

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

MORPHOLOGIE DES TOITS, ET CONSERVATION DE LA CHALEUR EN  
MILIEU URBAIN : CAS DE MONTRÉAL

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAITRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR

VANEL YONKEU NGANOU

NOVEMBRE 2020

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.10-2015). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire Monsieur Claude Codjia qui m'a orienté et a suivi avec intérêt l'avancement de mes travaux de recherche. Je tiens tout particulièrement à le remercier pour ses innombrables conseils durant mon parcours universitaire.

Mes sincères remerciements vont aussi à Monsieur Yves Beaudouin. Ses suggestions et conseils, sa rigueur et sa patience ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail. À tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches, je témoigne toute ma gratitude.

Je remercie mes très chers parents, Ide et Samuel, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie ma sœur Yolaine, pour son soutien et ses encouragements.

Enfin, mes amis Yvelin, Myriam, Fabrice, Madina et Sherley, qui ont toujours été là pour moi, trouvent ici la reconnaissance de leurs fidèles amitiés. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ceux-là qui sont intervenus à quelque niveau que ce soit et que je n'ai pas cité de peur que je n'en oublie, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

## DÉDICACE

À celui qui règne éternellement :  
merci pour la force.  
N'eût été TOI, j'aurais certainement  
abandonné ...

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES .....	xii
Liste des symboles et des unités .....	xiii
RÉSUMÉ .....	xiv
ABSTRACT.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
INTRODUCTION .....	15
CHAPITRE I TITRE DU CHAPITRE I.....	21
1.1 Toitures et matériaux les constituants.....	21
1.1.1 Histoire des toitures.....	21
1.1.2 Les formes de toitures .....	25
1.1.3 Histoire des toitures.....	31
1.2 Réflectivité (albédo) des toitures et bilan énergétique.....	38
1.2.1 Le rayonnement solaire (RS) .....	38
1.2.2 Comportement thermique des toitures .....	48
1.2.3 Apports des SIG et de la télédétection dans l'analyse thermique .....	55
CHAPITRE II Méthodologie .....	59
2.1 Présentation de la région et des zones d'études.....	60
2.1.1 Région d'étude .....	60
2.1.2 Zones d'étude .....	64
2.2 Présentation des données .....	69
2.2.1 Données de type matriciel.....	70

2.2.2	Données de type vectoriel .....	75
2.2.3	Données de type 3D .....	75
2.2.4	Données de type Excel .....	76
2.3	Démarche méthodologique .....	76
2.3.1	Les étapes de prétraitements .....	78
2.3.2	Les étapes de traitements .....	80
CHAPITRE III PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION .....		85
3.1	Présentation des résultats .....	85
3.1.1	Lien entre la forme des toitures et le gain d'énergie .....	85
3.1.2	Lien entre l'incidence de gain thermique des toitures et les îlots de chaleur urbain (ICU) .....	93
3.2	Discussion des résultats .....	96
3.2.1	Critique des résultats .....	96
CONCLUSION .....		97
ANNEXE A EXEMPLE DE SCRIPT PYTHON UTILISÉ LORS DU TRAITEMENT DES DONNÉES .....		99
BIBLIOGRAPHIE .....		100

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Formes de toitures traditionnelles. Source : (Ville de Québec, 1988).....	23
Figure 1.2. Charpente et toiture. (Source : roger brunvarlet.fr) .....	26
Figure 1.3. Photo maison moderne à toit plat. (Source : Photo maison moderne à toit plat. (Source : maisonsconcept.com) .....	27
Figure 1.4. Maison à deux versants (pignon) 3D. (Source: <a href="http://www.upton.ca/wpcontent/uploads/2013/04/MRC_Acton_Fiches_architecturale">http://www.upton.ca/wpcontent/uploads/2013/04/MRC_Acton_Fiches_architecturale</a> ) .....	28
Figure 1.5. La maison traditionnelle Québécoise. (Source : <a href="http://www.upton.ca/wpcontent/uploads/2013/04/MRC_Acton_Fiches_architecturales_FINAL_1.compressed.pdf">http://www.upton.ca/wpcontent/uploads/2013/04/MRC_Acton_Fiches_architecturales_FINAL_1.compressed.pdf</a> ) .....	29
Figure 1.6. Modèles de toitures en coupe (3D). (Source : <a href="http://www.etoiture.com/particuliers/informations/lexique/croupe.php">http://www.etoiture.com/particuliers/informations/lexique/croupe.php</a> ).....	30
Figure 1.7. Interaction rayonnement et corps opaque. (Source : Taine, Enguechard, et Lacona, 2014 ).....	40
Figure 1.8. Valeurs de l'albédo de différentes surfaces. (Source: <a href="http://collectivitesviables.org/articles/ilots_de_chaleur_urbains.aspx">http://collectivitesviables.org/articles/ilots_de_chaleur_urbains.aspx</a> ).....	42

Figure 1.9. Rayonnement solaire et processus en action au niveau de la toiture (source : KABORÉ, 2015).....	50
Figure 1.10. L'albédo de certains types de revêtements. (Source : <a href="http://intelligentskins.serero.com/?p=2209">http://intelligentskins.serero.com/?p=2209</a> ).....	51
Figure 1.11. L'albédo de certains types de revêtements. (Source : <a href="http://intelligentskins.serero.com/?p=2209">http://intelligentskins.serero.com/?p=2209</a> ).....	51
Figure 1.12. Variations de température entre toit réfléchissant et toit de type normal. (Source: <a href="https://ubisafe.org/explore/energies-clipart-beneficial/">https://ubisafe.org/explore/energies-clipart-beneficial/</a> ).....	52
Figure 1.13. Toit vert : un écran de protection naturelle. (Source : <a href="https://fluswikien.hfwu.de/index.php?title=File:Sketch_Anzalone.png">https://fluswikien.hfwu.de/index.php?title=File:Sketch_Anzalone.png</a> ).....	54
Figure 1.14. Toit vert : un écran de protection naturelle. (Source : <a href="https://fluswikien.hfwu.de/index.php?title=File:Sketch_Anzalone.png">https://fluswikien.hfwu.de/index.php?title=File:Sketch_Anzalone.png</a> ).....	54
Figure 2.1. Situation géographique de Montréal (Source : Mathieu, 2015) .....	59
Figure 2.2. Situation géographique de Montréal (Source : Mathieu, 2015) .....	59
Figure 2.3. Pôles économiques de l'agglomération de Montréal (Ville de Montréal, 2015) .....	60
Figure 2.4. Pôles économiques de l'agglomération de Montréal (Ville de Montréal, 2015) .....	60
Figure 2.5. Répartition de la végétation sur le territoire de Montréal (Source: Mathieu, 2011) .....	61

Figure 2.6. Répartition des espaces urbanisés à l'échelle de l'île de Montréal. (Source: (Mathieu, 2015)) .....	63
Figure 2.7. Espace couvert par les lignes de vols du capteur TASI.....	64
Figure 2.8. . Zone d'étude des toits plats à Montréal (2017).....	65
Figure 2.9 . Zone d'étude des toitures mansardes à Montréal (2017) .....	67
Figure 2.10. . Zone d'étude des toit pignons à Montréal (2017) .....	68
Figure 2.11. . Démarche méthodologique.....	77
Figure 2.12. Procédure technique d'extraction des valeurs de températures des images thermiques en fonction des bâtiments de la zone.....	81
Figure 3.1. . Exemple de carte d'ensoleillement pour l'arrondissement Ville Marie ..	87
Figure 3.2. Rayonnement reçu en fonction de l'orientation de la toiture (Source: <a href="https://www.arrevol.com/blog/cual-es-la-mejor-orientacion-para-tu-vivienda-casa">https://www.arrevol.com/blog/cual-es-la-mejor-orientacion-para-tu-vivienda-casa</a> ) .....	88
Figure 3.3. Statistique des possibilités de gain d'énergie en fonction.....	89
Figure 3.4. . Distribution de la température en fonction des différentes sortes de toits plats .....	91
Figure 3.5. . Distribution de la température en fonction des différentes sortes de toits plats .....	92

Figure 3.6. Distribution des formes de toitures dans la région d'étude..... 93

Figure 3.7. . Quantification des bâtiments ayant une capacité de stockage d'énergie. 94

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Tableau récapitulatif des formes de toitures avec leurs avantages et inconvénients respectifs .....	36
Tableau 1.2. Tableau récapitulatif des types de toits ainsi que de leurs avantages et inconvénients.....	37
Tableau 1.3. Albédo des surfaces urbaines. (Source : (Mathieu, 2015)).....	43
Tableau 1.4. Émissivités de surface de certains matériaux. (Source : <a href="https://slideplayer.fr/slide/10609808/">https://slideplayer.fr/slide/10609808/</a> ) .....	44
Tableau 1.5. Valeurs d'émissivité pour des surfaces rencontrées en milieu urbain. (Source : (Mathieu, 2015)).....	45
Tableau 1.6. L'Albédo de certaines matières. (Source : <a href="https://www.albedo-hqe.com/fr/7-albedo/55-definition-de-lalbedo">https://www.albedo-hqe.com/fr/7-albedo/55-definition-de-lalbedo</a> ).....	53
Tableau 2.1. Tableau récapitulatif de quelques statistiques sur Montréal (source: Ville de Montréal).....	62
Tableau 2.2. Tableau récapitulatif des trois zones d'études .....	69
Tableau 2.3. Répartition de la longueur d'onde des 72 bandes générées par le capteur CASI.....	72

Tableau 2.4. Tableau des métadonnées.....	74
Tableau 3.1. Caractéristiques des surfaces en fonction des zones d'études .....	86
Tableau 3.2. Énergie moyenne reçue en Kjm2 pour chaque forme de toits .....	94

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CASI : Compact Airbone Spectrographic Imager

CMM : Communauté métropolitaine de Montréal

ICU : Îlot de chaleur urbain

MNC : Modèle Numérique de Canopé

MNS : Modèle Numérique de Surface

MNT : Modèle Numérique de Terrain

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONU : Organisation des Nation-Unis

PIR : Proche Infrarouge

RS : Rayonnement solaire

TASI : Thermal Airborne Spectrographic Imager

UDM : Université de Montréal

UQAM : Université du Québec à Montréal

## LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

C : Température Celsius

K : Température Kelvin

Kwh/m<sup>2</sup>/jr : Kilowatt heure par mètre carré par jour

Km : Kilomètre

Km<sup>2</sup> Kilomètre carré

m : Mètre

m<sup>2</sup> : Mètre carré

## RÉSUMÉ :

Dans ce document, nous avons essayé de faire l'état des lieux des formes de toitures et de l'impact que celles-ci ont sur le gain thermique des bâtiments. Nous savons que les villes sont dans un constant accroissement ce qui implique la mise en place d'espaces minéralisés (espaces résidentiels, commerciaux, industriels, etc). Ces derniers ont pour conséquence l'accentuation de phénomènes naturels récurrents comme les îlots de chaleur. C'est pour tout ceci que nous sommes intéressés à ce sujet.

Afin de démontrer l'impact ou le lien existant entre les toitures et les îlots de chaleur, nous nous sommes intéressés à trois zones comportant trois formes (plate, pignon et mansarde) de toitures différentes dans le Grand Montréal. En se basant sur les travaux d'émissivité et d'albédo qu'avait effectués Fontaine (2017), nous avons essayé d'établir un lien même circonstanciel entre ces différentes formes et le gain thermique au travers des types de matériaux que supportaient ces toitures.

En termes de résultats, ceux-ci semblent mitigés, car il nous est difficile de conclure qu'il y a un lien direct entre les îlots de chaleur et la forme des toitures.

Mots clés :

Toitures, gain thermique, formes des toitures, îlots de chaleur, type de toitures.

## INTRODUCTION

- Mise en contexte :

Depuis le 20<sup>ème</sup> siècle, les villes ne cessent d'évoluer et de subir des mutations tant au niveau morphologique que démographique (Allemand, 2012, p. 6) (Antier, 2015). Ainsi, leurs incessantes modernisations, restructurations et revitalisations, y contribuent activement (OMS et ONU-HABITAT, 2010, p. 7). Ces multiples transformations de la ville se justifient, d'une part par une forte augmentation de la population citadine et d'autre part par un étalement urbain sans précédent. En effet, selon l'United Nation World Urbanisation Prospect (2014, p. 1), près de 54 % de la population mondiale vit en ville contre 30 % en 1950. Et selon ONU-HABITAT, en moyenne, chaque année, près de 60 millions de personnes rejoignent les villes et ce depuis les années 60 (OMS et ONU-HABITAT, 2010, p. 4).

Il est important de souligner que cette forte croissance démographique urbaine engendre nécessairement une croissance spatiale des agglomérations (OMS et ONU-HABITAT, 2010, p. 7). Par exemple, entre 1975 et l'an 2000, la communauté métropolitaine de Montréal (CMM) a connu un boom (près de 60 %) au niveau des demandes de permis de construction de bâtiments résidentiels (Friedman et Côté, 2003, p. 199). Cette flambée des demandes de permis permet d'illustrer un degré de croissance urbain multiplié par 26 entre 1971 et 2011 (Gagné, 2017), qui est manifeste au travers de l'augmentation des superficies artificialisées.

Cette artificialisation des milieux urbains est à l'origine des îlots de chaleur qui ne sont pas sans conséquence, comme l'illustrent CAVAYAS et BAUDOIN (2008) à Montréal, où certains quartiers urbains fortement minéralisés subissent de fortes chaleurs au point où l'on constate par moment des variations de températures pouvant aller de 5°C au-dessus de la moyenne. Montréal, n'est pas la seule agglomération affectée par ce phénomène. 25 % des villes au niveau mondiale y sont également sujettes, et ce à cause des mêmes raisons (Estrada et *al.*, 2017).

Ces multiples vagues de chaleur observées génèrent un certain inconfort (coup de chaleur, épuisement, coût économique, etc.) et, dans une certaine mesure, elles ont des répercussions directes sur le portefeuille, la santé et même, parfois, sur la survie des populations (ASSS, 2010; NOAA, 2010; Karl et al., 2009). Par exemple, ces températures extrêmes ont engendré en 1995 à Chicago (États-Unis) le décès de 739 personnes et ont amené 3 300 personnes à se rendre aux urgences. En termes économiques, il faut souligner que le coût qu'occasionnent ces chaleurs extrêmes est important, et ce, à cause des différents espaces et systèmes de rafraîchissement aménagés par les différentes municipalités. Par exemple, lors de l'été 2005, la Chine a connu la canicule et durant cette période la ville de Beijing a atteint un record de consommation électrique avec un dépassement de près de 20,4 % de la moyenne saisonnière (Li, et al., 2013). Cette consommation était en partie due à l'achat de système de climatisation par les populations.

En somme la forte minéralisation des espaces urbains a eu un effet domino sur le gain thermique des cités. Selon Dupuy (2008), les multiples avancées technologiques que nous avons connues au cours du siècle dernier ont grandement affecté le secteur de la construction, et plus particulièrement, celui des logements résidentiels. En effet, l'usage de méthodes et de

techniques modernes dans le domaine de la construction a engendré une incidence sans précédent d'une part sur les formes et les types de matériaux, davantage dans le secteur de la construction des toitures (Ville de Québec, 1988, p. 4), et, d'autre part, sur l'empreinte thermique de ces dernières. Par exemple, la conception des toitures à versant faiblement abrupte découle de l'amélioration de l'étanchéité des membranes isolantes (Ville de Québec, 1988, p. 4-5).

Ces nouvelles techniques dans le domaine de la construction et particulièrement celle des toitures ont contribué au fil des années à redéfinir l'empreinte thermique de nos agglomérations (Dupuy, 2008). En effet, on est passé de matériaux plus ou moins naturels (bois, tuiles d'argiles, etc.) choisis pour leur durabilité à l'usage de plastique, résines et autres matières synthétiques (Dupuy, 2008). Cette transition, en lien avec la forte demande des permis de construction de bâtisses et l'avancée technologique dans les années 80, a eu pour effet une forte minéralisation des zones urbaines, qui, à son tour, engendre dans les cités des îlots de chaleurs (Friedman et Côté, 2003, p. 199; Cavayas et Baudouin, 2008, p. 76).

Cependant, il est important de souligner que si certaines de ces nouvelles matières contribuent à faire monter le mercure, il n'en demeure pas moins que d'autres de ces matériaux permettent dans bien des cas de réduire voire annihiler une part importante de l'énergie solaire en la réfléchissant et, de ce fait, influencent directement l'empreinte énergétique des habitations (Boyer, 2010). Par exemple, en 2010, lors d'une expérience avec les volontaires du « cool roof program » sur le toit d'une maison de retraite à New York, le journaliste Sean O'Driscoll a pu constater la différence flagrante de températures (45°F ou 7,2°C) existant entre un toit ayant des matériaux naturels (galets noir-gris) à la base et un toit recouvert d'une fine

membrane de polymère blanche lors de sa pose (O'Driscoll, 2010). De même, pour l'ancien secrétaire américain à l'énergie, Steven CHU, l'usage de certaines composantes, de certains procédés ou encore matériaux (toits blancs, polymères à forte teneur d'albédo) sur les routes et toitures à l'échelle mondiale permettrait de réduire de façon significative l'empreinte thermique et polluante de nos agglomérations, car il aurait le même impact que d'éliminer toutes les voitures du globe pendant 11 ans (Hargreaves, 2009).

Tout ceci nous amène à nous questionner sur l'effet thermique des toitures dans l'enjeu des îlots de chaleur urbain (ICU). Ce questionnement ne se limite pas aux composantes matérielles des toitures, mais elle prend en compte aussi la forme ainsi que l'orientation de celles-ci.

- Problématique

À la lumière de la mise en contexte, nous voulons, par cette étude, appréhender et saisir la relation entre les variables que sont la forme des toitures et leur gain thermique. Ainsi, nous estimons que bien comprendre la dynamique existante dans cette relation permettrait de mieux cerner la contribution de ces variables dans le phénomène des îlots de chaleur urbain (ICU).

- Questionnement et hypothèses

Pour ce faire, nous nous sommes posé la question principale suivante : quelle est la dynamique existante entre la morphologie des toits et le comportement thermique de ceux-ci? Pour répondre à ce questionnement, nous avons émis une hypothèse principale selon laquelle la dynamique

thermique des toits est fortement influencée par la forme des toitures. De ce fait, nous souhaitons examiner si la forme de la toiture a une influence sur la captation de l'énergie solaire.

Afin de répondre au mieux à la question principale, nous avons entrepris de la morceler en deux questions secondaires. Cependant, il est important de préciser que chacune de ces questions comporte une hypothèse et qu'elles sont interdépendantes.

La première question secondaire est de savoir si les formes des toits ont une incidence significative sur le gain calorifique des toitures et pourquoi? Par cette question, nous voulons voir comment la forme en rapport avec un certain type de toit peut influencer le processus de gain d'énergie de celui-ci. En effet, par une telle idée, nous cherchons à démontrer que l'énergie stockée au niveau des toitures dépend nécessairement en grande partie des formes de ces dernières parce que nous présumons qu'un toit de forme plate ne peut arriver à stocker la même quantité d'énergie qu'un toit en forme appentis.

Dans la deuxième question secondaire, nous nous interrogeons à savoir si cette incidence au niveau du gain thermique des toitures a une influence majeure sur les îlots de chaleurs urbains (ICU). Et si oui, comment? Inversement à la première, cette question s'intéresse de façon indirecte à l'impact que peut avoir une forme de toit sur l'augmentation de la température en période d'îlots de chaleurs urbains. En effet, en prêtant attention aux formes de toits, nous pourrions, d'une part, estimer le gain d'énergie au niveau de la toiture et, d'autre part, nous aurons la possibilité de faire des liens entre la quantité d'énergie obtenue et les îlots de chaleurs urbains. Comme mentionné précédemment, nous savons que chaque objet

a une signature thermique particulière peu importe sa forme, (Anquez et Harlem, 2011). Or les toits sont une combinaison de formes et de divers types de matériaux.

- L'objectif de cette étude

Notre objectif, au travers de cette étude, est de contribuer à la connaissance des relations qui peuvent exister entre forme, type de toit, et comportement thermique des toitures comme facteurs contributifs des ICU. De nombreux articles scientifiques présentent et traitent le problème des îlots de chaleurs de façon générale ou selon l'angle des matériaux (type). Peu sont ceux qui s'intéressent aux formes des objets et à leur contribution dans la formation du phénomène. Nous pourrions ainsi montrer l'interrelation entre les facteurs « formes de toits », et l'élévation du mercure durant la période de canicule.

## CHAPITRE I

### TITRE DU CHAPITRE I

Dans ce chapitre (Résumé),

#### 1.1 Toitures et matériaux les constituants

S'il est vrai que les fondations d'une maison l'enracinent solidement dans le sol, le toit quant à lui surmonte les murs et protège l'intérieur de l'édifice des conditions climatiques. D'abord perçues comme de simples charpentes protectrices contre le mauvais temps, les toitures sont devenues au fil des années des revêtements complexes ayant la possibilité d'influer sur le bilan énergétique des habitations. Leurs formes ont évolué avec le temps.

##### 1.1.1 Histoire des toitures

###### 1.1.1.1 Histoire des toitures

Entre la première toiture en peau de mammouth en 40 000 avant JC (paléolithique) en Sibérie et les toitures vertes de nos cités modernes, il y a eu un essor spectaculaire dans ce domaine (Parent, 2013). En effet, si la plus vieille toiture retrouvée fut en peau d'animaux, les populations de la préhistoire ont aussi eu recours à plusieurs autres types de matériaux naturels tels que le bois, les écorces d'arbres, la paille, etc. (Parent, 2013).

Cependant, compte tenu de l'époque ces derniers étaient encore primaires et donc moins complexes.

Durant le néolithique (8000 avant JC), on constate non seulement une certaine évolution en matière de choix de matériaux mais aussi en matière de finition. En effet, certains peuples sédentaires du Moyen-orient, notamment ceux de la vallée de l'Anatolie, par des procédés plus complexes, à leur époque, ont rendu les toitures plus étanches et surtout plus efficaces; et ce notamment au travers de toits tissés de branches et calfeutrés avec de l'argile ou du plâtre (Parent, 2013). De plus, cette période verra l'apparition des premières toitures de forme plate (Parent, 2013).

Les temps modernes ainsi que le début de la période contemporaine furent marqués par un retour aux toits plats. Par exemple, en Allemagne dans les années 1920, on assista à un encadrement de l'architecture qui résulta à l'interdiction de construire des toitures en pente, car synonyme de bourgeoisie et de l'empire de Prusse (Parent, 2013). Cependant, suite à la reconstruction durant l'après-guerre en Europe (1945-1970), on notait l'essor d'une école de pensée qui voit l'architecture comme un art et qui privilégie l'architecture cubiste, moderniste à celles traditionnelles en tuiles (Parent, 2013). De cette école, plusieurs façons de penser l'architecture ont vu le jour et le domaine de la construction des toitures en fut profondément impacté.

#### 1.1.1.2 Les toitures au Québec et plus précisément à Montréal

En ce qui concerne le Québec et particulièrement la ville de Montréal, l'histoire semble légèrement différente.

Compte tenu de son passé, l'histoire de l'architecture au Québec est le résultat du brassage en matière d'influences politiques qu'a connu la province. En effet, les influences françaises, britanniques, et nord-américaines s'entremêlent dans la conception québécoise (Histoire du Québec, 2012). Les toitures sont aussi à l'image de ce brassage.

- Le Québec

Les plus anciennes toitures au Québec sont en pente avec des versants fortement inclinés qui trahissent une certaine inspiration française (Ville de Québec, 1988). En effet, ces toits à deux versants (toits dit pignons), très populaires dans les années 1700, étaient plus faciles à construire et moins susceptibles de propager les incendies que les toits en pavillon ou en mansarde (Ville de Québec, 1988) (figure 1.1).

