



HAL
open science

La place du paysagiste en ville dans un contexte de réchauffement climatique global. La question des îlots de chaleur urbains, application à Montréal

Florent Rullier

► **To cite this version:**

Florent Rullier. La place du paysagiste en ville dans un contexte de réchauffement climatique global. La question des îlots de chaleur urbains, application à Montréal. Sciences agricoles. 2012. dumas-00749024

HAL Id: dumas-00749024

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00749024v1>

Submitted on 6 Nov 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



VERSION PAYSAGE
ARCHITECTES PAYSAGISTES

5315 Boulevard Saint Laurent, suite 108,
Montréal, Qc, H2T 1S5

T 514 499 7083

F 514 399 1131

C 514 347 3112

E atelier@versionpaysage.com

AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers

2 Rue André le Notre
49045 Angers,
France
T 02 41 22 54 04

Mémoire de Fin d'Etudes

Diplôme d'ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage*

Année universitaire* : 2011-2012

Spécialité* : MOI

La place du paysagiste en ville dans un contexte de réchauffement climatique global La question des îlots de chaleur urbains, application à Montréal

Par : Florent Rullier

*Volet à renseigner par l'enseignant responsable de l'option/spécialisation**

Ou son représentant

Date :/.../... Signature

Bon pour dépôt (version définitive)

Autorisation de diffusion : Oui Non

Devant le jury :

Soutenu à Angers

le* : 17/10/2012

Sous la présidence de* : *Damien ROUSSELIERE - Enseignant-chercheur en Économie-Gestion*

Maître de stage* : *Jean Jacques BINOUX – Architecte paysagiste Sénior*

Enseignant référent : *Nathalie CARCAUD – Enseignant-chercheur en Paysage*

Autres membres du jury (Nom, Qualité) :

*"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent
que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST".*

Table des matières

Introduction	10
1. Principes fondamentaux	11
1.1. Bases physiques des échanges de chaleur	11
1.1.1. <i>La conduction thermique</i>	11
1.1.2. <i>La convection thermique</i>	12
1.1.3. <i>Le rayonnement</i>	13
1.2. Propriétés physiques des matériaux	13
1.2.1. <i>Propriétés thermiques des matériaux</i>	13
1.2.2. <i>L'albédo</i>	14
1.3. Origine de l'échauffement naturel de la Terre	15
1.4. Le réchauffement climatique	16
1.4.1. <i>La couche d'ozone</i>	16
1.4.2. <i>Les gaz à effet de serre</i>	16
1.5. Les îlots de chaleur	18
1.5.1. <i>Les îlots de chaleur de surface</i>	18
1.5.2. <i>Les îlots de chaleur de la canopée urbaine</i>	19
1.5.3. <i>Les îlots de chaleur de la couche limite urbaine</i>	21
2. L'apparition d'îlots de chaleur à Montréal, origines et conséquences	23
2.1. Les facteurs de surface	23
2.1.1. <i>Morphologie des villes</i>	23
2.1.2. <i>Propriétés thermiques des matériaux urbains</i>	25
2.1.3. <i>Imperméabilisation des surfaces</i>	26
2.2. La perte du couvert forestier	27
2.2.1. <i>Mise en évidence des faits</i>	27
2.2.2. <i>Les effets bénéfiques de l'ombrage</i>	28
2.2.3. <i>L'évapotranspiration, une climatisation naturelle</i>	28
2.2.4. <i>Réduction des gaz à effets de serre</i>	29
2.3. La chaleur anthropique	29
2.4. Des conséquences sur différents plans	31
2.4.1. <i>Impacts sanitaires</i>	31
2.4.2. <i>Impacts sur l'environnement</i>	31
3. Mesures de lutte contre les îlots de chaleur urbains : cas de Montréal	33
3.1. Favoriser les espaces végétalisés	33
3.1.1. <i>Stratégies urbaines de verdissement</i>	33
3.1.2. <i>Végétation et bâtiments une relation à favoriser</i>	35
3.2. La gestion de l'eau dans la problématique de lutte contre les îlots de chaleur urbains	40
3.2.1. <i>Eau libre et fontaines</i>	40
3.2.2. <i>Gestion durable des eaux pluviales</i>	42
3.3. Le choix de matériaux alternatifs pour limiter l'échauffement de l'air urbain	46
3.3.1. <i>Augmenter l'albédo des surfaces</i>	46
3.3.2. <i>Matériaux à faible inertie thermique</i>	47
3.3.3. <i>Matériaux drainants</i>	48
Conclusion	50
Sources bibliographiques	51
Sources sitographiques	54

Glossaire

Albédo : Propriété d'un matériau de qui caractérise sa capacité à réfléchir les rayons solaires. L'albédo est une grandeur sans dimension qui égale au rapport entre le rayonnement réfléchi sur le rayonnement reçu. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé.

Amendement : Un amendement est un produit apporté aux sols pour augmenter leur fertilité en améliorant leur pH (chaux, nitrate d'ammonium), leur structure (sable, vermiculite) ou leurs éléments nutritifs (compost, cendres de bois).

Aménité : La notion d'aménité évoque les aspects agréables de l'environnement ou de l'entourage social, qui ne sont ni appropriables, ni quantifiables en termes de valeur monétaire.

Canopée : Étage sommital de la forêt tropicale humide, qui abrite la majorité des espèces y vivant.

Canyon urbain : noms donné aux rue dont la morphologie est définie par un ratio hauteur de bâtiment sur largeur de rue élevé. Le nom provient de l'analogie morphologique et microclimatique qui peut être faite avec un canyon.

Ecologie écosystémique : Écologie qui concerne un système écologique complet (biotope et biocénose), et donc les relations existant entre les êtres vivants et leur milieu dans un endroit donné.

Egout combinés : (synonyme : égout unitaire) Canalisation recevant aussi bien les eaux usées que les eaux de ruissellement.

Évapotranspiration : L'évapotranspiration est l'effet combiné de l'évaporation et de la transpiration. L'évaporation est le passage de l'eau sous forme liquide sur une surface ou de celle-ci dans l'air, transformée en vapeur d'eau. La transpiration est le mouvement de l'eau passant des plantes dans l'air. Pour une culture, l'évapotranspiration est l'eau perdue dans l'air à partir à la fois de la surface du sol et de celle de la culture.

Fluorocarbures : Nom générique des combinaisons du carbone et du fluor, de formule générale C_nF_{2p} , très inertes chimiquement, et les meilleurs solvants connus de l'oxygène gazeux, ce qui les a fait proposer comme substituts du sang.

Halocarbures : Substance organique synthétique employé comme liquide extincteur et frigorifique. Ce composé chimique est suffisamment stable pour atteindre la stratosphère, qui peut réagir avec l'ozone stratosphérique ou être à l'origine de changements climatiques.

Halons : composé chimique halogéné bromé principalement utilisés pour lutter contre les incendies là où on ne peut utiliser de l'eau (dans les salles d'ordinateurs, par exemple).

Facteur de Vue du Ciel : proportion de Ciel visible sur une photographie prise à la verticale au moyen d'un objectif grand angle (fisheye). Le FVC est exprimé en pourcentage.

Laitiers : sous-produit de la métallurgie et de la combustion, composé principalement d'un mélange d'oxydes de silice, de soufre, de phosphore et d'aluminium. Le laitier sert de matériau pour la construction de routes, de ballast ou de source d'engrais phosphatés.

Physiographique : qui a trait à la description géomorphologique et climatique d'une région

Rugosité : La longueur de rugosité est la hauteur au-dessus du sol du plan où s'applique la condition d'adhérence. Il peut y avoir des variations significatives de la longueur de rugosité selon les saisons, dues par exemple aux feuilles ou à une couverture neigeuse. Elle a une incidence sur la vitesse du vent.

Smog : Le smog est une brume brunâtre épaisse, provenant d'un mélange de polluants atmosphériques, qui limite la visibilité dans l'atmosphère. Il est constitué surtout de particules fines et d'ozone. Le smog est associé à plusieurs effets néfastes pour la santé et pour l'environnement.

Stratosphère : La stratosphère est la couche de l'atmosphère terrestre qui se situe au-dessus de la troposphère (et donc de la tropopause), et qui s'étend jusqu'à la mésosphère, à 50 km d'altitude.

Table des figures

FIGURE 1 : SCHEMA BILAN DU RAYONNEMENT SOLAIRE A LA SURFACE DE LA TERRE	16
FIGURE 2 : COURBE D'EVOLUTION DU CO ₂ TERRESTRE DEPUIS 1950 (FLORENCE KALFOUN D'APRES ETHERIDGE ET AL., 1996)	17
FIGURE 3 : VARIATION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE LA SURFACE TERRESTRE AU COURS DES DEUX DERNIERS SIECLES. (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 2001)	17
FIGURE 4 : REPRESENTATION EN ELEVATION DES ISOTHERMES D'UN ILOT DE CHALEUR URBAIN (RESSOURCES NATURELLES CANADA 2007).....	18
FIGURE 5 : REPRESENTATION EN PLAN DES ISOTHERMES D'UN ILOT DE CHALEUR URBAIN (VOOGT 2002).....	18
FIGURE 6 : IMAGE THERMIQUE DU SECTEUR MONTREAL-EST A L'HIVER ET A L'ETE 2005 (BAUDOIN & RAMIREZ 2005) 19	
FIGURE 7 : IMAGE THERMIQUE DE L'ILE DE MONTREAL OBTENUE PAR TELEDETECTION LE 11 AOÛT 2001 (GUAY ET BAUDOIN 2005)	19
FIGURE 8 : PROFIL DE VENT DOMINANT MOYEN EN SITE HOMOGENE ET EN SITE URBAIN (PLATE ET KIEFER, 2001)	20
FIGURE 9 : MESURES DES TEMPERATURES A DIFFERENTES HEURES D'UNE BELLE JOURNEE D'ETE A VANCOUVER (VOOGT 2000).....	20
FIGURE 10 : REPRESENTATION THEORIQUE DU DOME DE CHALEUR QUI SE FORME AU-DESSUS D'UNE VILLE DANS DES CONDITIONS IDEALES D'ABSENCE DE VENT (LEMONSU 2003)	21
FIGURE 11 : REPRESENTATION THEORIQUE DU PANACHE DE CHALEUR QUI SE FORME AU NIVEAU DE LA COUCHE LIMITE URBAINE EN PRESENCE DE VENT (LEMONSU 2003).....	21
FIGURE 12 : BILAN DES FLUCTUATIONS DE TEMPERATURES DE L'AIR ET DE SURFACE AU COURS D'UNE JOURNEE EN FONCTION DE LA MORPHOLOGIE DU TERRITOIRE (RULLIER D'APRES VOOGT 2002).....	22
FIGURE 13: PHOTOGRAPHIES GRAND-ANGLES POUR MESURER LE FACTEUR DE VUE DU CIEL A FREIBURG (ALLEMAGNE) LE 01-08-2007 (MAYER ET AL. 2009)	23
FIGURE 14 : EVOLUTION DE L'INTENSITE MAXIMALE DES ILOTS DE CHALEUR URBAINS EN FONCTION DE LA RATION H/L.....	24
FIGURE 15 : ILLUSTRATION DU PIEGE RADIATIF CONSTITUE PAR UN CANYON URBAIN COMPARATIVEMENT A UNE RASE CAMPAGNE (COLOMBERT D'APRES GRIFFITH 1976)	24
FIGURE 16 : DIVERS ALBEDOS DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN (COLOMBERT 2008).....	25
FIGURE 17 : PERTURBATION DU TAUX D'INFILTRATION EN MILIEU URBAIN DUE A L'IMPERMEABILISATION DES SOLS (WONG 2008).....	26
FIGURE 18 : COMPARAISON DE LA L'EVOLUTION DES ILOTS DE CHALEURS A MONTREAL PAR RAPPORT A L'EVOLUTION DU COUVERT FORESTIER ENTRE 1984 ET 2005 (CAVAYAS & BAUDOIN 2008).....	28
FIGURE 19 : IMPACT DE LA VEGETATION SUR LA TEMPERATURE (CAVAYAS ET BAUDOIN 2008).....	34
FIGURE 20 : FAÇADE DE LA COOPERATIVE LA TOUR DES ALENTOURS, SITUEE AU COIN DES AVENUES DU PARC ET DES PINS A L'ETE 2007 ET A L'ETE 2008 (CENTRE D'ECOLOGIE URBAINE DE MONTREAL 2009)	36
FIGURE 21 : LA FAÇADE DE LA FRIPERIE DES PETITS FRERES DES PAUVRES, SITUEE AU COIN DES RUES GILFORD ET GARNIER A L'ETE 2008 ET A L'ETE 2009 (CENTRE D'ECOLOGIE URBAINE DE MONTREAL 2009)	36
FIGURE 22 : MUR VEGETAL DE LA FONDERIE DARLING (CATALYSE URBAINE 2007)	38
FIGURE 23 : DUPLEX MONTREALAIS AU COIN GUIFORD-MESSIER COLONISE PAR LA VIGNE VIERGE (MYRIQUE BAUMIER 2011).....	38
FIGURE 24 : COMPOSITION TYPE D'UNE TOITURE VEGETALISEE (RULLIER 2012 D'APRES NIMRODENVIRONMENTAL).....	39
FIGURE 25 : EXEMPLE DE TOIT VERT EXTENSIF, DUPLEX, CENTRE-VILLE DE MONTREAL (GUTHRIE 2011)	40
FIGURE 26 : EXEMPLE DE TOIT VERT INTENSIF, HOTEL HILTON BONAVENTURE (LATOUR 2012)	40
FIGURE 27 : JEUX D'EAU DU PARC WILFRID BASTIEN (THINK.STOCK 2012)	41
FIGURE 28 : PISCINE PUBLIQUE DU PARC LAURIER (TOHU-BOHU 2011).....	41
FIGURE 29 : PATAUGEOIRE DU PARC JEANNE MANCE (WEISENBURGER 2011).....	41
FIGURE 30 : CHEMIN DE BRUME, PLACE DE L'ADRESSE SYMPHONIQUE (DAOUST LESTAGE 2011)	42
FIGURE 31 : FONTAINES SECHES, PLACE DES FESTIVALS (DAOUST LESTAGE 2011).....	42
FIGURE 32 : PARKING DU QUAI DE L'HORLOGE A MONTREAL (CORMIER & ASSOCIES 2012).....	43
FIGURE 33 : SCHEMA D'UNE TRANCHEE DRAINANTE (A GAUCHE) ET TRANCHEE D'INFILTRATION A LYON (A DROITE) (GUIDENR)	44
FIGURE 34 : SCHEMA D'UNE CHAUSSEE RESERVOIR TYPE (GUIDENR)	45
FIGURE 35 : PUIITS D'INFILTRATION (GUIDENR)	45
FIGURE 36 : EXEMPLE D'ASPHALTE COLORE (J.P. SERGENT)	47
FIGURE 37 : RESURFAÇAGE D'UNE ROUTE EN ASPHALTE AVEC DU BETON (GOLDER 2011)	47
FIGURE 38 : BETON DRAINANT (LAFARGE 2011).....	48
FIGURE 39 : PAVES PREFABRIQUES EN BETON DRAINANT (KRONIMUS).....	48
FIGURE 40 : PAVES DE BETON A JOINTS ELARGIS (STRADUSINFRA).....	48

FIGURE 41 : MODULE ALVEOLAIRE A GAZON EN BETON (FEBESTRAL)	49
FIGURE 42 : MODULE ALVEOLAIRE A GAZON EN POLYETHYLENE HAUTE DENSITE (RITTERDAL).....	49

Table des tableaux

TABLEAU 1 : ALBEDOS DE QUELQUES SURFACES TERRESTRES	10
TABLEAU 2: CHALEUR ANTHROPIQUE (QF) ET RAYONNEMENT NET TOUTES LONGUEURS D'ONDE COMPRISES (Q*) DANS PLUSIEURS VILLES DU MONDE (COLOMBERT D'APRES OKE 1978)	30

Table des annexes

ANNEXE I : PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION D'USAGE COURANT	
ANNEXE II : DÉTERMINATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION	
ANNEXE III : COMMENT L'EAU EST-ELLE ÉVACUÉE DANS LE SOL?	
ANNEXE IV : PROSPECTUS ÉDITÉ PAR LA VILLE DE MONTREAL POUR LA SENSIBILISATION DU GRAND PUBLIC À LA GESTION DURABLE DES EAUX PLUVIALES	
ANNEXE V : ARBORESCENCE DES CRITÈRES DE DÉFINITION ET DES MESURES DE LUTTE AUX ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS	
ANNEXE VI : PROSPECTUS DE SENSIBILISATION DU GRAND PUBLIC À LA PROBLEMATIQUE DES ÎLOTS DE CHALEUR ÉDITÉ PAR LE CONSEIL REGIONAL DE L'ENVIRONNEMENT DE MONTREAL	

Introduction

Le réchauffement climatique est devenu, à l'occasion de la première conférence mondiale sur le climat, à Genève, un sujet d'intérêt général. Il a été mis en évidence par le climatologue James Hansen, d'après les recherches de Charles Keeling ⁽¹⁾, en 1979 qu'un doublement de la concentration en CO₂ atmosphérique par rapport à l'époque préindustrielle entrainerait un accroissement moyen de la température terrestre de 4 °C. Ce réchauffement climatique, encore spéculé il y a quelques dizaines d'années est désormais une réalité qu'il ne semble plus permis de mettre en doute.

Il se traduit aujourd'hui par une augmentation des épisodes météorologiques extrêmes (sècheresses, orages, cyclones) ainsi qu'une augmentation notable de la température mondiale (+ 0,2 °C par décennie au cours des 30 dernières années ⁽²⁾).

Les villes, au sein desquelles les épisodes de chaleur se font particulièrement ressentir, abritent aujourd'hui plus de la moitié de la population mondiale ⁽³⁾.

Les épisodes de chaleur accablante, renforcés par la morphologie du tissu urbain et la production de chaleur directement imputable à la population entraînent l'apparition d'îlots de chaleur. Ces derniers peuvent avoir des conséquences dramatiques tant en terme d'écologie que d'économie ou de santé publique, dans un monde où plus de la moitié de la population est urbaine ⁽³⁾. Nous avons encore tous en mémoire la canicule de 2003, qui en région parisienne a entraîné une surmortalité de 190 % par rapport aux années précédentes entre le 1^{er} et le 20 août ⁽⁴⁾.

Cette question des îlots de chaleurs doit donc d'être prise en compte par nos dirigeants afin de s'intégrer à la réflexion des développements urbains à différentes échelles, et de pouvoir dès aujourd'hui proposer des solutions qui permettront, si ce n'est d'abaisser les températures urbaines, du moins d'en éviter l'augmentation pour les années futures.

La ville de Montréal, située au sud du Québec, est la deuxième ville la plus peuplée du Canada après Toronto, et possède un climat très continental à forte amplitude thermique. De plus, si le Québec est réputé pour la rudesse de ses hivers, il ne l'est non moins pour la chaleur de ses étés.

Différentes études ont été initiées afin de pouvoir proposer des solutions durables au problème d'îlot de chaleur urbain. Nous allons, au travers du présent mémoire, tenter de comprendre d'une part les origines de ce phénomène mais également de proposer des solutions, dans le domaine d'intervention du paysagiste pour lutter contre son apparition.

Dans un premier temps sera fait un bref rappel des différents types d'échanges thermiques, puis des mécanismes de l'échauffement naturel de la Terre ainsi que du réchauffement climatique, avant de définir plus précisément la notion d'îlot de chaleur urbain.

Nous envisagerons par la suite les causes d'apparition des îlots de chaleur et de leurs conséquences, avant de nous intéresser aux solutions qui peuvent être proposées pour lutter contre ce phénomène en les illustrant, lorsque cela est possible, par des réalisations au sein du Grand Montréal.

1. Principes fondamentaux

1.1. Bases physiques des échanges de chaleur

La compréhension du concept même de chaleur ainsi que des mécanismes qui y sont associés est un préliminaire indispensable pour appréhender la problématique de la formation des îlots de chaleur urbains.

La chaleur est définie par le Larousse⁽⁵⁾ comme « un mode de transfert de l'énergie d'un corps à un autre qui ne correspond pas à un travail ».

La thermodynamique la définit quant à elle comme « un transfert de l'agitation thermique des particules au niveau microscopique ». Ainsi, un système dont les particules sont statistiquement plus agitées présentera une température d'équilibre plus élevée. La température est donc une traduction macroscopique de l'agitation des particules à une échelle microscopique et les transferts d'énergie cinétique qui interviennent, au cours des chocs aléatoires entre ces particules (d'agitations thermiques différentes), correspondent à des échanges de chaleur⁽⁶⁾.

Pour simplifier, nous pouvons dire que la chaleur correspond à un échange d'énergie entre deux systèmes. Ces échanges de chaleur peuvent se faire par trois types de mécanismes distincts : la conduction, la convection ou le rayonnement thermique⁽⁷⁾.

1.1.1. La conduction thermique

La conduction thermique correspond à un échange de chaleur par contact ; elle est provoquée par la différence de température entre deux régions d'un même corps, ou entre deux corps de températures différentes, et s'effectue sans déplacement de matière.

Il s'agit d'une propagation de proche en proche de l'agitation thermique du chaud vers le froid, c'est-à-dire de la plus grande agitation moléculaire vers la plus basse, qui aboutit à un retour à l'équilibre thermique.

Ce transfert de température a été décrit par Fourier en 1822, qui a énoncé que la densité de flux est proportionnelle au gradient de température, le facteur de proportionnalité étant précisément la conductivité du matériau⁽⁸⁾.

Loi de fourrier :

$$\Phi(W) = -\lambda.S.\frac{dT}{dx}$$

Avec :

- $\Phi(W)$ le flux de chaleur qui circule en x (W)
- $-\lambda$ la conductivité thermique du matériau ($W.K^{-1}.m^{-1}$)
- S la section du matériau (m^2)
- $\frac{dT}{dx}$ le gradient de température en x ($K.m^{-1}$)

À partir de cette loi, on aboutit à une équation générale des transferts de chaleur par conduction de la forme ⁽⁸⁾ :

$$\lambda \Delta T + P = \rho c \frac{dT}{dt}$$

Avec :

- λ la conductivité thermique du matériau ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- ΔT la différence de température entre les deux régions considérées
- P l'énergie produite au sein même du matériau (W.m^{-3})
- ρ la masse volumique du matériau (kg.m^{-3})
- c la chaleur spécifique massique du matériau ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

1.1.2. La convection thermique

Ce type de transfert de chaleur est basé sur le fait qu'il y a déplacement de matière et ne concerne par conséquent que les fluides. Entraînés par des différences de pression et de température, les fluides se déforment, entraînant ainsi une mise en mouvement des particules ⁽⁸⁾⁽⁹⁾.

