

**REPUBLIQUE ALGERIENNE POPULAIRE ET DEMOCRATIQUE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE D'ORAN 2 MOHAMED BEN AHMED**

Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de master

En

Changement climatique et adaptation

Présenté par :Mme HADJEB née TRABELSI Ilham

Thème

**Approche méthodologique utilisant l'outil géomatique pour l'identification et la caractérisation des ilots de chaleur urbains dans un contexte de changement climatique - application à la ville d'Oran -**

Sous la direction de Mr TRACHE Abdelhak

Jury d'examen :

Président.....Mr CHAACHOUA Moustapha

Examineur.....Mr SOUIAH Sid Ahmed

Rapporteur.....Mr KOUTI Aziz

---

*Approche méthodologique utilisant l'outil géomatique  
pour l'identification et la caractérisation  
des îlots de chaleur urbains dans un contexte de  
changement climatique*

- TRABELSI Ilham-

---

*"Si nous n'arrivons pas à faire passer notre message aux parents et  
aux dirigeants d'aujourd'hui, nous risquons fort de miner le droit  
fondamental de nos enfants à vivre dans un environnement  
enrichissant et vivifiant<sup>1</sup> "*

---

<sup>1</sup> Gro Harlem Brundtland, avant-propos de la présidente au rapport des Nations unies, Notre avenir à tous, 1987.

## Remerciements

Je remercie avant tout mon DIEU tout puissant qui m'a comblé de ses bienfaits et m'a donné assez de force pour achever ce travail et de venir à bout de cette formation.

Pour commencer, je veux adresser mes remerciements à mon directeur de mémoire, **Mr TRACH Abdelhak**, pour sa grande disponibilité et ses encouragements tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Mes remerciements vont également à **Mr SAIDI**, pour la gentillesse et la patience qu'il a manifestées à mon égard durant ce travail, pour tous les conseils et les données qu'il a bien voulu partager avec moi ;

Je remercie **Mr DJILALI** mon enseignant depuis toujours de télédétection, pour m'avoir accueilli et donner données et méthodes pour la réalisation de ce mémoire, et pour les conseils stimulants que j'ai eu l'honneur de recevoir de sa part.

Je ne sais comment exprimer ma gratitude à ces personnes autrement qu'en leur promettant d'agir comme eux avec des étudiants dans ma situation, si un jour l'occasion m'en est donnée.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à mon professeur **Mr HASSINI** chargé du master climadapt, pour avoir accepté que je fasse partie de cette formation ainsi que ses précieuses orientations.

Je remercie chaleureusement **Mr KOUTI** chef du département des Sciences de la Terre et de l'Univers pour sa présence, sachant répondre à toutes mes interrogations ; sans oublier sa participation au cheminement de cette formation.

Je remercie tous ceux sans qui ce mémoire ne serait pas ce qu'il est : aussi bien par les discussions que j'ai eu la chance d'avoir avec eux, leurs suggestions ou contributions.

Je remercie **Mr SAHABI** qui a également contribué par ses nombreuses remarques et suggestions à améliorer la qualité de ce mémoire, et je lui en suis très reconnaissant.

Finalement, entrons dans ma petite bulle familiale :

Merci à mes trois petites roses pour leur patience... Merci à mon mari, pour sa compréhension, ses encouragements et toute son aide afin de me laisser consacrer un maximum de temps à ce mémoire. Merci d'être là, à mes côtés...

Merci également à mes frères et mes sœurs pour leurs encouragements.

Je ne peux clôturer cette page sans dire que je pense vous plus que jamais... Je vous dédie ce travail, papa, maman.

# Table des matières

## Partie théorique

<b>Introduction</b> .....	1
<b><u>CHAPITRE 1:</u> La microclimatologie urbaine</b>	
1. Villes et changements climatiques.....	6
2. Le chauffage naturel de la Terre .....	7
3. Les transferts de chaleur en ville .....	7
3.1. Par rayonnement.....	7
3.2. Par convection et conduction .....	8
4. Le vent en ville.....	9
5. Les types de rayonnement.....	9
5.1. Le rayonnement solaire .....	9
5.1.1.Le rayonnement solaire direct .....	10
5.1.2.Le rayonnement solaire diffusé .....	10
5.1.3.Le rayonnement solaire réfléchi.....	11
5.1.4.Le rayonnement du ciel.....	11
5.2. Le rayonnement thermique.....	11
6. Les effets aérodynamiques en milieu urbain .....	12
6.1. Les couches atmosphériques près de la surface du sol .....	12
6.1.1.La canopée urbaine .....	12
6.1.2.La couche limite atmosphérique et la couche limite urbaine .....	13
7. Les échelles de climatologie .....	14
7.1. Description de l'écoulement autour de bâtiment .....	16
7.2. Description de l'écoulement dans une rue .....	16
7.3. Les effets aérauliques en milieu urbain .....	18
7.3.1.Effet Wise .....	18
7.3.2.Effet de coin .....	18
7.3.3.Effet de barre .....	18
7.3.4.Effet de canalisation .....	18
7.3.5.Effet Venturi .....	19
8. La notion du confort thermique dans les espaces extérieurs.....	20
9. Les études sur la micro climatologie urbaine et le confort thermique .....	22
9.1. Canyon urbain.....	23
9.2. Forme urbaine .....	23

9.3. Morphologie des villes .....	26
-----------------------------------	----

## **CHAPITRE 2: L'îlot de chaleur urbain**

1. La relation entre les îlots de chaleur et le changement climatique.....	27
2. Définition de l'îlot de chaleur urbain .....	27
3. Types des îlots de chaleur urbains .....	30
3.1. Les îlots de chaleur de surface .....	30
3.2. Les îlots de chaleur de la canopée urbaine.....	30
3.3. Les îlots de chaleur de la couche limite urbaine .....	31
4. Les facteurs intervenant dans le phénomène .....	32
4.1. Processus mis en œuvre dans la rétention de la chaleur par le tissu urbain .....	33
4.1.1. Rôle des propriétés radiatives et thermiques des matériaux.....	33
4.1.2. Rôle de la géométrie des canyons urbains .....	35
4.1.3. Rôle de l'exposition des surfaces au rayonnement solaire .....	36
4.1.3.1. Exposition du relief au rayonnement solaire .....	37
4.1.3.2. Exposition des canyons urbains au rayonnement solaire .....	37
4.1.3.3. Ombrage .....	38
4.1.4. Pollution atmosphérique .....	38
4.2. Perturbations de la dynamique des masses d'air .....	39
4.2.1. Rôle de la topographie .....	40
4.2.2. Rôle de la géométrie des canyons urbains .....	40
4.2.3. Rôle de la rugosité du tissu urbain.....	42
4.3. Réduction de l'évapotranspiration .....	43
4.3.1. Rôle de l'imperméabilité des surfaces .....	43
4.3.2. Rôle de l'eau .....	44
4.3.3. Rôle de la végétation .....	44
4.4. Émission de chaleur par les activités anthropiques .....	45
4.4.1. Rôle des bâtiments .....	46
4.4.2. Rôle des transports.....	47
4.4.3. Métabolisme humain.....	48
5. Méthodes employées dans l'identification des ICU .....	48
5.1. Mesures in situ.....	48
5.1.1. Description de la méthode .....	49
5.2. La Télédétection et son apport à l'ICU .....	51
5.2.1. La température de l'air et du sol .....	52
5.2.2. La distance par rapport à l'eau .....	53
5.2.3. L'indice d'imperméabilité des surfaces (IS) .....	53
5.2.4. L'indice de végétation normalisé .....	53

5.3. géomatique .....	54
5.4. Modélisation .....	56

**CHAPITRE 3: Les outils géomatiques pour l'identification et la caractérisation des îlots de chaleur urbains**

**La télédétection utilisée comme moyen pour l'analyse des IUC**

1. La Télédétection dans l'infrarouge thermique .....	58
1.1. Le rayonnement solaire .....	60
1.2. Le rayonnement atmosphérique.....	61
1.3. La température.....	61
2. Traitement numérique des données de télédétection.....	62
3. Prétraitement des données satellitaires.....	63
3.1. Corrections géométriques.....	64
3.1.1.Principe de corrections géométriques : corrections par points de contrôle .....	65
3.1.2.le rééchantillonnage de l'image .....	65
3.2. Corrections radiométriques .....	66
3.3. Corrections atmosphériques .....	66
3.3.1.Corrections des effets perturbateurs atmosphériques .....	67
4. L'absorption et la transmission.....	68
5. Les lois physiques .....	69
5.1. Émission du corps noir.....	69
6. Méthodologie : de l'émittance à la température de surface .....	70

**Les SIG pour la caractérisation des IUC**

1. Organisation des données .....	72
2. Analyse spatiale des données.....	72
3. Rôle de la géomatique .....	73
3.1. L'analyse spatio-temporelle.....	74
3.2. Relation spatiale .....	74
3.3. Représentation des données et des résultats.....	75
3.4. Géomatique et télédétection .....	75
4. Structuration des données dans un SIG et analyse spatiale .....	76
4.1. Carte des températures de surface (densité du bâti) et plan d'occupation du sol .....	76
4.2. Carte des températures de surface, densité et forme du bâti.....	76
5. Relations spatiales entre les éléments intervenant aux ICU .....	76

5.1. Relation spatiale : direction des vents/orientation des rues .....	76
5.2. Relation spatiale : végétation/ température/vent .....	78
5.3. Relation spatiale température /imperméabilisation et nature des matériaux des surfaces .....	79

### **Autres outils de mesure des ICU (LIDAR)**

1. Principe du lidar .....	80
----------------------------	----

### **CHAPITRE 4: Adaptation aux îlots de chaleur urbains**

1. Mesures atténuant les effets ICU .....	82
1.1. Mesure d'aménagement .....	82
1.2. Mesure visant la réduction de la pollution atmosphérique et des GES .....	83
2. S'adapter, implanter et aménager .....	84
2.1. Plan d'adaptation .....	85
2.2. Aménagement réducteur d'ICU et potentiel de rendement.....	87
2.2.1.Plantation d'arbres .....	88
2.2.2.Végétalisation des surfaces minérales .....	90
2.2.3.Végétalisation des bâtiments : toits et murs .....	91
2.2.4.Revêtement de surface à albédo élevé .....	92
2.3. Incitatif à l'aménagement.....	94
2.3.1.Gouvernement, villes et municipalités .....	94
2.3.2.Rôle de l'intervention communautaire .....	95
2.3.3.Objectif d'aménagement .....	96
3. Indicateurs potentiels et suivi des mesures.....	96
3.1. Indicateurs directs .....	98
3.1.1.Température et outils de mesure .....	98
3.1.2.Indice de verdissement et mesure de l'évolution de la canopée .....	99
3.2. Indicateurs indirects .....	100
3.2.1.Indice de densité de population et urbanisation .....	100
3.2.2.Indice de santé et sécurité publique.....	101
3.2.3.Indice de qualité de l'air .....	103
4. Suivi des mesures.....	104
5. Efficacité énergétique et green building.....	105
5.1. Le gaspillage.....	106
5.2. Economie d'énergie .....	106
5.3. L'énergie renouvelable.....	106
5.3.1.Le système solaire.....	106
5.3.2.La géothermie.....	107

5.3.3.D'autres sources d'énergies.....	107
--	-----

## **Partie pratique**

### **Approche méthodologique**

1. Démarche méthodologique.....	111
1.1. Hypothèses.....	111
2. Choix des paramètres.....	112
2.1. Paramètres exclus.....	112
2.2. Paramètres sélectionnés.....	113
3. Extraction des indicateurs.....	114
3.1. Albédo.....	114
3.2. Aspect ratio.....	115
3.3. Orientation des rues.....	115
3.4. Surface imperméable.....	115
3.5. Surface en eau.....	116
3.6. Surface végétalisée.....	116
4. Hiérarchisation des paramètres.....	116
5. Pondération des indicateurs.....	117

### **Application**

1. Description de la zone d'étude.....	119
1.1. Situation géographique.....	120
1.2. Géographie administrative : Arrondissements et quartiers.....	120
1.3. Climat.....	121
3. Données utilisées et leurs traitements.....	122
3. Modélisation du relief.....	124
4. Extraction de la hauteur du bâti à l'aide de données LiDAR.....	126
5. Création de la carte de température.....	127
6. Discussion des résultats.....	132
Conclusion.....	142



## Liste des figures

---

### Figures chapitre 1

---

**Figure 1 :** Température des eaux de surface de la mer Méditerranée établie en 2008 .Celle-ci compile les données quotidiennes haute résolution des eaux du bassin méditerranéen combinée avec celles collectées par des satellites

**Figure 1 :** Interactions existant entre les villes et les changements climatiques.

**Figure 2 :** Le chauffage de l'atmosphère et de la surface de la Terre.

**Figure 3 :** Rayonnement solaire et rayonnement infrarouge en ville.

**Figure 5 :** Rayonnement, convection et conduction sur une paroi.

**Figure 6 :** Schéma du phénomène de brise thermique de la campagne vers la ville.

**Figure 7 :** les différents effets provoqués par le passage du rayonnement solaire de l'atmosphère.

**Figure 8 :** Représentation des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso (a), à l'échelle locale(b) et micro (c).

**Figure 9 :** Cycle diurne de la CLA.

**Figure 10 :** Ecoulements autour d'un bâtiment.

**Figure 11 :** Régimes d'écoulements aérauliques dans la rue.

**Figure 12 :** Représentation graphique des effets aérodynamiques dans le milieu urbain.

**Figure 13 :** Circulation de l'air dans un canyon urbain.

**Figure 14 :** Canyon urbain

**Figure 15 :** Variations de la vitesse du vent, selon l'altitude et la nature du sol.

**Figure 16 :** Rayonnement solaire et rayonnement infrarouge en milieux naturel et urbain.

**Figure 17 :** Photographies grand-angle pour mesurer le facteur de vue du ciel.

---

### Figures chapitre 2

---

**Figure 18 :** Profil d'un Ilot de Chaleur Urbain.

**Figure 19 :** Variation type de la température ne milieux urbains et rurales lors de conditions météorologiques calmes (a) et de l'intensité de l'ICU (b).

**Figure 20** : Profil de vent dominant moyen en site homogène et en site urbain.

**Figure 21** : Représentation théorique du dôme de chaleur qui se forme au-dessus d'une ville dans des conditions idéales d'absence de vent

**Figure 22** : Représentation théorique du panache de chaleur qui se forme au niveau de la couche limite urbaine en présence de vent.

**Figure 23** : Bilan des fluctuations de températures de l'air et de surface au cours d'une journée en fonction de la morphologie du territoire.

**Figure 24** : Facteurs naturels et humains contribuant à la formation d'un ICU.

**Figure 25**: Les albédos de la ville.

**Figure 26**: Le canyon urbain. **A** : Paramètres géométriques d'un canyon urbain **B** : Schéma d'un canyon urbain.

**Figure 27** : course du soleil en été et en hiver.

**Figure 28** : Explication du pic de rayonnement global observé le matin (a) et l'après-midi (b) pour un capteur vertical tourné vers l'ESE dans un canyon.

**Figure 29** : Masques et ombres portées.

**Figure 30**: pollution atmosphérique.

**Figure 31**: le flux de vent rencontrant une colline et une dépression.

**Figure 32**: Structure de l'écoulement dans une rue-canyon

**Figure 33** : l'écoulement de l'air et rugosité du tissu urbain.

**Figure 34** : Importance relative de l'infiltration du ruissellement et de l'évapotranspiration selon l'occupation des sols: exemples schématiques pour différents taux d'imperméabilisation.