Les toits en mansarde furent d'ailleurs interdits en milieu urbain par des arrêtés promulgués en 1721 et en 1727 (Ville de Québec, 1988). En effet, longtemps considérés comme dangereux parce que leurs combles étaient habitables et que leur structure était construite avec une quantité de bois dépassant largement celle utilisée

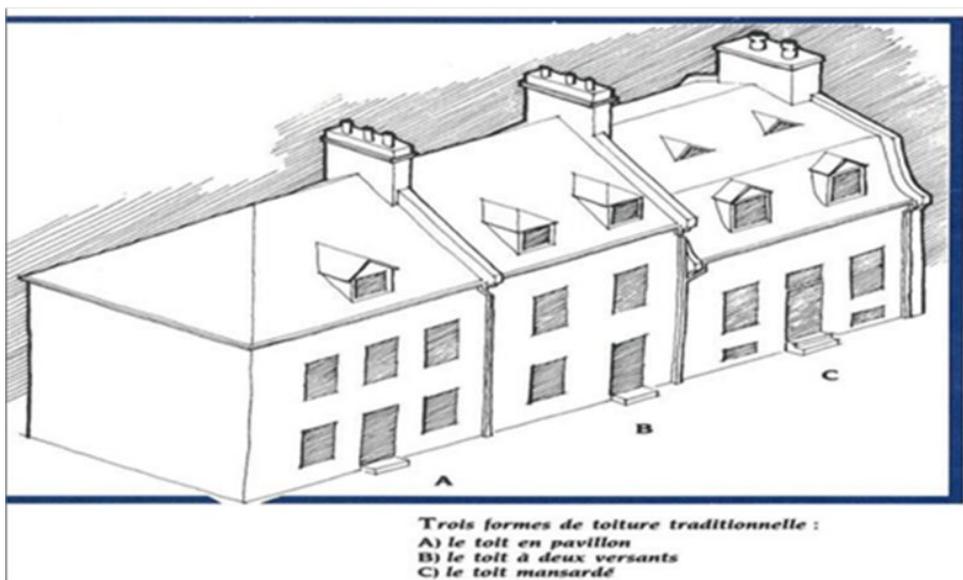


Figure 1.1. Formes de toitures traditionnelles. Source : (Ville de Québec, 1988)

dans la construction de d'autres types de toits, les toits mansardes seront finalement réhabilités autour de 1850 (Ville de Québec, 1988). Cependant, après la découverte du pétrole et de ses dérivés (goudron) autour de 1860, on observera l'apparition des toits à faibles pentes, presque plats (GPRQ, 2017). Ce sont ces derniers qui sont encore aujourd'hui prédominants dans les grandes villes de la province, car ils offrent plus de sécurité (moins de danger de chutes de neige, etc.) (Parent, 2013).

En termes de matériaux et de techniques, les premiers arrivants ont tout d'abord eu recours aux matières disponibles et abondantes du terroir pour recouvrir leurs toitures : le chaume, l'écorce et le bois (GPRQ, 2017). Le bardeau de bois a toujours été utilisé, mais on le retrouve plutôt aujourd'hui en milieu rural. Cependant, il a vite été relégué aux oubliettes au XVIIIe siècle, en raison de son manque d'étanchéité et du risque accru d'incendie qu'il présentait (GPRQ, 2017). À sa suite, on assista à l'avènement de la feuille en métal comme matériau de revêtement de toiture, qui connut une grande popularité (GPRQ, 2017). Parmi les revêtements de métal les plus populaires, on retrouve la tôle à baguettes et la « tôle à la canadienne » typique au Québec et dont l'usage se généralisa vers le milieu du XVIIIe siècle. Enfin, l'industrialisation du bâtiment apporta de tous nouveaux produits au tournant du XXe siècle. On fabriqua alors des feuilles de tôles à motifs imitant les écailles de poisson, les ardoises ou d'autres éléments (GPRQ, 2017). D'autres métaux, comme le cuivre, ont dans certains cas remplacé le fer blanc, premier métal employé, ou la tôle galvanisée apparue par la suite (GPRQ, 2017).

- Montréal

La ville de Montréal a une histoire particulière en matière de toitures. En effet, comme les autres cités québécoises, cette agglomération ainsi que ses environs ont eu pendant longtemps des toits d'inspirations françaises (toits à deux versants ou toits mansardés) (Marsolais, 2007). Par exemple, il suffit de se promener dans le Vieux Montréal pour

le constater. Cependant, à partir de 1875, le toit plat est apparu à Montréal en pleine révolution industrielle (Marsolais, 2007). Ainsi, afin d'accommoder adéquatement les ouvriers, le concept de duplex et de triplex verra le jour à Montréal. Par exemple, le duplex ouvrier se présentait sous la forme de deux maisons mitoyennes plus larges que profondes avec escaliers intérieurs et un toit plat dont l'entrée donnait directement sur le trottoir (Marsolais, 2007).

La mise en place des toits plats à Montréal permit l'apparition de nouvelles techniques. En effet, ce type de toiture permet l'usage de couches de feutre, d'asphalte, de goudron et de gravier (Marsolais, 2007). Ces derniers furent le symbole des habitations du type duplex construites en série, notamment dans les quartiers Saint-Henri et Centre-Sud de la ville (Marsolais, 2007).

Ce sont ces types de bâtisses que l'on retrouve encore dans bien des quartiers montréalais. Notre travail permettra d'identifier et de décrire les différents types de toitures encore présentes dans nos différentes zones d'études (zone de toits plats, zone de toits pignons, zone de toits mansardés).

### 1.1.2 Les formes de toitures

Avant de présenter les diverses formes de toitures, il est important de savoir et comprendre ce qui la structure réellement. Si la charpente et le pontage composent la structure de la toiture, il est important de relever que la charpente donne au toit sa forme, délimite un espace intérieur habitable et soutient le pontage et la couverture (Ville de Québec, 1988). Quant au pontage (revêtement de bois posé sur la charpente), ce dernier forme une surface sur laquelle est clouée la couverture (figure 1-2). De plus, le pontage permet notamment de stabiliser la charpente vis-à-vis des vents (Ville de Québec, 1988). Ainsi, sans ces deux éléments fonciers, il n'y a pas de toitures.

Selon le Guide du patrimoine et de la rénovation de qualité (GRPQ, 2017), les formes des toitures sont en partie dictées par les conditions climatiques d'une région, les traditions de construction, les matériaux disponibles, la destination du bâtiment et surtout l'aménagement des fonctions intérieur de celui-ci. Par exemple, l'ardoise, abondamment employée en Europe, a rapidement été remplacée au Québec par le bardeau de bois : d'une part, parce que les attaches ne pouvaient résister aux rigueurs du climat et, d'autre part, parce que l'approvisionnement était difficile, l'ardoise étant importée d'Europe (Cullen, 1990).



Figure 1.2. Charpente et toiture. (Source : roger brunvarlet.fr)

Aujourd'hui avec l'évolution des différentes techniques et les innovations en ingénierie, il n'est pas étrange d'apercevoir l'apparition de nouvelles formes ou encore d'apercevoir la persistance d'autres formes et ce, bien souvent à cause des facteurs culturels (Ville de Québec, 1988). Ainsi, les diverses formes de toitures que nous expliciterons ci-dessous sont celles que l'on rencontre le plus fréquemment dans la province.

### 1.1.2.1 Les toits plats

Comme mentionné précédemment, les toits plats (voir figure 1-3) sont apparus au Québec avec le développement massif des moulins à scie et la découverte de produits dérivés du pétrole comme le goudron (GPRQ, 2017). Il est important de savoir qu'au Québec, la toiture plate est actuellement l'une des plus répandues. Sa charpente est constituée de simples poutres de bois de dimensions plus modestes ce qui facilite la construction. Cette charpente est surmontée de multiples couches de membranes goudronnées qui assurent l'étanchéité de la toiture à laquelle on donne une faible pente vers l'extérieur ou vers le centre de la terrasse en bassin où les eaux sont évacuées par un canal (GPRQ, 2017).



Figure 1.3. Photo maison moderne à toit plat. (Source : Photo maison moderne à toit plat. (Source : maisonsconcept.com))

Bien qu'elle soit reconnue pour sa solidité, si elle est mal entretenue, l'efficacité de la toiture plate diminuera, augmentant ainsi les risques d'humidité qui causeront les problèmes de moisissures (Parent, 2013). En effet, le toit plat a l'avantage de constituer une plateforme sur laquelle aménager un jardin ou une terrasse avec meubles de jardin, barbecue, etc. Vous pouvez y étendre des panneaux solaires. Aussi, il n'y a aucune perte d'espace du fait qu'il n'y a pas d'entre toits ou de grenier (Parent, 2013). Le

principal inconvénient du toit plat, qui fait l'avantage du toit en pente, est qu'il peut poser des problèmes d'étanchéité et d'infiltrations d'eau. L'absence de pente ne permet pas une bonne évacuation des eau de pluie et de la neige qui fond au printemps (Parent, 2013). Elle est encore très répandue au Québec et notamment à Montréal.

#### 1.1.2.2 Les toits à deux versants (pignons)

Au Québec, les toitures les plus anciennes sont celles à deux versants (voir figure 1-4), que l'on appelait aussi à pignons ou à deux égouts (GPRQ, 2017). La pente plus ou moins prononcée était conditionnée, selon la région, par la sévérité du climat et les risques d'accumulation de neige. Une toiture plus abrupte se déchargeait ainsi plus facilement. Cette toiture est une dérivée de la toiture en pente (Parent, 2013).



Figure 1.4. Maison à deux versants (pignon) 3D. (Source: [http://www.upton.ca/wpcontent/uploads/2013/04/MRC\\_Acton\\_Fiches\\_architecturale](http://www.upton.ca/wpcontent/uploads/2013/04/MRC_Acton_Fiches_architecturale))

Les inconvénients d'un toit en pente ou en pignon sont multiples. Premièrement, l'espace triangulaire de l'entre toits ou du grenier est une perte d'espace habitable.

Deuxièmement, son entretien présente un risque d'accident. Plus à la verticale, sa superficie est davantage exposée aux dommages causés par le vent (Parent, 2013). Bien que présente dans certains quartiers des grandes villes québécoises, on la rencontre surtout en région.

### 1.1.2.3 Les toits mansardes

Le toit mansarde (voir figure 1-5) doit sa renommée à l'architecte français François Mansart, qui en popularisa l'emploi au XVIIe siècle (GPRQ, 2017). Le grand avantage du toit à la mansarde réside dans les possibilités qu'il offre d'utiliser d'une façon optimale l'espace intérieur (Parent, 2013). La région de Baie-Saint-Paul, par exemple, offre une abondance de toitures à la mansarde.

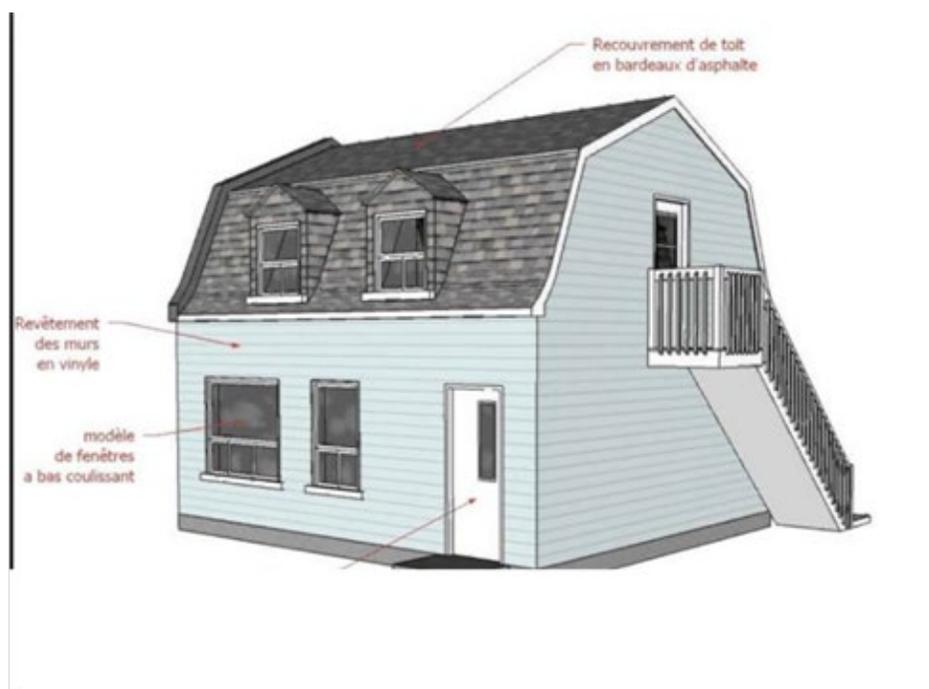


Figure 1.5. La maison traditionnelle Québécoise. (Source : [http://www.upton.ca/wpcontent/uploads/2013/04/MRC\\_Acton\\_Fiches\\_architecturales\\_FINAL\\_1.compressed.pdf](http://www.upton.ca/wpcontent/uploads/2013/04/MRC_Acton_Fiches_architecturales_FINAL_1.compressed.pdf))

Au cours de la première période de son usage, au XVII<sup>e</sup> siècle, le toit mansarde était recouvert d'ardoise ou de bardeau de bois (GPRQ, 2017). Puis, à l'époque de son retour à la mode, dans la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, on a eu recours au recouvrement de métal : la tôle à baguettes pour les terrassons de pente faible et la tôle à la canadienne pour le brisis dont la pente est plus prononcée et présente moins de risques d'infiltration d'eau (GPRQ, 2017).

#### 1.1.2.4 Les toits en croupes

Ce modèle de toiture exige une charpente plus complexe, la croupe représentant chacune des extrémités d'une toiture à deux versants auxquelles on donne une pente vers l'intérieur. Ainsi la toiture présente quatre versants, les longs pans des façades et les petits versants des extrémités. Beaucoup de maisons de l'île d'Orléans (ville de Québec) ont un toit de cette forme (GPRQ, 2017).

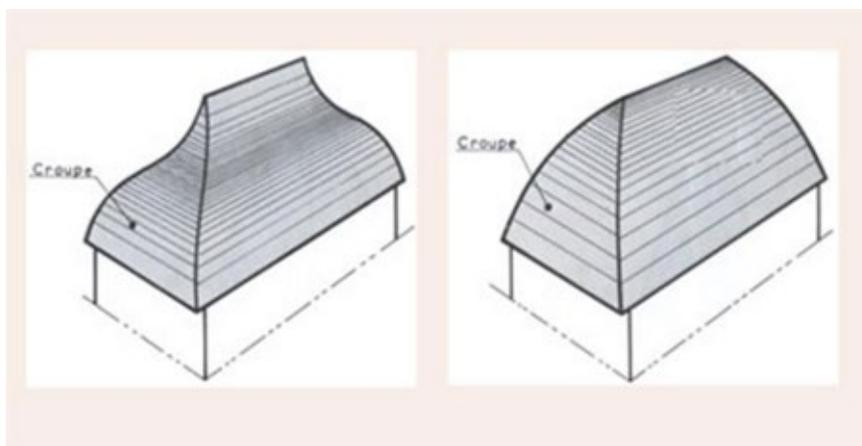


Figure 1.6. Modèles de toitures en croupe (3D). (Source : <http://www.etoiture.com/particuliers/informations/lexique/croupe.php>)

### 1.1.3 Histoire des toitures

Tout comme il y a différentes formes de toits, nous notons aussi différents types de toitures. Les types de toitures font référence en partie aux revêtements. Mais au-delà des revêtements, les types de toitures font surtout allusions aux différents matériaux qui constituent tant la charpente, le pontage que le revêtement (GPRQ, 2017). Les revêtements ne constituent que la partie visible de l'iceberg, et donc habillent ou constituent très souvent le pontage des toitures (Ville de Québec, 1988). Il y a différentes familles de revêtements. Les plus fréquemment utilisées sont : les bitumes, les métaux, les plastiques, les revêtements naturels et les revêtements recyclés (Ville de Québec, 1988). Chacun de ces revêtements possède des caractéristiques qui lui sont propres ainsi que des avantages et des inconvénients. Cependant, nous ne présenterons que quatre grandes familles.

#### 1.1.3.1 Toitures avec revêtements naturels

Pendant de nombreuses décennies, les premières toitures étaient faites de matériaux et de ressources naturelles tels que le chaume, les écorces et le bois (GPRQ, 2017). Et malgré la technique et l'arrivée des bardeaux de métal, l'usage de ces matières naturelles n'a pas complètement été délaissé. Ainsi, de nos jours nous constatons encore des habitations en milieu rural en bardeaux de bois de cèdre (GPRQ, 2017). Au-delà du bois, l'ardoise et surtout le gravier sont aussi utilisés en tant que matériaux pour habiller les toits (Soumission Rénovation, 2018).

- Bardeau de bois

Disponibles en plusieurs essences, un peu comme pour les différents types de plancher, les bardeaux de bois ont une bonne durabilité et une bonne résistance. En effet, elle offre une bonne imperméabilité en raison de leur torréfaction (Soumission Rénovation, 2018). L'une de ces faiblesses est qu'elle est très inflammable et elle nécessite

beaucoup de prudence, car un incendie est vite arrivé (GPRQ, 2017). De plus, dépendamment de la surface des bardeaux (rugueuse ou lisse), elle demande un incessant entretien de la teinture. Le bardeau de cèdre est le plus utilisé.

- Ardoise

Roche métamorphique caractérisée par un excellent clivage parallèle, l'ardoise contient des minéraux très résistants à l'absorption d'eau, aux intempéries et à l'abrasion comme le mica et le quartz (Cullen, 1990). L'ardoise a été et demeure un des revêtements du type naturel qui s'avère très efficace. En effet, elle est respectueuse de l'environnement, car elle isole très bien la maison et limite donc la consommation de chauffage. De plus, elle a une durée de vie de près de 100 ans (Cullen, 1990).

Cependant, l'ardoise s'avère coûteuse à produire, mais elle est également lourde. Le poids de l'ardoise accroît les frais de transport et rend sa pose difficile comparativement aux matériaux usinés. C'est pour ces raisons que l'ardoise a cédé le pas devant ces matériaux au XXe siècle (Cullen, 1990).

#### 1.1.3.2 Les toits verts

Les toits verts ont connu un boom ces dernières années en raison des îlots de chaleur dans bon nombre de cités Occidentales (Giguère, 2009). En effet, ils permettent de diminuer la pollution et les îlots de chaleur, en plus d'augmenter l'isolation du toit, ce qui a un impact net sur la consommation d'énergie relative au chauffage (Soumission Rénovation, 2018). Par exemple, la Ville de Chicago a mis sur pied un programme dénommé « la City of Chicago's environmental programs ». Dans le cadre de ce programme, un projet de réduction d'îlot de chaleur urbain a donné lieu à l'aménagement d'un toit vert d'une superficie de 3066 m<sup>2</sup> sur l'hôtel de ville (Boucher, 2006). Parmi tous les types de revêtements, les toits verts font partie de ceux qui sont

les plus écologiques. On les retrouve essentiellement sur les toits de formes plates. Les toits verts sont une alternative aux bois ou encore à l'asphalte (Boucher, 2006).

Cependant, jugés très pesant, ils demandent assurément un renforcement de la structure du toit de la maison. De plus, ils demandent beaucoup d'entretien (Soumission Rénovation, 2018).

#### 1.1.3.3 Toitures avec revêtements bitumineux

Les toitures avec les revêtements du type bitumineux sont les plus répandus au Québec. Le bardeau à base d'asphalte est le plus utilisé dans la province, et près de 90 % des toits dans la région de Montréal en sont recouverts (SÉMERY, 2012). Cependant, les bardeaux de fibre de verre sont de plus en plus préférés au bardeau d'asphalte, car, nécessitant moins de bitumes lors de sa fabrication, il est moins coûteux à produire (SÉMERY, 2012). Dans la même famille de produits, on retrouve aussi la membrane élastomère.

- Membrane d'asphalte multicouche ou gravier

Il est important de savoir que lorsque l'on parle de la membrane d'asphalte, il s'agit en réalité de feutre qui a été saturé dans de l'asphalte liquide, entre chacune de ses couches. Le tout est par la suite recouvert de gravier (Soumission Rénovation, 2018). Ce type de revêtement est surtout utilisé pour le recouvrement des toits plats. Le gravier est un matériel de choix qui permet de préserver la couche étanche de goudron en dessous des fissures (Soumission rénovation, 2018).

Son principal avantage est qu'il est moins dispendieux que la plupart des revêtements (Soumission Rénovation, 2018). En matière d'inconvénient, l'asphalte est plus lourd et à une durée de vie moindre. De plus, il nécessite un entretien constant car le gravier peut facilement se retrouver dans le drain (Soumission rénovation, 2018)

- Membrane élastomère ou bicouche (bitume modifié)

Il s'agit d'une membrane double de bitume modifié. Très utilisée par les couvreurs et surtout en vogue auprès des consommateurs à cause de son prix, la membrane élastomère est surtout installée sur les toits plats (Soumission Rénovation, 2018). Elle a une bonne durabilité dans le temps. Cependant, il existe un fort risque d'incendie lors de sa pose à cause de l'usage des chalumeaux. De plus, elle est un dérivé de l'asphalte donc n'est pas forcément écologique (Soumission Rénovation, 2018).

Aussi, on l'utilise également comme membrane sous-couche, pour les toits en pente qui ont un autre type de recouvrement, comme le bardeau d'asphalte (Soumission Rénovation, 2018).

#### 1.1.3.4 Toitures avec revêtements de type métalliques

L'usage des métaux à la fin du 18<sup>e</sup> siècle dans le secteur des toitures a permis de passer des toitures en bardeaux de bois à celle métallique. Cette dernière fut assez populaire avant l'arrivée des nouvelles techniques industrielles durant l'après-guerre (GPRQ, 2017). Le métal le plus utilisé est l'aluminium (Sémery, 2012).

- Les tôles

Les revêtements en tôles sont très intéressants car elles sont de meilleure qualité que la plupart des autres revêtements mentionnés ci-dessus (Soumission Rénovation, 2018). La tôle est simple à entretenir, elle est très durable et surtout elle est à l'épreuve des intempéries (Soumission Rénovation, 2018). Cependant, elle s'avère très dispendieuse à la base et encore plus quand il faut la remplacer.

### 1.1.3.5 Toitures avec revêtements en plastique

Pour ce qui est des revêtements de toiture en plastique, ils permettent des imitations d'ardoises, de bardeau de cèdre et de terracotta, mais sans avoir à payer le prix fort (Sémery, 2012). En revanche, ça ne fait pas longtemps qu'on installe ces produits (Soumission Rénovation, 2018).

- TPO (thermoplastiques polyoléfinés) et EPDM (terpolymère éthylène-propylène-diène)

Ces deux revêtements sont issus de synthèses chimiques. En effet, le TPO a une base de vinyle, tandis que le l'EPDM a une base en caoutchouc synthétique (SOUMISSION RÉNOVATION, 2018). Ces matériaux sont très utilisés pour les toits plats, ou pour les toits verts. De plus, d'une part ils ont une très bonne résistance aux conditions climatiques (soleil, gel, pluie, vent, etc.). En effet, durables et légers, ils sont également résistants contre les moisissures et ne nécessitent pas ou très peu d'entretien. D'autre part, ce sont surtout des membranes blanches, donc elles ne conservent pas la chaleur du soleil et contribuent ainsi à la réduction des îlots de chaleur (Soumission rénovation, 2018).

### 1.1.3.6 Conclusion

Cette partie nous a permis de recenser la plupart des formes et types de toits qu'on trouve au Canada et plus particulièrement au Québec (voir les tableaux 1-1 et 1-2). Chacune d'elles comporte divers avantages et inconvénients. Cependant, pour la partie analyse de notre travail, nous allons nous concentrer uniquement sur les types et formes de toits qui sont présentes dans nos différentes zones d'études à Montréal.

