières du MRNF (format numérique ; échelle de compilation 1/20000)	U. de M.	Analyse
1996	Image satellitale : TM-Landsat-5	UQÀM	Validation
1998	Image satellitale : TM-Landsat-5	UQÀM	Analyse
1998	Image satellitale : IRS	U. de M.	Analyse
1999	Image satellitale : ETM+-Landsat-7	U. de M.	Validation
1999	Cartes topographiques (1/20000) du MRNF	UQÀM	Validation
1999	Carte d'occupation du sol CUM (format numérique ; échelle de compilation 1/50 000)	U. de M.	Validation
1999	Orthophotographies numériques du MRNF (résolution 1 m)	U. de M.	Validation
2000	Image satellitale : TM-Landsat-5	UQÀM	Validation
2001	Image satellitale : ETM+-Landsat-5	U. de M.	Validation
2001	Image satellitale : IRS	U. de M.	Validation
2003	Image satellitale : TM-Landsat-5	UQÀM	Validation
2005	Image satellitale : TM-Landsat-5	UQÀM	Analyse
2005	Image satellitale : SPOT-5	CMM	Analyse
2005	Carte d'occupation du sol (format numérique ; compilée sur la base du cadastre numérique ; couverture partielle de la CMM)	CMM	Validation
2005	Mosaïque d'orthophotographies numérique couleur (résolution 5m)	CMM	Validation
2006	Image satellitale : SPOT-5	Projet Biotopes	Validation
2007	Image satellitale : SPOT-5	Projet Biotopes	Validation

Tableau 4.1 : Série chronologique de données utilisées pour le Volet 1.

4.2.2 Prétraitements des données cartographiques

Toutes les données cartographiques (format vectoriel) utilisées dans l'analyse (Tableau 4.2) ont été reprojetées, si nécessaire, en coordonnées UTM 18T (NAD83) et transformées en format matriciel. Le pixel a été mis à 25m x 25 m pour que les données cartographiques soient compatibles aux images satellitales corrigées géométriquement (voir section 4.1.3). Ces opérations ont été effectuées à partir du logiciel Geomatica de PCI.

Les cartes utilisées, que ce soit pour l'analyse ou pour la validation, emploient des systèmes de taxinomie des occupations du sol pas tout à fait compatibles. Ceci a nécessité un travail de reclassification tenant compte des spécifications initiales du projet biotopes. En effet tel que convenu au début du projet le bilan devait se faire pour les classes suivantes : bâti, agriculture, boisés, milieux humides et plans d'eau. Cette opération de reclassification est décrite par la suite en fonction des cartes utilisées. Il est à noter que le code des couleurs utilisé désormais pour indiquer les différentes catégories retenues est inspiré du code utilisé par le système européen CORINE Land Cover⁸.

Les cartes CLUMP 1986/1971/1976

Ces cartes distinguent les catégories montrées au tableau 4.1. La figure 4.2 présente ces cartes après reclassification. Il est à noter que la carte de 1976 exagère les zones bâties particulièrement pour l'île de Montréal par rapport aux cartes de 1971 et 1981. Cette carte n'a pas été finalement retenue pour l'étape de l'analyse de données. Les catégories industries extractives et récréation ont été retenues car ce sont des occupations du sol relativement importantes sur toute l'étendue du territoire de la CMM.

La carte CLUMP 1981

Cette carte emploie un double système de taxinomie. Les unités cartographiques sont classées par activité et par type de couverture (tableau 4.3). Par rapport aux cartes précédentes, les terres humides ne sont pas indiquées. Également les zones bâties après 1976 sont séparées en diverses catégories. La figure 4.3 présente ces deux composantes. La reclassification allait de soi pour certaines combinaisons activité-couverture (tableau 4.3). Pour les autres combinaisons (par exemple « activité non perçu – couverture broussailles »), la comparaison avec les cartes écoforestières ainsi que les images satellitales acquises entre 1984 et 1986 était nécessaire avant la reclassification.

⁸ <http://reports.eea.europa.eu/COR0-landcover/en>

Les cartes écoforestières

Ces cartes présentent un système de taxinomie avec 39 catégories d'occupation du sol pour les terrains à vocation non forestière incluant les terres humides et les plans d'eau. Pour les peuplements forestiers tels que définis par l'inventaire forestier, un système de taxinomie complexe est employé incluant l'espèce dominante et sous-dominante, l'âge, la hauteur et la densité du peuplement, le dépôt de surface, la pente ainsi que le régime hydrique. Le tableau 4.4 montre les catégories parmi les 39 retrouvées dans les cartes utilisées. La figure 4.4 présente cette carte provenant du mosaïquage de 23 feuillets au 1/20 000 après reclassification. Les boisés ont été regroupés dans un premier temps en trois classes : conifères, feuillus, mélangés. Ces classes ont été utilisées pour faire le bilan des changements du couvert forestier (voir section 4.3.2). Pour faire le bilan des changements entre 1966 et 1994 (voir section 4.3.1) toutes les trois classes ont été fusionnées en une : boisés. Il est à noter que certains polygones ne sont pas classifiés sur cette carte (« nature inconnue »; figure 4.4). En réexaminant les photos de 1994 ainsi que les autres documents disponibles après 1994 (tableau 4.1) ces polygones ont été attribués à une classe.

Les cartes d'occupation du sol

La carte MAMM généralise les catégories d'occupations du sol que l'on retrouve sur la carte CUM (tableau 4.4). De plus elle distingue diverses catégories des terrains vacants selon leur affectation. Ces deux cartes ont été maintenues telles quelles (figure 4.5).

Catégories d'occupation du sol	Description	Reclassification
Bâti urbain	Terres occupées par des cités, villes, et villages, ou par des unités isolées loin des agglomérations, tels les implantations manufacturières, les gares de train, et les campements militaires. Les parcs et autres espaces vacants dans les zones bâties y sont également inclus	Bâti
Industries d'extraction de matériaux	Mines, carrières, gravières et sablières	Industrie extractive
Zones de loisir en plein air	Terres utilisées pour des activités de loisir privées ou publics de plein air; exemples : golfs, parcs, plages, terrain de jeu	Récréation
Activités agricoles 1	Horticulture, fermes d'élevage	Agriculture
Activités agricoles 2	Vergers et vignobles	Agriculture
Activités agricoles 3	Terres utilisées pour les diverses cultures agricoles annuelles	Agriculture
Activités agricoles 4	Pâturages améliorés et cultures fourragères	Agriculture
Activités mixtes	Pâturages naturels	Herbage/Broussailles
Terres boisées productives	Les peuplements d'arbres couvrent plus de 25% du terrain avec des arbres de plus de 5m de hauteur; les plantations, les aires de coupes ou les brûlis y sont inclus.	Boisés
Terres boisées improductives	Terres couvertes par des arbustes	Boisés
Terres humides	marrais, marécages ou tourbières	Terres humides
Terres improductives 1	barres de sables, platières sableuses, dunes et plages	Terres dénudées
Terres improductives 2:	affleurements rocheux	Terres dénudées
Plans d'eau		Plans d'eau

Tableau 4.2 : Système de taxinomie des cartes CLUMP (1966; 1971 et 1976).

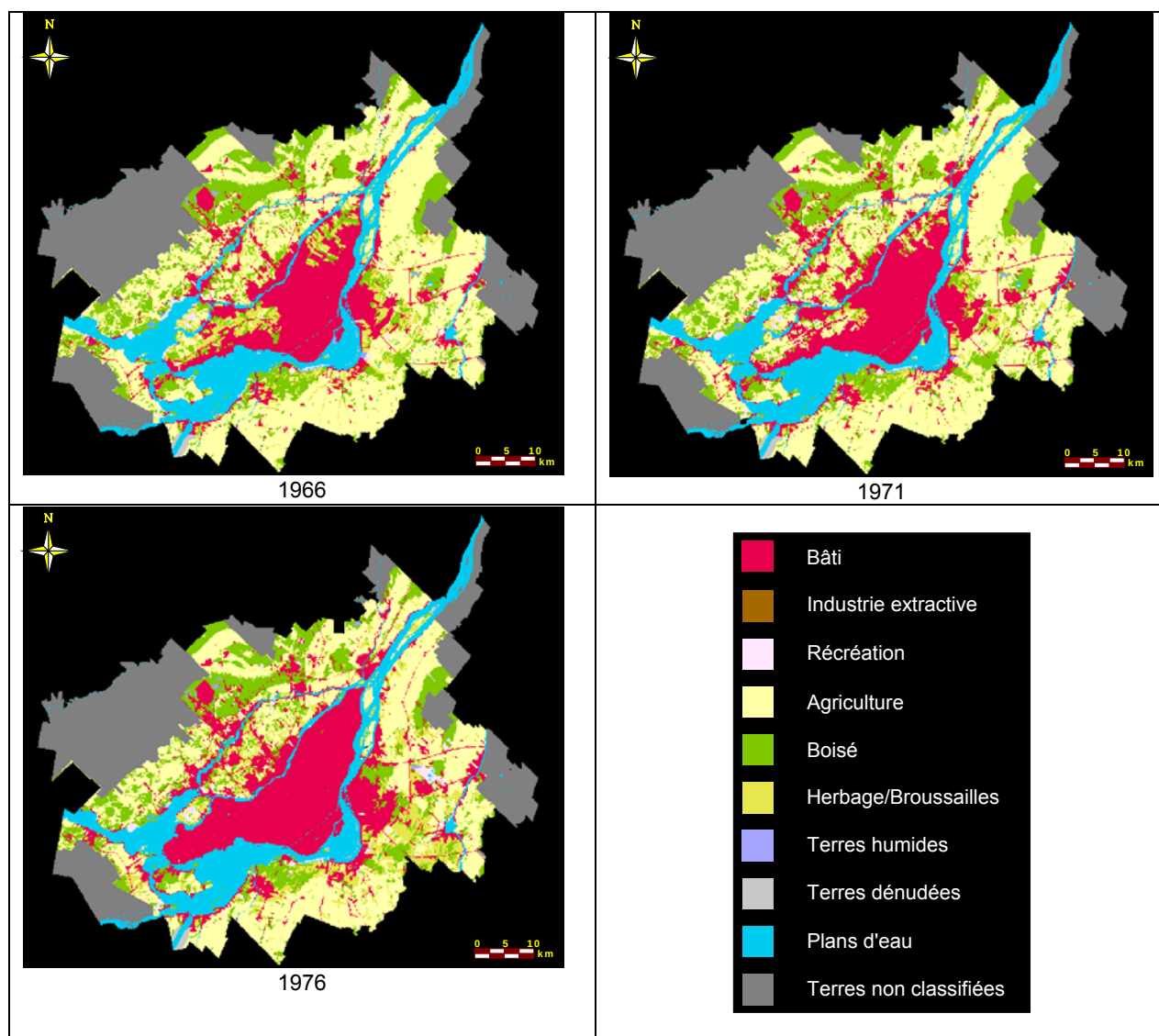


Figure 4.2 : Cartes du CLUMP reclassifiées.

Activités	Couverture	Reclassification
Bâti urbain (indifférencié)	Bâti urbain (indifférencié)	Bâti
Activités résidentielles	Couvert construit	Bâti
Commerces et manufactures	Couvert construit	Bâti
Services institutionnels	Couvert construit	Bâti
Industries d'extraction de matériaux	Surfaces dénudées	Industrie extractive
Transports et communications	Couvert construit	Bâti
Activités agricoles (4 catégories)	Végétation agricole (4 catégories)	
Activités forestières (2 catégories)	Arbres ou arbustes (2 catégories)	
Activités de loisir (2 catégories)		
Activités de chasse et de pêche		
Terrains réservés à la recherche écologique, la conservation, le contrôle d'inondations et le drainage		
Activités passées (3 catégories) (l'activité passée est perceptible mais il y a des signes d'abandon)		
Terrain en transition (les activités perceptibles semblent préparatoires à l'implantation d'une nouvelle activité dans le futur)		
Activités non perceptibles (impossible de définir ni l'activité passée ni l'activité actuelle)		
Non classifié (plans d'eau)	Eau	Plans d'eau

Tableau 4.3 : Double système de taxinomie de CLUMP pour l'inventaire de 1981.

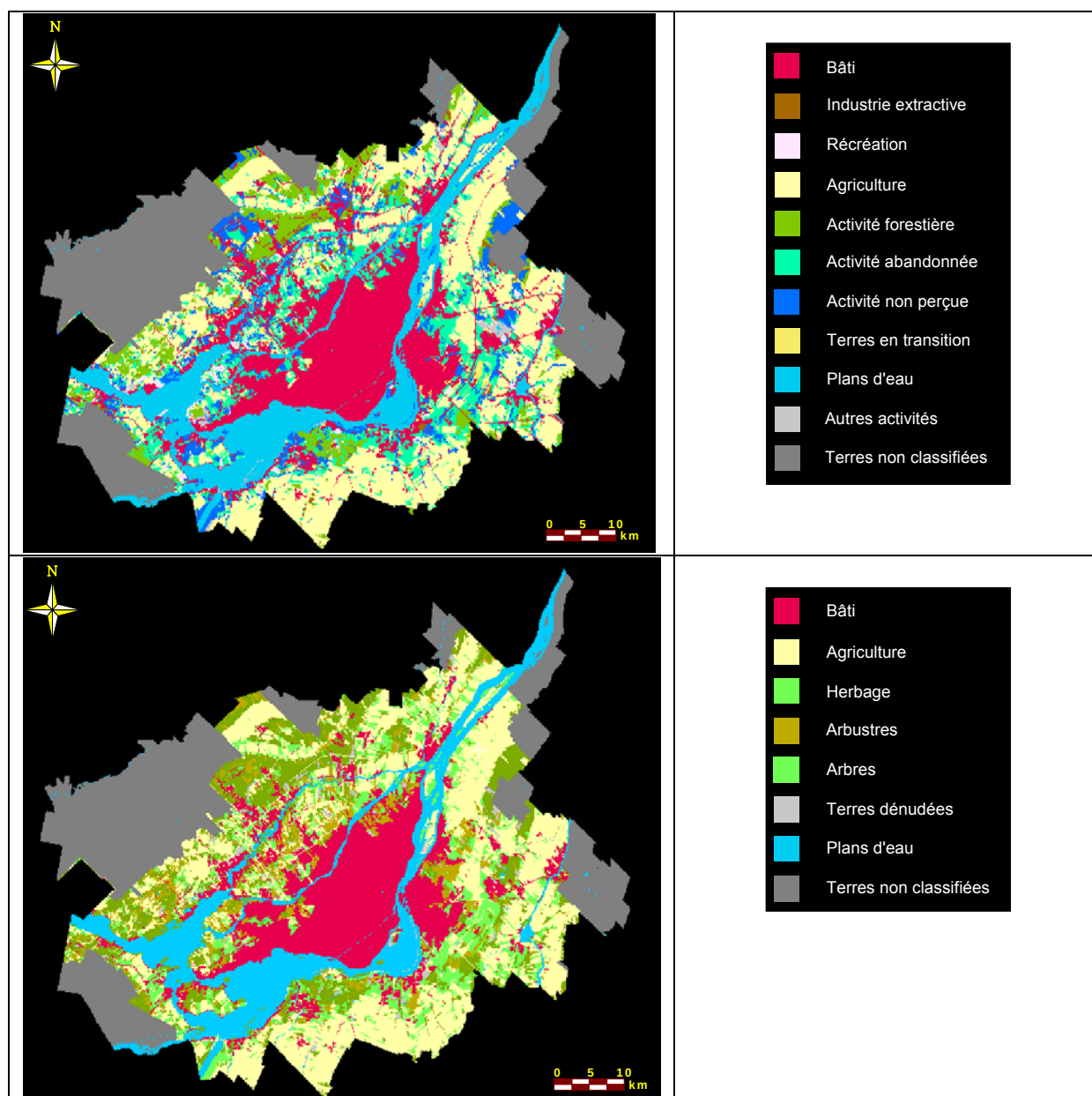


Figure 4.3 : Double système de taxinomie de CLUMP pour 1981.

Étendues d'eau
Étendue d'eau, cours d'eau
Site inondé
Terrains improductifs
Aulnaie
Dénudé et semi-dénudé humide
Dénudé et semi-dénudé sec
Terrains à vocation non forestière
Bassin de filtration, de décontamination, pisciculture
Camping
Carrière
Centrale hydro-électrique
Centre urbain
Cimetière d'automobiles
Déchets de mines
Golf (partie déboisée)
Gravière
Habitation permanente
Verger
Île boisée de 1 ha et moins
Ligne de transport d'énergie
Mine
Nature inconnue
Pépinière
Route et autoroute (emprise)
Terrain défriché
Terre agricole
Usine
Villégiature (partie déboisée)

Tableau 4.4 : Terrains à vocation non forestière, inventaire forestier MRNF.

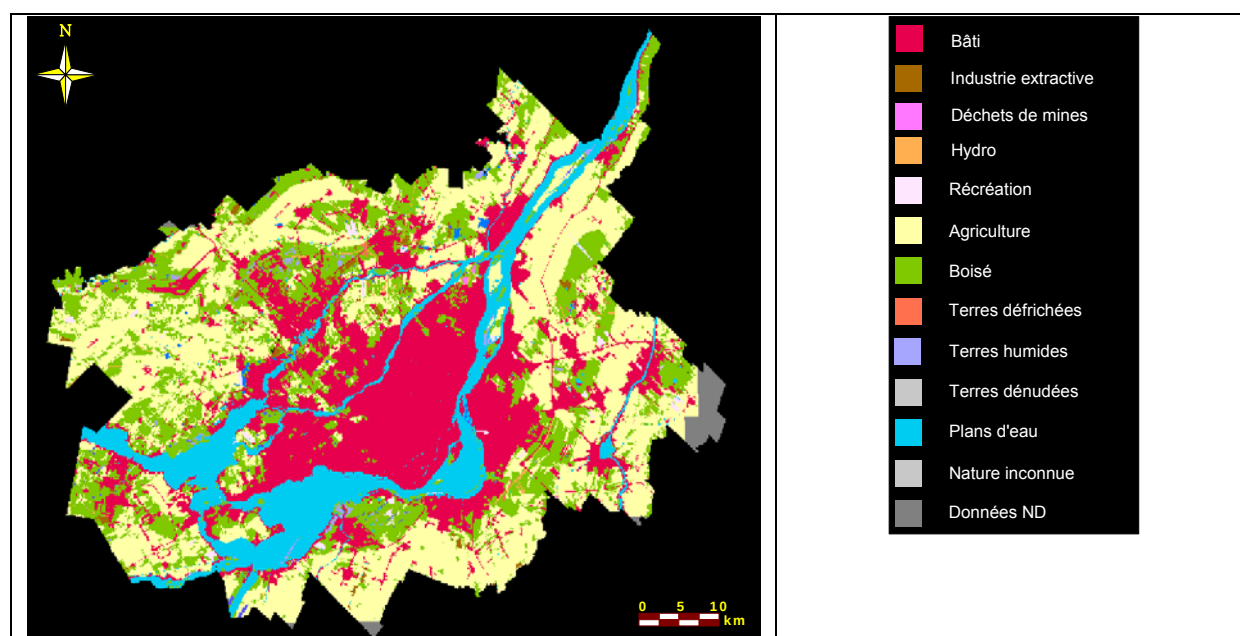


Figure 4.4 : Mosaïque des cartes de l'inventaire forestier du MRNF (1994).

Carte CUM	Carte MAMM
1- Résidentiel faible densité	1- Résidentiel
2- Résidentiel moyenne densité	2- Commercial
3- Résidentiel forte densité	3- Institutionnel
4- Commerce de détail	4- Industriel
5- Centre commercial	5- Espace vert
6- Industrie légère	6- Ram (route)
7- Industrie lourde	7- Vacant résidentiel
8- Carrière	8- Vacant commercial
9- Site d'enfouissement	9- Vacant institutionnel
10- Cimetière	10- Vacant industriel
11- Édifice à bureaux	11- Vacant espace vert
12- Équipement collectif	
13- Golf	
14- Parc régional	
15- Parc urbain	
16- Réserve naturelle	
17- Service d'utilité publique	
18- Rural	
19- Vacant	

Tableau 4.5 : Catégories des cartes d'occupation du sol.

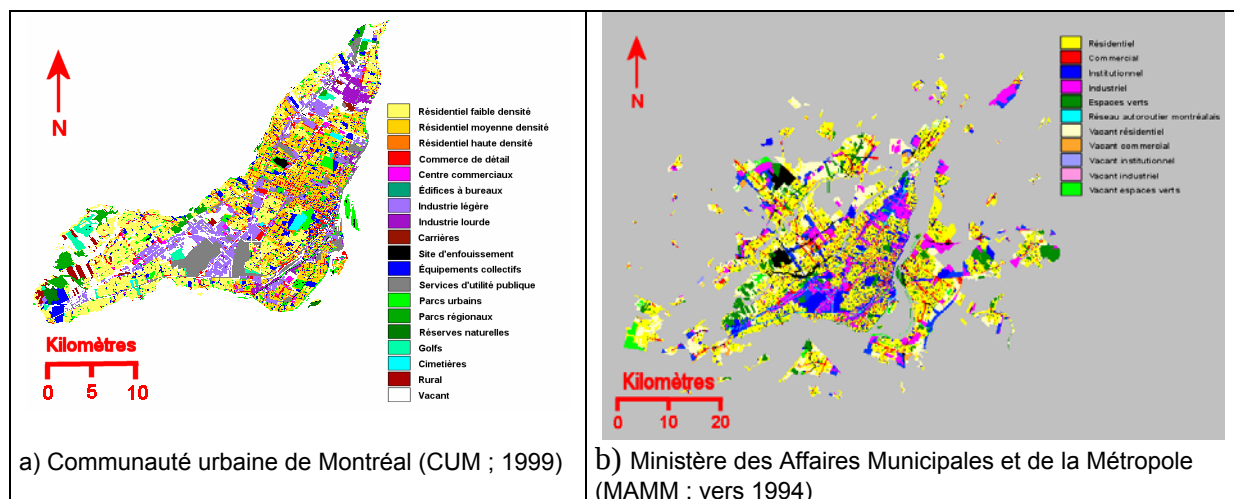


Figure 4.5 : Cartes d'occupation du sol.

4.2.3 Prétraitements des images satellitaires

Les images satellitaires analysées proviennent pour la plupart du satellite Landsat-5 (voir annexe 1). Ces images ont été corrigées géométriquement à partir du module OrthoEngine de PCI (UTM 18T-NAD83), et rééchantillonnées par interpolation bilinéaire à 25 m x 25 m (résolution d'origine 30 m x 30 m). La plupart de ces images ne couvrent pas l'ensemble du territoire de la CMM compte tenu de la particularité des orbites des satellites. Également certaines portions de ces images peuvent être couvertes de nuages opaques (figure 4.6) et mêmes translucides du type cirrus. Ces zones ont été masquées par inspection visuelle afin d'éviter les confusions avec les autres matériaux de surface. Pour toutes ces raisons afin de

permettre le suivi adéquat de l'évolution des occupations du sol pour l'ensemble du territoire nous avons introduit dans la série chronologique d'autres images satellitaires disponibles au laboratoire de télédétection de l'U. de M. acquises entre 1984 et 2005 (tableau 4.1).

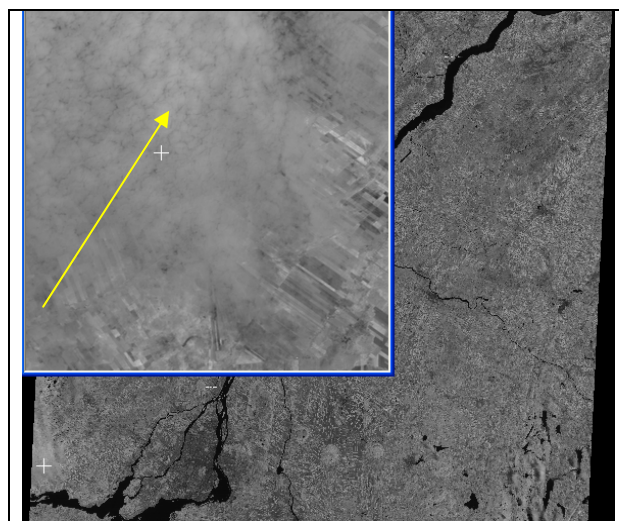


Image Landsat-5 (1984) avec une portion couverte de nuages affectant l'analyse dans l'agglomération de Mirabel

Figure 4.6 : Problèmes avec les nuages

Les images après prétraitements et masquage ont été classifiées par algorithme de « clustering ». La nature des clusters spectraux a été par la suite interprétée visuellement tenant compte aussi des signatures spectrales connues des différents types de surface (boisés, sols dénudés, plans d'eau, etc.). Nous avons choisi cette approche car les images présentent parfois des différences significatives surtout à cause de la phénologie de la végétation au moment de l'acquisition des données (figure 4.7). La figure 4.8 montre quelques exemples d'images classifiées.

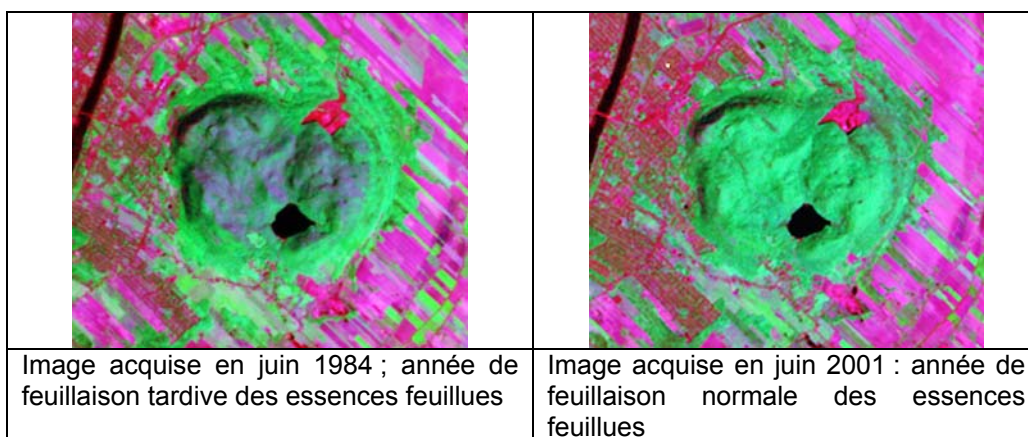


Figure 4.7 : Problèmes de classification découlant des conditions climatiques différentes d'une année à l'autre.

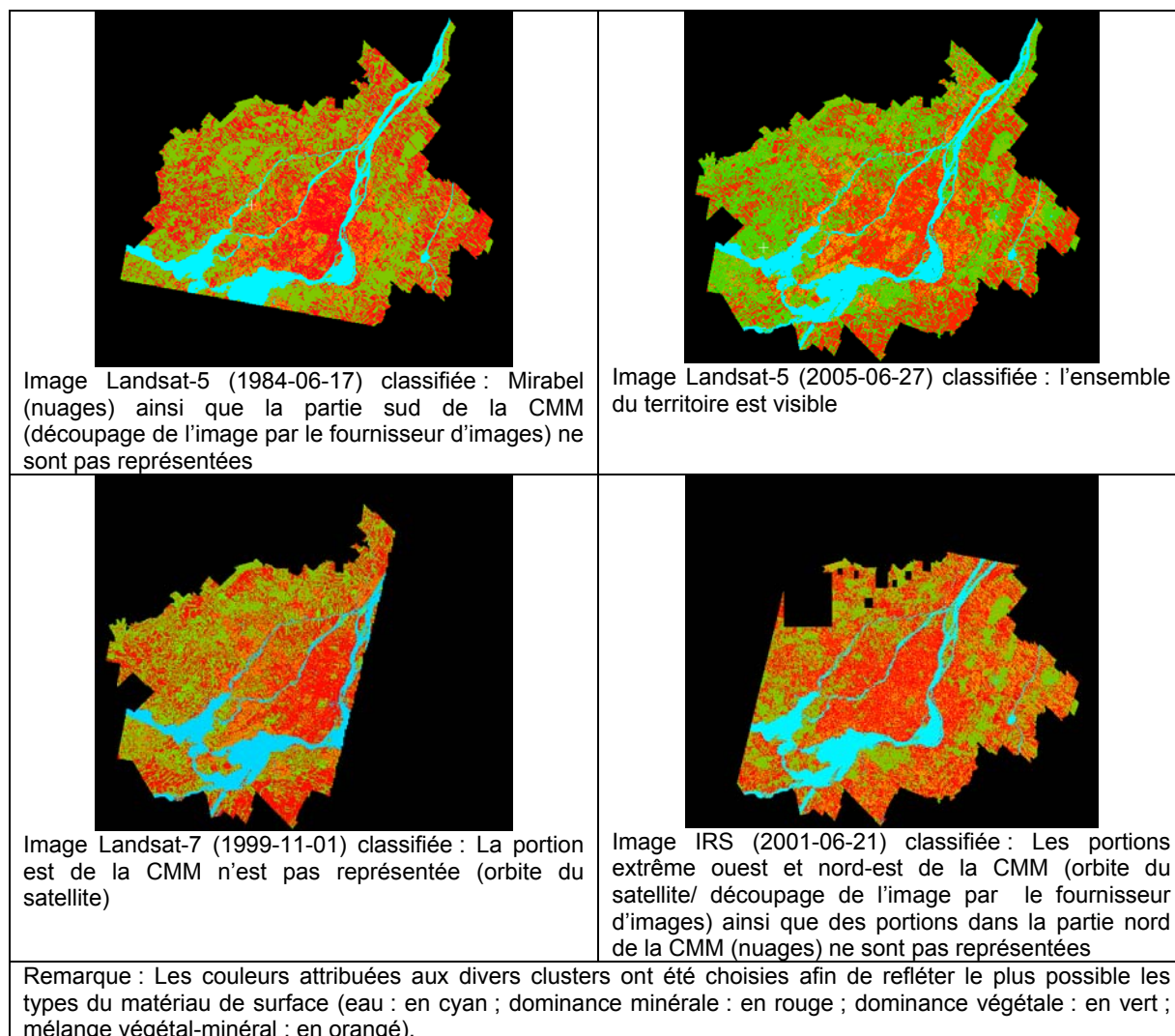


Figure 4.8 : Exemples d'images classifiées intégrées dans la série de données diachroniques.

4.2.4 Analyses comparatives

L'examen visuel des images satellitales acquises en 1984 et en 2005 montre que les changements d'occupation du sol se sont opérés en grande partie à l'intérieur des zones blanches. Ceci était prévisible compte tenu de la mise en vigueur de la Loi sur la protection du territoire agricole en 1978. La figure 4.9 aide à embrasser d'un seul coup d'œil les modifications du paysage dans une partie de la couronne Nord ainsi qu'à Laval depuis 1984. Les contours en orangé représentent le périmètre d'urbanisation. Nous sommes situés à l'est de Saint-Jérôme à quelques 900 m d'altitude. En avant plan, le territoire agricole est resté presque immuable. Quelques petites modifications par ci, par là sont visibles (endroits encerclés en rouge): l'expansion d'une industrie d'extraction, quelques coupes dans les boisés, l'apparition de petits bassins d'épuration ou l'expansion d'un terrain de golf. Plus on

se dirige vers Laval plus on se rend compte des modifications plus importantes opérées les vingt dernières années : le remplacement des boisés et des milieux humides (zones dégagées brunâtres à l'intérieur des boisés) par des résidences (zones grisâtres), des industries et des grandes surfaces commerciales (zones blanchâtres). Pour sa part la figure 4.10 montre une partie de la couronne Sud et de Longueuil. Nous sommes situés au nord-est du Mont Saint-Hilaire à quelques 900 m d'altitude. Ici les modifications opérées dans les zones vertes sont moins évidentes (zone encerclée en rouge). À l'intérieur des zones blanches, nous constatons ici aussi le « remplissage » progressif de l'espace non construit en 1984 surtout par des résidences.

La division du territoire en deux zones (blanche et verte) était donc impérative pour pouvoir mieux évaluer les caractéristiques spatiotemporelles des changements de l'occupation du sol. Ceci fût fait avec la carte disponible (figure 3.2). Ainsi toutes les autres cartes et images satellitales classifiées incluses dans la série diachronique ont été découpées en deux zones et comparées séparément.

Les analyses comparatives visaient principalement à mettre en évidence la dynamique de l'urbanisation à l'intérieur des zones blanches ainsi que la dynamique de la minéralisation de la CMM dans son ensemble. Ainsi il a été décidé d'effectuer les analyses suivantes :

- 1) La comparaison des cartes CLUMP et des cartes écoforestières pour la période 1966-1994 pour faire le bilan des changements des occupations des sols pendant cette période.
- 2) La comparaison des cartes d'occupations du sol avec les images satellitales acquises entre 1994 et 2005 pour faire le bilan de la conversion des terrains vacants dans les zones blanches.
- 3) La comparaison des cartes écoforestières avec les images satellitales acquises entre 1994 et 2005 pour faire le bilan des changements du couvert forestier pendant cette période.
- 4) La comparaison des cartes écoforestières et des cartes topographiques satellitales acquises entre 1994 et 2005 pour faire le bilan des changements des terres humides.

Les résultats des ces comparaisons sont présentés, illustrés et commentés dans les paragraphes qui suivent.