Le flux de chaleur échangé par convection est défini par la loi de Newton :

$$\Phi(W) = h.S.(T_p - T_f)$$

Avec:

- $\Phi(W)$ le flux de chaleur échangé par convection (W)
- h le coefficient de transfert convectif ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
- S la surface d'échange de la paroi (m^2)
- T_p la température de la paroi (K)
- T_f la température du fluide (K)

Un fluide, s'il augmente en température, a tendance à se dilater et donc à devenir moins dense ; ceci explique pourquoi les masses de fluide, lorsqu'elles sont chauffées, remontent au-dessus des masses plus froides qui se déplacent à leur tour. C'est ce type de transfert de température qui est à l'origine des courants maritimes ou des vents.

Au niveau des villes, la chaleur rayonnée par les surfaces entraîne la formation de courants ascendants chauds pouvant entraîner une zone de température plus élevée que la normale jusqu'à plusieurs centaines de mètres au-dessus des agglomérations.

1.1.3. Le rayonnement

Le rayonnement thermique est un échange d'énergie électromagnétique pour lequel le milieu intermédiaire n'a pas nécessairement d'influence, il se fait par émission puis absorption de radiations électromagnétiques.

Le rayonnement thermique fait intervenir trois étapes qui sont :

- L'émission : qui correspond à la conversion de l'énergie fournie à la source en énergie électromagnétique
- La transmission : il s'agit de la propagation des ondes électromagnétiques à travers le milieu traversé incluant éventuellement une absorption par le milieu.
- La réception : elle correspond à la transformation en énergie thermique du rayonnement incident ⁽⁸⁾.

D'après la loi de Stephan-Bolzmann, le flux de chaleur entre la surface S et le milieu ambiant peut s'écrire :

$$\Phi(W) = \varepsilon \sigma S (T_p^4 - T_f^4)$$

Avec :

- $\Phi(W)$ le flux de chaleur échangé par rayonnement (W)
- ε l'émissivité de la surface (sans unité)
- σ la constante de Stephan-Bolzmann $5,67 \cdot 10^8$ (W.m².K⁻⁴)
- S la surface d'échange de la paroi (m²)
- T_p = température de la paroi (K)
- T_f = température du fluide (K)

Ces trois types de transferts thermiques interviennent dans l'échauffement urbain et l'apparition des îlots de chaleur. Nous verrons par la suite comment et à quelles échelles.

1.2. Propriétés physiques des matériaux

1.2.1. Propriétés thermiques des matériaux

Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs physiques qui déterminent le comportement des matériaux face aux échanges thermiques. Elles se rapportent aux capacités des matériaux à absorber, à conserver ou à émettre l'énergie thermique reçue. La compréhension de ces mécanismes permet de mieux cerner les problématiques qui existent quant aux choix des matériaux urbains, dans une démarche de prévention des îlots de chaleur. Les principales propriétés thermiques des matériaux, dont la gestion peut avoir un impact sur la régulation thermique urbaine, sont définies par François Le Frouin ⁽⁹⁾ comme étant les suivantes :

- La conductivité thermique (λ) ; elle est définie par le flux de chaleur entre deux surfaces d'un même matériau distantes d'un mètre et dont la différence de température est de 1K. Sa valeur permet de quantifier le pouvoir d'un matériau à conduire la chaleur (en terme d'amplitude), plus elle est faible plus le matériau est isolant.

- La résistance thermique (R) ; elle définit le pouvoir isolant d'un matériau pour une épaisseur donnée et est définie par le rapport suivant. Cette grandeur est particulièrement utilisée pour mesurer la capacité d'isolation thermique des matériaux de construction.

$$R = \frac{e}{\lambda} = \frac{\Delta T.S}{\varphi} \quad (\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1})$$

- La diffusivité thermique (a) ; il s'agit d'une propriété dynamique du matériau en ce qu'elle caractérise la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur en terme de vitesse. La diffusivité thermique dépend de la conductivité thermique, de la masse volumique ainsi que de la capacité thermique.

$$a = \frac{\lambda}{\rho.C} \quad (\text{m}^2.\text{s}^{-1})$$

- L'émissivité thermique (ε) ; l'émissivité thermique caractérise la capacité à transmettre la chaleur par rayonnement. Elle s'exprime sous la forme du rapport entre la quantité d'énergie émise par une surface (Luminance) sur la quantité d'énergie émise par un corps noir élevé à la même température.

$$\varepsilon = \frac{L}{L_0}$$

- La capacité thermique (C) ; également appelée capacité calorifique est une grandeur extensive, elle caractérise la quantité d'énergie qu'il est nécessaire de fournir à un matériau pour élever sa température de 1K, de fait plus la quantité de matière est grande, plus la capacité thermique est importante. Par souci de praticité on utilise préférentiellement la capacité thermique massique, qui permet d'avoir une valeur intensive de la capacité thermique ramenée à la masse du corps considéré, elle s'exprime $\text{J}.\text{K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.

Les propriétés thermiques des matériaux de construction d'usage courant sont détaillées en Annexe I.

1.2.2. L'albédo

En dehors des propriétés thermiques des matériaux, l'albédo est le principal paramètre physique à jouer un rôle sur la chaleur urbaine.

L'albédo, aussi appelé indice de réflectance, est le rapport de la quantité de lumière réfléchie par un objet sur la quantité de lumière qu'il reçoit. Il est exprimé par un nombre qui va de 0 (aucune lumière réfléchie - cas du corps noir, ou parfaitement transparent) à 1 (toute la lumière est réfléchie - miroir parfait), ou bien est exprimé en pourcentage. Les valeurs extrêmes (0 ou 1) ne sont que théoriques : dans la pratique une surface dont l'albédo est inférieur à 0,03 apparaît comme parfaitement noire et une surface d'albédo supérieur à 0,8 apparaît comme blanche⁽¹⁰⁾. Cette valeur dépend à la fois de paramètres intrinsèques aux matériaux, tels que sa composition, sa rugosité ou encore sa teneur en humidité, mais également de paramètres extérieurs tels que le type ainsi que l'orientation des longueurs d'onde lumineuses incidentes (cf. tableau 1).

L'albédo global terrestre est estimé à 0,28 (0,34 pour les continents contre 0,26 pour les océans) ⁽¹⁰⁾.

Il est à noter d'ailleurs que les nuages, s'ils participent à l'effet de serre, ont un albédo relativement élevé (entre 0,25 et 0,8 selon leur nature et leur altitude – cf. tableau 1). De ce fait, on estime qu'ils comptent pour près de deux tiers du flux de rayonnements directement réfléchis vers l'espace ⁽¹⁰⁾.

Tableau 1 : Albédos de quelques surfaces terrestres

d'après Villeneuve et Richard « Vivre les changements climatiques-Réagir pour l'avenir » Ed. Multimonde (2007)

Surface	Albédo
Neige fraîche, Soleil haut	0,80-0,85
Neige fraîche, Soleil bas	0,90-0,95
Vieille neige	0,50-0,60
Sable	0,20-0,30
Herbe	0,20-0,25
Terre humide	0,10
Terre sèche	0,15-0,25
Forêt	0,05-0,10
Eau, Soleil haut	0,03-0,05
Eau, Soleil bas	0,50-0,80
Nuage épais	0,70-0,80
Nuage mince	0,25-0,50

1.3. Origine de l'échauffement naturel de la Terre

Le soleil est la principale source d'énergie de notre planète ; c'est grâce à lui que la vie a pu se développer. L'astre solaire émet des rayonnements électromagnétiques dont la lumière constitue la partie visible ($400 < \lambda < 800$ nm).

En moyenne, le soleil envoie 1368 W/m^2 ⁽¹¹⁾ au niveau de la haute atmosphère. Environ 30 % est alors directement réfléchi par l'atmosphère, les nuages et la surface terrestre. Les 70 % restants sont absorbés pour 20 % par les gaz atmosphériques et pour 50 % par la terre et les océans. Au final, seuls 342 W/m^2 ⁽¹²⁾ en moyenne arrivent à la surface de notre planète.

Cette énergie emmagasinée par la terre est alors restituée sous forme de rayonnements infrarouges dont environ 10 % s'échappent directement vers l'espace et 90 % sont piégés par les gaz naturellement présents dans l'atmosphère (principalement CO_2 et H_2O). Cette énergie captée par les gaz atmosphériques est alors réémise sous forme de rayonnements infrarouges vers le sol et l'espace dans des proportions d'environ 2/3, 1/3 ⁽¹²⁾. C'est ce phénomène, que l'on appelle effet de serre, qui assure une température viable à la surface du globe.

Les phénomènes radiatifs terrestres sont synthétisés dans la figure 1.

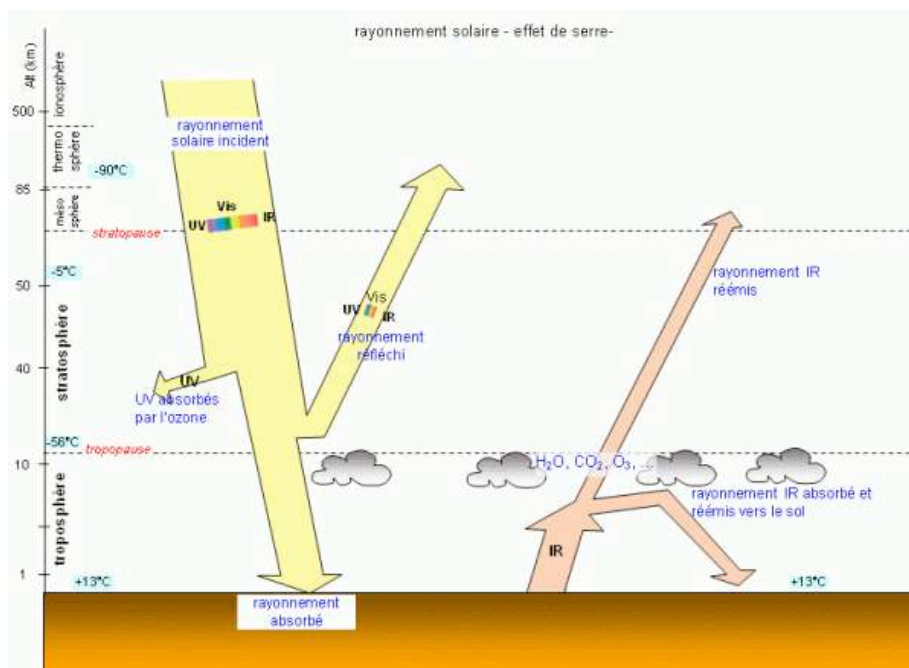


Figure 1 : Schéma bilan du rayonnement solaire à la surface de la terre (Alain Galien (2008))

Depuis ces 50 dernières années, le réchauffement climatique s'est accéléré par rapport à son évolution normale et semble directement imputable à l'activité humaine.

1.4. Le réchauffement climatique

1.4.1. La couche d'ozone

L'ozone (O_3), qui est un composé toxique dans les basses couches atmosphériques, joue un rôle majeur au niveau de la stratosphère. L'intérêt de cette couche d'ozone provient de sa capacité à absorber certains rayons solaires, les UVB et UVC (extrêmement nocifs, ils interdiraient toute vie à la surface du globe s'ils atteignaient sa surface).

La détérioration de la couche d'ozone a débuté au début des années 70 au niveau des pôles notamment, en raison de la présence de chlore et de brome dans la stratosphère résultant des émissions de fluorocarbures (CFC) et de halons par l'Homme.

La destruction de cette couche d'ozone s'est arrêtée vers la fin des années 90 suite au protocole de Montréal pour l'arrêt des émissions de CFC et de halons. Il faudra cependant plusieurs années avant que la couche d'ozone ne se régénère totalement ⁽¹²⁾.

1.4.2. Les gaz à effet de serre

En l'absence d'effet de serre, la température moyenne à la surface de la terre serait de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ et notre planète absolument invivable. Heureusement, grâce à l'effet de serre naturel, elle est de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui la rend accueillante pour les êtres vivants ⁽¹²⁾. La quantité d'énergie

reçue par la Terre, due à l'effet de serre naturel est de 155 W/m^2 ⁽¹³⁾, soit près de la moitié de l'énergie directement fournie par les rayonnements solaires.

Avec le développement industriel, l'Homme n'a eu de cesse de rejeter dans l'atmosphère des gaz qui augmentent artificiellement l'effet de serre. On estime que l'augmentation des rejets de gaz depuis les années 70 a entraîné une augmentation de l'énergie reçue de $2,43 \text{ W/m}^2$ ⁽¹³⁾.

Le principal coupable est le CO_2 ($1,46 \text{ W/m}^2$) qui provient en majorité de la combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) utilisées pour les transports et le chauffage et, dans une moindre mesure, de la déforestation. En observant les figures 2 et 3, on visualise cette corrélation qui existe entre l'évolution des températures et l'évolution du taux de CO_2 atmosphérique.

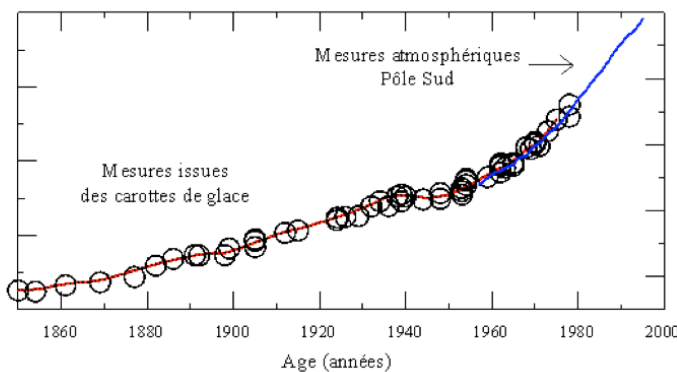


Figure 2 : Courbe d'évolution du CO_2 terrestre depuis 1950 (Florence Kalfoun d'après Etheridge et al., 1996)

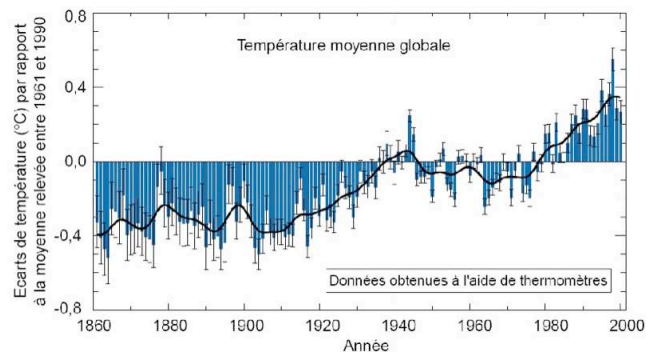


Figure 3 : Variation de la température moyenne de la surface terrestre au cours des deux derniers siècles. (Intergovernmental Panel on Climate Change 2001)

En second plan viennent :

- le méthane ($0,48 \text{ W/m}^2$), abondant dans les zones humides naturelles ou anthropiques telles les rizières, également issues de la digestion des ruminants, des décharges et des pertes lors de l'extraction, ou encore du transport et de l'utilisation du gaz naturel
- les halocarbures ($0,34 \text{ W/m}^2$) principalement provenant de gaz réfrigérant ou propulseur
- le dioxyde d'azote ($0,15 \text{ W/m}^2$) qui provient des amendements agricoles ⁽¹⁴⁾

Les îlots de chaleur urbains n'ont que peu d'impact sur le réchauffement climatique terrestre (Wickham & al. 2011). La proportion de zones urbanisées étant en effet minime à l'échelle du globe (moins de 0,25 %). En revanche, l'augmentation de la fréquence d'apparition ainsi que de l'intensité des îlots de chaleur est corrélée à l'augmentation globale des températures.

Il est toutefois à noter que le phénomène d'îlot de chaleur a un impacte sur les mesures météorologiques faites pour suivre ce réchauffement, puisqu'un nombre important de stations météo se trouve en ville ou à proximité et présentent donc des mesures biaisées.

1.5. Les îlots de chaleur

Mis en évidence pour la première fois aux alentours de 1830 par Luke Howard, les îlots de chaleur sont définis par James Voogt (2002) comme des isothermes fermées indiquant une zone urbanisée où la chaleur est significativement plus élevée que dans les zones rurales avoisinantes.

L'analogie physiographique provient de la similitude entre le modèle d'isotherme et les contours de hauteur d'une île sur une carte topographique (comme on peut le voir sur la figure 5).

Les îlots de chaleur possèdent des « falaises » à l'interface urbain-rural et un « sommet » dans la partie la plus densément bâtie de la ville (figure 4). La température moyenne d'une grande ville (plus d'un million d'habitants) peut être 1° à 2 °C plus chaud qu'avant son urbanisation. La température nocturne par temps clair peut alors y être de plus de 12 °C supérieure (ibid.).

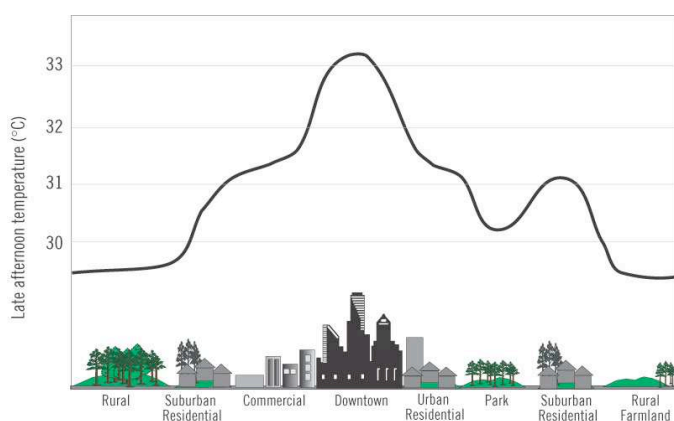


Figure 4 : Représentation en élévation des isothermes d'un îlot de chaleur urbain (Ressources Naturelles Canada 2007)

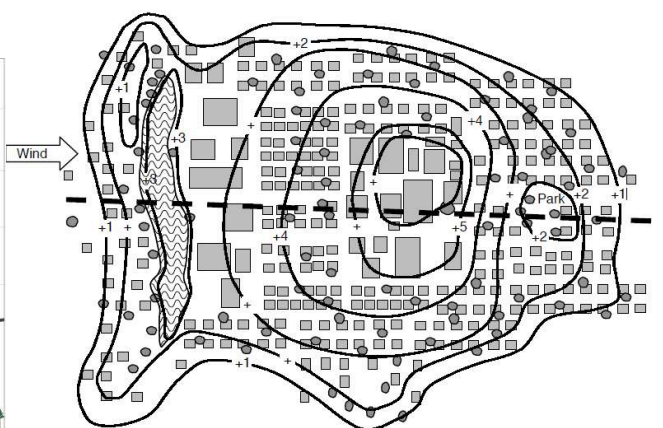


Figure 5 : Représentation en plan des isothermes d'un îlot de chaleur urbain (Voogt 2002)

On différencie classiquement trois types principaux d'îlots de chaleur urbains :

1.5.1. Les îlots de chaleur de surface

Les îlots de chaleur mesurés à la surface du sol résultent de l'échauffement important des surfaces urbaines en raison des caractéristiques morphologiques et des matériaux qui constituent les villes. De jour, la température moyenne de surface en milieu urbain est 10 à 15 °C supérieure à la température de surface d'une zone rurale avoisinante et 5 à 10 °C supérieurs. De nuit, elle est de 5 à 10 °C supérieure (Cavayas & Baudouin 2008).

Ces effets apparaissent aussi bien le jour que la nuit, mais ont tendance à être plus importants de jour en raison de l'élévation de température des matériaux sous l'action des rayons solaires. De même, la chaleur de surface est plus la plus importante en été par temps clair, lorsque l'intensité des rayons solaires reçus est maximale.

On peut observer et mesurer l'apparition des îlots de chaleur de surface grâce à des imageries satellites, des photographies aériennes ou bien depuis le sol au moyen de thermomètres laser à télédétection thermique (cf. figure 6 et 7). Ces capteurs détectent la radiation émise et reflétée par la surface, plutôt que la température directement, les relevés qu'ils permettent sont donc préférentiellement nommés « température superficielle apparente »

Exemples d'images obtenues par télédétection thermique :

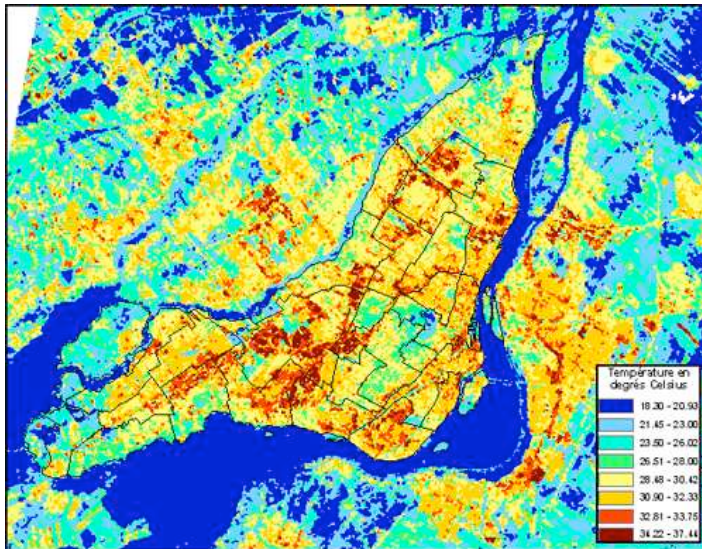


Figure 7 : Image thermique de l'île de Montréal obtenue par télédétection le 11 août 2001 (Guay et Baudoin 2005)

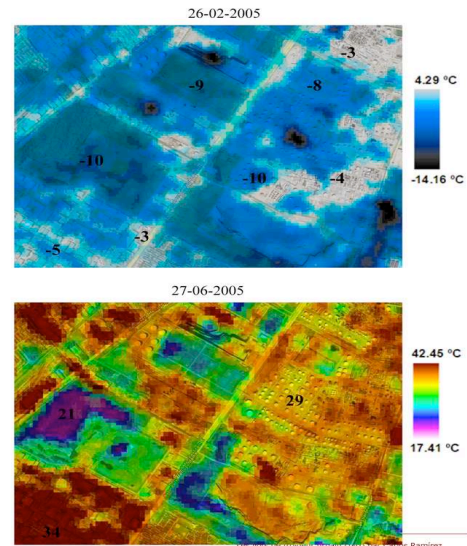


Figure 6 : Image thermique du secteur Montréal-Est à l'hiver et à l'été 2005 (Baudouin & Ramirez 2005)

Ce type d'imagerie permet des observations à des échelles variées, cependant il a ses limites. Les deux principales sont la nécessité d'avoir un ciel parfaitement dégagé pour prendre des clichés, et la deuxième est la nécessité de croiser les données avec les mesures de pollutions atmosphériques, qui en absorbant une partie des rayonnements ont tendance à en biaiser les mesures.