**Figure 35** : Disponibilité de l'eau en milieu urbain et en milieu rural.

**Figure 36** : Évapotranspiration du végétal.

**Figure 37**: émission des GES par différents secteurs.

**Figure 38** : Perte de chaleur dans une maison.

**Figure 39** : Comparaison des émissions de CO<sub>2</sub> entre les différents modes de transport.

**Figure 40** : La diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance.

**Figure 41**: Principe de la télédétection spatiale .

**Figure 42** : Explication physique du NDVI.

**Figure 43** les principales couches cartographiques utilisées pour déterminer, l'état actuel du territoire urbain.

**Figure 44** : principe du modèle TEB.

---

### Figures chapitre 3

---

**Figure 46** : illustration du système d'observation ; simulation à l'aide de données sources synthétiques ou réelles.

**Figure 47:** illustration de l'absorption, de la diffusion des rayonnements, et de l'émission par l'atmosphère et le paysage

**Figure 48 :** Schéma du trajet parcouru par le rayonnement électromagnétique avant d'être analysé par un capteur. Dans le cas de données satellitaires ou aéroportées, le rayonnement subi deux fois l'interaction avec l'atmosphère

**Figure 49 :** Méthode de travail en télédétection.

**Figure 50 :**Principe de corrections géométriques.

**Figure 51 :** méthodes de rééchantillonnage

**Figure 52 :** Perturbations du rayonnement électromagnétique dans l'atmosphère - Présence de gaz et/ou de poussières pouvant absorber et/ou réfléchir le rayonnement et donc en modifier les propriétés spectrales

**Figure 53:** Effet de l'atmosphère sur la mesure radiométrique

**Figure 54:** Méthode de corrections atmosphériques DOS : Dark Object Substraction

**Figure 55 :** Composition gazeuse de l'atmosphère et fenêtres d'absorption et de transmission.

**Figure 56 :** Fenêtres d'absorption et de transmission et bandes des Landsat 5 TM, 7 ETM+ et Landsat 8 OLI et TIRS.

**Figure 57:**Structure des données

**Figure 58:** les étapes de l'analyse spatiale.

**Figure 60 :** Confort thermique voies Est-Ouest

**Figure 61 :** Confort thermique voies Sud- Nord

**Figure 62 :** Confort thermique sur une voie Est-Ouest de 12m ( $H/L=1$ ).

**Figure 63 :** Réduction de la vitesse des brises thermiques par une plantation d'arbres d'alignements.

**Figure 63 :** Prise de vues et positionnement cinématique.

**Figure 64 :** Principe du lidar atmosphérique.

**Figure 65 :** Traitement des données Lidar.

---

#### Figures chapitre 4

---

**Figure 65 :** Principales étapes dans un cadre d'adaptation au CC adapté de l'anglais .

**Figure 66 :** Exemples de ruelles vertes montréalaises : de champêtre à classique .

**Figure 67 :** Exemple d'un végétal et d'un mur de plantes grimpantes.

**Figure 68** : Photo d'une toiture blanche dans Rosemont.

---

### **Figures chapitre application**

---

**Figure 69** : Hiérarchisation des éléments influent sur l'augmentation des îlots de chaleur.

**Figure 70** : Communes limitrophes d'Oran

**Figure 71** : Les quartiers et arrondissements d'Oran.

**Figure 72** : Les secteurs d'Oran.

**Figure 73** : Diagramme climatique de la ville d'Oran de l'année 2014

**Figure 74** : image satellite *Landsat 7* de la ville d'Oran (06 Novembre 2014) Echelle 1:50 000

**Figure 75** : Toute la scène en infrarouge thermique du satellite *Landsat 5* (11 août 2014)

**Figure 76** : Transformation du MNT en TIN avec 3D Analyst.

**Figure 77** : Image satellite drapée sur le MNT.

**Figure 78** : Modélisation du relief sur 3dsMax

**Figure 79** : Illustration de la méthode de traitement des données LiDAR.

**Figure 80** : Carte thermique de la ville d'Oran . Echelle 1:100 000.

**Figure 81** : Masque végétation sur la ville d'Oran. Echelle 1:100 000

**Figure 82** : Masque végétation sur la ville d'Oran. Echelle 1:100 000

**Figure 83** : Réseau routier superposé sur la carte thermique de la ville d'Oran. Echelle 1:100 000

**Figure 84** : Carte thermique drapée sur l'image de la ville d'Oran. Echelle 1:150 000

**Figure 85** : Carte thermique drapée sur l'image de la zone 1. Echelle 1 :50 000

**Figure 86** : Masque végétation drapé sur l'image Echelle 1 :50 000

**Figure 87** : Zoom sur la zone 1 (Kristel) Echelle 1 :50 000

**Figure 88** : Carte thermique drapée sur l'image de la zone 2. Echelle 1 :25 000

**Figure 89** : MNT drapée sur l'image de la zone 2. Echelle 1 :25 000

**Figure 90** : Zoom sur la zone 2 (Le Port d'Oran). Echelle 1 :25 000

**Figure 91** : Carte thermique drapée sur l'image de la zone 3. Echelle 1 :25 000

**Figure 92** : Masque végétation drapé sur l'image Echelle 1 :25 000

**Figure 93** : MNT drapée sur l'image de la zone 3 (centre-ville d'ORAN). Echelle 1 :25 000

**Figure 94** : Carte thermique indiquant la zone 4. Echelle 1 :25 000

**Figure 95** : Zoom sur la zone 4 (La Gare d'Oran). Echelle 1 :12 500

**Figure 96** : Carte thermique indiquant la zone 5. Echelle 1 :25 000

**Figure 97** : Zoom sur la zone 5 (ES SENIA). Echelle 1 :25 000

## Liste des tableaux

**Tableau 1** : Caractéristiques intrinsèque des capteurs.

**Tableau 2** : Les satellites à très haute résolution spatiale.

**Tableau 3** : Sommaire des mesures typiques de réduction des effets des ICU en liens aux 4 causes des ICU : avantages, co-bénéfices, et désavantages.

**Tableau 4** : Caractéristique d'un indicateur intelligent.

**Tableau 5** : Sommaire des mesures de suivi et des indicateurs de performance.

**Tableau 6** : paramètres influençant les ICU

**Tableau 7** : paramètres sélectionnés et indicateurs possibles

**Tableau 8** : indicateurs retenus

**Tableau 9** : classe de matériaux utilisés a Oran et albédos correspondants.

**Tableau 10** : classes d'orientation des rues

**Tableau 11** : échelle de pondération

**Tableau 12** : coefficients de pondération

**Tableau 13** : Anciennes et nouvelles appellations des arrondissements d'Oran.

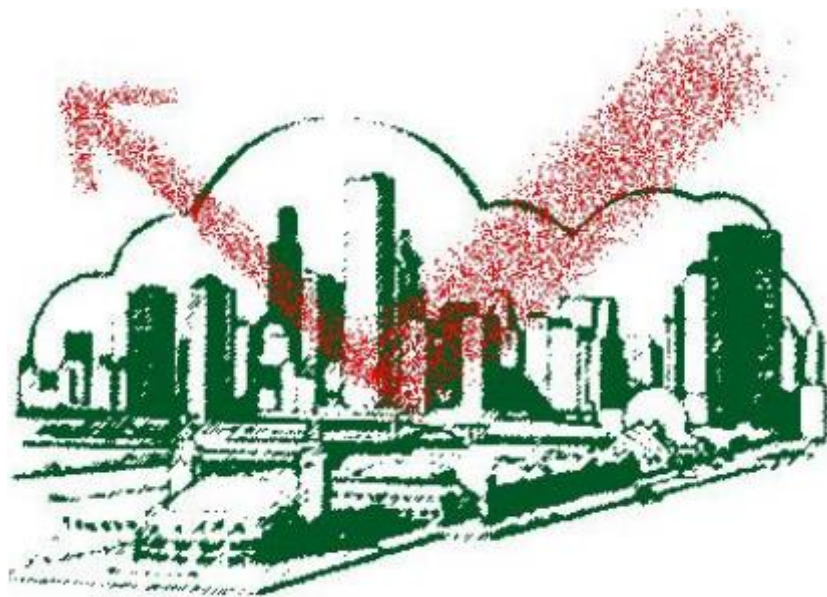
**Tableau 14** : Données climatiques à Oran de l'année 2014.

**Tableau 15**: Présentation des données utilisées.

**Tableau 16** : Application des différents canaux de Landsat TM

# CHAPITRE INTRODUCTIF

## *Introduction*



## **Introduction :**

L'augmentation des températures se manifeste à deux échelles : globalement avec le réchauffement climatique (RC), localement au travers des îlots de chaleur urbains (ICU).

### **Le réchauffement climatique : manifestation à l'échelle globale de l'augmentation des températures**

La réalité du changement climatique (CC) n'est plus à démontrer. La température moyenne annuelle à la surface du globe a augmenté de 0.85 °C depuis le début du 20ème siècle et le 5ième rapport de 2014 du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat GIEC *déclare qu'il est probable* que les températures moyennes de l'air augmentent en moyenne de 0,5°C (de 0,3 à 0,7°C selon les scénarios) soit +1,2°C entre 2016 et 2035 par rapport à 1850. Corrélativement, on observe la fonte accrue des neiges et des glaces<sup>1</sup>, une modification des régimes de précipitations<sup>2</sup>, induisant une élévation du niveau de la mer<sup>3</sup> (érosion et submersion des côtes), ainsi que l'augmentation en fréquence et en intensité des événements extrêmes. Du fait de l'inertie du système climatique, ce phénomène est cumulatif et irréversible.

Les impacts du réchauffement climatique (RC) sont importants et variés. En effet, l'ensemble des systèmes naturels et des secteurs d'activités sont susceptibles d'être touchés : le secteur agricole et forestier, les écosystèmes marins et côtiers, les espèces animales et végétales, la qualité et la disponibilité de la ressource en eau, la santé humaine, les activités économiques et sociales. Le mécanisme naturel d'effet de serre, combiné aux apports anthropiques (concentration des gaz à effet de serre (GES)<sup>4</sup> accrue par les activités humaines) en est la cause prépondérante. En effet, l'équilibre entre le flux de rayonnement parvenant du soleil à la Terre et le flux de rayonnement infrarouge renvoyé vers l'espace, dont résulte la température moyenne de la planète, est perturbé.

En réponse à ces phénomènes dont l'augmentation des températures, deux approches complémentaires existent : l'atténuation et l'adaptation.

L'adaptation correspond à « l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques ».<sup>5</sup>

---

1 Diminution de 2,7% par décennie depuis 1978 dans l'océan arctique

2 Hausse des précipitations dans l'Est de l'Amérique du Nord et du Sud, le Nord de l'Europe et le centre de l'Asie, tandis que diminution dans le Sahel, les zones méditerranéennes, l'Afrique Australe et l'Asie du Sud.

3 En moyenne + 1,8 mm par an depuis 1961

4 Dioxyde de carbone, méthane, oxyde nitreux, hydrofluorocarbures, perfluorocarbures, hexafluorure de soufre, dont les émissions sont pondérées par leur pouvoir de réchauffement global.

5 Selon le cinquième rapport d'évaluation du GIEC

Ainsi, on cherche à réduire la « vulnérabilité » des territoires<sup>6</sup> par des actions permettant de réduire les impacts effectifs du CC ou d'améliorer la capacité de réponse de la société.

Sont distinguées adaptation spontanée (réponse immédiate et non réfléchie d'un point de vue stratégique) et adaptation planifiée (décisions stratégiques délibérées, fondées sur une perception claire des conditions qui ont changé et sur les mesures qu'il convient de prendre pour revenir, s'en tenir ou parvenir à la situation souhaitée). L'atténuation, quant à elle, vise à limiter la concentration des GES dans l'atmosphère, par la maîtrise de l'énergie, la substitution d'énergies fossiles par des énergies renouvelables, et le stockage du carbone.

Isolément, aucune des deux approches ne permettrait de prévenir les effets du RC. Sans une réduction des émissions de GES, un seuil critique serait atteint, rendant l'adaptation impossible. De même, la modulation des émissions de GES ne peut, à court terme, parvenir à stabiliser le climat mondial. De plus, il s'agit de deux problématiques différentes car elles divergent sur différents points : l'échelle géographique et temporelle de leurs bénéfices, le nombre et la nature des acteurs impliqués, la comptabilisation des coûts et des bénéfices. Atténuation et adaptation doivent donc être deux « systèmes » d'actions menés de front.

Sans aucun doute, l'augmentation des températures constitue une problématique d'actualité suscitant un intérêt croissant.

### **Les îlots de chaleur urbains : manifestation à l'échelle locale de l'augmentation des températures**

Les îlots de chaleur urbains (ICU), phénomène propre au microclimat urbain, sont caractérisés par une élévation localisée des températures (nocturnes notamment) en centre ville, par rapport aux environs moins urbanisés. La différence de température peut atteindre jusqu'à 10°C<sup>7</sup> et est en moyenne de 1,5 à 2,5°C. Les études climatiques et scientifiques dont ils font l'objet ont débuté il y a de nombreuses années<sup>8</sup>. Mais, du fait de l'actuelle prise de conscience de la réalité du RC, une plus grande attention est aujourd'hui portée au réchauffement urbain. Malgré l'absence de relation de cause à conséquence entre ICU et CC, les effets de l'un sur l'autre aggravent les impacts de chacun. Ainsi, l'intensité de l'ICU sera accrue par l'augmentation des températures au niveau global, tout comme ses conséquences (consommations d'énergie, pollution...) qui sont des facteurs du CC.

---

6 Degré par lequel un système risque d'être affecté négativement par les effets des changements climatiques sans pouvoir y faire face, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes (Rapport 2007, GIEC)

7 HIDALGO J. et al., *Advances in urban climate modeling*, 2008

8 HOWARD L., « The climate of London », 1820 ; OKE dans les années 1970 ; en France, ESCOURROU G.

« Le climat et la ville », 1991

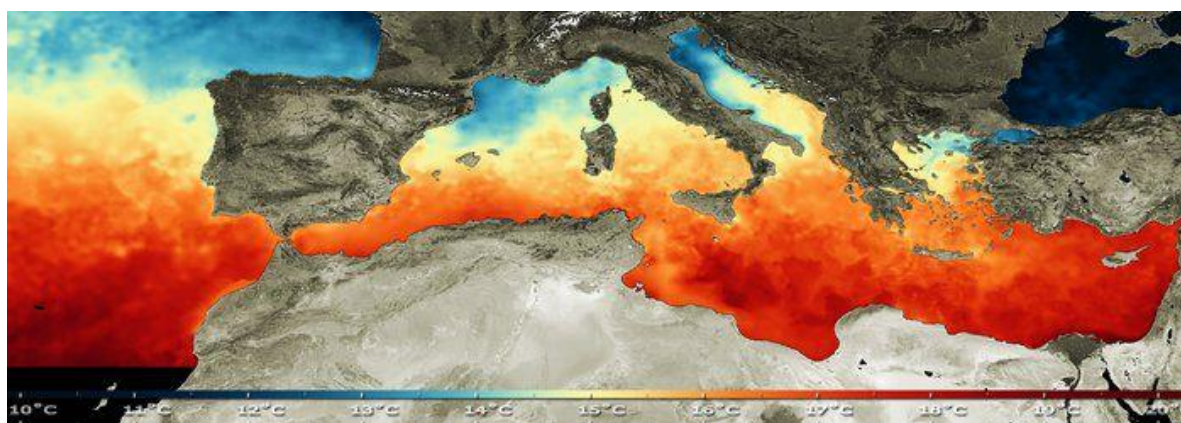


L'importance des impacts des ICU est indéniable. Ils modifient le climat urbain<sup>9</sup> et entraînent des problèmes de santé. La pollution de l'air, renforcée par un phénomène d'inversion atmosphérique et une modification de la composition physicochimique de l'air, entraîne une dégradation de la qualité de vie, l'augmentation des allergies, des problèmes respiratoires et cardiovasculaires. Les effets sanitaires et socio-économiques des canicules sont donc accentués. Les ICU impliquent également une augmentation des consommations d'énergie.

Les différentes politiques urbaines sont encore loin de réellement tenir compte de ce phénomène, mais à l'inverse, l'ICU influence le climat de la ville (températures, précipitations), les taux et la répartition des polluants, le confort et la santé des citoyens, les éléments naturels...

L'effet d'ICU est donc une donnée urbaine à prendre en considération dans la conception et la gestion de la ville. Cependant, force est de constater que les différentes politiques urbaines sont encore loin de réellement tenir compte de ce phénomène qui nécessite - et nécessitera encore plus à l'avenir - une adaptation raisonnée de la ville. A l'heure actuelle, les différents documents de planification et d'urbanisme sont encore assez peu avancés sur le sujet, notamment lorsqu'on les compare à des documents étrangers équivalents.

La problématique d'adaptation au réchauffement urbain est donc d'autant plus importante pour le milieu méditerranéen car c'est un « hotspot »: l'augmentation de la température prévue est plutôt supérieure à la moyenne à laquelle on s'attend globalement sur la planète. On a une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes, aussi bien les pluies torrentielles que les sécheresses. Tout ça a des conséquences en chaîne sur la dégradation des sols et sur toute une série de problèmes.



**Figure 4 :** Température des eaux de surface de la mer Méditerranée établie en 2008 .Celle-ci compile les données quotidiennes haute résolution des eaux du bassin méditerranéen combinée avec celles collectées par des satellites Source :CNRS 2015

<sup>9</sup> Augmentation du nombre de jours chauds, des précipitations (inondations urbaines), de la période de développement de la végétation (perte de biodiversité), mais diminution des rosées, brumes et brouillards urbains contribuant à épurer l'air des aérosols, pollens et poussières en suspension.

Des préconisations d'ordre scientifique et technique permettant, sinon de résorber ce phénomène, tout au moins de l'atténuer, sont faites par les chercheurs. Ces mesures d'adaptation sont de deux types. Les premières, tenant aux changements à effectuer quant aux activités anthropogéniques (développement des transports en commun, efficacité énergétique des bâtiments), les secondes tiennent à des techniques de rafraîchissement des villes, fondées sur la ventilation naturelle et les couvertures urbaines.

L'Algérie, se caractérise au nord par un climat typiquement méditerranéen, avec des étés chauds et secs, des hivers doux et humides (400 mm à 1 000 mm de pluie par an), ainsi que des températures moyennes de l'ordre de 25 °C en août et 12 °C en janvier pour la ville d'Oran et variant en fonction de l'altitude. Sur les Hauts Plateaux et dans l'Atlas saharien, par des précipitations peu abondantes (200 mm à 400 mm par an).