Tableau 1.1. Tableau récapitulatif des formes de toitures avec leurs avantages et inconvénients respectifs

Formes de toits	Année d'apparition	Localisation	Avantages	Inconvénients
<b>Toit Plat</b>	1860	Partout au Québec, surtout dans les grandes villes.	Permet l'aménagement d'un jardin, terrasse ou de panneaux solaires	Si mal entretenue, risque accrue d'humidité.
<b>Toit à deux versants (pignon)</b>	Autour de 1700	Surtout en région, présence moyenne dans les grandes villes.	Facile à construire.	Permet une accumulation de neige.
			Permet de ne pas propager les incendies.	Perte d'espace habitable à cause de sa forme.
				Exposée aux dommages causés par le vent.
<b>Toits mansarde</b>	1850	Surtout en région, présence moyenne dans les grandes villes.	Permet d'optimiser l'espace intérieur	Propageait facilement le feu entre bâtiments et fut interdit pendant un certain temps.

Tableau 1.2. Tableau récapitulatif des types de toits ainsi que de leurs avantages et inconvénients

Catégorie de toit	Type de toit	Nature du toit	Sur quelle forme de toit	Avantages	Inconvénients
Toitures avec revêtement en plastique	TPO	Base en Vinyle	Toits Plat	Peu d'entretien. Durable et léger. Résiste à la moisissure. Possède un faible albédo	
	EPDM	Base en caoutchouc synthétique			
Toitures avec revêtements de type métallique	Tôles	Métal	Toit Pignon Toit Mansarde	Simple à entretenir. A l'épreuve des intempéries.	Dispendieux au moment de la remplacer
Toitures avec revêtement bitumineux	Membrane d'asphalte multicouches ou gravier	Feutre d'asphalte liquide + gravier	Toit Plat	Moins dispendieux que la plupart des revêtements.	L'asphalte a une durée de vie moindre. Entretien constant.
	Membrane élastomère ou bicouche (bitume modifié)		Toit Plat Toit à Pente (dérivé des Pignons)	Bonne durabilité dans le temps	Pas écologique. Risque d'incendie durant sa pose.
Toitures avec revêtements naturels	Bardeau de bois	Bois	Toit Pignon Toit Mansarde	Bonne durabilité et résistance	Risque d'incendie Entretien constant.
	L'ardoise	Mica + quartz	Toit Mansarde Toit Plat Toit Pignon	Isole bien. Durée de vie de 100 ans et bon isolant	Couteuse Pose difficile car très lourd
	Toits verts	Bac à plantes	Toit Plat	Écologique. Réduit les ICU	

## 1.2 Réflectivité (albédo) des toitures et bilan énergétiques

### 1.2.1 Le rayonnement solaire (RS)

Le rayonnement solaire (RS) pourrait se définir comme l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il se compose donc d'ultraviolets (UV), de la lumière visible, mais également d'ondes radio en plus de rayons cosmiques (Bessemoulin et Olivieri, 2000). Ce dernier se propage à la vitesse de la lumière et il lui faut en moyenne 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre l'atmosphère terrestre (Bessemoulin et Olivieri, 2000).

Le RS transporte de la lumière et aussi de l'énergie, qui est indispensable à la vie sur terre (Bessemoulin et Olivieri, 2000). Cette énergie est transportée sous forme d'un rayonnement de nature électromagnétique et de longueur d'onde comprise entre 0,1 et 100 micromètres (Mayer, 2018).

Compte tenu du fait qu'il traverse l'atmosphère terrestre, l'intensité du RS est réduite et sa distribution spectrale est modifiée par l'absorption et la diffusion (Bessemoulin et Olivieri, 2000). En effet, en fonction de la taille des particules et gaz présent dans l'atmosphère, ce rayonnement peut être perturbé, absorbé voire bloqué et tout ceci au travers des mécanismes de diffusion et d'absorption (Ressources Naturelles Canada, 2016). Il est important de savoir qu'une grande partie des longueurs d'onde de l'infrarouge et des ultraviolets sont absorbés. Par exemple, selon Ressources Naturelles Canada (2016) le bioxyde de carbone (gaz connu pour sa contribution à l'effet de serre) fait partie de ces gaz qui absorbent grandement le RS dans la portion infrarouge thermique et emprisonne la chaleur dans l'atmosphère.

De ce fait, ce n'est qu'une portion du RS qui arrive à la surface des corps sur la terre et qui peut ainsi interagir avec ceux-ci. Cependant, la majorité de ces corps n'entre en « réaction » qu'avec certaines longueurs d'ondes électromagnétiques du RS. Par exemple,

selon (Varlet-Granchet, et *al.*, 1989) le couvert végétal ne réagit qu'avec les longueurs d'onde comprises entre 350 et 750 nm environs (spectre électromagnétique) et avec une efficacité variable. À la suite de son interaction avec les particules dans l'atmosphère, le RS qui parvient à la surface de la couche terrestre comprend : 6,3 % d'UV 42,5 % de lumière visible et 51,2% d'infrarouge (IR), qui sont les porteurs majeurs de l'énergie thermiques (Énergie Facteur 4, 2018). Ce sont ces dernières longueurs d'onde qui interagissent avec les différents corps sur la surface terrestre. Ainsi, de l'énergie est échangée en permanence entre les corps et le champ de rayonnement (soleil) par deux processus : l'émission et l'absorption (Taine et *al.*, 2014).

#### 1.2.1.1 Les définitions

- L'émission, l'absorption et la réflexion

Parmi les différentes interactions existant entre le RS et les corps à la surface de la terre, on note : l'absorption, l'émission ou encore la réflexion (figure1-7).

Selon Taine, et *al.*, (2014), l'émission spontanée de rayonnement est une conversion d'énergie matérielle (énergie de vibration-rotation, énergie électronique, énergie des phonons, etc.) en une énergie radiative (photons). Pour UVED (2008), la notion d'émission renvoie à tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu (0° Kelvin équivaut à - 273°C) et qui émet un rayonnement électromagnétique issu de l'agitation thermique des molécules, et dont la longueur d'onde est fonction de la température. Par exemple, lorsqu'un corps comme le soleil nous émet de l'énergie et de la lumière en rayonnement électromagnétique, ce dernier vient de perdre une partie de son énergie propre.

Tandis que, l'absorption de rayonnement consiste en une conversion inverse d'énergie radiative en énergie matérielle (Taine, Enguechard, et Lacona, 2014)). Ou encore l'absorption pourrait se définir comme la capacité qu'ont certains corps de retenir une

portion ou voire toute la totalité de l'énergie du rayonnement qu'ils reçoivent (Ressources Naturelles Canada, 2016). Il est intéressant de noter que contrairement à ce qui se passe dans l'atmosphère, transparente aux rayonnements visibles et proche infrarouge, les surfaces naturelles elles, absorbent une partie de ces rayonnements (UVED, 2008). Par exemple, un corps "noir" absorbe tous les rayonnements (UV, visible ou IR) et s'échauffe de la même façon et ce peu importe s'il reçoit 1W d'UV, 1 W d'IR ou 1W de rayonnement visible (Énergie Facteur 4, 2018).

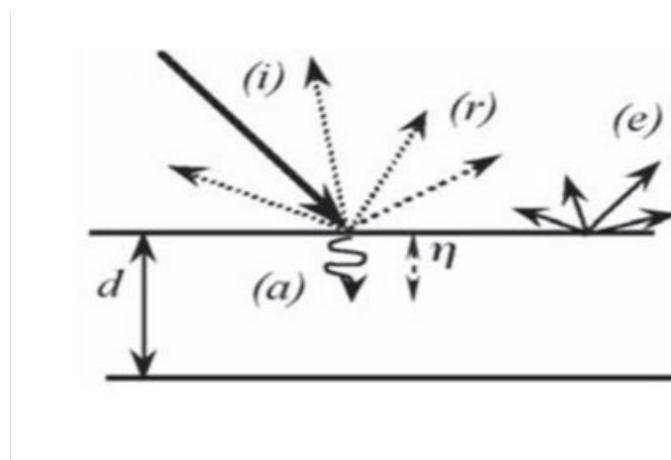


Figure 1.7. Interaction rayonnement et corps opaque. (Source : Taine, Enguehard, et Lacona, 2014 )

Selon UVED, la notion de réflexion dans le domaine des ondes électromagnétiques est un processus où une partie de l'énergie issue du rayonnement change de direction (effet rebond) lorsque celui-ci entre en contact avec une surface donnée (UVED, 2008). Ce processus se veut essentiel car il permet en télédétection de faciliter l'identification des surfaces sur lequel le rayonnement rebondit. La direction du rayonnement réfléchi varie en fonction de la rugosité des surfaces naturelles (UVED, 2008). De plus, selon, Ressources Naturelles Canada, (2016), la façon dont une cible réfléchit le rayonnement dépend de l'amplitude de la rugosité de la surface par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident. Ainsi, une surface lisse produit une réflexion spéculaire, c'est-à-dire que toute l'énergie est redirigée dans une même direction (comme c'est le cas

d'un miroir). La réflexion diffuse se produit quand la surface est rugueuse, ce qui redirige l'énergie uniformément dans toutes les directions. La plupart des objets de la surface terrestre se situent entre ces deux extrêmes.

Cependant, il est important de préciser qu'un corps opaque ne transmet aucune fraction d'un rayonnement incident ( $i$ ) ; ce dernier est alors soit absorbé ( $a$ ), soit réfléchi ( $r$ ) (figure 1-7) (Taine, Enguehard, et Lacona, 2014, 2014). Plus restrictivement, nous définirons un corps opaque (par exemple les toitures) comme un milieu tel que la profondeur  $\eta$  de pénétration du rayonnement est faible devant une dimension caractéristique du système :  $d$ . Dans la mesure où un corps opaque absorbe du rayonnement ( $a$ ), il est susceptible d'en émettre ( $e$ ), en tout point de sa frontière. Le phénomène de réflexion peut être mesuré par un coefficient de réflexion ou encore par l'albédo.

- L'albédo ou la réflectivité

Selon (Taillet, Fevre, et Vilain, 2009), l'albédo désigne la capacité qu'à un matériau de réémettre un rayonnement qui lui est incident. De même, Boiselle (2010), définit l'albédo comme la capacité d'un matériau à réfléchir la lumière reçue. Tandis que pour Bozonet (2005), l'albédo est la résultante de la fraction du RS incident, qui est renvoyée par réflexion et diffusion. En effet, pour lui, celle-ci correspond en réalité au rapport du RS réfléchi et du RS reçu et ce sans tenir compte de la surface réelle de l'objet (Bozonet, 2005).

L'albédo se veut très important, car il permet de caractériser la réflexion d'une surface (Ourda, 2008). Ainsi, un albédo bas (couleur foncée) implique des températures de surface plus élevées puisqu'une plus grande quantité d'énergie est absorbée. Par exemple, le goudron qui est foncé à un albédo de 0.03 à 0.18 tandis que l'asphalte a un indice d'albédo de 0.05 à 0.2 (figure 1-8) (Anquez et Harlem, 2011). Aussi avec les

valeurs issues du tableau 1-3 on constate que l'asphalte absorbe une part majeure du rayonnement solaire qu'il reçoit comparativement aux autres matériaux. À l'inverse, un albédo élevé (couleur claire) entraîne des températures plus fraîches, par exemple les surfaces de couleur blanche ont un albédo de 0.50 à 0.90 et les toits réflecteurs de 0.60 à 0.70 (Anquez et Harlem, 2011, 2011). Ainsi, l'albédo dépend de la couleur et de la rugosité de la surface du matériel en question.

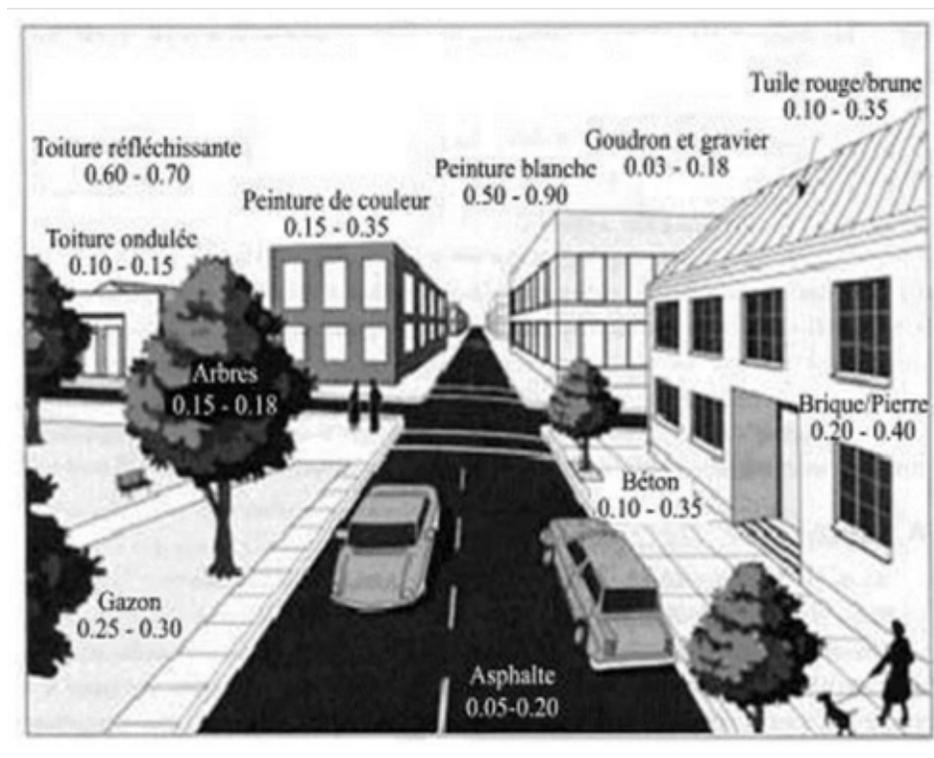


Figure 1.8. Valeurs de l'albédo de différentes surfaces. (Source: [http://collectivitesviables.org/articles/ilots de chaleur urbains.aspx](http://collectivitesviables.org/articles/ilots%20de%20chaleur%20urbains.aspx))

Tableau 1.3. Albédo des surfaces urbaines. (Source : (Mathieu, 2015))

<b>MATÉRIAUX</b>		<b>ALBÉDO</b>
MUR	BETON	<b>0,10-0,35</b>
	BRIQUES	<b>0,20-0,40</b>
	PIERRES	<b>0,20-0,35</b>
TOITURES	TUILES	<b>0,10-0,35</b>
	ARDOISE	<b>0,10</b>
	GOUDRON ET GRAVIER	<b>0,08-0,18</b>
	ASPHALTES	<b>0,05-0,20</b>

- L'émissivité

Selon Kellerits (2017), l'émissivité décrit la capacité d'un matériau à émettre et à absorber l'énergie radiative. Pour Giguère (2009), l'émissivité est la propriété d'un matériau à diffuser l'énergie qu'il accumule. L'énergie qui n'est pas diffusée contribue au réchauffement des surfaces. Ainsi, les objets réels absorbent et réémettent une quantité radiative toujours inférieure à celle du corps noir à la même température. Or, un « corps noir » désigne un objet idéal dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température, autrement dit, il réémet la totalité de son énergie à toutes les longueurs d'onde.

Aussi, l'émissivité d'un objet dépend de la nature du matériau et de son état de surface (Kellerits, 2017). Les objets non métalliques et opaques ont généralement des émissivités supérieures à 80%. L'émissivité d'un métal varie entre 5 et 90% (Kellerits, 2017). Les métaux brillants ou très réfléchissants ont une émissivité plus faible. Il est important de souligner que la plupart des matériaux de construction et certaines

surfaces en milieu urbain ont une émissivité de 0,9 environ (voire tableaux 1-4 et 1-5), ce qui signifie qu'ils rayonnent 90% du maximum théorique d'énergie radiante correspondant à une température donnée (Bekkouche, et *al.*, 2012). De plus l'émissivité est très souvent dépendante de la longueur d'onde, en particulier pour les métaux. Il est important de savoir que l'émissivité tend à augmenter avec l'élévation de température, parce qu'il tend à piéger principalement les longueurs d'ondes porteuses de chaleur (infrarouge) (CNRS, 1996).

Tableau 1.4. Émissivités de surface de certains matériaux. (Source : <https://slideplayer.fr/slide/10609808/>)

<b>MATÉRIAUX DE SURFACES</b>	<b>ÉMISSIVITÉ</b>
ASPHALTE ET GOUDRON	<b>0,93-0,97</b>
BARDEAU D'ASPHALTE	<b>0,96-0,97</b>
CIMENT	<b>0,71-0,90</b>
GRAVIER	<b>0,92</b>
ALUMINIUM	<b>0,05</b>
TÔLE ONDULÉE	<b>0,13-0,28</b>
ACIER GALVANISÉ	<b>0,95</b>
ACIER GALVANISÉ OXYDÉ	<b>0,8</b>
CUIVRE	<b>0,96</b>
ARBRES, ARBUSTES ET HERBES	<b>0,97-0,99</b>
HERBES SEC	<b>0,93</b>
MILIEUX HUMIDES	<b>0,95-0,99</b>
SOL À NU	<b>0,92</b>
EAU CLAIRE	<b>0,98</b>

- La rugosité / la diffusivité / l'effusivité
  - La rugosité

La rugosité est le résultat de la modification microgéométrique d'une surface, provoquée par le bombardement intensif de cette surface par des projectiles (Surfanet, 2018). De même, selon le dictionnaire Larousse 2018, le terme rugosité désigne le caractère ou l'état rugueux (couvert d'aspérité) d'une surface. La rugosité est une caractéristique physique de la surface. La rugosité des matériaux aura également un impact sur le comportement du rayonnement (Mathieu, 2015). En effet, les matériaux possédant une forte rugosité ont tendance à réfléchir le rayonnement solaire dans tous les sens, engendrant de ce fait leur absorption par les objets environnants, tandis que les matériaux lisses réfléchissent de façon directe, vers le ciel (Bigorgne, 2012).

Tableau 1.5. Valeurs d'émissivité pour des surfaces rencontrées en milieu urbain. (Source : (Mathieu, 2015))

<b>SURFACES</b>	<b>ÉMISSIVITÉ e (-)</b>
ASPHALTE	<b>0,95</b>
BETON	<b>0,71-0,91</b>
AIRES URBAINES	<b>0,85-0,96</b>
SOL SEC À MOUILLÉ	<b>0,90-0,98</b>
PELOUSE HAUTE À BASSE	<b>0,90-0,95</b>

- La diffusivité

La diffusivité thermique pourrait se définir comme étant la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps (Écobati, 2015). De même, selon Netsch (2018) la diffusivité thermique décrit comment un matériau réagit rapidement à une variation de température. En effet, ce bouleversement au niveau physique dépend de la

capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à stocker la chaleur (capacité thermique) (Netzsch, 2018). Dès lors, la diffusivité thermique n'est que l'illustration d'une propriété spécifique des matériaux caractérisant la conduction de chaleur non constante. Il est important de préciser que plus la valeur de la diffusivité thermique est faible, plus la conduction de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur est arrivée sur une face et le moment où elle atteindra l'autre face sera importante (Écobati, 2015).

- L'effusivité ou capacité thermique

L'effusivité est la capacité qu'a un matériau d'absorber plus ou moins rapidement un apport de chaleur (Écobati, 2015). Cette capacité se caractérise par la sensation de chaud ou de froid qu'il donne à ce dernier. En effet, plus la valeur d'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe rapidement un important flux d'énergie sans pour autant se réchauffer en surface (métal, pierre, etc.) (Écobati, 2015). Tandis qu'une valeur d'effusivité faible révèle que le matériau se réchauffe rapidement en surface en absorbant peu de chaleur (isolant, bois) (Écobati, 2015). Il est important de mentionner que l'effusivité est une composante de l'émissivité, car elle permet de caractériser l'absorption de chaque matériau.

#### 1.2.1.2 L'importance de l'albédo et de l'émissivité des toits sur la thermique des bâtiments

En termes de bâtiment, le toit, avec sa grande superficie, est l'une des parties les plus longuement exposées au RS. Il est donc en grande partie responsable de transférer le flux de chaleur qu'il reçoit au reste du bâtiment. En effet, selon Rosenfield et al., (1995), lorsqu'une surface (toiture) non ombrée et avec un bas albédo est longuement exposée à la lumière du soleil, celle-ci devient très chaudes à son tour, et contribue à réchauffer

le bâtiment et l'air ambiant. Dès lors, si l'albédo du toit est important, l'air à son niveau devient plus frais et plus dense (Rosenfield et al., 1995).

De plus, selon l'étude menée par Prado et Ferreira, 2005, il semble que certains matériaux constituant les toitures, ont des performances variables en matière d'albédo et d'émissivité. Ce rapport démontre surtout que seuls les toits en céramique, de couleur blanche et rouges (forte teneur en albédo), atteignent des températures de surface plus basses que celles de l'air. Tandis que, les matériaux métalliques, avec des valeurs d'albédo d'environ 55 % ont montré des températures de surface beaucoup plus hautes (Prado et Ferreira, 2005).

Dès lors, il devient essentiel d'examiner l'efficacité des indices d'albédos et d'émissivités pour les matériaux afin de bien orienter les particuliers dans leurs choix de toits. Par exemple, aux États-Unis d'Amérique, il existe des études qui prennent en considération l'inclusion de règlement pour déterminer des paramètres limites de réflectivité et émissivité. Par exemple, on les retrouve au sein de matériaux utilisés dans la création de toits des bâtiments commerciaux et industriels, qui d'habitude demandent beaucoup d'énergie (Prado et Ferreira, 2005, 2005). De même, Rosenfield et al., (1995) abondent dans le même sens, car leur article dévoile que 20 à 40% des énergies directes peuvent être économisées en augmentant l'albédo du toit d'un seul bâtiment. Or, qui dit gain d'énergie dite aussi perte en matière de chaleur, donc réduction de la température au niveau du toit.

Cependant, même si l'albédo semble avoir un rôle majeur dans la captation et la diffusion de l'énergie issue du RS, il n'en reste pas moins qu'il s'avère parfois insuffisant. En effet, avec l'âge et la durée d'utilisation, la réflectivité des toits tend à s'amenuiser comme le souligne (Brezet et Akbari, 1997). Une étude menée par Brezet et Akbari sur 10 toitures en Californie pour surveiller l'effet de l'âge sur l'albédo des toits, révèle que la réflectivité des matériaux (surtout ceux avec des membranes claires) tend

à diminuer d'environ 15% pendant la première année d'utilisation (1997). Ainsi, Brezt et Akbari, ont déduit que l'accumulation des saletés peut altérer la performance des toits à haut albédo (1997). Bien que, le lavage des toits avec du savon soit efficace pour restaurer l'albédo original, ces auteurs suggèrent qu'il serait cependant utile de développer des membranes recouvrant à haut albédo et résistante à la saleté (Brez et Akbari, 1997).

Le radiant d'émissivité des toits, est aussi une donnée importante surtout pour les bâtiments qui sont longuement exposés au soleil (Kellerits, 2017). Selon Kellerits (2017) plus la toiture est exposée, plus le choix de ses composantes devient essentiel, et ce parce que l'émissivité propre aux différents matériaux la constituante augmente généralement avec la température (Kellerits, 2017). Par exemple, lorsqu'un matériel de type métaux lourds (asphalte, béton, etc.) est longuement exposé au soleil, cette dernière offre un radiant d'émissivité suffisamment élevé, qui conduit donc à une considérable absorption d'énergie au niveau du toit. Ce qui aura pour effet, d'influer sur le confort thermique du bâtiment en général (Kellerits, 2017). De plus, l'usage de matériaux de construction à faible émissivité contribue à réduire les échanges de chaleur entre les parois des toitures et leurs cavités internes (Bekkouche, et al., 2012). Ceci peut être justifié par le fait que l'échange de chaleur par rayonnement est proportionnel à l'émissivité des surfaces intérieures (Bekkouche, et al., 2012).