Si la température du sol est en moyenne très nettement supérieure en ville à celle en rase campagne, la température de l'air est également sensiblement différente. On peut différencier deux couches atmosphériques distinctes, que nous allons détailler ci-après, pour la caractérisation des îlots de chaleur.

1.5.2. Les îlots de chaleur de la canopée urbaine

La couche de canopée urbaine est définie comme la tranche d'atmosphère allant du sol à la hauteur du toit des immeubles. C'est dans cette couche que se déroule l'essentiel de l'activité humaine (Colombert 2008).

La nécessité de distinguer cette sous-couche atmosphérique vient du fait que la rugosité de la zone urbaine agit comme un brise-vent, et les mouvements d'air y sont considérablement perturbés. En effet, là où, en zone rurale, le vent moyen peut être modélisé sous une forme logarithmique (figure 8), le vent entre les bâtiments est affaibli et adopte un régime turbulent

dont l'analyse montre des similitudes avec les mouvements d'air sous la canopée forestière (Voogt 2002).

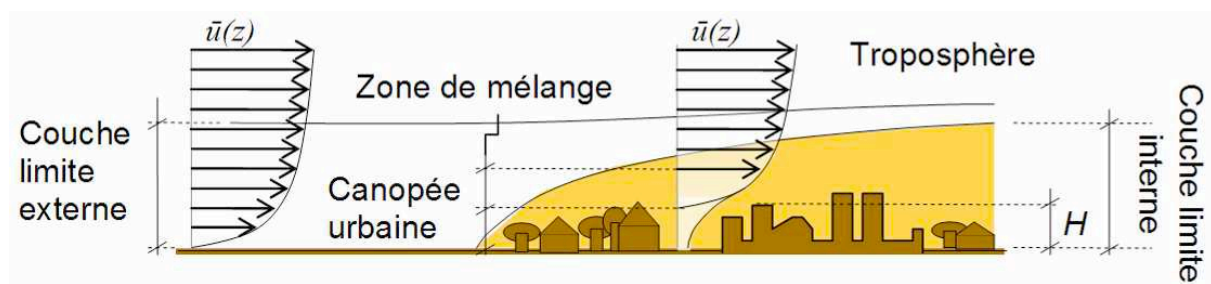


Figure 8 : Profil de vent dominant moyen en site homogène et en site urbain (Plate et Kiefer, 2001)

Différentes études ont également mis en évidence que les îlots de chaleur, mesurés au niveau de la couche de canopée urbaine sont un phénomène principalement nocturne. (Voogt 2002, Oke & Maxwell 1967, Oke & Voogt 2003) La figure 9 met en évidence cette évolution de l'amplitude des îlots de chaleur urbains à partir de mesures effectuées à différentes heures de la journée dans différentes zones, urbaines et rurales.

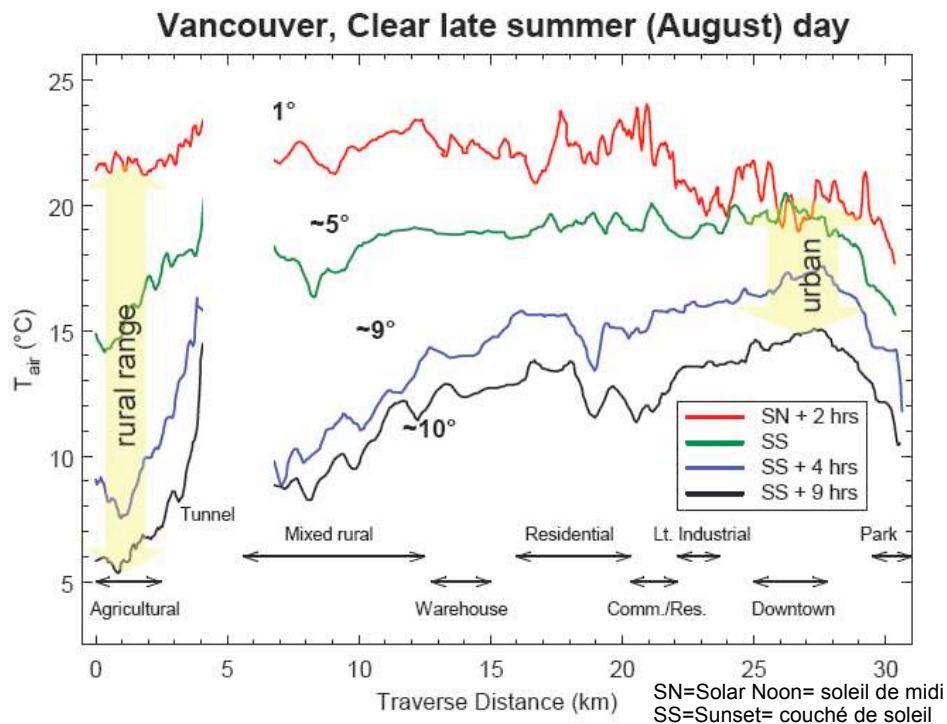


Figure 9 : Mesures des températures à différentes heures d'une belle journée d'été à Vancouver (Voogt 2000)

Le fait que la différence de température soit plus marquée la nuit que le jour s'explique de plusieurs façons ⁽¹⁵⁾ :

- La première est que, compte-tenu de la rugosité du tissu urbain, le brassage qui s'effectue normalement entre les vents frais nocturnes et l'air chaud des villes est réduit par rapport aux zones rurales.
- La deuxième est que, les matériaux constitutifs des villes ont tendance à emmagasiner une importante quantité de chaleur qui est lentement restituée la nuit.

- Enfin, une autre raison est que la pollution résultant de l'activité humaine au niveau des villes entraîne une augmentation ponctuelle de l'effet de serre, piégeant ainsi la chaleur longtemps après le coucher du soleil.

Les températures de la sous-couche de canopée urbaine sont mesurées par croisement des données récupérées au moyen de thermomètres situés en différents points des villes ou fixés à des véhicules. Il est d'ailleurs important, pour avoir des mesures non biaisées, que les stations de mesures soient au maximum à l'abri des rayonnements solaires ⁽¹⁵⁾.

1.5.3. Les îlots de chaleur de la couche limite urbaine

L'influence des îlots de chaleur de la couche de canopée urbaine s'étend à la couche d'atmosphère qui lui est superposée. La perturbation thermique y prend, dans des conditions climatiques idéales, la forme d'un dôme pouvant atteindre une altitude de 1,5 km en après-midi. En réalité, en raison de la présence de vent, la perturbation prend plutôt la forme d'un panache.

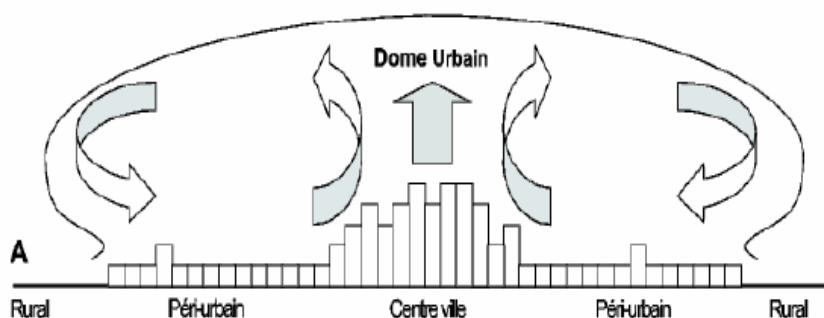


Figure 10 : Représentation théorique du dôme de chaleur qui se forme au-dessus d'une ville dans des conditions idéales d'absence de vent (Lemonsu 2003)

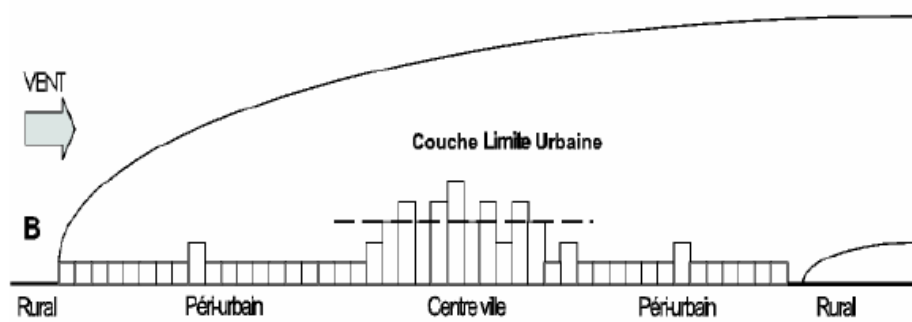


Figure 11 : Représentation théorique du panache de chaleur qui se forme au niveau de la couche limite urbaine en présence de vent (Lemonsu 2003)

La formation de ce dôme de chaleur dans la couche limite urbaine s'explique par la formation de mouvements d'air convectifs au-dessus des villes ; l'air chaud, moins dense, remonte vers les hautes couches atmosphériques, créant ainsi d'importants courants ascendants au-dessus des villes. Cette masse d'air chaud, en présence de vent se retrouve alors déportée créant un panache de chaleur en altitude pouvant atteindre plus de 10 km.

▪ Schéma bilan :

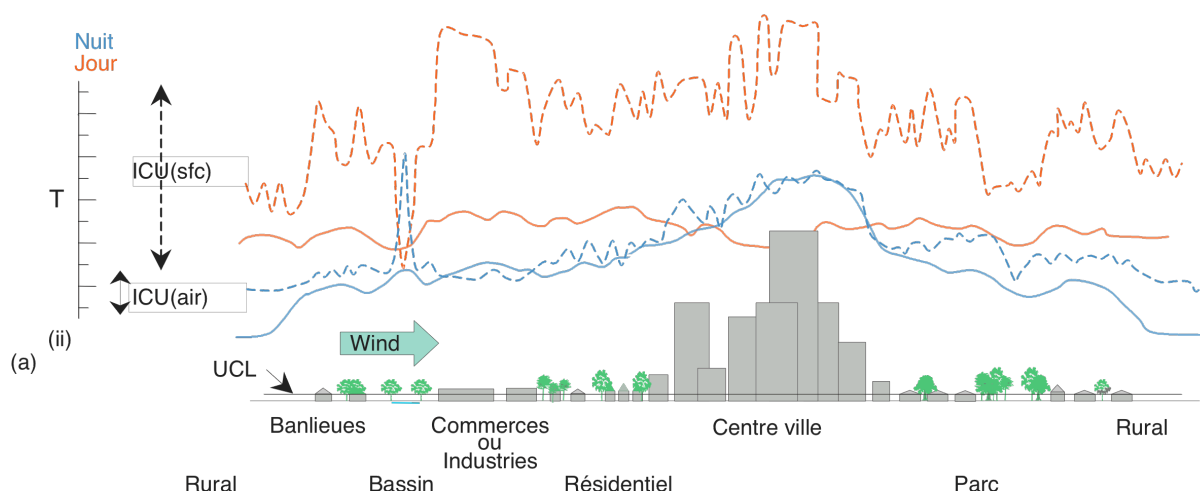


Figure 12 : Bilan des fluctuations de températures de l'air et de surface au cours d'une journée en fonction de la morphologie du territoire (Rullier d'après Voogt 2002)

Ce schéma bilan met en évidence la différence de manifestation des îlots de chaleur de surface (traits pointillés) et de l'air (traits pleins), le jour (rouge) et la nuit (bleu). La principale conclusion à retenir de ce schéma est que les excès de chaleur de surface sont principalement un phénomène diurne alors que les îlots de chaleur atmosphériques sont principalement un phénomène nocturne.

Les îlots de chaleurs urbains, qu'ils soient de surface ou atmosphériques, ont des origines multiples. Nous allons, au travers du prochain chapitre présenter les phénomènes responsables de l'apparition de ces perturbations climatiques.

2. L'apparition d'îlots de chaleur à Montréal, origines et conséquences

Si la situation géographique des villes détermine la probabilité d'apparition des îlots de chaleur, de par la nature du climat et des facteurs météorologiques associés, il n'en reste pas moins que les principales causes de leurs apparitions sont de nature anthropique. On peut distinguer trois grands types de causes au suréchauffement des zones urbaines : les facteurs de surface, la perte du couvert forestier et les émissions de chaleur anthropique proprement dites.

2.1. Les facteurs de surface

On appelle facteurs de surface l'ensemble des propriétés morphologiques et des caractéristiques intrinsèques des matériaux qui constituent la couche de surface du milieu urbain. Il est en effet aisé de comprendre que des différences majeures existent entre les sols de milieux « naturels » et de milieux urbanisés. Nous allons, au travers des paragraphes qui suivent, tenter de mettre en évidence ces différences et les conséquences qu'elles ont sur l'apparition des îlots de chaleur urbains.

2.1.1. Morphologie des villes

Les centres-villes des grandes métropoles nord-américaines, Montréal ne faisant pas exception, sont traditionnellement des quartiers d'affaires, où, sous l'action des pressions foncières se sont élevés de hauts buildings de bureaux et de commerces. Ce type de construction augmente considérablement la rugosité de la trame urbaine et participe ainsi à la formation des îlots de chaleur.

Oke en 1988 est le premier à établir qu'il existe une relation entre la température et la morphologie du bâti à travers le Facteur de Vue du Ciel (FVC).

$$\Delta T_{(\max)} = 15,27 - 13,88 * FVC \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Ce dernier correspond à la proportion de ciel visible sur une photographie prise selon un axe verticale, on peut le mesurer au moyen de photographies verticales à très grand angle en comptabilisant la fraction de ciel visible. (cf. figure 13).

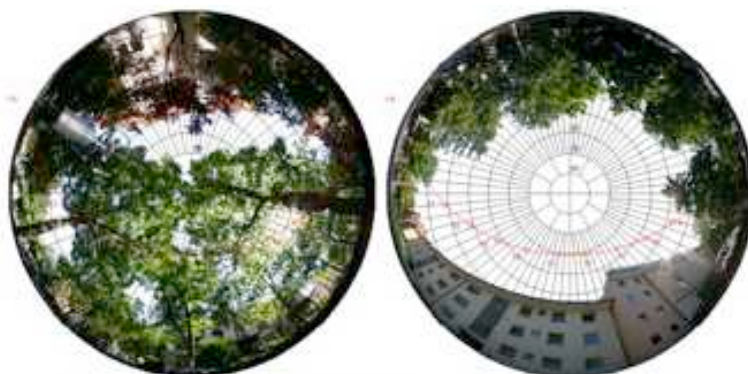


Figure 13: Photographies grand-angles pour mesurer le facteur de vue du ciel à Freiburg (Allemagne) le 01-08-2007 (Mayer et al. 2009)

Le FVC peut être ramené, par simplification, au rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue qu'ils bordent. Cette analogie ne tient en revanche pas compte de l'éventuel couvert forestier pouvant modifier l'ensoleillement du sol et des parois au niveau des rues.

À partir de ses recherches, Oke (1981) parvient à établir une relation reliant l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain et la géométrie de la rue, exprimée en fonction de la hauteur des bâtiments (H) et la distance entre les bâtiments (L) par le ratio H/L :

$$\Delta T_{(\max)} = 7,54 + 3,97 \ln\left(\frac{H}{L}\right) \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Le fait que la formule soit logarithmique (cf. figure 14) met en évidence que des modifications de faible importance du ratio H/L, peuvent avoir d'importantes conséquences sur les variations de la température et que, de fait, la relation entre la hauteur des bâtiments relativement à la rue qu'ils bordent doit donc être prise en considération en terme de planification urbaine.

La relation établie par Oke s'explique de différentes manières ;

- L'augmentation de la hauteur du bâti par rapport à la largeur de la rue abaisse l'albédo global de la ville du fait que l'albédo d'une surface crénelée est inférieur à celui d'une surface lisse de même nature. (Oke 1988, Colombert 2008).
- Les rues et les hautes parois qui les encadrent forment ce que l'on appelle, par analogie morphologique, des canyons urbains. Ces canyons constituent de véritables pièges radiatifs comme l'illustre la figure 15 (Colombert 2008).

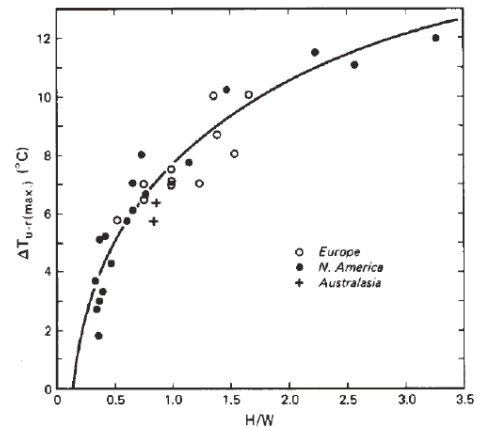


Figure 14 : évolution de l'intensité maximale des îlots de chaleur urbains en fonction de la ration H/L

(Colombert 2008)

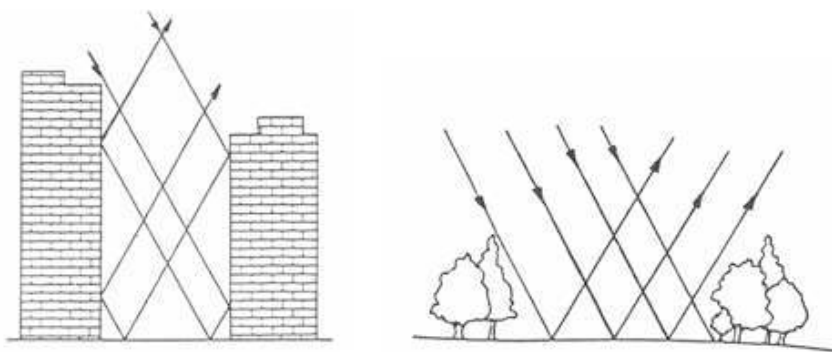


Figure 15 : illustration du piège radiatif constitué par un canyon urbain comparativement à une rase campagne (Colombert d'après Griffith 1976)

Les rayonnements infrarouges émis par les surfaces chauffées se retrouvent piégés au sein de ces canyons et on tendance à échauffer l'air ambiant au lieu d'être renvoyés vers l'atmosphère. De ce fait, bien que le rayonnement solaire direct soit généralement plus faible en ville qu'en milieu rural du fait de l'ombre portée des bâtiments les uns sur les autres, elles sont soumises à des rayonnements indirects plus importants.

- Enfin, la forte rugosité des villes entraîne une diminution de la vitesse du vent et crée des turbulences. La principale conséquence de cette perturbation des mouvements d'air est que l'air surchauffé des canyons urbains reste piégé durant la nuit ne subissant pas le brassage avec le vent frais nocturne.

2.1.2. Propriétés thermiques des matériaux urbains

Les villes européennes et d'Amérique du Nord, de par la nature des matériaux qui les composent, ont un albédo plus élevé que les régions rurales avoisinantes. L'albédo moyen des villes d'Amérique du Nord est en effet compris entre 0,15 et 0,30. Il est d'ailleurs intéressant de constater que les villes d'Afrique du Nord, qui se sont développées dans des régions chaudes, sont beaucoup plus « blanches » et ont un albédo compris entre 0,45 et 0,60 ce qui est au-dessus de l'albédo moyen des zones rurales avoisinantes, cette différence provient du type de matériaux de construction utilisé (brique, béton ou pierre sombre dans un cas, calcaire et chaux dans l'autre).

Voici un schéma illustrant les valeurs d'albédo des principaux matériaux que l'on retrouve dans les villes européennes et nord-américaines.



Figure 16 : Divers albédos de l'environnement urbain (Colombert 2008)

On remarque sur ce schéma que les matériaux dont les albédos sont les plus bas sont l'asphalte ainsi que les couvertures de toit en bitume et gravier. Ces deux types de revêtements recouvrent la grande majorité de la surface horizontale de la ville de Montréal, où les rues sont larges et les toitures plates pour la plupart. Au soleil, l'asphalte ou le bitume sont, en raison de leur très faible albédo et de leur capacité thermique, capables de s'élever à des températures supérieures de plus de 40 °C à l'air ambiant qui s'échauffe alors à leur contact (Akbari & Matthews 2012).

Ces larges rues offrent cependant l'avantage de limiter l'effet de canyon, en partie responsable des pics de température nocturne, dans les quartiers résidentiels.

Les matériaux urbains, outre leur albédo bas ont généralement une grande inertie thermique. D'une manière générale, on peut dire que plus un matériau est dense et plus il aura une inertie thermique importante. Cela se traduit par le fait qu'il lui faudra un flux thermique important pour monter en température, mais à l'inverse, une fois chaud il mettra autant de temps à se refroidir.

Ce principe d'inertie thermique est une des raisons majeures des anomalies thermiques nocturnes que l'on observe en ville. À titre d'exemple le béton, qui recouvre la quasi-totalité des trottoirs Montréalais a une capacité thermique de 2 400 à 2 640 kJ.°C⁻¹.m⁻³ alors qu'elle est seulement 1 350 kJ.°C⁻¹.m⁻³ pour la terre sèche de 1 350 (Valette et Cordeau 2010).

2.1.3. Imperméabilisation des surfaces

À Montréal on évalue à environ 80 % la proportion de surfaces asphaltées ou construites (Labrecque & Vergriete 2006).

L'accroissement des surfaces minérales, outre leur apport négatif sur un plan thermique du fait de leurs propriétés thermiques intrinsèques, se traduit également par une imperméabilisation progressive des surfaces. Du fait de cette imperméabilisation, l'eau ne s'infiltré plus et est contrainte de rejoindre par ruissellement le réseau d'assainissement urbain.