Et enfin, par des précipitations inférieures à 130 mm par an, et une amplitude thermique très importante (de 49 °C le jour à moins de 10 °C la nuit) en région Saharienne<sup>10</sup>, s'inscrit (l'Algérie) parfaitement dans ce processus de changement du climat et plus précisément d'augmentation de la température, vu qu'elle a enregistré ces dernières années des températures inhabituelles et très élevées sur la plupart des régions du territoire national. Les travaux présentés dans ce mémoire doivent permettre en premier lieu l'identification des ICU, l'objectif de l'identification est d'obtenir une cartographie d'ICU basée sur un indicateur fiable, calculé à partir de données satellites, de données d'occupation du sol ou de bases de données urbaines. Afin de déterminer précisément où sont situés les îlots de chaleur urbains de surface, l'emploi de certains outils est essentiel, dont les plus utilisés relèvent de la géomatique et plus spécifiquement de l'analyse cartographique d'images (exemples : images satellites Landsat).

L'analyse cartographique d'images, basée sur des cartes, permet de connaître la température de surface de la ville et de caractériser le type de recouvrement des sols. Peu dispendieuse et pratique, elle permet également la juxtaposition de cartes comportant différentes données du milieu urbain étudié (données socioéconomiques, couvert forestier, surverses annuelles des eaux pluviales, etc.)

Quand à la caractérisation permet d'élaborer les relations spatiales entre les différents intervenants et va permettre de comprendre quels sont les déterminants de l'apparition des ICU de définir les facteurs favorisant la création d'un ICU.

La télédétection permet de connaître les températures de surface extraites de l'image infrarouge thermique et la géomatique permet d'y associer certaines variables comme les facteurs influant sur ce l'ICU et d'offrir des fonctions d'analyse spatiale.

---

<sup>10</sup>Rubrique géographie, "Algérie: milieu naturel, climat", IN Encyclopédie Encarta sur CD-ROM, Paris, Encarta, 2013.

Cette étude aura donc pour but, après quelques définitions, d'aider à envisager les possibilités d'adaptation et d'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain après l'avoir identifié en matière d'urbanisme et d'aménagement (c'est-à-dire en termes de solutions collectives et de conception et de gestion de l'espace urbain et non pas par des solutions individuelles, exogènes et potentiellement consommatrices d'énergies telle que la généralisation des appareils de climatisation) en utilisant la géomatique qui regroupera plusieurs disciplines (la climatologie, la télédétection, la topographie, l'architecture...) à travers la compréhension de la répartition des températures dans le périmètre étudié.

Le premier chapitre va porter sur la microclimatologie urbaine, qui étudie le climat qui peut être modifié à des échelles plus vastes, locales et régionales par la végétation (ou inversement par sa destruction) ces échelles seront définies et de même, les transferts de chaleur en ville et autres éléments présents en ville influent les ICU ;

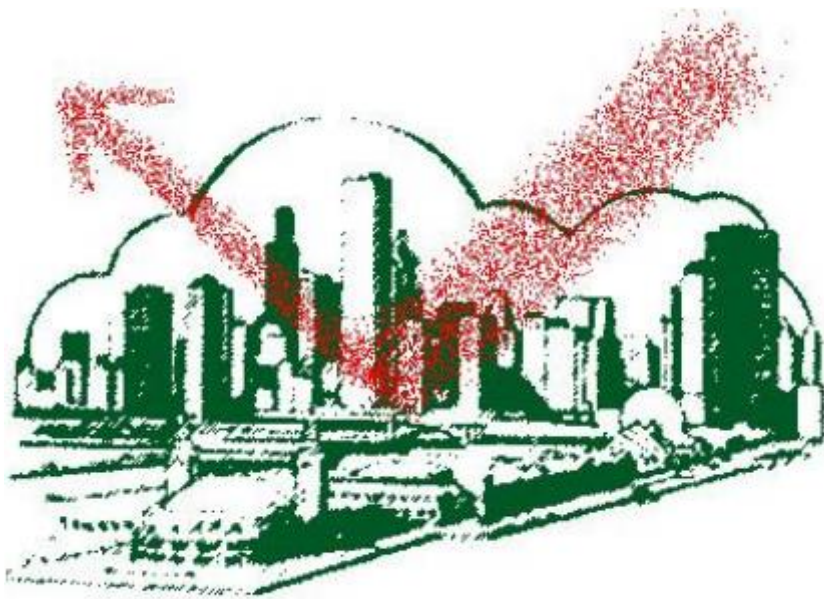
Le deuxième chapitre englobe les îlots de chaleur urbains, définition, types causes et facteurs qui accentuent ce phénomène ou qui font leur apparition quand au troisième chapitre on va voir la contribution de la géomatique dans la caractérisation des ICU, comment la télédétection thermique offre un outil idéal pour l'identification des ICU ainsi que l'existence de d'autres moyens pour la localisation de ce phénomène.

Le quatrième chapitre qui donne les mesures d'adaptation prises par le Québec car l'adaptation en Algérie reste encore dans un état embryonnaire. Enfin la partie pratique où nous avons donné une approche méthodologique pour l'identification mais que nous n'avons pas pu la mettre en œuvre, mais nous avons réalisé avec les données que nous disposons une carte thermique qui a permis de localiser les éventuels îlots de chaleur et nous avons essayé de trouver en utilisant les SIG une explication logique à ce phénomène dans la région oranaise.



## CHAPITRE 1:

### *La microclimatologie urbaine*



## 1. Villes et changements climatiques

Le changement climatique est en cours et ses conséquences se manifestent déjà aux quatre coins du globe : réchauffement planétaire, élévation du niveau de la mer, augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes et altération de la distribution des précipitations. Il correspond à une « variation de l'état du climat, que l'on peut déceler par des modifications de la moyenne ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus ».

Les nombreuses études recensées dans le dernier rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) permettent d'affirmer que « l'essentiel de l'élévation de la température moyenne du globe observée depuis le milieu du XXe siècle est très probablement attribuable à la hausse des concentrations de GES anthropiques »<sup>11</sup>.

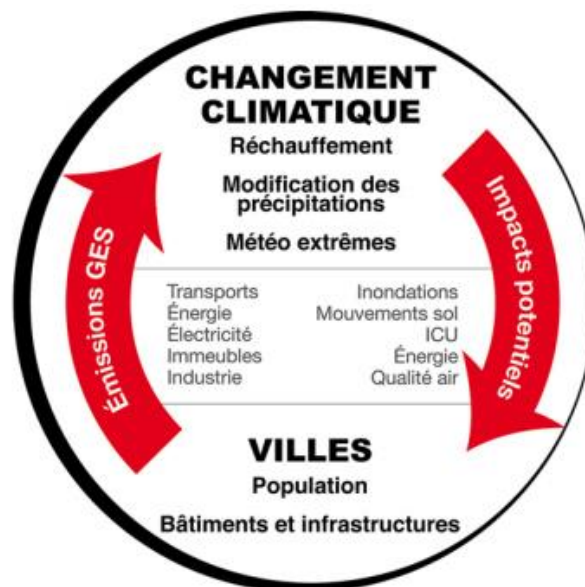


Figure 2 : Interactions existant entre les villes et les changements climatiques.

Source : Catherine Dubois, 2014<sup>12</sup>.

11 GIEC. 2014. Bilan 2014 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

12 Dubois, C., O. Bergeron, A. Potvin, et L. Adolphe. 2012. « Adapting cities to climate change: heat and urban form. » In Proceedings of the 8th International Conference on Urban Climates and the 10th Symposium of the Urban environment, 4. Dublin.

## 2. Le chauffage naturel de la Terre

Le Soleil est la source d'énergie (et donc de chaleur) de la Terre. Les rayons émis par le Soleil traversent l'espace jusqu'à l'atmosphère terrestre. 30 % de cette énergie est renvoyé dans l'espace par l'atmosphère, les continents et les océans, le reste est absorbé et sert donc à « chauffer » l'atmosphère et la surface terrestre. A ces apports directs d'énergie par le Soleil, s'ajoutent les rayonnements émis par l'atmosphère et la surface terrestre, car, afin de rester en équilibre, le système terrestre perd continuellement de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge. De l'énergie qu'elle reçoit, l'atmosphère en rayonne donc une partie vers l'espace, l'autre vers la surface terrestre ce qui contribue encore plus largement que les rayons solaires à sa température. De même, la surface renvoie des infrarouges vers l'espace (10 %) et vers l'atmosphère<sup>13</sup>.

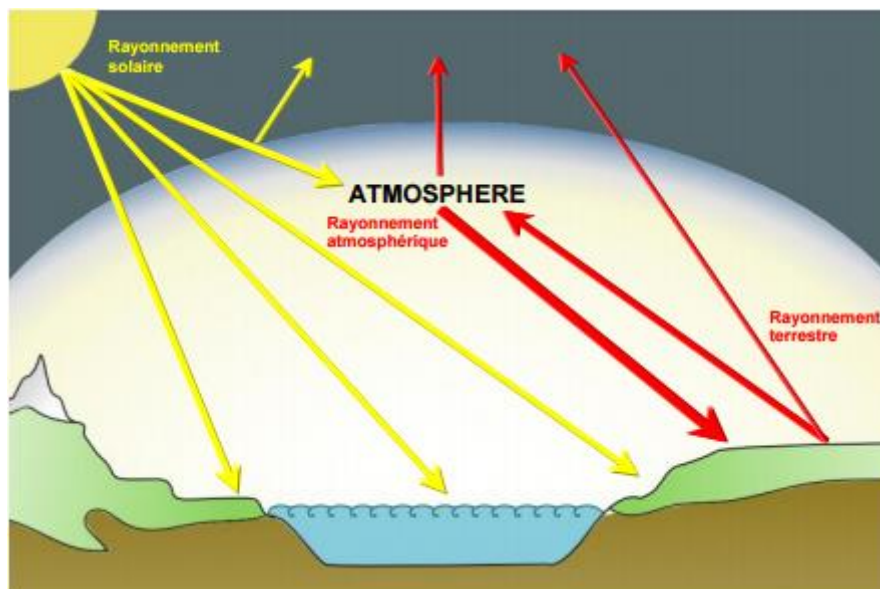


Figure 3 : Le chauffage de l'atmosphère et de la surface de la Terre. Source : IAU îdF 2010

## 3. Les transferts de chaleur en ville

### 3.1. Par rayonnement

A l'échelle de la ville, l'énergie reçue du Soleil et de l'atmosphère est à son tour absorbée et réfléchiée en partie par les matériaux de la ville. Lorsqu'elle est absorbée, elle chauffe les bâtiments et les différents revêtements et couverts urbains ; la partie réfléchiée est renvoyée. La particularité de la ville réside ici dans la multitude de surfaces sur lesquelles peut être envoyée l'énergie.

13IAU îdF – Les îlots de chaleur urbains –répertoire de fiches connaissances, île de France novembre 2010.  
<http://www.iau-idf.fr>

Ainsi, le rayonnement renvoyé par un bâtiment peut l'être sur un autre, qui à son tour absorbe une partie de l'énergie et en renvoie une autre. De plus, tout comme la surface terrestre et l'atmosphère, la ville émet un rayonnement infrarouge qui à son tour est intercepté par les surfaces qu'il frappe et qui le réfléchissent.

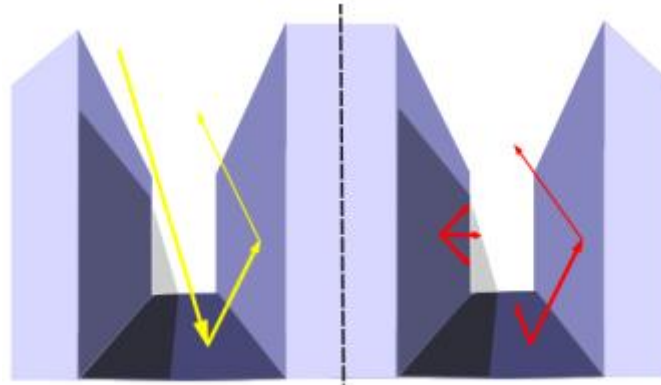


Figure 4 : Rayonnement solaire et rayonnement infrarouge en ville. Source : IAU idF 2010

### 3.2. Par convection et conduction

On observe également un phénomène de convection, lorsque l'air est chauffé par la ville et s'élève car il se dilate et devient alors plus léger que l'air froid. En montant, il se refroidit et retombe. C'est ainsi que se crée un « dôme » au-dessus de la ville où les masses d'air se déplacent dans un mouvement ascendant. La chaleur se diffuse également dans les matériaux par conduction : si un mur est chauffé par le soleil à l'extérieur, ou un système de chauffage à l'intérieur d'un bâtiment, cette chaleur va se diffuser à travers le matériau du mur. C'est pour cette raison que l'on observe des pertes de chaleur des bâtiments en hiver lorsque les logements et bureaux sont chauffés (La conduction vise à rétablir l'équilibre de température).

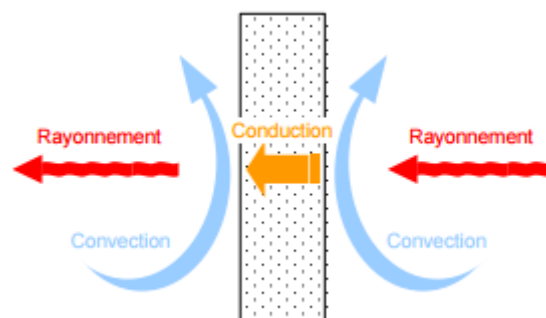


Figure 5 : Rayonnement, convection et conduction sur une paroi. Source : IAU idF 2010



#### 4. Le vent en ville

Tout comme à l'échelle de la planète, le vent en ville est le résultat du déplacement ascendant des masses d'air du chaud vers le froid. Dans le contexte urbain, on voit ainsi l'apparition de brises, c'est-à-dire des vents faibles dirigés des zones froides vers les zones chaudes.

Ce phénomène est particulièrement important dans le contexte de l'îlot de chaleur urbain : on observe alors des brises de la campagne vers la ville, mais aussi à l'intérieur même de la ville.

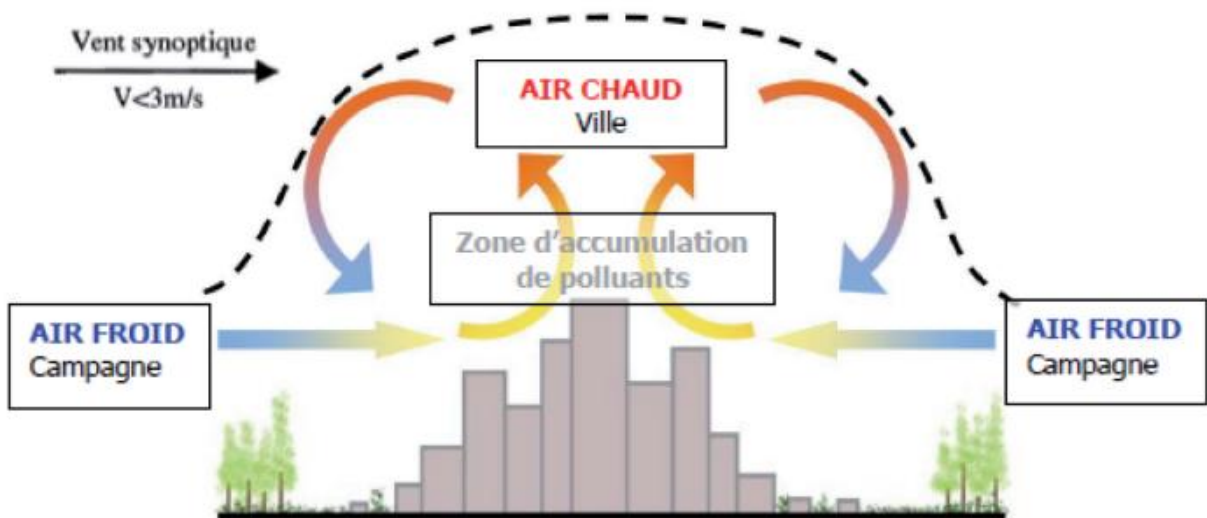


Figure 6 : Schéma du phénomène de brise thermique de la campagne vers la ville. Source : IAU idF, 2010

Ces brises de campagne engendrent un effet de dôme au-dessus de la ville particulièrement néfaste lors des pics de pollution.

#### 5. Les types de rayonnement

##### 5.1. Le rayonnement solaire

Le soleil, émet une énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Le rayonnement émis se compose d'un spectre continu allant de l'ultra-violet à l'infrarouge en passant par le visible. En traversant l'atmosphère, les gaz et les molécules absorbent certaines bandes de l'ultra-violet et de l'infrarouge. Ainsi le rayonnement solaire qui arrive à la surface de la terre comprend : 5% d'UV, 40% de lumière visible et 55% d'infrarouge, porteurs essentiels de l'énergie thermique<sup>14</sup>.

14 E. Bozonnet. Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments-cas des rues canyons. Thèse de doctorat, Université de Rochelle, 2005.