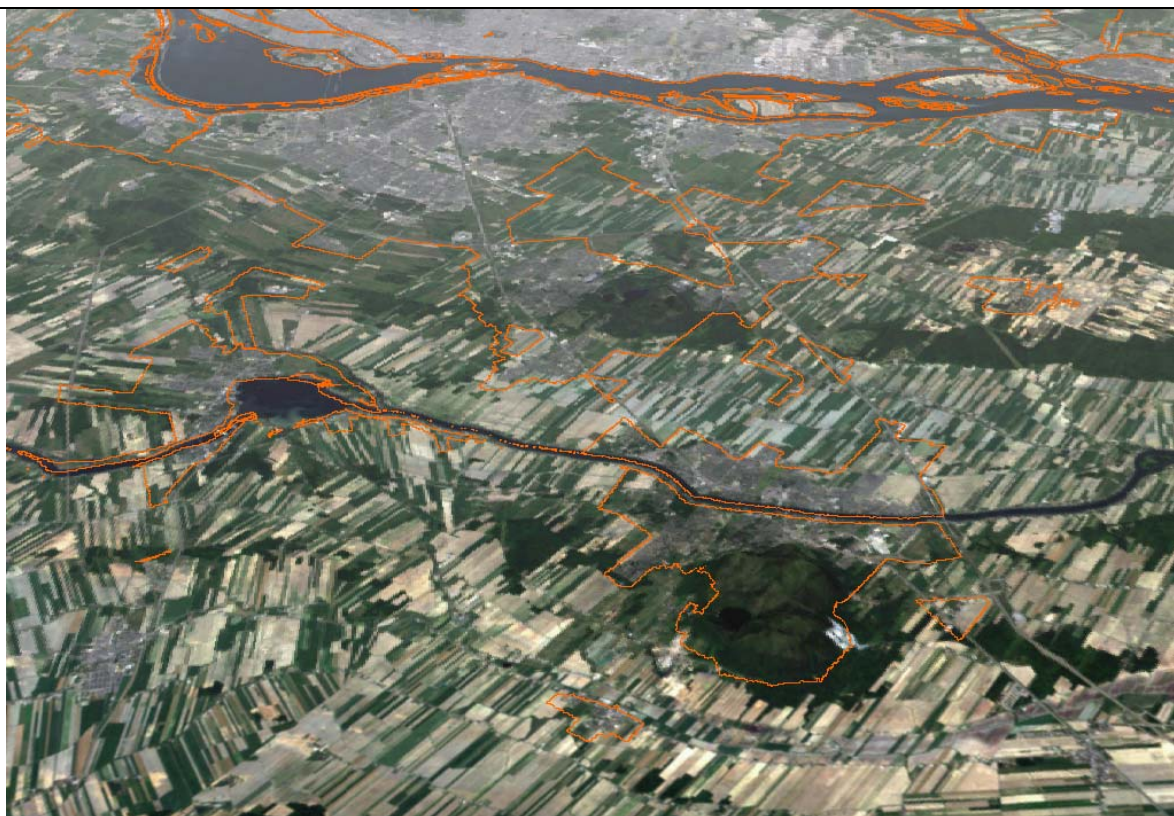


a. Image Landsat acquise en juin 1984

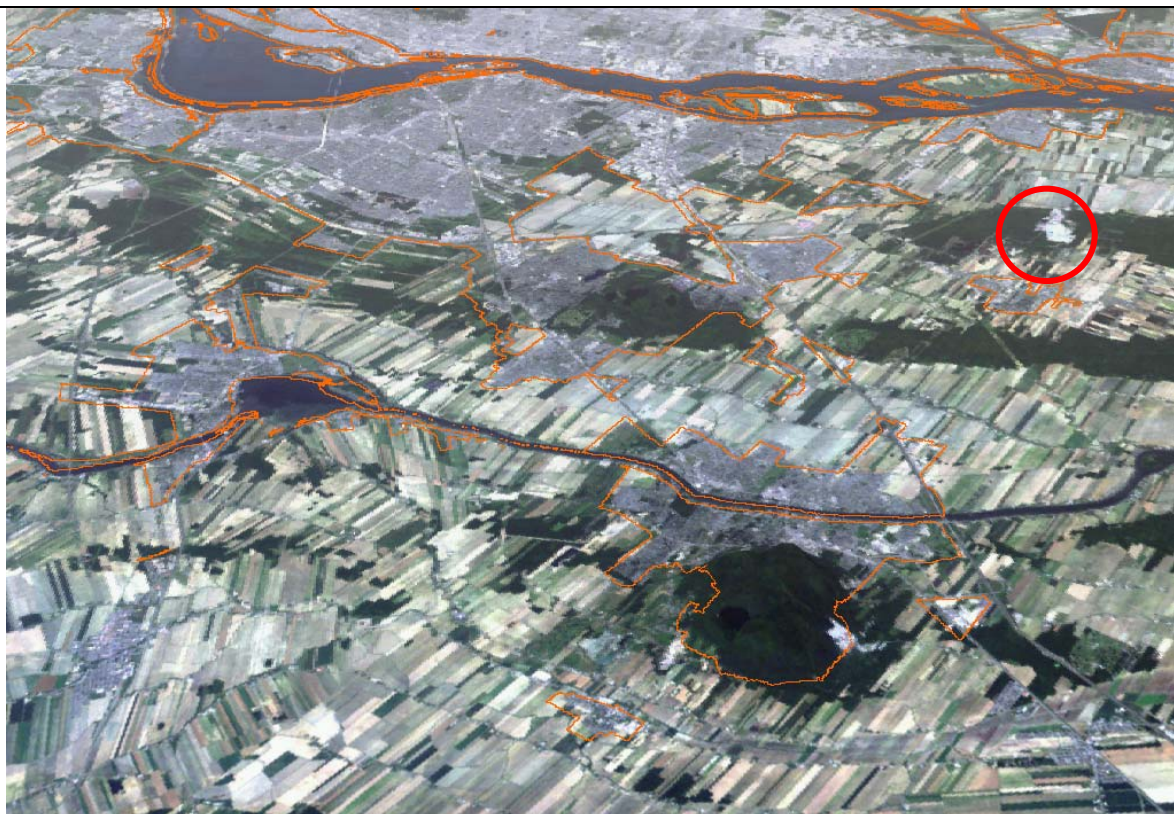


b. Image Landsat acquise en juin 2005

Figure 4.9 : Vue en « vol d'oiseau » d'une partie de la couronne Nord et de Laval



a. Image Landsat acquise en juin 1984



b. Image Landsat acquise en juin 2005

Figure 4.10 : Vue en « vol d'oiseau » d'une partie de la couronne Sud et de Longueuil.

4.3 Résultats

4.3.1 Bilan 1966-1994

Le territoire couvert par les cartes CLUMP, en excluant les plans d'eau, représente environ 2970 km² dont 1500 km² en zone blanche et 1470 km² en zone verte. Au total la portion couverte par ces cartes représente un peu plus que 60% de la superficie de la CMM (voir section 1.3). La comparaison des cartes CLUMP 1966/1981 et des cartes écoforestières, après vérification avec les images satellitales disponibles entre 1984 et 1994, a permis de constater les suivants :

- 1) Le pourcentage des terres construites (incluant les voies de communication et les industries d'extraction) à l'intérieur des zones blanches analysées a connu une augmentation constante en passant de 40% en 1966 à un peu moins de 70% en 1994 (Figure 4.11). Si l'on tient compte que cette analyse couvre une trentaine d'années et que la superficie des zones blanches analysées est de 1500 km², nous pouvons dire que le rythme d'urbanisation de l'espace se situait à environ 14 km²/an. Cette urbanisation s'est faite au détriment des terres vouées à l'agriculture et des terres boisées en 1966. Tel que montré par la figure 4.11, les premières passent d'un peu moins de 25% en 1966 à moins de 10% en 1994. Quant aux boisés, occupant presque le même pourcentage que l'agriculture en 1966, leur pourcentage d'occupation tend à se stabiliser après 1981 à quelques 15% ;
- 2) Dans les zones vertes les occupations du sol demeurent passablement stables entre 1966 et 1994. Les terres agricoles occupaient en 1994 un peu plus de 72% du territoire analysé qui était de 1470 km², les boisés, quelques 20% tandis que le milieu bâti demeurerait une occupation marginale avec quelques 2%.

Pour mieux analyser les tendances d'urbanisation de l'espace à l'intérieur des zones blanches nous nous sommes servis de la carte CLUMP de 1981 permettant d'identifier les nouveaux développements entre 1966 et 1981 dans les secteurs résidentiel et industriel/commercial ainsi que de la carte de MAMM de 1994. La figure 4.12 montre le résultat de cette analyse. Seule la partie des zones blanches couvertes par la carte CLUMP (1500 km²) a été prise en considération. Il est évident par cette figure que l'urbanisation s'est faite à un rythme presque constant pour les deux secteurs analysés. Il est d'environ 14 km²/an dans le secteur résidentiel et d'environ 3,5 km²/an pour les secteurs industriel et commercial considérés ensemble.

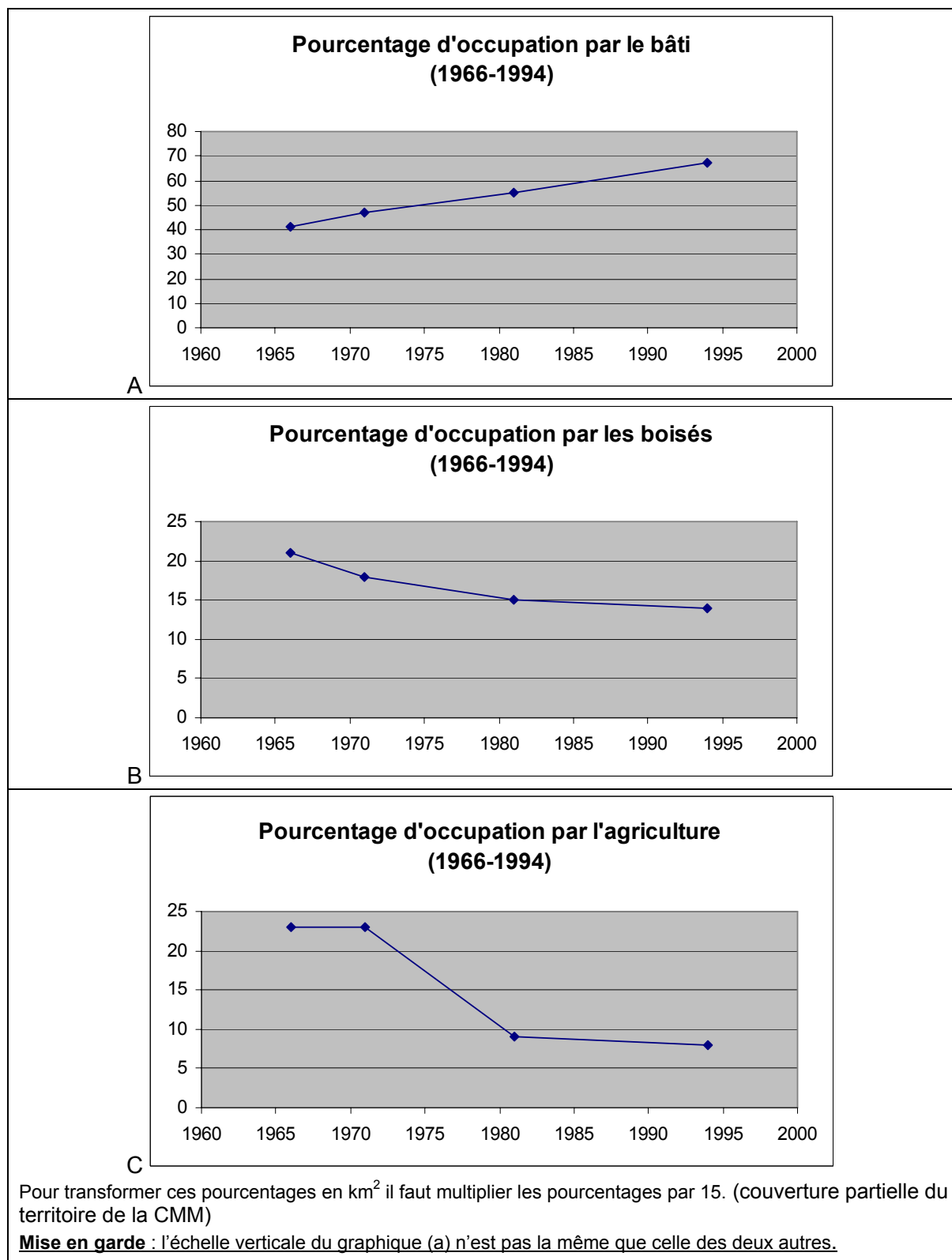


Figure 4.11 : Changements des occupations du sol entre 1966 et 1994 à l'intérieur des zones blanches.

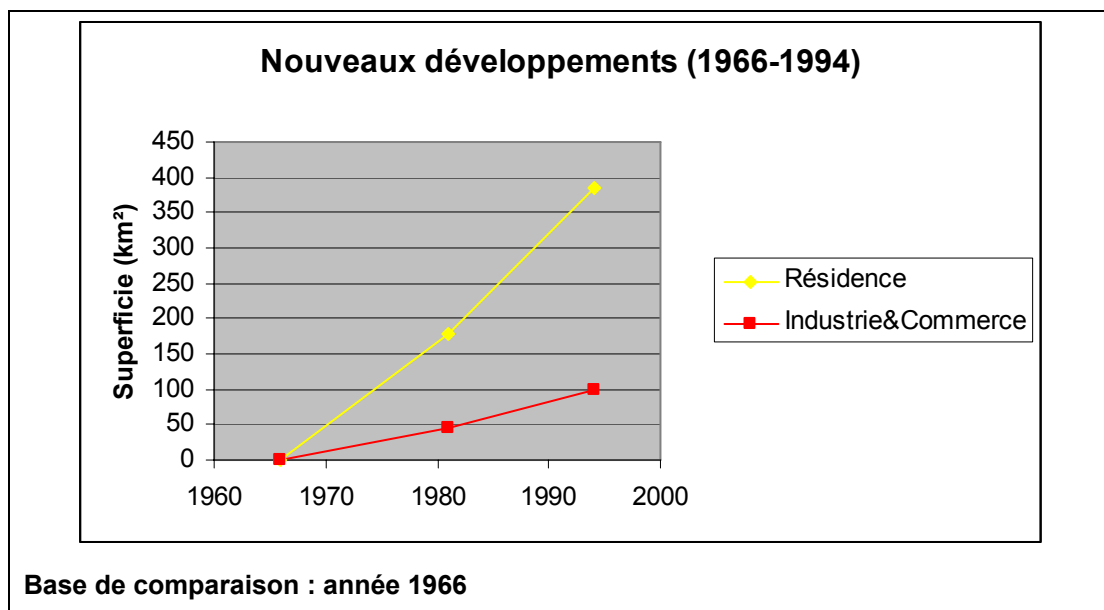


Figure 4.12 : Nouveaux développements jusqu'à 1994

4.3.2 Bilan dans les zones blanches 1994-2005

La carte d'occupation du sol du MAMM a été compilée en intégrant des documents qui datent pour la plupart des années 1992 à 1996. Ainsi à des fins de comparaison avec les images satellitales nous avons pris comme date de base de cette carte l'année 1994. Tel que constaté, cependant, certains terrains vacants indiqués sur la carte MAMM était soit en dehors des limites actuelles de la CMM ou en zones vertes. Ces terrains n'ont pas été pris en considération. La figure 4.13 montre la répartition des terrains vacants en 1994 retenus pour cette analyse. Au total ils représentent un peu plus que 380 km², soit 23% environ des zones blanches. Ce pourcentage est tout a fait conforme au pourcentage estimé précédemment de l'ordre de 30% non construit en 1994. La différence s'explique d'une part par le fait que certaines portions des zones blanches n'ont pas été couvertes par la carte de MAMM (ex. réserve de Kahnawake) et de la définition des terres urbanisées dans les différentes cartes utilisées pour faire le bilan entre 1966 et 1994 (voir tableau 4.2).

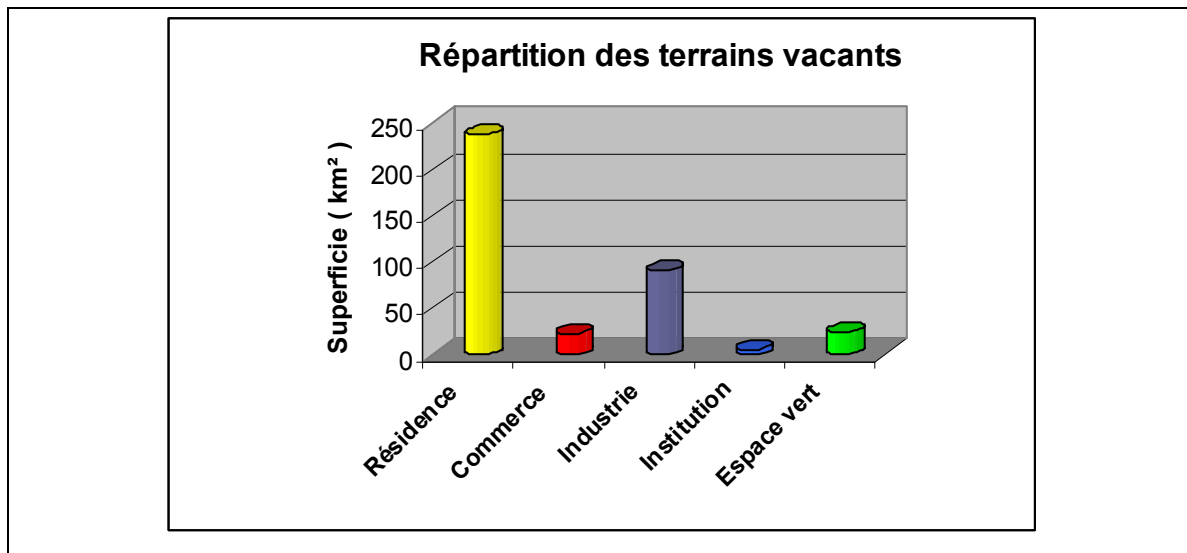


Figure 4.13 : Étendue des terrains vacants en 1994 selon leur affectation (carte MAMM).

La classification de l'image satellitale de 2005 à l'intérieur des terrains vacants a permis de faire le bilan de l'occupation de sol actuelle de ces terrains. Les classes suivantes d'occupation du sol ont été définies : plans d'eau (peuvent contenir des marécages ainsi que des zones de végétation riveraine) ; boisés (peuvent contenir certaines terres humides) ; herbage (surfaces gazonnées, friches arbustives et herbacées) ; dénudés (terres agricoles à nu, zones des coupes, zones en construction) ; et bâti. Cette classification a été validée avec des orthophotos couleur de 2005 mises à notre disposition par la CMM. L'exactitude de la classification est supérieure à 95% pour les zones boisés, les zones d'herbage et les plans d'eau. Pour les surfaces dénudées et le bâti, il y a certaines confusions qui ne dépassent pas quand même les 10%. Ainsi certains développements résidentiels en phase de construction se retrouvent dans la catégorie « dénudés » et certaines zones avec des amoncellements des débris dans la catégorie « bâti ». Ces confusions sont normales étant donné la résolution spatiale des images (30 m x 30 m) et la similarité spectrale des matériaux. La figure 4.14 montre les résultats de cette classification.

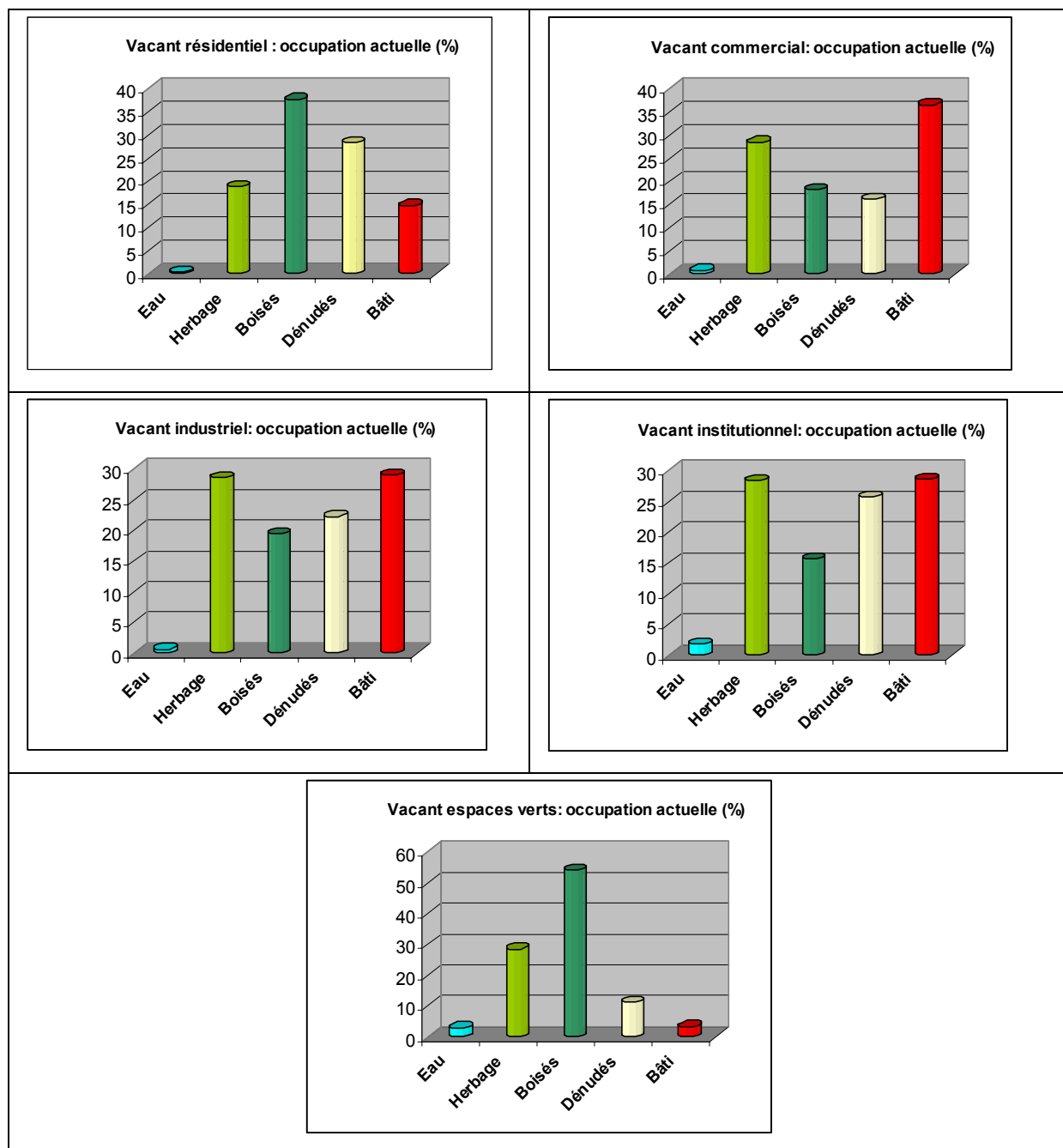


Figure 4.14 : Occupation actuelle (2005) des terrains vacants tels qu'établis en 1994 par la carte MAMM.

Au total les zones bâties, toutes catégories de vacant confondues, représentaient en 2005 environ 72 km² sur un total de 380 km² disponibles pour des nouveaux développements en 1994. Compte tenu de l'intervalle de temps examiné d'une dizaine d'années, ceci équivaut à un rythme d'urbanisation de l'ordre de 7 km²/an. Cependant ce rythme est loin d'être le même pour les différentes fonctions urbaines. Tel qu'attendu le secteur résidentiel s'étend à un rythme supérieur que les autres fonctions urbaines. Il est en effet d'environ 4 km²/an versus 1 à 2 km²/an pour les autres fonctions urbaines.

La disponibilité de l'image Landsat de 1998 couvrant l'ensemble du territoire de la CMM a permis après classification de connaître les superficies du bâti à ce moment précis. Il était ainsi possible de mieux analyser le rythme d'urbanisation depuis 1994. Tel que montré par la figure 4.15 les secteurs résidentiel et commercial ont maintenu un rythme presque constant. Le secteur industriel a connu pour sa part un certain ralentissement tandis que l'évolution du bâti dans les deux autres fonctions urbaines n'est pas importante.

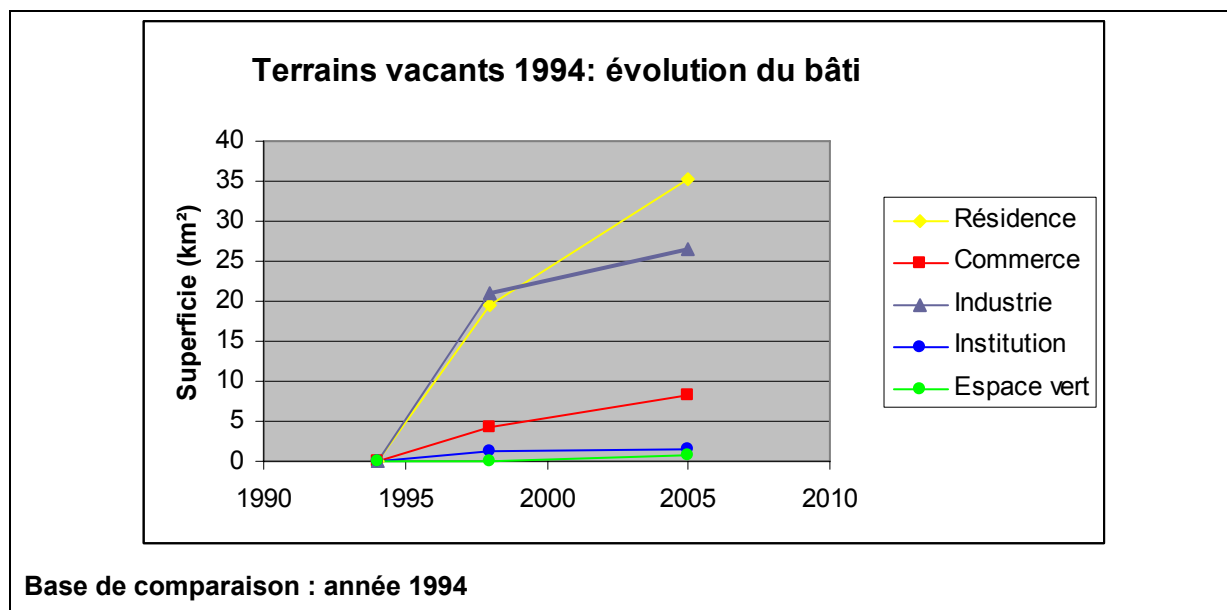


Figure 4.15 : Nouveaux développements jusqu'à 2005

Cette analyse montre un ralentissement du rythme d'urbanisation dans les zones blanches comparativement à la période 1966–1994 ; il passe d'environ 14 km²/an à environ 7 km²/an (toutes fonctions urbaines confondues). Cette différence peut être moindre compte tenu de la définition stricte du rythme d'urbanisation uniquement en fonction des zones occupées par des bâtiments pour la période 1994 à 2005. Tout indique cependant que ce ralentissement devrait être présent. À titre d'exemple, pour le secteur résidentiel même en comprenant les zones dénudées dans la définition d'une zone urbanisée, le rythme d'urbanisation ne dépasse pas les 10 km²/an pour la période 1994-2005 tandis qu'il est de 14 km²/an pour le même secteur pour la période 1966-1994 (figure 4.12). Il y a donc matière à des recherches plus approfondies afin de définir avec une plus grande exactitude le rythme actuel d'urbanisation dans les différents secteurs car ce rythme est un élément clé pour la modélisation de l'évolution du climat de la CMM. Il est particulièrement important dans le cas des secteurs industriel et commercial, des générateurs d'îlots de chaleur comme le montrent les analyses dans la partie 5. En assumant le rythme actuel, évalué à 7km²/an, constant, la consommation de la totalité de l'espace disponible non bâti ne se fera pas avant une

trentaine d'années. Ceci est conforme aux estimations du document du gouvernement du Québec cité en introduction qui mentionne l'an 2029 comme date fatidique de disparition du couvert végétal actuel si des mesures de conservation ne sont pas prises. La figure 4.12 montre que les surfaces végétalisées couvrent actuellement une bonne partie des terrains vacants particulièrement ceux voués au secteur résidentiel pour que des approches différentes de développement que les coupes totales, comme c'est la pratique courante à l'heure actuelle, soient élaborées.

4.3.3 Évolution des peuplements forestiers 1994-2005

La figure 4.16 montre l'évolution des peuplements forestiers entre 1994 et 2005. Les superficies pour 1994 proviennent des cartes écoforestières. Celles de 2005 ont été calculées comme suit. L'image Landsat de 2005 classifiée a été analysée pour chaque catégorie de peuplement indiquée sur les cartes et les pixels des clusters correspondant à la forêt ont été comptabilisés. Les cartes identifient les trois types de peuplement : feuillus, conifères et mélangés ainsi que des peuplements très jeunes issus soit de champs agricoles laissés en friche soit de coupes forestières ou de plantations ; leur évolution dans les zones blanches et vertes est montrée dans cette figure. Comme nous pouvons le constater, dans les deux zones les peuplements de feuillus dominent. Viennent par la suite les peuplements issus de friches et les mélangés. Les peuplements de conifères et ceux issus de coupes ne couvrent pas de superficies importantes comparativement aux autres peuplements tandis que les peuplements issus de plantations sont plutôt rares, particulièrement dans les zones blanches.

Dans les zones blanches le bilan est négatif pour l'ensemble de catégories montrées dans la figure 4.16. Le rythme d'élimination est variable selon la catégorie ; il est aux alentours de 5,5 km²/an pour les feuillus et les friches et tombe à 1,3 km² /an pour les mélangés. Pour les autres catégories ce rythme est inférieur à 1 km² /an. Contre nos attentes, pour l'ensemble des zones vertes les rythmes d'élimination par catégorie sont similaires. Les principales causes de cette élimination sont illustrées dans les figures 4.9 et 4.17 : conversion en champ agricole, conversion en terrain de golf, établissement ou expansion d'une industrie d'extraction, etc. La désuétude de la carte des zones vertes peut cependant causer une surestimation du rythme d'élimination (figure 4.17 b et d).

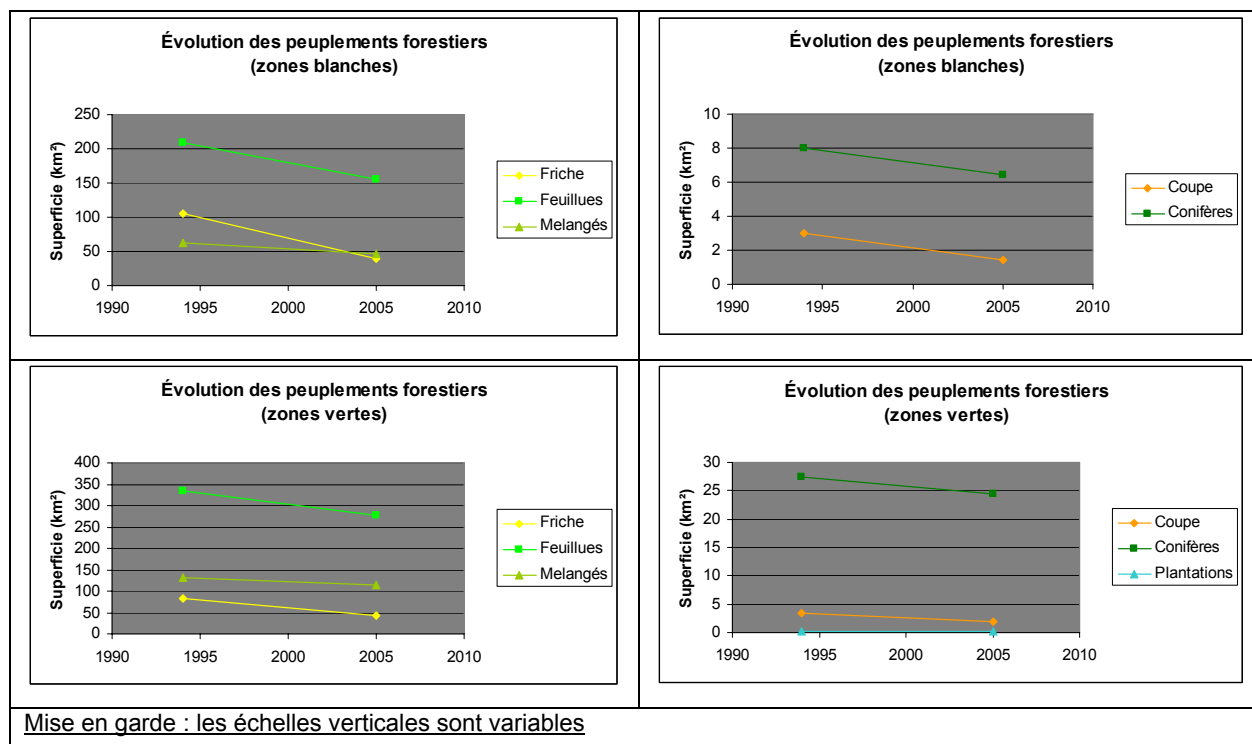


Figure 4.16 : Évolution du couvert forestier (1994-2005) pour l'ensemble du territoire de la CMM

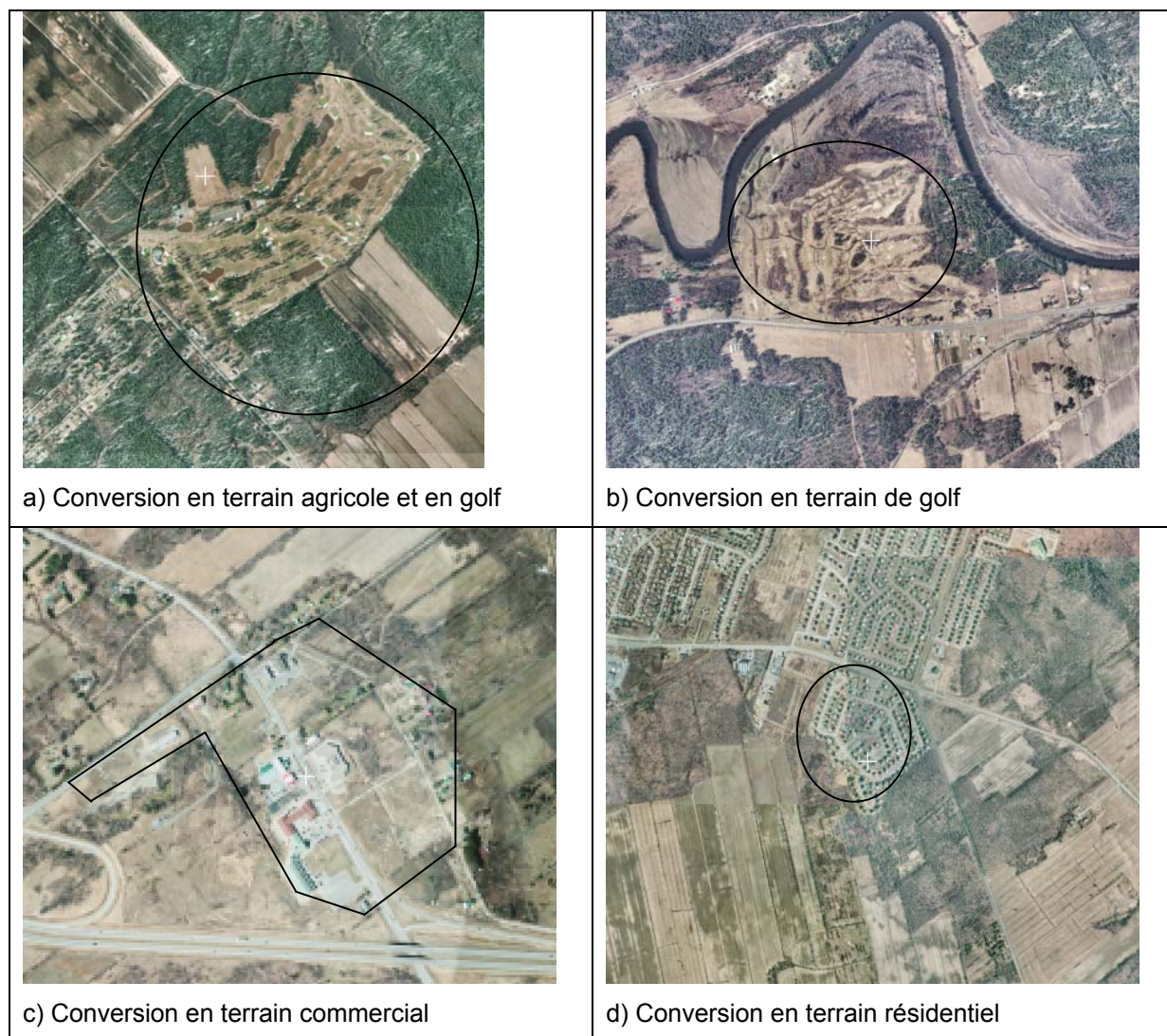


Figure 4.17 : Illustrations des changements, repérées dans le couvert forestier en zone verte (orthophotographies 2005)

Pour clore cette analyse nous présentons les résultats de comparaison dans les zones blanches ventilés par unité administrative. La figure 4.18 illustre les changements évalués pour une série d'unités administratives choisies soit parce que les pressions d'urbanisation sur le couvert forestier sont importantes soit parce qu'elles représentent des cas typiques des MRC des couronnes Nord et Sud. Dans chaque cas illustré seuls les types de couvert d'une superficie de 1km² ou plus en 1994 y sont inclus.