Le ruissellement de surface constitue la fraction d'eau de pluie qui ne pénètre pas dans le sol et ne s'évapore pas, mais qui s'écoule en surface du sol.

On estime que, en milieu naturel, le ruissellement de surface ne dépasse que rarement 10 %, en revanche il atteint 55 % en milieu urbain, où les zones imperméables représentent entre 80 et 100 % du total (cf. figure 17) (Wong 2008).

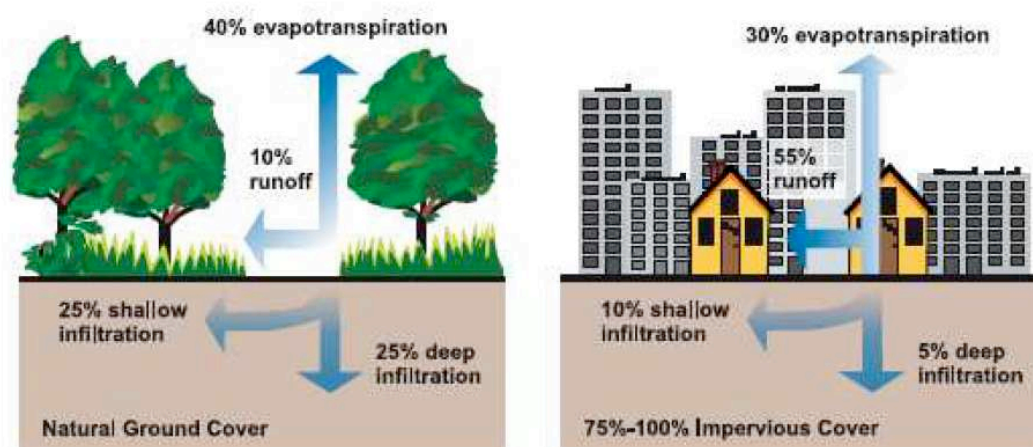


Figure 17 : perturbation du taux d'infiltration en milieu urbain due à l'imperméabilisation des sols (Wong 2008)

En ruisselant sur les surfaces asphaltées, l'eau se charge alors de multiples polluants (particules, huiles, graisses, métaux lourds, caoutchouc, sels de déglacages et débris divers) provenant de sources diffuses, telles que les gaz d'échappement des véhicules motorisés, ce qui contribue grandement à la dégradation de sa qualité ainsi qu'à la destruction des écosystèmes aquatiques. En milieu urbain, les eaux de ruissellement sont considérées comme l'une des premières causes de pollution des rivières.

Une autre conséquence directe est que, lors d'épisodes orageux, le volume d'eau à évacuer devient trop important pour le réseau d'évacuation dont le dimensionnement, notamment dans les quartiers anciens de Montréal-Est aujourd'hui insuffisant. Cela se traduit par des inondations et, lorsqu'il s'agit d'égouts combinés, qui représentent 90 % du réseau du centre

de Montréal, par une pollution des cours d'eau où se déverse alors le trop-plein non traité (Labrecque et Vergriete 2006).

Outre les conséquences précédemment énumérées, l'imperméabilisation des surfaces a également un impact sur l'échauffement de l'air ambiant. En effet, l'eau qui ne s'infiltre pas ne peut nécessairement pas s'évaporer, or le phénomène physique d'évaporation constitue un processus naturel de climatisation. L'eau, pour changer d'état prend de l'énergie au milieu, sous forme de chaleur. L'évaporation d'un litre d'eau exige 580 kcal soit environ 2500 joules, c'est-à-dire autant que pour élever de 1 °C 580 litres d'eau (Colombert 2008).

« Il a été estimé que pour une averse estivale fournissant 5 mm d'eau par m², dans les 24 heures suivantes, 4 mm s'évaporent en milieu rural et seulement 0,5 mm en milieu urbain (...) soit une forme d'apport supplémentaire d'énergie en milieu urbain de 2,5 kWh.m² en 24h (un peu plus du double de l'énergie thermique résultant en été des activités humaines).» (Colombert 2008).

La minéralisation des surfaces, qui accompagne le développement des villes et plus particulièrement des zones commerciales ou industrielles ne laisse inévitablement qu'une maigre place à la végétation qui tient, comme nous allons le voir, un rôle majeur dans la régulation de la température urbaine.

2.2. La perte du couvert forestier

« Le 25 juin 2005, la température enregistrée dans le parc du Mont-Royal s'élevait à 21,8 degrés Celsius, mais non loin de là, à l'angle du boulevard Saint-Laurent et de l'avenue du Mont-Royal, il faisait plutôt 33,5 degrés. L'écart de 12 degrés dans un rayon de moins de 1,5 kilomètre illustre bien le phénomène des îlots de chaleur créés par la suprématie du béton en milieu urbain au profit de la verdure. » (Le Devoir, 20 février 2008)

2.2.1. Mise en évidence des faits

Le couvert forestier montréalais n'a eu de cesse de diminuer au profit de l'urbanisation depuis les années 60, et ce à la vitesse de 7 km²/an. En ce basant sur cette vitesse de disparition, le gouvernement québécois a estimé que le couvert végétal de la région de Montréal pourrait disparaître d'ici 2029 (Cavayas et Baudouin 2008).

Outre les considérations d'écologie écosystémiques et les questions de cadre de vie, ce déclin rapide de la végétation a une incidence directe sur le réchauffement urbain.

Il est possible de mettre en évidence cette rétroaction négative en comparant les cartes d'évolution du couvert forestier aux cartes d'évolution des températures à Montréal.

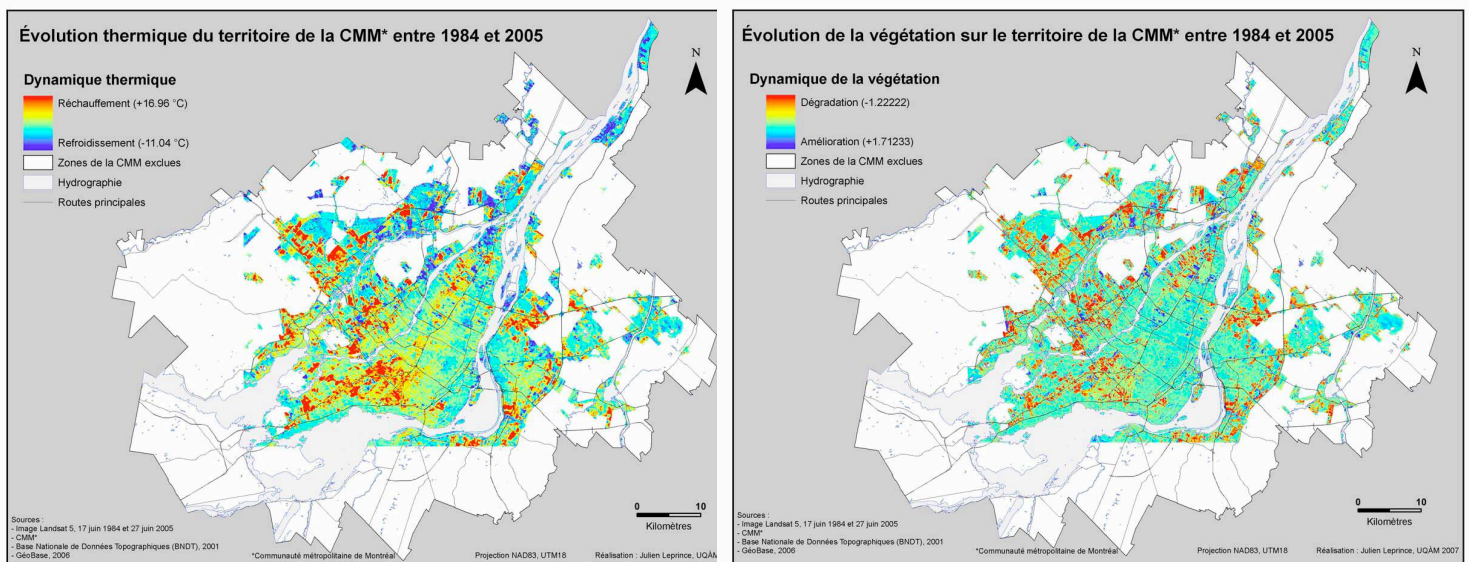


Figure 18 : comparaison de la l'évolution des îlots de chaleurs à Montréal par rapport à l'évolution du couvert forestier entre 1984 et 2005 (Cavayas & Baudouin 2008)

L'étroite similitude entre ces deux cartes, met bien en évidence, la relation qui existe entre l'augmentation de la température et la perte du couvert forestier. Cela s'explique de différentes manières.

2.2.2. Les effets bénéfiques de l'ombrage

Les arbres, du fait de leur feuillage, arrêtent en été entre 70 et 90 % du rayonnement solaire incident. Il résulte de cet ombrage une diminution de l'échauffement des surfaces sous-jacentes qui, de fait, rayonnent moins durant la nuit.

De plus, l'apport d'ombre sur les revêtements comme l'asphalte, en augmente considérablement la longévité en diminuant les écarts de température qu'il subit. On a pu ainsi estimer qu'une économie de 58 % sur l'entretien d'une chaussée asphaltée peut être obtenue sur une période de 30 ans, uniquement par un apport d'ombrage.

Bien que l'albédo du feuillage soit élevé (de l'ordre de 0,12 pour une forêt (météo France 2004) la faible émissivité des surfaces végétales n'entraîne pas d'échauffement de l'air avoisinant.

Il apparaît évident que cet ombrage bénéfique en été doit être limité en hiver, il est donc plus intéressant, d'un point de vue thermique, de planter des arbres à feuilles caduques que des arbres à feuillage persistant.

2.2.3. L'évapotranspiration, une climatisation naturelle

L'évapotranspiration est le nom donné à la combinaison de deux phénomènes ; la transpiration des plantes par les stomates d'une part et d'autre part l'évaporation de l'eau contenue dans le sol associé. Le bénéfice thermique du processus d'évaporation énoncé dans le chapitre précédent s'applique aux deux processus, pour ce qui est de la végétation, à titre d'exemple, un chêne adulte transpire en moyenne 400 litres d'eau par jour, nécessitant ainsi une énergie de 10^6 Joules (Wong 2008)!

Le processus d'évaporation est exploité depuis longtemps pour ses vertus climatisantes et aujourd'hui il commence même à être exploité pour des appareils électriques de climatisation. (les différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration sont détaillées en annexe II)

Il est de plus à noter que non seulement l'évapotranspiration abaisse la température mais elle permet de réguler le taux d'humidité de l'air.

Des études ont d'ailleurs montré que le potentiel rafraichissant de l'évapotranspiration augmente à mesure que l'humidité ambiante diminue.

2.2.4. Réduction des gaz à effets de serre

Les plantes participent activement à la réduction des quantités de gaz à effet de serre.

Par le processus de photosynthèse, les plantes pour créer du glucose consomment une quantité importante de CO₂ atmosphérique, qui est nous l'avons vu précédemment le principal responsable de l'effet de serre terrestre.

Une étude réalisée aux États-Unis a permis d'estimer à 700 millions de tonnes la quantité de carbone ainsi stockée dans les arbres urbains pour une séquestration annuelle de 25 millions de tonnes sur l'ensemble du territoire. (Wang 2008).

Les plantes captent également, au travers de leurs stomates, d'autres gaz comme le monoxyde de carbone (CO), l'ozone, le dioxyde de soufre ou les oxydes d'azotes, ainsi que certaines microparticules volatiles. En 2006 aux États-Unis, l'équipe du chercheur David Nowak a estimé que le couvert forestier urbain avait permis le stockage de 784 000 tonnes de polluants atmosphériques.

La conséquence de cette dépollution est une réduction des gaz à effet de serre, mais également une amélioration conséquente de la qualité de l'air urbain. En considérant ce double effet Nowak et al. ont estimé que, toujours en 2006, le bénéfice financier de cette la dépollution due aux arbres urbains aux États-Unis pouvait se chiffrer à 3,8 milliards de \$.

La perte du couvert forestier en entraînant une augmentation des températures a pour effet indirect de favoriser les solutions alternatives permettant un gain de confort thermique et notamment par l'utilisation des climatiseurs qui sont, avec la voiture, l'une des premières sources de chaleur anthropique.

2.3. La chaleur anthropique

Les émissions de chaleur d'origine anthropique sont très importantes en milieu urbain du fait de la concentration des activités et de la population.

Si en hiver la chaleur anthropique, produite par l'activité humaine, la circulation automobile ou le chauffage des bâtiments, élève la température urbaine et apporte ainsi un certain confort au sein des agglomérations, elle augmente l'intensité des îlots de chaleur en été.

Tableau 2 : Chaleur anthropique (QF) et rayonnement net toutes longueurs d'onde comprises (Q*) dans plusieurs villes du monde (Colombert d'après Oke 1978)

Zones urbaines	date	période	Population (*10 ⁶)	Densité (ha/km ²)	Consommation d'énergie (MJ * 10 ³)	Q _F (W/m ²)	Q* (W/m ²)
Manhattan (40°N)	1967	Année	1,7	28 810	128	117	93
		Été				40	
		Hiver				198	
Montréal (45°N)	1961	Année	1,1	14 102	221	99	52
		Été				57	92
		Hiver				153	13
Budapest (47°N)	1970	Année	1,3	11 500	118	43	46
		Été				32	100
		Hiver				51	-8
Sheffield (53°N)	1952	Année	0,5	10 420	58	19	56
Berlin ouest (52°N)	1967	Année	2,3	9 830	67	21	57
Vancouver (49°N)	1970	Année	0,6	5 360	112	19	57
		Été				15	107
		Hiver				23	6
Hong Kong (22°N)	1971	Année	3,9	3 730	34	4	≈110
Singapore (1°N)	1972	Année	2,1	3 700	25	3	≈110
Los Angeles (34°N)	1965 – 70	Année	7,0	2 000	331	21	108
Fairbanks (64°N)	1965 – 70	Année	0,03	800	740	19	18

Ces valeurs, bien qu'anciennes, mettent en évidence que la quantité de chaleur anthropique augmente avec la population et la densité du bâti, mais également qu'elle est fonction du climat.

Montréal, de par sa situation géographique, sa morphologie, mais également en raison de la mentalité consommatrice nord-américaine est l'une des agglomérations les plus énergivores et qui a l'une des plus importantes productions de chaleur anthropique.

Les sources de chaleur anthropique estivales à Montréal sont principalement :

- le trafic automobile, qui participe à la formation des îlots de chaleur, d'une part par l'échauffement des véhicules du fait de leur activité mécanique, et d'autre part par l'émission de gaz d'échappement qui viennent accroître l'effet de serre. Étant donné la quantité de véhicules en circulation, et particulièrement lors de la formation de ralentissement, la couleur même de la voiture, souvent sombre, devient une source de chaleur non négligeable.
- l'utilisation de climatiseurs, qui sont un moyen facile d'abaisser la température intérieure, mais qui, en plus de leur gourmandise énergétique, rejettent une importante quantité de chaleur vers l'extérieur participant ainsi à l'augmentation de la température de l'air ambiant. En 2005 plus d'un tiers des ménages montréalais étaient équipés de climatiseurs et ce pourcentage ne va pas en diminuant (Giguère 2009).
- Les activités industrielles, qui, si elles tendent à être plus « Vertes », sont généralement encore des sources de chaleur importante. Elle sont d'ailleurs nombreuses sur l'île de Montréal, particulièrement dans le Nord-Est et le Sud-Ouest de l'île, très touchée par le phénomène d'îlots de chaleur urbains (Cavayas & Baudoin 2008).

2.4. Des conséquences sur différents plans

2.4.1. Impacts sanitaires

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain en accentuant les risques d'apparition de vagues de chaleur accablante, entraîne un inconfort pour les populations citadines. Le confort thermique est propre à chaque individu et il est impossible de définir une température optimale pour tous, cependant il est admis que la température de confort de la majorité de la population se situe entre 20 et 27 °C pour un taux d'humidité allant de 35 à 65 % (Giguère 2009).

En dépassant la température de confort, la chaleur peut entraîner un stress thermique pour la population ce qui en fait un problème de santé publique, certaines personnes peuvent être davantage vulnérables aux fortes températures comme les personnes atteintes de maladies chroniques, les populations socialement isolées, les très jeunes enfants, les personnes âgées, les travailleurs extérieurs, les personnes ayant un faible niveau socioéconomique, les sportifs extérieurs de haut niveau et les personnes souffrant de troubles mentaux (Giguère 2009).

« En 2003, durant la période estivale, la France est frappée de plein fouet par une vague de chaleur accablante. On recense 15 000 décès, les groupes les plus vulnérables étant les personnes âgées, et plus particulièrement les femmes. » Besancenot, 2005

À la température viennent également se greffer les effets néfastes de la pollution atmosphérique qui serait à l'origine de 1 540 décès prématurés par année à Montréal (400 liés aux pics de pollution et 1 140 liés à une exposition chronique) (Gaumont 2007).

En effet, les fortes températures constituent un environnement favorable à la formation du SMOG qui est, par définition, «un mélange toxique de gaz et de particules que l'on peut souvent observer dans l'air sous forme de brume sèche» ⁽¹⁶⁾ et se compose principalement de deux polluants : l'ozone troposphérique (O₃) et les composés volatils.

Cet épais nuage de pollution renforce alors l'effet de serre urbain participant ainsi au surchauffement de l'air ambiant et est également responsable de nombreuses maladies respiratoires telles que l'asthme ou la bronchite aiguë.

2.4.2. Impacts sur l'environnement

Sur un plan environnemental, l'accroissement des températures urbaines entraîne une perturbation de la qualité de l'air, tant extérieur, par la contribution à la formation du SMOG et la stagnation d'autres polluants, qu'intérieur en favorisant la libération de composés tels que les formaldéhydes contenus dans les colles utilisées pour la fabrication des meubles. Il favorise également la prolifération des acariens, moisissures et bactéries (Anquez & Herlem 2011).

D'autre part, la hausse des températures, en créant un inconfort pour la population, entraîne une surconsommation d'énergie due à l'utilisation massive de la climatisation, cette surconsommation se traduit, selon les moyens de production utilisés, par une augmentation du rejet de gaz à effet de serre. Dans le cas d'une élévation de la température de 2 °C induite par les îlots de chaleur, la consommation d'énergie peut grimper de 5 % (Anquez & Herlem 2011). On estime ainsi que 5 à 10% de la consommation électrique estivale servent à compenser l'effet des îlots de chaleur (Wang 2008).

Il apparaît également que l'élévation des températures urbaines a un impact sur les écosystèmes environnants. Les principaux touchés sont les écosystèmes aquatiques. Les eaux de pluie, chauffées en ruisselant sur les surfaces urbaines contribuent à l'élévation des températures des ruisseaux, rivières, étangs et lacs avoisinants vers lesquelles elles s'écoulent. Une hausse de la température du milieu aquatique peut ensuite affecter négativement le métabolisme et la reproduction de nombreuses espèces (Anquez et Herlem 2011).

Enfin l'augmentation des températures entraîne une surconsommation d'eau potable par la population pour se désaltérer, se rafraîchir ou pour l'arrosage des zones végétalisées, cela est d'autant plus remarquable que le Québec est déjà connu pour être la région la plus grande consommatrice d'eau potable avec 800 litres d'eau par jour et par personne ⁽¹⁷⁾ (contre 210 en France ⁽¹⁸⁾) si l'on ramène la consommation au nombre d'habitants.

Comme nous l'avons vu, les origines des îlots de chaleur sont multiples. Si les causes sont aussi variées que la morphologie des villes, la nature des revêtements, la présence de végétation ou encore les mauvaises habitudes humaines, il semble évident qu'il est possible d'aller à l'encontre du phénomène. Quelles sont les actions à mener pour prévenir l'apparition et l'amplitude des îlots de chaleur ? C'est à cette question que nous allons tenter de répondre dans la prochaine partie de ce mémoire.

3. Mesures de lutte contre les îlots de chaleur urbains : cas de Montréal

Les stratégies de lutte contre les îlots de chaleur urbains sont nombreuses et touchent différents secteurs, dont l'urbanisme, l'architecture, les transports ou encore le paysage.

Ces mesures de luttent existent à différentes échelles et font intervenir différents participants, depuis les collectivités jusqu'aux usagers.

On peut définir trois grands types de mesures de lutte contre les îlots de chaleur urbains, les mesures concernant la végétation et la gestion des eaux pluviales, celles concernant les infrastructures, et les mesures visant à réduire la production de chaleur anthropique. Même s'il est évident qu'une intervention en synergie sur ces trois plans est nécessaire pour obtenir les meilleurs effets, nous ne nous concentrerons dans cette troisième partie, que sur le cadre d'intervention d'un paysagiste.

3.1. Favoriser les espaces végétalisés

En partant du constat que nous avons établi précédemment il est aisé de comprendre en quoi le reverdissement des villes peut être profitable à leur climat. Les mesures de végétalisation sont d'ailleurs sans doute parmi les plus faciles à mettre en œuvre. Le tissu urbain présente en effet de nombreux endroits propices à la mise en place de végétaux et sa restructuration permanente n'a de cesse d'en créer des nouveaux.

Ainsi qu'il s'agisse d'espaces publics, de parkings privés de ruelles ou même de murs et de toitures, les possibilités de verdir l'espace sont nombreuses et souvent peu onéreuses, compte tenu du retour sur investissement.

3.1.1. Stratégies urbaines de verdissement

Une stratégie de végétalisation ou de verdissement a pour but d'augmenter l'indice global de végétation d'une ville en se fixant un objectif à atteindre dans un échéancier donné.

Le couvert forestier urbain participe activement à la régulation de l'air ambiant grâce à l'ombre prodiguée par le feuillage d'une part et à l'évapotranspiration, d'autre part, qui permet d'augmenter le taux d'humidité de l'air environnant et qui constitue un processus de climatisation naturel.

La végétalisation des villes a également d'autres avantages.

- Elle participe au maintien de la qualité de l'air par la captation de certains gaz et la fixation de composés volatils, ce qui permet de réduire l'effet de serre urbain ainsi que les risques d'apparition du SMOG.
- Elle participe à la gestion de l'eau, en augmentant la perméabilité des surfaces urbaines. Les conséquences en sont une limitation des risques de surcharge du réseau d'assainissement et une limitation du ruissellement de l'eau sur les surfaces urbaines chaudes qui viennent polluer les écosystèmes aquatiques environnants.
- Elle permet une importante économie, provenant à la fois des aspects bénéfiques de la baisse de température, de la meilleure gestion des eaux pluviales, de la qualité de l'air ainsi que de valorisation esthétique du paysage.