Au niveau énergétique, la constante solaire de  $1350 \text{ W/m}^2$  est l'énergie qui arrive aux couches supérieures de l'atmosphère.

L'effet de la traversée de l'atmosphère qui réfléchit, absorbe ou diffuse des parties de ce rayonnement solaire réduit considérablement la valeur qui arrive à la surface du sol. Ainsi, le flux atteignant une surface de la Terre peut avoir une valeur maximale de  $900$  à  $1000 \text{ W/m}^2$ . Plus précisément, le flux ( $\text{W/m}^2$ ) qui atteint une surface, provient de trois composantes : la composante directe, la composante diffuse et la composante réfléchie.

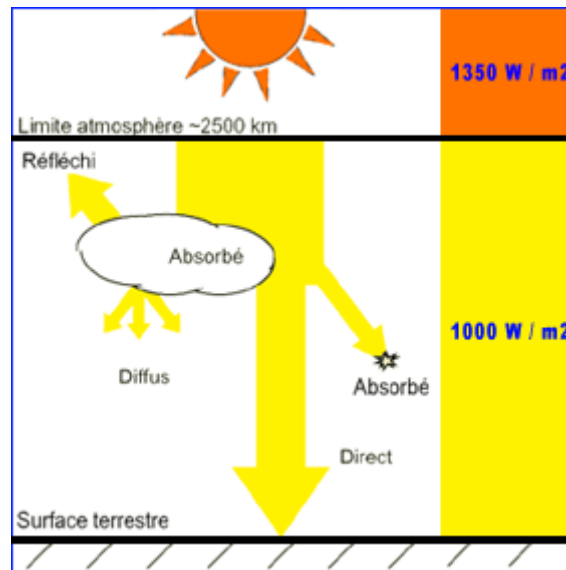


Figure 7 : les différents effets provoqués par le passage du rayonnement solaire de l'atmosphère.

Source : [www-energie.arch.ucl.ac.be](http://www-energie.arch.ucl.ac.be)

### 5.1.1. Le rayonnement solaire direct

Le rayonnement solaire direct, exprimé en  $\text{W/m}^2$ , correspond au flux solaire qui atteint directement une surface quand celle-ci est exposée au soleil. Elle dépend de la hauteur du soleil et de l'angle d'exposition de la surface au soleil à l'instant considéré. La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal. L'angle d'incidence correspond l'angle avec lequel le rayon solaire frappe la surface : c'est l'angle entre la normale à la paroi et le rayon solaire à l'instant considéré.

### 5.1.2. Le rayonnement solaire diffusé

La composante diffuse représente le flux, en provenance du ciel. Il résulte de la diffusion des rayons solaires par les particules de l'atmosphère et il est émis par la voute céleste. On évalue l'énergie solaire diffuse sous l'hypothèse que toutes les parties du ciel émettant le même rayonnement.

Dans ce cas, seule l'inclinaison de la surface pondère le flux diffus incident. Cette hypothèse est correcte pour un ciel couvert ou le flux diffus est plus important que le direct.

### 5.1.3. Le rayonnement solaire réfléchi

La composante réfléchie correspond à la partie du flux qui arrive à la surface suite aux réflexions solaires produites par l'environnement proche. Les formes urbaines qui se trouvent autour de la surface étudiée renvoient vers elle une part du flux global incident (direct et diffus). La part réfléchie dépend de l'albédo des surfaces alors que le flux intercepté par la surface dépend de son inclinaison.

### 5.1.4. Le rayonnement du ciel

Une partie du rayonnement solaire est absorbé par l'atmosphère, les océans et les continents, qui transforment une partie de l'énergie lumineuse en rayonnements infrarouges et renvoient ceux-ci vers l'espace. Ensuite, les composantes de l'atmosphère comme l'ozone, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et les aérosols absorbent le rayonnement de grande longueur d'onde en les émettant ensuite vers toutes les directions. La quantité du rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde reçue par la surface terrestre dépend de la stratification verticale de la température ainsi que des concentrations des gaz exposés<sup>15</sup>.

La nébulosité joue également un rôle important quant à l'émission du rayonnement de grande longueur d'onde. Lorsqu'un nuage capte les rayons infrarouges il réémet une partie de cette énergie vers l'espace et une partie vers la surface de la Terre, ce qui la réchauffe.

## 5.2. Le rayonnement thermique

Considérons un corps porté à une température  $T$ . Ce corps émet de l'énergie par sa surface sous forme de rayonnement thermique, c'est à dire sous forme d'ondes électromagnétiques. Cette énergie est émise suivant toutes les longueurs d'onde et vers toutes les directions.

Par conséquent, le voisinage de deux surfaces de températures différentes aura comme résultat le transfert d'énergie thermique sous forme de rayonnement électromagnétique.

La densité de flux radiatifs de grandes longueurs d'onde ( $E$ ) émise par un corps est définie par la loi de Stefan-Boltzmann qui s'écrit avec l'équation suivante :

---

15 T.R. Oke. Boundary layer climates. Methuen and co.London, 2nd edition, 1987.

$$E = \epsilon \sigma T_s^4$$

–  $\epsilon$  : l'émissivité (qui est définie comme étant le rapport entre l'émission du corps réel et celle du corps idéal, appelé corps noir, porté à la même température  $T$ )

–  $\sigma$  : la valeur constante de Stefan-Boltzmann

–  $T$  : la température du corps

Toutefois, le calcul du bilan électromagnétique entre deux surfaces, nécessite la connaissance du facteur de forme. Plus précisément, le facteur de forme  $F_{12}$  pour deux surfaces  $S_1$  et  $S_2$  est la fraction d'énergie qui quittant la facette 1 est reçue par la facette 2 de surfaces orientées d'un angle solide  $\theta_i$  par rapport à leur normale et qui se trouvent à une distance  $r$ . Il est décrit par la formule

$$F_{12} = \frac{1}{S_1} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{dS_1 \cos \theta_1 dS_2 \cos \theta_2}{\pi r^2}$$

Pour le calcul de  $F_{12}$ , on tient compte des forme et orientation respectives des deux facettes ainsi que de la présence éventuelle d'obstacles entre les deux<sup>16</sup>.

## 6. Les effets aérodynamiques en milieu urbain

Le vent naturel a un signal fluctuant dans le temps. C'est un paramètre principal du microclimat des villes. En milieu urbain, les mouvements d'air sont fortement perturbés à cause de la présence de bâtiments qui font obstacle sous formes diverses. Au voisinage des constructions, on peut définir deux couches atmosphériques en fonction de leur état de stabilité. La canopée urbaine et couche limite urbaine sont les deux couches dont l'étude permet d'analyser les bilans énergétiques et radiatifs ainsi que les effets aérodynamiques [Oke 87]<sup>15</sup>.

### 6.1. Les couches atmosphériques près de la surface du sol

#### 6.1.1. La canopée urbaine

La canopée urbaine est une couche qui correspond à la hauteur moyenne de bâtiments qui font obstacle à l'écoulement d'air dans le milieu urbain.

Dans cette couche, le mouvement de masses de l'air est très perturbé et tourbillonnaire du fait de la présence de constructions. Les variations climatiques qui y ont lieu modifient l'équilibre thermique au niveau du sol.

---

16D. Groleau. Solène, un outil de simulation des éclairagements solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains [Webpage]. 2000. Disponible sous le lien <https://listes.cru.fr/wiki/solenetb/>

### 6.1.2. La couche limite atmosphérique et la couche limite urbaine

La couche limite atmosphérique CLA est la couche inférieure de la troposphère de 1 à 2 km d'épaisseur. Cette couche est associée à l'échelle méso-climatique. Son épaisseur varie de quelques centaines de mètres jusque à quelques kilomètres en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité des sols et de l'ensoleillement variable.

La CLA présente une forte variation pendant le cycle diurne. Le jour, elle varie de 1 à 2 km, en fonction de l'ensoleillement et de la saison. La nuit, elle varie entre 100 et 300 m, en fonction du vent et du refroidissement en surface. La couche limite urbaine CLU, située au-dessus de la canopée urbaine fait partie de la CLA et son épaisseur est très variable puisque il dépend de la rugosité du terrain. Sa valeur est nulle aux zones rurales. Cette couche est caractérisée par des transferts d'énergie entre la surface et l'atmosphère.

Les variations climatiques entraînées sont généralement identiques pour tous les points de la zone étudiée et elles varient en fonction du changement de la typologie urbaine. L'influence des constructions sur le mouvement des masses d'air se prolonge jusqu'une partie plus haute de la canopée urbaine. La sous couche rugueuse, nommée en anglais "roughness sublayer" elle dépend de l'homogénéité du terrain, des formes qui font obstacle à écoulements ainsi que de la distance su laquelle ces deux conditions s'appliquent. Dans cette zone l'écoulement est également perturbé, observant aussi d'écoulements secondaires verticaux ou transversaux. L'épaisseur de cette couche dépend de la nature des surfaces qui se trouvent au voisinage avec le sol. Dans une partie plus haute de la surface du sol, on observe la sous-couche inertielle, nommée "Inertial sublayer" qui s'apparente à l'ensemble de la couche de surface pour les zones rurales<sup>17</sup>.

Au-dessus de 1000 m de la surface terrestre, les perturbations sont plus faibles et le mouvement du vent est parallèle aux isobares. Les isobares sont des courbes qui relient tous les points de même pression atmosphérique. Sur un site ou la rugosité est plus faible, la turbulence s'affaiblie<sup>18</sup>.

---

17 M. Rotach. On the influence of the urban roughness sub layer on turbulence and dispersion. Atmospheric environment

18 E. Bozonnet. Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments-cas des rues canyons. Thèse de doctorat, Université de Rochelle, 2005.

## 7. Les échelles de climatologie

Avant d'analyser les éléments du microclimat, il est important de mentionner les quatre différentes échelles d'étude en climatologie<sup>14</sup>:

- L'échelle globale ou échelle "macro" qui se situe en quelques 103 kilomètres loin de la surface terrestre qui correspond aux phénomènes définitifs pour les principales variations climatiques et saisonnières.
- L'échelle régional ou l'échelle "mésos" qui se prolonge jusqu'à quelques centaines de kilomètres. Les reliefs et l'emplacement de la région par rapport aux déplacements d'air affecte le climat à ce niveau.
- L'échelle locale qui se prolonge à quelques dizaines de kilomètres correspond aux changements climatiques régionaux créés par la présence d'une vallée et de la mer. C'est l'échelle des modifications de régime du vent et des brises thermiques.
- L'échelle microclimatique est limitée à quelques centaines de mètres. C'est l'échelle où l'intervention de l'homme peut impacter les conséquences climatiques.

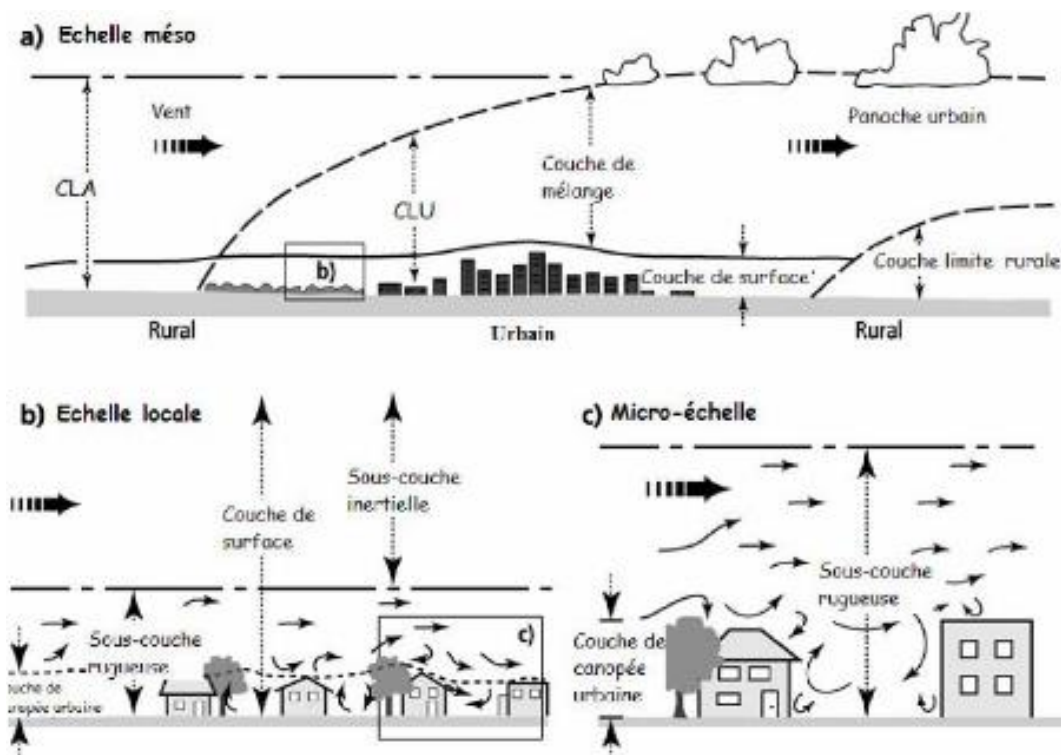


Figure 8 :Représentation des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso (a), à l'échelle locale (b) et micro (c). source : T.R. Oke, 2006.

Dans la Couche de Canopée Urbaine, l'écoulement et les échanges d'énergie sont régis par des processus de micro-échelle, et dépendent précisément du lieu et du type de surface. La sous-couche rugueuse de la CLU est particulièrement perturbée. Bien qu'elle existe également pour un sol peu rugueux, son épaisseur devient beaucoup plus conséquente au-dessus d'une ville.

Dans certaines conditions, elle pourrait atteindre plusieurs fois la hauteur moyenne des bâtiments<sup>19</sup>. L'épaisseur de la sous-couche rugueuse est en général difficile à déterminer. Elle est souvent considérée proportionnelle à la hauteur de la Couche de Canopée Urbaine (Arnfield, 2003 ; Rotach, 2005), avec un facteur compris entre 2 et 5. Dans cette couche, l'écoulement ne vérifie pas les conditions d'homogénéité horizontale et de stationnarité nécessaires à l'application de la théorie de similitude de Monin-Obukhov (décrit l'écoulement et la température moyenne dans la couche de surface en fonction de la hauteur (sans dimension) lorsque la stabilité de l'atmosphère est non neutre), au contraire les flux turbulents varient fortement. La sous-couche inertielle est la zone située au-dessus de la sous-couche rugueuse et qui s'étend jusqu'au sommet de la couche de surface. C'est uniquement dans cette partie de la couche de surface que les conditions d'application de la théorie de Monin-Obukhov sont réunies. Le problème qui se pose au-dessus des villes est que la sous-couche inertielle peut être très réduite voire même inexistante dans certaines conditions<sup>20</sup>.

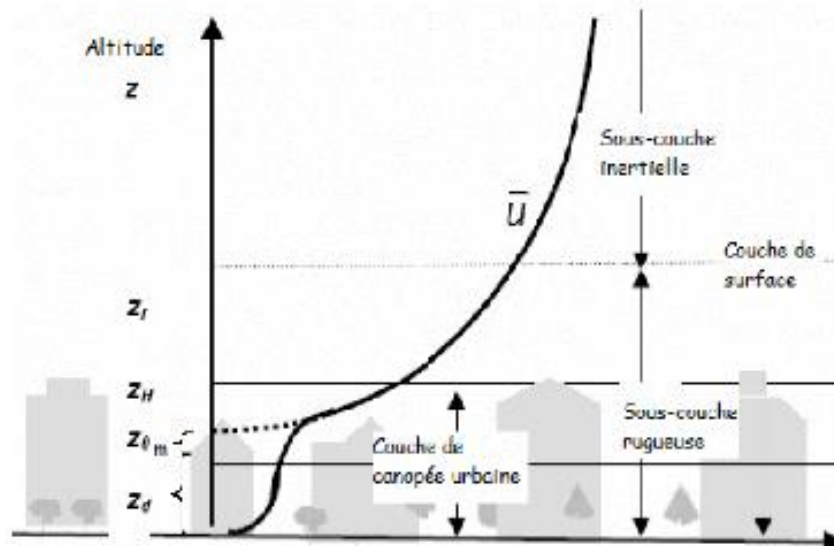


Figure 9 : Cycle diurne de la CLA. source : Delmas et al, 2005<sup>21</sup>

<sup>19</sup>Arnfield. A.J, 2003: The urban heat island, *International Journal Climatology*

<sup>20</sup>Rotach. M. W, 2005: Structure of the Urban Boundary Layer, Chap. 2, *Meteorology applied to Urban Air Pollution*, 2001: Representation of the field data, *Proceedings of the Third International Conference on Urban Air Quality. Loutraki, Greece*

<sup>21</sup>Delmas. R. G, Mégie. V. H, Peuch, 2005: Physique et chimie de l'atmosphère, *Thèse de Doctorat de l'Université de Paris*.