### 1.2.2 Comportement thermique des toitures

Les toits comme tous les autres objets ont certaines propriétés thermiques qui les distinguent. En effet, parler du comportement thermique des toitures revient à présenter la somme des différentes interactions simultanées existant entre la toiture, le bâtiment portant cette toiture, le milieu environnant et le RS. Ses différentes interactions font appel aux principes de réflectivité (albédo), de conductibilité (diffusion et effusivité thermique) et d'émissivité (absorption) qui ont été exposés dans la partie précédente (voir figure 1-9). Néanmoins, il est important de préciser que les modalités des

interactions et transferts d'énergie au sein de la toiture, notamment entre l'intérieur et l'extérieur de celle-ci varient en fonction de sa morphologie, de son orientation, ainsi que de l'organisation des espaces environnants (Kaboré, 2015). En effet, les transferts d'énergie sont essentiellement des échanges de chaleur. Le principal mode de transfert de chaleur rencontré au sein de parois opaques comme les toits est la conduction, (Kaboré, 2015). De ce fait, de nombreuses propriétés thermo-physiques (la conductivité thermique, la capacité thermique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique) interviennent dans ce mode d'échange thermique. La diffusivité, l'effusivité et la capacité thermique nous renseignent de façon précise sur la conduction de la chaleur à l'échelle des toitures et des matériaux les constituants. Par exemple, près de 15 % de l'énergie solaire absorbée par le toit est diffus, tandis que 85 % de cette énergie sont transmis (Herde et Liébard, 2004) (voir figure1-8). Ceci dit, il est important de rappeler que le premier apport d'énergie au niveau de la toiture est le RS. Sans RS, il est impossible de parler d'échanges thermiques au sein du toit. De plus, concernant les échanges par rayonnement, il est essentiel de comprendre que lorsqu'il y a incidence sur une paroi, le flux solaire est à son tour réfléchi, absorbé et transmis (voir figure1-9), suivant les caractéristiques de surface de cette dernière (réflectivité, absorptivité, transmittivité) (Kaboré, 2015). De ce fait, on peut affirmer que le flux solaire réfléchi dépend en partie des facteurs de réflexion solaire des matériaux constituant la paroi et de son albédo (ou réflectivité), et qui est essentiellement en lien avec la couleur (Kaboré, 2015). En effet, le noir ne réfléchit rien mais absorbe tout, tandis que le blanc réfléchit tout et n'absorbe rien (Ourda, 2008). Par exemple, un matériel comme l'asphalte a une forte capacité d'absorption, car c'est un corps de couleur noire, tandis que sa propension à réfléchir (albédo) se veut très faible.

En résumé, lorsque le RS atteint la toiture, ce dernier peut dépendamment de la nature des matériaux constituant le toit, soit absorber (émissivité) une grande partie de ce flux solaire ou simplement le réfléchir (albédo). Dès lors, quand le rayonnement solaire est absorbé par la paroi, ce dernier se transforme en chaleur et élève la température de

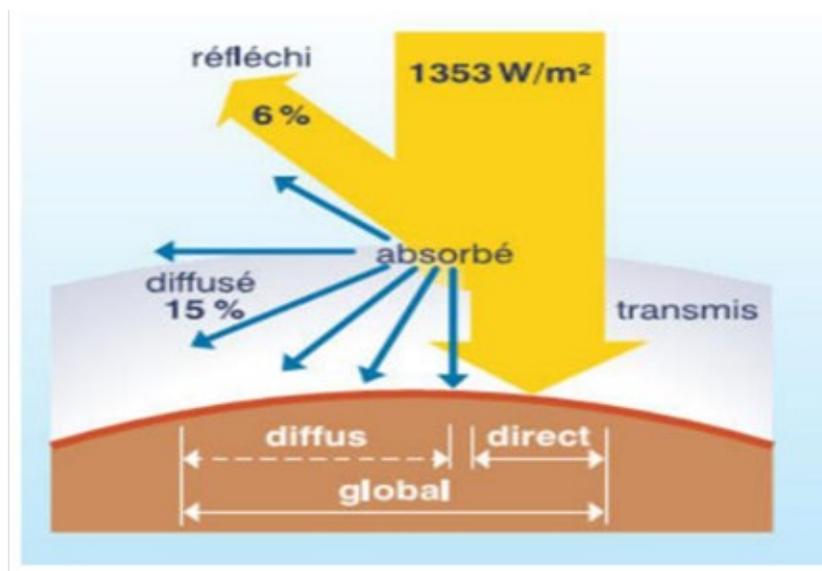


Figure 1.9. Rayonnement solaire et processus en action au niveau de la toiture  
(source : KABORÉ, 2015)

surface de la paroi (Herde et Liébard, 2004). Ce faisant, celle-ci ainsi chauffée échange alors avec son environnement suivant les trois modes fondamentaux d'échanges, par conduction à l'intérieur de la paroi, par convection avec l'air environnant et par rayonnement vers les parois voisines. Ainsi, cette énergie absorbée et rayonnée par une paroi vers les autres parois dépend des propriétés émissives des matériaux "émissivités" (Kaboré, 2015; Herde et Liébard, 2004). Par exemple, dans le cas des matériaux transparents, la part du flux solaire qui est transmise suit sa course vers les parois intérieures des bâtiments et ce par des processus d'émissivité et de conductibilité thermique (diffusivité thermique) (Herde et Liébard, 2004).

#### 1.2.2.1 Bilan thermique des toits réfléchissants ou toits blancs

En 1997, une étude scientifique en Californie révélait que près de 70% de l'énergie, qui devait être attribuée à la climatisation des édifices a pu être préservées juste en installant des revêtements à albédo élevé (toits réfléchissants) sur les toits d'une zone résidentielle (Brezet et Akbari, 1997). Cependant, après deux ans d'observation de ces

mêmes toitures, ils se sont rendu compte que l'efficacité thermique et énergétique de celles-ci décroissait avec le temps, compte tenu de l'accumulation de saleté et de l'usure (Brezet et Akbari, 1997). Malgré ces résultats, ce type de toitures s'avère être vraiment bénéfique car leur apport dans la réduction de gain thermique est salué par la communauté scientifique. Par exemple, selon Akbari et *al.*, (2001) la différence de températures entre la surface des toitures fortement absorbantes (faible albédo) et l'air ambiant peut par moments atteindre 50°C (voir figure 1-10), tandis que pour les revêtements moins absorbants avec des propriétés isolantes (albédo élevé), la différence est d'environ 10°C (2001) (O'Driscoll, 2010). Les mesures de température de surface ont démontré que les toitures ayant des revêtements à albédo élevé peuvent réduire la température de surface d'environ 7,5°C (Akbari, et *al.*, 2001). Sur le plan technique, les processus au niveau des toitures réfléchissantes sont similaires à ce qui fut présenté dans le point précédent.

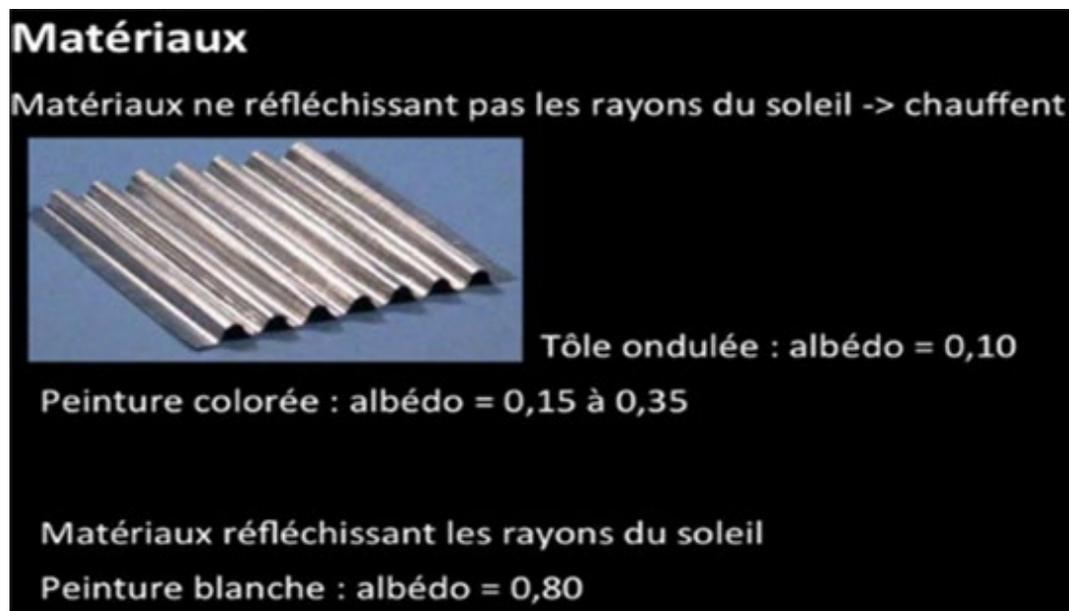


Figure 1.10. L'albédo de certains types de revêtements. (Source : <http://intelligentskins.serero.com/?p=2209>)

En effet, les matériaux ayant un fort albédo reflètent une grande partie du rayonnement solaire et ne permettent pas à la température de surface de s'élever et ce à cause de leur très faible émissivité (CNRS, 1996). Il est important de préciser que le pourcentage de réflexion varie en fonction du type de matériaux et de revêtement (voir figure 1-11 et tableau 1-6). Bien que le facteur albédo soit essentiel au niveau des toits réfléchissants, ce dernier n'est pas le seul paramètre intervenant dans l'évolution des températures de surface. L'émissivité joue également un rôle important, car elle permet de réguler l'absorption de l'infrarouge thermique. Plus la valeur d'émissivité au niveau du toit est basse, plus l'absorption de rayons permettant de chauffer la surface sera moindre (CNRS, 1996).

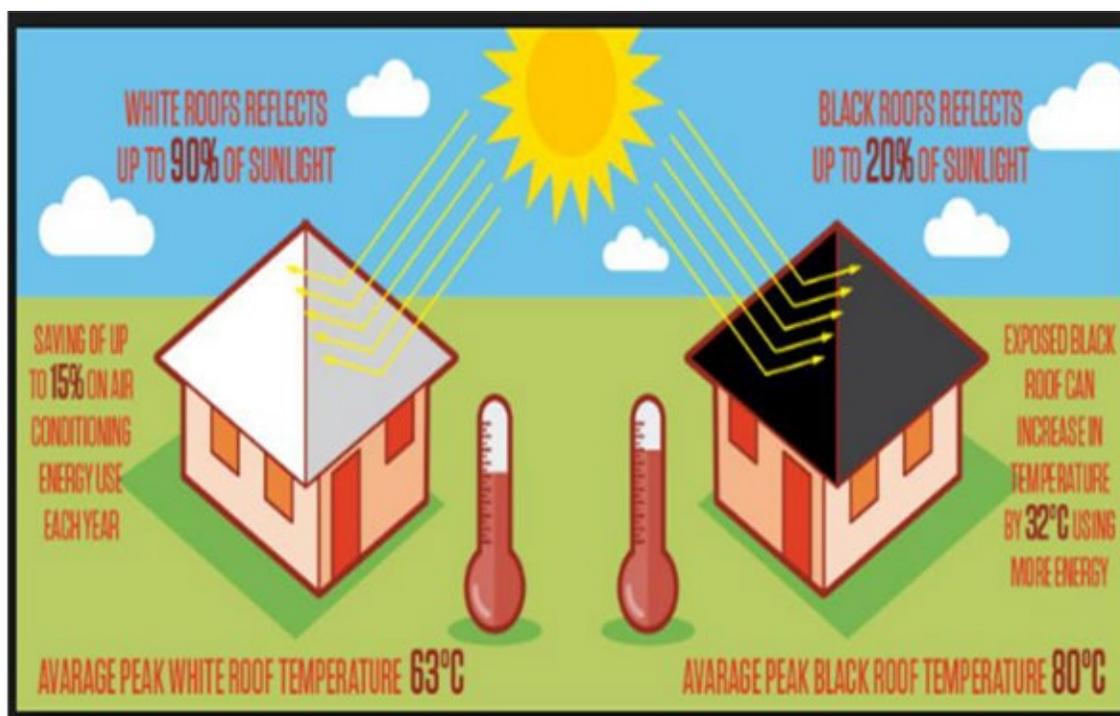


Figure 1.12. Variations de température entre toit réfléchissant et toit de type normal. (Source: <https://ubisafe.org/explore/energies-clipart-beneficial/>)

Tableau 1.6. L'Albédo de certaines matières. (Source : <https://www.albedo-hqe.com/fr/7-albedo/55-definition-de-lalbedo>)

<b>Substance</b>	<b>Albedo (%)</b>
CORPS NOIR	<b>0</b>
BASALTE	<b>5</b>
Océans	<b>7</b>
FORÊTS	<b>5-10</b>
SOL NOIR (CENDRES)	<b>5-15</b>
SOL	<b>16</b>
BÉTON	<b>17-27</b>
SABLE	<b>25=30</b>
CHAUX	<b>36</b>
GLÂCE	<b>30-50</b>
NEIGE FRAÎCHE	<b>81=92</b>
MIRROIR PARFAIT	<b>100</b>

#### 1.2.2.2 Bilan des toits verts.

Dans des agglomérations de plus en plus minéralisées où il existe une forte spéculation du sol, beaucoup de surfaces végétalisées tendent à disparaître au profit de nouveaux services (Sainteny, 2008). Pourtant indispensables, ces espaces verts permettraient entre autres de réduire voire d'éviter les effets des îlots de chaleurs ainsi que le gaspillage d'énergie (climatisation des bâtiments). C'est dans cette optique que les toits verts sont une alternative intéressante (Niachou et *al.*, 2001).

Sur un toit vert, les plantes forment un écran de protection naturelle de la surface (voir figure 1-12) avant l'activation des différents processus de gain et transfert thermique décrits précédemment (Niachou et *al.*, 2001). En effet, la plante par son feuillage protège l'édifice du rayonnement solaire et des vents est (Niachou et *al.*, 2001). Dès

lors, l'humidité et surtout la température extérieure diminuent sensiblement à mesure que le rayonnement solaire traverse les feuillages qui recouvrent la toiture. Ceci est possible car la plante par ses fonctions biologiques, telles que la photosynthèse ou l'évapotranspiration, absorbe une importante proportion du rayonnement solaire notamment l'infrarouge thermique (Niachou et *al*, 2001). Or, si une grande portion du rayonnement est piégée par les plantes, alors le gain thermique au niveau de la surface du toit se verra considérablement réduit.

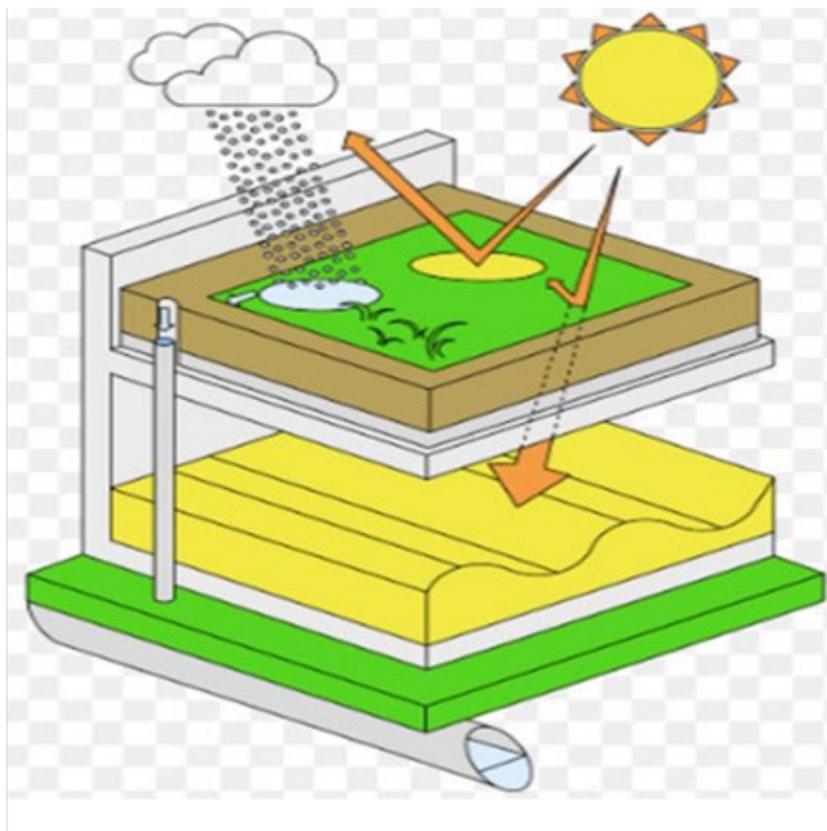


Figure 1.13. Toit vert : un écran de protection naturelle. (Source : [https://fluswikien.hfwu.de/index.php?title=File:Sketch\\_Anzalone.png](https://fluswikien.hfwu.de/index.php?title=File:Sketch_Anzalone.png))

En 2008, Alexandri et Jones ont noté une différence de  $12,8^{\circ}\text{C}$  entre un toit vert et un toit nu à Riyad en Arabie Saoudite. Ils sont arrivés à la conclusion que les toits verts sont essentiels à la réduction des îlots de chaleurs en milieu urbain. Cependant, ils

estiment que certains paramètres (le type de plantes, la teneur en eau des plants, les conditions extérieures, la teneur en eau du sol, etc.) peuvent permettre d'améliorer l'efficacité de ces toits. De même Jaffal et *al.* (2012), considèrent que le choix des différentes constituantes d'un toit vert peut permettre de réduire minimalement entre 1 à 15°C de température ambiante en période estivale.

### 1.2.3 Apports des SIG et de la télédétection dans l'analyse thermique

#### 1.2.3.1 SIG et télédétection : définition et contexte général

Les systèmes d'informations géographiques (SIG) et la télédétection sont de plus en plus utilisés pour surveiller et analyser de façon discrète les caractéristiques biophysiques de la surface terrestre (Steininger, 1996). En effet, de nos jours, les SIG ont permis de mieux comprendre, planifier et gérer les milieux urbains. Cela a entre autres engendré un intérêt croissant pour des études en lien avec les températures de surface et le bilan énergétique des agglomérations. Ainsi, de nombreux phénomènes en milieu urbain tel que les îlots de chaleurs urbains (ICU), le smog ont pu être mieux explicités.

À cet effet, Weng et Quattrochi (2004) estime que la télédétection a un énorme potentiel dans la compréhension, la description et l'analyse de la structure technique du tissu urbain. En effet, par ses méthodes de calcul et ses algorithmes, la télédétection permet de décrypter les interactions existant entre la structure des espaces urbains et l'environnement qui l'entoure. Par exemple, au travers d'images (satellites ou aéroportées) à très haute résolution, la télédétection nous permet de compiler des bases de données thermiques propres à chaque bâtiment en zone urbaine (Nichol, 1996). Aussi, Weng et Quattrochi (2004) encouragent les chercheurs à faire davantage usage de la télédétection afin d'avoir des analyses approfondies sur les applications de la télédétection thermique.

Ainsi, la télédétection pourrait se définir comme l'ensemble des techniques mises en oeuvre pour obtenir une information à partir de données enregistrées par un capteur (radiomètre, photomètre) à distance, sans contact direct avec l'objet étudié, c'est-à-dire placé à bord d'une plateforme (avion, satellite, etc.) (Grau, 2012). En télédétection, ce qui détermine si une méthode est applicable versus une autre est l'interaction entre la précision des différentes résolutions et l'application que l'on veut en faire (Vincourt, 2016). La télédétection compte cinq types de résolution que sont la résolution spatiale, spectrale, temporelle, radiométrique et angulaire. Par exemple, la résolution spatiale correspond à la surface couverte par un pixel, tandis que la résolution spectrale, qui correspond au nombre et à la largeur des bandes spectrales étudiées (Vincourt, 2016). Dans le cadre de cette étude nous avons surtout fait recours à la résolution spatiale, car elle nous permet d'obtenir de l'information tant sur une grande zone (fauchée) et qu'à petite échelle (taille d'un pixel) et ce quels que soient les espaces (zones de bâtiments, routes, forêt, etc.).

Mais au-delà des données fournies par la télédétection, on a aussi recours aux systèmes d'information géographiques (SIG). En effet, dans une anatomie aussi complexe qu'est la ville, les SIG nous permettent d'avoir une vision globale du système urbain et ce en analysant les différentes caractéristiques et données en format vectoriel (données de bâtiments, de végétations, etc.) qui la composent (Blaschke et *al.*, 2001).

### 1.2.3.2 SIG et télédétection : définition et contexte général

Depuis les années 80, des études de températures de surface ont été menées, le long de la côte ouest de l'Amérique du nord, au travers des données AVHRR fournies par NOAA (WENG et al, 2004). Ces données ont, entre autres, permis d'avoir le portrait thermique de certaines agglomérations et ce en lien avec leur usage du sol. Cependant, la résolution spatiale (1200 m) de ces données, s'est avérée appropriée uniquement pour la cartographie de la température urbaine à petite échelle, non pour établir des corrélations précises entre les valeurs des images téléchargées et les mesures prises

directement sur le terrain (Weng et *al.*, 2004). Par exemple, en 1990, Carnahan et Larson ont fait usage de l'infrarouge thermique de la Landsat 4-5 (120 m de résolution spatiale) afin d'observer les variations des températures entre les milieux urbains et ruraux dans la zone d'Indianapolis (États-Unis).

De même, c'est à cet effet que vers les années 2000, on a recours à l'usage d'image thermique à 60 m de résolution spatiale (Weng et *al.*, 2004). Cela a contribué à affiner les résultats et à avoir des statistiques thermiques propres à chaque éléments du milieu urbain (bâti, végétation, etc.). Par exemple, en 2004 afin d'analyser la corrélation entre la température et la forte végétation dans la ville d'Indianapolis, Weng et *al.*, ont recours aux images d'infrarouges thermiques (60 m de résolution spatiale) provenant du satellite LANDSAT. De nos jours, l'évolution technologique nous permet d'avoir des images à très hautes résolutions spatiales (en dessous de 10 m) (Weng et *al.*, 2004). De telles données ont permis de détecter et de mieux analyser les effets diurnes et nocturnes des îlots de chaleurs urbains dans plusieurs villes. Par exemple, pour notre projet de recherche, nous avons obtenu des images thermiques et hyperspectrales ayant une résolution spatial 1 m.

Dans le cadre de ce projet, la télédétection est un outil d'importance puisqu'elle nous permet d'étudier la contribution qu'ont les différentes formes de toitures sur le gain ou la perte d'énergie des édifices urbains en lien avec les différentes longueurs d'onde (visible comme infrarouge) du rayonnement solaire.

Le second objectif que nous avons est de tenter de démontrer qu'il y a une interrelation même faible existant entre les facteurs « formes de toits », et l'élévation du mercure durant la période de canicule. En effet, de façon spécifique premièrement, nous expliciterons la dynamique existant entre les formes de toits, et la notion de gain ou de perte d'énergie thermique. Deuxièmement, nous déterminerons si les formes des toits

peuvent avoir une incidence sur les ICU à long terme et ce par le gain d'énergie thermique.

## CHAPITRE II

### MÉTHODOLOGIE

Cette partie de notre travail est réservée à la description et à l'illustration de notre démarche en matière de méthodologie. Il est important de souligner, qu'elle prend appui sur le chapitre précédent. En effet, lors de la présentation de notre problématique, nous avons soulevé une question essentielle à laquelle nous avons tenté de répondre par des outils et des méthodes élaborés que nous présentons dans ce chapitre.