- Elle améliore le cadre de vie ce qui a des répercussions tant sanitaires que sociales comme l'ont montré les études de Witt et Crompton sur l'impact des espaces verts sur la criminalité urbaine (Witt & Crampton 1997) .

Différentes études ont permis de mettre en évidence les bénéfices thermiques de la végétation urbaine :

Akbari et Taha (d'après Colombert 2008) ont montré au travers d'une étude portant pour partie sur Montréal qu'une augmentation de 30 % du couvert végétal de la ville (ce qui correspond à la plantation d'environ 3 arbres par domicile) permettrait une économie de 10 % en ce qui concerne l'énergie nécessaire au chauffage et au refroidissement des habitations.

Cavayas et Baudouin (2008) ont mis en évidence dans le quartier Hochelaga – Maisonneuve, à Montréal, qu'une différence de température au sol de 6 °C était observable entre deux rues situées à une centaine de mètres de distance. Une mesure prise à proximité d'une zone industrielle affiche une température au sol de 35 °C, l'autre en bordure d'une zone végétalisée affiche une température de 29 °C (cf. figure 19).

Liebard et Deherde (2005) ont également montré qu'une différence de 5 °C était observable entre le centre-ville et un quartier longeant une bande végétalisée de 50 à 100m.

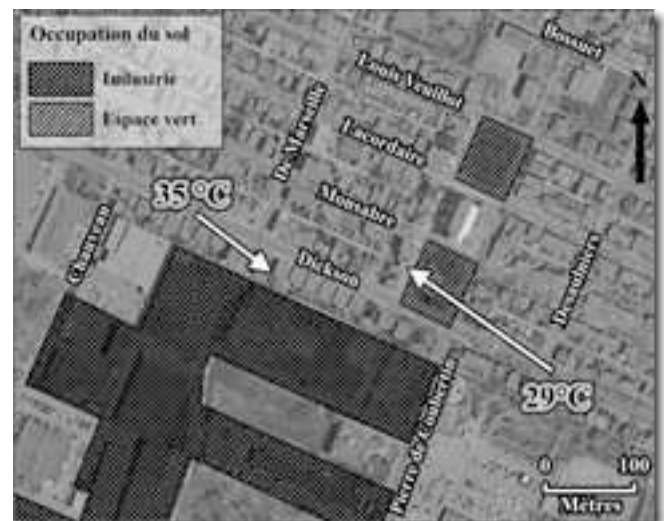


Figure 19 : Impact de la végétation sur la température (Cavayas et Baudouin 2008)

L'influence favorable d'un parc sur la température a notamment été étudiée par Shashua-Bar et Hoffman (2000), mettant en évidence qu'une bande végétalisée de 60 mètres de largeur avait une influence rafraîchissante sur près de 100 m. Il apparaît de plus que même si ce périmètre d'influence augmente avec la taille du parc, sa taille est proportionnellement plus importante pour des zones végétalisées de dimensions réduites.

La création de nombreux espaces verts de petite taille (entre 1 et 2ha) est donc préférable à un nombre restreint de grands parcs. En effet, leur mise en place est plus aisée, et compte tenu de l'effet lisière, il est possible de rafraîchir une surface plus importante qu'au moyen de grands parcs. Il est également préférable sur un plan social de favoriser des espaces verts de proximité qu'il est envisageable de relier par la mise en place de trames vertes à travers la ville.

Différentes études ont permis d'évaluer le bénéfice financier retirable de stratégies de plantation à l'échelle d'une agglomération. À titre d'exemple, l'équipe de E. Gregory McPherson (2008) a ainsi montré que la plantation de 1 million d'arbres dans la ville de Los Angeles apporterait un bénéfice sur 35 ans de 1,33 à 1,95 milliard de \$ et des bénéfices allant de 50 à 135 \$ par arbre et par an.

Montréal, dans une volonté de préserver et d'enrichir son patrimoine végétal a mis en place différents documents visant à protéger à favoriser le peuplement forestier de l'agglomération.

Une partie s'adresse directement à la population dans un but de sensibilisation sur un problème parfois méconnu, c'est le cas par exemple du document publié par le Conseil Régional de l'Environnement de Montréal : « Le verdissement Montréalais pour lutter contre les îlots de chaleur » paru en 2007. Ce document permet d'appréhender facilement la problématique de l'îlot de chaleur urbain ainsi que les bénéfices environnementaux et sociaux qui peuvent être tirés de la mise en place d'une stratégie de végétalisation.

Une telle stratégie a d'ailleurs récemment vu le jour à Montréal à l'initiative combinée de la Ville de Montréal et de la société privée SOVERDI (Société de verdissement du Montréal Métropolitain) sous le nom de Plan d'action canopée 2012-2021. Il s'agit d'un plan d'action sur 10 ans dont le but est de promouvoir la plantation de 300 000 arbres sur l'agglomération montréalaise, soit 2333 ha supplémentaires, afin de faire passer son couvert arboré de 20 à 25 %.

Le grand intérêt d'une telle démarche est d'allier le domaine public pour 1/3 des plantations à prévoir et le domaine privé pour les 2/3. Cette initiative intervient suite à l'apparition de l'agrile du frêne qui risque de faire chuter de 2 % la canopée montréalaise d'ici 2015. Une étude menée par SOVERDI a estimé que le coût d'investissement initial de 158M \$CAN serait entièrement remboursé d'ici 2050, cela illustre bien l'intérêt économique de la végétation urbaine, d'autant que ces arbres continueront à rendre service bien après cette date. Cette estimation se base principalement sur les valeurs monétaires accordées à l'absorption du CO₂, à l'économie de traitement de l'eau potable, aux économies d'énergie réalisées ou encore aux économies faites dans le domaine de la santé.

3.1.2. Végétation et bâtiments une relation à favoriser

L'apport de végétal peut se faire en de nombreux endroits où il n'aura pas le même impact ni la même fonction. Qu'il s'agisse de végétaliser les abords d'un échangeur routier, un parking ou un bâtiment, même si certains objectifs sont communs il semble évident que la fonction de la végétation sera différente et son choix devra être fait en conséquence.

▪ Végétalisation des abords de bâtiments

On considère dans l'appellation abords de bâtiments la zone immédiatement en contact avec le bâtiment jusqu'à quelques mètres de celui-ci.

La végétalisation en pourtour de bâtiments permet, grâce aux processus d'évapotranspiration et à l'ombrage de réduire significativement la température extérieure environnante ainsi que la température intérieure durant l'été. Durant l'hiver, selon leur localisation, la plantation de conifères, en servant de brise-vent, permet également de limiter le refroidissement de l'intérieur des bâtiments. En limitant les variations thermiques intérieures, la végétation permet de limiter substantiellement l'utilisation du chauffage et de la climatisation ce qui se traduit par une économie d'énergie et une limitation des rejets de chaleur anthropique.

L'équipe d'Akbari (1997) a montré que, selon leur localisation autour d'un bâtiment résidentiel, la présence d'arbres d'ombrage pouvait permettre une économie de 26 à 47% de la consommation électrique pour la climatisation, ainsi qu'une réduction de près de 4 °C de la température extérieure à proximité du bâtiment.

McPherson et Simpson (1997) ont d'ailleurs étudié le bénéfice thermique que pouvait apporter la plantation d'arbres autour des bâtiments. Il en ressort que le plus valorisant sur un plan énergétique est de planter des arbres à feuilles caduques relativement proches des

bâtiments (entre 3 et 6m) au sud - sud/ouest - ouest, l'ombre qu'ils porteront sur le bâtiment permettra d'en limiter l'élévation de température et durant l'hiver leurs branches nues ne présenteront qu'un faible obstacle aux précieux rayons solaires. Au nord et à l'est, en revanche, il est préférable de planter des arbres à feuillage persistant qui serviront de brise-vent, notamment en hiver, limitant ainsi l'abaissement des températures du bâtiment.

Fairuz Shahidan et Al. ont également mis en évidence que si une baisse de température de l'air de 2 °C était observable sous un couvert d'arbres d'ombrage, elle atteint 4 °C si cet ombrage est associé à un sol humide, et perméable (surface engazonnée).

Plusieurs initiatives de végétalisation de pourtours de bâtiments ont vu le jour à Montréal entre 2008 et 2012 dans le cadre du projet « Ilots de fraîcheurs » du Centre d'Écologie Urbaine de Montréal. Le principal but de ces démarches est de remplacer les zones minérales qui bordent les bâtiments, qu'ils s'agissent de béton, d'asphalte ou de criblure de pierre afin d'y implanter une bande de végétation regroupant arbres, arbustes et herbacées vivaces afin d'offrir un gain de fraîcheur ainsi qu'une amélioration du cadre de vie.

Voici quelques exemples de végétalisation ayant été réalisés durant l'été 2008 à l'initiative du CEUM.



Figure 20 : Façade de la Coopérative la Tour des alentours, située au coin des avenues du Parc et des Pins à l'été 2007 et à l'été 2008 (Centre d'écologie urbaine de Montréal 2009)



Figure 21 : La façade de la Friperie des petits frères des pauvres, située au coin des rues Gilford et Garnier à l'été 2008 et à l'été 2009 (Centre d'écologie urbaine de Montréal 2009)

▪ Végétalisation des façades

La végétalisation des façades est un excellent moyen de valoriser le végétal là où les espaces sont trop restreints pour d'autres types d'aménagements. La mise en place de murs végétalisés présente différents avantages.

En augmentant la masse thermique des bâtiments, elle permet de tamponner la température extérieure. En hiver le mur végétal aura un rôle d'isolant qui réduira l'abaissement de température des parois en été l'ombre ainsi que le maintien d'une humidité relative élevée permettra de maintenir le mur relativement frais.

En protégeant les façades des UVs et autres agressions de la vie urbaines (graffitis, affichages...) la végétalisation des murs assure une plus grande longévité aux matériaux de construction. Il est à noter que les murs végétaux apportent également une bonne isolation phonique.

Les murs végétaux apportent aussi un bénéfice écologique important, en augmentant la biodiversité urbaine, en créant de nouvelles niches écologiques et en purifiant l'air ambiant par la captation de composés volatils et de gaz à effets de serre.

Il existe deux grandes catégories de murs végétalisés. La première correspond aux murs colonisés par une végétation de plantes grimpantes plantées au sol. Ce type de végétation ne nécessite pas de support particulier, cependant il est possible de faire croître les végétaux sur des câblages ou palissages afin de les éloigner des façades. Ce type de végétalisation ne nécessite qu'un faible investissement et les plantes ont généralement besoin de peu de place au sol. Elles peuvent d'ailleurs être plantées en bac si une plantation pleine terre n'est pas réalisable.

Le deuxième type, plus complexe, a vu le jour récemment sous l'influence de designers et de paysagistes. Il s'agit cette fois de murs véritablement végétaux où les plantes, non grimpantes sont directement plantées dans un substrat vertical accolé à la paroi du bâtiment. Ce procédé, nettement plus onéreux a été largement popularisé par le chercheur Patrick Blanc qui en a développé le concept et le définit comme suit.

« Sur un mur porteur ou une structure porteuse est placée une ossature métallique qui soutient une plaque de PVC expansé de 10 mm d'épaisseur, sur laquelle sont agrafées deux couches de feutre de polyamide de 3 mm d'épaisseur chacune. Ces couches de feutre miment en quelque sorte les mousses qui se développent sur les parois rocheuses et qui servent de support aux racines de nombreuses plantes. Un réseau de tuyaux commandés par des électrovannes apporte une solution nutritive contenant les éléments minéraux dissous nécessaires à la croissance des plantes. Le feutre s'imprègne par capillarité de cette solution nutritive, laquelle descend le long du mur par gravité. Les racines des plantes y prélèvent les éléments nutritifs dont elles ont besoin, et l'eau en excès est recueillie en bas du mur par une gouttière, avant d'être réinjectée dans le réseau de tuyaux : le système fonctionne en circuit fermé. Les plantes sont choisies pour leur capacité à croître sur ce type de milieu et en fonction de la lumière disponible. » (Patrick Blanc)

Les effets bénéfiques de la mise en place de murs végétalisés sur les îlots de chaleur urbains ont été étudiés par Alexandri et Jones (2006) qui ont effectué une simulation afin d'évaluer l'effet de la mise en place de murs et toits végétalisés sur un canyon urbain. Leurs études ont mis en évidence que la mise en place de murs végétalisés pouvait permettre sur la ville de Montréal de réduire la température de l'air de 1,7 à 2,1 °C, plus l'humidité relative est élevée moins l'effet rafraîchissant est important.

Seweka et Mohamed (2012) ont montré que les fluctuations de température d'un mur végétalisé étaient de 50 % inférieure à celle d'un mur de brique attenant. De plus les feuilles captent 40 à 80 % de la lumière incidente protégeant ainsi les murs des rayons UV et limitant le rayonnement thermique des bâtiments.

Même si l'expérience a été tentée à « l'Espace fraîcheur de la fonderie Darling » (figure 22), la ville de Montréal, en raison de son climat rigoureux, convient mal aux murs végétaux. En revanche la végétalisation au moyen de plantes grimpantes semble bien se comporter face au froid. Les principales espèces adaptées au climat étant la vigne vierge (*Parthenocissus quinquefolia*) (figure 23) le lierre de Boston (*Parthenocissus tricuspidata*) et l'hydrangée grimpante (*Hydrangea petiolaris*) il apparaît d'ailleurs que contrairement aux idées reçues les plantes grimpantes n'endommagent pas le mur (Anquez et Herlem 2011).



Figure 22 : Mur végétal de la fonderie Darling (Catalyse Urbaine 2007)



Figure 23 : Duplex montréalais au coin Guiford-Messier colonisé par la vigne vierge (Myrique Baumier 2011)

▪ Végétalisation des toitures

Les toitures, en ville, représentent avec les rues l'essentiel des surfaces horizontales touchées par les rayonnements solaires. La majorité des habitations montréalaises étant dotées de toitures plates le potentiel de végétalisation de la ville est considérable. Même si, sous réserve d'une structure suffisante, tous les types de toits sont végétalisables, les toitures présentant un angle compris entre 0 et 20 % sont les mieux adaptées à ce type de pratique (Giguère 2009 d'après - Déoux 2004).

La couverture végétale d'un toit ajoute une seconde peau qui améliore les qualités d'isolation thermique des bâtiments, été comme hiver, et participe au rafraîchissement de l'air ambiant. La végétation constitue également pour le toit une couche de protection contre les intempéries et les rayonnements UVs qui se traduit par une amélioration de la durée de vie du toit (Giguère 2009 d'après - Déoux 2004).

De plus la végétalisation des toitures compense l'imperméabilisation du sol due à l'emprise du bâtiment ce qui permet de réduire le ruissellement des eaux de pluie et allège ainsi le réseau d'assainissement.

Elle prodigue par ailleurs au même titre que les autres espaces verts urbains une plus-value environnementale et esthétique.

Il existe deux types distincts de toitures végétalisées ; les toits verts extensifs et les toits verts intensifs. Ces deux types aux vocations et à l'aspect différents sont basés sur le même principe.

Sur la surface du toit sont apposés successivement une couche d'étanchéité, d'isolation, une membrane antiracinaire, un système de drainage et de filtration, un géotextile puis un substrat de plantation contenant ou non un système d'irrigation et dont la nature dépend du type de toit vert réalisé. (figure 24)

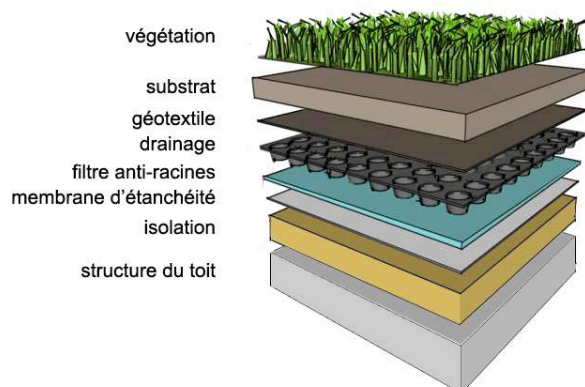


Figure 24 : composition type d'une toiture végétalisée (Rullier 2012 d'après nimrodenvironmental)

Les toits verts extensifs (cf. figure 26) sont les plus faciles à mettre en place et les moins onéreux, ils se caractérisent par un substrat de faible épaisseur (2 à 10cm), léger et poreux. Ce type de toiture est principalement à vocation environnementale et énergétique et n'est pas prévu pour un usage récréatif ; on y trouve principalement des plantes de type sédum ou graminées et vivaces de prairies alpines. Ces végétaux pour la plupart très rustiques résistent bien au climat québécois et permettent une mise en place facile, car il ne nécessite qu'un entretien minime. Ce type de structure pèse entre 30 et 100 kg au m² et ne nécessite la plupart du temps pas de renfort de charpente (Wong 2008).

Les toits verts intensifs se caractérisent par une importante épaisseur de substrat, offrant des possibilités d'aménagement quasi sans limites. Étant nettement plus lourd, ce type de toiture, à vocation récréative, nécessite d'être pris en compte sur un plan architectural lors de la construction du bâtiment. Il permet notamment de libérer des espaces à l'agriculture urbaine et offre toutes les particularités et possibilités d'un jardin au sol, ce qui inclut nécessairement un entretien plus conséquent et la nécessité d'un système d'arrosage.

Sonne (2006) a mesuré la température d'un toit dont la moitié était recouverte d'une membrane traditionnelle et l'autre d'un toit vert extensif. Il a mis en évidence que la différence de température entre les deux atteignait 22 °C au plus chaud de la journée avec 54 °C pour le toit nu contre 33 °C pour le toit vert.

Une première étude a été réalisée à Montréal en 2011 par l'ingénieur Sébastien Jacquet qui a montré qu'en été, l'entrée de chaleur par le toit dans un bâtiment peut être réduit de 99 % dans le cas d'une couverture végétale irriguée, et de 91 % dans le cas d'un toit non irrigué. L'installation d'un climatiseur dans ces conditions devient presque inutile. En hiver, inversement, les pertes de chaleur par le toit ont diminué respectivement de 38 % et 27 %.

«Plus grande est la surface du toit, par rapport à la surface totale (en incluant les murs), plus forte sera la baisse de la facture de chauffage», souligne M.Jacquet.

D'après les relevés du CEUM ⁽¹⁹⁾ la ville de Montréal ne compterait à l'heure actuelle qu'une centaine de toits vert implantés sur les toitures de résidences privées. Cette faible quantité comparativement à l'immense potentiel de la ville s'explique notamment par le fait que le code de la construction de Montréal n'oblige pas les constructeurs à concevoir des structures capables de supporter le poids des toits verts. En raison de l'âge des bâtiments, pour aménager un toit vert sur une résidence, il est donc souvent nécessaire de renforcer la structure de son toit, ce qui implique des coûts prohibitifs évalués à plus de 850 \$ du m² ⁽¹⁹⁾.

Les codes de construction de la ville sont en train d'être modifiés pour ses 19 arrondissements afin qu'y soit prise en considération la mise en place de toits verts ou blancs, dans le sens où, ne devant pas être imposés, la possibilité sera laissée au propriétaire d'en choisir ou non l'installation.

Quelques exemples de toits verts sont tout de même remarquables en plein Montréal. Le plus ancien, qui est également le plus grand est situé sur le toit de l'hôtel Hilton Bonaventure en plein centre-ville (figure 25).

Réalisé en 1967, ce toit extensif abrite aujourd'hui des arbres matures, un bassin et des jeux d'eau autour duquel s'est mis en place un véritable écosystème suspendu.

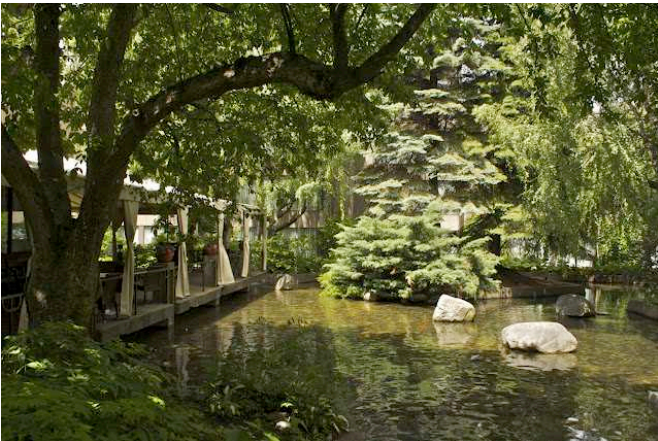


Figure 26 : exemple de toit vert intensif, hôtel Hilton Bonaventure (Latour 2012)



Figure 25 : exemple de toit vert extensif, duplex, centre-ville de Montréal (Guthrie 2011)

3.2. La gestion de l'eau dans la problématique de lutte contre les îlots de chaleur urbains

Nous l'avons vu dans la deuxième partie du présent mémoire, la minéralisation et donc l'imperméabilisation des surfaces à une incidence majeure sur l'apparition d'îlots de chaleur. Par ailleurs, l'élévation de l'humidité relative, par l'évapotranspiration ou d'autres moyens, couplée au vent permet de réduire sensiblement la température de l'air ambiant.

3.2.1. Eau libre et fontaines

Les bassins, rivières ou autres jets d'eau, même de petites tailles, tamponnent les fluctuations thermiques de l'air ambiant et permettent ainsi la création de véritables zones de fraîcheur. Plusieurs types d'installations d'eau peuvent être mis en place en divers endroits. Ces installations, à but esthétique ou récréatif ont toutes en commun d'offrir une aire de rafraîchissement extérieur pour la population.

Dans les parcs ou les aires de jeux, des bassins, piscines extérieures, ou brumisateurs, peuvent être mises en place et offrent un potentiel récréatif important pour tous les âges.

Les jets d'eau, fontaines sèches et autres brumisateurs sont également un bon moyen d'amener l'eau au centre des espaces minéralisés : cela permet de compenser en partie l'absence d'évapotranspiration due à la minéralisation et d'offrir des espaces ludiques et esthétiques aux usagers.

Liébard et DeHerde (2005) ont ainsi mis en évidence que la brumisation favorise sensiblement le rafraîchissement de l'air ambiant qui fournit à l'eau la chaleur nécessaire à son évaporation. Les résultats, bien que plus probants quand l'air est sec n'en sont pas moins intéressants dans les régions plus humides, notamment lorsque les brassements d'air sont importants.