### 7.1. Description de l'écoulement autour de bâtiment

La présence d'un édifice perturbe le mouvement de masses d'air. Trois zones de perturbation apparaissent :

Sur la façade au vent, on observe une zone de suppression et un vortex turbulent dû à l'écoulement qui descend sur la face. Sur la façade sous le vent, on observe une zone de dépression turbulente qui s'étire dans la cavité de basse pression. Sur les côtés et la partie supérieure, on observe un décollement et une zone turbulente [Bozonnet 05]. Plus précisément, la figure ci-dessous montre le contournement d'un bâtiment à un profil vertical de vitesse moyenne. Les différentes zones qu'on observe sont les suivantes :

1. point de séparation
2. rouleau tourbillonnaire
3. zone tourbillonnaire latérale
4. gradient vertical de vitesse

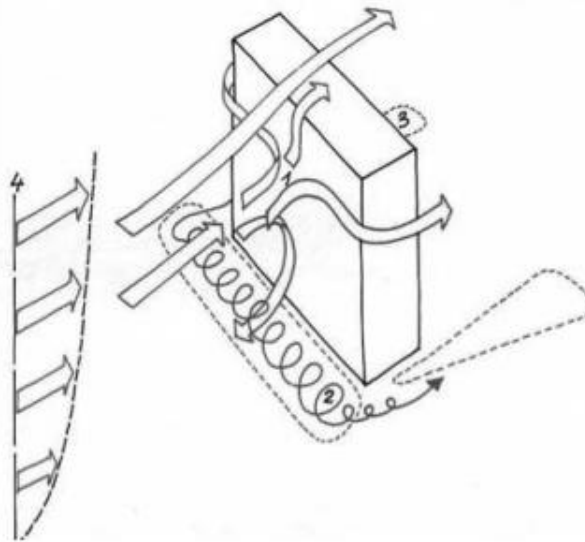


Figure 10 : Ecoulements autour d'un bâtiment. Source : J. Gandemer<sup>22</sup>

### 7.2. Description de l'écoulement dans une rue

L'analyse d'écoulement du vent dans une rue nécessite l'utilisation d'un indicateur géométrique qui est défini comme le rapport de la hauteur moyenne des bâtiments sur la largeur de la rue.

<sup>22</sup> J. Gandemer & A. Guyot. Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti. Ministère de l'Équipement, Direction ' de l'Aménagement foncier et de l'Urbanisme, Paris, 1976.



La caractérisation des différents régimes d'écoulement dans une rue peut être réalisée en fonction du rapport Hauteur/Largeur ( $H/L$ ). Si les bâtiments sont bien séparés avec un rapport  $H/L < 0.5$ , les écoulements n'interagissent pas. En diminuant l'espacement entre les bâtiments, les écoulements commencent à interagir et les sillages sont perturbés.

La combinaison de la hauteur, de l'espacement et de densité amène d'un régime de rugosité isolée (isolated roughness) à un écoulement d'interférence de sillage (wake interference flow). Ce régime est caractérisé par des écoulements secondaires dans l'espace du canyon. Lorsque le rapport  $H/L$  et la densité sont encore plus élevés, un vortex stable s'établit dans la rue canyon ainsi qu'un régime d'écoulement rasant<sup>23</sup>. La figure suivante montre les régimes d'écoulements aérodynamiques dans la rue.

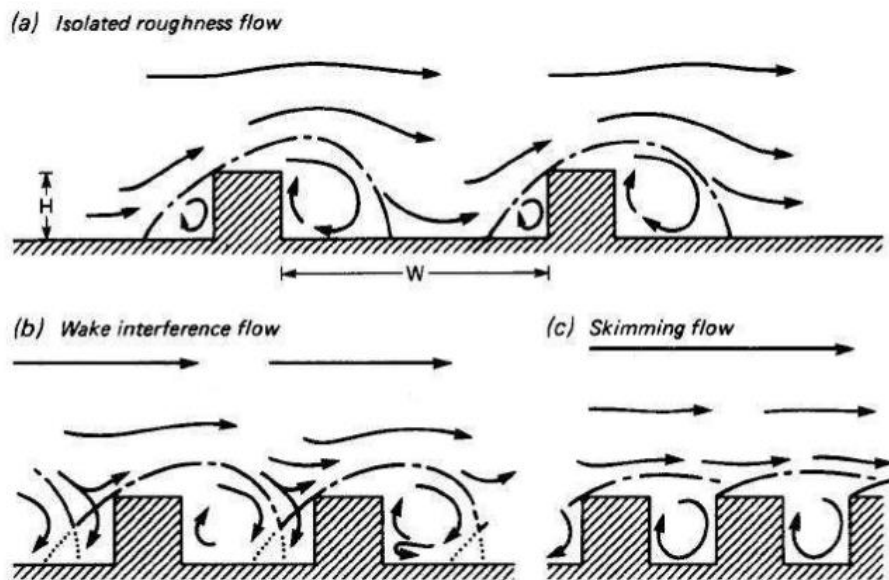


Figure 11 : Régimes d'écoulements aérodynamiques dans la rue. Source : Oke 88

Le régime de rugosité isolée (a) correspond au cas où les écoulements n'interagissent pas. En diminuant l'espacement entre les bâtiments, les écoulements commencent à interagir et les sillages sont perturbés, ce qui provoque régime de rugosité isolé (b). Lorsque le rapport  $H/L$  et la densité sont encore plus élevés régime d'écoulement rasant (c) s'établit dans la rue canyon [Oke 88].

### 7.3. Les effets aérauliques en milieu urbain

Dans le milieu urbain, l'écoulement du vent interagit avec les formes urbaines perturbant ainsi son mouvement. Les principes d'écoulement d'air en milieu urbain sont assez bien étudiés pour certaines configurations géométriques.

#### 7.3.1. Effet Wise

Création de rouleau tourbillonnaire devant un bâtiment élevée lorsque celui-ci voisine avec un bâtiment plus petit, implanté parallèlement. L'effet Wise est très gênant pour les piétons du fait de la forte composante verticale de la vitesse du vent dans la zone critique.

#### 7.3.2. Effet de coin

Il s'agit d'un phénomène d'accélération localisée, à l'angle d'un bâtiment. L'augmentation de la vitesse du vent est entraînée par le gradient très élevé de la pression entre la façade exposée et celle qui se situe en dépression. L'effet de double coin est un phénomène induit de l'effet de coin. La configuration de l'effet de double coin ou passage entre 2 immeubles est créé à partir de 2 bâtiments placés longitudinalement et séparés par un passage. La zone d'espacement entre les 2 formes est très critique du point de vue de l'inconfort et elle peut même se prolonger à l'arrière des bâtiments<sup>24</sup>.

#### 7.3.3. Effet de barre

L'effet de barre est caractérisé par une déviation en vrille de l'écoulement au passage d'une barre pour une incidence voisine de 45°. Le phénomène existe si la hauteur moyenne  $h$  de la barre est  $< 25$  m et la longueur minimum  $l$  de la barre est  $> 8$  h.

#### 7.3.4. Effet de canalisation

L'effet de canalisation apparait lorsqu'un ensemble construit forme un couloir. Une canalisation n'est pas une cause de gêne en soi. Elle n'agit que si elle est associée à une anomalie aérodynamique qu'elle transmet sur toute sa longueur. L'association de phénomènes de canalisation et de Venturi peut être une source de gêne importante. La figure suivante montre certains effets aérodynamiques qui ont lieu dans le milieu urbain.

---

24 S. Reiter. Elaboration d'outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception des ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes. Thèse de doctorat, Université de Louvain, 2007.

### 7.3.5. Effet Venturi

Le rétrécissement du passage amène à l'augmentation de la vitesse du vent, pour un débit identique. La zone critique du confort se situe à l'étranglement.

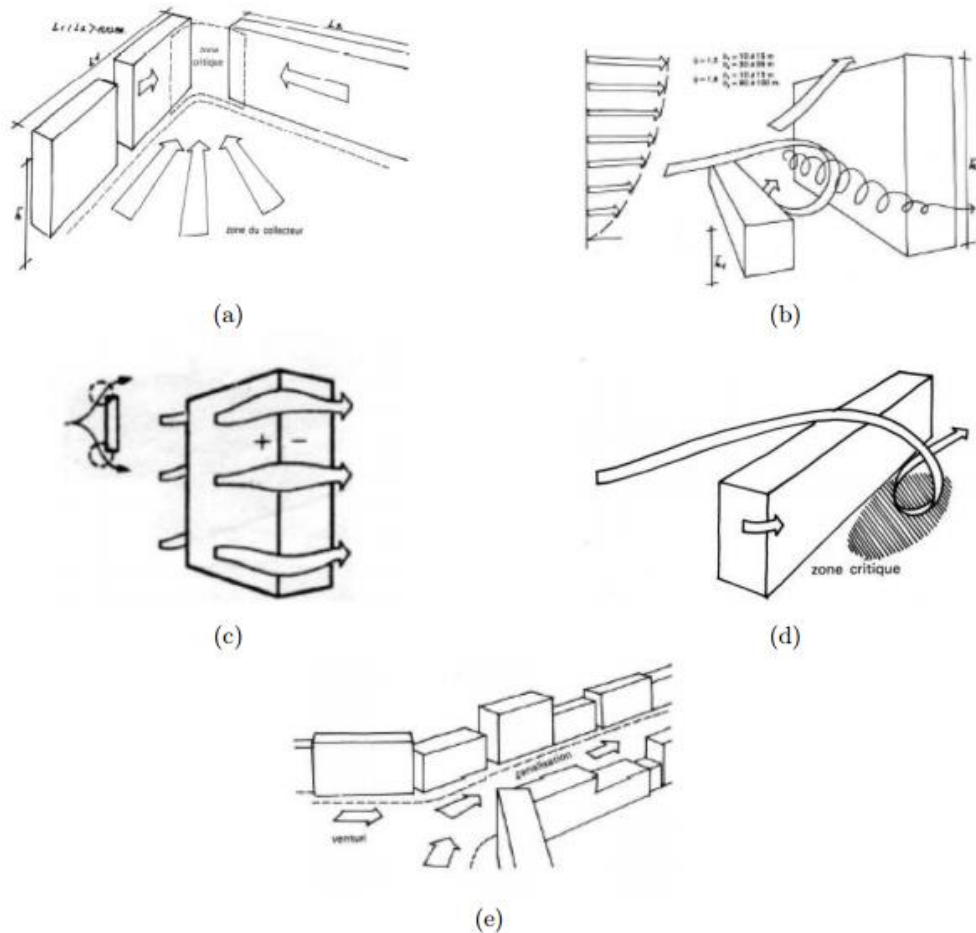


Figure 12 : Représentation graphique des effets aérodynamiques dans le milieu urbain. Source : J.Gandemer

L'effet de Venturi (a) correspond à l'augmentation de la vitesse du vent du fait de rétrécissement du passage. L'effet Wise (b) correspond à la création de rouleau tourbillonnaire devant un bâtiment élevée lorsque celui-ci voisine avec un bâtiment plus petit. L'effet de coin (c) est un phénomène d'accélération localisée, à l'angle d'un bâtiment. L'effet de barre (d) est caractérisé par une déviation en vrille de l'écoulement au passage d'une barre et l'effet de canalisation (e) apparaît lorsqu'un ensemble construit forme un couloir (J. Gandemer).

## 8. La notion du confort thermique dans les espaces extérieurs

Le confort de l'individu résulte en partie de l'ambiance thermique. Il s'agit d'une notion complexe et globale puisque plusieurs paramètres interagissent et influencent son évaluation. Son étude nécessite la prise en compte de facteurs objectifs ainsi que subjectifs. L'ambiance thermique est significativement déterminée par les éléments du microclimat. Néanmoins, en dehors des conditions microclimatiques, il existe certains facteurs physiologiques et psychologiques qui jouent un rôle également important sur le confort des individus en extérieur. En effet, une approche uniquement quantitative est insuffisante pour décrire les conditions de confort à l'extérieur. C'est l'adaptabilité psychologique, dépendante du temps de l'exposition, des espérances et du contrôle personnel qui a un impact important sur l'évaluation de sensation thermique. Comprendre la manière dont ces notions interagissent peut être une aide à la conception de la planification et des formes du milieu urbain<sup>25</sup>. L'adaptabilité des usagers en espaces extérieurs est le sujet de plusieurs recherches scientifiques. Un modèle a été développé à partir d'une étude de neuf mois qui visait à évaluer le comportement physiologique de 649 individus, exposés aux conditions climatiques extérieurs variables.

Les chercheurs ont abouti à la conclusion que les usagers s'adaptent à conditions extérieures en fonction des vêtements et du choix d'où ils s'installent ainsi que de la durée de leur exposition. En plus, la vitesse maximale de l'air a été trouvée comme le paramètre qui influence le plus l'adaptabilité tandis que la température de l'air ambiante a un impact négligeable sur l'adaptabilité. L'enjeu pour les planificateurs urbains est alors de créer des espaces urbains dont les conditions microclimatiques influence le confort thermique de manière à ce que les piétons puissent le tolérer<sup>26</sup>.

En outre, le taux d'activités humaines mené à l'extérieur est influencé par le confort thermique ressenti par les individus. Autrement dit, l'intensité des activités ainsi que la durée sont dépendantes de niveau d'inconfort et de gêne. Pendant l'été, la haute température ainsi que le rayonnement solaire directe vont décourager les individus de se balader dans les espaces ouvertes sans protection solaire. Au contraire, en hiver, la vitesse de l'air combinée à la température basse va encourager les piétons à chercher des espaces ensoleillées<sup>27</sup>.

---

25M. Nikolopoulou & K. Steemers. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for design urban spaces. Energy and Buildings.

26 D. Walton, V. Dravitzki & M. Donn. The relative influence of wind, sunlight and temperatures on user comfort in urban outdoor spaces. Building and environment.

27 B. Givoni, M. Noguchi, H. Saaroni, O. Pochter & Y. Yaacovand S. Becker. Outdoor thermal comfort research issues. Energy and buildings

Par conséquent, le confort thermique résulte d'une interaction complexe entre les paramètres microclimatiques et les paramètres relatifs à l'individu.

Son évaluation nécessite tout d'abord la connaissance de quatre paramètres microclimatiques<sup>28</sup>.

- La température moyenne radiante
- La vitesse de l'air
- La température de l'air
- L'humidité de l'air

La température moyenne radiante est un paramètre critique en ce qui concerne l'évaluation du confort thermique en espaces extérieurs. Elle intègre les flux de courte et de grande longueur d'onde absorbés par le corps humain, influençant ainsi son bilan énergétique. La  $T_{mrt}$  (La température moyenne radiante) est le facteur clé quant au calcul d'indices de confort puisque elle a un impact important sur le bilan thermique de l'homme<sup>29</sup>. En milieu extérieur, la vitesse du vent est difficile à contrôler. Dans un site urbain, des zones calmes peuvent jouxter des zones d'écoulement tourbillonnaires. Les gradients d'écoulement ressentis surtout aux zones voisines aux constructions de grande hauteur, sont perçus comme une gêne importante. De plus, le bilan énergétique est perturbé pour des vitesses du vent importantes. Les mouvements d'air modifient les échanges dus à la convection entre le corps humain et son environnement. Par conséquent, des sensations de froid peuvent être perçues par l'individu. Par contre, ces notions dépendent fortement du niveau d'activité ainsi que du climat et de la saison<sup>30</sup>.

Le bilan énergétique est perturbé pour de vitesses du vent importantes. D'un point de vue thermique, l'air reste agréable pour une vitesse jusqu'à 0.15 m/s en hiver et 0.2 m/s en été. A partir de ces seuils, des perturbations peuvent apparaître. Il faut aussi signaler que pendant les jours très chauds, des vitesses du vent jusqu'à 1.5m/s peuvent être perçues comme acceptables. Les vitesses supérieures de 4 m/s accentuent les échanges convectifs et perturbent le bilan thermique. De plus, les grandes vitesses provoquent la perturbation du mouvement, des vêtements, l'irritation des yeux, entraînant ainsi l'inconfort pour les usagers d'espaces extérieurs<sup>31</sup>.

---

28J. Vinet. Contribution à la modélisation thermo aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat, Ecole d'architecture de Nantes, 2000.

29 F. A. Toudert & H. Mayer. Numerical effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in a hot and dry climate. *Building and Environment*

30 Jacques Laravoire et al. Annexe nationale à la NF EN 1991-1-4 :2005, 2005. Disponible sous le lien <http://www.scribd.com/doc/14498865/Eurocode-NF-EN-199114>.

31 F. Thellier. Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Une approche de l'étude de confort. Tése de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, 1989.

Les apports du rayonnement solaire, la température de la voûte céleste ainsi que les phénomènes naturels comme la pluie et la neige sont des facteurs à prendre en considération quant à l'évaluation du confort thermique en extérieur. Les variations du rayonnement solaire ont comme résultat les pertes ou les gains de chaleur cutanée.