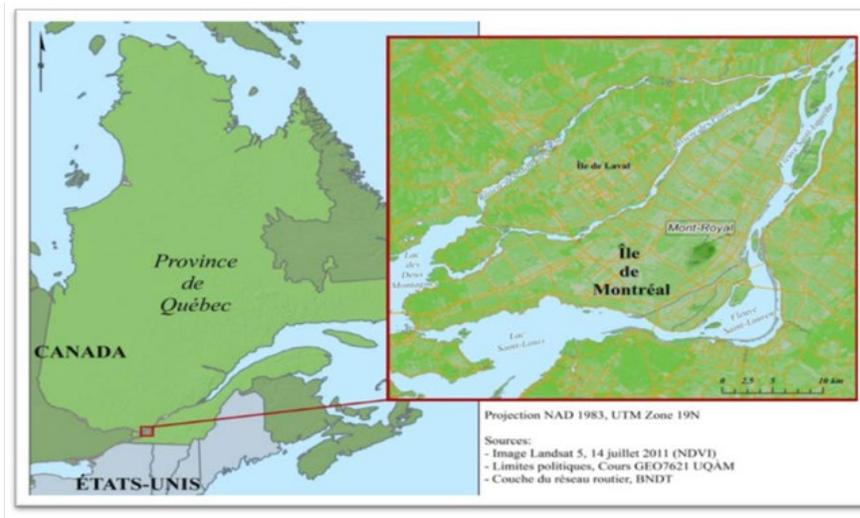


Figure 2.1. Situation géographique de Montréal (Source : Mathieu, 2015)

## 2.1 Présentation de la région et des zones d'études

La région d'étude de notre projet est l'île de Montréal. Cependant, nous nous sommes focalisés essentiellement sur trois zones d'études, qui se veulent homogènes en matière de toitures et qui représentent les différentes formes de toits les plus rencontrées à Montréal. Il s'agit : de la zone dite des toits plats, celle des toits mansardes et celle des toits en pignon. En effet, bien que les données thermiques pour ce projet aient été prises à l'échelle de l'île (voir figure 2-1), les contraintes logistiques nous ont permis d'accéder uniquement aux maquettes 3Ds des toitures de bâtiments de certains arrondissements montréalais (Ville-Marie, Plateau Mont-Royal, Sud-Ouest et Outremont). Malgré cette contrainte, nous avons fini par réaliser nous-mêmes, pour compléter ces données, certaines maquettes de bâtiments 3Ds et ce selon des zones bien précises.

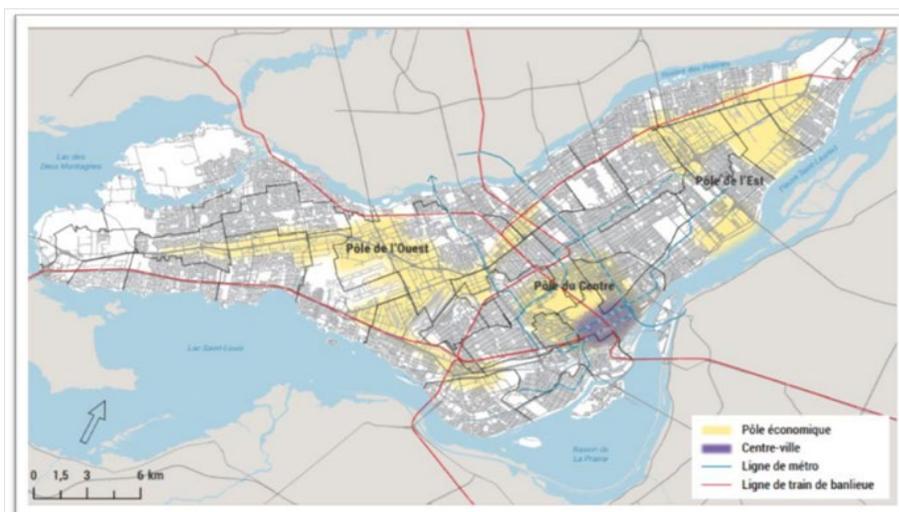


Figure 2.3. Pôles économiques de l'agglomération de Montréal (Ville de Montréal, 2015)

### 2.1.1 Région d'étude

Située au sud de la province du Québec, l'agglomération de Montréal (Ville de Montréal et autres villes) est placée dans un cadre environnemental assez particulier, en raison de son contexte insulaire dans la vallée du fleuve Saint-Laurent. Elle a une

superficie de 499,1 km<sup>2</sup>, et compte une population d'environ 1 942 044 personnes, soit 24,2 % de la population totale du Québec (Statistique Canada, 2016) (voir tableau 2-1). Sur le plan économique, l'île représente 34,1 % de l'ensemble du PIB québécois en 2016 soit 122 milliards de dollars (Statistique Montréal, 2017). En effet, cette empreinte économique est matérialisée par la présence de trois des principaux pôles économiques (pôle du centre, pôle de l'ouest et pôle de l'est) de la région voire de la province au sein de l'agglomération (voir figure 2-2) (Ville de Montréal, 2015). Cela a une certaine incidence sur le centre-ville de l'agglomération, incidence qui s'illustre en outre par une forte concentration de tours à bureaux et des espaces commerciaux. Cette grappe de bâtiments au centre-ville illustre surtout l'un des forts taux de minéralisation, de rugosité et de densification en cette zone dans l'île comme le souligne Rullier (2012). De plus, l'agglomération de Montréal c'est aussi un couvert végétal significatif, mais qui se veut inégalement répartie dans son ensemble comme l'illustre la figure 2-3. En effet, l'île de Montréal dispose de 19 grands parcs (voir figure 2-4) totalisant 2000 hectares ainsi qu'après 1,2 million d'arbres (Ville de Montréal, 2018). Cependant, selon certaines statistiques, l'île perdrait environ 7 km<sup>2</sup>/an à cause des fortes vagues d'urbanisation et de minéralisation qu'elle subit depuis les années 60 (Rullier, 2012).

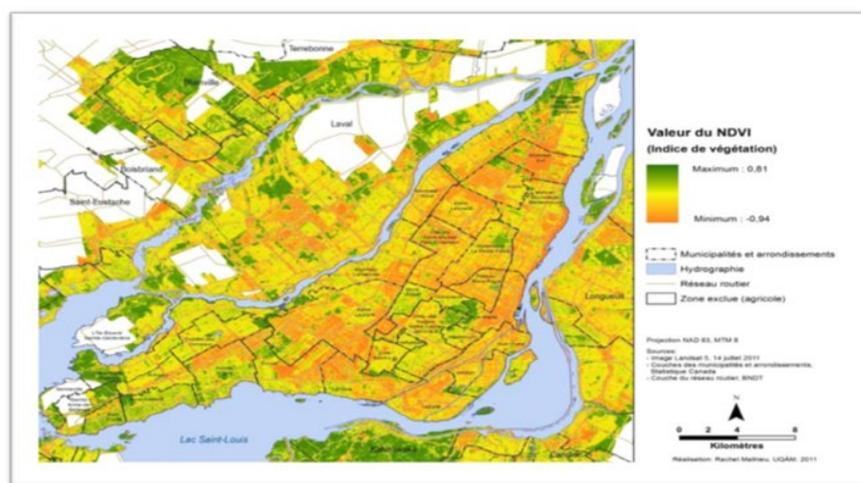


Figure 2.5. Répartition de la végétation sur le territoire de Montréal (Source: Mathieu, 2011)

C'est dans cette même dynamique, que Labrecque et Vergriete (2006) ont souligné le fort taux de surface urbanisée qui représente environ 80% des espaces qui sont bâtis et goudronnés (voire figure2-5).

De plus, il est important de savoir que les différentes surfaces que l'on rencontre en ville, sont le résultat de l'association de plusieurs matériaux. Or, comme mentionné précédemment, chacun d'eux possède des spécificités thermiques qui leur sont propres et ce en fonction de leur positionnement dans l'espace et de leur environnement proche (Taine et al, 2014). En effet, selon l'analyse de certains quartiers montréalais on remarque une concentration de certains types de matériaux. Par exemple, au centre-ville on retrouve une majorité de façades vitrées (verres) et de structures d'acier (Dunton et Malkin, 2008) ou encore dans le vieux-Montréal, on observe une forte densité de bâtiments construits en pierre grise comme l'illustre (Benoît et Gratton, 1991).

Tableau 2.1. Tableau récapitulatif de quelques statistiques sur Montréal (source: Ville de Montréal)

Arrondissements	Superficie en Km2	Population (nbre hbts)	Densité (hbts/km2)	Occupation du sol	Nombre de logements	Nombre de Bâtiments
Ville de Montréal	365,2	1 704 694	4 668,3	Parcs, Résidentiel, Industriel, Institutionnel, Conservation, Emploi, Commercial	779 795	1 885 142
Agglomération de Montréal	499,1	1 942 044	3 891,2	Parcs, Résidentiel, Industriel, Institutionnel, Conservation, Emploi, Commercial	870 375	2 369 654



### 2.1.2 Zones d'étude

Le point précédent nous a permis de mieux appréhender la dynamique d'aménagement au sein des différents quartiers de l'île et ainsi distinguer leurs multiples caractéristiques. De plus, en la jumelant avec les informations récoltées dans le sous-chapitre de la revue de littérature, nous comprenons mieux l'impact que peuvent avoir certains développements urbains (toiture de bâtiments) sur le bilan thermique des agglomérations. Pour ce faire, et ainsi vérifier nos hypothèses, ces informations nous ont permis de confirmer et de nous concentrer sur les trois zones de notre région d'étude déterminée précédemment (cf. 2.1). Chacune de ces zones, nous a permis d'une part d'établir des liens directs ou indirects entre la composition morphologique des toits et le bilan radiatif et, d'autre part de souligner l'incidence thermique que peuvent avoir ces formes de toits sur les ilots de chaleurs urbaines. Il est important ici de préciser, que le choix de l'emplacement de ces trois zones repose essentiellement sur deux

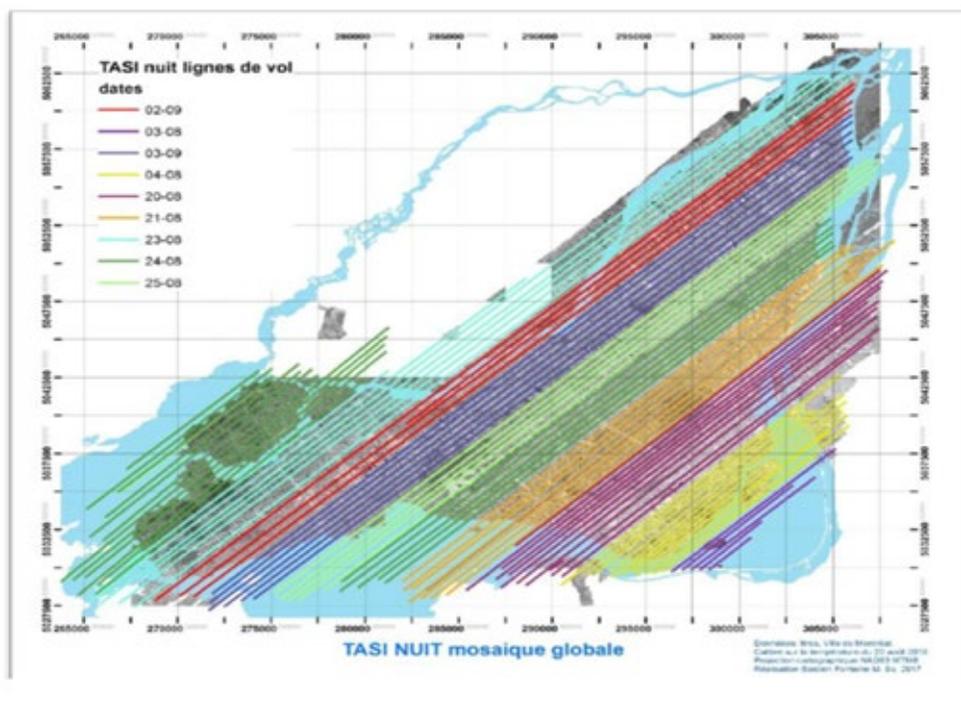


Figure 2.7. Espace couvert par les lignes de vols du capteur TASI

critères fondamentaux : 1- la couverture d'image à haute résolution thermique disponible (TASI et CASI à 1 m de résolution) (voire figure 2-6) et 2- la présence de formes de toitures bien distinctes et surtout formant un secteur ou des secteurs homogènes. Ainsi ces trois zones sont : la zone dite des toitures plates, la zone dite des toitures mansardes et celles des toits en pignons. Chacune de ces zones se distingue par des morphologies de toits variables (forme des toits, orientation des bâtiments, etc.) et par des valeurs thermiques différentes.

### 2.1.2.1 La zone dite des toitures plates

Pour la zone dite des toitures plates (voire figure 2-7), nous avons choisi comme échantillon d'étude un espace de 0,31 km<sup>2</sup> dans l'arrondissement du plateau Mont-Royal où la majorité des bâtiments présents sont de formes plates. Cet échantillon d'étude se situe dans le centre-ville et plus précisément près des avenues Christophe-Colomb au sud, Papineau au nord, Mont-Royal à l'ouest et la rue Rachel à l'est. Cette

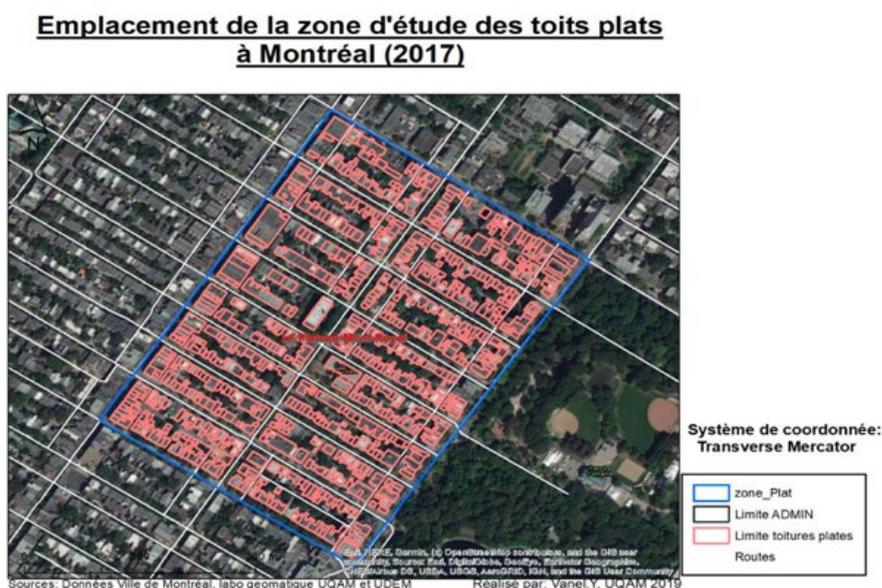


Figure 2.8. . Zone d'étude des toits plats à Montréal (2017).

zone se veut être exclusivement résidentielle même si on y retrouve aussi quelques commerces et de la végétation à foison (mur végétalisé, parcs, etc.) avec notamment la présence du parc Lafontaine à proximité. De plus, comme le souligne Mathieu (2015), on observe que la trame urbaine dans cette zone est très peu variée et très serrées et l'orientation des rues y contribue en forte majorité NOO-SEE . On a dénombré environ 850 édifices (résidences et commerces) dans cette zone.

L'un des matériaux de construction les plus utilisés dans les bâtiments de cet espace est la brique (Mathieu, 2015). En ce qui concerne les toitures on y retrouve essentiellement des revêtements du type bitumineux (Soumission Rénovation, 2018).

#### 2.1.2.2 La zone dite des toitures mansardes

La zone, dite des toitures mansardes, a une superficie de 0,12 km<sup>2</sup> et se situe dans l'arrondissement de Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles. Il est important de préciser que la majorité des bâtiments présents dans cet arrondissement sont de formes mansardes et pignons. Notre zone d'étude ne représente qu'un échantillon des formes de toitures mansardes. Ainsi, celle-ci est ceinturée par les rues Rolland-Germain, Marcel-Raymond, Primat-Paré et Iris. Elle représente, tout comme la précédente zone, un espace du type résidentiel. En effet, c'est une zone fortement minéralisée (voire figure 2-8), mais on dénote néanmoins la présence de verdure. La trame urbaine dans ce secteur est très peu variée et les bâtiments sont légèrement moins serrés que ceux observés dans la zone des toitures plates. On y dénombre environ 250 bâtiments résidentiels.

Selon Mathieu (2015), les matériaux de construction les plus utilisés dans les bâtiments de cet espace sont la brique et le bois. En ce qui concerne les toitures on y retrouve des revêtements du types naturels et bitumineux (Soumission Rénovation, 2018). Cependant, comme le mentionne Soumisssion Rénovation (2018), la grande majorité

(plus de 60%) des toitures mansardes à Montréal aujourd'hui sont souvent des bitumineux (membrane élastomère ou encore du bitume modifié).



### 2.1.2.3 La zone dite des toitures à pignon

La zone dite des toitures à pignon se retrouve dans l'arrondissement Ahuntsic-Cartierville, situé entre les avenues Papineau et Christophe-Colomb et les rues Emile-Yelle et Jacques-Casault au coeur d'un secteur résidentiel (voir figure 2-9). Dans cet arrondissement, on retrouve majoritairement des toitures de forme pignons, mais il est important de souligner que l'on observe des formes de toits diverses. Notre zone d'étude possède une superficie de 0,34 km<sup>2</sup> et comporte environ 500 bâtiments.

On y retrouve certes des résidences et surtout des espaces verts et des commerces. De plus, elle se trouve aussi dans le corridor du pôle économique de l'ouest. Tout comme les autres zones à l'étude, la trame urbaine de celle-ci est aussi serrée et se veut aussi

quelque peu variée. Selon Soumisssion Rénovation (2018), les édifices de cette zone ont pour la plupart des toits ayant des revêtements du type bitumineux.



Figure 2.10. . Zone d'étude des toit pignons à Montréal (2017)

#### 2.1.2.4 Résumé

En récapitulatif, notre étude se fait dans la région de Montréal. Nous avons sélectionné trois sites qui pour nous illustrent, adéquatement l'ensemble des formes de toits les plus rencontrées sur l'île. Le tableau 2-2 compile quelques informations que nous avons trouvées pertinentes pour chacun des sites choisis.

Tableau 2.2. Tableau récapitulatif des trois zones d'études

<b>Zone d'études</b>	<b>Superficie en km2</b>	<b>Arrondissements</b>	<b>Type de toits rencontrés</b>	<b>Occupation du sol</b>
<b>Toitures mansardes</b>	0,11 km <sup>2</sup>	Rivière-des-Prairies-Pointes-aux-Tremble	Type bitumineux et naturels	Résidentiel et parcs
<b>Toitures pignon</b>	0,34 km <sup>2</sup>	Ahuntsic-CartierVille	Type bitumineux	Résidentiel et parcs
<b>Toitures plates</b>	0,31 km <sup>2</sup>	Le Plateau Mont-Royal	Type bitumineux	Résidentiel et parcs

## 2.2 Présentation des données

La validation des différentes hypothèses émises vis-à-vis de ce projet passe par le traitement des données acquises. En effet, nous avons obtenu plusieurs types de données matricielles (MNS, TASI et CASI), les données vectorielles 2.5D de bâtiments de la Ville de Montréal, et les couches 3Ds de bâtiments des différentes zones d'étude. Pour chacune de ces données nous avons mis en place des protocoles de traitements qui nous ont, entre autres, permis d'obtenir des couches qui nous aident à répondre notre question principale à savoir : quelle est la dynamique existant entre la morphologie des toits et les variations thermiques au sein de ceux-ci? Dès lors, nous présenterons ici, chacune des données utilisées et leur subtilité (voir tableau 2-4 des métadonnées) et nous illustrons dans la suite les différentes démarches mises en place dans le traitement de celles-ci.

### 2.2.1 Données de type matriciel

Pour analyser l'impact qu'ont les formes des toitures sur le gain thermique au sein des bâtiments, nous avons eu recours à trois sources majeures de données matricielles : 1- les images thermiques TASI (2016) (images prises par des capteurs thermiques aéroportés). 2- des images CASI (2016) prises dans les longueurs d'onde du PIR (proche infrarouge). 3- des images du modèle numérique de surface (MNS) de la ville de Montréal.

Il est important de préciser que les images, CASI ET TASI, nous ont été fournies par la ville de Montréal, même si elles ont été réalisées par la compagnie ITRES. En effet, à l'été 2016, la ville de Montréal a financé l'acquisition d'image thermique par la firme ITRES recherche ltd et ce dans le but d'élargir sa mission de cartographie (FONTAINE, 2017). Ce projet fut en partenariat avec les universités de Montréal et du Québec à Montréal (UDM et UQAM). La prise de ces données a été faite en août 2016 par un survol entier de l'île avec des couloirs de vol précis. Ce survol fut réalisé tant de jour que de nuit. Dans cette étude nous avons opté de nous concentrer uniquement sur les données de jour car elles nous permettent d'évaluer la quantité d'énergie absorbée.

#### 2.2.1.1 Les images issues du modèle numérique de surface (MNS)

Les modèles numériques de surface (MNS) sont des représentations simplifiées de l'altimétrie du sol et des bâtiments (Ville de Montréal, 2018). En effet, à l'inverse du modèle numérique de terrain (MNT), le MNS offre plus de possibilités et surtout de précision car en plus des valeurs altimétriques du sol, il nous offre de la précision sur la hauteur des bâtiments. De plus, il est possible de le coupler aussi avec de la végétation en incluant le modèle numérique de canopée (MNC).

### 2.2.1.2 Les images thermiques de type TASI

Le TASI (Thermal Airborne Spectrographic Imager) est un capteur hyperspectral aéroporté produisant des images dans les longueurs d'onde de l'infrarouge thermique. Ce dernier possède 32 bandes situées entre 8 et 11  $\mu\text{m}$ , avec une largeur de bande de 54 nm et à une résolution de 2 m.

Selon la compagnie ITRES (2019) les capteurs du type TASI permettent de déterminer les valeurs de températures absolues et d'émissivité. De plus, elles sont aussi utiles dans l'identification des matériaux. Le TASI offre quelques avantages tels que : la variabilité de l'émissivité et ce en fonction de la longueur d'onde considérée ou encore la fourniture de plusieurs mesures de température pour ne citer que ceux-ci (Fontaine, 2017).

### 2.2.1.3 Les images matricielle de type CASI

A contrario du TASI, le CASI est un capteur hyperspectral visible qui a la capacité de détecter une vaste gamme de bandes spectrales étroites dans les longueurs d'onde visibles et infrarouges, et ce en utilisant le balayage le long de la piste (Indiana University Library, 2019). Les capteurs CASI modernes peuvent avoir jusqu'à 288 bandes comprises entre 0,4 et 0,9  $\mu\text{m}$  (Indiana University Library, 2019). Dans notre cas, les images CASI possèdent 72 bandes (voir tableau 2-3) et ont une résolution de 1 m. Les capteurs hyperspectraux comme le CASI permet de constituer une source importante d'informations de diagnostic sur les caractéristiques d'absorption et de réflexion d'objets spécifiques, fournissant de ce fait une « empreinte digitale » spectrale (Indiana University Library, 2019).

Tableau 2.3. Répartition de la longueur d'onde des 72 bandes générées par le capteur CASI

BANDE	LONGUEUR D'ONDE (µm)						
1	370,7	19	541,3	37	712,1	55	882,8
2	380,2	20	550,8	38	721,6	56	892,2
3	389,9	21	560,2	39	731,1	57	901,7
4	399,1	22	569,7	40	740,6	58	911,1
5	408,6	23	579,2	41	750,1	59	920,6
6	418,0	24	588,7	42	759,6	60	930,1
7	427,5	25	598,2	43	769,0	61	939,5
8	437,0	26	607,7	44	778,5	62	949,0
9	446,4	27	617,2	45	788,5	63	958,4
10	455,9	28	626,7	46	797,5	64	967,9
11	465,4	29	636,2	47	807,0	65	977,3
12	474,9	30	645,7	48	816,5	66	986,7
13	484,4	31	655,2	49	825,9	67	996,7
14	493,8	32	664,7	50	835,4	68	1005,6
15	503,3	33	674,1	51	844,9	69	1015,0
16	512,8	34	683,6	52	854,4	70	1024,5
17	522,3	35	693,6	53	863,8	71	1033,9
18	531,8	36	702,6	54	873,3	72	1043,3

#### 2.2.1.4 Résumé

Cette partie, nous a permis de présenter en détail les différentes données matricielles que nous avons utilisées pour la réalisation de ce projet. Pour mieux comprendre l'importance de ce dernier pour notre étude, nous avons opté de les résumer dans un tableau (voir tableau 2-4).