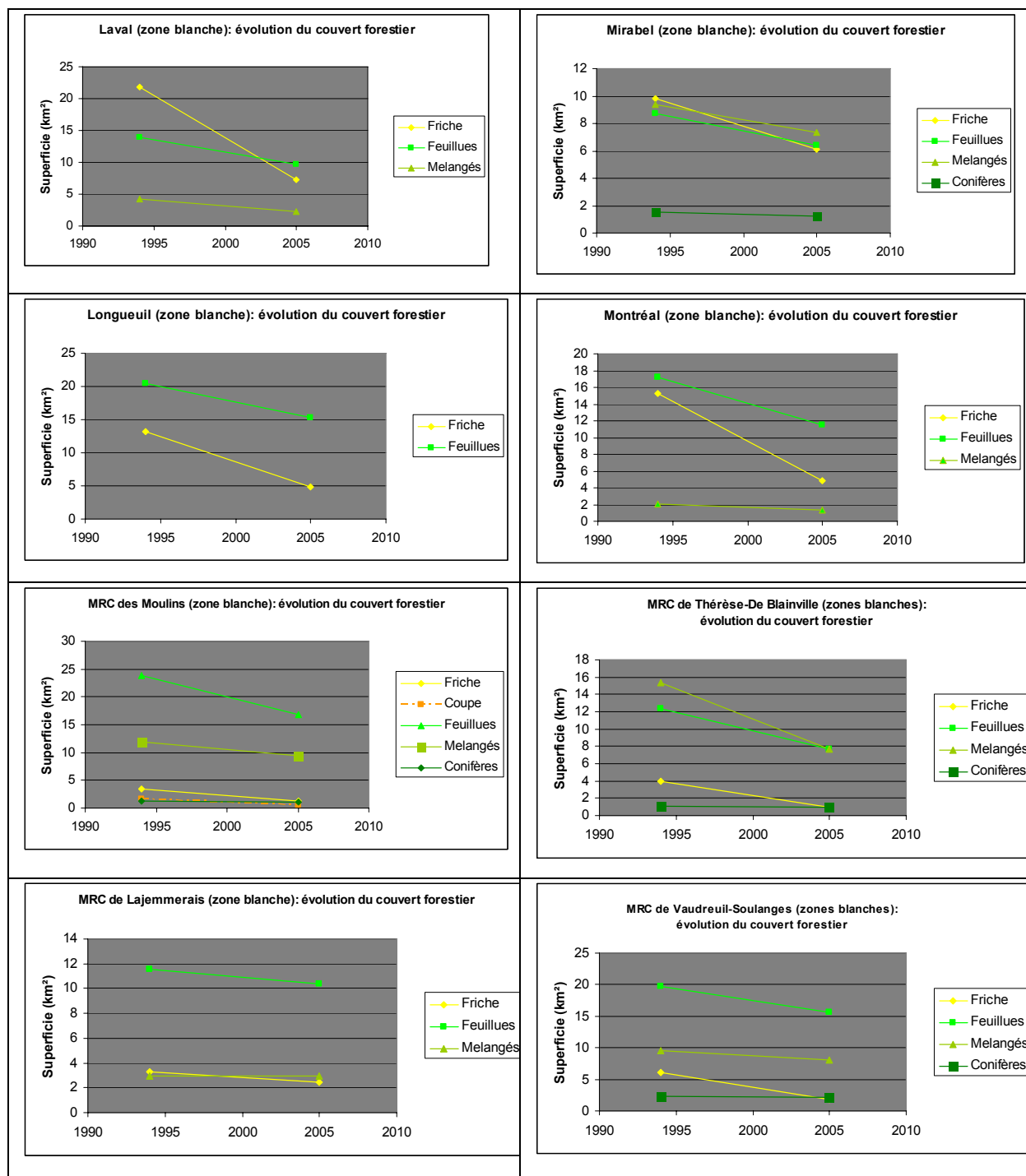


Figure 4.18 : Évolution du couvert forestier (1994-2005) dans certaines unités administratives de la CMM

4.3.4 Évolution des milieux humides 1994-2005

En règle générale les milieux humides présents sur le territoire de la CMM avant les années 2000 sont de petite taille (inférieure à 0,5 km²). Cette petite taille, combinée à la complexité des signatures spectrales de ces milieux rend une analyse des images Landsat difficile.

Nous avons pu quand même repérés quelques changements importants en analysant les images classifiées après 2000. Nous nous sommes basés sur les cartes écoforestières qui identifient deux types de milieux humides ouverts (sans couverture arborescente importante) : « Terres dénudées ou semi dénudées humides » et « Terres dénudées ou semi dénudées sèches ». Nous avons aussi inclus dans cette analyse deux autres catégories de ces cartes : « Aulnaies » et « Terres inondées ». Toutes ces catégories mises ensemble couvraient en 1994, 19,2 km² dans les zones blanches et 8,3 km² dans les zones vertes. Dans les zones blanches, les terres humides sont surtout concentrées dans la couronne Sud à la MRC de Roussillon et dans la couronne Nord dans les MRC de Deux montagnes, des Moulins et de Thérèse-De Blainville. Dans les zones vertes elles sont disséminées un peu partout à travers la CMM. L'analyse des images satellitales classifiées a permis de constater les suivants :

1) Dans les zones vertes les changements repérés ne sont pas significatifs. Nous présentons ici une illustration d'un type de changement repéré.



Figure 4.19 : Changement repéré dans une terre humide à partir de l'image Landsat 2005 dans la zone verte de la Ville de Laval (orthophoto 2005)

2) Dans les zones blanches les changements les plus significatifs sont repérés dans la MRC de Thérèse De Blainville. La figure suivante illustre quelques changements repérés dans diverses parties du territoire de la CMM.



Figure 4.20 : Changements repérés dans les terres humides à partir de l'image Landsat 2005 dans la zone blanche (orthophotos 2005).

Concernant les milieux humides couverts les changements sont pris indirectement en compte par l'analyse précédente sur l'évolution du couvert forestier, car ces terres humides sont identifiées sur les cartes écoforestières par la nature de leur couverture arborescente.

4.4 Génération d'indicateurs

L'impact des changements des occupations du sol sur les îlots de chaleur et le ruissellement de surface sont discutés plus en détail dans les parties subséquentes de ce rapport. Ici, nous montrerons comment à partir des cartes d'occupation du sol, il est possible de générer des indicateurs utiles à la meilleure compréhension de ces deux problèmes (îlots de chaleur et

ruissellement de surface des eaux pluviales) ainsi qu'à d'autres analyses portant sur les milieux naturels.

4.4.1 Convertir une carte d'occupation en degré d'imperméabilité

La littérature fournit nombre d'approches pour cartographier les matériaux de surface par analyse d'images satellitales. Avec l'arrivée des capteurs dits hyperspectraux qui fournissent beaucoup plus de détails sur la signature spectrale des objets, il sera possible d'aller beaucoup plus loin dans cette cartographie mais pour le moment l'analyse d'images multispectrales fournit des résultats incertains. Une autre approche plus simple pour générer des cartes montrant le degré d'imperméabilité est d'associer à un type d'occupation un coefficient empirique. La littérature fournit de tels coefficients. Le tableau suivant en montre un exemple.

Coefficients d'imperméabilisation simplifiés	Coefficients d'imperméabilisation	Occupation du sol
Faible	0-0,1	Espaces verts naturels, terres agricoles, parcs et jardins
Faible	0,1-0,2	Terrains vacants urbains et ruraux, infrastructures de transports ferroviaires
Moyen	0,2-0,3	Terrains de jeu, habitations faible densité du bâti
Moyen	0,3-0,4	Quartiers résidentiels peu denses
Moyen	0,4-0,7	Quartiers résidentiels moyenne densité, carrières, décharges, cimetières
Fort	0,7-0,8	Quartiers résidentiels forte densité, commerces et bureaux, industries
Fort	0,9-1	Infrastructures routières et aéroportuaires

(Compilation de plusieurs sources)

Tableau 4.6 : Coefficients d'imperméabilisation en fonction des occupations du sol

En utilisant ces coefficients et la carte de l'occupation du sol de la CUM qui est la plus détaillée des cartes disponibles pour le territoire de la CMM nous obtenons des cartes qui présentent un intérêt certain pour les études hydrologiques à un niveau plutôt régional. Pour raffiner cette carte nous avons ajouté le réseau routier provenant des cartes topographiques. Comme le montre la figure 4.21 il est possible d'associer cette carte à un modèle numérique d'altitude pour faciliter les analyses par bassin versant.

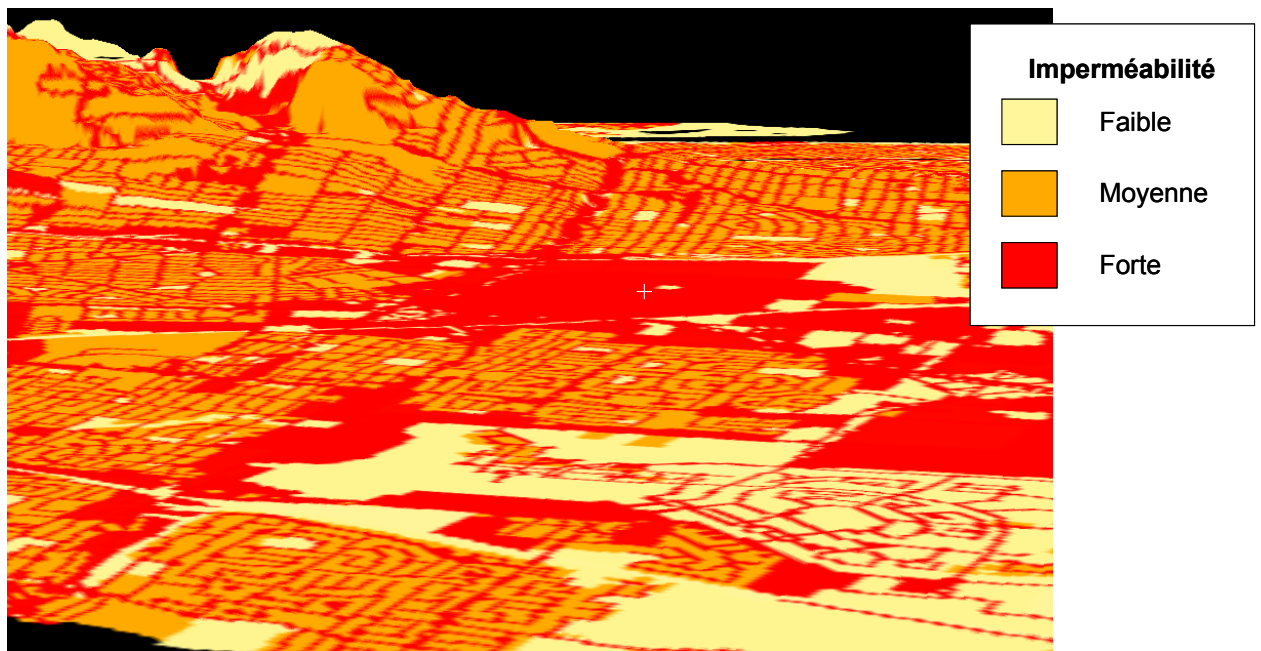


Figure 4.21 : Carte du degré d'imperméabilité des sols : le Mont Royal et ses environs (vue à vol d'oiseau de l'ouest de l'île de Montréal)

4.4.2 Analyser les pressions d'urbanisation sur les milieux naturels

Les logiciels géomatiques offrent actuellement une panoplie d'algorithmes d'analyse spatiale des données vectorielles ou matricielles qui favorisent la meilleure compréhension de l'état des milieux naturels (exemples : formes, fragmentation). Il serait intéressant d'utiliser ces logiciels avec des cartes d'occupation du sol et d'autres données afin de développer des indices montrant l'état des milieux naturels et par là favoriser la prise de décision sur la conservation, protection ou encore réhabilitation des milieux naturels. Une simple illustration du potentiel des analyses spatiales est donnée par la suite. On montre un milieu humide (en vert) dans la couronne Sud de la CMM indiqué sur la carte CLUMP de 1966 ainsi que sur les cartes écoforestières de 1994. En 1966 les milieux urbanisés (en orangé) étaient peu présents dans son environnement immédiat. La situation a radicalement changé en 1994 avec les milieux urbanisés (en rouge) qui sont de plus en plus présents, et le milieu humide qui est littéralement pris en étau.

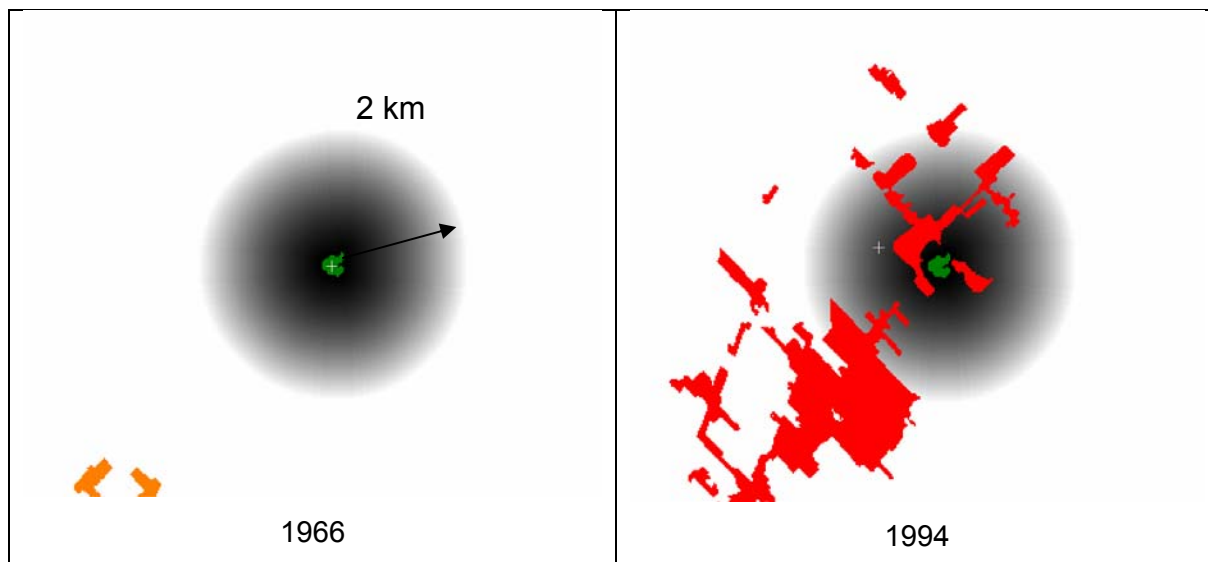


Figure 4.22 : Pressions d'urbanisation de plus en plus importantes exercées sur un milieu humide

4.5 Conclusions et recommandations

Les principales conclusions de cette analyse sont les suivantes :

- 1) L'urbanisation des zones blanches a progressé ces dernières années à un rythme significatif que nous avons évalué à $7 \text{ km}^2/\text{an}$. Ce rythme doit être réévalué avec des images satellitaires offrant une plus grande résolution. À titre d'exemple nous montrons ici les gains dans la précision que nous pouvons atteindre avec ces images.

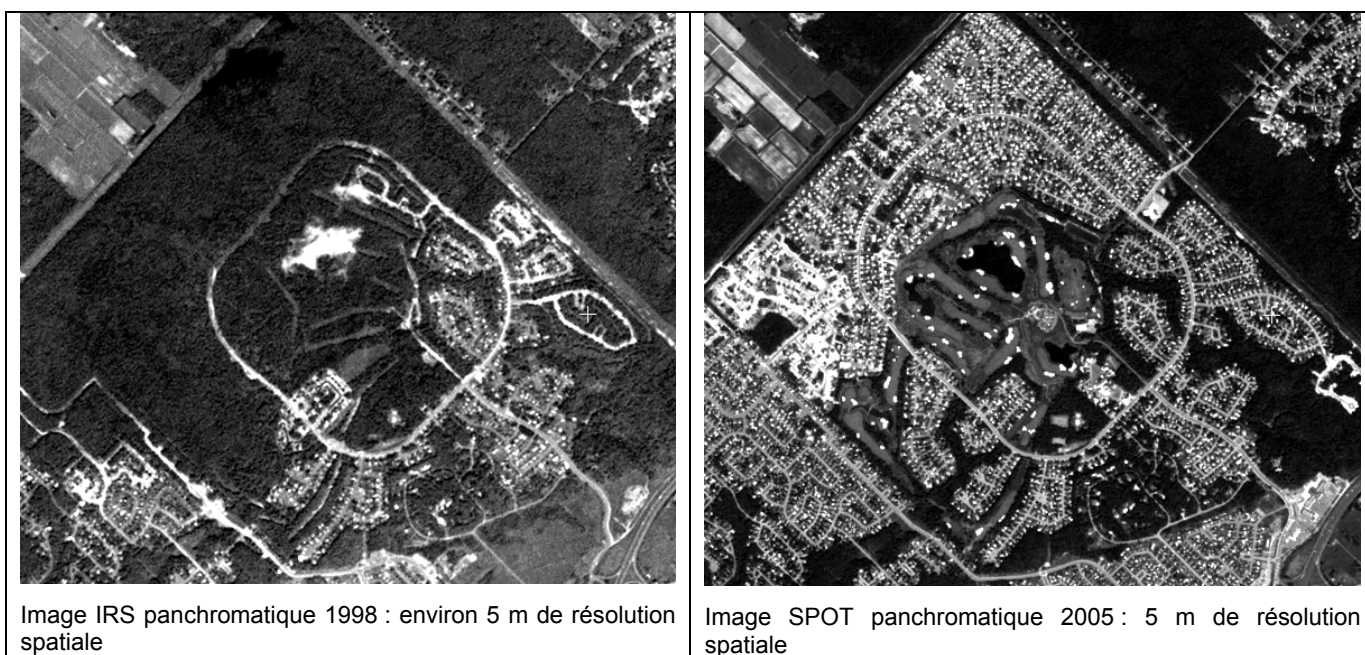


Figure 4.23 : Changements des occupations du sol tel que perçus sur des images satellitaires à haute résolution

- 2) La progression de l'urbanisation se fait surtout au détriment du couvert forestier existant, la figure ci-dessus illustre bien cet état de fait. Des études plus poussées sont nécessaires pour évaluer les impacts de cette perte de biomasse toujours en rapport avec les changements de l'environnement thermique.
- 3) Un résultat un peu inattendu de cette étude est la perte du couvert forestier également dans les zones vertes à un rythme similaire à celui observé dans les zones blanches.
- 4) Les milieux humides demeurent globalement une occupation du sol marginal. Des changements significatifs semblent être présents dans les zones blanches. Ici aussi, compte tenu de la petitesse de leur taille, des analyses plus poussées sont nécessaires avec l'imagerie satellitale de plus haute résolution.

5. Îlots de chaleur et indice de végétation

Ce deuxième volet repose sur l'exploitation d'images satellitaires (Landsat-5) et a pour but de quantifier et qualifier le comportement thermique ainsi que le taux actuel de végétalisation (2005). De plus il présentera l'évolution, sur une période de 20 ans, de ces deux thématiques. Tenant compte de la technologie et de la méthodologie utilisées, les informations quantitatives sont à considérer comme des indicateurs et non comme des valeurs absolues. Même à cela nous avons été en mesure de dégager certains portraits et certaines tendances qui confirment une fois de plus l'importance des végétaux et des matériaux de surface en milieu construit.

5.1 Objectifs

Les objectifs du deuxième volet sont les suivants :

1. Recherche dans les archives et commande d'images satellitaires comprenant une bande spectrale dans l'infrarouge thermique et couvrant la période entre 1984 et 2005.
2. Correction géométrique et radiométrique des images et extraction des données sur les trois grands centres urbains : Montréal, Laval et Longueuil.
3. Recherche de données cartographiques et météorologiques pertinentes et création d'une base de données diachroniques avec intégration des images satellitaires
4. Localisation des sites susceptibles à la formation des îlots de chaleur
5. Mise en corrélation des sites établis et des changements de l'occupation du sol tels qu'établis dans le volet 1.

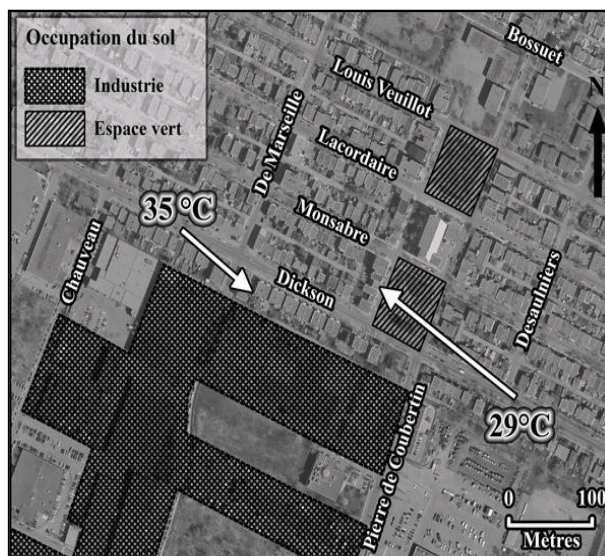
5.1.1 Précisions sur quelques termes

Les îlots de chaleur se définissent comme des *zones urbanisées, caractérisées par des températures estivales plus élevées que l'environnement immédiat avec des différences qui varient selon les auteurs de 5 à 10°C*. (Environnement Canada). Voogt (2004)⁹ identifie trois types d'îlots de chaleur, soit ceux :

⁹ 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*. 5th Symposium of the Urban Environment, American Meteorological Society, 23-26 Aug. 2004 Vancouver, BC, Canada. In Martin P., 2007, *Analyse diachronique du comportement thermique de Montréal en période de 1984 à 2005*. Mémoire de

1. de la couche de la limite atmosphérique (*boundary layer urban heat island*),
2. de canopée, situés à la cime des arbres et/ou des immeubles (*canopy layer urban heat island*),
3. et ceux de surface (*surface urban heat island*).

Les images satellitales utilisées dans ce volet (Landsat-5, bande 6) détectent le 3^{ème} type d'îlots de chaleur, c.a.d. ceux de surface. La chaleur ressentie par le corps humain est par contre différente de celle de surface, elle se rapproche plus de celle située à la canopée qui est généralement plus fraîche mais ceci dépend des matériaux situés à proximité. Ceci est illustré par la figure 5.1. Les températures de surface indiquées sur cette figure ont été estimées à partir de l'image Landsat de 2005 (voir plus loin). On remarque sur la figure 5.1a que la variation thermique durant la période estivale en milieu urbain est très élevée. En effet, à l'intérieur d'un rayon de 1,5 km, plus de 10°C ont été enregistrés (25 juin 2005). La figure 5.1b illustre bien cette situation. Ainsi nous notons 21,86°C au parc du Mont Royal tandis que juste un peu plus au nord, près de l'avenue Mont Royal, dans un secteur fortement minéralisé, la température est de l'ordre de 33,56°C. Des milieux différents engendrent inévitablement des comportements thermiques différents.



Influence du contexte environnant sur les températures d'une même fonction urbaine (résidentiel) en 2005



Différence de température estivale entre divers secteurs situés à proximité du Mont-Royal en 2005.

Figure 5.1 : Variation des températures de surface dans le milieu urbain (île de Montréal)

Les périodes de chaleur accablante

Les périodes de chaleur accablante nécessitent certaines conditions particulières, échelonnées dans le temps, qui font appel à des seuils de températures nocturne et diurne. Les îlots de chaleur quant à eux constituent, pour un temps donné et un lieu particulier, des secteurs avec des températures de 5 à 10 °C plus élevées que l'environnement immédiat. Bien évidemment la population résidant dans ces secteurs risque d'être la première affectée lors de périodes de chaleur accablante.

Suite à un décès ayant eu lieu dans une porcherie au début des années 90, Environnement Canada (EC) a été demandé par le coroner de mettre en place un système de prévision et d'avertissement avisant la population des conditions météo chaudes et humides.

Ainsi, en 1994, le programme d'avertissement de chaleur accablante fut créé et implanté. Selon ce

Humidex (°C)	Degré de confort
20 - 29	Aucun inconfort
30 - 39	Un certain inconfort
40 - 45	Beaucoup d'inconfort : évitez les efforts
Au-dessus de 45	Danger; probabilité d'un coup de chaleur

programme lorsqu'EC prévoyait un humidex qui atteignait 40 au moins 1 heure pour les prochaines 24 heures, il émettait un avertissement de chaleur accablante.

Puis, en 2004, suite aux quelques 10 000 décès enregistrés lors de la canicule en France en 2003, la Direction de Santé Publique-Montréal Centre jugea opportun de concevoir et implanter un programme d'intervention de canicule à partir des statistiques d'excès de mortalité/morbidité des 20 dernières années combinées aux conditions météo entourant les périodes de chaleur observées durant la même période. Environ sept épisodes durant la période 1984-2003 ont été identifiés. (Source : Échange de courriels avec M. Gérald Viger, Environnement Canada, 2006.)

Humidex pour l'humidité relative de 100% à 65%								
HR (%) T (C°)	100	95	90	85	80	75	70	65
21	29	29	28	27	27	26	26	24
22	31	29	29	28	28	27	26	26
23	33	32	32	31	30	29	28	27
24	35	34	33	33	32	31	30	29
25	37	36	35	34	33	33	32	31
26	39	38	37	36	35	34	33	32
27	41	40	39	38	37	36	35	34
28	43	42	41	41	39	38	37	36
29	46	45	44	43	42	41	39	38
30	48	47	46	44	43	42	41	40
31	50	49	48	46	45	44	43	41
32	52	51	50	49	47	46	45	43
33	55	54	52	51	50	48	47	46
34	58	57	55	53	52	51	49	48
35		58	57	56	54	52	51	49
36			58	57	56	54	53	51
37					58	57	55	53
38							57	56

Ainsi le programme actuel d'intervention de la DSP-Montréal Centre, avec la complicité des autorités municipales dont le Bureau de Sécurité civile de la Ville de Montréal, est basé sur un suivi des prévisions météo des prochains jours, un *monitoring* particulier des

mortalités/morbidités dans les hôpitaux de la grande région de Montréal et des critères météorologiques suivants:

- Temp. max. d'au moins 33°C,
- Temp. min. ne descendant pas en bas du 20°C la nuit,
- pour une durée minimale de 3 jours consécutifs.

Les périodes de chaleur accablante nécessitent certaines conditions particulières, échelonnées dans le temps, qui font appel à des seuils de températures nocturne et diurne. Les îlots de chaleur quant à eux constituent, pour un temps donné et un lieu particulier, des secteurs avec des températures de 5 à 10 °C plus élevées que l'environnement immédiat. Bien évidemment la population résidant dans ces secteurs risque d'être la première affectée lors de périodes de chaleur accablante.

5.1.2 Les facteurs et les conséquences

Divers facteurs tels l'occupation du sol, les matériaux utilisés, la végétation, les conditions climatiques et les polluants influencent la présence ainsi que l'amplitude des îlots de chaleur. Les îlots de chaleur ont quant à eux des conséquences sur la santé humaine, la flore, la consommation d'énergie ainsi que sur les changements climatiques. Dans certains cas, comme pour les polluants, ces facteurs en plus d'y participer, s'y combinent et exacerbent la situation. Pour contrer ou du moins ralentir la présence d'îlots de chaleur diverses solutions sont proposées comme l'ajout de végétation, la pratique de certains aménagements, l'implantation de toits froids et de trottoirs froids. De plus, certaines de ces solutions contribuent à la réduction d'inondations (en milieu urbain) en diminuant l'imperméabilité des sols.

Afin de regrouper les informations de la littérature associées à ce contexte trois tableaux synthèses ont été produits (Leprince J., 2007) : le premier considère les facteurs ainsi que leurs caractéristiques, le deuxième s'attarde aux conséquences et caractéristiques, tandis que le troisième relate différentes solutions inventoriées qui seront présentées à la section 5.4.