Santamouris a montré que les aménagements de jets d'eau et de bassins mis en place dans les aménagements pour l'exposition universelle de Séville en 1992 ont permis un gain de fraîcheur de 5 °C, le même type d'aménagement a permis un gain de 4 °C au sein du village olympique d'Athènes en 2004 (Colombert 2008).

La ville de Montréal a depuis longtemps pris conscience de la nécessité d'offrir des espaces de rafraîchissement à ses citoyens. Elle y a notamment répondu par l'aménagement d'espaces aquatiques gratuits, disséminés dans les différents parcs de la ville. On compte ainsi 74 piscines extérieures, 116 pataugeoires et 99 jeux d'eau (figures 27, 28, 29).



Figure 28 : piscine publique du parc Laurier (tOhu-bOhu 2011)



Figure 27 : jeux d'eau du parc Wilfrid Bastien (Think.Stock 2012)



Figure 29 : pataugeoire du parc Jeanne Mance (Weisenburger 2011)

Hors des parcs, l'eau sous forme de fontaines sèches ou de brumisateurs vient également agrémenter différents aménagements urbains. Ces sources de fraîcheur permettent de tamponner en partie les surfaces très minérales qui les entourent. Le quartier des spectacles de Montréal, dont l'aménagement imaginé par l'agence Daoust Lestage a été réalisé entre 2009 et 2012 s'inscrit parfaitement dans cette démarche de gestion des îlots de chaleur et d'aménité liée à l'eau. L'immense place des festivals, constituée pour partie d'une surface

pavée, accueille 235 jets d'eau éclairés (figure 31) qui permettent de réguler la température de cet espace particulièrement exposé aux rayons du soleil. Plus loin, au niveau de la place de l'Adresse Symphonique, un chemin pavé est bordé sur toute sa longueur de brumisateurs activés par intermittence offrant un aspect singulier à cet espace ouvert et un rafraîchissement pour les usagers qui décident de se poser sur l'herbe (figure 32).



Figure 31 : fontaines sèches, place des festivals (Daoust Lestage 2011)



Figure 30 : chemin de brume, place de l'Adresse Symphonique (Daoust Lestage 2011)

L'eau, si elle n'est pas rendue visible dans un projet d'aménagement paysager, demeure néanmoins une ressource qu'il est nécessaire de protéger et de gérer. Une gestion intelligente et durable des eaux pluviales participe en effet indirectement à la réduction des îlots de chaleur urbains.

3.2.2. Gestion durable des eaux pluviales

De nombreuses études mettent en évidence l'effet bénéfique de l'humidité du sol sur l'atténuation des îlots de chaleur. Différentes pratiques existent pour intégrer la problématique de gestion durable des eaux pluviales en favorisant la percolation de l'eau dans le but d'une part d'humidifier le sol, augmentant son potentiel d'évapotranspiration et d'autre part de court-circuiter le réseau d'assainissement lorsque c'est possible afin de renvoyer les eaux de pluie directement à la nappe phréatique.

La plupart des pratiques de gestion durable de l'eau se développe dans l'idée de développement à faible impact. « Le développement à faible impact favorise les aménagements à petite échelle qui permet la gestion des eaux pluviales à la source afin d'éviter la pollution due au ruissellement » (Giguère 2009).

La mise en place de structures favorisant la gestion des eaux pluviales, si elle est généralement aisée et peu coûteuse, nécessite toutefois de prévoir des études préalables afin de déterminer les différents paramètres qui en influenceront l'efficacité. Il est ainsi nécessaire de vérifier au préalable la profondeur de la nappe phréatique, la nature des sols, particulièrement la granulométrie des agrégats, ou encore les risques de pollution liés au ruissellement (dans le cas de traitement des eaux de parking ou de voirie particulièrement).

▪ Les jardins pluviaux

L'aménagement de jardins pluviaux permet de minimiser l'impact de l'imperméabilisation des sols, à proximité des bâtiments ou autres surfaces minéralisées. D'une réalisation relativement facile ils ne demandent généralement qu'un faible investissement. Ils consistent en une dépression faible du terrain qui s'allonge perpendiculairement au sens de la pente qu'ils drainent. Le traitement de la topographie du site est alors prévu pour acheminer l'eau vers ce point bas où elle s'infiltré lentement permettant ainsi de maintenir une certaine humidité au niveau du sol et d'alimenter la nappe phréatique (Rivard 2010).

La ville de Montréal a déjà lancé des campagnes de sensibilisation de la population à la problématique des eaux de ruissellement, elle a notamment publié en 2010 un document à l'attention des particuliers visant à expliquer les bienfaits retirables de la mise en place d'un jardin pluvial et de la réorientation vers le jardin des eaux d'écoulement de toiture. (Ville de Montréal 2011- Annexe IV)

Un autre document cette fois plus important et suivant une approche plus technique et scientifique a été rédigé par une équipe pluridisciplinaire et publié en 2011 sous le titre de Guide de gestion des eaux pluviales. « Le document se veut essentiellement un outil pratique pour guider les concepteurs de systèmes de drainage ainsi que les autres intervenants impliqués dans le développement urbain (urbanistes, architectes paysagistes, spécialistes en environnement, développeurs et décideurs municipaux) dans l'identification, l'utilisation et la mise en œuvre des meilleures pratiques pour la protection des ressources hydriques pouvant être affectées par les eaux de ruissellement urbain. » (Rivard 2010).

Il est d'ailleurs intéressant de remarquer qu'un tel document apparaît relativement tard compte tenu de l'ancienneté de la prise de conscience sur l'importance de la gestion des eaux pluviales.

Dans certains cas le choix de plantes pour leur qualité détoxifiante peut permettre de limiter la pollution du sol et de la nappe par des eaux de ruissellement chargées en hydrocarbures. C'est le cas notamment pour l'aménagement de jardins pluviaux destinés à gérer les eaux de ruissellement d'aires de stationnement ou autres routes. Un premier parking (figure 32), dénué de puisards et de bordures a d'ailleurs vu le jour cette année à l'initiative de l'architecte paysagiste Claude Cormier au niveau du Quai de l'Horloge situé au Vieux-Port de Montréal. Ce stationnement est entièrement drainé par les bandes végétalisées qui le bordent. Espérons que ce bel exemple de gestion durable des eaux pluviales changera les mentalités de la Ville, souvent peu enthousiaste à l'idée de ces pratiques alternatives réputées difficiles d'entretien, notamment en raison des déneigements hivernaux.



Figure 32 : parking du Quai de l'Horloge à Montréal (Cormier & Associés 2012)

▪ Les bassins de rétention

Lorsque l'espace disponible le permet, la création de bassins de rétention des eaux pluviales est un bon moyen de gérer l'infiltration de grandes surfaces imperméables. Deux types existent ;

- les bassins d'eau, qui conservent en permanence une certaine quantité d'eau et peuvent être traités comme des bassins urbains ;
- les bassins secs, Ils ne se remplissent qu'en cas de fortes pluies. Ces derniers ont l'avantage de pouvoir offrir des espaces récréatifs par temps sec.

Ces espaces, peuvent également se présenter comme de nouveaux espaces de biodiversité urbaine, c'est le cas notamment du bassin de rétention du domaine Chartier à Montréal. Ce bassin, d'une superficie totale de 14 000 m² pour un volume de 35 000 m³ est bordé d'arbustes et de graminées. Ces effets de naturalisation ont permis d'y observer, depuis, la présence de diverses espèces d'oiseaux, dont des crécerelles d'Amérique, des carouges à épaulettes, des outardes, des canards et des faucons pèlerins ⁽²⁰⁾.

▪ Les tranchées de rétention

En milieu urbain, l'espace souvent restreint ne permet pas forcément la mise en place de structures telles que les bassins de rétention. Les tranchées de rétention peuvent alors être une alternative intéressante pour alléger le réseau d'égout et humidifier les sols. Une tranchée de rétention se constitue d'une excavation linéaire peu profonde (environ 1 m) et comblée au moyen d'une pierre propre (3/4 net) (Giguère 2009). En zone urbaine, ce type d'aménagement peut alors être réalisé sous des cheminements dont le revêtement de surface est constitué de matériaux drainants.

Les tranchées d'infiltration participent également à l'amélioration de la qualité des eaux pluviales. Une tranchée bien entretenue peut retirer aussi bien les polluants solubles que les polluants particulaires. La décontamination s'opère par adsorption et par conversion biologique et chimique dans le sol, le taux de rétention des polluants dépendant de la nature du sol (les sols sablonneux étant moins efficaces que les sols plus imperméables pour retenir les nitrates et les métaux-traces) ⁽²¹⁾.

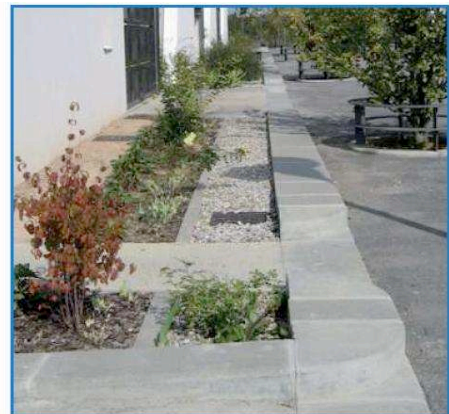
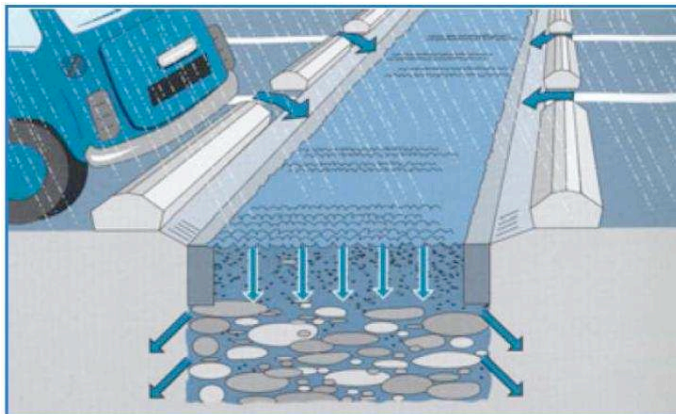


Figure 33 : Schéma d'une tranchée drainante (à gauche) et tranchée d'infiltration à Lyon (à droite) (GUIDEnR)

Il est toutefois à noter que ce type d'ouvrage nécessite un entretien en raison des risques de colmatage sur le long terme dû à la sédimentation dans la tranchée.

▪ Les chaussées réservoir drainantes

À plus grande échelle il est possible d'aménager des espaces de rétention sous les voiries. Ces structures prenant le nom de chaussées réservoir, elles peuvent être recouverte de matériaux drainants ou être alimentées par des collecteurs répartis le long de la chaussée (cf. figure 34).

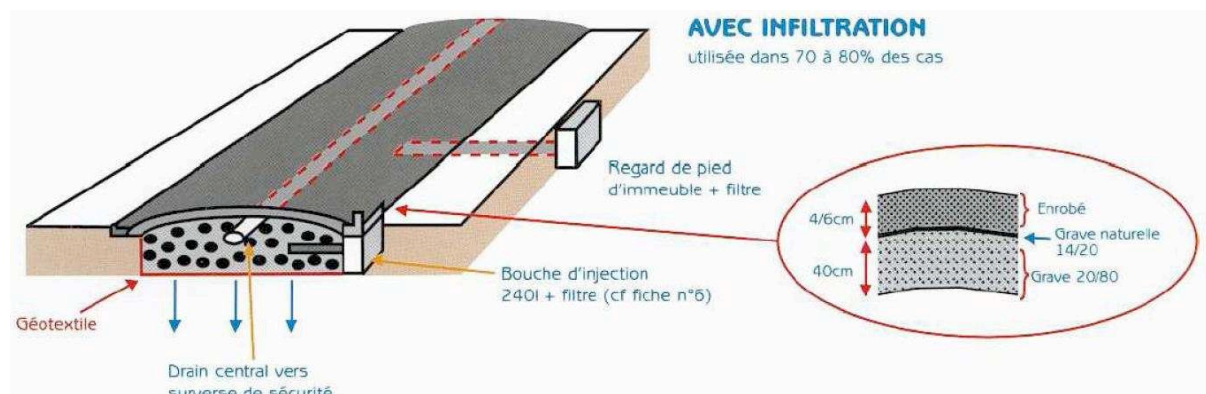


Figure 34 : schéma d'une chaussée réservoir type (GUIDEnR)

L'assise drainante peut être constituée de ⁽²²⁾ :

- matériaux non liés (grave concassée, semi-concassée, roulés, hors sable) : porosité jusqu'à 45 %,
- matériaux traités au liant bitumineux (graves bitumes drainantes) : porosité de 10 à 15 %,
- matériaux traités au liant hydraulique (béton poreux) : porosité de 10 à 20 %,
- matériaux alvéolaires en plastique (structure de type nid d'abeilles) : porosité > 90 %,
- matériaux de récupération (pneus) : Porosité > 70 %.

Ce type de structure peut être prévu pour une simple rétention de l'eau en cas d'épisode orageux ou alors comme structure d'infiltration. Dans ce cas les considérations de dépollution devront être traitées au préalable.

L'entretien et la gestion de ce type de voirie, surtout si elles sont recouvertes d'une couche de roulement drainante, sont délicats, car ce type de surface présente des risques de colmatage. Pour assurer une bonne perméabilité, un curage du pavé doit être effectué régulièrement par jet d'eau ou aspirateur (Giguère 2009). Par ailleurs il s'avère que le climat québécois n'est pas le plus adapté à ce type d'ouvrage dont l'altération sera accélérée par les cycles de gel et dégel, de plus l'eau gelée dans le matériau le rend imperméable aux ruissellements lors de la fonte des neiges au printemps.

▪ Les puits d'infiltration

Lorsque l'espace se réduit encore, il est possible de concevoir des structures de rétention et d'infiltration non plus linéaires, mais verticales, elles comportent une fosse verticale d'environ 1mx1mx2m remplie de pierre propre (3/4 nette) emballée dans un géotextile, les derniers 10-20 cm en surface peuvent alors être recouverts de gravier ou de plantations légères selon les choix. Un tel système permet aux eaux de toitures de percoler directement dans le sol sans avoir à être reliées au réseau d'assainissement de la ville assurant ainsi la régénération de la nappe phréatique.

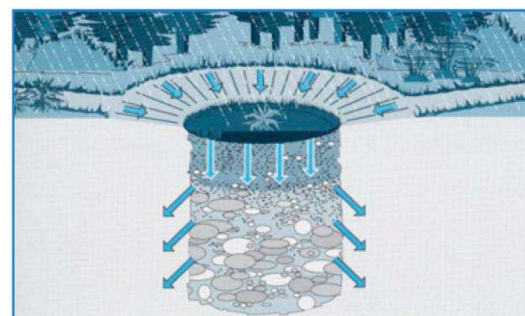


Figure 35 : puits d'infiltration (GUIDEnR)

Il est néanmoins recommandé d'éloigner ce type de structure des fondations des bâtiments qui pourraient être endommagées par une stagnation d'humidité.

De plus, s'il ne demande qu'un faible investissement initial, le puits doit cependant être nettoyé régulièrement, à cette fin il doit rester accessible. La couche filtrante, présente en dessous du puits, doit être renouvelée lorsque l'eau stagne plus de 24 heures dans le puits.

3.3. Le choix de matériaux alternatifs pour limiter l'échauffement de l'air urbain

Les surfaces minérales prédominent en milieu urbain. Même s'il est souvent possible de laisser une plus grande place aux espaces végétalisés, il est en revanche impossible de s'affranchir des surfaces dures, nécessaires à la circulation et à la fréquentation intense. Il existe toutefois des alternatives aux matériaux traditionnels dont les propriétés thermiques sont souvent déplorable. Nous l'avons vu précédemment, des matériaux, comme l'asphalte possèdent un albédo très faible (0,05 à 0,20), et sont susceptibles d'atteindre de hautes températures lorsqu'ils sont exposés aux rayons solaires. De plus, la plupart de ces matériaux, choisis pour leur résistance et leur durabilité, ont une forte densité ce qui leur confère une importante inertie thermique qui se traduit par un rayonnement important de la chaleur accumulée durant la journée.

Différentes études ont montré qu'il était possible de rafraîchir sensiblement l'air urbain en modifiant les habitudes en ce qui concerne les matériaux de revêtements des surfaces. La plupart de ces études portent sur les revêtements à faible albédo, ce facteur est en effet celui dont les variations influencent le plus fortement la température (Wong 2012).

Santamouris et son équipe (2012) ont ainsi montré, à Athènes, qu'une différence de 12 °C au niveau du sol et de 2 °C au niveau de l'air à 1 m du sol était observable au-dessus d'une zone pavée par des pavés à haut albédo (0,6) comparativement à une autre zone avoisinante.

Une autre étude menée par Nakayama et Fujita (2010), sur les pavés drainants a cette fois-ci montré qu'une différence de 5 à 10 °C était observable entre ce type de revêtement et des pavés traditionnels. La différence de température étant accrue par l'humidification des pavés.

3.3.1. Augmenter l'albédo des surfaces

Il existe de nombreux produits alternatifs permettant d'augmenter l'albédo des villes. Les plus aisés à mettre en œuvre sont les pavés à haut albédo, de couleur claire et comprenant généralement des éclats cristallins ; ils ont un haut pouvoir de réflectance solaire.

Certains bétons faits à partir d'agrégats de laitiers ou de cendres recyclés permettent d'obtenir un albédo très supérieur à celui d'un béton classique. Ce type de matériau à d'ailleurs été utilisé à Chicago dans le cadre d'une campagne de rafraîchissement des ruelles.

Des solutions existent également pour les chaussées asphaltées. Une alternative serait, au lieu de couler une fine couche de bitume (noire) sur des granulats, d'inverser le processus et de venir « coller » les granulats sur une couche de bitume. Ce procédé ne peut toutefois pas s'appliquer aux voies de circulations à grande vitesse, car les granulats sont alors moins bien fixés à la structure (Giguère 2009).

L'utilisation de colorants (figure 36) ou de liants alternatifs au bitume sont également des solutions envisageables pour augmenter l'indice de réflectance des voiries, cependant ces procédés encore chers sont souvent boudés des municipalités.

Des traitements de l'asphalte afin d'en augmenter l'indice de réflectance de même qu'un resurfacement avec des agrégats de pierre concassée à fort albédo offrent de bons résultats (chip sealing).

Des études ont également mis en évidence qu'une bonne méthode pour réduire l'albédo des surfaces asphaltées est de les recouvrir d'une couche de béton 2,5 cm à 10 cm selon les usages, le « whitetopping » (figure 37). Cette solution s'adapterait à tout type de circulation et l'albédo du béton, plus élevé que celui de l'asphalte (0,3 contre 0,05 lorsque neuf) permettrait une réduction importante des températures de surface, elle permet de plus de prolonger la vie des chaussées asphaltées (Giguère 2009).

Enfin, en augmentant l'indice de réflectance des surfaces, on en diminue le besoin en éclairage augmentant ainsi la sécurité des usagers et permettant une diminution de consommation énergétique.



Figure 36 : exemple d'asphalte coloré (J.P. Sergent)



Figure 37 : resurfacement d'une route en asphalte avec du béton (Golder 2011)

3.3.2. Matériaux à faible inertie thermique

S'il est possible de limiter l'échauffement des revêtements en augmentant leur réflectance, il est également possible de limiter la capacité de ces derniers à emmagasiner la chaleur en contrôlant leur inertie ainsi que la conductivité thermique.

D'une manière générale, plus un matériau sera dense, plus il sera à même d'emmagasiner la chaleur et par conséquent de la restituer sous forme de rayonnement infrarouge, particulièrement durant la nuit.

L'utilisation de matériaux de revêtement à plus faible densité est donc préconisable dans une optique de réduction des îlots de chaleur urbains. Il est toutefois évident que ce type de matériau a une structure moins résistante et ne peut être employé que pour des circulations piétonnes ou cyclables.

Des matériaux qui ont été initialement développés dans un but de gestion des eaux pluviales peuvent révéler des qualités thermiques de par leur plus faible densité. En effet, le béton ou l'asphalte drainant, par exemple, sont composés de granulats plus gros que des matériaux traditionnels, créant des vides qui permettent à l'eau de percoler au travers. Ce type de matériaux, moins dense aura un échauffement moindre, car les granulats qui le constituent, en raison de leur taille, ont une surface de contact plus restreinte les uns avec les autres, de plus l'air qui remplit les vides agit comme un isolant.

Diminuer, lorsque cela est possible, l'épaisseur du pavement est également une solution pour réduire la masse thermique et donc la chaleur qu'il est capable d'emmagasiner. Il est donc important dans un objectif de limitation des îlots de chaleur, d'éviter tout surdimensionnement inutile et de bien tenir compte des usages dans le choix des matériaux (piétons, vélos, voitures, camions...).

Le bois est un matériau de construction durable qui offre un bon rendement thermique, il possède généralement une faible conductivité thermique du fait de sa densité nettement inférieure à celle de la pierre ou du béton (0,140 W/m.K contre 1,650 pour le béton) ⁽²³⁾. De plus, la mise en place d'une structure circulaire en bois nécessite des structures porteuses qui créent une couche d'air isolante entre le sol et la surface exposée aux rayons solaires.

3.3.3. Matériaux drainants

Les enrobés drainants, mis aux points il y a près de 30 ans ⁽²⁴⁾ et plus récemment les bétons drainants ont été développés initialement dans un but de gestion durable des eaux pluviales. On leur a découvert a posteriori d'intéressantes propriétés thermiques. En effet, un matériau, s'il est capable d'absorber l'eau de par sa porosité, est également capable de la restituer par évaporation offrant ainsi par les mécanismes thermiques qui lui sont associés un formidable potentiel de rafraîchissement.

Différents types de revêtements minéraux drainants adaptés aux contraintes des aménagements urbains existent à l'heure actuelle. Le devenir des eaux après percolation dépend de la nature du sol sous jacent. (Voir annexe III)

- Alternatives pour les zones pavées

Au niveau des circulations piétonnes ou cyclables, une solution peu coûteuse consiste à la mise en place de pavés à joints drainants, le matériau de jointure est alors d'une granulométrie 1/3 ou 2/5 mm afin de permettre à l'eau de s'écouler (Rivard 2010). Des formes de pavés ont été développées afin d'augmenter la surface des joints et d'améliorer ainsi la perméabilité de la zone pavée (cf. figure 38).