Aussi, il est important de préciser que les différents capteurs thermiques, utilisés dans le cadre de ce projet, réagissent à la luminance des objets, et ne prennent donc pas

directement de mesure de réflectance. Pour avoir ces valeurs de réflectance et même les températures de surface, il nous faut passer par un processus de transformations des valeurs de luminances obtenues. En effet, ce processus de transformations nous a conduit à des traitements sur les images (des corrections géométriques et atmosphériques et transformation des luminances en température apparentes). Néanmoins, il faut noter que les correctifs atmosphérique peut occasionner un certain biais en sous-estimant les valeurs de température thermique, mais il n'en demeure pas moins que celles-ci sont fiables comme le démontre Savelyev et Sugumaran (2008).

De plus, il est fondamental de souligner que certains processus de prétraitements, comme la transformation des luminances en température apparente, ont été effectuées par une équipe du Professeur Cavayas (Université de Montréal) via un algorithme permettant de séparer la température de l'émissivité. De ce fait, l'algorithme a permis d'obtenir une seule image de température (. Gc .temp.pix) et 32 images d'émissivité (. Gc em.pix).

Tableau 2.4. Tableau des métadonnées

Type de données	Fichiers	Description des fichiers	Format du fichier	Précisions	Date de création	Auteurs	Droits d'utilisation
3D	BATIMENTS 3D	Cette couche est une maquette numérique des bâtiments 3D LOD2 avec textures en format CityGML et 3DM de certains arrondissements de Montréal.	Xml ou CityGML LOD2 avec textures	Fichiers préalablement montés sur arcScene et converti ensuite en fichier xml	OCTOBRE 2019	Étudiant	
EXCEL	DONNÉS TOITURES BLANCHES	Cette table comporte des données sur les bâtiments ayant des toitures blanches et ce en fonction des arrondissements	.XLS		AOUT 2016	Ville de Montréal	Données ouvertes... Usage libre pour tous. Ces données ont été trouvées sur le site de la Ville de Montréal
VECTORIELLES	BATIMENTS 2D	Cette couche est une représentation géométrique et conventionnelle des toits des bâtiments en plan 2.5D	.SHP		MARS 2015	Ville de Montréal	Données ouvertes... Usage libre pour tous. Ces données ont été trouvées sur le site de la Ville de Montréal
MATRICIELLES	TASI	Le TASI est un capteur hyperspectral aéroporté produisant des images dans les longueurs d'ondes de l'infrarouge thermique	.Pix	Résolution : 2 m/pixel le jour et 1m/pixel de nuit.	AOUT 2016	ITRES	Données à usage restreint. Droit d'autorisation avant usage
	CASI	Le CASI est un capteur hyperspectral permettant d'obtenir des images dans les longueurs d'ondes du visible et du proche infrarouge		Résolution : 1m/pixel			
	MNS	Les modèles numériques surface (MNS) sont des représentations simplifiées de l'altimétrie du sol et des bâtiments	.TIFF		AVRIL 2018	Ville de Montréal	Données ouvertes... Usage libre pour tous. Ces données ont été trouvées sur le site de la Ville de Montréal

### 2.2.2 Données de type vectoriel

Dans ce travail, les données vectorielles sont importantes, parce qu'elles nous offrent différentes possibilités; comme celle de morceler les images rasters à l'échelle unique des toitures. Ainsi, les données auxquelles nous avons eu recours à ce stade furent les données 2.5D des bâtiments. De format .shp (shapefile), et de type polygone, ces dernières nous ont aussi été fournies par la Ville de Montréal. Il est important de préciser que la couche vectorielle 2.5D des bâtiments désignent une représentation géométrique et conventionnelle des toits de bâtiments en plan (Ville de Montréal, 2018). Cette représentation illustre ces éléments en planimétrie 2D tout en prenant en compte les informations altimétriques de celles-ci. La table attributaire de cette couche, nous révèle la forme des toits d'un certain nombre de bâtiments.

### 2.2.3 Données de type 3D

Les données du type 3D se veulent essentielles à notre étude, car elles nous ont permis de tester un module de traitement fourni par la firme ESRI et ainsi de visualiser la variation de l'insolation réelle rencontrée au niveau des formes de toitures dans notre zone d'étude. Pour ce faire, les données 3Ds utilisées furent celles de bâtiments. Elles ont été montées avec le logiciel City gml. Ainsi, les données City Gml 3D des bâtiments, sont des maquettes 3Ds de bâtiments réalisées à partir de techniques de photogrammétrie et de modèle numériques de surface (MNS). En effet, comme le précise Mathieu (2015) ces données ont été créées par captage photogrammétrique via des images aériennes et l'exactitude de la couche de toits est de  $\pm 30$  à  $\pm 40$  cm. Les murs sont des données déduites de la couche de toits. De plus, ces données furent réalisées par la Ville de Montréal en 2013. Ces données n'étaient pas disponibles pour toute l'île de Montréal, alors nous avons opté d'en générer nous-mêmes pour nos trois

zones d'étude. Pour ce faire, nous avons eu recours au module Arcscene d'ESRI afin de monter nos 3D de bâtiments en partant de notre 2.5D.

#### 2.2.4 Données de type Excel

Les données de type Excel désignent des informations de types tabulaires. En effet, ces informations fournies par la ville de Montréal, nous permettent d'avoir une idée sur les toitures ayant des revêtements de type blanc et sur leur localisation dans les différents arrondissements de la ville de Montréal. Nous avons opté de faire usage de ces données car nous avons observé ces dernières années que des toitures blanches de formes plates étaient de plus en plus installées. Aussi, comme nous souhaitons démontrer que la forme plate des toits a un effet sur le gain thermique, nous estimons que parler des toits blancs et plats nous permettrait de couvrir tous les angles

### 2.3 Démarche méthodologique

La démarche méthodologique (voir figure 2-10) mise en place durant cette recherche vise essentiellement à extraire l'information qui est contenue au sein des images thermiques, à la traiter et à l'analyser. Cependant, cette information de type analogique ne nous renseigne guère sur la nature des objets au sol, mais uniquement sur leur capacité à absorber ou à réfléchir les ondes électromagnétiques comme le souligne Canuel Ouellet (2017). En vue de déterminer l'impact des formes de toitures sur le gain thermique, il est donc devenu important pour nous d'enrichir cette démarche initiale avec des procédés complémentaires afin d'affiner notre analyse.

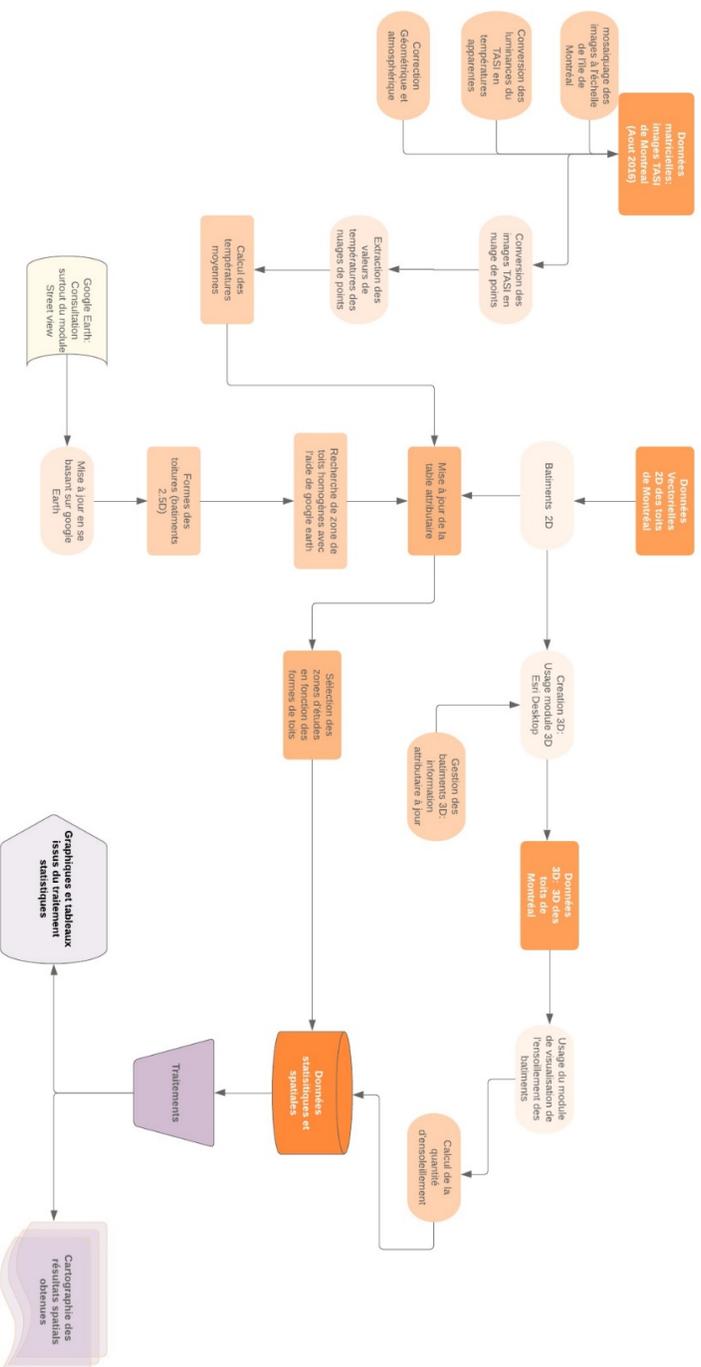


Figure 2.11. . Démarche méthodologique

Ainsi, dans la présente section, nous décrivons les différentes étapes (prétraitements, traitements et cartographie) que nous avons faites afin d'extraire l'information des images thermiques choisies. De plus, nous montrons aussi comment des éléments complémentaires, nous ont permis d'avoir une vue beaucoup plus globale du phénomène.

### 2.3.1 Les étapes de prétraitements

Les étapes de prétraitements font référence aux différentes phases qui permettent de préparer les données avant le traitement proprement dit. A ce niveau, on retrouve très souvent des transformations telles que les corrections géométriques et atmosphériques. Pour ce projet, en plus des transformations courantes, il a aussi fallu réaliser des transformations au niveau des valeurs de luminance afin d'avoir des températures. Cependant il est essentiel de préciser ici que toutes ces étapes ont été réalisées avant que nous entrions en possession des données. Nous avons jugé important et utile de le mentionner, car ce sont les mêmes que nous aurions entreprises si cela n'avait été préalablement réalisé. Nous avons aussi effectué des prétraitements de données en lien avec la couche 2D des bâtiments, surtout pour documenter la forme des toitures.

#### 2.3.1.1 Les transformations géométriques

Durant cette étape, les images, CASI et TASI, obtenues lors de l'acquisition des données sont traitées afin d'apporter un certain nombre de corrections. En effet, la prise d'image aéroportée, ne tient pas toujours compte du relief au sol ou encore des déformations que peuvent subir l'image lors de sa captation. Ainsi, pour palier à cela, des corrections géométriques ont été appliquées comme le souligne Fontaine (2017). Il est important de préciser que la réussite de notre étude repose en grande partie sur une bonne concordance des pixels à pixels, car ce sont ces derniers qui comporteront les valeurs thermiques. Pour entreprendre cette étape, il faut faire recours au module Ortho

Engine de PCI GEOMATICS en y appliquant une polynomiale du 1er degré se basant sur un fichier vectoriel des routes (Cavayas et Beaudouin, 2008).

#### 2.3.1.2 Les transformations atmosphériques

A la suite des transformations géométriques, il a fallu procéder à des corrections atmosphériques afin de nettoyer l'image de tout apport en lien avec l'atmosphère (aérosol, vapeurs d'eau, fines particules, etc.) qui pourrait biaiser les calculs au moment du calcul des températures (Fontaine, 2017). Pour cela, nous avons eu recours au module ATCOR de PCI GEOMATICS. Ce dernier, nous a offert la possibilité de rentrer le jour et l'heure où l'image fut prise ainsi que des données météorologiques en lien avec cette date là. Compte tenu du nombre de bandes contenue dans les images (voir tableau 2-3), nous avons dû réaliser cette étape au travers de la programmation. Ainsi, un petit algorithme a été monté en s'inspirant des travaux de Fontaine (2017).

#### 2.3.1.3 Les transformations thermiques (valeurs de luminance en température Celsius)

À ce stade, nous avons décidé de transformer les valeurs numériques de pixels obtenus lors de l'acquisition des images en valeurs de températures apparente. La méthode couramment utilisée est celle qui se base sur l'inversion de la loi de Planck (Fontaine, 2017). Les calculs reposent donc sur les formules de la figure 2-11.

Les paramètres  $L_{min}$  et  $L_{max}$  expriment respectivement le niveau le plus bas et le niveau le plus haut du flux de luminances mesurables par le capteur. Ces niveaux correspondent aux comptes numériques qui s'établissent de 1 CNmin à 255 C. nmax. 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 (Cavayas et Beaudouin, 2008).

Il est important de noter que compte tenu du nombre de bandes (32 exactement pour le capteur TASI), nous avons fait usage de la programmation pour les transformer. De plus, ces 32 bandes nous offrent des résultats intéressants, car on a des mesures

distinctes de température, ce qui permet d'évaluer l'émissivité des matériaux (FONTAINE, 2017).

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

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

Formule 2-1 Formules de transformations des valeurs de luminance en températures apparentes

#### 2.3.1.4 Prétraitement en lien avec la couche 2D

Étant donné que notre travail se porte sur les toitures, nous avons opté d'améliorer cette couche en y rajoutant des précisions sur la forme des toits et aussi sur l'orientation de ceux-ci. Cela fut fait manuellement et en se basant sur les images satellites de Google Earth et sur les résultats de MATTHIEU (2015) en ce qui concerne l'orientation. Cette étape fut particulièrement fastidieuse, car nous avons dû passer en revue de façon manuelle la forme des toits pour chacune des trois zones d'études choisies.

### 2.3.2 Les étapes de traitements

#### 2.3.2.1 Traitement en lien avec la couche 2D

Lors de la réception des images rasters après leur prétraitement, nous avons opté de morceler les images thermiques de notre zone étude à la taille/échelle des différents bâtiments que comporte les différentes zones. Cette étape nous a permis d'isoler les pixels de températures qui se retrouvaient exclusivement à l'intérieur des polygones des bâtiments (2D) et ainsi de pouvoir dégager des statistiques sur la température moyenne des toitures en fonction de leur forme. Ainsi, pour ce faire les différentes étapes techniques réalisées furent les suivantes :

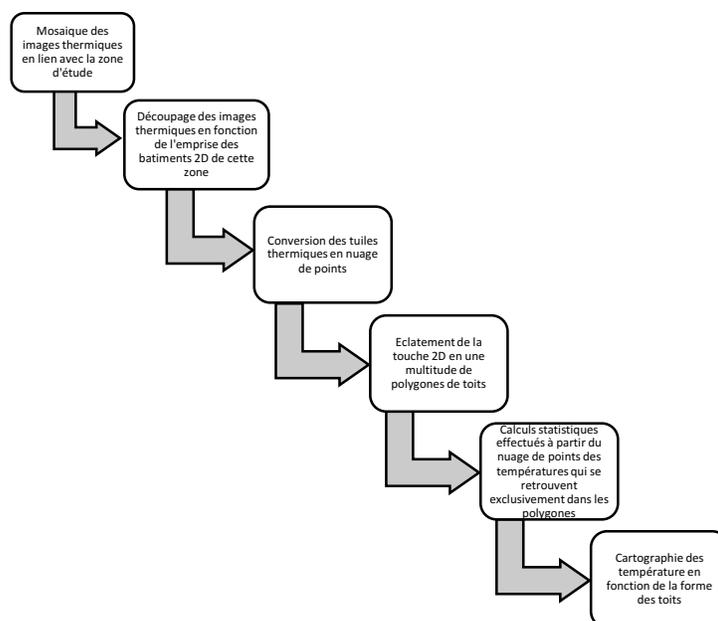


Figure 2.12. Procédure technique d'extraction des valeurs de températures des images thermiques en fonction des bâtiments de la zone

La majorité de ces étapes ont été réalisées sur ArcMap (suite Esri). Le « mosaïquage » des rasters est l'unique étape qui nous a demandé de faire recours à un logiciel de traitement d'image (la suite PCI GEOMATICS). Cette dernière était un peu plus fastidieuse, car il fallait agencer les différentes lignes de vols de façon adéquate en fonction de la date et du numéro de ligne de vol pour avoir une image uniforme (exemple cf. figure 2-6). A la suite du mosaïquage, nous avons entrepris de fractionner notre couche de bâtiments 2D en de multiples couches. Ce qui nous permettait de traiter chaque toit comme un cas à part et ainsi de pouvoir transformer les tuiles rasters de températures qui leur sont propres en nuage de point. C'est donc à partir de ce nuage de point que les calculs statistiques ont pu être amorcés. De plus, compte tenu des multiples étapes et du nombre important de bâtiments (plus de 2500) que comportait nous avons décidé de réaliser une grande partie du travail par programmation au travers de script python (voir annexe A). Cela nous a permis de gagner du temps et d'éviter des erreurs. Cette étape de notre processus est importante, car elle nous permet de

pouvoir confirmer ou infirmer notre hypothèse secondaire 1 et par ricochet répondre à la question secondaire.

#### 2.3.2.2 Traitement Excel

Les traitements réalisés par le script Python, nous ont permis d'avoir une table comportant pour chaque toiture, une température minimale, maximale et une température moyenne. Comme mentionnée précédemment, la couche des bâtiments 2D comporte des informations sur la forme et l'orientation des toits. C'est à partir de ces deux informations que nous avons pu tracer un graphe qui illustre le gain thermique en fonction de la forme de toits. De plus, nous avons aussi pu observer le pourcentage des types de toits présents dans les différentes zones.

#### 2.3.2.3 La simulation 3D afin de déterminer la quantité d'énergie emmagasinée

La simulation 3D est une étape essentielle dans le processus de traitement qui nous permet de déterminer la quantité d'ensoleillement reçue par les toits dans la zone d'étude. Par cette étape, nous avons pu estimer la quantité d'énergie reçue et ainsi visualiser quelle forme de toiture sont les plus propices au gain thermique. La réalisation de cette étape a été un peu plus difficile que les autres, car nous avons eu des soucis de License de logiciel. Pour ce faire nous avons donc mis en place le processus décrit à la figure 2-10.

Le processus mis en place pour la simulation 3D nous a emmené à faire usage d'ARCGIS Pro (suite ESRI). Ainsi, pour ce faire nous avons dû au préalable entreprendre une série de prétraitements sur les données 3D des bâtiments que nous avons générés à partir des bâtiments 2D. Les prétraitements ont donc été essentiellement pour adopter un format éditable par ARCGIS Pro et aussi d'entreprendre un assemblage unique des bâtiments 3D pour chacun des secteurs dans notre zone d'étude.

A la suite du prétraitement des bâtiments 3D, nous avons eu recours au module « visualize solar radiation on building roofs » dans ARCGIS. Ce module offre à partir du modèle numérique de surface (MNS) et des données d'ensoleillement fournis par la NASA (données propres à ARCGIS PRO et à son module) de générer une image des toitures de bâtiments drapées avec les données des gains thermiques calculées. Cette étape nous a aidés à limiter les données d'ensoleillement uniquement aux toitures et ainsi d'obtenir un raster avec le gain thermique pour chaque toiture. Ainsi, on a aussi pu se faire une idée du rendu visuel (voire chapitre 3). Cette étape a été particulièrement éprouvante parce qu'il nous fallait par moment jouer avec la résolution au niveau de la sortie du fichier raster de gain thermique. En effet, lorsque la résolution était proche de celle du capteur TASI de départ, le logiciel avait beaucoup de difficulté à procéder. Nous avons donc dû pour chaque secteur mettre la résolution de sortie à 5 m. À la question pourquoi vouloir absolument garder la même résolution que celle du TASI, nous pensons que cela devrait nous aider à faire des liens entre la température moyenne obtenu sur les toits et le type de matériaux. Aussi, compte tenu du fait que les images TASI avaient été prises au mois d'août, nous avons convenu de garder ce mois pour les calculs statistiques de compilation sur la quantité d'ensoleillement obtenus pour chaque toiture. Ces calculs sont automatiquement générés par le logiciel.

#### 2.3.2.4 Module de calcul de l'énergie solaire avec le 3D

Afin d'estimer la quantité d'énergie qui est reçue par les toitures durant nos travaux de recherche, nous avons eu recours à un module de gestion avancée de données géospatiales ('Calculate solar radiation') de la firme ESRI. Ce module propre aux systèmes d'information géographique a été promu par les travaux des scientifiques Fu et Rich (2000) dont nous nous sommes inspirés. Le module de calcul 3D repose essentiellement sur un modèle mathématique, qui à partir des données altimétriques, de données d'élévation de bâtiments et de données météorologique permet de calculer

la quantité d'ensoleillement reçu dans un espace précis et donc par ricochet d'estimer la quantité d'énergie qui est reçu par un toit.

Il est important de souligner que l'analyse spatiale du potentiel thermique d'une région dépend essentiellement de son modèle numérique d'altitude (MNA) (Fu et Rich, 2000). En effet, ce dernier permet d'estimer avec précision le temps d'exposition du substrat au rayonnement solaire. Les calculs dépendent : d'une part des données d'altitudes et météorologiques qui permettent de déterminer ce qui influence directement le rayonnement solaire. D'autre part, on a recouru à l'usage de données métriques (latitudes), qui nous offrent la possibilité de visualiser la distribution spatiale des températures (Fu et Rich, 2000).

Il est important de souligner que ce modèle génère un champ de vision hémisphérique vers le haut, pour chaque emplacement sur un MNA (Fu et Rich, 2000). Ces différents champs de vision sont alors utilisés pour calculer l'insolation pour chaque emplacement et produire une carte précise de l'insolation. Ce dernier se veut véritablement fiable et il permet d'effectuer des calculs pour une période mensuelle précise (Fu et Rich, 2000).

Dans notre cas précisément, nous avons décidé de fournir au module le modèle numérique de surface (MNS) (modèle numérique d'altitude + la hauteur des bâtiments) pour nos différentes zones d'étude. En faisant cela, nous nous sommes assurés, que la hauteur des bâtiments serait prise en compte dans le calcul, compte tenu du fait que nous sommes dans un secteur urbain. Les données météorologiques étaient fournies par défaut par le module. Afin d'affiner les résultats que l'on obtenait, nous avons décidé de sélectionner une période précise (mois d'août) pour les calculs. Lorsque ces calculs ont été effectués, le logiciel a pu les draper sur des données de bâtiments 3D.

## CHAPITRE III

### PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, nous décrivons comment la mise en application des différents procédés préalablement décrits dans la méthodologie, nous ont permis d'obtenir une série de résultats. Ce sont ces derniers que nous souhaiterons exposer et analyser ici.

#### 3.1 Présentation des résultats

Après les différents traitements, notamment ceux en lien avec les images TASI de jour (voir figure 2-11), nous avons pu dégager des tableaux, des graphiques et des cartes qui nous permettent d'avoir une idée plus exhaustive sur le plan statistique du lien existant entre la forme des toitures et le gain d'énergie.

##### 3.1.1 Lien entre la forme des toitures et le gain d'énergie

Pour valider le lien existant entre la forme des toitures et le gain d'énergie thermique de celles-ci, nous avons, à partir de notre revue des connaissances et de notre méthodologie, réussi à isoler des paramètres d'albédo, de température de surface, d'orientation et d'émissivité. Ces paramètres nous permettent pour chacune de nos zones d'études, d'obtenir des résultats chiffrés qui nous offre la possibilité de cerner la dynamique de gain thermique et forme de toitures.

### 3.1.1.1 Zone des toits plats

Comme soulignés pendant la revue de la littérature (chapitre 1), nous savons que l'albédo permet de caractériser la réflexion d'une surface (Ourda, 2008). Ainsi, un albédo bas (couleur foncée) implique des températures de surface plus élevées puisqu'une plus grande quantité d'énergie est absorbée. Dans ladite zone des toits plats, le traitement Excel (cf. Page 79), montre que la valeur de l'albédo, en lien avec les toitures, est élevée comme l'illustre le tableau 3-1. De plus, la faible émissivité dans ce secteur (voir tableau 11) décrit la faible capacité de certains des matériaux, présent au niveau des toitures de cette zone à émettre et à absorber l'énergie radiative. Outre les paramètres d'albédo et d'émissivité, le paramètre de l'orientation des bâtiments est fondamental, car il permet de définir la quantité d'énergie solaire incidente que peut recevoir une toiture comme le souligne le Groupe ABC Marseille (1999).