Les facteurs

Facteurs	Caractéristiques	Auteurs
La présence de certaines occupations du sol / typologie des bâtiments	1. Rapport non résidentiel / superficie totale du sol dans le développement 2. Rapport hauteur moyenne / superficie du sol de moins de 10% 3. Industrie : grande superficie de béton/métal, d'où forte température 4. Plus la densité du bâtiment est importante, moins l'effet de rafraîchissement est ressenti 5. Changement d'occupation du sol, en particulier dégradation ou absence de zones végétalisées 6. Effet rafraîchissant de la végétation 7. Zones commerciales, industrielles et de fortes densités associées à des fortes températures par opposition aux lacs et aux parcs 8. La hauteur des bâtiments, la densité et l'orientation des rues altèrent la ventilation naturelle 9. La complexité des structures tridimensionnelles à la surface 10. L'étalement urbain 11. Formation de canyons urbains, liés à la géométrie urbaine et aux propriétés des matériaux de construction Ces canyons expliqueraient des chaleurs assez importantes la nuit dans les zones commerciales et les centres d'affaires 12. L'implantation continue de bâtiments favorise les ICU 13. Meilleure efficacité des forêts par rapport aux fermes horticoles et aux champs de culture	Ali-Toudert <i>et al.</i>, 2005, in Yow, 2007 Bourbia et Awbi, 2004, in Yow, 2007 Chen <i>et al.</i>, 2006 Ghiaus <i>et al.</i>, 2006, in Yow, 2007 Giridharan <i>et al.</i>, 2007 Grimmond, 2007 Harman <i>et al.</i>, 2004, in Yow, 2007 Huang <i>et al.</i>, 2007 Jusuf <i>et al.</i>, 2007 Kato et Yamaguchi, 2007 Kusaka et Kimura, 2004, in Yow, 2007 Oke, 1982 in Yow 2007 Terjung et Louie, 1973 Unger, 2006, in Yow, 2007 Velazquez-Lozada <i>et al.</i>, 2006 Weng <i>et al.</i>, 2004, in Yow, 2007 Wong <i>et al.</i>, 2007
Propriétés physiques des matériaux	1. Index d'émission seuil de 10 % 2. Les aspects radiatifs perte/gain; longueur d'onde courtes/longues 3. Capacité thermique 4. Stockage de la chaleur 5. Propriétés thermiques diffusivité et conductivité 6. La rugosité 7. L'albédo et la réflectivité 8. Conductivité et capacité thermique 9. Leur combinaison produit une grande gamme de micro-climats	Giridharan <i>et al.</i>, 2007 Grimmond, 2007 Pease <i>et al.</i>, 1976 Terjung et Louie, 1973 Velazquez-Lozada <i>et al.</i>, 2006
L'imperméabilité du sol	1. Impact de la substitution de la végétation par des surfaces imperméables 2. Forte relation linéaire entre les températures de surface et	Kato <i>et al.</i> 2007 Weng <i>et al.</i>, 2004 in Yow, 2007 Yuan et Bauer, 2007

	l'imperméabilité du sol, et ce pour toutes les saisons	
Présence d'eau / humidité	1. Modification du système hydrique : • Ruissellement et écoulement plus rapide • Évapotranspiration moins importante 2. Rapide canalisation de l'eau due aux bâtiments et aux rues 3. Effet rafraîchissant de l'eau, qui impose un contrôle de sa qualité 4. La distribution de l'humidité de surface potentiellement affectée par l'évaporation ou la transpiration 5. Niveau de sécheresse	Grimmond, 2007 Huang <i>et al.</i>, 2007 Nasrallah <i>et al.</i>, 1990 Pease <i>et al.</i>, 1976 Runnalls et Oke, 2000, in Yow, 2007 Terjung et Louie, 1973 Velazquez-Lozada <i>et al.</i>, 2006 Weng et Yang, 2004
Pollution de l'air / Aérosols	1. Augmente les radiations des ondes longues et produit un effet de serre	Grimmond, 2007 Velazquez-Lozada <i>et al.</i>, 2006
Conditions climatiques	1. Vent vitesse/direction • Réduction du flux de vent par friction • Ce facteur est lui-même influencé par la topographie locale, ainsi que par les caractéristiques des bâtiments hauteur/densité et l'orientation des rues • La complexité des terrains joue sur les vents et favorise une forte variabilité climatique • Typologie du vent : vent issu de la différence terre/eau et de variations locales qui peuvent influencer le transport des polluants 2. Nuages : • L'amplitude thermique diminue avec la vitesse du vent et la couverture nuageuse • Les contrastes sont plus forts si le ciel est clair et calme par opposition à une situation venteuse et nuageuse selon • Visibilité (<i>Sky view factor</i>) : • Différences microclimatiques en fonction du site d'observation, même si on observe généralement l'ordre : couverture de béton, pelouse, eau et bois. Situation inverse la nuit. • Radiation solaire	Ackerman, 1985, in Yow, 2007 Arnfield, 2003, in Yow, 2007 Chandler, 1960, in Yow, 2007 Ghiaus <i>et al.</i>, 2006, in Yow, 2007 Giridharan <i>et al.</i>, 2007 Grimmond 2007 Huang <i>et al.</i>, 2007 Kim et Baik, 2005, in Yow, 2007 Landsberg, 1981, in Yow, 2007 Livada <i>et al.</i>, 2002, in Yow, 2007 Monti and Leuzzi, 2005, in Yow, 2007 Sofer et Potchter, 2006, in Yow, 2007 Terjung et Louie, 1973 Tong <i>et al.</i>, 2005, in Yow, 2007 Velazquez-Lozada <i>et al.</i>, 2006
Chaleur anthropique	1. Effets limités. Facteur potentiellement important dans les centres urbains, mais minimales dans les zones résidentielles et commerciales	Grimmond, 2007 Kato et Yamaguchi, 2007 Taha, 1997 Terjung et Louie, 1973 Velazquez-Lozada <i>et al.</i>, 2006

Les conséquences

Conséquences	Caractéristiques	Auteurs
Impacts sur la santé humaine	1. Les îlots de chaleurs de type canopée sont ceux ayant le plus d'impacts sur l'humain	Yow, 2007
Impacts sur la flore	1. Altère le cycle nutritionnel biochimique 2. Décomposition des feuilles 3. Capacité nutritive du sol 4. Floraison précoce 5. Accroissement du stress hydrique en été	Baxter <i>et al.</i> , 2002, in Yow, 2007 Groffman <i>et al.</i> , 2002, in Yow, 2007 Lavoie et Lachance, 2006, in Yow, 2007 Pavao-Zuckerman et Coleman, 2005, in Yow, 2007 Pouyat <i>et al.</i> , 2002, in Yow, 2007
Impacts sur la consommation d'énergie	1. Surtout visibles quand on évalue les économies potentielles	Yow, 2007
Impacts climatiques	1. Cercle vicieux : Chaleur-climatiseurs-augmentation de la température-augmentation de la demande d'électricité et d'émission de gaz à effet de serre 2. Réduction ou annulation de la rosée matinale dans les villes 3. Augmentation de la masse nuageuse 4. Précipitation de type convectif 5. Mouvements convectifs 6. Occurrence de la foudre 7. Fréquence des pluies de grêle 8. Parfois pollution de l'air mène à une réduction de la taille des gouttelettes pas de précipitation 9. Influence sur la vapeur d'eau dans l'atmosphère est moins généralisable 10. Changements climatiques augmenteraient les îlots de chaleur et inversement	Baik <i>et al.</i> , 2001, in Yow, 2007 Bornstein et Lin, 2000, in Yow, 2007 Changnon, 1981, in Yow, 2007 Changnon, 2003, in Yow, 2007 Changnon, 2004 in Yow, 2007 Collier, 2006, in Yow, 2007 Crutzen, 2004 in Yow, 2007 Grady <i>et al.</i> , 2003, in Yow, 2007 Grimmond, 2007 Jauregui et Romales, 1996, in Yow, 2007 Kurbatskii, 2001, in Yow, 2007 Orville <i>et al.</i> , 2001, in Yow, 2007 Richards, 2004 Romanov, 1999, in Yow, 2007 Rosenfeld, 2000, in Yow, 2007 Rosenzweig <i>et al.</i> , 2005, in Yow, 2007 Rozoff <i>et al.</i> , 2003, in Yow, 2007 Steiger <i>et al.</i> , 2002, in Yow, 2007 Terjung et Louie, 1973, in Yow, 2007 Unger, 1999, in Yow, 2007

5.2 Méthodologie

La méthodologie repose principalement sur l'utilisation de l'imagerie satellitale (voir schéma à la page suivante). Ainsi 13 images du satellite Landsat-5 ont été acquises. Les cartes présentées aux Annexes II et III par contre ne reposent que sur deux images : 17/06/1984 et 27/06/2005. La bande thermique (bande 6) originalement d'une résolution de 120 mètres a été rééchantillonnée à 30 mètres¹⁰ afin de se conformer aux autres bandes. Le passage du satellite se situe aux alentours de 10h15 le matin. Les techniques et méthodes appliquées, présentées dans l'organigramme, sont conventionnelles et se retrouvent dans plusieurs autres études que ce soit pour le calcul des températures¹¹, celui des indices de végétation¹² ou encore pour la détection des changements¹³.

¹⁰ Il aurait été souhaitable d'utiliser une résolution plus détaillée pour la couverture thermique comme celle de Landsat 7 (60 mètres) par exemple. La fenêtre temporelle y était par contre trop limitée (1999-2003). L'utilisation de l'aéroportée aurait aussi été une piste intéressante grâce sa grande résolution; toutefois son coût élevé ainsi que la disponibilité d'images antérieures limitaient son usage.

¹¹ <http://www.cas.sc.edu/geog/rslab/Rsc/mod5/5-1/exercices/RADIANCE.HTM>

Barsi J.A., Schott J.R., Palluconi D.L., Helder S.J., Hook B.L., Markham G., Chander G. et O'Donnell E.M., 2003, Landsat TM and ETM+ thermal band calibration, *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 29, No. 2, pp. 141-153.

¹² Bonn F., 1996, *Précis de télédétection, Volume 2 Applications thématiques*, AUPELF, 633 pages.

¹³ Mas J.F., 2000, Une revue des méthodes et techniques de télédétection, *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 26, No. 4, pp. 349-362.

Prétraitement

Vérification des conditions météorologiques (Environnement Canada) avec les dates visées



Acquisition de 13 images satellites



Correction géométrique calage



Vérification des valeurs thermiques obtenues avec celles des stations
d'Environnement Canada



Application des masques eau et terres agricoles (MAPAQ 1999)



Traitement (images 17/06/1984 et 27/06/2005)



Calcul des indices de végétation
 $NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R}$
 $NDVI = \frac{\text{Bande 4} - \text{Bande 3}}{\text{Bande 4} + \text{Bande 3}}$

Calcul des Températures en °C
Bande 6 : 10,40-12,50 µm



Détection des changements 1984-2005 :
Dégradation vs amélioration
Analyse en composantes principales

Confection des cartes 2005 :
Thermique
Indice de Végétation



Minéralisation
vs
Végétalisation

Réchauffement
vs
Refroidissement



Mesure de la dynamique relative
aux îlots de chaleurs
et à la végétation



Production d'extraits sous forme de cartes et de rapports
(en y joignant certaines données de base de la BDTQ et BNDT)

5.2.1 Vérification des conditions météorologiques

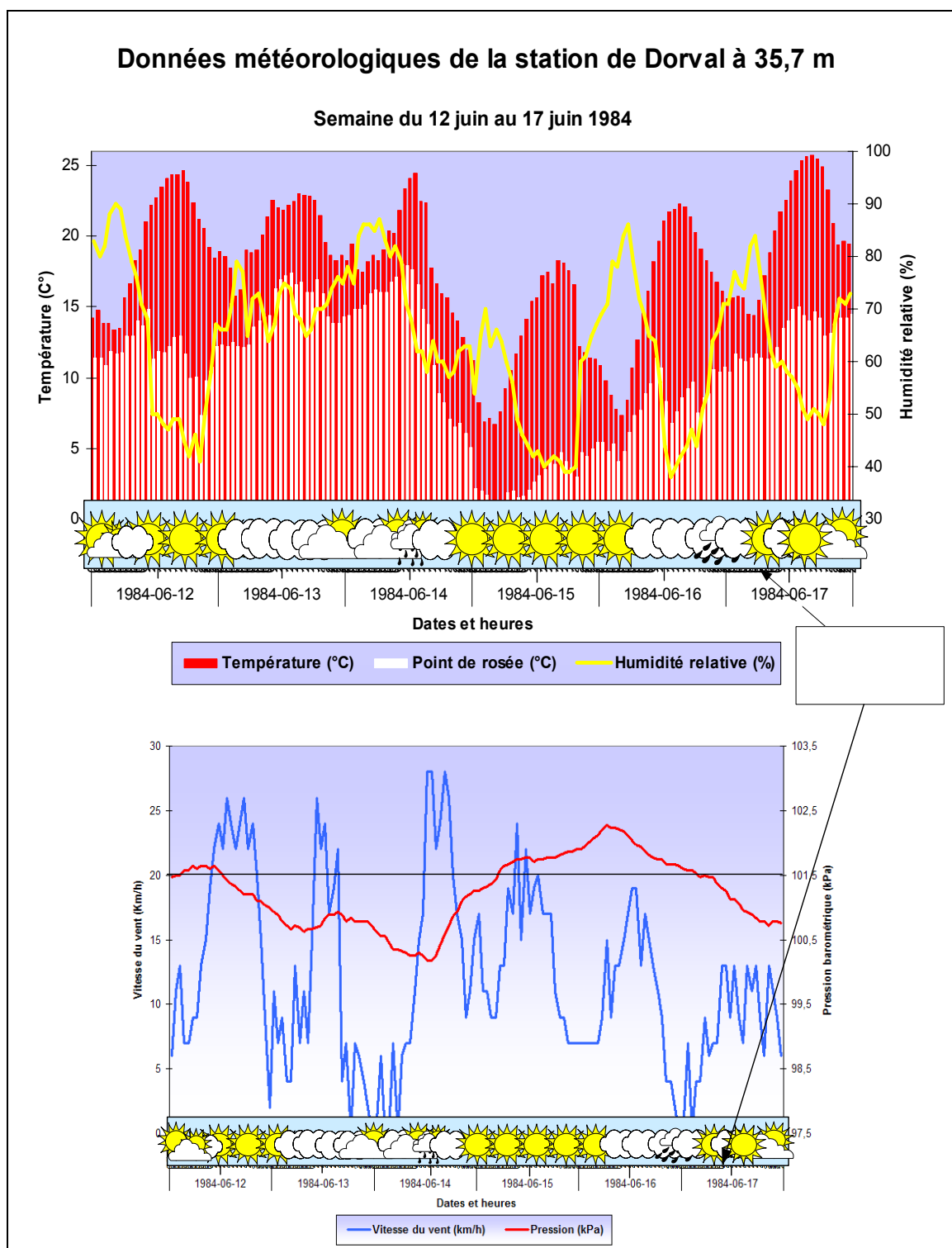
Après une vérification de la disponibilité d'image satellitaires pour la période 1984-2005 un examen des conditions météorologiques des dates relatives aux images présélectionnées a été effectué. Ainsi Martin et ses collaborateurs.¹⁴ en sont arrivés à identifier les conditions optimales de saisie d'image pour la détection des îlots de chaleur; en fait le moment de saisie idéal sera lors de la présence d'un ciel clair et sans vent :

- Couverture nuageuse inférieure à 5% ;
- Vent inférieur à 11km/h ;
- Conditions anticycloniques classes 1, 2 et 3 :
 - o *Classe 1 : anticyclonique -> sous un anticyclone ou une crête ; vents faibles à nuls (effets locaux), air très sec, peu ou pas de nuage. ICU maximal.*
 - o *Classe 2 : anticyclonique -> devant un anticyclone ou une crête ; vents faibles du secteur nord, air sec, peu de nuages.*
 - o *Classe 3 : anticyclonique -> derrière un anticyclone ou une crête ; vents faibles du secteur sud, air moins sec, peu de nuages.*
- Jours de l'été considérés: juin et juillet seulement, par soucis de constance de réchauffement solaire (entre 15.45hrs d'ensoleillement le 1er juin et 14.78hrs le 31 juillet, versus 13.33hrs le 31 août)¹⁵ ;
- Conditions météorologiques de la veille similaires ;
- Nuages hauts: moins de 5/10 de nuages hauts (cirrus) à l'heure de l'image (10h00), via les observations météorologiques brutes (SA/METAR). Les cirrus ont une bonne transmissivité dans le visible, d'où leur transparence sur les images, mais une moins bonne dans l'IR.

Les Figures 5.2 et 5.3 schématisent les conditions météorologiques prévalant lors de la saisie des images. On y remarque que les vents dans les deux cas oscillent autour du 10km/h, ce qui nécessairement affectera quelque peu la précision résultante.

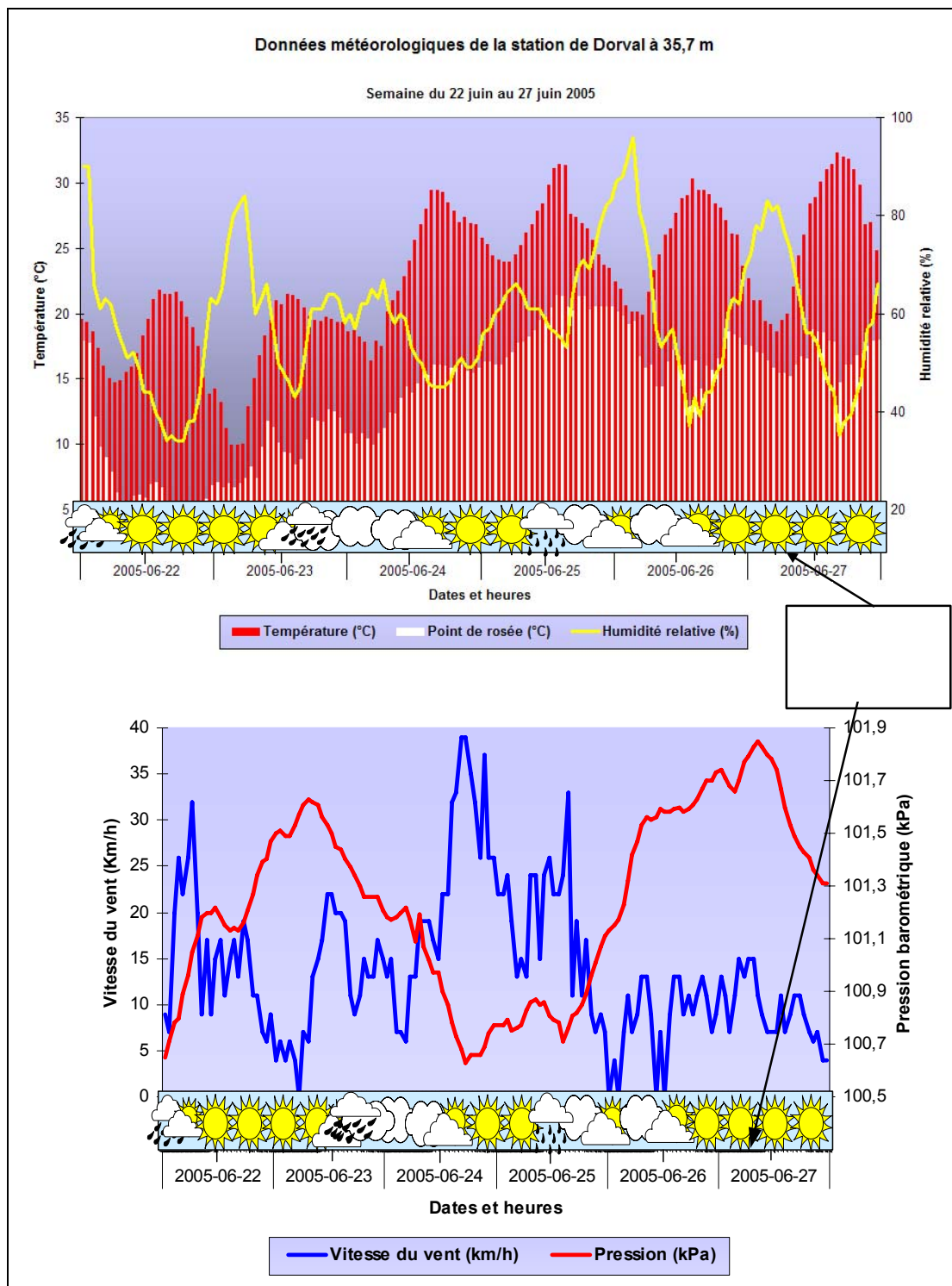
¹⁴ Martin P., Baudouin Y., Beauchemin M., Gagnon S., 2007, *Tendance historique 1984-2005 de l'ICU à Montréal via l'imagerie Landsat et les stations météorologiques*, 19 pages (article en préparation).

¹⁵ Ouranos a toutefois indiqué un glissement des journées les plus chaudes du mois de juillet vers le mois d'août ; il est donc possible au cours des prochaines années que la présence des îlots se retrouve (intensité et superficie) en août plutôt qu'en juillet.



Source : Martin P., 2007

Figure 5.2 : Données météorologiques de la semaine du 12 au 17 juin 1984 de la station de Dorval (Pierre Elliot-Trudeau).



Source : Martin P., 2007

Figure 5.3 : Données météorologiques de la semaine du 22 au 27 juin 2005 de la station de Dorval (Pierre Elliot-Trudeau).

5.2.2 Acquisition des images

Comme mentionné précédemment 13 images ont été acquises (Tableau 5.1) dans le cadre du projet FACC et 10 ont été traitées. Il s'agit d'images Landsat-5 TM où les bandes 3 et 4 ont été utilisées pour le calcul de l'indice de végétation, tandis que la bande 6 était nécessaire pour la réalisation des cartes thermiques (Tableau 5.2). Comme indiqué, les bandes 3 et 4 sont à 30 mètres de résolution et la bande 6 à 120 mètres de résolution. Les images de cette dernière bande ont toutes été rééchantillonnées à 30 mètres.

Landsat-5 TM		Path/Row 14-28		Path/Row 15-28	
	Couverture nuageuse/année	0%	10%	0%	10%
	1984	17 juin			
	1986	26 août			
	1988	16 septembre			
	1990			11 juillet	
	1992	25 juillet			
	1994			7 août	
	1996	18 juin			
	1998		27 août		
	2000			20 juin	
	2002				13 août
	2003				15 juillet
	2005	27 juin	29 juillet 20%		

Tableau 5.1 : Liste des images acquises.

Landsats 4-5 (TM)	Longueur d'onde (micromètres)	Résolution (mètres)
Bande 1	0.45-0.52	30
Bande 2	0.52-0.60	30
Bande 3	0.63-0.69	30
Bande 4	0.76-0.90	30
Bande 5	1.55-1.75	30
Bande 6	10.40-12.50	120
Bande 7	2.08-2.35	30

Tableau 5.2 : Longueur d'onde de chacune des bandes de Landsat 4 et Landsat-5 (TM).

5.2.3 Corrections géométriques

Il est important de préciser que la réussite de l'étude repose sur une bonne correspondance des images pixel à pixel, dans la mesure où nous allons nous baser sur des comparaisons d'images. Le positionnement de l'image par rapport à leur position géographique est important, mais elle reste subordonnée à la correspondance optimale d'image à image.

L'image du 27 juin 2005 a été géoréférencée à l'aide du module *Ortho Engine* de PCI avec une polynomiale du 1^{er} degré en se basant sur un fichier vectoriel des routes. Cette image couvre l'ensemble du territoire de la CMM. Elle a donc été choisie comme référence pour la correction des autres images retenues pour cette étude. Le tableau 5.3 et la figure 5.4 présentent des exemples des résultats de cette opération de correction géométrique image à image.

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
					Erreur moyenne quadratique : 0.197

Tableau 5.3 : Qualité de la correction géométrique (points de contrôle) de juillet 1992 ; image de référence juin 2005.

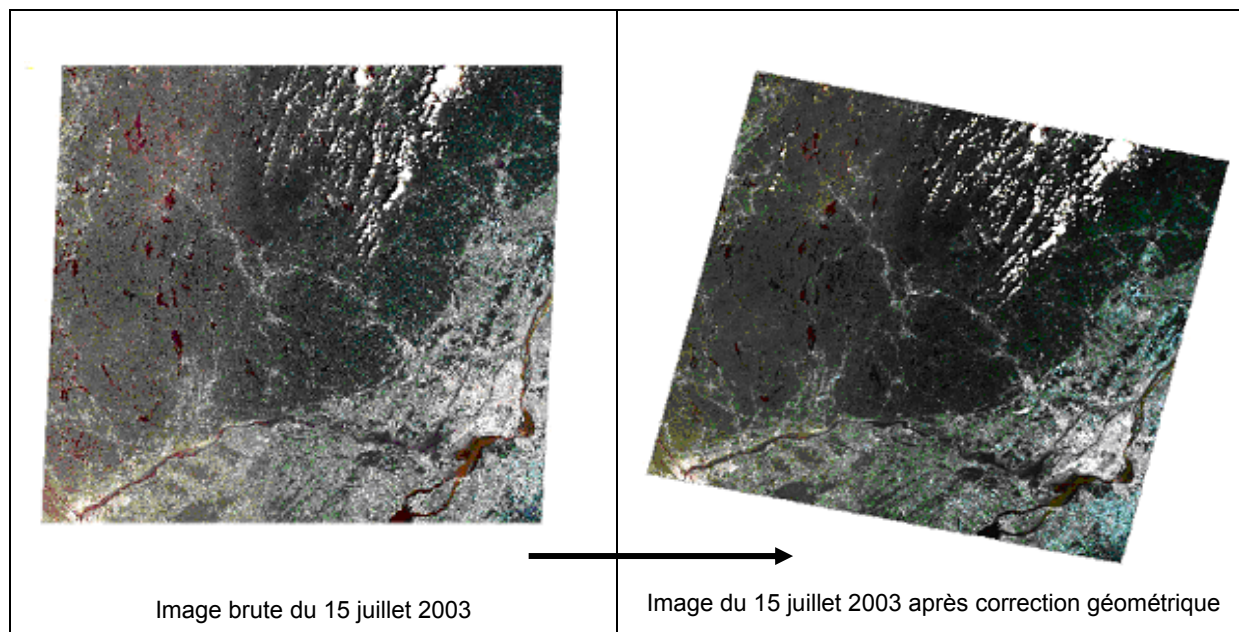


Figure 5.4 : Illustration de l'opération de correction géométrique ; image de référence juin 2005.

5.2.4. Vérification des valeurs thermiques obtenues avec celles des stations météorologiques

Les valeurs des images ont par la suite été vérifiées avec les données des stations d'Environnement Canada (C.f. Annexe 1). La figure 5.5 montre la répartition des ces stations dans le territoire de la CMM. Il faut toutefois prendre en considération que les valeurs satellitales traduisent les températures de surface tandis que les stations météorologiques sont situées en hauteur (ex. Dorval 37,5m).

5.2.5 Application des masques visant à exclure le réseau hydrographique et les zones agricoles

Dans le cadre d'applications associées à l'imagerie thermique ou au calcul de l'indice de végétation, le réseau hydrographique et les zones agricoles peuvent engendrer diverses erreurs. En effet, si un champ est cultivé en un temps T à forte teneur en végétaux, et qu'il se trouve en jachère à forte teneur en minéraux à un temps T+X, un changement de forte intensité sera détecté sans que cela ne soit justifié. De même, les variations du niveau de l'eau d'une date à l'autre peuvent induire le même type d'erreur dans les zones riveraines du fleuve et des autres cours d'eau présents. Pour contourner ces problèmes, nous avons eu

recours à un masque (Figure 5.6) créé à partir des couches vectorielles des parcelles agricoles (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 1999) et du réseau hydrographique (Ministère des transports du Québec, 2001).



Figure 5.5 : Stations météorologiques d'Environnement Canada.

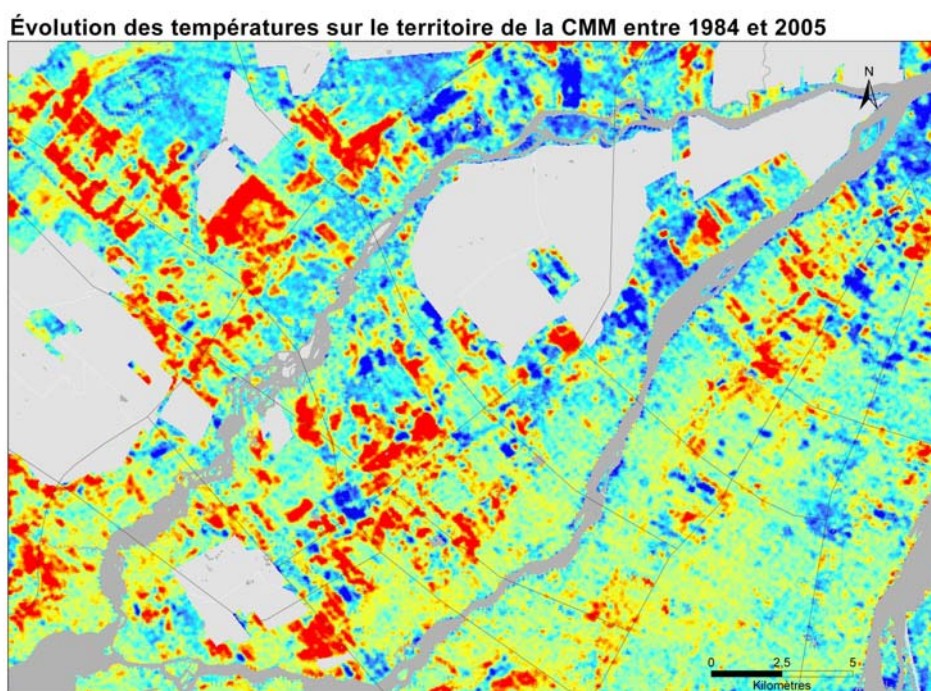


Figure 5.6 : Masquage du réseau hydrographique et des zones agricoles (en gris)

5.2.6 Traitement des données

Divers traitements ont été appliqués afin d'obtenir des indices de végétation et des cartes thermiques pour l'ensemble de notre jeu d'images.

Les indices de végétation

L'indice choisi pour l'observation du changement du milieu végétal est celui du NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), car malgré le développement de plusieurs nouveaux indices adaptés aux comportements des sols, le NDVI reste celui le plus utilisé. De récentes études ont démontré les limites de ce dernier qui parfois ne fournit pas d'estimation juste quant à la quantité de végétation. Ses mesures sont en effet fonction 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. 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 variabilité de l'NDVI.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}}$$
$$\text{NDVI} = \frac{\text{Bande 4} - \text{bande 3}}{\text{Bande 4} + \text{Bande 3}}$$

Les valeurs résultantes du NDVI varient de -1 à +1. Celles situées entre -1 et 0 indiquent l'absence ou la faible présence de végétation tandis que les valeurs entre 0 et +1 correspondent à une présence de plus en plus importante de couvert végétal. La figure 5.7 donne un exemple d'une carte de NDVI.

Valeur du NDVI sur le territoire de la CMM le 27 juin 2005

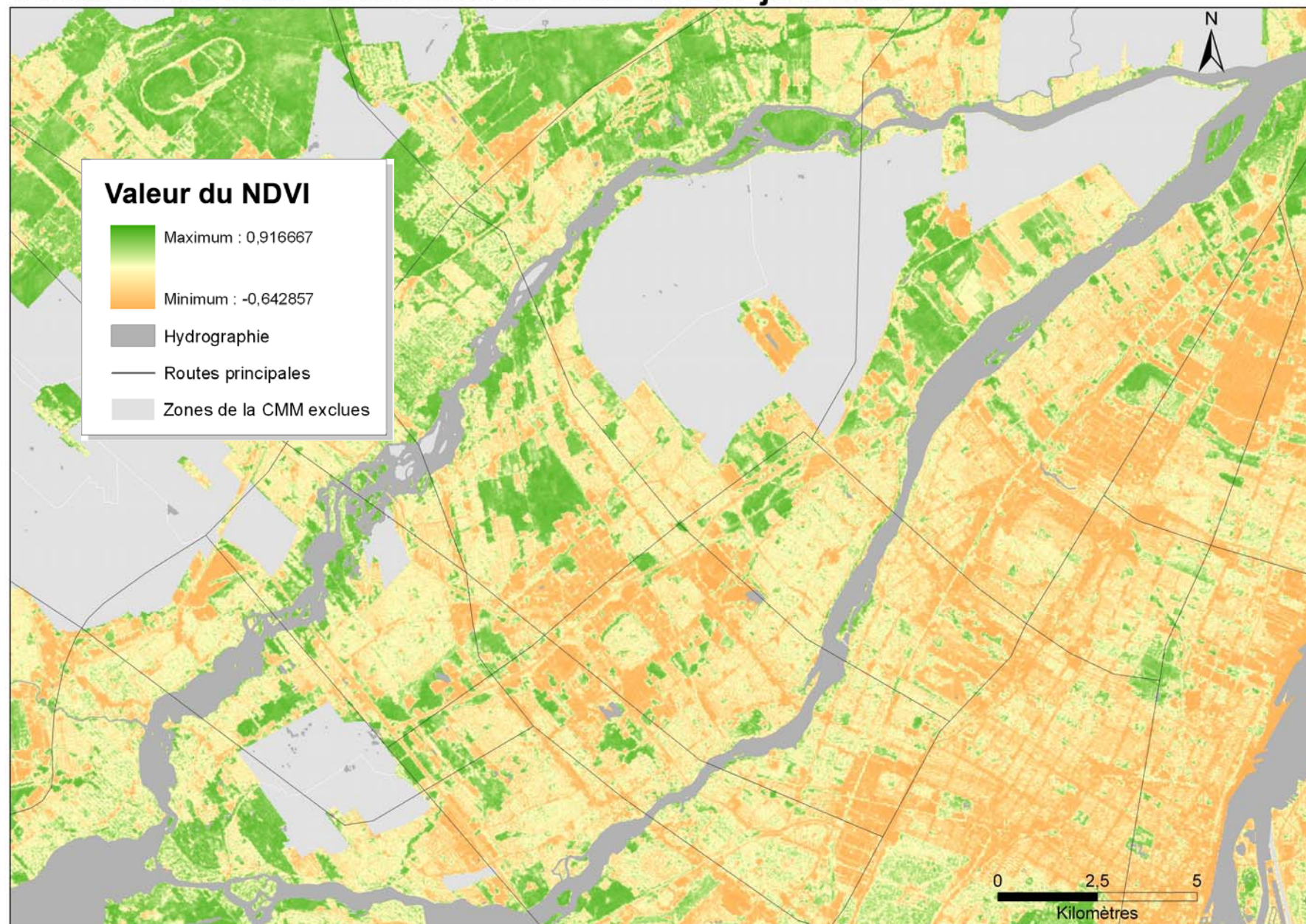


Figure 5.7 : Exemple de production cartographique du NDVI pour le 27 juin 2005.

Les îlots de chaleur

Pour cette étude, la transformation des comptes numériques des pixels en valeurs de température apparente se fait grâce à la formule fournie dans le manuel du satellite¹⁶. La première équation transforme les comptes numériques CN de l'image en flux rayonnement mesuré par le capteur L_s , alors que la seconde équation convertit le flux mesuré en température apparente en degrés Celsius.

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

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

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 $CN_{\max}$. 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.

Ces nouvelles bandes sont sauvegardées. Désormais et à ce stade de la méthodologie, chaque image possède sept bandes de 8 bits originales et la résultante en 32 bits créées.

Dans le cas de l'imagerie Landsat-5 nous obtenons donc des pixels de 120 mètres de résolution avec une précision au $\frac{1}{2}$ °C. Bien entendu cette approche n'est pas suffisante pour réaliser une analyse fine des matériaux de surface par contre elle s'avère adéquate pour dégager un portrait de la CMM et ainsi analyser ses différents arrondissements et municipalités (Figure 5.8).