En ce qui concerne les pavés, une solution plus efficace encore, notamment sur un plan thermique, est l'utilisation de pavés élaborés à partir de béton poreux (réalisé à partir d'agrégats de granulométrie supérieure à un béton traditionnel) (cf. figure 39). Ce type de pavés offre de bons résultats, tant en terme de gestion des eaux pluviales que de rafraîchissement par évaporation (Pommerantz et al 2000).



Figure 40 : pavés de béton à joints élargis (Stradusinfra)



Figure 39 : pavés préfabriqués en béton drainant (Kronimus)



Figure 38 : béton drainant (Lafarge 2011)

- Béton drainant

L'utilisation de béton drainant peut également convenir à un béton coulé. Ce type de revêtement possède une porosité allant de 10 à 30 % (cf. figure 40). Il est également à l'étude pour ses propriétés de réduction du bruit de roulement ⁽²⁵⁾. Si en raison de sa granulométrie, il est moins stable qu'un béton traditionnel, il convient toutefois bien au surfacage des zones de stationnement ou aux chaussées mixtes à faible roulement.

- Asphalte drainant

L'asphalte drainant suit le même principe que le béton drainant. Son fonctionnement est basé sur une augmentation de la porosité du matériau fini par augmentation de la taille des agrégats qui le constituent. Il peut employer du bitume ou des liants alternatifs issus de matières premières recyclables comme le Végécol. Ce type de revêtement, au même titre que les bétons drainants, nécessite un nettoyage régulier au moyen de jets à haute pression ou par aspiration afin d'éliminer les poussières qui viendraient colmater les pores (Giguère 2009).

- Dalles alvéolaires

Les dalles alvéolaires sont des systèmes modulaires, prévus pour pouvoir accueillir un ensemencement, qui autorisent la circulation de véhicules. Les modules sont déposés sur une couche de fondation type pour la pose de pavage puis les alvéoles sont comblées avec de la terre végétale avant d'être ensemencées ; il est également possible de choisir des dalles préengazonnées pour un rendu immédiat. Les systèmes modulaires ont la particularité de protéger les racines des végétaux et de permettre l'écoulement des eaux de pluie. Plusieurs modèles sont disponibles dans le commerce, ils sont soit en matériaux composites (figure 41) plastiques à haute résistance soit en béton, ces derniers sont moins cher, mais le gazon y a généralement plus de difficultés à se maintenir en raison de la plus faible place dont il dispose et de l'échauffement qu'il subit au contact du béton. Les dalles alvéolaires ont malheureusement mauvaise réputation auprès des professionnels du paysage, car l'ensemencement a souvent du mal à se maintenir en l'absence d'arrosage du fait des contraintes qu'il subit (Deny & Gaumont 2008).



Figure 42 : module alvéolaire à gazon en Polyéthylène haute densité (Ritterdal)



Figure 41 : module alvéolaire à gazon en béton (Febestral)

Conclusion

Le réchauffement climatique qui touche notre planète risque de s'accélérer dans les années à venir et d'entraîner ainsi une augmentation du phénomène d'îlots de chaleur urbains que nous observons dans nos métropoles. Comme nous l'avons vu, différents facteurs sont à l'origine de ces élévations anormales de température au sein du tissu urbain. La morphologie des rues, l'imperméabilisation des sols au profit de matériaux à forte inertie thermique, ainsi que la perte du couvert forestier sont malheureusement le legs d'une urbanisation qui s'est faite spontanément et au détriment d'une vision durable, notamment sur un plan thermique. En outre, de par leurs modes de vie et leurs activités, les hommes rejettent une chaleur considérable dans leur milieu, les entraînant dans un inconfort qui peut s'avérer dangereux pour les personnes les plus fragiles, mais aussi pour l'ensemble des êtres vivants de l'environnement urbain. Des recherches ont été réalisées ces dix dernières années par des équipes de recherche du monde entier pour trouver des solutions à ce phénomène endémique.

Nous avons détaillé, au travers de cette étude, un panel de matériaux et pratiques relativement aisées à mettre en œuvre pour la plupart dans la conception d'aménagements paysagers en milieu urbain. Les différentes mesures de lutte proposées participent à la réduction des îlots de chaleur, mais ne peuvent suffire à elles seules à endiguer ce phénomène.

En effet, une prise de conscience globale et une action synergique des différents acteurs du développement urbain ainsi que des usagers sont nécessaires pour lutter au niveau des différentes sources de chaleur urbaine. Ainsi, le développement de bâtiments bioclimatiques en architecture, visant à la conception de structures mieux isolées, mieux orientées permettent d'éviter le recourt systématique à la climatisation pour maintenir une température confortable. La réflexion quant à l'agencement du tissu urbain, notamment par la densification et la mixité des activités permet de réduire les distances entre le lieu de vie et le lieu de travail ou les commerces et ainsi de s'affranchir de la voiture qui est, particulièrement en Amérique du Nord, omniprésente. (L'ensemble des leviers d'actions est présenté en annexe V)

De même, la sensibilisation du grand public comme elle existe déjà sous la forme de prospectus de vulgarisation (annexe VI), mais aussi des professionnels, aux problématiques liées au développement durable est nécessaire si nous voulons voir une réelle évolution dans les années futures. En effet, très attachés à ce qu'ils connaissent depuis toujours les professionnels de la construction sont encore souvent réticents à l'essai de techniques alternatives qui permettrait de limiter substantiellement les îlots de chaleurs urbains, leur refus se basant sur des spéculations de durabilité médiocre ou de coût prohibitif.

Les paysagistes en ville ont donc leur rôle à jouer dans les années à venir pour apporter davantage de fraîcheur à l'environnement urbain ainsi leurs actions peuvent se situer à différents niveaux : conseil et de médiation auprès des collectivités et des professionnels de l'aménagement, participation à l'élaboration de documents qui cadreront le développement urbain, mise en application directe lors de la réalisation des projets.

Espérons que dans les années à venir, nos cités deviennent des villes durables, prenant en compte non seulement les enjeux économiques, sociaux et culturels mais aussi la dimension écologique au service notamment de la gestion des aspects climatiques et que si les forêts ont précédé les peuples, elles continueront de les suivre.

Sources bibliographiques

- Akbari H & Matthews H.D (2012). Global cooling updates : réflective roofs and pavements, *Energy and Buildings*, 5p.
- Akbari, H., D. Kurn, et al. (1997). Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and Buildings*, 10p.
- Akbari, H., Pomerantz, M., and Taha, H. (2001) Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas. *Solar Energy*, Vol. 70, No. 3. 16p.
- Alexandri E, Jones P (2006), Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates, *Building and Environment* 43 (2008) 480–493, 14p.
- Anquez P & Herlem A (2011), Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal :causes, impacts et solutions, chaire de responsabilité sociale et de développement durable ESG UQÀM, 19p.
- Cavayas & Baudouin (2008). Etude des biotopes urbains et périurbains de la CMM, Volet 1 et 2, UQAM, 120p.
- Colombert M., (2008), Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville, Université Paris-Est, Thèse de Doctorat, 540p.
- Deny E, Gaumont C, (2008), Matériaux réfléchissants et perméables pour contrer les îlots de chaleur urbains, Conseil Régional de l'Environnement de Montréal, 21p.
- Fairuz Shahidan M, Jones P.J, Gwilliam J, Salleh E (2012), An evaluation of outdoor and building environment cooling achieved through combination modification of trees with ground materials, *building and environment*, 58 (2012) 245-257, 13p.
- Gaumont C (2007), Le Verdissement Montréalais, pour lutter contre les îlots de chaleur urbains, le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique, Conseil Régional de l'Environnement de Montréal, 21p.
- Giguère M (2009), Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains, revue littéraire, Institut National de la Santé Publique du Quebec, 95p.
- Jacquet S, (2011), Performance énergétique d'une toiture végétalisée au centre-ville de Montréal, résumé de mémoire présenté à l'école de technologie supérieure, 48p.
- Labrecque M & Vergriete Y (2006), Etude des biotopes urbains et périurbains de la CMM, volet 3 : synthèse des indicateurs de rétention des eaux par les végétaux et possibilité d'application, en milieu urbain et périurbain, sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal. Rapport destiné au CRE de Laval, 24p.
- Lemonsu, A., (2003), Modélisation des processus de surface et de la couche limite en milieu urbain, CNRM, Thèse de Doctorat, 490p.
- Liebard A, Deherde A, (2005), Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, *Le Moniteur*, 776p.
- Mayer H, Holst J, Imbery F (2009): Human thermal comfort in summer in different urban quarters of a mid-size Central European city. *Proc. 8th AMS Symposium on the Urban Environment*; 4.1: 1-8,9p.
- McPherson J.R, Gregory E.; Simpson, James R.; Xiao, Qingfu; Chunxia, Wu, (2008); Los Angeles 1-Milliontree canopy cover assessment ; Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-207. Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 52 p.

- Nakayama T, Fujita T, (2010), Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas, *Landscape and Urban Planning* 96 (2010) 57–67, 11p.
- Nowak, David J.; Crane, Daniel E.; Stevens, Jack C. (2006), Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States, *Urban Forestry and Urban Greening* 4:115-123
- Oke, T.R. (1982). The Energetic Basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 108:1-24. 24p.
- Oke T.R et Maxwell G.B (1967)Urban heat Island dynamics in Montréal and Vancouver,*Atmospheric Environment* (1967), Volume 9, Issue 2,Pages 191-200, 9p.
- Oke, T.R. (1988), Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, vol.11, n°1-3, 10p.
- Rivard G, (2010), Guide de gestion des eaux pluviales, pour le MDDEP et le MARMOT, p.86
- Santamouris M, Gaitani N, Spanou A, Saliari M, Giannopoulou K, Vasilakopoulou K, Kardomateas T, (2012), Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas - Design realization and results of the flisvos project, *Building and Environment* 53 (2012) 128-136, 19p.
- Shashua-Bar L, Hoffman M.E (2000), Vegetation as a climatic component in the design of an urban street An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees, *Energy and Buildings* 31 _2000. 14p.
- Sheweka S.M & Mohamed N.M, (2012), Green Facades as a New Sustainable Approach Towards Climate Change, *Energy Procedia* 18 : 507 – 520, 14p.
- Simpson J.R.; McPherson E.G, (1997),Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento, *Atmospheric Environment*, Volume 32, Number 1, 6p.
- Sone J (2006), Evaluating green roof energy performance, *ASHRAE Journal*;Feb2006, Vol. 48 Issue 2, 59p.
- Valette E & Cordeau E (2010), Les îlots de chaleur urbains, Répertoire de fiches de connaissance, publication de l'IAU Île de France, 58p.
- Voogt, J.A. (2002) Urban heat island, *Encyclopedia of global environmental change*, Vol. 3, 6p.
- Voogt J.A et Oke T.R (2003)The remote sensinf of urban climates, *Remote Sensing of Environment*, Volume 86, Issue 3, p. 14p
- Wickham et Al. (2011). Influence of the global Heating on the Global Temperature Land Average Using Rural Sites Identified from MODIS Classifications, University of California, Berkeley, 14p.
- Witt P & Crampton J (1997), The At-Risk Youth Recreation Project, *Parks and Recreation*, v32 n1, 7p.
- Ville de Montréal, SOVERDI (2011), Plan d'action canopée 2012-2021, direction des grands parcs et du verdissement, document de travail,11p.
- Ville de Montréal (2011), Récupérer l'eau de pluie, document de sensibilisation du public, 2p.
- Wong (2008), Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies -Basics - Urban Heat Island Basics, U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs, 22p.
- Wong (2008), Reducing Urban Heat Island; Compendium of Strategies – Trees and Vegetation, Urban Heat Island Basics, U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs,32p.
- Wong (2012), Reducing Urban Heat Island; Compendium of Strategies – Cool pavements, Urban Heat Island Basics, U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs,40p.
- Wong (2008), Reducing Urban Heat Island; Compendium of Strategies – Green roofs, Urban Heat Island Basics, U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs,29p.

Sources sitographiques

- 1 Gouëset C (2010). 30 ans de prise de conscience de l'urgence climatique.
URL : http://www.lexpress.fr/actualite/environnement/30-ans-de-prise-de-conscience-de-l-urgence-climatique_829497.html (consulté le 13/08/2012)
- 2 Hansen J et Al. (2010). GISS Surface Temperature Analysis .
URL : <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/2010november/> (consulté le 10/08/2012)
- 3 La Banque Mondiale (2012). Population urbaine (% du total).
URL : <http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.URB.TOTL.IN.ZS/countries/1W?display=graph> (consulté le 10/08/2012)
- 4 Emmanuelle Cadot et Alfred Spira (2008). Canicule et surmortalité à Paris en août 2003, le poids des facteurs socio-économiques.
URL : <http://eps.revues.org/index1383.html> (consulté le 02 septembre 2012).
- 5 Encyclopédie Larousse. Article Larousse « chaleur ».
URL : <http://www.larousse.fr/encyclopedie/nom-commun-nom/chaleur/32550> (consulté le 13/08/2012)
- 6 Techno-science. Chaleur
URL : <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=1312> (consulté le 22/08/2012)
- 7 Schwartzentruber J (2011). Thermodynamique, échanges de chaleur.
URL : http://nte.mines-albi.fr/Thermo/co/uc_Chaleur.html(consulté le 06/08/2012)
- 8 Robichon A (2009). Transferts thermiques; loi de Fourier[PDF]., Cours de MP/MP*
URL : <http://alainrobichon.free.fr/cours.html>(consulté le 06/08/2012)
- 9 Le Frious F (2010). Les propriétés thermiques des matériaux et les références météorologiques [PDF]. URL : <http://www.metrologie-francaise.fr/fr/dossiers/proprietes-thermiques-materiaux.pdf> (consulté le 09/08/2012)
- 10 MétéoFrance (2004), Glossaire : albédo
URL : http://comprendre.meteofrance.com/pedagogique/pour_tous/glossaire/a/a_detail?page_id=2820&document_id=744&portlet_id=67697 (consulté le 09/08/2012)
- 11 Auteur inconnu (2011), L'atmosphère
URL : <http://la.climatologie.free.fr/atmosphere/atmosphere.htm> (consulté le 15/08/2012)
- 12 CNRS (2011), Le climat de la Terre.
URL : http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/contenu/alternative/alter2_textes.html (consulté le 09/08/2012)
- 13 Calathéa S (2005), Effet de serre et CO2 [PDF].
URL : <http://www.cea.fr/content/download/3091/14647/file/> (consulté le 09/08/2012)

- 14 Ngô, Edmonium C (2010), *Température moyenne et bilan radiatif de la Terre : simplification abusives ?*[PDF]
URL : www.edmonium.fr/page108.php (consulté le 12/08/2012)
- 15 Voogt J (2007) *How Researchers Measure Urban Heat Islands* [PDF]
URL : http://nlquery.epa.gov/epasearch/epasearch?querytext=how+researchers+mesure+urban&typeofsearch=epa&sort=term_relevancy&results_per_page=10&doctype=all&originalquerytext=how+researchers&areaname=&faq=yes&filterclause=&sessionid=99F49B960FC C3B7A2F551F89D6A1BDCB&referer=http%3A%2F%2Fwww.epa.gov%2Fsearch.html&prevtype=epa&result_template=epafiles_default.xml&areasidebar=search_sidebar&areapagehead=epafiles_pagehead&areapagefoot=epafiles_pagefoot&stylesheet=&po (consulté le 11/08/2012)
- 16 Environnement Canada (2012), *Le SMOG*,
URL : <http://www.ec.gc.ca/air/default.asp?lang=Fr&n=13D0EDAA-1> (consulté le 04/09/2012)
- 17 *Développement Durable, Environnement et Parc du Québec (2012), La gestion de l'eau au Québec, document de consultation publique*
URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/consultation/themes3.htm> (consulté le 22/08/2012)
- 18 *Verdura (2012), Consommation de l'eau*,
URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/consultation/themes3.htm> (consulté le 22/08/2012)
- 19 Guthrie J, (2011), *Des toits verts efficaces... et attendus à Montréal*,
URL : <http://journalmetro.com/actualites/montreal/35273/des-toits-verts-efficaces-et-attendus-a-montreal/> (consulté le 24/08/2012)
- 20 Tranchemontagne D, (2011), *Un bassin qui retient ... l'attention!*
URL : <http://www.progresstleonard.com/Societe/Environnement/2011-04-15/article-2429945/Un-bassin-qui-retient-%26hellip%3B-l%26rsquo%3Battention!/1> (consulté le 14/09/2012)
- 21 GUIDEnR, (date inconnue), *Techniques alternatives de dépollution des eaux pluviales > Tranchées drainantes*, URL : <http://www.hqe.guidenr.fr/cible-5-hqe/depollution-eaux-pluviales-tranche-drainante.php> (consulté le 15/09/2012)
- 22 GUIDEnR, (date inconnue), *Techniques alternatives de dépollution des eaux pluviales > Chaussées à structure réservoir*, URL : <http://www.hqe.guidenr.fr/cible-5-hqe/depollution-eaux-pluviales-chaussees-structure-reservoir.php> (consulté le 15/09/2012)
- 23 Ganeeva France, (2011), *Le Bois Massif, Qualité Confort Écologie, Isolation d'exception Architecture et simplicité Durable*, URL : <http://ganeeva.fr/thermique.htm> (consulté le 18/09/2012)
- 24 Wikipédia, (2007), *Liste d'inventions françaises*,
URL : http://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_d%27inventions_fran%3%A7aises (consulté le 21/09/2012)

- 25 *Vögele Info, (2012), Portion d'essai de béton drainant à Düren :la route qui absorbe les bruits, URL : <http://www.voegele.info/roadnews/roadnewsF01/draehbeton.htm> (consulté le 23/09/2012)*

ANNEXES

ANNEXE I : Propriétés physiques des matériaux de construction d'usage courant (COCON, logiciel de COMparaison de solutions CONstructives, de CONfort et d'émissions de CO2)

matériau	densité (kg/m ³)	conductivité thermique λ (W/m.K)	chaleur spécifique (J/kg.K)	résistance diffusion vapeur d'eau μ mu (-)	énergie grise d'origine non renouvelable (kWh/m ³)	impact environnemental/ changement climatique (kg eq CO ₂ /m ³)
Bloc béton (Parpaing de ciment)	1185	0.952	1080	10	219	80
Bloc béton rectifié pose joint mince 20cm	1185	0.650	1080	10	219	80
Brique standard 20 cm	650	0.390	1008	13	670	144
Brique joint mince de type B	650	0.270	1008	13	469	132
Brique joint mince de type A	650	0.200	1008	13	469	132
Brique joint mince R=1.32 (optibric PV 4G)	687	0.152	1008	13	469	132
Monomur de terre cuite 37cm	740	0.120	1008	13	521	115
Bloc béton pierre ponce rectifié type Tarmabloc Vtherm 25cm	600	0.156	1000	15	223	99
Bloc pierre ponce type Cogetherm 30cm	700	0.146	1000	15	223	99
Bloc pierre ponce type Cogetherm 35cm	700	0.146	1000	15	223	99

matériau	densité (kg/m ³)	conductivité thermique λ (W/m.K)	chaleur spécifique (J/kg.K)	résistance diffusion vapeur d'eau μ mu (-)	énergie grise d'origine non renouvelable (kWh/m ³)	impact environnemental/ changement climatique (kg eq CO ₂ /m ³)
Béton cellulaire 350kg/m ³	350	0.090	864	3	500	175
Béton cellulaire 400kg/m ³	400	0.100	864	3	500	175
Mur béton armé	2150	1.650	1008	105	807	307
Béton caverneux	1700	1.150	1000	80	638	243
Briques pleines (cuites)	1850	1.000	1000	10	1306	280
Pisé (1900 kg / m ³)	1900	1.050	1008	10	110	33
Adobe ou torchis dense (1600 kg/m ³)	1600	0.650	1008	10	110	33
Bois léger brut, séché à l'air (sapin, épicéa)	540	0.140	2400	35	332	-388
Bois léger, raboté, étuvé (sapin, épicéa)	500	0.140	2400	35	610	-388
Bois lourd (hêtre, chêne)	800	0.200	2700	35	560	-388

matériau	densité (kg/m ³)	conductivité thermique λ (W/m.K)	chaleur spécifique (J/kg.K)	résistance diffusion vapeur d'eau μ mu (-)	énergie grise d'origine non renouvelable (kWh/m ³)	impact environnemental/ changement climatique (kg eq CO ₂ /m ³)
Panneau de bois contre-collé ou lamellé-collé	540	0.140	2400	35	1446	-284
Laine de roche 20kg/m ³ (rouleaux)	20	0.050	1030	1	180	44
Laine de roche 70kg/m ³	70	0.042	1030	1	630	154
Laine de roche 110kg/m ³	113	0.044	1030	1	1013	248
Laine de roche 140kg/m ³	138	0.046	1030	1	1238	303