Tableau 3.1. Caractéristiques des surfaces en fonction des zones d'études

	Orientation des bâtiments	Réfectivité (albédo)	Émissivité (entre 0 et 1)	Température moyenne de surface en Celsius
Zone Toiture Plates (bitume modifié, multi gravier, bardeau asphalte)	NOO-SEE	0,12	0,90	46
Toiture Plates Blanche	NOO-SEE	0,83	0,92	21
Zone Toiture Pignons (bitumes, bardeaux noir)	E-O, NOO-SSE	0,05	0,91	32
Zone toiture Mansardes (bardeau de bois)	NNO-SSE	0,23	0,95	37

Dès lors, lorsque ces trois paramètres sont couplés, on réalise d'une part que l'orientation joue un rôle de régulateur au niveau de la quantité de RS recue et par

ricochet donc de la quantité d'énergie et de la température moyenne de surface des toits. Or comme l'illustre notre tableau 3-1, on note une température assez élevée pour les toits de forme plate. D'autre part, on a aussi noté que l'orientation a très peu d'influence sur le gain énergétique pour les toitures plates comme nous l'illustre la figure3-1.

Néanmoins, il est aussi primordial de souligner la présence des toits plats blancs. Ces derniers ont un albédo bas et une émissivité élevée à cause du type de revêtements qu'elles portent et de leurs capacités à diffuser le RS. ceci contribue à faire baisser la température moyenne de surface de ces toitures.

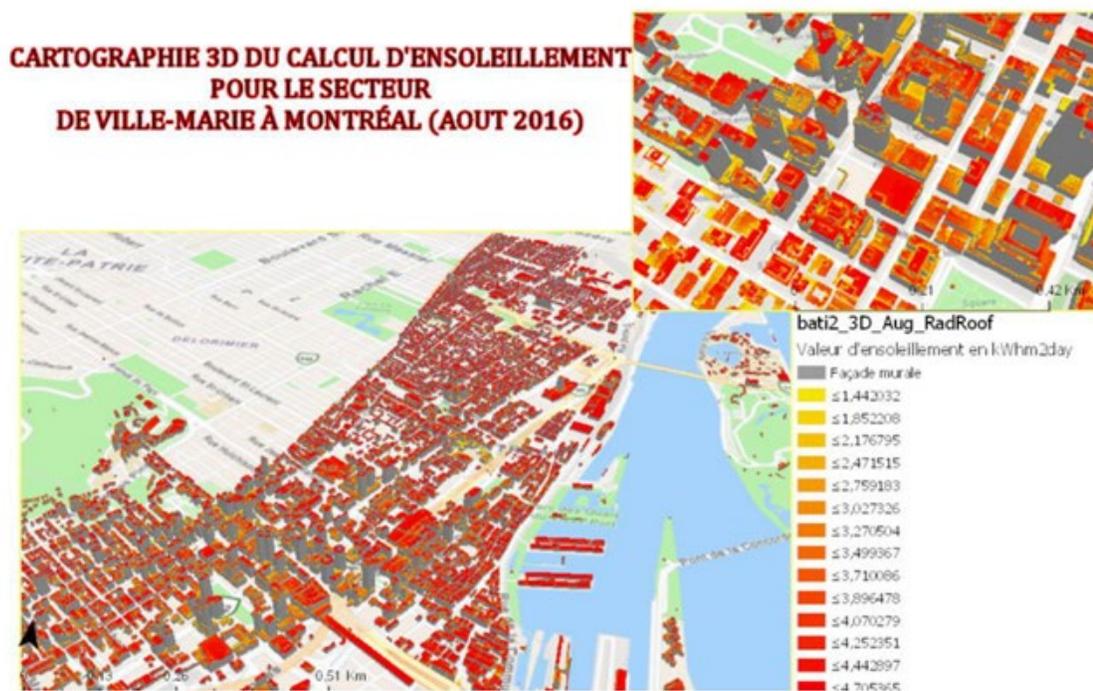


Figure 3.1. . Exemple de carte d'enseillement pour l'arrondissement Ville Marie

### 3.1.1.2 Zone des toits mansardes

Selon les résultats, d'émissivité et d'albédo, obtenus à la suite des différents traitements (comme exposés aux pages 77-81), on a conclu que les principaux paramètres influents dans la zone des toits à forme mansardes sont : l'albédo et l'orientation des bâtisses. Comme mentionné au tableau 1-1, nous savons que les toits ayant ces formes-là ont souvent des revêtements de type naturelles. En jumelant, l'information issue du tableau 1-1 et les données statistiques d'émissivités obtenue avec les images TASI, on observe des températures de surface assez basse comme l'illustre le tableau 3-1. De plus, l'orientation des toits a aussi une certaine influence sur ces températures de surface. En effet, compte tenu de la forme mansarde des toitures l'intensité du rayonnement solaire reçue n'est pas uniforme partout sur la toiture. Ainsi, certaines zones du toit seront plus exposées que d'autres, ce qui entraîne donc un gain d'énergie total moyen comme l'illustre les figures 3.2 et 3.3.

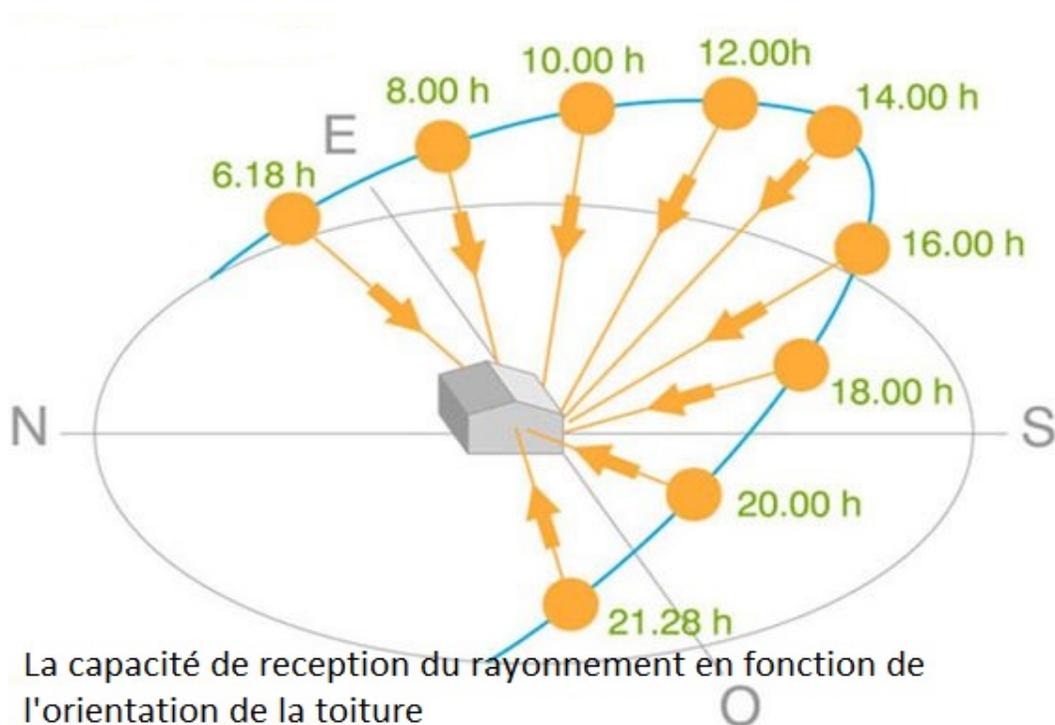


Figure 3.2. Rayonnement reçu en fonction de l'orientation de la toiture (Source: <https://www.arrevol.com/blog/cual-es-la-mejor-orientacion-para-tu-vivienda-casa>)

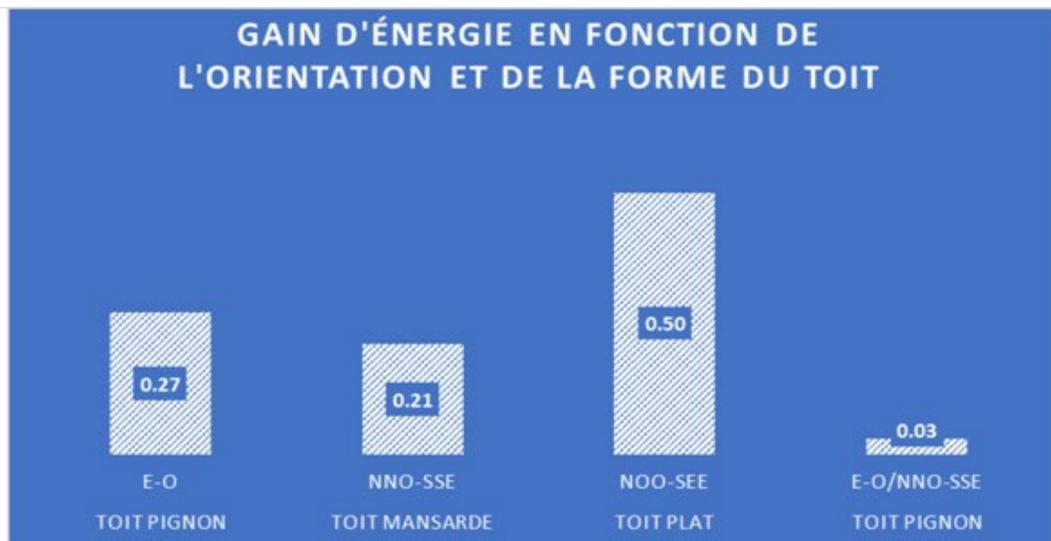


Figure 3.3. Statistique des possibilités de gain d'énergie en fonction de l'orientation et de la forme du toit

### 3.1.1.3 Zone des toits pignons

Pour la zone des toits pignons, nous avons dénoté un taux d'albédo moyennement élevé. Ce dernier s'explique en partie avec les données compilées au tableau 1-1. En effet, les toitures de forme pignon à Montréal, sont souvent revêtues de bitumes ou de bardeaux noirs (SEMERY, 2012), or nous savons que ces matériaux ont un albédo faible, car ils emmagasinent énormément d'énergie émise par le rayonnement solaire. Mais ce stockage est biaisé par l'orientation des édifices (comme l'illustre le tableau 3-1 et la figure 3-2). Nous savons que les toits pignons ont deux versants (cf. Figure 1-4), aussi en l'associant avec le paramètre de l'orientation, on note qu'une partie du toit reçoit une forte quantité d'énergie tandis que l'autre non. Ainsi, lorsqu'on vient à compiler les données de températures pour les deux versants de la toiture, on constate un écart notable qui se traduit par une température moyenne relativement basse. Dès lors tout

comme pour la zone des toits mansarde, on peut dire que l'orientation et l'albédo joue un rôle prépondérant dans la notion de gain thermique pour les toits de forme pignons (voir tableau 3-1).

#### 3.1.1.4 Résumé

En observant les différents paramètres (albédo, émissivité, orientation, température de surface); que nous avons au départ pour valider s'il y a une dynamique existante entre les formes de toits, et la notion de gain ou de perte d'énergie thermique, nous sommes arrivés à quelques conclusions.

Premièrement, indépendamment de l'orientation du bâtiment les toitures de formes plate vont stocker une grande partie du RS qui est émis et ce en partie à cause de l'homogénéité dans la structure de la forme. La seule différence à noter est que le type de matériaux mis sur cette forme peut influencer sur le gain thermique. En effet, il est important de souligner que les toitures plates permettent souvent l'installation de matériaux ayant une forte masse thermique (voir tableau 1-3) comme les revêtements de type bitumineux tels que le bardeau d'asphalte (Marsolais, 2007; Ecohabitation, 2017). Selon Séméry (2012), le bardeau à base d'asphalte est le plus utilisés dans la province, et près de 90 % des toitures plates dans la région de Montréal en sont recouvert. Cependant, on constate depuis quelques années à cause des avancées technologiques et aussi à cause de la réduction des coûts que des revêtements, ayant une faible masse thermique, comme ceux de type élastomères ou des toits dit blancs sont de plus en plus en vogue essentiellement pour les toits plats (Parent, 2013). Ce qui a pour conséquence une réduction de la température au niveau de cette forme de toiture (O'Driscoll, 2010) (voir figure 3-3)

Deuxièmement, nous avons aussi constaté que pour les toitures de forme mansarde comme pour celles de forme pignon, l'orientation joue un rôle prépondérant et ce peu importe le type de matériel installé sur la toiture. Par exemple, nous avons que des

revêtements comme les élastomères (toits blancs), nous offre une garantie de réduction drastique de la température (5° à 15°C) via la réflexion de l'énergie solaire incidente (O'Driscoll, 2010), alors lorsqu'associé avec le paramètre orientation sur ces toits, on peut facilement corrélérer la baisse de gain thermique, l'orientation de la bâtisse et ainsi estimer les températures de surfaces. Dès lors, l'orientation dans ces deux cas de figures devient un élément essentiel lorsque l'on veut déterminer les températures de surface. Nous tenons à souligner que dans notre étude nous n'avons pas eu à faire à des toits mansardes/pignons de couleurs blanches.

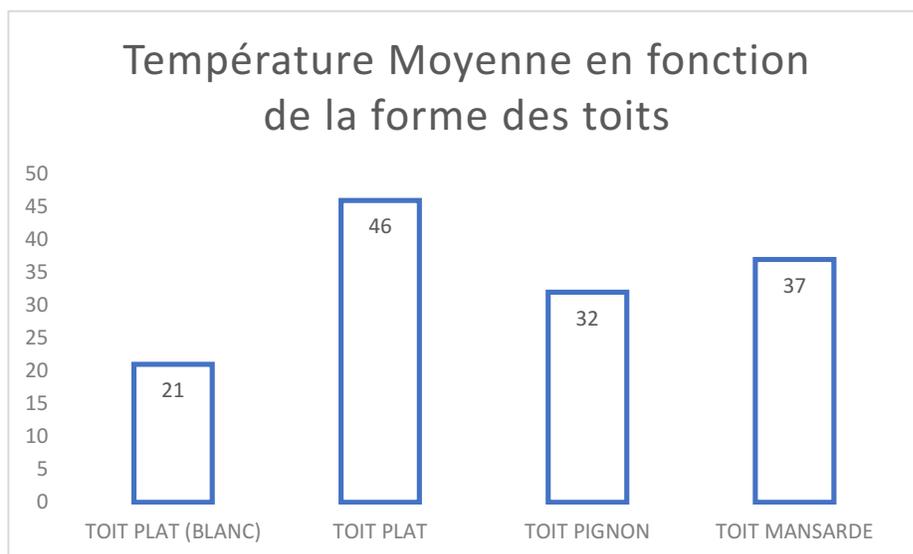


Figure 3.4. . Distribution de la température en fonction des différentes sortes de toits plats

En conclusion, peu importe la forme des toitures nous pouvons dire qu'il y'a une corrélation existante entre celles-ci et le gain thermique. Cette corrélation dépend de plusieurs paramètres comme le type de matériaux (albédo et émissivité), l'orientation et les températures de surface. Cependant, le paramètre le plus influent est le type de revêtement posé sur la forme de toit, car il détermine les valeurs statistiques d'émissivité, de température de surface et d'albédo du toit. Par exemple, nous avons observé que pour les toitures plates, le type de matériaux mis sur l'ossature du toit va

grandement influencer l'albédo et l'émissivité de ce dernier. Or plus l'albédo et l'émissivité sont élevés, comme l'illustre les tableaux 1-3 et 1-5, plus la toiture aura une capacité de stockage d'énergie accrue comme nous l'explique Herde & Liébard (2004). En définitive, lorsque le RS atteint la toiture, ce dernier peut dépendamment de la nature des matériaux constituant le toit, soit absorber (émissivité) une grande partie de ce flux solaire ou simplement le réfléchir (albédo). Dès lors, quand le rayonnement solaire est absorbé par la paroi, ce dernier se transforme en chaleur et élève la température de surface de la paroi (Herde & Liébard, 1996-2004).

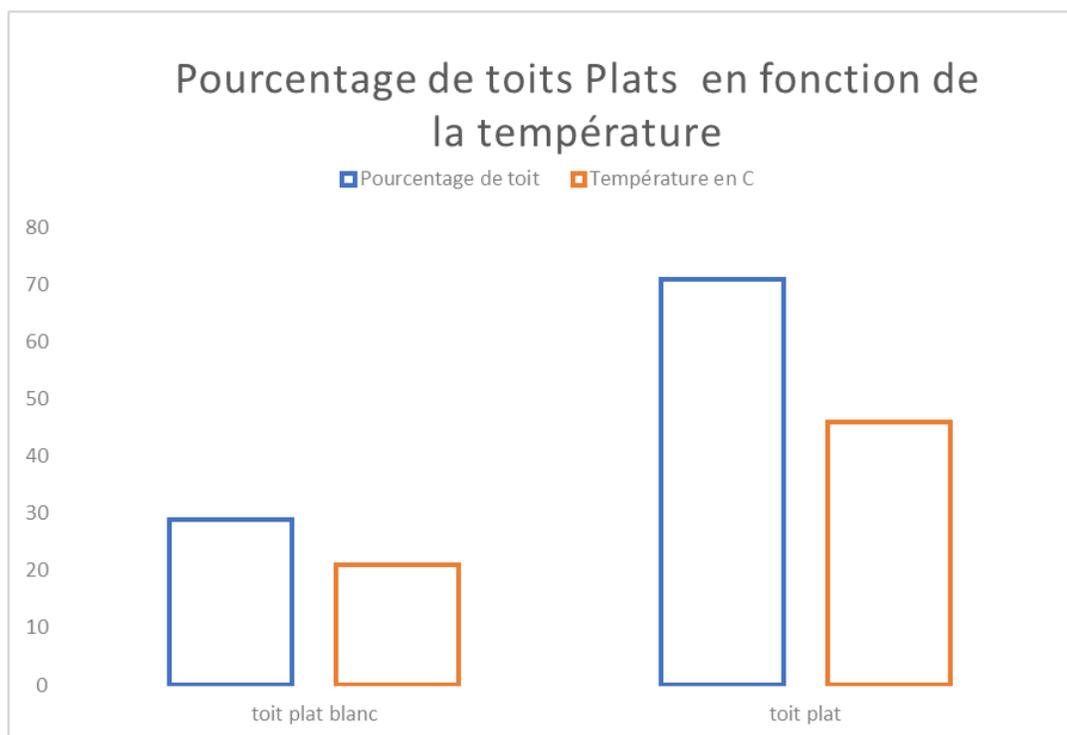


Figure 3.5. . Distribution de la température en fonction des différentes sortes de toits plats

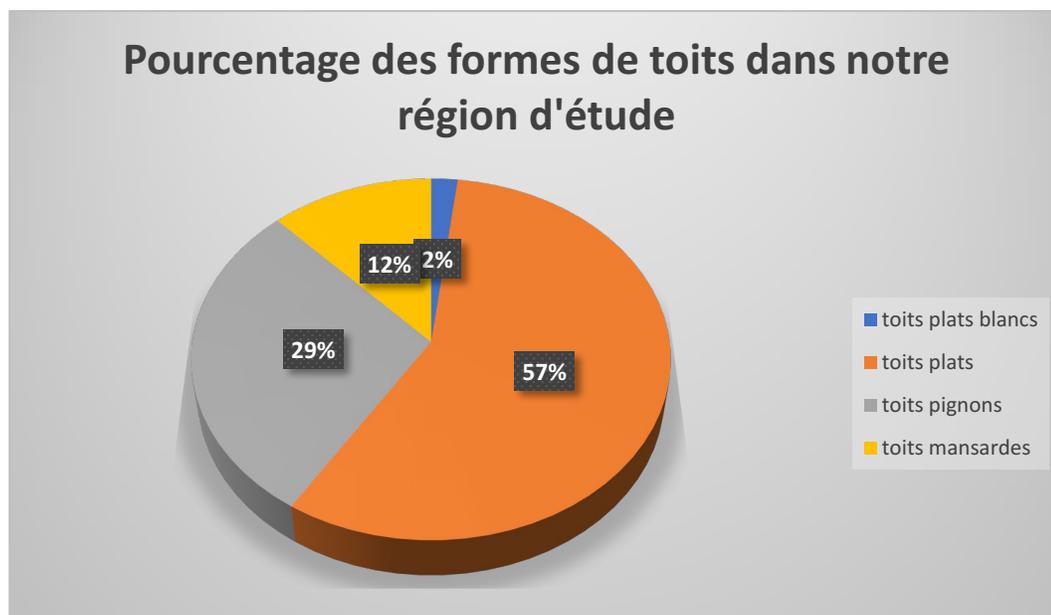


Figure 3.6. Distribution des formes de toitures dans la région d'étude

### 3.1.2 Lien entre l'incidence de gain thermique des toitures et les îlots de chaleur urbain (ICU)

Pour établir le lien existant entre l'incidence du gain thermique des toitures et les ICU, nous avons, d'une part, à partir de notre méthodologie, réussi à isoler des résultats sur l'énergie emmagasiné par les différentes formes de toitures en période de canicule et d'autre part nous avons essayé de dégager un lien avec les ICU.

#### 3.1.2.1 Résultats énergie emmagasinée en période de canicule

Afin d'obtenir de l'information quantifiée sur le gain thermique des toitures, nous avons décidé de procéder à une simulation 3D (cf. Page 80-81). Dès lors, par le processus de la simulation, nous avons cherché à déterminer la quantité d'énergie reçu par le toit et dans quelle proportion elle est conservée. Cela a pu être réalisé pour chacune des formes de toits que nous avons étudiées. Ainsi, cette énergie calculée par

les modules d'ARCGIS Pro, est mesurée en Kwhm2day (Kilowatt heure/m2/jour). Nous tenons cependant à préciser que nous n'avons pas pu extraire la proportion d'énergie qui est absorbé et celle qui est réémise par l'albédo, parce que le logiciel utilisé ne nous donnait pas la possibilité d'avoir cette option de calcul. Cela ne nous a donc pas permis d'avoir des informations sur les quantités pouvant contribuer au ICU.

Tableau 3.2. Énergie moyenne reçue en Kjm2 pour chaque forme de toits

	Toits plats blancs	Toits plats	Toits pignons	Toits mansardes
Énergie moyenne reçue et stockée (en kJ/m2)	2.01	7.044	4.85	3.38
Nombre d'édifices	99	260	402	559

Ainsi, à la suite de la simulation 3D, nous avons pu dégager des données statistiques, qui nous ont donné une idée globale de la situation énergétique et en fonction des

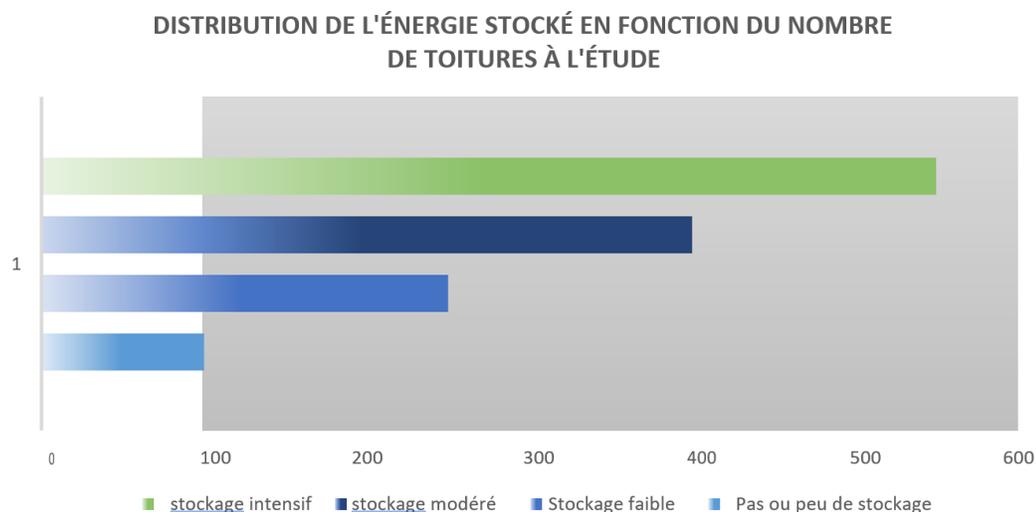


Figure 3.7. . Quantification des bâtiments ayant une capacité de stockage d'énergie.

différentes formes de toitures (voir tableau 3.2). Ce portrait global démontre surtout qu'il y'a un fort emmagasinage d'énergie pour les toitures dites plates. Cela ne semble pas surprenant car, comme nous l'avons précédemment démontré les toitures plates à cause de leur type de revêtement stockent plus d'énergie (voir tableau 3.1 et figure 3.7), tandis que celles mansardes et pignons stockent moins non seulement à cause de leurs revêtements et aussi à cause de l'orientation des édifices qui les portent.