¹⁶ NASA (2002), <http://www.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/>

Les Îlots de chaleur dans la Communauté Métropolitaine de Montréal le 27 juin 2005

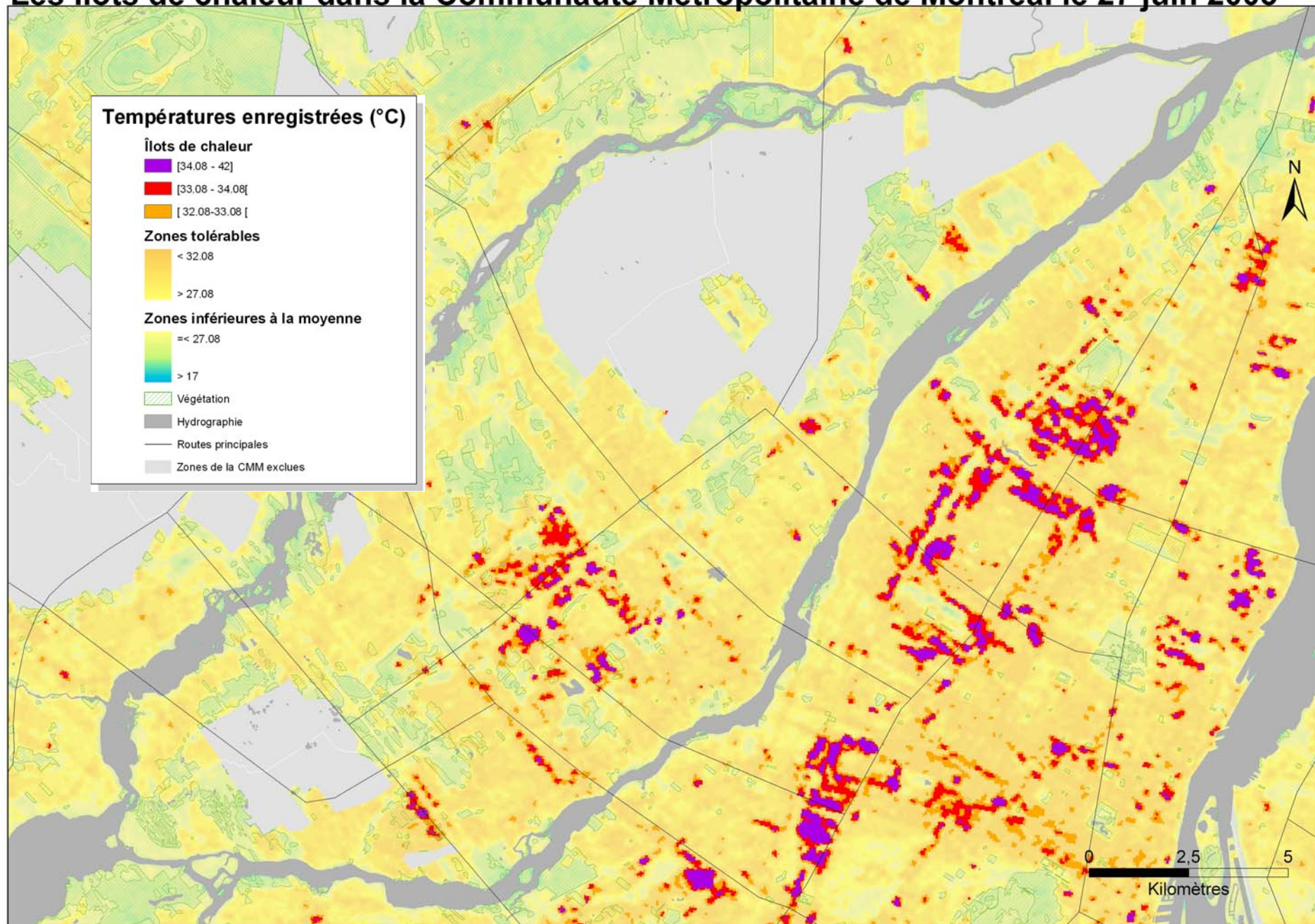


Figure 5.8 : Exemple de production cartographique des îlots de chaleur pour 2005.

Application de l'analyse en composantes principales

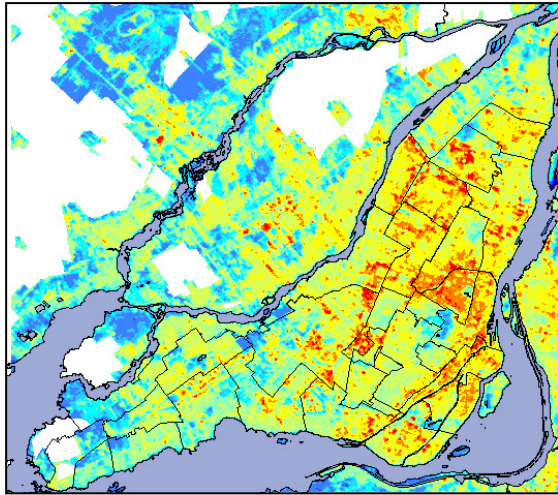
L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique d'analyse statistique (multivariée) visant entre autres à éliminer les éléments redondants et à synthétiser l'information. Cette technique est utilisée dans différents domaines lorsque la quantité de données s'avère importante. Elle vise l'extraction des principaux facteurs d'un ensemble de données.

Dans le présent cas nous utiliserons cette technique afin de comparer des paires d'images et faire ressortir les différences, c'est-à-dire les changements. Le but est d'isoler l'information correspondant aux transformations du territoire entre deux images de dates différentes.

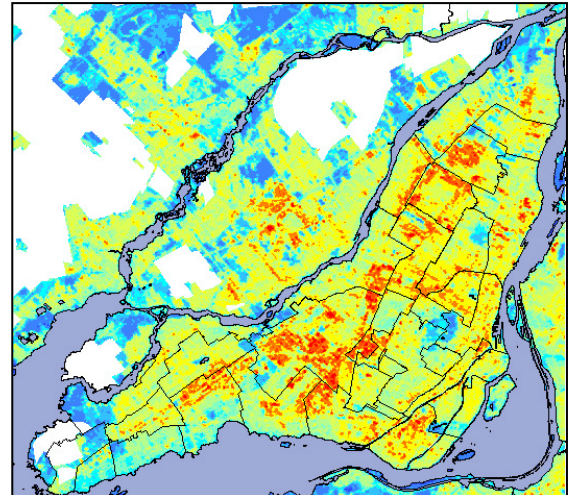
En appliquant l'ACP à deux images, on obtient deux facteurs. Le premier regroupe la majeure partie de l'information, soit les similitudes, et le second contient au contraire les informations liées aux changements. Nous avons donc réalisé différentes comparaisons par paires d'images aussi bien pour les indices de végétation que pour les températures.

Ainsi une comparaison a été appliquée entre les images 1984 et 2005 Figure 5.9. La carte résultante située au bas indique les secteurs transformés. En rouge les secteurs s'étant dégradés et en bleu les secteurs s'étant améliorés. Cette carte d'évolution thermique illustre les changements thermiques survenus entre deux dates : 17/06/1984 et 27/06/2005. Ces cartes montrent les secteurs s'étant réchauffés maximum de +16,96 °C ou refroidis maximum de -11,04 °C. **MISE EN GARDE :** CES CARTES NE LOCALISENT PAS LES ÎLOTS DE CHALEUR MAIS BIEN LES SECTEURS QUI THERMIQUEMENT ONT CONNU UN CHANGEMENT À LA HAUSSE OU À LA BAISSSE. Ce changement est très souvent attribuable à une modification du taux de minéralisation ou de végétalisation. Un secteur peut donc s'être réchauffé substantiellement (en rouge sur la carte) sans pour autant constituer un îlot de chaleur; on parlera alors de dégradation thermique. L'inverse étant aussi vrai. Il importe que cette notion soit bien comprise et qu'il n'y ait pas confusion entre la carte des îlots de chaleur et la carte d'évolution thermique, il s'agit d'informations complémentaires.

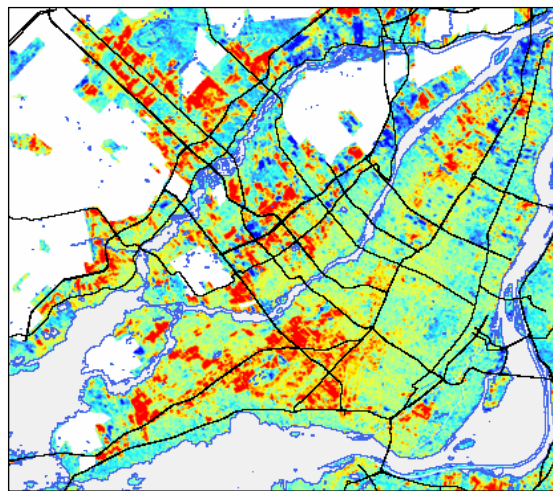
De la même façon nous avons appliqué cette technique aux deux cartes d'indices de végétation (17/06/1984 et 27/06/2005). Ceci a permis de localiser les secteurs s'étant minéralisés de ceux s'étant végétalisés.



a) Températures Juin 1984



b) Températures Juin 2005



c) Carte d'évolution (changements)

Note : Il importe de distinguer la différence entre les cartes d'îlots de chaleur et la carte d'évolution des températures : la couleur rouge dénote une augmentation de la température tandis que le bleu un refroidissement.

Figure 5.9 : Températures estimées pour deux dates (1984 et 2005) et leurs différences.

5.3 Résultats

5.3.1 Les documents cartographiques

Suite au prétraitement et au traitement des images satellites, quatre types de cartes ont été générés. Nous retrouvons donc: 1- les cartes thermiques (ex. Figure 5.11), 2- les cartes d'évolution (ou de changements thermiques ; ex. Figure 5.12), 3- les cartes des indices de végétation (NDVI ; ex. Figure 5.13) et 4- les cartes d'évolution des NDVI (ou de changements des NDVI ; ex. Figure 5.14).

Les cartes thermiques ont été produites sous forme d'affiches pour le territoire de la CMM ainsi qu'en format 8 ½ X 11 pour chacun des arrondissements/villes de Montréal (34 cartes) et pour 12 autres composantes de la CMM (Boisbriand ; Deux-Montagnes (ex. Figure 5.10a) ; Laval : Chomedey ; Duvernay, Saint-Vincent-de-Paul ; Ouest ; Pont-Viau/Laval-des-Rapides ; Saint-François ; Laval-sur-le-Lac/Sainte-Dorothée ; Fabreville/Sainte-Rose ; Auteuil/Vimont ; ainsi que Longueuil et Repentigny). Cette même couverture cartographique a été réalisée pour les cartes d'évolution thermique (ex. Figure 5.10b), les cartes d'indice de végétation et les cartes d'évolution de l'indice de végétation. Ces 188 documents cartographiques se retrouvent aux Annexes 2 et 3. D'autres produits cartographiques ont aussi été conçus, il s'agit dans certains cas de documents composites (îlots de chaleur et indice de végétation, etc.) que nous retrouvons dans le présent rapport.

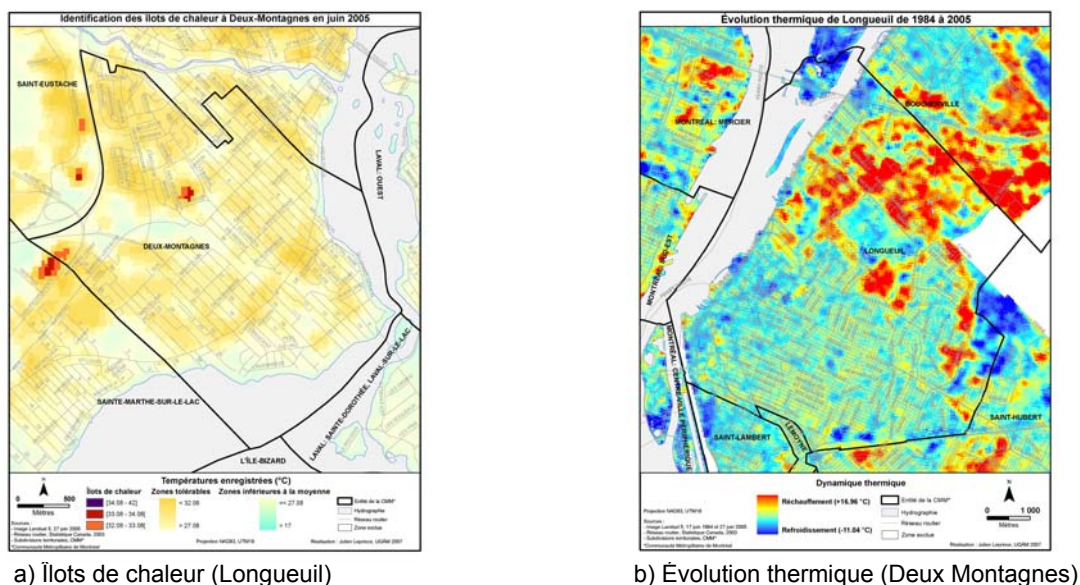


Figure 5.10 : Exemples de cartes du comportement thermique

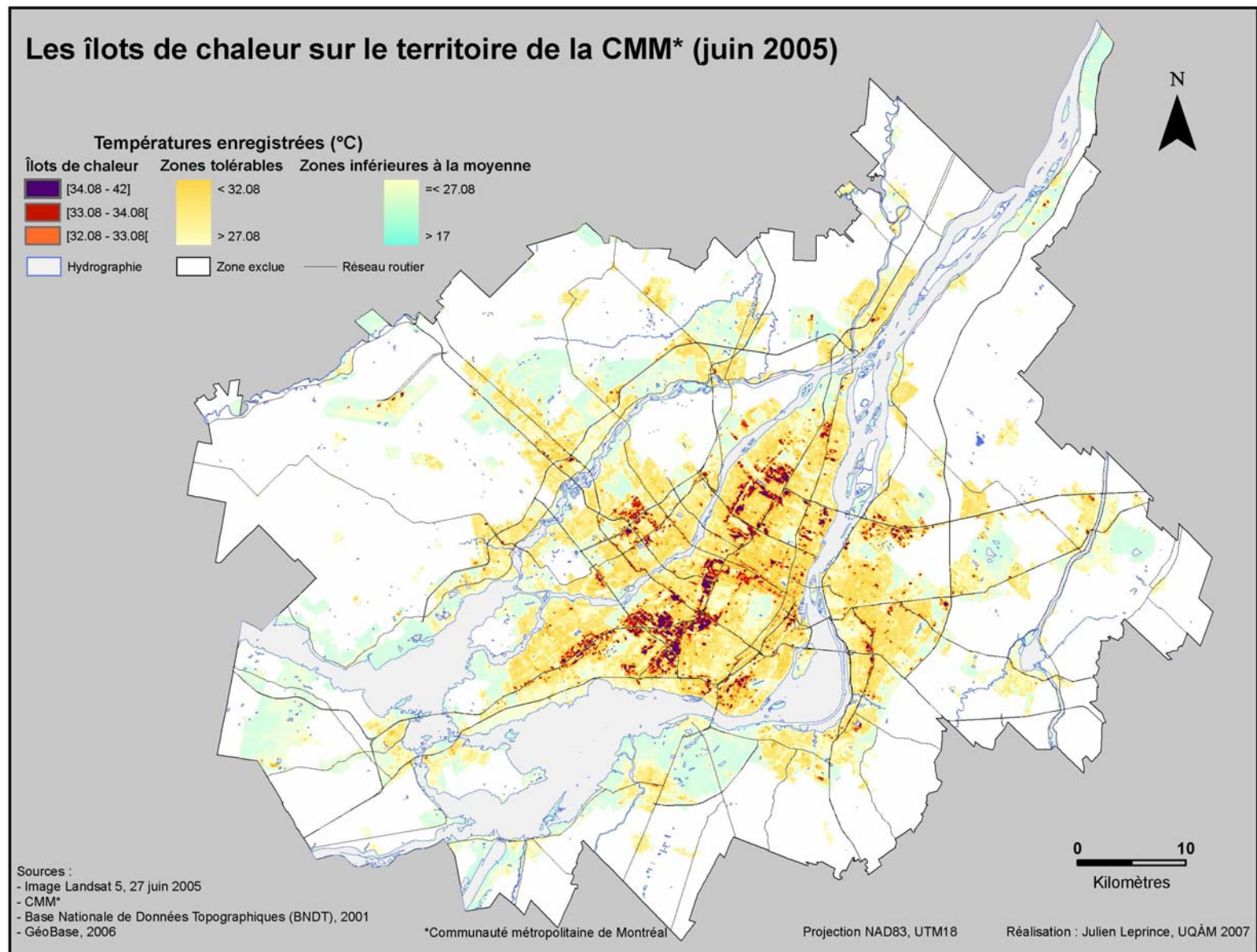


Figure 5.11 : Localisation des îlots de chaleur le 27 juin 2005.

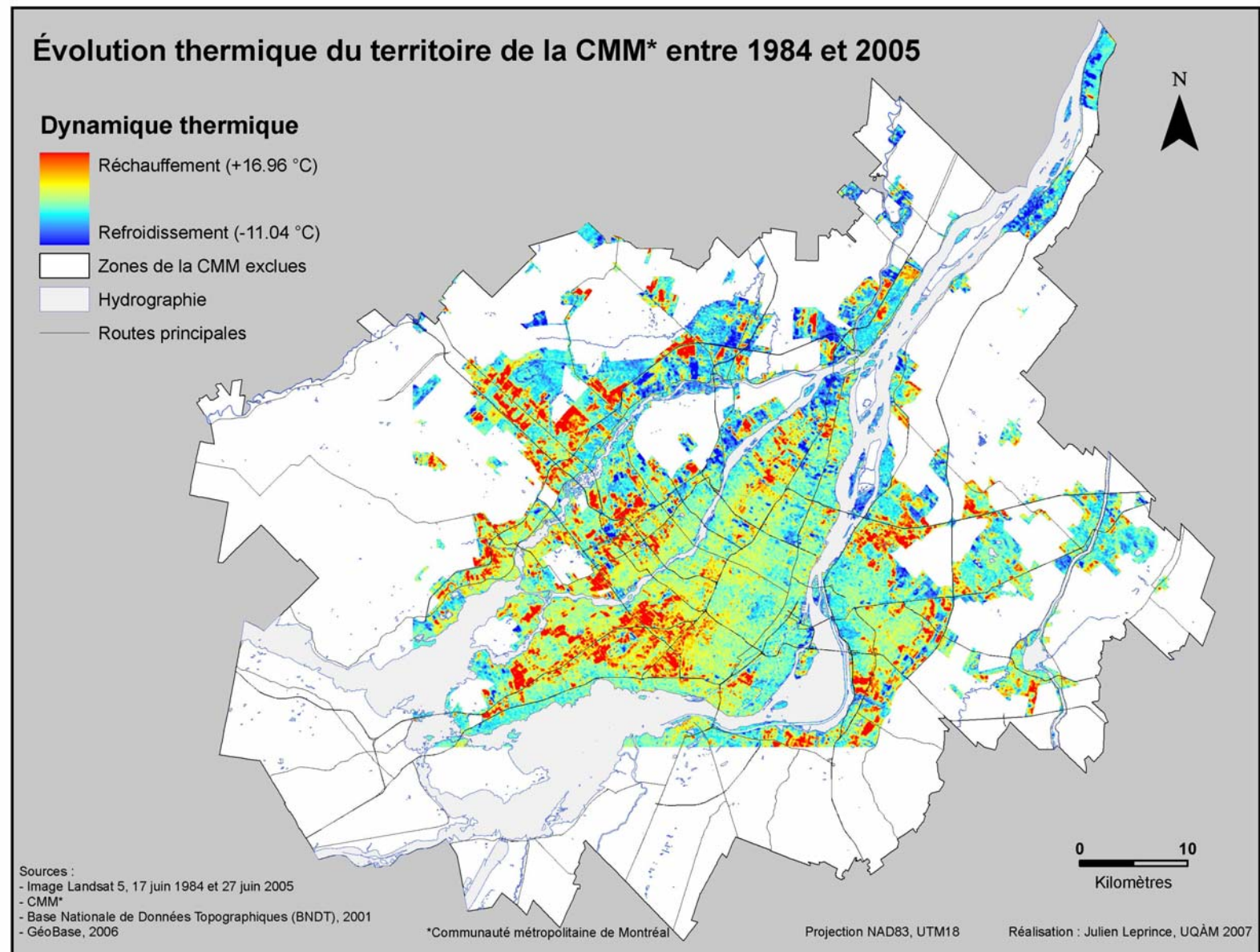


Figure 5.12 : Localisation des secteurs thermiquement modifiés entre le 17 juin 1984 et le 27 juin 2005.

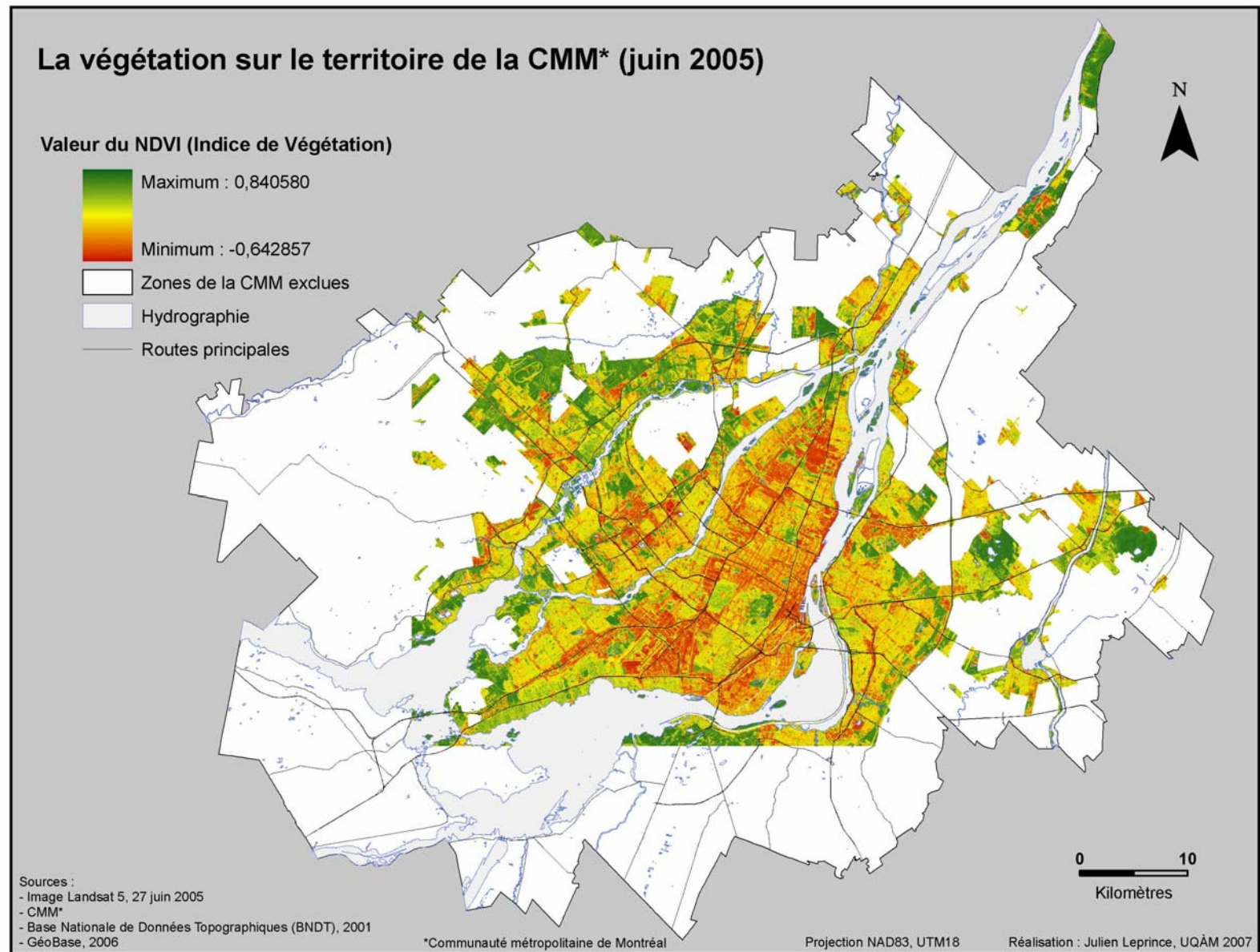


Figure 5.13 : Représentation de l'indice de végétation du 27 juin 2005.

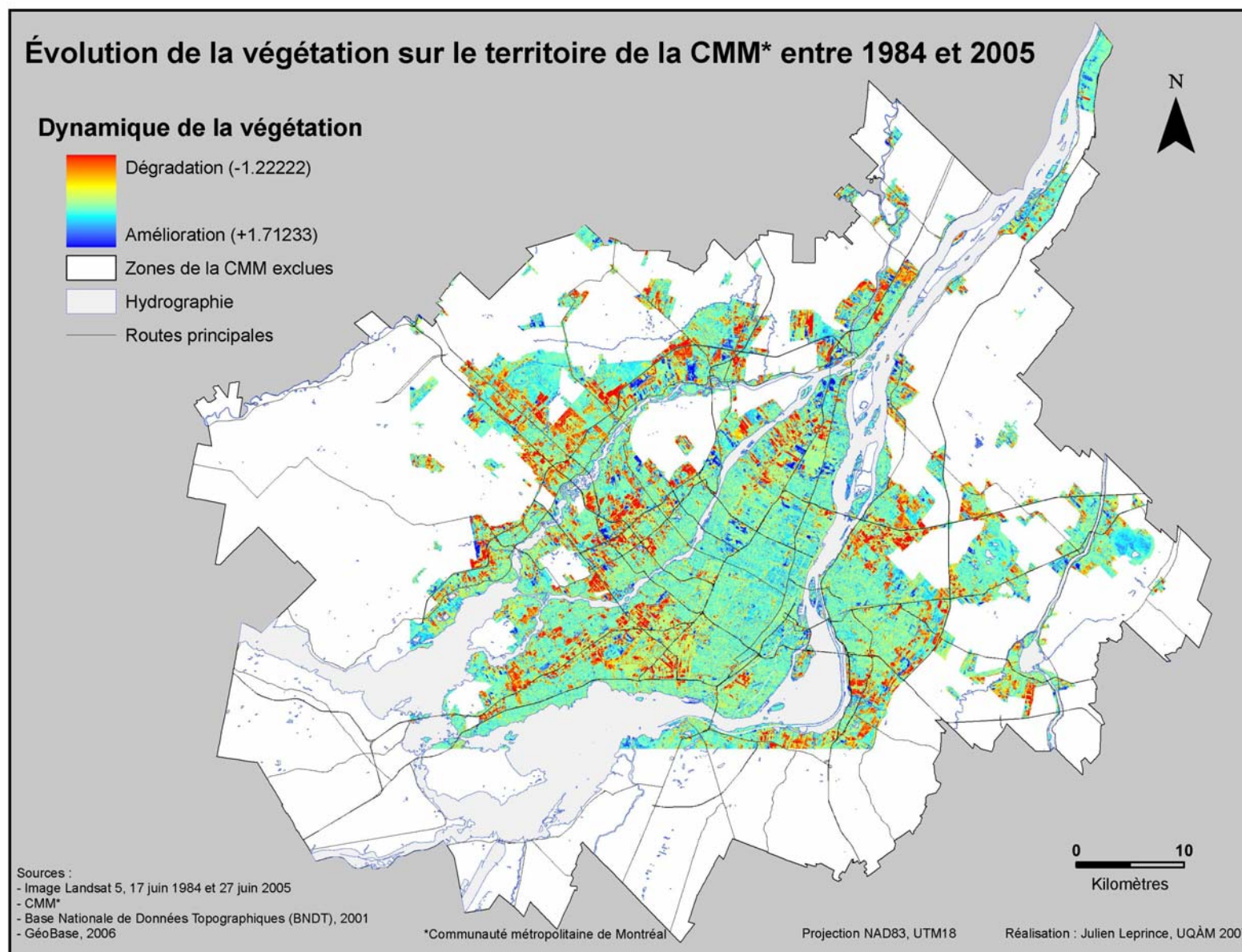


Figure 5.14 : Localisation des secteurs comportant une modification de l'indice de végétation le 17 juin 1984 et le 27 juin 2005.

5.3.2 Les îlots de chaleur

Comme mentionné au point 5.1.1 (Précisions sur quelques termes), les îlots de chaleur se distinguent de leur milieu environnant par des différences de température allant de 5 à 10°C. Dans le cas de l'image 2005 nous avons statué que les îlots de chaleur débutaient à 32 °C, soit 5°C de plus que la moyenne c.a.d. 27,08°C + 5°C (Figure 5.15). Cette valeur est légèrement plus basse que les 33°C souvent utilisés mais la légende donne le loisir de constater qu'il s'agit du début de la tranche supérieure. Au niveau des représentations cartographiques thermiques les limites s'échelonnent ainsi de 32,08°C à 42°C et sont constituées de trois classes : 32,08°C - 33,08°C (orange); 33,08°C - 34,08°C (rouge) ; 34,08 °C - 42,00 °C (mauve). Les deux autres tranches vont respectivement de 17°C à 27,08°C inférieure à la moyenne et les zones tolérables de 27,08°C à 32,08°C.

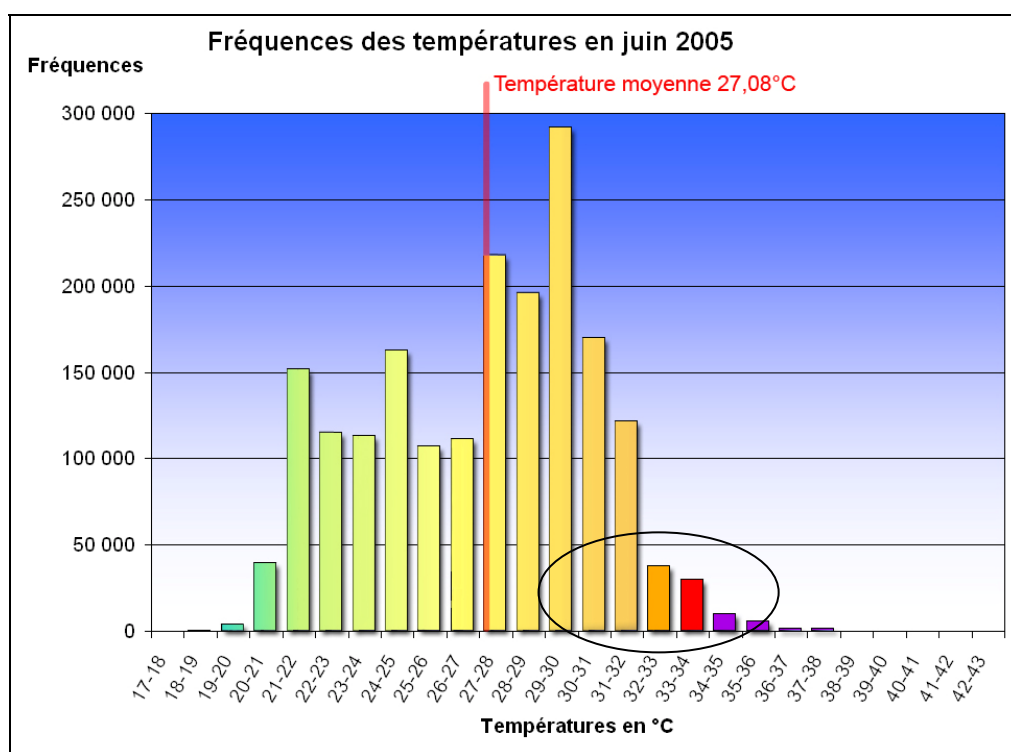
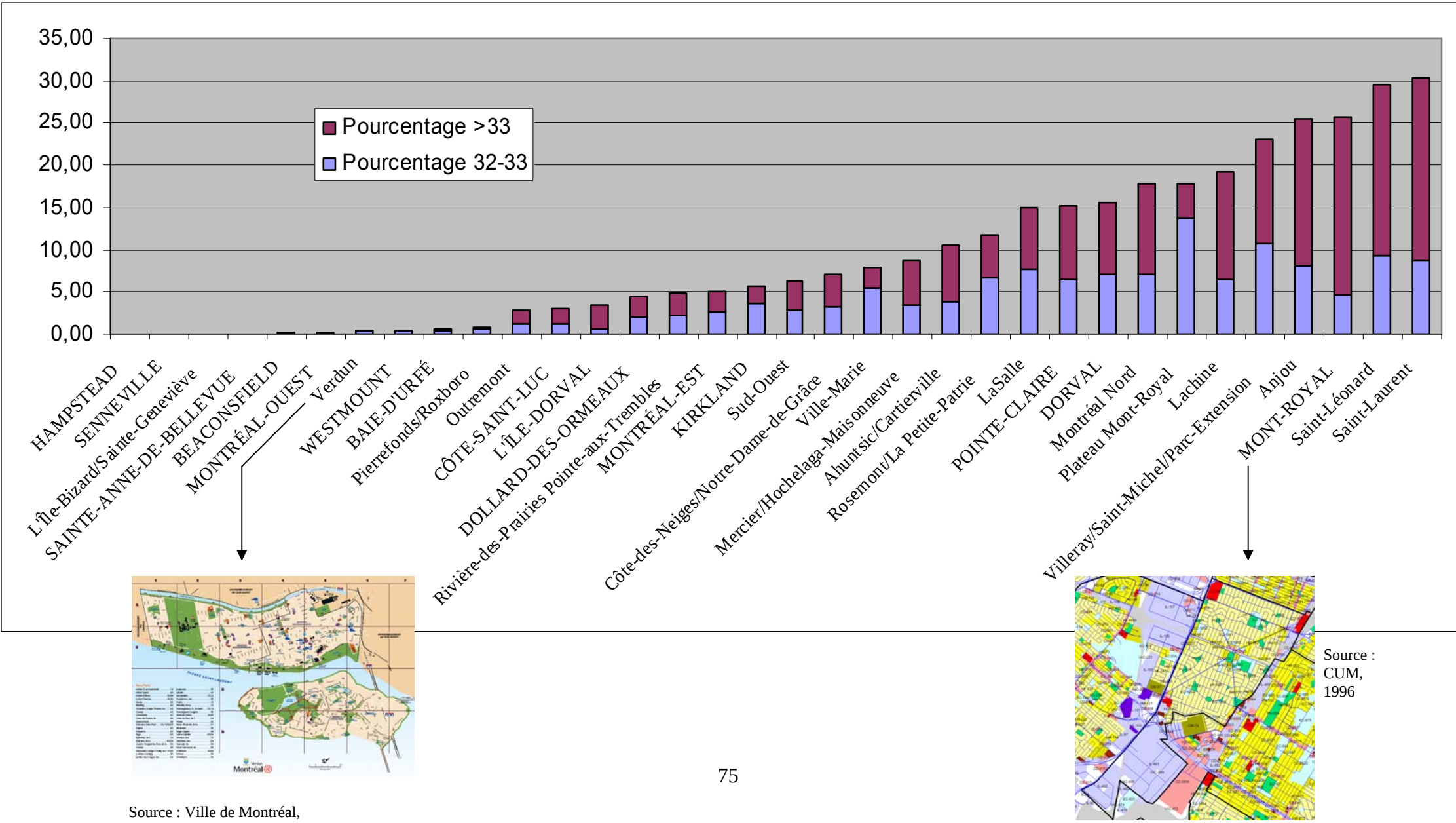


Figure 5.15 : Répartition des températures de l'image du 27 juin 2005 ainsi que les îlots de chaleur à partir de 32°C.