La thermorégulation physique du corps s'effectue selon différents modes : principalement par convection, rayonnement et évaporation et dans une plus petite mesure par conduction et respiration. En général, les exigences au confort thermique en espace intérieur sont caractérisées par les seuils suivants<sup>32</sup> :

- en hiver :  $T_{air} \sim 20^{\circ}\text{C}$  pour un taux d'humidité  $H=40-60\%$
- en été :  $T_{air} \sim 25^{\circ}\text{C}$  si  $T_{ext} < 30^{\circ}\text{C}$
- en été :  $T_{air} = T_{ext} + 5$  si  $T_{ext} > 30^{\circ}\text{C}$

L'humidité relative représente le pourcentage de vapeur d'eau contenu dans l'air par rapport à la quantité maximum que cet air pourrait contenir avant de se condenser. Plus la masse d'air est chaude, plus elle peut absorber de vapeur d'eau. Deux masses d'air qui ont des températures différentes vont contenir une quantité de vapeur d'eau différente. Cela explique le fait que, pour une humidité relative de 60%, l'individu ressent inconfort de  $30^{\circ}\text{C}$  alors qu'il ne fait que  $20^{\circ}\text{C}$ .

L'augmentation d'humidité d'un taux de 10% amène à une élévation de la température de l'air ressentie par l'individu<sup>33</sup> [CERTU 03].

## **9. Les études sur la micro climatologie urbaine et le confort thermique**

La ville est très souvent étudiée à travers l'analyse des rues canyons puisque il s'agit d'un élément "clé" du tissu urbain. Les caractéristiques principales de la morphologie d'une rue sont la largeur, la longueur, la hauteur des bâtiments ainsi que les propriétés des matériaux des façades. Elle peut être définie comme une unité géométrique de longueur infinie qui peut être traitée en 2D. Les études sur les rues canyons ont mis en évidence différents types d'écoulement selon les configurations géométriques, caractérisées par le rapport de la largeur de la rue (L) à la hauteur des bâtiments (H)<sup>34</sup>.

---

32 CERTU. Confort thermique. Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opérations de constructions publiques, 2003.

33 M. Balandraux. Confort thermique, température et humidité [Webpage]. 2007. Disponible sous le lien <http://www.medecine-preventive.ch/fra/humidite.php>.

CERTU. Confort thermique. Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opérations de constructions publiques, 2003.

34 J. Vinet. Contribution à la modélisation thermo-aérodynamique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieures. Thèse de doctorat, Ecole d'architecture de Nantes, 2000.

### 9.1. Canyon urbain

Un canyon urbain est une construction humaine qui reproduit de façon similaire un canyon naturel (Denis d'après Oke, 1971)<sup>35</sup>. Le canyon emprisonne la chaleur qui s'accumule causant une augmentation artificielle de la chaleur. Le résultat est un ICU sur la longueur. L'effet est accentué si le canyon est aligné Est-Ouest, l'ensoleillement y est alors constant.

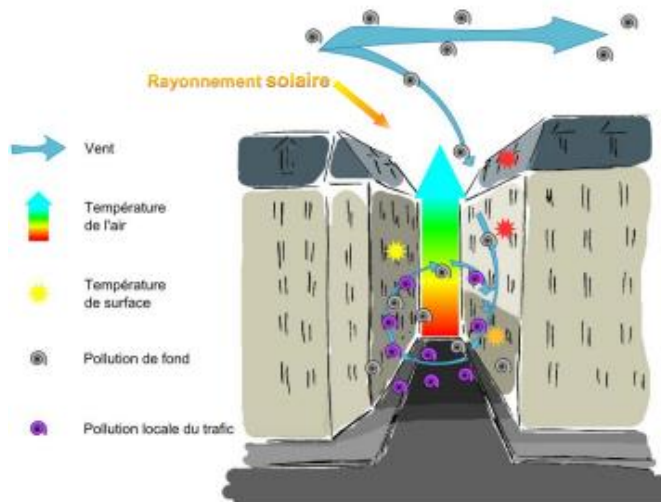


Figure 13 : Circulation de l'air dans un canyon urbain.  
source (Denis, 2014).



Figure 14 : Canyon urbain  
(photo: S. Meslin, 2010)

### 9.2. Forme urbaine

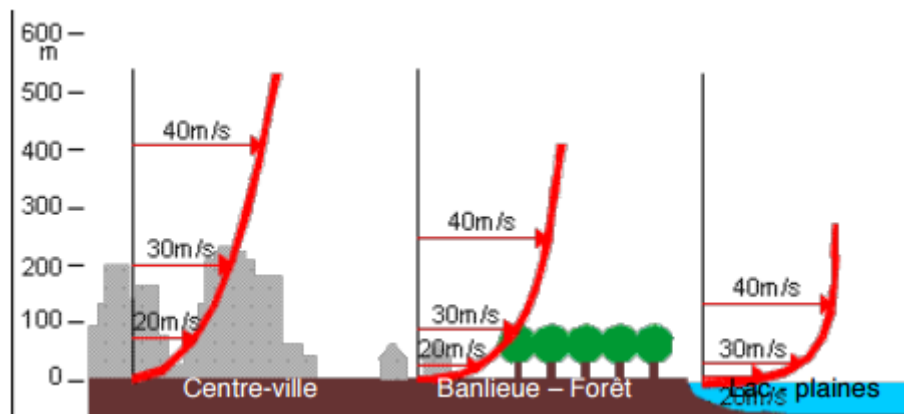
La forme urbaine correspond au rapport entre le bâti et les espaces libres à l'intérieur d'une ville selon des articulations et des dispositions spécifiques aux contextes sociaux, historiques, politiques et géographiques (Dubois d'après Antoni 2010). La forme urbaine influence le taux et les mécanismes par lesquels une ville se réchauffe et se refroidit (Dubois d'après Forkes 2010). Plus précisément, elle agit sur l'ICU à trois niveaux en modifiant : **1)** la vitesse et l'écoulement du vent dans le tissu urbain, **2)** l'exposition des surfaces au soleil et **3)** la vitesse du refroidissement radiatif.

De manière générale, les bâtiments constituent des obstacles non négligeables au passage du vent. Leur concentration sur le territoire d'une ville a pour effet d'en ralentir la course et d'en modifier localement l'écoulement.

La taille, la hauteur et la densité des constructions, de même que l'orientation des rues par rapport aux vents dominants, déterminent la vitesse et la nature des turbulences aérauliques engendrées par la ville (effet de sillage, de coin, tourbillon amont, effet de maille, de canalisation, de Venturi, etc.)<sup>12</sup>. De fait, plus la densité est élevée, moins la vitesse du vent au sol est grande.

La Figure ci-dessous illustre à cet égard qu'un vent de 30 m/s se trouve à une altitude approximative de :

- i) 50 m dans le cas d'un espace dégagé
- ii) 100 m au-dessus de forêts et de banlieues pavillonnaires
- iii) 200 m au-delà d'un centre-ville. Aussi d'ordinaire, la vitesse moyenne du vent chute de 20 à 30 % dans un centre-ville, mais les turbulences aérauliques s'accroissent de 50 à 100 % (Dubois d'après Sacre 1983). Cette situation réduit la capacité du vent de dissiper la chaleur en dehors de la ville l'été, ce qui exacerbe l'ICU. En contrepartie l'hiver venu, la même forme urbaine réduit les besoins de chauffage des bâtiments (Dubois d'après Forkes 2010). L'équilibre entre l'atténuation de l'ICU l'été et la diminution de la demande énergétique des constructions l'hiver est donc un enjeu réel pour les villes. D'autant que le changement climatique laisse envisager des hivers plus doux, la priorité pourrait éventuellement être donnée aux conditions du confort estival.



**Figure 15 : Variations de la vitesse du vent, selon l'altitude et la nature du sol.**

Source : Gratia et UCL - Architecture et Climat, 2000

Dubois, C., O. Bergeron, A. Potvin, et L. Adolphe. 2012. « Adapting cities to climate change: heat and urban form. » In Proceedings of the 8th International Conference on Urban Climates and the 10th Symposium of the Urban environment, 4. Dublin.



La forme urbaine détermine également le degré d'exposition des surfaces construites au rayonnement solaire. Comparé à un terrain plat et découvert (Figure 16a) un site construit (Figure 16b) comporte en effet plus de surfaces (murs, toits et chaussées) capables de recevoir cette énergie (Dubois d'après Yannas, 2001). Cette dernière est composée à hauteur de 5 % de rayons ultraviolets, de 43 % de lumière visible et de 52 % de rayons infrarouges, invisibles, mais ressentis sous forme de chaleur. Les surfaces bâties en ville sont exposées plus souvent au rayonnement solaire réfléchi et infrarouge qu'au rayonnement solaire direct étant donné la présence de bâtiments qui se portent mutuellement ombrage. Cette situation provoque des perturbations radiatives conséquentes : les villes réfléchissent moins, absorbent plus et dissipent moins rapidement l'énergie solaire que les milieux naturels.

Ces perturbations sont aussi intimement liées aux propriétés radiatives et thermiques des matériaux de revêtement, mais ces dernières sont présentées de manière spécifique.



Figure 16 : Rayonnement solaire et rayonnement infrarouge en milieux naturel et urbain.

Source : Catherine Dubois, 2014.

Les perturbations radiatives sont généralement étudiées au regard des canyons urbains. Ces derniers correspondent à des rues relativement étroites bordées par des bâtiments de plusieurs étages<sup>36</sup>. Au cours d'une journée, un même canyon urbain peut susciter des effets diamétralement opposés sur l'absorption et la dissipation de la chaleur. D'un côté, il génère un « îlot de fraîcheur » du fait de l'ombre des bâtiments les uns sur les autres. De l'autre, il constitue un « piège radiatif », car la chaleur y demeure emprisonnée en raison du jeu successif d'absorption et de réémission des rayons infrarouges par les différentes surfaces du canyon (Figure 16b).

36 US EPA. 2008. « Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies ». US Environmental Protection Agency (EPA). <https://www.epa.gov>

Le refroidissement radiatif se produit la nuit lorsque les infrarouges sont réémis vers la voûte céleste. Ce phénomène est notamment à l'origine des différences de températures nocturnes mesurées entre le centre et la périphérie d'une agglomération. L'impact de la forme urbaine sur la formation et l'intensité d'un ICU se mesure donc au niveau de la diminution de la vitesse du vent moyenne dans la ville, de la modification de l'exposition des surfaces au rayonnement solaire direct le jour et du ralentissement du refroidissement radiatif la nuit.

### 9.3. Morphologie des villes

Les centres villes des grandes métropoles, 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).

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 (Figure 17).

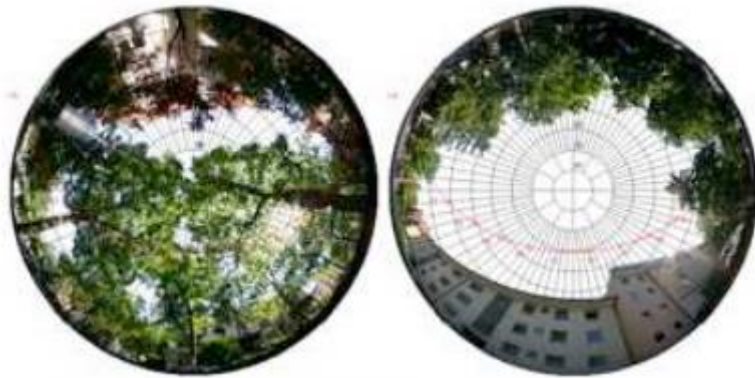


Figure 17 : Photographies grand-angle pour mesurer le facteur de vue du ciel.

Source : Florent Rullier 2012<sup>37</sup>

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.

---

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





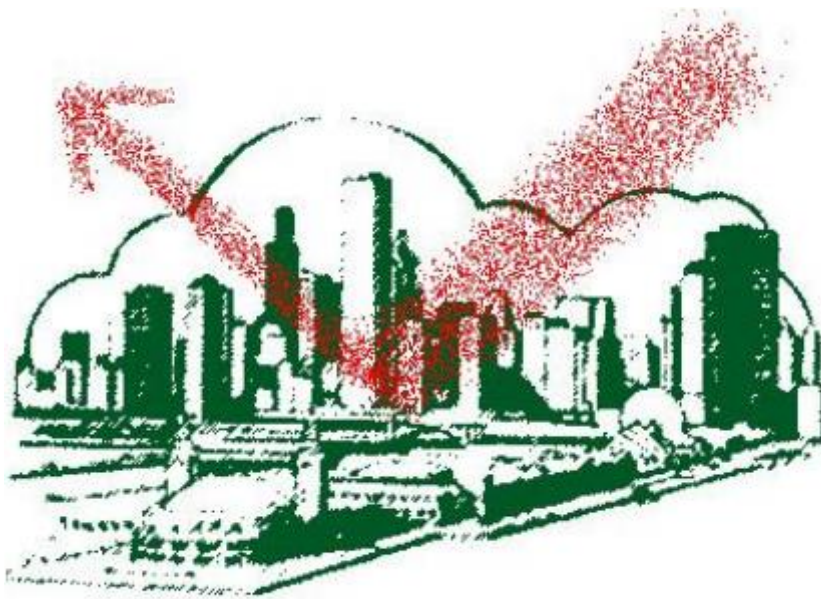






**CHAPITRE 2:**

*L'îlot de chaleur urbain*





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

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

1. Environ la moitié de la population mondiale est située dans une zone urbaine, et cette proportion devrait augmenter à 61 % d'ici 2030, soit près de cinq milliards d'individus<sup>38</sup>. Ceci signifie une demande accrue en énergie nécessaire à l'alimentation des services publics et privés d'une ville, et davantage de personnes exposées à des troubles liés au smog (Mélange de fumée et de brouillard stagnant parfois au-dessus des concentrations urbaines et industrielles) et aux effets des chaleurs accablantes;
2. Les fortes températures au sein d'une ville nécessitent plus d'air climatisé pour les citoyens, contribuant à augmenter les émissions de GES dans l'atmosphère favorables au réchauffement (D'après l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), les climatiseurs fonctionnent avec des fluides frigorigènes à base d'hydrofluorocarbures (HFC) dont le pouvoir de réchauffement est 2 000 fois plus élevé que celui du CO<sub>2</sub>, le plus connu des gaz à effet de serre responsables du changement climatique)<sup>39</sup>;
3. La plupart des GES qui contribuent au changement global du climat proviennent des zones urbaines et de leurs industries. Ces émissions contribuent également à des modifications du temps et du climat à des échelles locales et régionales<sup>40</sup>.

## 7. Définition de l'îlot de chaleur urbain

Le concept d'îlot de Chaleur Urbain (ICU) désigne les écarts de température observés au même moment entre les milieux urbains et les zones rurales environnantes<sup>43</sup>. La première mise en évidence de cette observation remonte à plus d'un siècle, lorsque Howard en 1833, à la suite d'une étude scientifique sur le climat urbain, constate que les températures au centre de la ville de Londres sont plus élevées que dans les zones rurales périphériques<sup>44</sup>.

---

38 Food and Agriculture Organization, 2002 - <http://www.fao.org>

39 l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie : [www.ademe.fr/](http://www.ademe.fr/)

40 Groupe intergouvernemental sur le changement climatique (CØEC): <http://www.ipcc.ch>

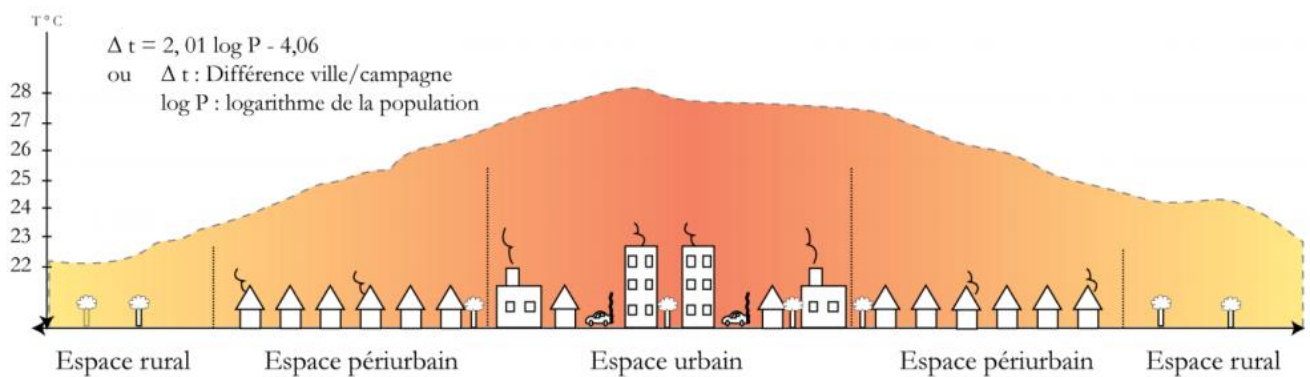
43 Guigère, M. 2009. Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. INSPQ.