### 3.1.2.2 Lien entre les ICU et gain d'énergie thermique des toitures

L'augmentation de la température en ville engendre de multiples conséquences sur nos environnements urbains. La mise en place de système comme les ICU est une de ces conséquences. Un îlot de chaleur est une zone qui, en période estivale, acquière une température plus élevée que son environnement immédiat (Mathieu, 2015). Lorsque l'on observe les différents paramètres qui contribuent à la mise en place d'îlots de chaleur, on constate la présence d'éléments comme l'accroissement de la population, une minéralisation accrue et une diminution des espaces verts. De prime à bord, à cause de ces autres facteurs influençant la présence ou non des ICU, et compte tenu du fait que nous n'avons pas de données sur la proportion d'énergie qui est absorbé et celle qui est réémise par l'albédo, il serait hasardeux d'établir de lien direct entre les ICU et le gain d'énergie thermique au niveau des toitures. Cependant, on peut se risquer d'y déceler un lien indirect. En effet, la forte minéralisation a engendré un boom (près de 60%) de demandes de permis pour la mise en place de nouvelles bâtisses. (Friedman et Côté, 2003, p. 199). Cette flambée des demandes de permis permet d'illustrer un degré d'étalement urbain multiplié par 26 entre 1971 et 2011 (Gagné, 2017). La construction de nouveau bâtiments vont nécessiter la mise en place de nouvelles toitures et

dépendamment de la forme et du type de revêtement la recouvrant on peut avoir une incidence indirecte sur les ICU.

En résumé, il est difficile d'établir un lien direct entre la forme des toitures et l'augmentation des ICU. Mais, nous pouvons cependant établir un lien indirect entre ces dernières.

## 3.2 Discussion des résultats

### 3.2.1 Critique des résultats

Les résultats obtenus nous ont permis de déceler certains paramètres qui ont une influence directe sur le gain d'énergie par les toitures. Ces paramètres (albédo, émissivité) sont confirmées avec les résultats des travaux qu'ont effectués Canuel Ouellet, (2017) et Bastien Fontaine (2016). Cependant, le paramètre orientation des toitures qui ressort de notre travail et qui n'a pas été abordé par ces autres auteurs est très intéressant, car il nous permet de détecter une légère nuance quand il s'agit notamment des toits avec des versants (mansardes et pignons).

S'il a été facile de montrer le lien existant entre le gain thermique et la forme des toitures, il a été beaucoup plus difficile de démontrer le lien existant entre l'augmentation des ICU et le gain thermique en fonction de la forme de celles-ci. Il nous a fallu faire usage de la littérature pour essayer de déceler un quelconque lien

## CONCLUSION

L'analyse de la région de Montréal et plus précisément de nos différentes zones d'études, s'est avérée très intéressante afin de comprendre l'apport que peut avoir la forme des toits dans le gain thermique des bâtiments.

Notre projet visait d'une part à comprendre et à approfondir nos connaissances sur la dynamique thermique d'une toiture en fonction de sa forme. D'autre part, nous souhaitions voir s'il était possible de détecter l'influence que ces toits avaient sur les ICU. Pour ce faire, nous nous sommes basées sur des images TASI de 2017, qui étaient fournies par la ville de Montréal et sur des données 3D/2,5D des couches de bâtiments de notre zone d'étude de la ville de Montréal. Ce travail, nous a permis entre autres de passer en revue les toits en fonction de leurs formes et aussi de voir quel est leur impact de façons statistique sur les températures de surface. Il est important ici de préciser que si beaucoup de travaux existent sur la dynamique des températures de surface et des matériaux, cette étude serait pionnière à date de ce qui est de l'intégration de la notion de forme.

Cependant comme tout travail, ce projet comporte certaines limites. En effet, l'une des limites que nous avons rencontrées étaient en partie le délai dans l'acquisition des données images thermique et aussi dans la difficulté à pouvoir relier les données 3D pour sortir des liens appropriés entre les ICU et l'impact que peut avoir la forme des toitures. Aussi, nous tenons à préciser que d'autres variables de l'environnement (végétation en particulier) qui ont une certaine incidence sur le gain thermique au niveau de la toiture n'ont pas été prises en compte dans cette recherche. La complexité dans l'analyse qu'aurait induit ces facteurs ne nous aurait pas permis de couvrir le

travail dans le temps alloué à un mémoire de recherche de niveau Maitrise de même que les moyens disponibles pour réaliser les travaux. A la lumière des différents résultats et analyses, il nous convient ici de dire que la forme des toitures a certainement une influence sur le gain thermique des toits et des bâtiments. L'abondance de toits plats a aussi mis en exergue le fait que certaines formes de toits étaient plus enclines à permettre un gain d'énergie que d'autres.

Néanmoins, nous n'avons pas pu valider l'hypothèse concernant la contribution des formes de toits dans le gain thermique au milieu d'un environnement d'ICU. Cependant, nous avons pu grâce à la littérature dégager une ficelle indirecte. Nous estimons que pour réellement vérifier cette dernière, cela nous prendrait plus de temps et surtout d'avoir des données meilleures au niveau du 3D et les moyens en logiciel plus adapté capable de nous permettre d'extraire l'énergie qui est absorbé et celle qui est réémise par l'albédo des toitures. Cette dernière pourrait faire l'étude d'une thèse de doctorat ou d'un autre mémoire de maitrise.

## ANNEXE A

### EXEMPLE DE SCRIPT PYTHON UTILISÉ LORS DU TRAITEMENT DES DONNÉES

```
#3. Zipp des listes générés
test= zip(pol,poi)
print test
count = arcpy.GetCount_management(test)
print count
'''

##N = len(liste)
first = 296047
last = 301464
N = last - first + 1
#4. calcul des Points statistics dans un polygone
for i in range(first, last + 1):
    if i % 10 == 0:
        print "{}/{}".format(i, last)
    x = 'T{}_0'.format(i)
    if not arcpy.Exists(x):
        continue
    y = x + '_pts'
    nom = x + "_Stat"
    if arcpy.Exists(nom):
        arcpy.Delete_management(nom)
    mem_name = "in_memory\\Point_Statistics"
    mem_pol= arcpy.CopyFeatures_management(x,mem_name)
    arcpy.AddField_management(mem_pol, "xMinimum", "Double")
    arcpy.AddField_management(mem_pol, "xMaximum", "Double")
    arcpy.AddField_management(mem_pol, "xAverage", "Double")
    result = arcpy.GetCount_management(x)
    feat = int(result.getOutput(0))
    arcpy.SetProgressor("step","Calculating Point Stat...", 0, feat, 1)
    with arcpy.da.UpdateCursor(mem_pol, ("SHAPE@", "xMinimum", "xMaximum", "xAverage")) as x_update:
        for x_row in x_update:
            try:
                point_values=[]
                mem_point = arcpy.MakeFeatureLayer_management(y,"mem_point")
                arcpy.SelectLayerByLocation_management(mem_point, "INTERSECT", x_row[0])
                with arcpy.da.SearchCursor(mem_point, ("grid_code")) as point_search:
                    for point_row in point_search:
                        if point_row[0]:
                            point_values.append(float(point_row[0]))
                x_row[1]=(min(point_values))
                x_row[2]=(max(point_values))
                x_row[3]=(sum(point_values)/float(len(point_values)))
                x_update.updateRow(x_row)
                arcpy.SetProgressorPosition()

            except Exception as e:
                arcpy.AddMessage(str(e.message))
    arcpy.CopyFeatures_management(mem_pol, nom)
    arcpy.Delete_management(mem_pol)

    arcpy.Delete_management(mem_point)
    print nom
    arcpy.ResetProgressor
    arcpy.GetMessages()
```

## BIBLIOGRAPHIE

AKBARI, H., POMERANTZ, M., & TAHA, H. (2001). *Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas*. In *Solar Energy* vol 34, pp. 295-310.

ALEXANDRI, E., & JONES, P. (2008). *Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates*. In *BUILD ENVIRON* vol 43, pp. 480-493.

ALLEMAND, S. (2012, 1). LES VILLES EN MUTATION. « *L'Économie politique* » vol 53, pp. 6-6.

ANQUEZ, P., et HARLEM, A. (2011). *Les îlots de chaleurs dans la région métropolitaine de Montréal: causes, impacts et solution*. (C. d. durable, Éd.) ESG UQAM.

ANTIER, G. (2015). « *Quelles villes pour demain* ». In *COP21 Paroles d'experts*, (p. 11). Paris.

BEKKOUCHE, S., et al., (2012). *L'Apport de l'Émissivité Thermique: Cas d'un Mur Type Opaque Muni de Cavités d'Air*. Le 2eme Séminaire Internationales sur les Énergies Nouvelles et Renouvelables, (p. 7). Ghardaïa.

BESSEMOULIN, P., et OLIVIERI, J. (2000, Septembre). « *Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette* ». *La météorologie* 8e série-n°31.

BIGORGNE, J. (2012). *Les îlots de chaleurs urbains à Paris*. Paris: Ateliers parisiens d'urbanisme.

- BLASCHKE, T., HAY, G., WENG, Q., et RESCH, B. (2001). *"Collective sensing: Integrating geospatial technologies to understand urban system – An overview"*. *Remote Sensing*, 3(8), pp. 1743-1776.
- BOISELLE, L. (2010). *Guide de bonnes pratiques. Gestion écoresponsable des terrains*. Gouvernement du Québec.
- BOUCHER, I. (2006). *LES TOITS VERTS*. QUEBEC. AFFAIRES MUNICIPALES ET RÉGIONALES.
- BOYER, D. (2010). *L'augmentation de l'albédo des toitures de bâtiments pour diminuer la progression des changements climatiques*. Montréal: École Polytechnique de Montréal.
- BOZONNET, E. (2005). « *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments cas de la rue canyon* ». Université de la Rochelle.
- BREZT, S., & AKBARI, H. (1997). *"Long-term performance of high-albedo roof coatings"*. In *Energy and Buildings* vol 25, pp. 159-167.
- CANBING LI, et al., (2013). *"Interaction between urban microclimate and electric air-conditioning energy consumption during high temperature season"* in *Applied Energy*. Vol 117. Récupéré sur Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913009641> (2013, Décembre 28)
- OUELLET, O. (2017). *Analyse du comportement thermique des surfaces à l'aide de l'imagerie aéroportée infrarouge thermique (TABI-1800) et hyperspectral (CASI-1500) dans l'optique de minimiser l'intensité des îlots de chaleur urbains sur l'île de Montréal*. Montréal: UQAM.
- CARNAHAN, W., & LARSON, R. (1990). *"An analysis of an urban heat sink"*. *Remote Sensing of Environment* VOL 33, pp. 65-71.
- CAVAYAS, F., & BAUDOIN, Y. (2008). *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)*. Conseil Régional de l'Environnement de Laval.
- CAVAYAS, F., & BAUDOIN, Y. (2008). *Projet Biotopes: Évolution des occupations du sol, du couvert végétal et des îlots de chaleur sur le territoire de la CMM (1984-2005)*. Montréal: Ville de Montréal.

- CNRS. (1996). *Albédo*. Récupéré sur Le Centre de Documentation du LMD: [http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/publi/1996/Manip\\_Billet\\_1996/Scan/p\\_dossier\\_6.pdf](http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/publi/1996/Manip_Billet_1996/Scan/p_dossier_6.pdf)
- CULLEN, M. (1990). *LES COUVERTURES EN ARDOISES AU CANADA*. Environnement Canada, Service des Parcs.
- DUNTON, N., & MALKIN, H. (2008). *Guide de l'architecture contemporaine de Montréal*. Montréal.: Presses de l'université de Montréal.
- DUPUY, G. (2008). *Habitat Sain et Écologique*. Québec: Éditions Quebecor (Collection Essai).
- ÉCOBATI. (2015). *La diffusivité thermique*. Récupéré sur ÉCOBATI: <https://www.ecobati.com/fr/a-propos/services/conseils/lexique/la-diffusivite-thermique> (30/08/2017 à 20h00)
- ÉCOBATI. (2015). *L'effusivité thermique (Ef)*. Récupéré sur ECOBATI: <https://www.ecobati.com/fr/a-propos/services/conseils/lexique/effusivite-thermique> (06/05/2018 à 22h00)
- Energie Facteur 4. (2018). *La thermique: comment ça marche? - Des photons à la chaleur*. Récupéré sur Energie Facteur 4: <http://www.ef4.be/fr/thermique/comment-ca-marche/> (09/03/2018 à 12h00)
- ESTRADA, F., WOUTER BOTZEN, W., & TOL, R. (2017, Mai 29). *Nature Climate Change*. Récupéré sur Nature: <https://www.nature.com/articles/nclimate3301> (16/02/2019 à 22h00)
- FONTAINE, B. (2017). *Rapport de Stage: Mémoire de la maîtrise professionnelle en géographie*. Montréal: Université de Montréal.
- FRIEDMAN, A., & Côté, M. (2003). *Maisons coûts abordables et communautés viables*. Projet d'une décennie de transition. Société d'habitation du Québec.
- FU, P., et P. M. RICH. 2000. *The Solar Analyst 1.0 Manual*. Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA. Consulté en ligne en Mars 2020. Liens : [http://professorpaul.com/publications/fu\\_rich\\_2000\\_solaranalyst.pdf](http://professorpaul.com/publications/fu_rich_2000_solaranalyst.pdf)
- GAGNÉ, S. (2017, Juin 3). *Comment contenir l'étalement urbain?* Le Devoir. Récupéré sur <http://www.ledevoir.com/vivre/habitation/500108/urbanisme-comment-contenir-l-etatement-urbain> (07/09/2018 à 22h00)

GIGUÈRE, M. (2009). *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*. Institut National de Santé publique du Québec. (Page 10)

Guide du Patrimoine et de la Rénovation de Qualité. (2017). *LA TOITURE, UN TRAIT DE PERSONNALITÉ ARCHITECTURAL*. Récupéré sur GUIDE DU PATRIMOINE ET DE LA RÉNOVATION DE QUALITÉ: <https://www.monguidedupatrimoine.com/fr/toiture/> (27/03/2018 à 22h00)

GRAU, E. (2012). *Modélisation DART du transfert radiatif Terre-Atmosphère pour simuler les bilans radiatif, images de télédétection et mesures LIDAR des paysages terrestres*. (Thèse de Doctorat). Toulouse: Université Paul Sabatier-Toulouse III. (Page 56)

Groupe ABC Marseille. (1999) *Formes et dimensions d'une protection solaire en fonction de l'orientation*. Récupéré le 3 octobre 2017 de <http://www.marseille.archi.fr.abc.textes>

HARGREAVES, S. (2009). *White roofs to fight global warming*. CNN Money. Récupéré sur [http://money.cnn.com/2009/07/13/news/economy/white\\_roofs/?postversion=2009071313](http://money.cnn.com/2009/07/13/news/economy/white_roofs/?postversion=2009071313) (14/06/2016 à 14h00)

HERDE, A., & LIÉBARD, A. (2004). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*.

HISTOIRE DU QUÉBEC. (2012). *L'ARCHITECTURE AU QUÉBEC*. Récupéré sur HISTOIRE DU QUÉBEC: <http://histoire-du-quebec.ca/architecture-quebec/> (14/06/2016 à 14h20)

INDIANA UNIVERSITY LIBRARY. (2019, Février 16). *Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) Data*. Récupéré sur Remote Sensing: [http://webapp1.dlib.indiana.edu/virtual\\_disk\\_library/index.cgi/4916230/FID1230/html/casi.htm](http://webapp1.dlib.indiana.edu/virtual_disk_library/index.cgi/4916230/FID1230/html/casi.htm) (24/05/2019 à 17h00)

ITRES. (2019, February 15). *TASI-600 Thermal AirboneBroadband Imager*. Récupéré sur ITRES: <http://www.itres.com/tasi-600/>

JAFFAL, I., OULDBOUKHITINE, S.-E., & BELARBI, R. (2012). "A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance". In *Renewable Energy* vol 43, pp. 157-164.

KABORÉ, M. (2015). *Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne*. (Thèse de doctorat 2IE). Ouagadougou, Burkina Faso: Génie Civil et Sciences de l'Habitat 2IE.

- KARL, T. e. (2009). *Global Climate Change Impacts in the United States*. New York: Cambridge University Press.
- KELLERITS. (2017). *Émissivité : définition et influence sur la mesure de température sans contact*. Récupéré sur KELLERITS: <http://www.keller-its.fr/pyrometre-application/emissivity-definition-and-influence-in-non-contact-temperature-measurement.php>
- KLEIN, J.-L., LÉVESQUE, B., & FORTAN, J.-M. (2003). *Reconversion productive et économie plurielle: le défi territorial*. Presses de l'Université du Québec.
- MARSOLAIS, C. (2007). *Les origines du toit plat montréalais*. La Presse.
- MATHIEU, R. (2015). *Variation des températures au sol selon la nature de la surface et la morphologie urbaine sur l'île de Montréal*. Montréal: UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL.
- MAYER, N. (2018). Rayonnement thermique. Récupéré sur FUTURA SCIENCE: <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-rayonnement-thermique-16047/>
- Ressources Naturelles Canada. (2016, 08 17). *Tutoriel: Notion fondamentales de télédétection*. Récupéré sur Ressources Naturelles Canada: <https://www.rmcan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imagerie-satellitaire-photos-aeriennes/imagerie-satellitaire-produits/ressources-educatives/9310>
- NETZSCH. (2018). *Définition de la Diffusivité Thermique*. Récupéré sur NETZSCH: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/fr/landing-pages/definition-de-la-diffusivite-thermique/>
- NIACHOU, K., et al., (2001, Janvier 01). *ENERGY AND BUILDINGS* vol 33, pp. 719-729.
- NICHOL, J. (1996). *"High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: A satellite-based study"*. in *Journal of Applied Meteorology* vol 35, pp. 135-146.
- O'DRISCOLL, S. (2010). *"White roofs cool energy bills"*. In: *Washington Post*. Récupéré sur <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2010/09/16/AR2010091607740.html>
- OMS, et ONU-HABITAT. (2010). *"L'Essor des villes modernes"*. Dans O. & ONU-Habitat, *La face cachée des villes: mettre au jour et vaincre les inégalités en santé en milieu urbain* (pp. 3-10).

OURDA, M. (2008). *L'influence de la réflectivité des matériaux (albédo) sur la modification du microclimat et le confort thermique extérieur dans un canyon urbain*. Université de Constantine.

Parent, R.-M. (2013). Choisir le toit de votre maison : Plat, en pente ou mansardé. Récupéré sur [SoumissionRenovation.ca](http://soumissionrenovation.ca):

<https://soumissionrenovation.ca/choisir-toit-maison-plat-pente-mansarde>

PRADO, R., & FERREIRA, F. (2005). "Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials". In *Energy and Buildings* vol 35, pp. 295-300.

ROSENFELD, A., et al., (1995). "Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, up dates". *Energy and Buildings* vol 22, pp. 255-265.

RULLIER, F. (2012). *La place du paysagiste en ville dans un contexte de réchauffement climatique global. La question des îlots de chaleur urbains, application à Montréal*. (Mémoire de maîtrise). Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage.

SAINTENY, G. (2008). "L'Étalement urbain" in *Responsabilité et Environnement* n° 49, 7-18.

SAVELYEV, A., et SUGUMARAN, R. (2008). "Surface Temperature Mapping of the University of Northern Iowa Campus Using High Resolution Thermal Infrared Aerial Imagery" in *Sensors* Vol 8, pp. 5055-5068.

SÉMERY, D. (2012). *Les revêtements de toiture*. TÉLÉ-QUÉBEC.

SOUMISSION RÉNOVATION. (2018). *REFAIRE SA TOITURE - LES ÉTAPES ET LES MATÉRIAUX*. Récupéré sur [SOUMISSION RÉNOVATION.CA](http://soumissionrenovation.ca/refaire-toiture): <https://soumissionrenovation.ca/refaire-toiture>

STATISTIQUE MONTRÉAL. (2017, Décembre 16). *Bilan économique 2016: Agglomération de Montréal*. Récupéré sur Portail Document Montréal: [http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/MTL\\_STATS\\_FR/MEDIA/DOCUMENTS/BILANECONOMIQUE2016.PDF](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/MTL_STATS_FR/MEDIA/DOCUMENTS/BILANECONOMIQUE2016.PDF)

STATISTIQUE CANADA. (2016, décembre 13). *POPULATION TOTALE EN 2011 ET EN 2016-Variation-Densité*. Récupéré sur Ville de Montréal, Montréal en Statistiques: [http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?\\_pageid=6897,67887840&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=6897,67887840&_dad=portal&_schema=PORTAL)

STEININGER, M. (1996). *"Tropical secondary forest regrowth in the Amazon: Age, area and change estimation with Thematic Mapper data"*. International Journal of Remote Sensing vol 17, pp. 9-27.

SURFANET. (2018). *RUGOSITÉ de SURFACE*. Récupéré sur SURFANET.ORG: <http://www.surfanet.org/rugosite-de-surface/>

TAILLET, R., FEVRE, P., et VILLAIN, L. (2009). *Dictionnaire de physique*. DE BOECK, Coll Supérieur.

TAINÉ, J., ENGUEHARD, F., et LACONA, E. (2014). *Transferts Thermiques: Introduction au transfert d'énergie* (5e Édition). DUNOD.

UN, World Urbanisation Prospect. (2014). The 2014 révision.

UVED. (2008). *Réflexion*. Récupéré sur ENVCAL - SUIVI DE L'ENVIRONNEMENT PAR TÉLÉDÉTECTION: <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/2-3-reflexion.html>

VARLET-GRANCHET, et al., (1989). *"Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal."* In Agronomie, EDP Sciences vol 9, pp. 419-439.

Ville de Montréal. (2015, Décembre 18). *Schéma d'aménagement et de développement de l'agglomération de Montréal*. Récupéré sur Ville de Montréal\_Portal Docs: [http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/PROJ\\_URBAINS\\_FR/MEDIA/DOCUMENTS/SCHEMA20150401\\_CHAP2\\_2.2.PDF](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/PROJ_URBAINS_FR/MEDIA/DOCUMENTS/SCHEMA20150401_CHAP2_2.2.PDF)

VILLE DE MONTRÉAL. (2018). *Bâtiments*. Récupéré sur Portail données ouvertes: <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/batiment-2d>

VILLE DE MONTRÉAL. (2018, Décembre 16). *Cartes et autres plans des grands parcs: La carte des grands parcs*. Récupéré sur Grands parcs et verdissement: [http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands\\_parcs\\_fr/media/documents/cartes\\_grands\\_parcs\\_2018.pdf](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands_parcs_fr/media/documents/cartes_grands_parcs_2018.pdf)

Ville de Québec. (1988). *Les toitures en pentes: guides techniques*. Québec: Service de l'urbanisme, en collaboration avec le Service des communications.

WENG, Q., et QUATTROCHI, D. (2004). *"Editorial: Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue"* in Remote sensing of environment vol 104, pp. 119-122.

WENG, Q., LU, D., et SCHUBRING, J. (2004). *Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies*. Remote Sensing of Environment VOL 89(4), pp. 467-483.