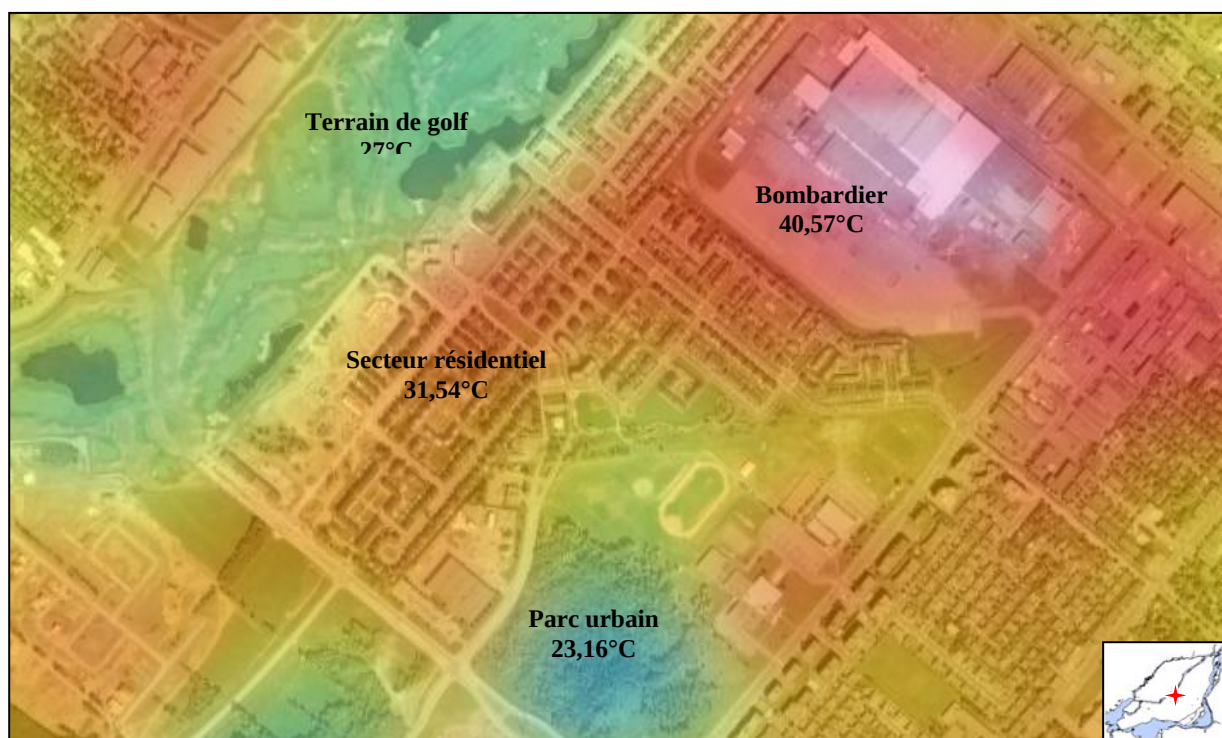
Une fois les données compilées et l'ensemble des documents cartographiques complétés nous avons confectionné un histogramme illustrant, pour les arrondissements et villes de l'agglomération de Montréal, les proportions des superficies situées entre 32°C et 33°C et au-dessus de 33°C (Figure 5.16). On constate aisément que les secteurs plus fortement minéralisés se situent à droite de cet histogramme.

Figure 5.16 : Proportion des villes et arrondissements de Montréal comportant des superficies entre 32-33°C et au-dessus de 33 °C.



En consultant les cartes régionales (Figures 5.11, 5.12, 5.13 et 5.14) ainsi que les cartes à grandes échelles (par municipalités et arrondissements des Annexes 2 et 3) ces résultats ne surprennent pas. En effet les secteurs ayant un fort taux de minéralisation et un faible indice de végétation (faible taux de végétalisation) présenteront un comportement thermique plus élevé. Par exemple l'arrondissement Saint-Laurent a connu depuis 20 ans un important développement qui se traduit par une transformation de son milieu avec des matériaux à faible albédo (grandes surfaces, stationnements, etc.). Ces changements se remarquent sur la carte d'évolution thermique 1984 vs 2005 (Figure 5.12) ainsi que sur les cartes à grandes échelles des Annexes 2 et 3 et de la Figure 5.17.

Le cas de Saint-Laurent n'est pas unique, plusieurs autres exemples tirés de municipalités ou arrondissements différents auraient été aussi convaincants. Nous pouvons penser par exemple à certains nouveaux développements résidentiels où l'on aura tardé à revégétaliser (Figures 5.18a et 5.18b). En effet on remarque depuis 20 ans que l'ouest de l'agglomération de Montréal, la rive-nord et la rive-sud ont connu une dégradation thermique (Figure 5.12) ayant son corollaire par la dégradation du couvert végétal (Figure 5.14) et par le fait même un accroissement de la minéralisation. Nous avons aussi noté d'autres projets (Figure 5.18c) où il y a eu revégétalisation dès la fin du projet et ceci a aussi été identifié par notre carte d'évolution, mais cette fois comme étant un secteur s'étant amélioré (baisse de température).



Bande thermique Landsat-5 (27 juin 2005) superposée à Google Earth, 2006 (Source : Martin P. 2007).

Figure 5.17 : Exemple d'îlots de chaleur intra-urbain dans l'arrondissement Saint-Laurent.



a) Végétalisation tardive dans un quartier vieux de plus de 10 ans (Valois à Poite-Claire) ; influence à la hausse du comportement thermique.



b) Exemple d'un développement fortement minéralisé à Laval montrant un comportement thermique élevé



c) Exemple de revégétalisation appliquée peu de temps après que le projet domiciliaire situé au nord de la 40, Montréal, soit complété; influence à la baisse du comportement thermique.

Figure 5.18 : Situation actuelle et comportement thermique

L'histogramme de la Figure 5.16 démontre aussi certaines particularités. Nous pouvons penser à Ville Mont-Royal qui est en fait composée de deux grandes unités : une première résidentielle (fraîche) et au sud-ouest une zone industrielle et commerciale; c'est ce qui explique qu'elle présente environ 25% de son territoire au-dessus de 32°C. Le cas de Verdun s'y apparente quelque peu non pas par ses fonctions mais par sa composition administrative qui jumelle deux milieux fort différents en termes de densité résidentielle.

Un 2^{ème} histogramme (Figure 5.19 et Tableau 5.4), légèrement différent, a été réalisé pour l'ensemble des municipalités de la CMM et en superposant l'indice de végétation. Ainsi nous retrouvons une courbe (en-bas) des proportions (%) des municipalités et arrondissements situés au-dessus de 32°C ainsi qu'une autre courbe (en-haut) présentant les municipalités et arrondissements situés au-dessus d'un NDVI supérieur à 0 (n.b. : -1 et l'absence de végétation, +1 présence maximale de végétation). Un coefficient de corrélation a été calculé entre ces deux variables et celui-ci est fort, soit 0,74. On remarque que plus une municipalité ou arrondissement aura une faible proportion d'indice de végétation sur son territoire, plus il sera minéralisé et plus son comportement thermique sera à la hausse. Deux curiosités ressortent de cet histogramme : Montréal-Est (à cause des nombreux réservoirs blancs) et le Centre-ville (avec l'ombrage sur les façades).

Un 3^{ème} graphique (Figure 5.20), ressemblant au précédent a été produit mais cette fois il comporte 5 courbes issues du NDVI. Donc plutôt que de schématiser tous les pixels situés entre 0 et +1 (maximum), 4 classes ont été rajoutées: 0-0,25 ; 0,25-0,50 ; 0,50-0,75 ; 0,75-1,0. Un coefficient de corrélation positif de 0,63 a été noté entre la variable des températures (au-dessus de 32°C) et la courbe du NDVI situé entre 0-0,25. Ceci laisse entendre que les secteurs thermiquement affectés connaissent peu de végétation.

Un 4^{ème} graphique (Figure 5.21) a aussi été confectionné mais cette fois en en considérant uniquement les indices de végétation situés au-dessus de +0,25. Le coefficient de corrélation est alors de -0,81. **Les municipalités et arrondissements détenant une plus faible proportion d'îlots de chaleur comportent un seuil minimal de végétation situé au-dessus d'un NDVI de +0,25.**

Figure 5.19 : Proportion des villes et arrondissements de la CMM comportant des superficies (proportions en %) au-dessus de 32°C et des NDVI au-dessus de 0.

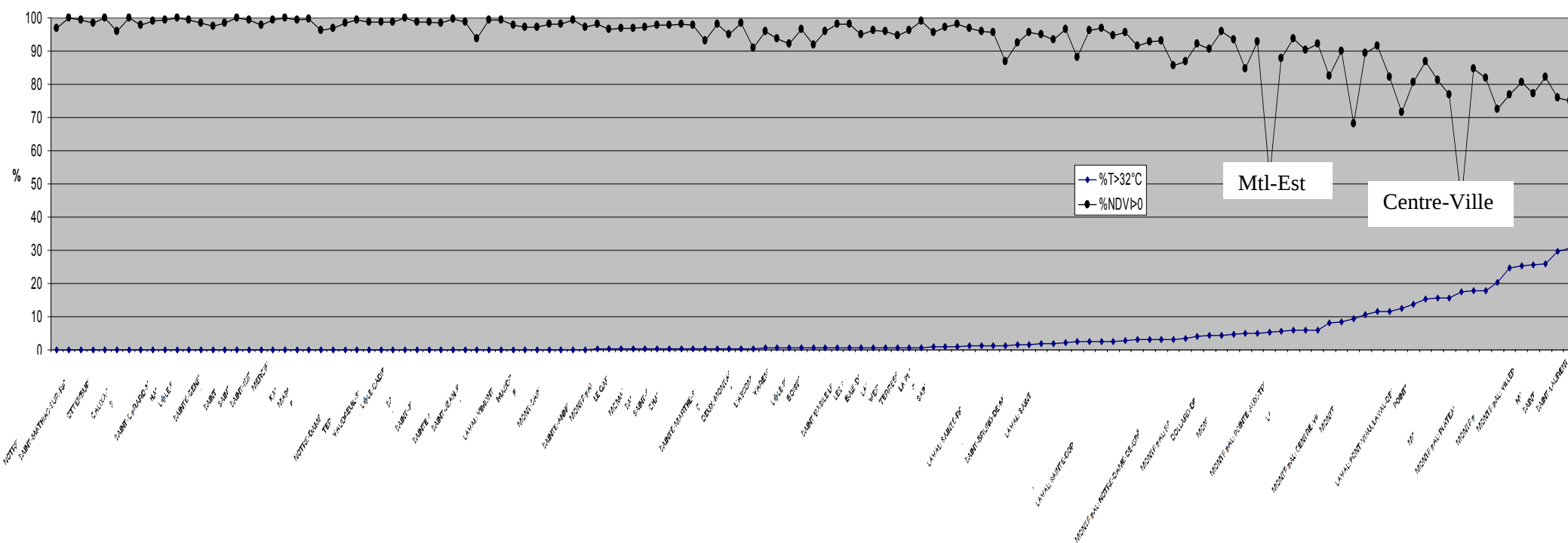


Figure 5.20 : Proportion des villes et arrondissements de la CMM comportant des superficies (proportions en %) au-dessus de 32°C et des NDVI entre 0-0,25; 0,25-0,50; 0,50-0,75; 0,75-1,0.

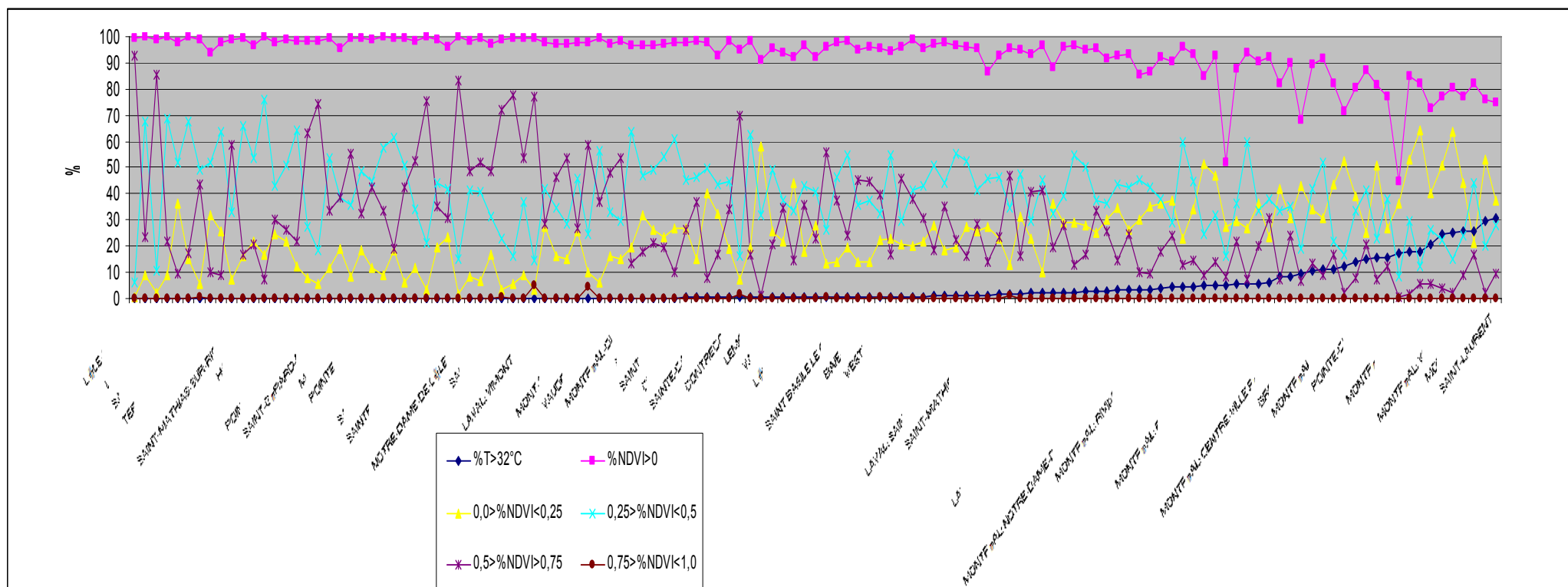
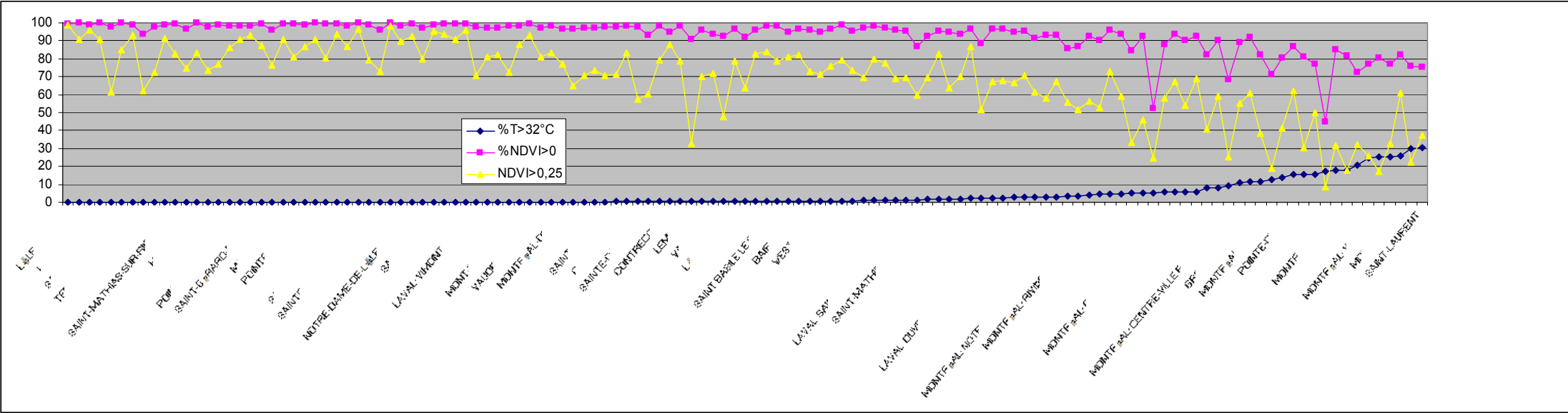


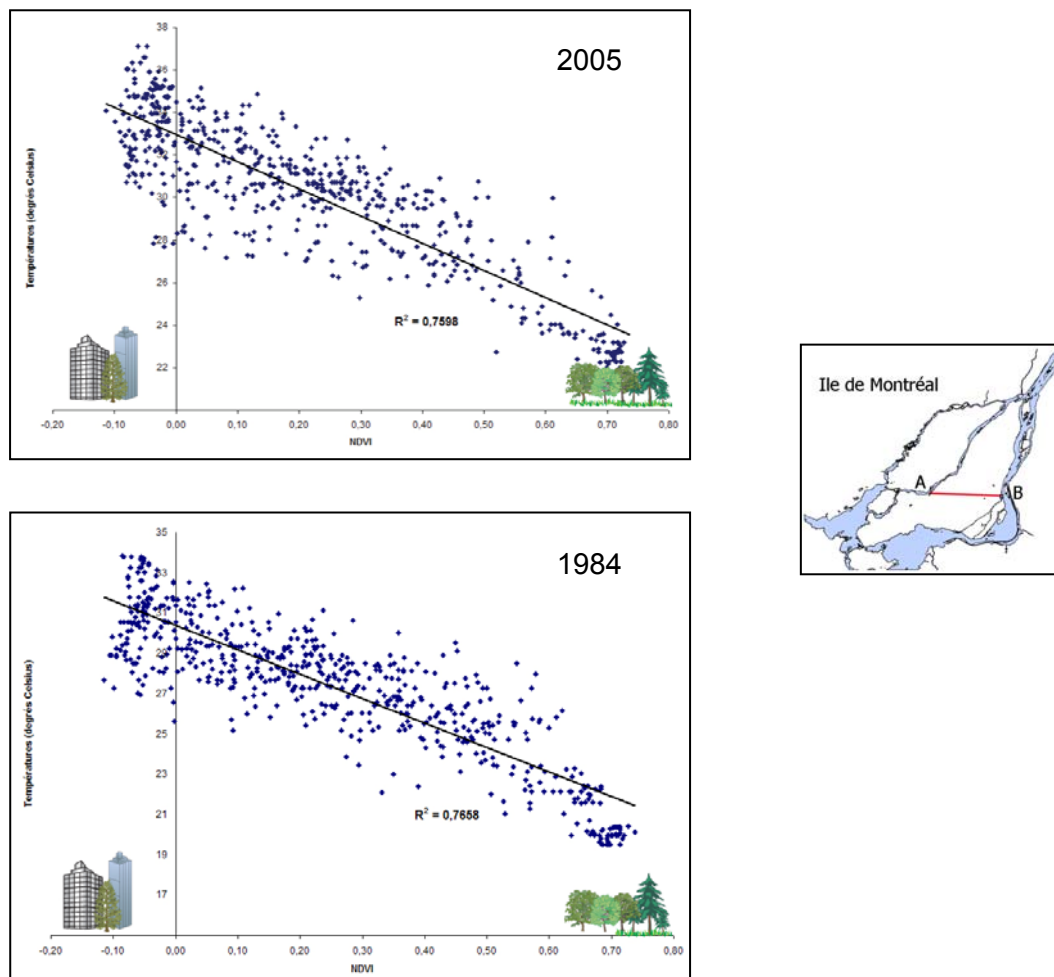
Figure 5.21 : Proportion des villes et arrondissements de la CMM comportant des superficies (en %) au-dessus de 32°C et des NDVI au-dessus 0,25.



NOM_MUN/ARRONDISSEMENTS	%T>32°C	%NDVI>0	NOM_MUN/ARRONDISSEMENTS	%T>32°C	%NDVI>0
RICHELIEU	0	96,79	BOISBRIAND	0,53	91,96
NOTRE-DAME-DU-BON-SECOURS	0	99,88	MIRABEL	0,55	95,97
SAINT-MATHIAS-SUR-RICHELIEU	0	99,42	PINCOURT	0,56	98,01
CARIGNAN	0	98,38	SAINT-BASILE LE GRAND	0,62	98,15
OTTERBURN PARK	0	99,96	LES CÈDRES	0,63	95,10
VERCHERES	0	95,80	BAIE-D'URFÉ	0,67	96,36
CALIXA-LAVALLÉE	0	100,00	LACHENAIE	0,67	95,79
SAINT-SULPICE	0	97,96	WESTMOUNT	0,70	94,60
L'ÉPIPHANIE	0	99,06	TERREBONNE	0,75	96,36
SAINT-GÉRARD-MAJELLA	0	99,24	LA PLAINE	0,75	98,92
HAMPSTEAD	0	99,90	CANDIAC	0,82	95,48
L'ÎLE-DORVAL	0	99,50	SAINTE-JULIE	0,89	97,34
SENNEVILLE	0	98,41	PIERREFONDS	0,94	98,00
SAINTE-GENEVIÈVE	0	97,55	SAINT-LAMBERT	1,17	96,90
ROXBORO	0	98,43	REPENTIGNY	1,22	95,88
SAINT-MATHIEU	0	100,00	LAVAL: SAINTE-ROSE, FABREVILLE	1,23	95,59
SAINT-PHILIPPE	0	99,50	SAINT-EUSTACHE	1,24	86,78
SAINT-ISIDORE	0	97,89	SAINT-MATHIEU-DE-BELOEIL	1,57	92,54
MERCIER	0	99,24	SAINT-BRUNO-DE-MONTARVILLE	1,64	95,59
LERY	0	100,00	BOIS-DES-FILION	1,73	94,95
KAHNAWAKE	0	99,30	LAVAL: SAINT-FRANÇOIS	2,01	93,47
MAPLE GROVE	0	99,62	ROSEMÈRE	2,30	96,55
BEAUHARNOIS	0	96,22	DELSON	2,39	88,22
MELOCHEVILLE	0	96,98	SAINT-HUBERT	2,42	96,29
POINTE-DES-CASCADES	0	98,50	BELOEIL	2,43	96,82
NOTRE-DAME-DE-L'ÎLE-PERROT	0	99,30	LAVAL: DUVERNAY, ST-VINCENT-DE-PAUL	2,63	94,78
TERRASSE-VAUDREUIL	0	98,83	LAVAL: SAINTE-DOROTHÉE, LAVAL-SUR-LE-LAC	2,83	95,63
VAUDREUIL-SUR-LE-LAC	0	98,75	LA PRAIRIE	3,00	91,65
L'ÎLE-CADIEUX	0	98,63	SAINTE-THERÈSE	3,09	92,96
HUDSON	0	99,86	OUTREMONT	3,16	93,26
SAINT-LAZARE	0	98,89	CÔTE-SAINT-LUC	3,25	85,68
POINTE-CALUMET	0	98,80	MONTREAL: NOTRE-DAME-DE-GRÂCE, MONTREAL-OUEST	3,38	86,72
SAINT-JOSEPH-DU-LAC	0	98,38	LONGUEUIL	4,14	92,28
LORRAINE	0	99,54	MONTREAL: RIVIÈRE-DES-PRAIRIES	4,38	90,49
SAINTE ANNE DES PLAINES	0	98,74	DOLLARD-DES-ORMEAUX	4,47	96,09
SAINT-JEAN-BAPTISTE	0	93,72	BROSSARD	4,62	93,42
L'ÎLE-BIZARD	0,03	99,50	MONTREAL: SUD-OUEST	4,90	84,69
OKA	0,06	99,44	MONTREAL: ROSEMONT	5,09	92,68
LAVAL: VIMONT, AUTEUIL	0,06	97,88	MONTREAL-EST	5,25	52,15
MASCOUCHE	0,06	97,29	MONTREAL: POINTE-AUX-TREMBLES	5,74	87,76
BLAINVILLE	0,10	97,27	KIRKLAND	5,78	93,75
LAVAL: OUEST	0,10	98,03	LAVAL: CHOMEDEY	5,79	90,32
MONT-SAINT-HILAIRE	0,11	98,00	BOUCHERVILLE	5,95	92,26
BEACONSFIELD	0,13	99,28	MONTREAL: MERCIER	8,14	82,40
VAUDREUIL-DORION	0,13	97,20	MONTREAL: CITE-DES-NEIGES	8,32	89,94
SAINTE-ANNE-DE-BELLEVUE	0,18	98,17	MONTREAL: CENTRE-VILLE PÉRIPHÉRIQUE	9,29	68,17
MONTREAL-OUEST	0,19	96,51	MONTREAL: AHUNTSIC	10,64	89,25
LE GARDEUR	0,20	96,75	GREENFIELD PARK	11,44	91,67
CHAMBLY	0,22	96,90	SAINT-PIERRE	11,45	82,24
MCMASTERVILLE	0,22	97,34	MONTREAL: SUD-EST	12,36	71,48
SAINT-AMABLE	0,23	97,86	LAVAL: PONT-VIAU, LAVAL-DES-RAPIDES	13,75	80,63
SAINT-CONSTANT	0,29	97,92	POINTE-CLAIRE	15,28	86,99
CHATEAUGUAY	0,31	98,11	LASALLE	15,52	81,30
CHARLEMAGNE	0,32	97,85	DORVAL	15,64	76,90
SAINTE-CATHERINE	0,33	93,00	MONTREAL: CENTRE-VILLE	17,39	44,93
SAINTE-MARTHE-SUR-LE-LAC	0,38	98,21	MONTREAL-NORD	17,82	84,80
CONTRECOEUR	0,40	94,99	MONTREAL: PLATEAU MONT-ROYAL	17,94	81,87
DEUX-MONTAGNES	0,42	98,54	LACHINE	20,42	72,40
LEMOYNE	0,46	90,80	MONTREAL: SAINT-MICHEL	24,82	76,82
L'ASSOMPTION	0,49	95,80	MONTREAL: VILLERAY	25,33	80,66
VARENNES	0,52	93,74	ANJOU	25,53	77,06
VERDUN	0,52	92,29	MONT-ROYAL	25,84	82,28
L'ÎLE-PERROT	0,53	96,63	SAINT-LÉONARD	29,73	75,79
			SAINT-LAURENT	30,59	75,07
Moyennes	Proportion des superficies ayant des Températures plus grandes que 32°C : 3,80%		Proportion des superficies comportant un NDVI plus grand que 0 : 92,97%		
Coefficient de corrélation	-0,74 entre ces deux variables				

Tableau 5.4 : Proportion des superficies des municipalités et/ou arrondissements ayant des températures de plus de 32°C et un indice de végétation de plus de 0.

Encore une fois il est aisé de démontrer l'étroite relation entre le comportement thermique et la présence de végétation (Figure 5.22). En dressant une coupe de l'Ouest à l'Est de l'île de Montréal et en comptabilisant les pixels ainsi touchés nous constatons un comportement similaire pour les deux années (1984 et 2005), soit une corrélation négative et un plus grand nombre de pixels avec des températures plus élevées en 2005.



Source : Martin et al., 2007

Figure 5.22 : Coupe à Montréal illustrant la relation entre la température et le NDVI

5.4 Recommandations

Diverses solutions s'offrent aux acteurs municipaux afin de réduire le comportement thermique tout en permettant un développement. Il faut toutefois être conscient que ces solutions ont des chances de s'appliquer réellement si ces dernières génèrent un bilan financier positif. A cet effet divers auteurs (Akbari *et al.*, 2001; Akbari et Konopacki, 2004, in Yow, 2007 ; Rosenfeld *et al.*, 1998, in Yow 2007) mentionnent qu'il y a effectivement une rentabilité aux solutions proposées. Par exemple pour le grand Toronto, en se basant sur des modifications des toits et sur la plantation d'arbres, 11 millions \$US sont économisés annuellement en frais énergétiques de climatisation; 20% de la demande énergétique états-unienne pourrait être réduite en se basant sur les surfaces froides toit froid/ pavée froide et la végétation; un gain de 500 millions \$US annuellement pour Los Angeles s'avère possible en se basant sur des modifications de la chaussée et des toits, et en plantant des arbres.

Nous allons dans un premier temps dresser une liste de solutions telles que recensées dans la littérature (tableau ici-bas de J. Leprince, 2007) et par la suite nous tenterons d'extraire les éléments les plus plausibles en fonction des précédents résultats.

Les solutions

Solutions	Caractéristiques	Auteurs
Végétation / plantation d'arbres	1. Arbres placés sur les murs orientés sud et ouest effet direct 2. Économie directe d'énergie ombre 3. Économie indirecte d'énergie évapotranspiration 4. Diminution du Smog 5. Effet pare-vent 6. Qualité de vie 7. Valeur des propriétés 8. Diminution des rejets d'eau de pluie et donc protection contre les inondations 9. Captation du CO2 photosynthèse 10. Problèmes : résistance aux conditions locales, émission de composantes organiques, favorisant le smog, racines, incendies, coûts divers plantation, entretien etc. Nécessite un choix d'espèces et une bonne planification 11. Économies d'énergie 12. Diminue émissions de carbone 13. Suppression de polluants 14. Effet rétroactif (<i>background</i>): un site aura un pouvoir rafraîchissant d'autant plus important que la température à	Akbari <i>et al.</i>, 2001 Akbari et Konopacki, 2005 Rosenberg <i>et al.</i>, 1998, in Shashua-Bar et Hoffman, 2000 Shashua-Bar et Hoffman, 2000 Soleckia <i>et al.</i>, 2005 Spronken-Smith <i>et al.</i>, 2000, in Yow, 2007 Taha, 1997 Wilby et Perry, 2006 Wong <i>et al.</i>, 2007 Yu et Hien, 2006, in Yow, 2007

	l'extérieur sera forte 15. Ombrage 16. Effet des arbres sur la rue coût minimal 17. Effet de fraîcheur sur les environs du site 18. Conseille au moins un arbre à ombrage par maison 19. Parcs urbains, en plus, améliore la qualité de l'air, favorise une certaine vie sauvage et permet un contrôle des inondations	
Toits verts	1. Résultats mitigés car : • Faible capacité thermique des substrats fins. • Substrats refroidissent très rapidement la nuit • Souvent végétation non extensive • Plantes de type pelouses 2. Aspects positifs de toits verts, si végétation extensive est choisie : • Réduction des flux de chaleur et des risques de reflets éblouissants • Les toits végétalisés tendent à avoir une température moindre • Grande variabilité d'efficacité selon les types de plantes, avec de meilleurs résultats thermiques pour une végétation extensive	Narejo, 2005, in Yow, 2007 Wilby et Perry, 2006
Toits froids « <i>cool roofs</i> » à fort albédo	1. Pas de coûts supplémentaires si planifiés précocement 2. Économie d'énergie directe et indirecte 3. Diminution du smog 4. Moins de fluctuation jour/nuit et de dilatation, d'où une meilleure durée de vie	Akbari <i>et al.</i> , 2001 Akbari et Konopacki, 2005 Grimmond, 2007 Taha, 1997 Wilby et Perry, 2006
Trottoirs froids « <i>cool pavements</i> » à fort albédo	1. Réflexion des rayons du soleil, d'où réduction de la température des surfaces et de l'air 2. Réduction de la consommation d'énergie 3. Réduction du <i>smog</i> 4. Température affecte performances de la chaussée 5. Amélioration de la visibilité, en particulier la nuit et en cas de pluie. Nécessite moins d'éclairage 6. Problèmes : reflets ; maintien de la couleur claire et désagrégation en cas de mauvaise installation	Akbari <i>et al.</i> , 2001 Akbari et Konopacki, 2005 Rosenfeld <i>et al.</i> , 1998, in Yow, 2007
Cadre bâti/ Aménagement	1. Réduction de la densité de bâtiments 2. Varier la hauteur des bâtiments 3. Espacement 4. Modification de l'orientation des rues, plus d'ombre et moins d'exposition 5. Améliorer le design des bâtiments	Grimmond, 2007 Wilby et Perry, 2006

	6. Améliorer les climatiseurs 7. Renforcer la ventilation naturelle par une hétérogénéité de taille et de densité de bâtiments 8. Albédo des voitures 9. Trottoirs poreux (<i>porous pavement</i>) 10. Isolation des toits 11. Bassin de rétention des eaux de pluie et zone humide 12. Murs verts 13. Systèmes combinés chauffage+énergie 14. Systèmes de chauffage / refroidissement à l'échelle des districts Trois solutions récurrentes : végétation + toits froids + trottoirs froids	
--	---	--

On remarque que la végétalisation représente un élément clef pour abaisser la température, mais il faut aussi réduire l'espace minéralisé et choisir d'autres sortes de matériaux pour les artères ainsi que pour les toitures. Concrètement ces solutions s'articulent autour de :

1. la plantation de végétaux :

- végétaliser les espaces dénudés,
- végétaliser les grands espaces (stationnements) moins timidement qu'en ce moment (Figure 5.23a),
- procéder à la plantation dès la fin d'un projet domiciliaire et non pas 10 ou 15 ans après (Figure 5.18c), la réglementation devrait être plus contraignante à cet effet,
- les toits verts s'avèrent intéressants mais pour les constructions résidentielles existantes la solution est onéreuse, ceci s'adresserait peut-être plus aux bâtiments publics (ex. : SAQ, HEC, McGill, hôtel de ville, etc.) et/ou aux nouveaux bâtiments,
- végétaliser les façades (Figure 5.23b) car celles-ci représentent de grandes superficies comparativement aux toitures ;

2. la réduction des espaces minéralisés :

- réduire la largeur des artères,
- utiliser des matériaux perméables pour les stationnements et les entrées de garage (Figure 5.23c);

3. la révision de l'usage de certains matériaux et par leur remplacement:

- modifier la couleur des matériaux de surface (plus réfléchissant, Figure 5.23d),
- éviter les toitures goudronnées foncées,
- utiliser des matériaux de pavage ayant un albédo plus élevé.