[http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/988\\_MesuresIlotsChaleur.pdf](http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/988_MesuresIlotsChaleur.pdf)

44 Parmentier, A. 2010. Élaboration d'un outil d'aide à la décision pour atténuer le phénomène d'îlots de chaleur en milieu urbain. <http://espace.etsmtl.ca/311/>

Le phénomène d'ICU est caractérisé par son intensité, qui s'exprime par la différence entre la température de l'air de la zone urbaine étudiée et la température mesurée dans la périphérie rurale, faisant office de mesure de référence<sup>45</sup>. Cette intensité est noté  $\Delta T_{U-R}$ . Le profil d'un ICU est caractérisé dans la figure ci-dessous. Les observations déjà effectuées ont montrés que cette différence entre milieux urbains et milieux périphérique rurales peut aller jusqu'à 12°C (Guigère, 2009). Dans les villes de l'hémisphère nord, on note une différence de température en moyenne de 2°C<sup>46</sup>. L'intensité de ce phénomène varie selon les villes en fonction de leur climat, leur topographie, leur population, leur morphologie et enfin de leurs activités<sup>47</sup>.

L'intensité de l'ICU est généralement plus marquée lors de la nuit que pendant la journée. On remarque que le milieu rural se rafraîchit beaucoup plus vite que le milieu urbain en fin de journée. Les températures diminuent tout au long de la nuit et augmente rapidement lors du lever du soleil. Les nuits en milieu rural sont plus fraîches que dans le milieu urbain qui se refroidit plus difficilement. Enfin, le matin, les températures en milieu rural augmentent plus facilement qu'en milieu urbain. Les causes de ces observations sont décrites dans la partie suivante. Oke a démontré en 1973, que l'intensité d'un ICU est influencée par la densité de population de l'aire étudiée. Il a mis en évidence une relation entre la taille de la ville et l'intensité de l'ICU, en réalisant un calcul selon un logarithme de la population (figure 18). Plus la population et la taille de la ville est importante, plus l'intensité de l'ICU va augmenter.



**Figure18 : Profil d'un îlot de Chaleur Urbain.** source : ROUX Justine ,2014<sup>48</sup>

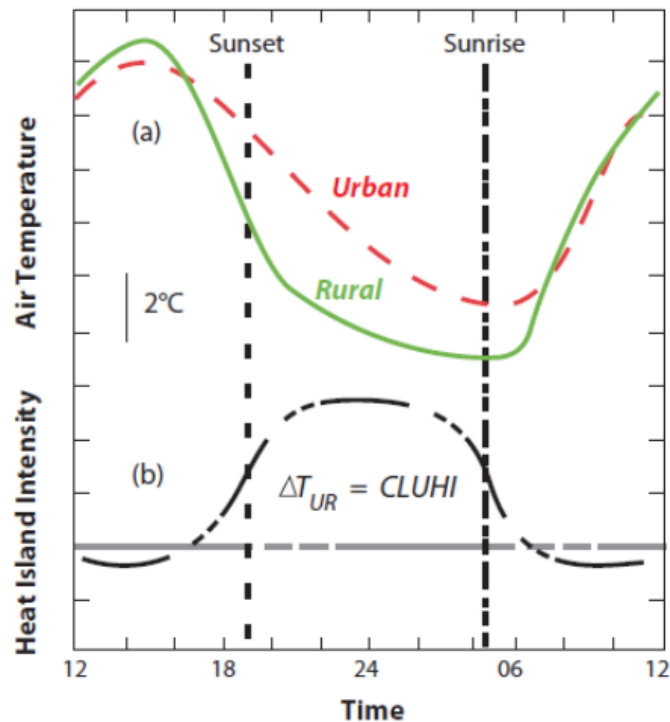
45 Oke, T.R. 1973. City size and the urban heat island. Atmospheric Environment (1967).

46 Taha, H. 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat.

47 Fan, H., and D. J. Sailor. 2005. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. Atmospheric Environment

48 ROUX Justine , Mémoire en vue de l'obtention du MASTER 1 Transports Mobilité Environnement Climat Juin 2014

Enfin, l'intensité d'un ICU atteint sa valeur maximale lorsque les conditions météorologiques présentent des conditions anticycloniques stables : un ciel dégagé et une vitesse de vent inférieur à 3m/s <sup>49</sup>.



**Figure 19 : Variation de la température en milieux urbains et ruraux lors de conditions météorologiques calmes (a) et de l'intensité de l'ICU (b).**

source : (Oke, 1987) Tiré de l'Agence de protection de l'environnement des Etats-Unis (EPA)<sup>50</sup>

Le fait que la différence de température soit plus marquée la nuit que le jour s'explique de plusieurs façons<sup>51</sup> :

- La première est que, compte-tenu de la rugosité du tissu urbain (voir § 4.2.3), 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.

49 Champiat, C. 2008. Prévention des effets sanitaires des vagues de chaleur : Élaboration d'une méthodologie d'identification des îlots de chaleur urbains sur le territoire du Grand Lyon. <http://blogs.grandlyon.com/plan-climat/files/downloads/2010/09/23509087-CHAMPIATMemoire-IGS.pdf>

50 US EPA. 2008. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies | Heat Island Effect. <http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm>.

51 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. Agricultural sciences. 2012.

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 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 (Florent Rullier 2012)<sup>51</sup>.

## **8. Types des îlots de chaleur urbains :**

On différencie classiquement trois types principaux d'îlots de chaleur urbains (Florent Rullier 2012). :

### **3.1. 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 de 10 à 15 °C supérieure d'une zone rurale avoisinante. De nuit, elle est de 5 à 10 °C supérieure (Florent Rullier 2012). 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 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, ou bien depuis le sol au moyen de thermomètres laser à télédétection thermique. 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 ».

### **3.2. 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 (Florent Rullier 2012)<sup>51</sup>. 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 20), le vent entre les bâtiments est affaibli et adopte un régime dont l'analyse montre des similitudes avec les mouvements d'air sous la canopée forestière (Florent Rullier 2012).

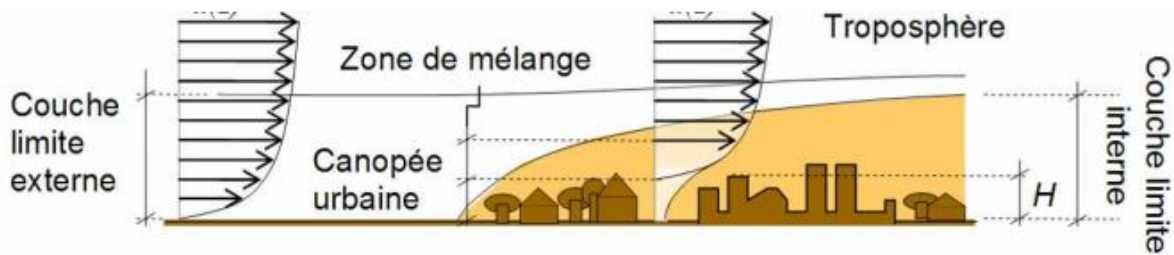


Figure 20 : Profil de vent dominant moyen en site homogène et en site urbain.

Source : Emmanuel Bozonnet, 2006<sup>14</sup>

### 3.3. 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 (Florent Rullier 2012)<sup>51</sup>.

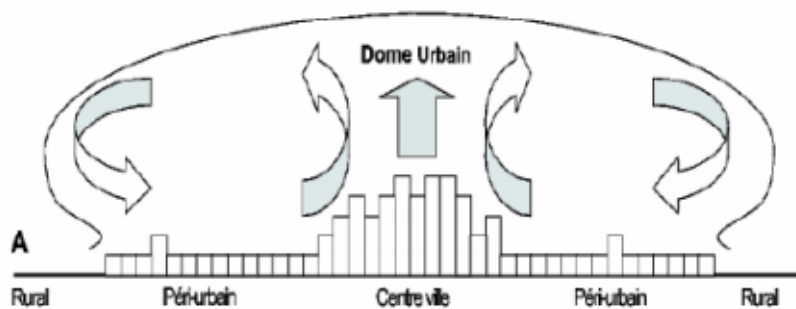


Figure 21 : Représentation théorique du dôme de chaleur qui se forme au-dessus d'une ville dans des conditions idéales d'absence de vent Source : Lemonsu, 2003<sup>52</sup>

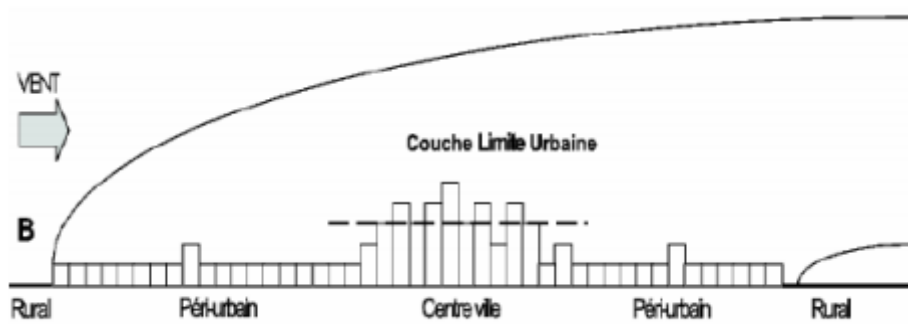
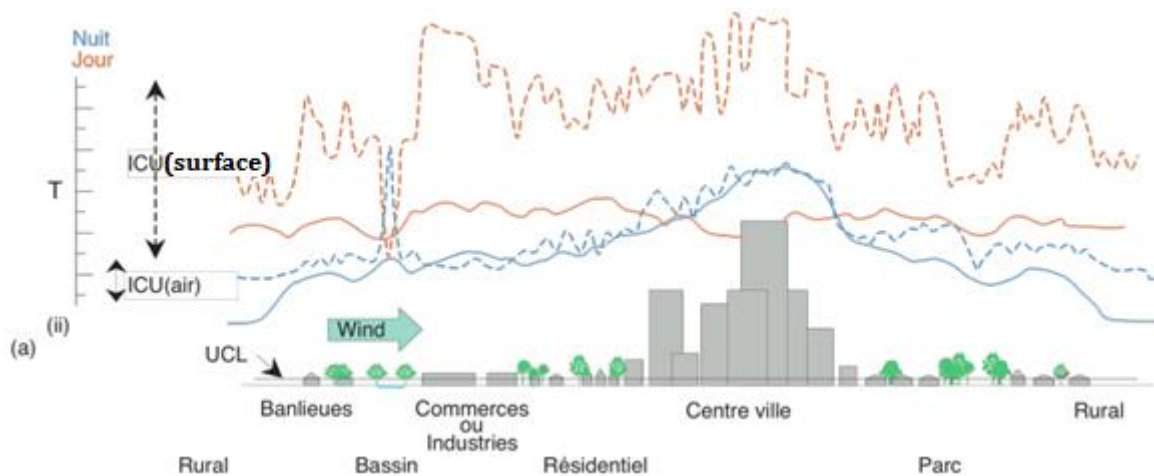


Figure 22 : Représentation théorique du panache de chaleur qui se forme au niveau de la couche limite urbaine en présence de vent. Source : (Lemonsu 2003)

<sup>52</sup> Lemonsu 2003, modélisation des processus de surface et de la couche limite en milieu urbain, CNRM

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 (Florent Rullier 2012)<sup>51</sup>.

- **schéma bilan**



**Figure 23 : Bilan des fluctuations de températures de l'air et de surface au cours d'une journée en fonction de la morphologie du territoire.** Source : (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.

#### 4. Les facteurs intervenant dans le phénomène

L'îlot de chaleur urbain (ICU) est un phénomène caractérisé par l'interaction de plusieurs facteurs.

Les facteurs naturels sont à l'origine des variations d'intensité quotidiennes et saisonnières des îlots de chaleur urbains. La couverture nuageuse et le vent ont notamment pour effet d'en diminuer l'intensité, car les premiers freinent l'apport de rayonnement solaire et le deuxième favorise la dissipation de la chaleur. De fait, l'ICU disparaît complètement lorsque la vitesse du vent excède les 40 km/h<sup>53</sup>.

53ONERC. 2010. Rapport au Premier ministre et au Parlement : villes et adaptation au changement climatique. Rapport au Premier ministre et au Parlement. France.

Sa forme et son intensité dépendent de la combinaison d'une série de facteurs naturels et humains, exposés à la Figure 24. L'encadré de gauche rassemble les facteurs naturels qui sont d'origine géographique ou météorologique. Le type de climat (continental, océanique, désertique, etc.), l'altitude et la topographie d'une ville appartiennent à la première catégorie. La couverture nuageuse, les vents et le rayonnement solaire appartiennent plutôt à la deuxième.

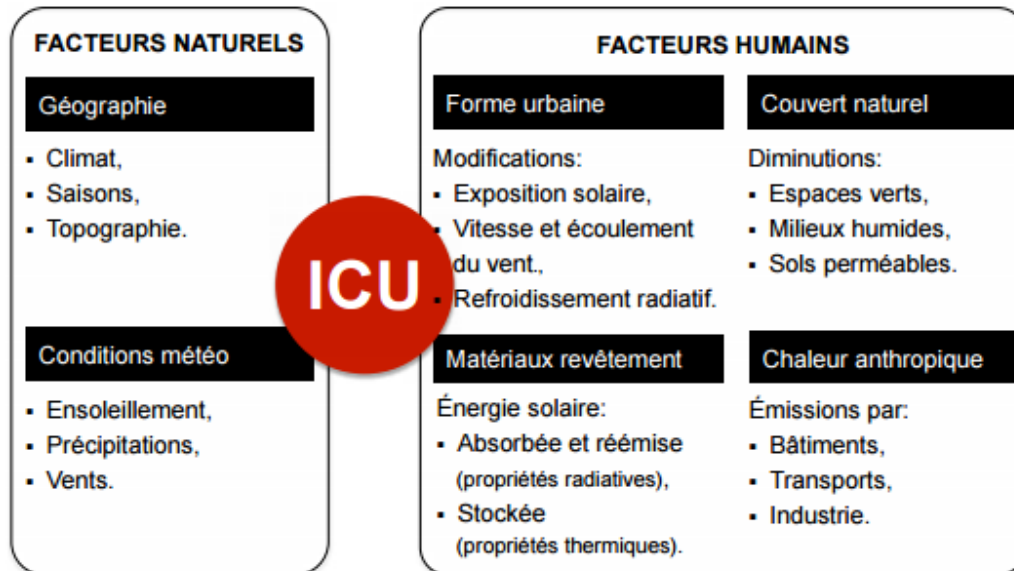


Figure 24 : Facteurs naturels et humains contribuant à la formation d'un ICU. Source : Catherine Dubois, 2014.

L'encadré de droite rassemble les facteurs humains pouvant conditionner la formation d'un îlot de chaleur urbain. Ces derniers, contrairement aux facteurs naturels, sont du ressort de l'intervention humaine. Les caractéristiques de la forme urbaine, l'emprise du couvert naturel dans la ville (le couvert naturel comprend les espaces verts, les milieux humides ainsi que les sols perméables), les propriétés des matériaux de revêtement et l'ampleur des émissions de chaleur anthropique font partie des facteurs humains.

#### 4.1. Processus mis en œuvre dans la rétention de la chaleur par le tissu urbain

De par ces caractéristiques structurelles et morphologiques, la ville est capable de stocker et de piéger la chaleur issue du rayonnement solaire.

##### 4.1.1. Rôle des propriétés radiatives et thermiques des matériaux

Les matériaux utilisés dans la construction des bâtiments et le revêtement des sols ont des propriétés optiques et thermiques favorisant la rétention de la chaleur par le tissu urbain.

12Dubois, C., O. Bergeron, A. Potvin, et L. Adolphe. 2012. « Adapting cities to climate change: heat and urban form. »



La journée, les propriétés optiques des matériaux de la ville gouvernent le stockage de la chaleur issue du rayonnement solaire incident direct. Ce processus va participer à l'augmentation de la température des surfaces<sup>54</sup> et ainsi au phénomène d'ICU dans la SL (couche de surface). Afin de représenter ces propriétés, les auteurs utilisent une grandeur appelée albédo (A). L'albédo correspond au pouvoir de réflexion d'une surface exposée à la lumière<sup>55</sup>. C'est une grandeur sans dimension, comprise entre 0 (pour une surface absorbant la totalité de la lumière incidente : corps noir) et 1 (pour une surface réfléchissant la totalité de la lumière incidente). Plus (A) est faible, plus la surface considérée va absorber l'énergie provenant du rayonnement solaire. Les matériaux constitutifs des villes présentent des albédos relativement faibles. Pour les villes européennes, l'albédo moyen est de 0,15 (Taha, 1997). Les matériaux de la ville présentent des émissivités, des conductivités thermiques et des capacités thermiques élevées<sup>56</sup>. A partir de la fin de la journée et pendant toute la nuit, ces caractéristiques vont être responsables de l'émission, sous forme de rayonnement infrarouge, de l'énergie stockée par les matériaux durant la journée<sup>57</sup>. Ce processus va se traduire par un transfert de chaleur, des matériaux au volume d'air du canyon urbain et ainsi alimenter le phénomène d'ICU au niveau de l'UCL.