Laine de roche 160kg/m3	163	0.047	1030	1	1463	358
Laine de verre 18kg/m3 (rouleaux)	18	0.044	1030	1	210	26
Laine de verre 35kg/m3	35	0.039	1030	1	420	53
Laine de verre 60kg/m3	60	0.038	1030	1	720	90
Laine de verre 100kg/m3	100	0.039	1030	1	1200	150
matériau	densité (kg/m ³)	conductivité thermique λ (W/m.K)	chaleur spécifique (J/kg.K)	résistance diffusion vapeur d'eau μ mu (-)	énergie grise d'origine non renouvelable (kWh/m ³)	impact environnemental/ changement climatique (kg eq CO ₂ /m ³)
Laine de roche en vrac	35	0.065	1030	1	315	77
Polystyrène expansé	18	0.039	1450	60	486	67
Polystyrène extrudé (Plaques expansées aux HCFC)	34	0.035	1450	150	918	126
Mousse de polyuréthane 30kg/m3 (plaques moulées)	34	0.029	1450	150	905	131
Verre cellulaire 160kg/m3 (plaques)	120	0.042	3000	1500000	1174	156
Béton cellulaire Multipor	115	0.040	864	3	447	150
Panneaux laine de bois > 200 kg / m3	275	0.100	1700	5	19	-503
Panneaux laine de bois > 150 kg / m3	175	0.070	1700	5	12	-320
Panneaux laine de bois > 130 kg / m3	140	0.042	1700	5	10	-256
Laine de chanvre, lin, coton	40	0.060	1600	1	336	72
matériau	densité (kg/m ³)	conductivité thermique λ (W/m.K)	chaleur spécifique (J/kg.K)	résistance diffusion vapeur d'eau μ mu (-)	énergie grise d'origine non renouvelable (kWh/m ³)	impact environnemental/ changement climatique (kg eq CO ₂ /m ³)
Laine de mouton et autres fibres animales	35	0.060	1600	1	252	54
Plumes de Canard	30	0.040	1560	3	268	50
Liège expansé conforme norme NF EN 13170	125	0.049	1560	1	85	-229
Paille (bottes à plat)	83	0.080	1332	1	1	-165
Paille (bottes sur chant)	83	0.052	1332	1	1	-165
Ouate de cellulose soufflée	23	0.042	1900	1	50	9
Ouate de cellulose injectée	45	0.042	1900	1	98	17
Ouate de cellulose (panneaux)	70	0.042	1900	3	152	27
Perlite en vrac	100	0.060	900	2	472	100
Panneau Perlite Expansée EPB non revêtu	154	0.050	900	20	1214	217
matériau	densité (kg/m ³)	conductivité thermique λ (W/m.K)	chaleur spécifique (J/kg.K)	résistance diffusion vapeur d'eau μ mu (-)	énergie grise d'origine non renouvelable (kWh/m ³)	impact environnemental/ changement climatique (kg eq CO ₂ /m ³)
Plaque plâtre BA13	825	0.250	1008	7	1100	200
Fermacell	1125	0.360	1265	11	1669	412
Carreau de plâtre	957	0.320	1000	7	1290	234
Panneau d'aggloméré type OSB	620	0.130	1584	40	2066	-473

Panneau de particules agglomérées	670	0.120	1584	33	1900	-540
Panneau MDF 1	528	0.100	1584	16	3100	-480
Enduit de chaux	1550	0.700	864	7	1014	437
Enduit de ciment	1900	0.800	864	25	1243	536
Enduit terre et Pisé	2000	1.200	1008	10	110	33
Enduit plâtre courant intérieur	1150	0.570	1008	8	393	86
matériau	densité (kg/m ³)	conductivité thermique λ (W/m.K)	chaleur spécifique (J/kg.K)	résistance diffusion vapeur d'eau μ mu (-)	énergie grise d'origine non renouvelable (kWh/m ³)	impact environnemental/ changement climatique (kg eq CO ₂ /m ³)
Béton de chaux-chanvre 250kg/m3 (toiture)	250	0.060	580	6	218	-70
Béton de chaux-chanvre 450 kg/m3 (mur, sol)	450	0.100	580	8	392	-126
Béton terre-paille 300kg/m3	300	0.170	1300	1	7	-165
Béton terre-paille 600kg/m3	600	0.170	1300	3	19	-133
Pierre ferme et demi ferme	1895	1.400	1000	45	0	4
Pierre très tendre	1590	0.850	1000	25	0	4
Meulières	2200	1.800	1000	45	0	4
Ponces naturelles	400	0.120	1000	7	0	4
Granites	2600	2.800	1000	10000	0	4
Shistes, ardoises	2400	2.200	1000	900	0	4
matériau	densité (kg/m ³)	conductivité thermique λ (W/m.K)	chaleur spécifique (J/kg.K)	résistance diffusion vapeur d'eau μ mu (-)	énergie grise d'origine non renouvelable (kWh/m ³)	impact environnemental/ changement climatique (kg eq CO ₂ /m ³)
Briquettes de parement	1850	0.833	1000	10	1306	280
Lame d'air ventilé	1	0.192	1000	1	0	0
Lame d'air 5 mm	1	0.047	1000	1	0	0
Lame d'air 10 mm	1	0.071	1000	1	0	0
Lame d'air 20 mm	1	0.130	1000	1	0	0
Lame d'air 25 mm	1	0.155	1000	1	0	0
Lame d'air 30 mm	1	0.180	1000	1	0	0
Lame d'air 40 mm	1	0.230	1000	1	0	0
Lame d'air 50 mm	1	0.280	1000	1	0	0
Pare-Vapeur (Sd=1500m)	130	2.300	2300	1500000	0	0

ANNEXE II : Détermination de l'évapotranspiration (d'après le cours de Andréa Rinaldo de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne)

La détermination de l' ET_0 peut être faite : soit directement à l'aide des lysimètres; soit à l'aide de formules empiriques et théoriques.

La plupart des formules empiriques sont développées pour étudier l'évapotranspiration de cultures données dans le cadre de la réflexion de systèmes d'irrigation. Elles sont difficilement généralisable surtout lorsque le climat diffère. De plus elles ne prennent pas en compte des données telles que le vent qui a une grande importance dans les phénomènes évaporatifs.

La formule de Turc

Cette formule offre l'avantage de s'appliquer aux régions tempérées, cependant elle ne s'applique que sur des durées longues et n'est pas forcément adaptées à l'étude de quelques journées de très haute chaleur.

$$ET_0 = 0,4 \cdot (R_G + 50) \cdot \frac{t}{t + 15} \quad (\text{pas de temps mensuel})$$

$$ET_0 = 0,13 \cdot (R_G + 50) \cdot \frac{t}{t + 15} \quad (\text{pas de temps décadaire})$$

Avec :

t : température moyenne de la période considérée t en [°C],
ET₀ : évapotranspiration de référence mensuelle ou décadaire [mm],
RG : rayonnement global mensuel ou décadaire [cal/cm²/jour].

L'équation de Penman

Il s'agit cette fois ci d'une formule construite sur des bases physiques et non empiriques

$$ET_0 = \frac{R_n \cdot \Delta + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \bar{e}}{r_a}}{\lambda(\Delta + \gamma)}$$

Où :

ET₀ : évapotranspiration de référence calculée par la relation de Penman [mm/s],
R_n : rayonnement net [W/m²],
Δ : pente de la courbe de pression de vapeur à la température moyenne de l'air [kPa/C°],
ρ : densité de l'air à pression constante [kg/m³],
c_p : capacité thermique de l'air humide [J/kg/C°],

- δe : différence entre la pression de vapeur saturante e_s [kPa] et la pression de vapeur effective dans l'air e_a [kPa] ($\delta e = e_s - e_a$),
- r_a : résistance aérodynamique [s/m] (descripteur météorologique traduisant le rôle des turbulences atmosphériques dans le processus d'évaporation),
- λ : chaleur latente de vaporisation de l'eau [J/kg],
- γ : constante psychrométrique [kPa/C°].

Une fois ces valeurs précisées, on peut déterminer la résistance aérodynamique, la pression de vapeur saturante e_s , la pression de vapeur effective dans l'air e_a (en kPa et avec la température en degrés Celsius) etc. On a :

$$e_s = 0.611 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right)$$

Avec : T , température de l'air [C°].

On obtient encore la relation suivante :

$$e_a = e_s \cdot \frac{R_h}{100}$$

où R_h est l'humidité relative de l'air [%].

Et finalement :

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237.3)^2} \text{ avec } \Delta_{\text{en}} \text{ [kPa/C}^2\text{]}$$

L'introduction de la notion de résistance de surface (r_s) dans l'équation de Penman conduit à la formulation de **l'équation de Penman-Monteith** :

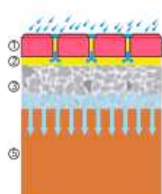
$$ET_0 = \frac{R_n \cdot \Delta + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \delta e}{r_a}}{\lambda \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]}$$

En conséquence, on retiendra ici qu'il est possible d'estimer l'évaporation ainsi que l'évapotranspiration de référence par le biais de formulations plus ou moins complexes qui requièrent toutes la connaissance d'un certain nombre de paramètres climatiques. C'est, en définitive, la disponibilité en données météorologiques qui conditionnera le choix d'une formulation au détriment d'une autre ainsi que ses possibilités d'application pour la région d'étude concernée.

ANNEXE III : Comment l'eau est-elle évacuée dans le sol? (d'après le Centre de recherches routières - Annexe au Bulletin CRR n° 77 - 2008).

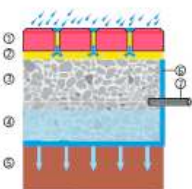
L'eau est de préférence infiltrée dans le sol. Si la perméabilité du sol n'est pas suffisamment grande, il convient de prévoir un système de drainage supplémentaire. Celui-ci doit garantir une évacuation différée de telle sorte que le stockage s'effectue toujours dans la sous-fondation, ce qui évite ainsi toute surcharge en aval.

Quatre cas différents peuvent se présenter selon la perméabilité du sol:



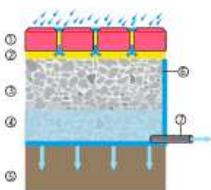
Cas 1 : sol très perméable

Toute l'eau s'infiltré directement dans le sol. Une sous-fondation n'est pas nécessaire, ni un drainage supplémentaire.



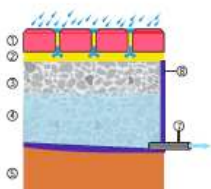
Cas 2 : sol bien perméable

L'eau s'infiltré en grande partie après le stockage dans la sous-fondation. Une évacuation est réalisée entre la fondation et la sous-fondation afin d'éviter toute stagnation prolongée dans la fondation.



Cas 3 : sol modérément voire peu perméable

L'eau s'infiltré seulement de manière très limitée dans le sol. L'eau résiduelle est stockée dans la sous-fondation et évacuée via un dispositif de drainage. Celui-ci passe par un réducteur de débit, ce qui permet une évacuation différée vers les fossés, les dispositifs d'infiltration ou les caniveaux situés à proximité. La structure perméable sert surtout de dispositif de stockage.



Cas 4 : aucune infiltration possible

Une membrane imperméable est placée sur le fond du coffre et autour de la structure. L'évacuation différée s'effectue sous la structure. Une pente minimale de 2,5 % est prévue sous la structure afin que toute l'eau puisse être évacuée. Le stockage de l'eau s'effectue toujours dans la sous-fondation.

1. Pavés drainants
2. Couche de pose
3. Fondation
4. Sous-fondation
5. Sol
6. Géotextile non tissé
7. Tuyau d'évacuation avec réducteur de débit
8. Membrane perméable

ANNEXE IV : Prospectus édité par Ville Montréal pour la sensibilisation du grand public à la gestion durable des eaux pluviales.

L'impact de ces changements climatiques en milieu urbain

Les pluies intenses sont de plus en plus fréquentes. Ces averses envoient de grandes quantités d'eau en un temps record dans le réseau, ce qui peut occasionner un refoulement d'égout.

Solution :
SI VOUS AVEZ UN TOIT EN PENTE, DÉBRANCHEZ VOS GOUTTIÈRES DU RÉSEAU D'ÉGOUT !

Cette action vous permet de :

- de protéger les fondations de votre domicile
- de réacheminier l'eau de pluie pour préserver vos aménagements paysagers

Saviez-vous que...

En vertu du Règlement 2008-47 sur l'assainissement des eaux de la Communauté métropolitaine de Montréal

« Lorsque les eaux de drainage de toits sont captées par un système de gouttière, ces eaux doivent être dirigées sur la surface du sol à au moins 1,5 mètre d'un bâtiment, en évitant l'infiltration vers tout drain de fondation. »

Vous voulez de l'information pour choisir les techniques et les équipements les mieux adaptés à votre environnement ?

Communiquez avec votre éco-quartier ou un organisme environnemental de votre secteur. On y sera en mesure de vous conseiller ou de vous référer à une ressource spécialisée.


Pour en savoir plus, consultez notre site Internet à :

ville.montreal.qc.ca/eaudemontreal

Les suggestions énoncées dans ce dépliant sont d'ordre général et peuvent ne pas convenir à tous les immeubles. Chaque immeuble ayant ses spécificités propres, un professionnel devrait être consulté afin de s'assurer que l'une ou l'autre des méthodes suggérées est appropriée.

English version available upon request.

Photo : Ville de Montréal, 144-9933 (24-7)



RÉCUPÉRER L'EAU DE PLUIE

Montréal

Dans un contexte de changements climatiques

Année après année, le climat montréalais se transforme. Les étés ont tendance à devenir plus longs, les canicules plus fréquentes et les périodes de sécheresse se multiplient. Cela contribue à accentuer des problèmes déjà existants, dont :

- la perte de végétaux et le déprissement d'aménagements paysagers
- l'assèchement des sols
- le lézardement des fondations en terrain argileux.

Nombre de journées de 30 °C et plus à Montréal		
Moyenne de 1991-2010	Année 2010	Prévision 2010-2040
10 jours	12 jours	46 jours

Source : Environnement Canada, 2011

Et pourtant...

Lors d'événements de pluie intense, on prévoit que la quantité de pluie augmentera de 15 %, d'ici le milieu du siècle.

Récupérer les eaux de pluie...



pour protéger les fondations de votre bâtiment

Près de 50 % des immeubles montréalais sont construits en sol argileux. L'argile de Champlain se contracte lorsqu'il s'assèche. Les tensions qui s'exercent alors sur les fondations peuvent se traduire par des fissures dans le bâtiment. Le coût moyen d'une réparation est de 17 000 \$.

Ce phénomène pourrait se répéter périodiquement avec la tendance au réchauffement. Jouez la carte de la prévention, utilisez les eaux de pluie pour conserver l'humidité des sols!

Défecteur, langue de chat, puits percolant, tranchée de drainage... Il y a plusieurs façons d'amener l'eau du toit à infiltrer le sol. Assurez-vous seulement de porter l'eau à une distance d'au moins 1,5 mètre de vos fondations sans nuire à vos voisins.



pour préserver vos aménagements paysagers

Une gouttière équipée d'un dispositif simple et peu coûteux qui oriente l'eau de pluie vers la pelouse, le potager, les aménagements paysagers ou les arbres permet d'hydrater le sol et de mieux préserver la végétation en période de sécheresse.





pour disposer d'une réserve d'eau de qualité

Emmagasiner de l'eau de pluie dans des réservoirs permet de se constituer une réserve d'eau non chlorée, idéale pour l'arrosage du jardin et des plantes, en plus d'économiser l'eau potable.

Placez votre baril à une certaine hauteur pour profiter de l'effet de gravité au moment de l'arrosage. Des équipements « prêts à installer » sont disponibles en quincaillerie.

Une fois que votre baril a atteint sa capacité maximale, assurez-vous que le surplus d'eau soit dirigé vers une surface perméable.

Comment faire plus ? Aménagez un jardin de pluie...

Si votre terrain s'y prête, envisagez l'aménagement d'un jardin de pluie. Installez-y des plantes qui aiment avoir « les pieds dans l'eau ».



Prévenez les coups de chaleur : VERDISSEZ !

En été, l'ombrage des plantes évite d'accumuler la chaleur dans les murs. L'hiver, la chute des feuilles permet d'emmagasiner celle du soleil.

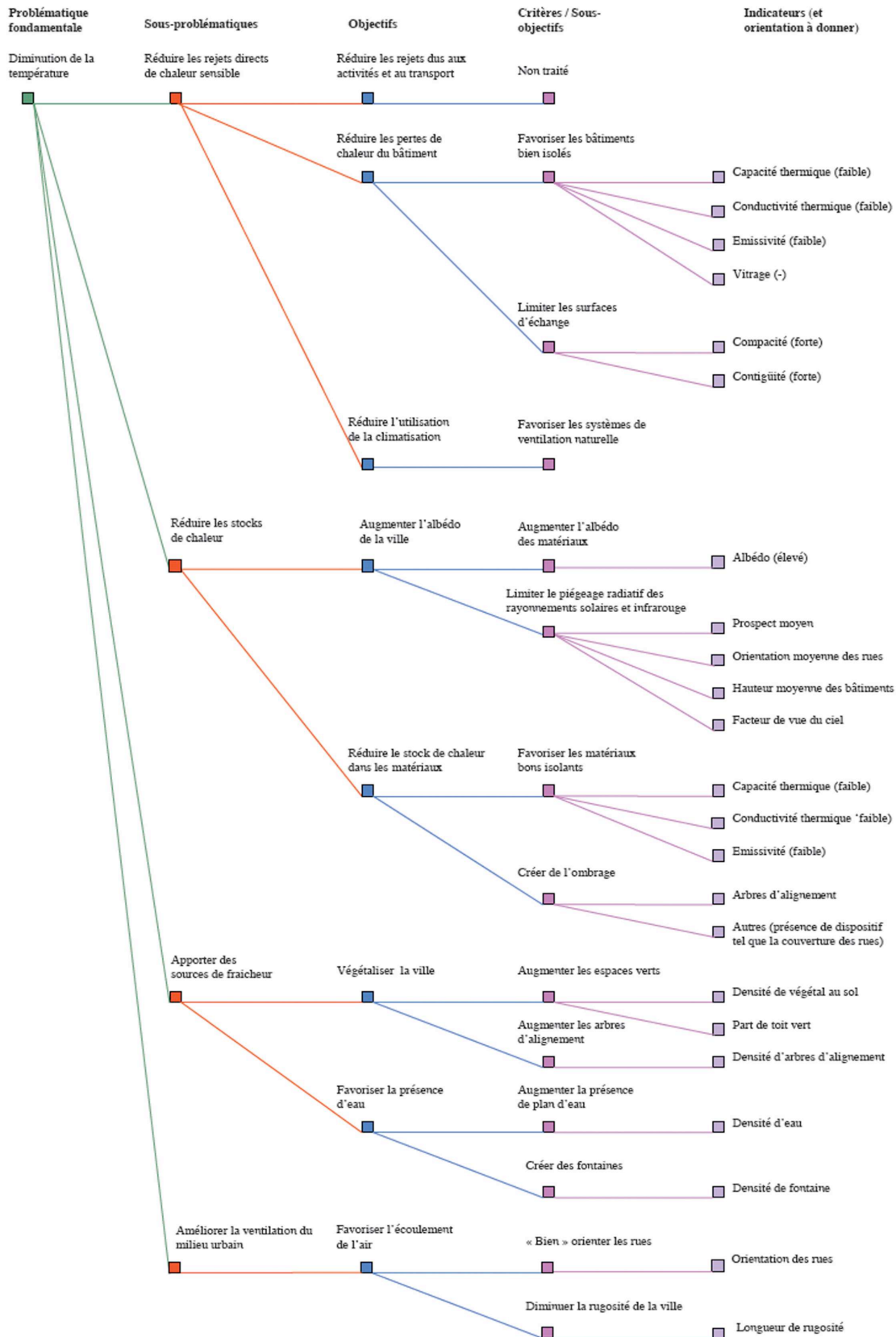
Les plantes contribuent aussi à l'épuration et au rafraîchissement de l'air.


L'aménagement d'un mur végétal peut se faire directement sur le revêtement ou en faisant pousser des plantes grimpantes sur un support de treillis à quelques pouces du mur.

Des plantes grimpantes sur les murs sud et nord d'une maison conventionnelle peuvent réduire jusqu'à 25% les frais de climatisation (Labrecque et Verginche, 2007).

ANNEXE V : Arborescence des critères de définition et des mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains.

Ce graphique en arborescence proposé par Colombert d'après les travaux de Adolphe et Al. (2002) présente les différents domaines d'action, les leviers d'action ainsi que leurs critères d'évaluation.



	Diplôme : Diplôme d'ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage Spécialité : Paysage Spécialisation / option : MOI Enseignant référent : Nathalie CARCAUD
Auteur(s) : Florent RULLIER Date de naissance* : 30/08/1988 Nb pages : 68 Annexe(s) :6 Année de soutenance : 2012	Organisme d'accueil : VERSION PAYSAGE Adresse : 5315 Boulevard Saint Laurent, suite 108, Montréal, Qc, H2T 1S5 Maître de stage : Jean Jacques BINOUX
Titre français : La place du paysagiste en ville dans un contexte de réchauffement climatique global La question des îlots de chaleur urbains, application à Montréal Titre anglais : Urban landscape architects place in a global enwarming context Urban heat ilands topic, practical application in Montreal city	
Résumé : Le présent document a pour but de mettre en évidence la problématique souvent méconnue des îlots de chaleur urbains. Il s'agit de l'apparition de zones plus chaudes en ville que dans les espaces ruraux avoisinants. Ce travail théorique s'appuie sur des réalisations ainsi que sur des observations réalisées à Montréal (Canada). Une première partie permet de placer les bases théoriques des échanges thermiques, des mécanismes d'échauffement terrestre avant de définir le concept d'îlot de chaleur urbain. Par la suite sont développées les origines de l'apparition de ces îlots de chaleur. Ils résultent toutes de l'action de l'Homme sur son environnement mais elles sont de nature différentes. Il s'agit principalement de facteurs de surfaces, qui concernent la nature des matériaux ainsi que la morphologie des villes, de la perte du couvert forestier dont l'effet sur la régulation de la température urbaine est particulièrement important, et de facteurs directement imputables à l'activités humaine. Enfin la dernière partie de ce travail permet de découvrir un panel d'actions qu'il est possible de prendre en considération ou de mettre en œuvre pour un paysagiste dans une optique de lutte contre les îlots de chaleur. Les mesures présentées se développent sur trois plans : les mesures de végétalisation, les mesures de gestion de l'eau et le choix de matériaux à faible impact thermique.	
Abstract : The present document aims at highlighting the problem often underestimated of urban heat islands. It is about the appearance of warmer zones in urban areas than in the neighbouring rural spaces. This theoretical work leans on realizations as well as on observations based on the city of Montreal (Canada). A first part allows to place the theoretical bases of the thermal exchanges, the mechanisms of ground heating before defining the concept of urban heat ilands. Afterward, the origins of the appearance of these heat ilands will be developed. All of them results of Men's actions on their environment, but they are of different natures. It is mainly about surface factors, which concern the type of materials as well as the morphology of cities, the loss of the forest cover who affects particularly the city enwarming mitigation, and of factors directly attributable to human. Finally the last part of this work allows to discover a panel of actions which can be considered or be implemented by a landscape architect in an optic of heat island mitigation. The different control measures are developed on three plans: the revegetation measures, water management measures and the choice of materials which have a low thermal impact.	
Mots-clés : Montréal, Canada, îlots de chaleurs urbains, albédo, thermique, végétalisation, verdissement Key Words: Montreal, Canada, Urban Heat Ilands, Albédo, reflectance, thermal, greening	