Ces diverses solutions s'avèrent intéressantes mais devront aussi s'accompagner d'une modification dans nos pratiques de développement et d'aménagement : revoir la disposition des bâtisses, la dimension des lots, l'importance accordée aux artères (largeur), les délais de revégétalisation une fois un projet complété, le code du bâtiment, etc. De plus, les différents professionnels impliqués auront à s'inspirer de travaux réalisés dans d'autres pays afin d'adapter ces techniques au contexte québécois.

Aussi, il serait souhaitable qu'une étude approfondie du comportement des matériaux de surface soit réalisée en exploitant l'imagerie aéroportée thermique (à haute résolution) dans le but de mieux en connaître les propriétés thermiques et éventuellement quantifier le gain économique potentiel de l'apport des végétaux ainsi que des matériaux de surface.



a) Espace « *timidement* » végétalisé, sans grand effet de refroidissement, dans le stationnement d'un centre d'achat.



b) Végétalisation de façade à Fukuoka au Japon. (Source : www.metropolismag.com)



c) Utilisation d'un pavé perméable (Source : <http://www.inhabitat.com>)



d) Utilisation d'une couleur réfléchissante (albédo aux alentours de 0,9) (Source : <http://www.arizonafoam.com>)

Figure 5.23 : Divers solutions concrètes pour contrôler le comportement thermique

6. Études de cas

6.1 Développement commercial (Repentigny)

Les secteurs commerciaux, tels que représentés dans l'exemple ci-joint par les *Galerias Rives Nord* à Repentigny démontrent bien leur contribution à la présence d'îlots de chaleur. L'absence de végétation et les matériaux de surface concourent directement à cette situation.



Localisation des Galerias Rives Nord à Repentigny (Source : Google Earth).



Carte des îlots de chaleur. La température en mauve oscille entre 38 °C et 42 °C (2005).



Carte de l'indice de végétation. La température orangée-rouge indique un indice de végétation de -064, soit très peu sinon pas du tout de végétation (2005).

Figure 6.1 : Cas d'un centre commercial avec une forte minéralisation

6.2 Développement industriel (arrondissement Saint-Laurent).

Les secteurs industriels, eux-aussi fortement minéralisés, affectent le comportement thermique environnant. Par exemple, l'usine Bombardier située à l'arrondissement Saint-Laurent, est composée d'un espace de stationnement et de matériaux à faible albédo avec

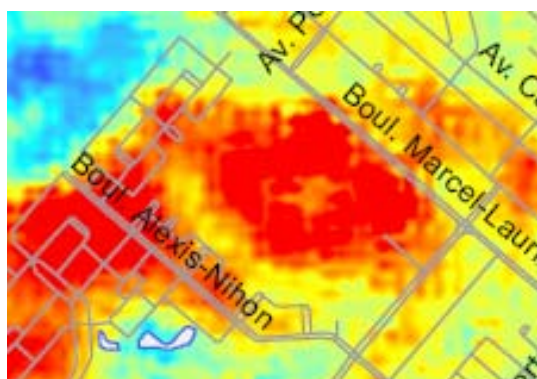
l'absence de végétation. Ceci constitue le milieu idéal pour la formation d'îlots de chaleur. On remarque de plus que ceci affecte le secteur résidentiel situé à proximité. Des zones tampons à proximité auraient été souhaitables.



Localisation de l'usine Bombardier à l'arrondissement Saint-Laurent (2005). (Source : Google Earth drapée de l'image thermique).



Carte des îlots de chaleur. La température en mauve oscille entre 38 °C et 42°C (2005).



Carte des indices de végétation. La température orangée-rouge indique un NDVI de -064, montrant l'absence de végétation (2005).

Figure 6.2 : Cas d'une industrie avec une forte minéralisation

6.3 Développement résidentiel (Longueuil)

Le secteur résidentiel de Longueuil montré à la Figure 6.3 (encadré en rouge) est venu modifier le comportement thermique du milieu. On y remarque qu'il y a eu augmentation de la température (Figure 6.4a), elle est par contre située dans la zone tolérable (Figure 6.4b). L'indice de végétation est faible (Figure 6.4c) ce qui démontre qu'il y a peu de végétation où que celle-ci est relativement récente. L'évolution de l'indice de végétation (Figure 6.4d) laisse entendre que le secteur situé un peu plus au sud c'est moins dégradé même si son indice de végétation est plus faible et qu'il accuse une température qui semble légèrement plus élevée.

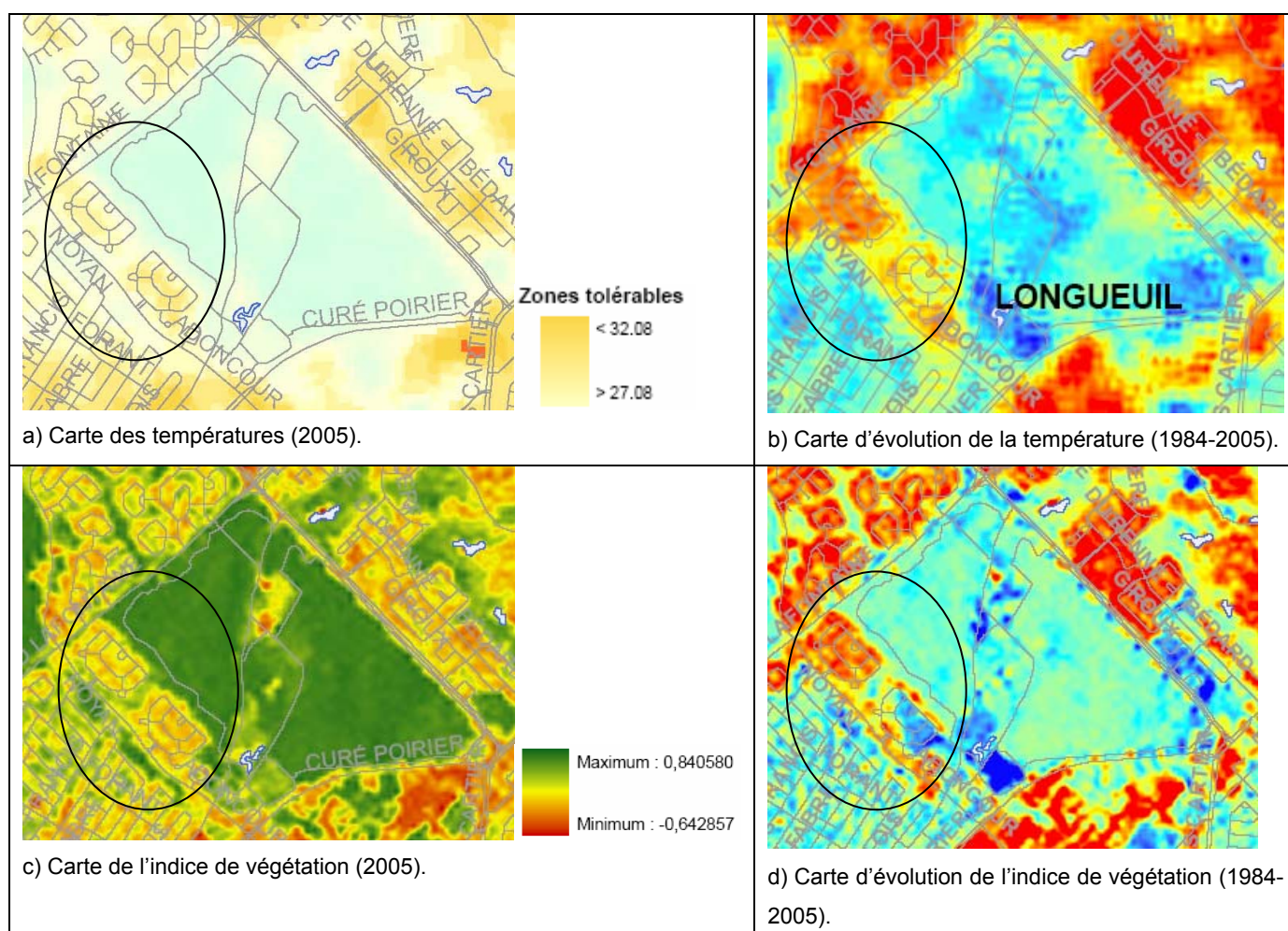


Figure 6.4 : Effets du nouveau développement résidentiel (figure 6.3) sur le comportement thermique du milieu

6.4 Développement d'un terrain de golf (arrondissement Saint-Laurent)

On remarque dans la figure 6.5 qu'un terrain de golf offre un comportement thermique passablement plus frais que son milieu environnant. Ceci contribue à la baisse et amenuise sans aucun doute l'effet de l'usine Bombardier située à l'est (droite).

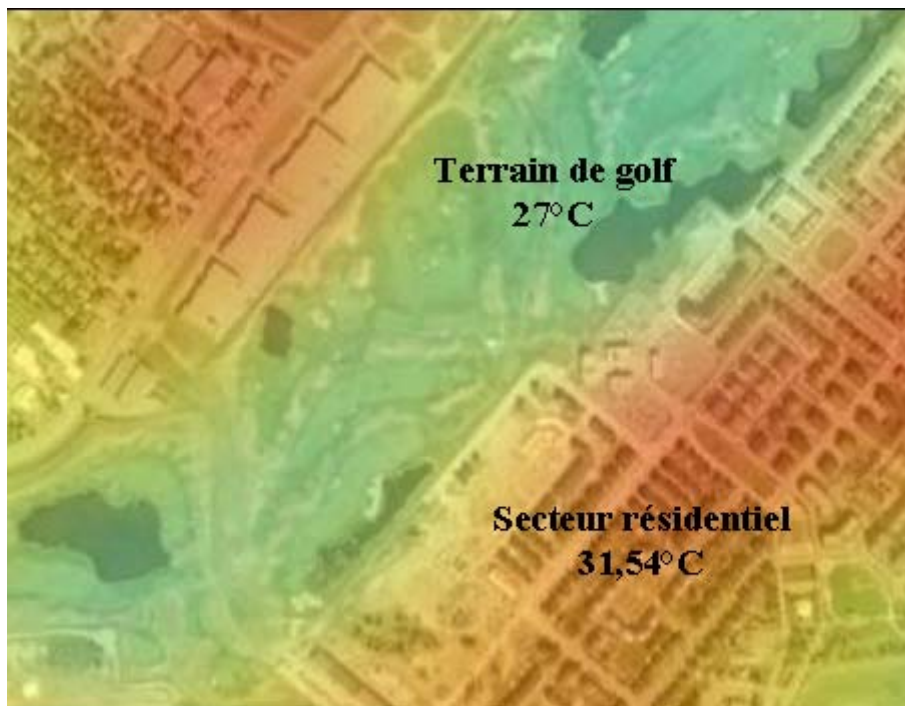


Figure 6.5 : Secteur de l'arrondissement Saint-Laurent situé à proximité de l'usine Bombardier (2005).

6.5 À la recherche d'une meilleure précision des températures estimées par les données Landsat

Le but de cette étude de cas est de montrer que pour exploiter pleinement le potentiel des images thermiques de Landsat nous devons avoir des connaissances additionnelles, tout particulièrement, sur l'état de l'atmosphère lors de l'acquisition de données et sur le comportement thermique des matériaux de surface. Dans cette étude de cas nous avons utilisé trois images ETM+ de Landsat-7 (60 m de résolution spatiale) acquises en été 2001 afin d'illustrer le potentiel des ces images pour suivre les variations des températures pendant la saison estivale pourvu qu'on les traite avec des données provenant d'autres sources. Nous avons également utilisé une image TM Landsat (120 m de résolution spatiale) acquise en été 2003 à des fins de comparaison.

Tel que mentionné dans la section 5 les températures utilisées pour localiser les îlots potentiels de chaleur sont des températures apparentes. Bien qu'elles soient suffisantes pour dresser un portrait général de la situation actuelle et de l'évolution de l'environnement thermique de la CMM, leurs valeurs absolues doivent être interprétées avec une certaine réserve. En effet ces températures apparentes peuvent être plus élevées ou plus faibles qu'elles le sont en réalité à cause des effets atmosphériques et de l'émissivité des matériaux de surface. L'atmosphère tend à niveler les luminances mesurées par satellite. Cette perte de contraste se reflète sur les températures apparentes des objets, particulièrement de ceux qui occupent les extrémités de l'échelle de mesure de températures. Ainsi, les objets froids apparaîtront plus chauds qu'ils le sont en réalité tandis que le contraire arrivera avec les objets chauds. Pour sa part l'émissivité décrit en quelque sorte la capacité d'un objet de « traduire » sa température interne en rayonnement, ce qui est en fin de compte mesuré par télédétection. Un objet avec une émissivité proche de l'unité traduit presque parfaitement sa température en rayonnement (corps noir). C'est le cas de l'eau ou de la végétation verte par exemple (Tableau 6.1). Plus l'émissivité s'éloigne de l'unité et tend vers zéro plus l'objet apparaîtra plus froid qu'il l'est en réalité. C'est le cas des toitures en tôle ondulée par exemple (Tableau 6.1). La figure 6.6 montre un exemple patent de l'effet de l'émissivité sur les températures apparentes des objets. Sur la photo aérienne, le revêtement de la toiture du bâtiment avec des matériaux différents est évident. Nous apercevons que la portion de la toiture d'une couleur gris clair apparaît sur la thermographie ETM+ beaucoup plus froide que la portion brun clair de la toiture. Tel qu'indiqué sur cette figure un écart des températures apparentes de l'ordre de 30°C pour le même bâtiment n'est pas explicable que si l'émissivité des matériaux serait très différente, la portion gris clair ayant l'émissivité la plus faible.

Matériaux de surface	Émissivité
Asphalte et goudron (revêtement de chaussée)	0,93-0,97
Bardeaux d'asphalte (toitures)	0,96-0,97
Ciment	0,71-0,90
Gravier	0,92
Aluminium	0,05
Tôle ondulée	0,13-0,28
Acier galvanisé	0,96
Acier galvanisé oxydé	0,80
Cuivre	0,96
Arbres, arbustes et herbage (verts)	0,97-0,99
Herbage sec	0,93
Milieux humides	0,95-0,99
Sol à nu	0,92
Eau claire	0,98
Eau turbide	0,96

Tableau 6.1: Émissivités de surface (compilation de plusieurs publications)

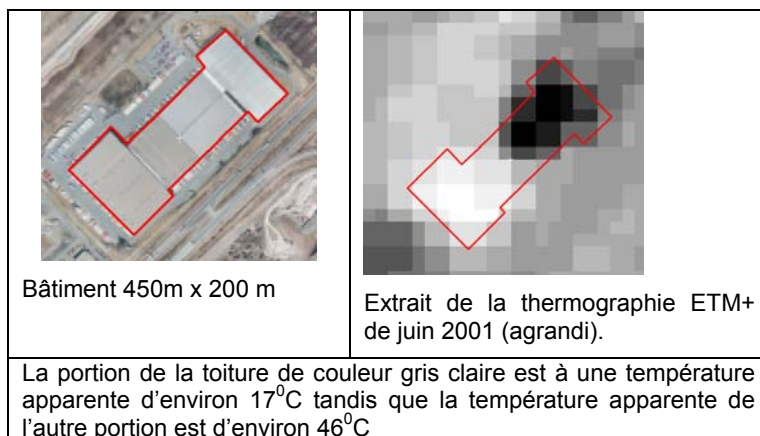


Figure 6.6 : Effets de l'émissivité sur les températures apparentes.

Pour tenir compte des effets atmosphériques et de l'émissivité, la luminance calculée au niveau du satellite, avant de la traduire en température, doit être réduite à la luminance au sol selon l'approche donnée au tableau 6.2. Malheureusement, dans la majorité des cas, ni les effets atmosphériques lors de l'acquisition des données ni l'émissivité des matériaux de surface sont connues. Pour les effets atmosphériques nous pouvons quand même avoir recours à des modèles qui évaluent d'une façon plus ou moins approximative ces effets. Particulièrement pour les images de Landsat-5 et de Landsat-7 acquises après mars 2000, la NASA met à la disposition des utilisateurs sa calculatrice des effets atmosphériques accessible par internet (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>). Cette calculatrice (Barsi *et al.*, 2003b) fait appel au code atmosphérique MODTRAN et à des profils verticaux de température, pression, et vapeur d'eau à l'échelle planétaire tels que modélisés par le National Centers for Environmental Prediction aux Etats-Unis. Ces profils sont utilisés pour estimer les conditions locales de l'atmosphère au moment du passage du satellite. Il est aussi possible d'introduire des mesures effectuées à une station météorologique locale pour mieux évaluer les paramètres recherchés.

$$L_{sat} = \tau \cdot \varepsilon \cdot L_s [T_s] + \tau \cdot \rho \cdot L_{\downarrow} + L_{\uparrow}$$

où

L_s = La luminance propre à l'émission de la surface, considérée un corps noir à une température cinétique T_s qui est la température recherchée,

τ = La transmittance atmosphérique

$L_{\uparrow}$ = La luminance due à l'émission atmosphérique perçue par le capteur.

$L_{\downarrow}$ = La luminance du ciel dirigée vers la surface visée par le capteur,

ε = L'émissivité de surface dans la bande thermique de Landsat

ρ = La réflectivité de surface dans la bande thermique de Landsat

Le plus souvent nous considérons que réflectivité et émissivité sont liées par l'équation suivante : $\varepsilon = 1 - \rho$.

Tableau 6.2 : Calcul de la luminance au sol (bande thermique)

Dans cette étude de cas nous nous sommes servis de cette calculatrice en introduisant les données météorologiques de la station de l'aéroport Trudeau saisies à une heure proche du passage du satellite. Les données météo ainsi que les valeurs estimées par la calculatrice de la NASA pour les images utilisées sont présentées dans le tableau suivant.

Station météorologique : Aéroport P.E. Trudeau (45°28'N, 73°44'O), Altitude: 35,70 m				
Date	08/06/2001	26/07/2001	11/08/2001	15/07/2003
Température de l'air (C)	20,9	19,0	23,6	26,6
Pression atmosphérique (mb)	1006,1	1015,1	1016,4	1013,5
Humidité relative (%)	44	43	43	46
Résultats de la calculatrice de la NASA (voir texte)				
Transmittance atmosphérique	0,86	0,87	0,84	0,74
Luminance de parcours (W/m ² /sr/μm)	1,02	0,95	1,26	2,04
Luminance du ciel (W/m ² /sr/μm)	1,71	1,60	2,09	3,29

Tableau 6.3 : Données météorologiques et résultats de la calculatrice de la NASA.

Les données des thermographies Landsat utilisées dans cette recherche sont des luminances étalonnées en 8 bits (256 valeurs numériques possibles). La luminance exprime la densité de flux du rayonnement électromagnétique (Watt/m^2) provenant des objets par unité de longueur d'onde (micromètre) et par angle solide d'observation (stéradian) mesurée par le capteur. La transformation des valeurs numériques, Q_{etal} , en luminances au niveau du satellite ou luminances apparentes, L_{sat} , se fait par l'équation suivante :

$$L_{sat} = G * Q_{etal} + B \quad (1)$$

où G est le gain et B le biais (étalonnage). Le tableau ci-dessous montre les coefficients d'étalonnage G et B habituellement employés pour les capteurs TM de Landsat-5 et ETM+ de Landsat-7. Il est à noter que le capteur ETM+ produit deux images thermiques dites bandes 6H (high gain) et 6L (low gain). La première sature à une température de surface de 49 C (322 K) et la seconde, à une température de surface de 64,5 C (347,5 K). Puisque dans un environnement urbain une plus grande sensibilité aux hautes températures est de mise, la bande 6L est préférable.

Bande	G (W/m ² /sr/μm/Q _{étal})	B (W/m ² /sr/μm)	Source
TM	0,0551584	1,2378	
ETM+6L*	0,0668224	0,0000	Landsat 7 Science Handbook: http://tpwww.gsfc.nasa.gov/las/handbook/handbook.htmls/chapter11/chapter11.htm
ETM+6H*	0,0370588	3,2000	
*Pour les images traitées avant le 1 décembre 2000, il faut soustraire des valeurs de luminance calculées avec ces coefficients d'étalonnage la valeur 0,31 W/m ² /sr/μm			

La luminance apparente peut être transformée en température apparente des objets visés (en degrés Kelvin) en appliquant l'équation suivante, une approximation de la loi de Planck pour la bande d'opération des capteurs TM ou ETM+ :

$$T(K) = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_{sat}} + 1\right)} \quad (2)$$

Les constantes k_2 et k_1 sont données ici.

Bande	k_1	k_2
TM6	607,76	1260,56
ETM+6	666,09	1282,71

Tableau 6.4 : Transformations des valeurs numériques des images thermiques de Landsat en températures apparentes des objets visés par le capteur

Une fois les valeurs numériques transformées en luminances apparentes (Tableau 6.4), nous avons utilisé les valeurs des paramètres atmosphériques ainsi qu'une émissivité constante de 0,95 pour évaluer les températures au sol. Cette émissivité peut être considérée comme une valeur moyenne des émissivités de la plupart des matériaux de surface. Les différences entre les températures au sol et les températures apparentes, en excluant les zones couvertes de nuages, sont montrées au tableau 6.5 (échantillon de 10 000 pixels). Nous constatons que pour les objets présents dans le territoire de la CMM pendant l'été, les températures apparentes sous-estiment de 5°C à 7°C en moyenne les températures de surface. En d'autres mots les températures de surface montrées dans la section 5 et les études de cas sont plus élevées en réalité.

Image	Minimum	Moyenne	Maximum
Juin 2001	2,4	5,7	9,2
Juillet 2001	1,4	5,3	7,5
Août 2001	3,1	5,5	8,5
Juillet 2003	2,7	7,2	11,7

Tableau 6.5 : Différences entre températures apparentes et températures au sol.

Les figures suivantes montrent les variations des températures durant l'été 2001 dans deux secteurs de la CMM : le secteur le plus densément bâti (Laval-Longueuil-Montréal) et un secteur dominé par des terres agricoles (couronne nord). Dans toutes ces figures les objets avec des températures plus faibles que 15° C représentent soit des nuages ou des toitures d'édifices à faible émissivité. Particulièrement dans l'image de juillet 2001 en milieu rural (Figure 6.8) les tâches bleuâtres représentent des nuages translucides du type cirrus. Dans le premier secteur les endroits possédant une couverture arborescente importante (ex. Mont-Royal, divers parcs) sont à des températures proches à celle de l'air. Cette tendance a été observée dans d'autres territoires et du moins pour les conifères ce phénomène est expliqué par la façon dont les aiguilles régularisent leurs températures (Lundén, 1987). En prenant la température des zones boisées comme base nous constatons que les températures des autres types d'occupation du sol par date suivent à peu près le même pattern d'augmentation progressive des températures de surface en raison inverse de l'abondance du couvert arborescent et du couvert végétal en général. Le deuxième secteur présente des patterns de température beaucoup plus complexes, résultats de la variation dans le temps du couvert végétal. Au début de la croissance des cultures (juin) les températures de surface sont similaires à celles des milieux urbanisés. En pleine croissance (juillet) et dans le stade de maturité (août) les températures des surfaces en culture suivent le comportement des surfaces végétalisées (toujours en relation avec la température de l'air). Le tableau suivant montre les variations des valeurs des quelques occupations du sol afin de mieux illustrer nos propos. Nous avons ajouté l'image TM de Landsat-5 acquise en 2003 pour montrer qu'avec les ajustements des températures pour les effets atmosphériques nous arrivons à des résultats similaires même si le capteur TM est différent du capteur ETM+. Nous pouvons noter eu regard à ce tableau :

- 1) Le comportement des bois avec des températures très proches de celle de l'air observée à la station météorologique peu importe la date d'acquisition, à l'exception peut-être de l'image de juin 2001;
- 2) L'augmentation progressive des températures de surface en raison inverse de l'abondance du couvert arborescent;
- 3) Les variations saisonnières des températures de surface à dominance agricole. Compte tenu du fait que la superficie des terres agricoles dans la CMM est très importante, leur impact sur l'environnement thermique et le climat en général de la CMM n'est pas à négliger. C'est une question qui doit être abordée dans l'avenir.

Occupation du sol	Minimum	Moyenne	Maximum
Bois (500 pixels)			
Juin 2001	24,5	25,6	28,7
Juillet 2001	18,7	19,8	22,5
Août 2001	20,5	23,0	25,6
Juillet 2003	24,3	25,7	27,9
Résidentiel avec forte proportion de couvert arborescent (1000 pixels)			
Juin 2001	28,1	32,8	36,8
Juillet 2001	26,2	30,1	33,7
Août 2001	29,3	32,4	35,8
Juillet 2003	32,5	35,4	39,3
Résidentiel avec faible proportion de couvert arborescent (1000 pixels)			
Juin 2001	34,5	38,8	41,0
Juillet 2001	32,0	34,2	36,5
Août 2001	34,2	36,7	39,7
Juillet 2003	37,6	40,5	42,5
Industriel (100 pixels)			
Juin 2001	26,9	39,4	58,0
Juillet 2001	27,4	37,2	45,6
Août 2001	30,5	39,3	50,0
Juillet 2003	28,5	41,1	50,3
Centre commercial (100 pixels)			
Juin 2001	39,7	42,9	50,1
Juillet 2001	36,5	38,9	41,4
Août 2001	38,0	42,2	44,8
Juillet 2003	40,9	45,2	49,8
Agriculture (1000 pixels)			
Juin 2001	23,2	33,4	42,2
Juillet 2001	21,9	25,1	32,6
Août 2001	25,6	30,0	36,9
Juillet 2003	27,3	30,5	34,3

Tableau 6.6 : Températures de différentes occupations du sol.

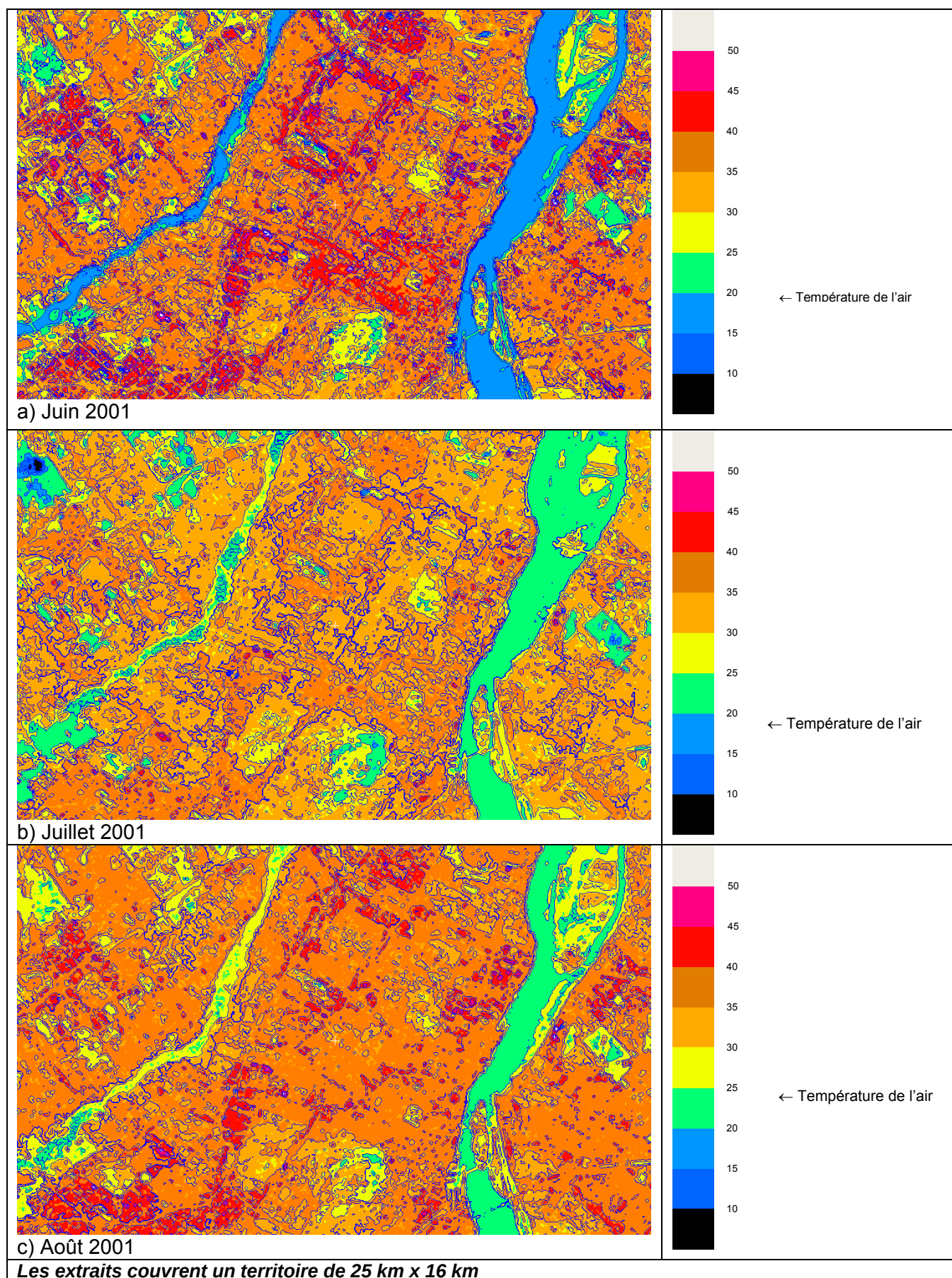


Figure 6.7 : Variation saisonnière de la température en 2001 : milieux urbanisés

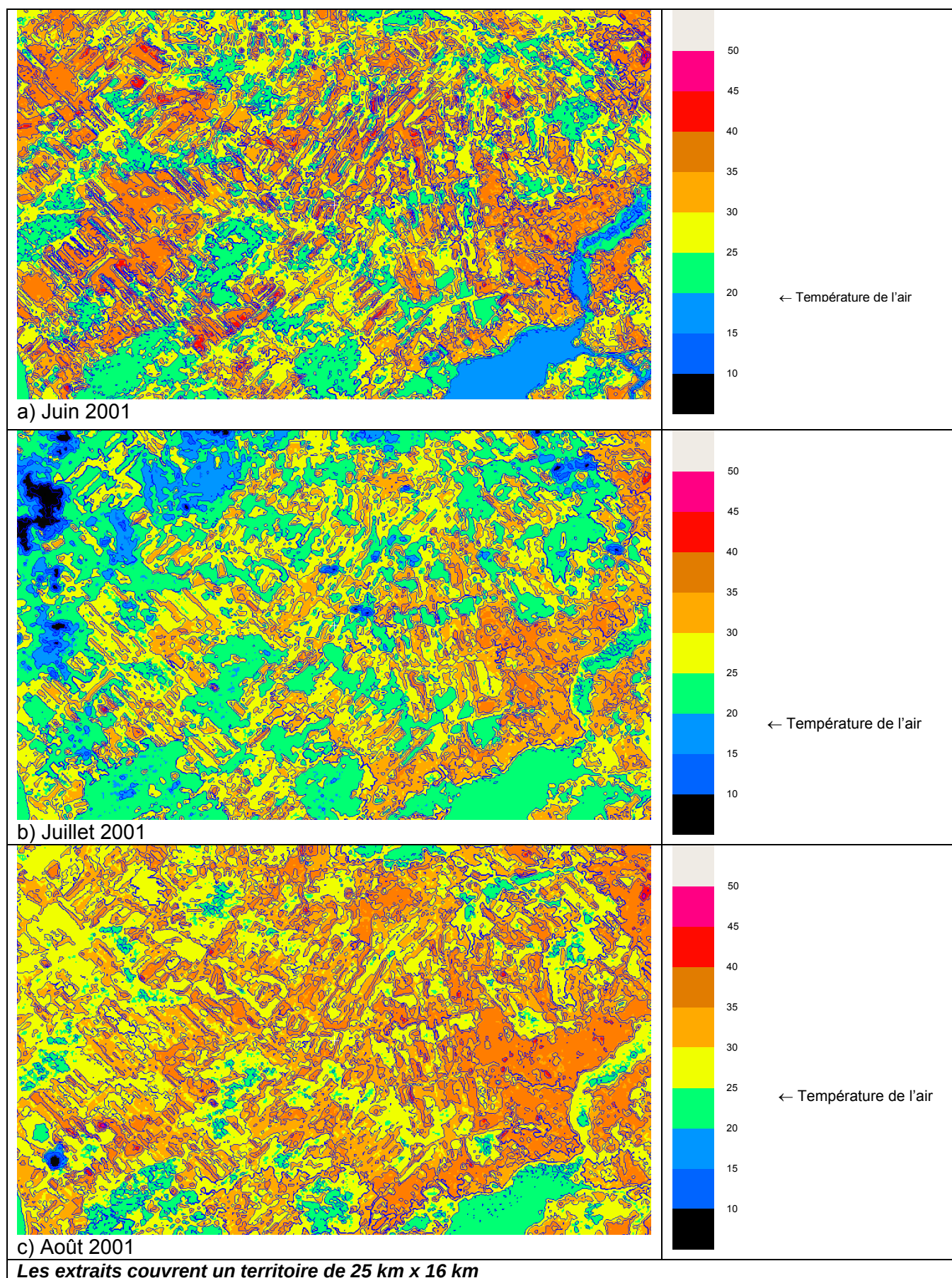


Figure 6.8 : Variation saisonnière de la température en 2001 : milieux ruraux

Références

- Akbari H., Konopacki S., 2005, Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies, *Energy Policy*, 33(6): 721-756.
- Akbari H., Pomerantz M., Taha H., 2001, Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas, *Solar Energy*, 70(3): 295-310.
- Arnfield J.A., 2003, Two Decades of Urban Climate Research: a Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water, and the Urban Heat Island, *International Journal of Climatology*, 23: 1–26
- Barsi J.A., Schott J.R., Palluconi D.L., Helder S.J., Hook B.L., Markham G., Chander G., O'Donnell E.M., 2003, Landsat TM and ETM+ thermal band calibration, *Can. J. Remote Sensing*, 29(2): 141-153.
- Bonn F., 1996, *Précis de télédétection, Volume 2 Applications thématiques*, AUPELF, 633 pages.
- Booth D. B., Hartley D., Jackson R., 2002, Forest cover, impervious-surface area, and the mitigation of stormwater impacts, *Journal of the American Water Resources Association*, 38 (3): 835-845.
- Changnon SA., Westcott NE., 2002, Heavy rainstorms in Chicago: increasing frequency, altered impacts, and future implications, *Journal of the American Water Resources Association*, 38:1467-1475.
- Chen X.-L., Zhao H.-M., Li P.-X., Yin Z.-Y., 2006, Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes, *Remote Sensing of Environment: Thermal Remote Sensing of Urban Areas*, 104(2): 133-146.
- Chester A., Gibbons C.J., 1996, Impervious surface coverage, *Journal of American Planning Association*, 62 (2): 243-258.
- Civco D.L., Hurd J.M., 1997, Impervious surface mapping for the state of Connecticut, *Proc. 1997 ASPRS/ACSM Annual Convention*, Seattle, WA, 3, pp.124-135.
- Diem J.E., 2008, Detecting summer rainfall enhancement within metropolitan Atlanta, Georgia USA, *Int. J. Climatol.* 28: 129–133.
- Giridharan R., Lau S.S.Y., Ganesan S., Givoni B., 2007, Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong, *Building and Environment*, 42(10): 3669-3684.
- Grimmond S., 2007, Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming, *The Geographical Journal*, 173(1): 83-88.
- Huang L., Lia J., Zhao D., Zhu J., 2007, A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China, *Building and Environment*, 43(1): 7-17.

- Jusuf S., Kardinal B., Wong N.H., Hagen E., Anggoro R., Hong Y., 2007, The influence of land use on the urban heat island in Singapore, *Habitat International*, 31(2) : 232-242.
- Kato S., Yamaguchi Y., 2007, Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data, *Remote Sensing of Environment*, 110(1): 1-17.
- Leprince, J., 2007, *Aménagement du campus de l'Université McGill*, Mémoire de maîtrise (en cours), Département de Géographie de l'Université du Québec à Montréal.
- Martin P., 2007, *Analyse diachronique du comportement thermique de Montréal en période de 1984 à 2005*. Mémoire de maîtrise (en évaluation), Département de Géographie, Université du Québec à Montréal, 138 pages.
- Martin P., Baudouin Y., Beauchemin M., Gagnon S. 2007, Tendances historiques 1984-2005 de l'ICU à Montréal via l'imagerie Landsat et les stations météorologiques, 19 pages (article en préparation).
- Mas J.F., 2000, Une revue des méthodes et techniques de télédétection, *Can. J. Remote Sensing*, 26(4) : 349-362.
- Pease R. W., Lewis J.E., Outcalt S.I., 1976, Urban terrain climatology and remote sensing. *The Association of American Geographers*, 66(4): 557-568.
- Richards, K., 2004, Observation and simulation of dew in rural and urban environments, *Progress in Physical Geography*, 28(1): 76-94.
- Rosenzweig C., Solecki W., Parshall L., Gaffin S., Lynn B., Goldberg R., Cox J., Hodges S., 2006, Mitigating New York city's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces, *Sixth Symposium on the Urban Environment*, American Meteorological Society, 29 January-2 February 2006, Atlanta, GA, 5 pages.
- Sailor D.J., 2006, Mitigation of urban heat islands – recent progress and future prospects. *Sixth Symposium on the Urban Environment*, American Meteorological Society, 29 January-2 February 2006, Atlanta, GA, 14 pages.
- Shashua-Bar L., Hoffman M.E., 2000, Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*, 31(3): 221–235.
- Taha H., 1997, Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2): 99-103.
- Terjung W. H., Louie Stella S-F., 1973, Solar radiation and urban heat islands. *The Association of American Geographers*, 63(2): 181-207.
- United Nations, 2004, *World Urbanization Prospects, the 2003 Revision: Data Tables and Highlights*, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, ESA/P/WP.190, 195 pages.
- Velazquez-Lozada A., Gonzalez J.E., Winter A., 2006, Urban heat island effect analysis for San Juan, Puerto Rico. *Atmospheric Environment*, 40(9): 1731-1741.
- Weng Q., Yang S., 2004, Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. *Journal of Environmental Management*, 70(2):145-156.

- Wilby R. L., Perry George L.W., 2006, Climate change, biodiversity and the urban environment: a critical review based on London, UK. *Progress in Physical Geography*, 30(1): 73-98.
- Wong N.H., Tan P.Y., Chen Y., 2007, Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate. *Building and Environment*, 42(1): 25-54.
- Yow, Donald M., 2007, Urban Heat Islands: Observations, Impacts and Adaptation. *Geography Compass*, 1(6): 1227-1251.
- Yuan F., Bauer M.E., 2007, Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imager. *Remote Sensing of Environment*, 106(3) : 375-386.

Annexe 1 : Données utilisées

Extrait du rapport de G. Lachance, 2006, Rapport des images satellites, 146 pages.

1. Inventaire des images satellites sélectionnées

2. Données météorologiques : Données horaires. (Informations partielles présentées)

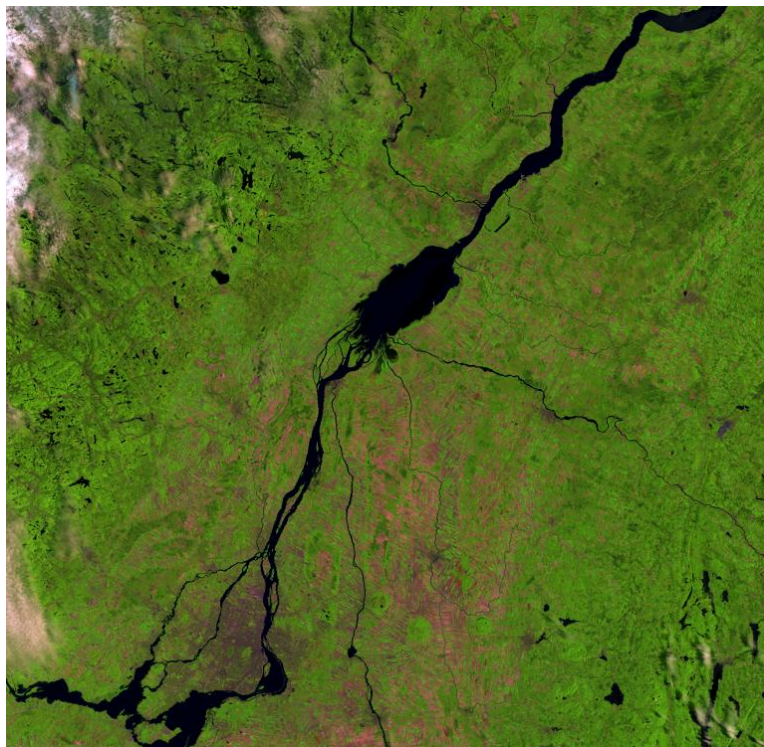
1. Inventaire des images satellites sélectionnées

Les images satellites sélectionnées concernent l'ensemble du territoire montréalais et proviennent de Landsat-5 TM (1984, 1986, 1988, 1990, 1992, 1994, 1996, 1998, 2000, 2002, 2003 et 2005) et de Landsat-7 ETM+ (2001) (tableau A.1). Ces images ont une couverture nuageuse maximale de 20% et n'ont pas ou peu de nuages au-dessus de l'île de Montréal. De plus, les images présentent les caractéristiques de base suivantes : format-path, resampling-DS8, map system-NAD83, map projection-UTM, format-GeoTIFF. Seule l'image de 1988 est en format PIX.

Tableau A.1 : Synthèse des images satellites disponibles sélectionnées (jaune) et non sélectionnées (blanc).

		Path/Row 14-28		Path/Row 15-28	
Landsat-5 TM (120m)	Couverture nuageuse/année	0%	10%	0%	10%
	1984	17 juin			
	1985	8 septembre		14 août	
	1986	26 août			
	1987	13 août			
	1988	16 septembre			
	1989	26 août			
	1990			11 juillet	
	1991				14 juillet
	1992	25 juillet			
	1993	29 août			
	1994			7 août	
	1995			23 juin 10 août	
	1996	18 juin			
	1997			28 juin	
	1998		27 août		
	1999		21 juillet		
	2000			20 juin	
Landsat-7 ETM+ (60m)	2001		11 août		
Landsat-5 TM (120m)	2002				13 août
	2003				15 juillet
	2004	26 juillet			
	2005	27 juin	29 juillet (20%)		

Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	17 juin 1984
Path / Row	14 / 28
Heure d'acquisition GMT; HNLE	15:06; 10:06
Couvert nuageux (%)	0
Coordonnées du coin supérieur gauche	47°00'03"N, -73°49'44"W
Coordonnées du coin supérieur droit	46°39'13"N, -71°27'12"W
Coordonnées du coin inférieur gauche	45°23'46"N, -74°23'38"W
Coordonnées du coin inférieur droit	45°03'32"N, -72°04'59"W



Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	26 août 1986
Path / Row	14 / 28
Heure d'acquisition GMT; HNLE	14:59; 9:59
Couvert nuageux (%)	0
Coordonnées du coin supérieur gauche	47°00'45"N, -73°54'15"W
Coordonnées du coin supérieur droit	46°39'55"N, -71°31'42"W
Coordonnées du coin inférieur gauche	45°24'28"N, -74°28'10"W
Coordonnées du coin inférieur droit	45°04'14"N, -72°09'30"W



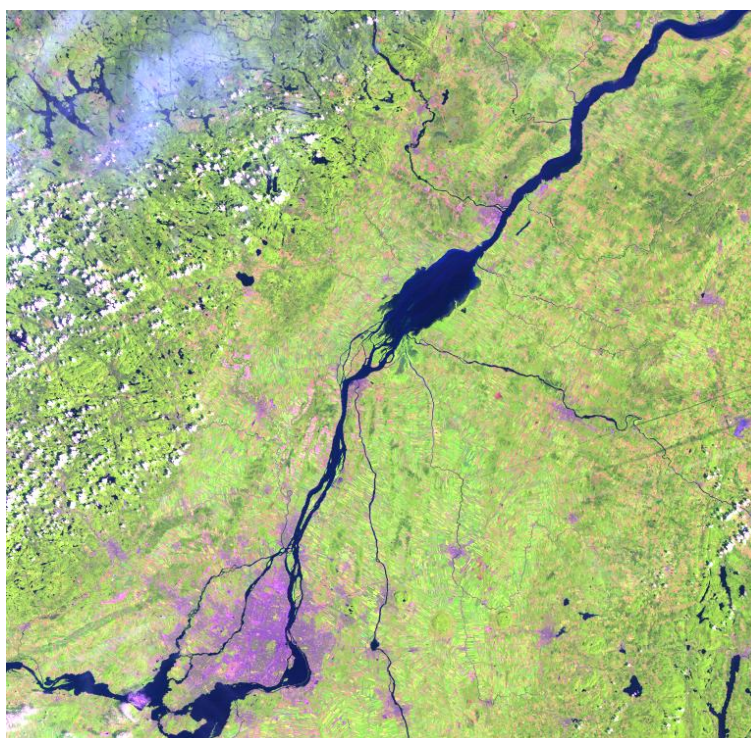
Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	6 septembre 1988
Path / Row	14 / 28
Heure d'acquisition GMT; HNLE	15:09; 10:09
Couvert nuageux (%)	0
Coordonnées du coin supérieur gauche	47°06'35"N, -73°51'03"W
Coordonnées du coin supérieur droit	46°45'39"N, -71°28'48"W
Coordonnées du coin inférieur gauche	45°31'35"N, -74°24'05"W
Coordonnées du coin inférieur droit	45°11'14"N, -72°05'37"W



Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	11 juillet 1990
Path / Row	15 / 28
Heure d'acquisition GMT; HNLE	15:04; 10:04
Couvert nuageux (%)	0
Coordonnées du coin supérieur gauche	46°56'02"N, -75°25'13"W
Coordonnées du coin supérieur droit	46°35'14"N, -73°02'51"W
Coordonnées du coin inférieur gauche	45°27'34"N, -75°56'21"W
Coordonnées du coin inférieur droit	45°07'18"N, -73°37'34"W



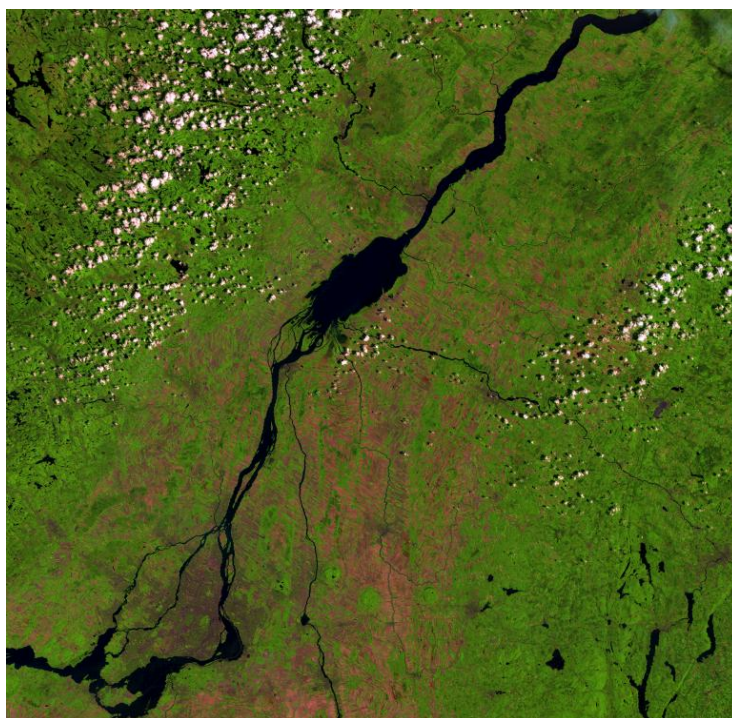
Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	25 juillet 1992
Path / Row	14 / 28
Heure d'acquisition GMT; HNLE	15:00; 10:00
Couvert nuageux (%)	0
Coordonnées du coin supérieur gauche	47°07'19"N, -73°55'04"W
Coordonnées du coin supérieur droit	46°46'23"N, -71°32'47"W
Coordonnées du coin inférieur gauche	45°32'20"N, -74°28'07"W
Coordonnées du coin inférieur droit	45°11'59"N, -72°09'37"W



Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	7 août 1994
Path / Row	15 / 28
Heure d'acquisition GMT; HNLE	15:01; 10:01
Couvert nuageux (%)	0
Coordonnées du coin supérieur gauche	46°56'02"N, -75°25'13"W
Coordonnées du coin supérieur droit	46°35'14"N, -73°02'51"W
Coordonnées du coin inférieur gauche	45°27'34"N, -75°56'21"W
Coordonnées du coin inférieur droit	45°07'18"N, -73°37'34"W



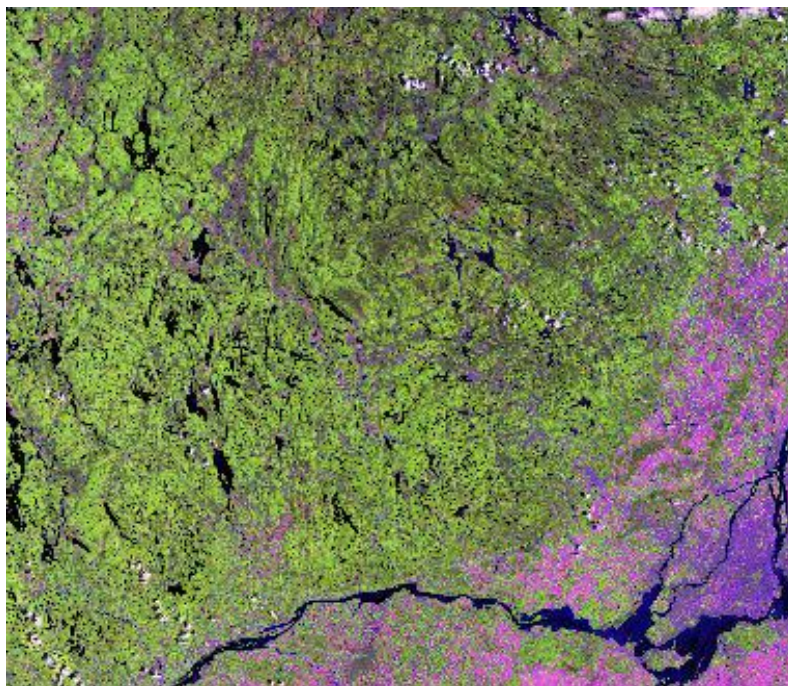
Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	18 juin 1996
Path / Row	14 / 28
Heure d'acquisition GMT; HNLE	14:51; 9:51
Couvert nuageux (%)	0
Coordonnées du coin supérieur gauche	46°58'41"N, -73°43'32"W
Coordonnées du coin supérieur droit	46°37'52"N, -71°21'03"W
Coordonnées du coin inférieur gauche	45°22'25"N, -74°17'24"W
Coordonnées du coin inférieur droit	45°02'11"N, -71°58'49"W



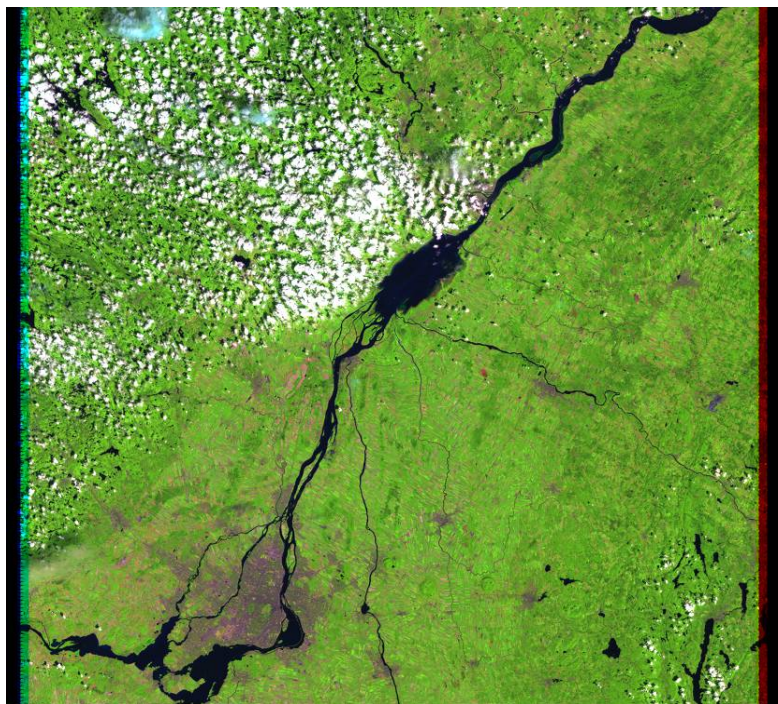
Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	27 août 1998
Path / Row	14 / 28.141
Heure d'acquisition GMT; HNLE	15:16; 10:16
Couvert nuageux (%)	~10
Coordonnées du coin supérieur gauche	N/D
Coordonnées du coin supérieur droit	N/D
Coordonnées du coin inférieur gauche	N/D
Coordonnées du coin inférieur droit	N/D
Coordonnées au point central	45°49'48"N, -72°59'24"W



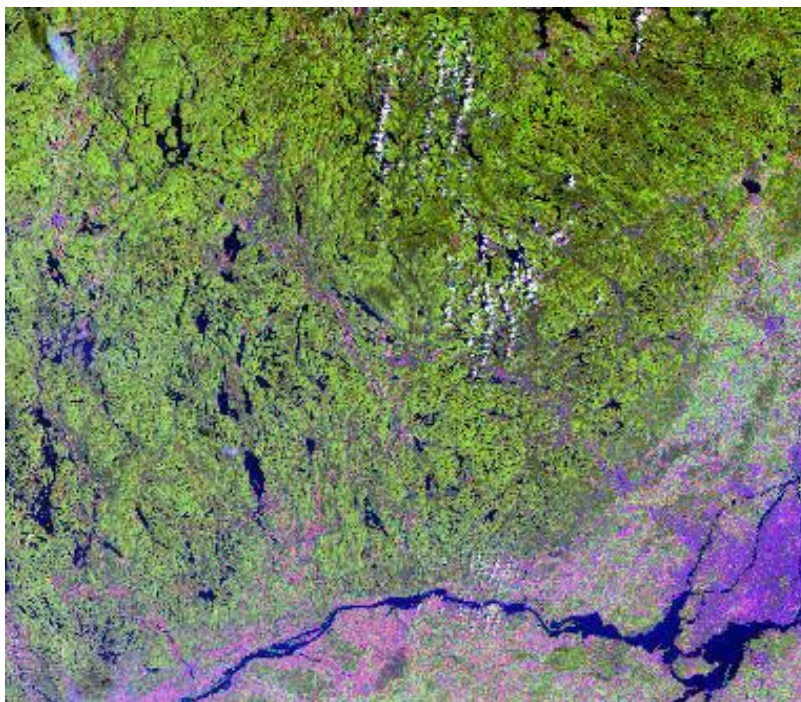
Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat 7 ETM+
Date d'acquisition	20 juin 2000
Path / Row	15 / 28
Heure d'acquisition GMT; HNLE	15:20; 10:20
Couvert nuageux (%)	10
Coordonnées du coin supérieur gauche	46°56'31"N, -75°24'23"W
Coordonnées du coin supérieur droit	46°35'43"N, -73°02'00"W
Coordonnées du coin inférieur gauche	45°28'03"N, -75°55'32"W
Coordonnées du coin inférieur droit	45°07'47"N, -73°36'44"W



Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	11 août 2001
Path / Row	14 / 28
Heure d'acquisition GMT; HNLE	15:26; 10:26
Couvert nuageux (%)	10
Coordonnées du coin supérieur gauche	47°00'27"N, -73°55'59"W
Coordonnées du coin supérieur droit	46°39'00"N, -71°28'22"W
Coordonnées du coin inférieur gauche	45°23'26"N, -74°29'38"W
Coordonnées du coin inférieur droit	45°02'36"N, -72°06'09"W



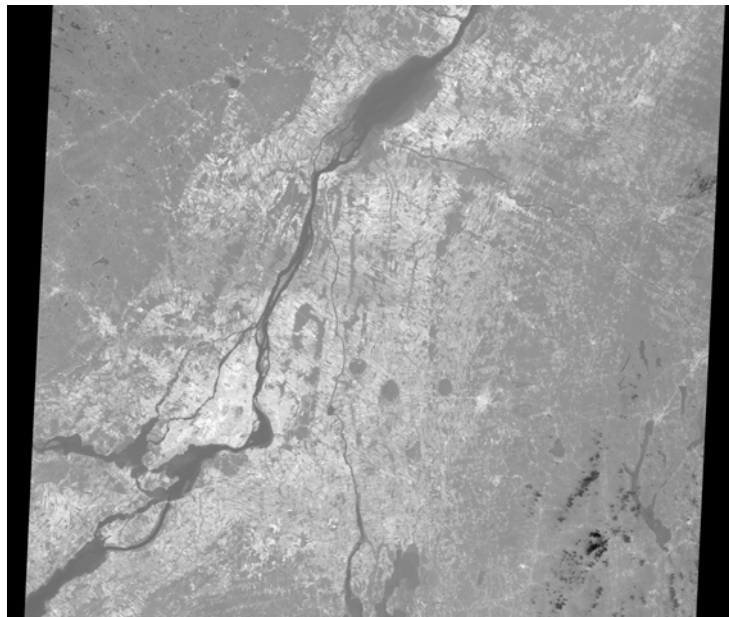
Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	13 août 2002
Path / Row	15 / 28
Heure d'acquisition GMT; HNLE	15:15; 10:18
Couvert nuageux (%)	10
Coordonnées du coin supérieur gauche	46°57'06"N, -75°29'15"W
Coordonnées du coin supérieur droit	46°36'17"N, -73°06'51"W
Coordonnées du coin inférieur gauche	45°28'37"N, -76°00'25"W
Coordonnées du coin inférieur droit	45°08'21"N, -73°41'35"W



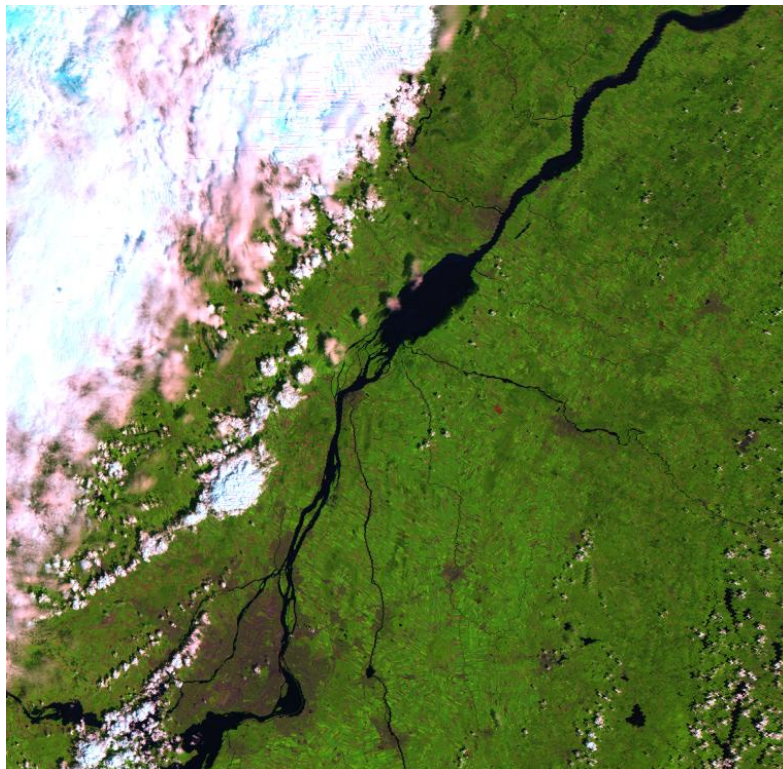
Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	15 juillet 2003
Path / Row	15 / 28
Heure d'acquisition GMT; HNLE	15:20; 10:20
Couvert nuageux (%)	10
Coordonnées du coin supérieur gauche	46°56'05"N, -75°22'21"W
Coordonnées du coin supérieur droit	46°35'17"N, -72°59'59"W
Coordonnées du coin inférieur gauche	45°27'37"N, -75°53'29"W
Coordonnées du coin inférieur droit	45°07'21"N, -73°34'42"W



Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	27 juin 2005
Path / Row	14/ 28.247
Heure d'acquisition GMT; HNLE	15:25; 10:25
Couvert nuageux (%)	0
Coordonnées du coin supérieur gauche	N/D
Coordonnées du coin supérieur droit	N/D
Coordonnées du coin inférieur gauche	N/D
Coordonnées du coin inférieur droit	N/D
Coordonnées au point central	42°40'48"N, -73°03'36"W



Attributs de l'image	Valeur de l'attribut
Satellite	Landsat-5 TM
Date d'acquisition	29 juillet 2005
Path / Row	14 / 28
Heure d'acquisition GMT; HNLE	15:25; 10:25
Couvert nuageux (%)	20
Coordonnées du coin supérieur gauche	47°06'39"N, -73°52'17"W
Coordonnées du coin supérieur droit	46°45'43"N, -71°30'01"W
Coordonnées du coin inférieur gauche	45°31'40"N, -74°25'19"W
Coordonnées du coin inférieur droit	45°11'19"N, -72°06'51"W



2. Données météorologiques (extrait données horaires seulement)

Les données météorologiques présentées comportent des informations horaires, quotidiennes, de l'almanach ainsi que des normales climatiques. Ces données sont disponibles pour les stations situées à l'intérieur des limites de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) et produisant ce type de relevé (figure 1).



Figure 1 Stations météorologiques disponibles et utilisées (localisées à l'intérieur des limites de la CMM)

2.1 Données horaires (extrait : l'ensemble des stations ne sont pas incluses)

Les données horaires sont présentées pour la journée au cours de laquelle l'image satellite a été captée.

Légende

[vide] = Aucune donnée disponible

E = Valeur estimée

M = Manquante

NA = Non disponible

T = Trace

† = Données journalières n'ayant subi qu'un contrôle de qualité préliminaire

17 juin 1984

STATION: Montréal / Pierre Elliott Trudeau Int'l A **ID CLIMATO:** 7025250 **LATITUDE:** 45,47 N
LONGITUDE: 73,75 W **ALTITUDE:** 35,70 m

Date	Heure	Température (°C)	Point de rosée (°C)	Humidité relative (%)	Direction du vent (10's degrés)	Vitesse du vent (km/h)	Visibilité (km)	Pression (kPa)	Humidex	Temps
1984-06-17	00:00	15,6	10,4	71		0	24,1	101,6		Généralement nuageux
	01:00	15,7	11,7	77	18	7	24,1	101,57		Nuageux
	02:00	15,8	11,3	75		0	24,1	101,57		Averses de pluie
	03:00	15,7	11,1	74	15	4	24,1	101,53		Généralement nuageux
	04:00	14,5	11,4	82	15	4	24,1	101,47		Généralement nuageux
	05:00	14,4	11,7	84	16	9	24,1	101,5		Généralement nuageux
	06:00	15,5	11,4	77	15	6	24,1	101,47		Généralement dégagé
	07:00	17,2	11,3	68	18	7	24,1	101,47		Généralement dégagé
	08:00	18,8	11,4	62	20	7	24,1	101,37		Généralement dégagé
	09:00	20,4	12,1	59	20	13	24,1	101,3		Généralement dégagé
	10:00	21,7	13,5	60	23	13	24,1	101,26		Dégagé
	11:00	22,6	14	58	23	9	24,1	101,13		Généralement dégagé
	12:00	23,9	14,9	57	25	13	24,1	101,13		Généralement nuageux
	13:00	24,6	15	55	21	9	24,1	101,06		29 Généralement nuageux
	14:00	25,4	14,4	51	25	7	24,1	100,96		Généralement nuageux
	15:00	25,6	14	49	19	13	24,1	100,93		Généralement dégagé
	16:00	25,7	14,7	51	21	11	24,1	100,89		Généralement dégagé
	17:00	25,5	14,2	50	19	13	24,1	100,83		Généralement dégagé
	18:00	24,9	13	48	20	9	24,1	100,79		Dégagé
	19:00	23,3	13,1	53	21	6	24,1	100,79		Dégagé
	20:00	20,9	14,6	67	15	13	24,1	100,72		Généralement dégagé
	21:00	19,4	14,2	72	15	11	24,1	100,79		Généralement dégagé
	22:00	19,7	14,2	71	17	9	24,1	100,79		Généralement nuageux
	23:00	19,5	14,5	73	20	6	24,1	100,76		Nuageux

27 juin 2005

STATION: Montréal / Pierre Elliott Trudeau Int'l A ID CLIMATO: 7025250 LATITUDE: 45,47 N ALTITUDE: 35,70 m
LONGITUDE: 73,75 W

Date	Heure	Température (°C)	Point de rosée (°C)	Humidité relative (%)	Direction du vent (10's degrés)	Vitesse du vent (km/h)	Visibilité (km)	Pression (kPa)	Humidex	Temps
2005-06-27	00:00	22,7	17,5	72	36	13	25	101,74		Dégagé
	01:00	21	17	78	3	11	25	101,71		Dégagé
	02:00	21	16,9	77	2	7	25	101,68		Dégagé
	03:00	19,4	16,4	83	2	11	25	101,66		Dégagé
	04:00	19,2	15,8	81	2	15	24,1	101,7		Dégagé
	05:00	18,6	15,4	82	2	13	24,1	101,77		Dégagé
	06:00	19,5	15,4	77	2	15	24,1	101,79		Généralement dégagé
	07:00	20	15,2	74	2	15	24,1	101,83		Dégagé
	08:00	22	16,1	69	1	11	24,1	101,85		Dégagé
	09:00	24,4	16,7	62	2	9	24,1	101,83	29	Dégagé
	10:00	26	16,5	56	7	7	24,1	101,8	31	Dégagé
	11:00	28,4	18,8	56	19	7	19,3	101,78	35	Dégagé
	12:00	28,9	18,6	54	21	7	19,3	101,74	35	Dégagé
	13:00	30,1	18,5	50	19	11	19,3	101,67	36	Dégagé
	14:00	31	17,9	46	23	7	19,3	101,6	37	Dégagé
	15:00	31,4	17,8	44	25	9	19,3	101,53	37	Dégagé
	16:00	32,3	14,7	35	24	11	19,3	101,49		Dégagé
	17:00	32	16,1	38	22	11	19,3	101,45	37	Dégagé
	18:00	31,8	16,1	39	24	9	19,3	101,43	36	Dégagé
	19:00	31	16,8	43	25	7	19,3	101,41	36	Dégagé
	20:00	29,8	16,9	46	24	6	24,1	101,36	35	Dégagé
	21:00	26,8	17,5	57	23	7	25	101,34	32	Dégagé
	22:00	27	17,9	58	17	4	25	101,31	33	Dégagé
	23:00	24,8	18	66	26	4	25	101,31	31	Dégagé