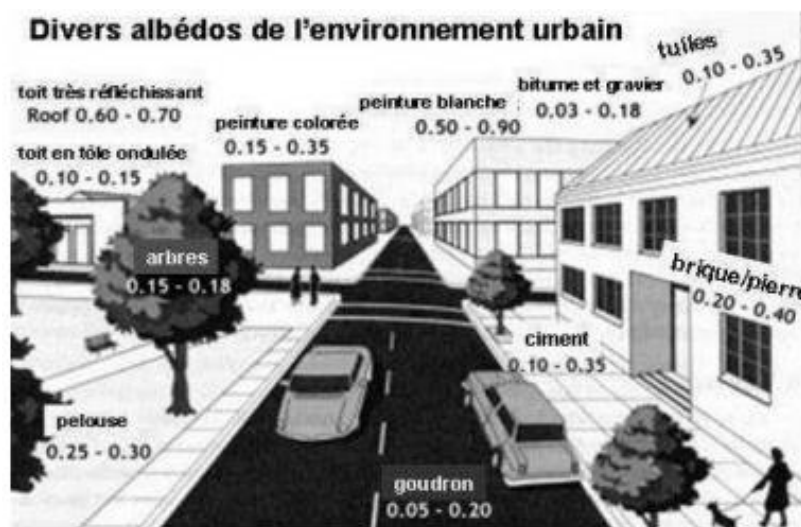


Figure 25: Les albédos de la ville. Source : Colombert, 2008<sup>58</sup>

54 OKE T.R., MAXWELL G.B., février 1975, « Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver »,

55 TAHA H., 1997, « Urban Climates and heat islands : albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat »

56 MILLS G., 2005. The Urban Canopy Layer Heat Island. IAUC Teaching Resources,

[http://www.epa.gov/hiri/resources/news\\_Jan05.html#story1](http://www.epa.gov/hiri/resources/news_Jan05.html#story1)

57 ACKERMAN S., 2007. Urban Heat Island, University of Wisconsin, Space Science and Engineering Center.

[http://icecap.us/images/uploads/URBAN\\_HEAT\\_ISLAND.pdf](http://icecap.us/images/uploads/URBAN_HEAT_ISLAND.pdf)

58 Colombert, M. 2008. « Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville ». France: Université Paris-Est.



#### 4.1.2. Rôle de la géométrie des canyons urbains

La géométrie des canyons urbains contribue à l'accumulation et à la rétention de la chaleur. La journée, les rayons solaires incidents sont piégés dans les canyons par les multiples réflexions qu'ils subissent sur les parois verticales du canyon. Ceci participe au stockage de la chaleur dans les matériaux constitutifs du canyon<sup>59</sup>. A partir de la fin de la journée, et durant toute la nuit, la faible ouverture vers le ciel dans les canyons urbains, va entraîner la capture de la chaleur réémise par les surfaces lors du processus décrit précédemment<sup>60</sup>. C'est la cause de l'absence de refroidissement nocturne de l'air des canyons urbains. Le Sky View Factor (SVF) est une grandeur qui permet d'apprécier l'interface hémisphérique de contact direct entre une surface située au centre du canyon et le ciel (Nakamura et Oke, 1988).

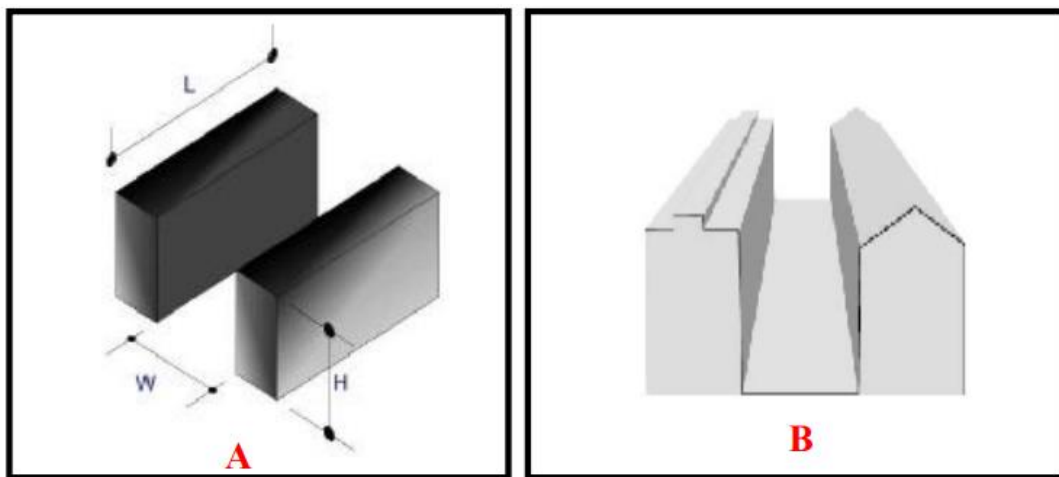


Figure 26: Le canyon urbain. **A** : Paramètres géométriques d'un canyon urbain **B** : Schéma d'un canyon urbain.

Source : TAREB, architecture basse énergie<sup>61</sup>

Plus le Sky View Factor est faible plus l'interface est petite. Ainsi dans les canyons urbains, on peut rencontrer des Sky View Factor très faibles, traduisant l'obstruction de l'horizon par les bâtiments. Cette grandeur permet de caractériser la capture de la chaleur s'échappant des surfaces vers le ciel. Plus le Sky View Factor sera faible, plus la chaleur s'échappera difficilement. La géométrie d'un canyon urbain est caractérisée par son Aspect Ratio (AR) (Oke, 1981).

59 NAKAMURA Y., OKE T.R., 1988, « Wind, temperature and stability conditions in an eastwest oriented urban canyon », Atmospheric Environment.

60 OKE T.R., 1981, « Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations », International Journal of Climatology.

61 TAREB, « Architecture Basse Energie », IN Energie dans l'environnement urbain, <http://www.learn.londonmet.ac.uk>.

Il s'agit du rapport de la hauteur moyenne des bâtiments délimitant le canyon (H) sur la largeur de la rue (W). Ce rapport permet de caractériser la capture des rayons solaires lors de leurs multiples réflexions sur les façades verticales du canyon. Il constitue également une bonne approximation du Sky View Factor (Mills, 2005)<sup>56</sup>. Ainsi, plus ce ratio est grand, plus le canyon aura tendance à capturer les rayons incidents et la chaleur réémise par rayonnement infrarouge à partir des surfaces.

#### 4.1.3. Rôle de l'exposition des surfaces au rayonnement solaire

L'exposition des surfaces au rayonnement solaire incident direct va influencer sur l'intensité du phénomène de rétention décrit précédemment. Plus les surfaces seront exposées, plus la chaleur stockée ou piégée sera importante. C'est la topographie et la morphologie du tissu urbain qui gouvernent l'exposition au rayonnement solaire.

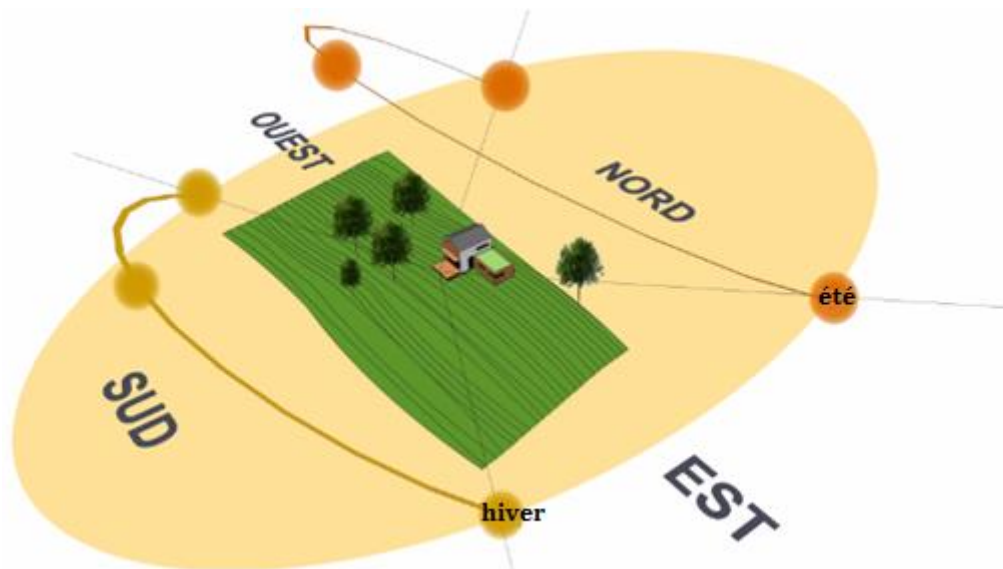


Figure 27 : course du soleil en été et en hiver.

source : <http://plusarchitectes.fr/architecture-bioclimatique-confort-et-bien-etre>

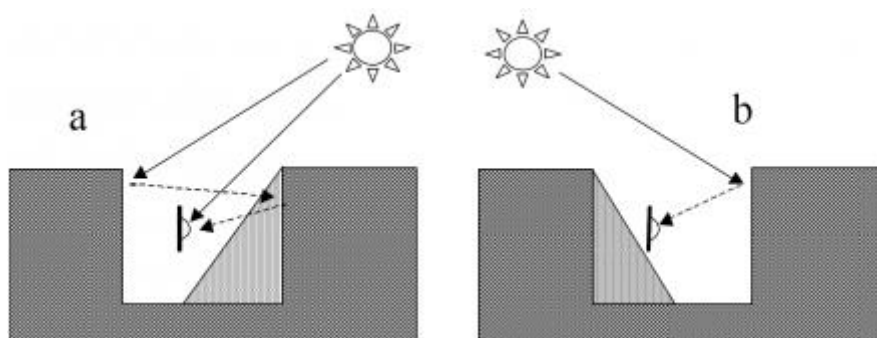
Si l'on souhaite s'intéresser à l'exposition des surfaces au rayonnement solaire, il faut dans un premier temps connaître la course du Soleil sur une journée. La figure 27 présente la course du Soleil en été, comme on peut la rencontrer aux latitudes des climats tempérés. On constate que les surfaces orientées au sud vont être les plus exposées, alors que le rayonnement solaire direct reçu par celles orientées au nord sera extrêmement faible.

#### 4.1.3.1. Exposition du relief au rayonnement solaire

Pour les lieux présentant un relief important, avec des courbes de niveau relativement resserrées, l'orientation des pentes va déterminer l'exposition du terrain au rayonnement solaire et donc l'exposition des zones urbaines qui y sont implantées. Ce n'est pas un paramètre que l'on retrouve dans toutes les villes. La littérature est assez pauvre au sujet de sa relation avec le phénomène des îlots de chaleur. Toutefois, dans le cadre d'Oran, où l'on rencontre des zones urbanisées implantées sur des reliefs comme Sidi el Houari, la topographie peut jouer un rôle dans l'exposition des surfaces au rayonnement solaire.

#### 4.1.3.2. Exposition des canyons urbains au rayonnement solaire

L'orientation des rues joue un rôle important dans l'exposition des surfaces au rayonnement solaire<sup>62</sup>. Elle détermine l'énergie solaire interceptée par les façades verticales et horizontales du canyon urbain. Les canyons orientés E-O, vont présenter, sur une journée estivale, des périodes d'exposition au rayonnement solaire direct plus grandes que les canyons orientés NE-SO, NO-SE et N-S, ces derniers représentant les canyons qui ont une période d'exposition la plus courte, concentrée en milieu de journée (Santamouris et al., 2004). Les canyons E-O, dont les façades qui le constituent sont orientées au nord ou au sud, reçoivent le maximum de rayonnement solaire au niveau du sol et des toits<sup>63</sup>. Le rayonnement diffusé est plus important le matin (figure 28a), quand le capteur fait face au soleil, que l'après-midi, quand il lui tourne le dos (figure 28a).



**Figure 28 : Explication du pic de rayonnement global observé le matin (a) et l'après-midi (b) pour un capteur vertical tourné vers l'ESE dans un canyon.** source : Pierre P. Kastendeuch<sup>64</sup>

62 SANTAMOURIS M., ADNOT J. et al., 2004, Cooling the cities, Paris : Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris

63 TERJUNG W. H., O'ROURKE P.A., août 1980, « Simulating the causal elements of urban heat islands », Boundary-Layer Meteorology

64 Pierre P. Kastendeuch, Modélisation du bilan radiatif et d'énergie d'un canyon urbain à Strasbourg

A contrario, les canyons orientés N-S, dont les façades sont orientées à l'est ou l'ouest, reçoivent la majeure partie du rayonnement solaire direct au niveau des surfaces verticales. Le gain d'énergie au niveau des façades reste toutefois limité car les rayons solaires incidents présentent des angles (par rapport à l'horizontal) faibles (Santamouris et al., 2004).

#### 4.1.3.3. Ombrage

Des études sur les températures de surface des zones urbanisées, ont montré que les surfaces à l'ombre pouvaient être jusqu'à 10°C plus froides que des surfaces exposées au rayonnement solaire direct<sup>65</sup>. L'ombre prodiguée par les arbres et certains bâtiments, en fonction de la course du Soleil, réduit au niveau des surfaces l'énergie issue du rayonnement solaire en s'opposant à la pénétration des rayons incidents directs.



Figure 29 : Masques et ombres portées. Source : Mathilde BUREAU<sup>66</sup>

#### 4.1.4. Pollution atmosphérique

Toutes les villes présentent des concentrations de polluants atmosphériques supérieures à celles du milieu rural. Cette pollution interagit avec le rayonnement solaire atteignant le tissu urbain. En absorbant le rayonnement solaire incident dans les faibles longueurs d'onde, la pollution diminue le rayonnement solaire incident reçu par les surfaces mais réémet des rayonnements infra rouge. Ce processus contribue à réduire la quantité d'énergie absorbée par les surfaces<sup>19</sup> mais réchauffe l'air des zones urbanisées polluées. Les composants atmosphériques en jeu dans ces processus sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et les particules. Ces deux effets antagonistes rendent difficile l'établissement d'une relation entre la pollution atmosphérique et les ICU, toute fois elle affecte la santé. La pollution atmosphérique est également responsable d'allergies et de maladies respiratoires.

65CHUDNOVSKY A., E. BEN-DOR E., SAARONI H., novembre 2004, « Diurnal thermal behaviour of selected urban objects using remote sensing measurements », Energy and Buildings.

66Mathilde BUREAU, étudiante à l'ENSAIA La fonction thermorégulatrice de l'arbre en ville, <http://web04.univ-lorraine.fr/ENSAIA/marie/web/ntic/pages/2012/bureau.html>

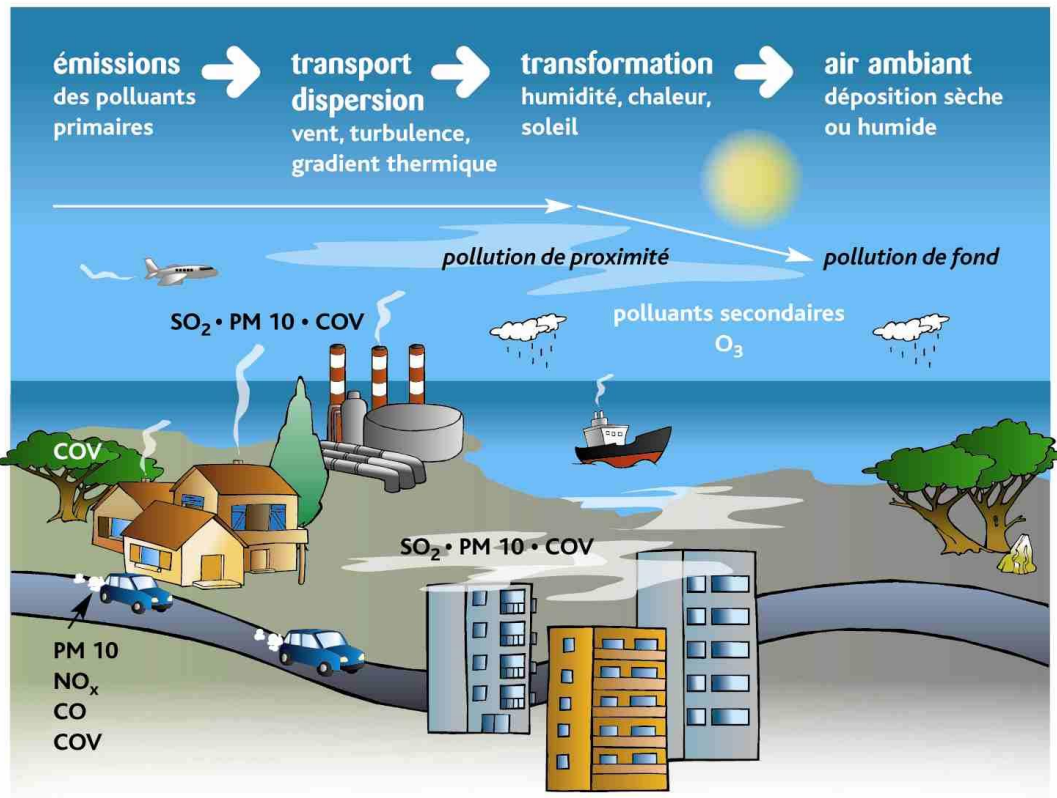


Figure 30: pollution atmosphérique. Source: TPE N.Y.O<sup>67</sup>

On a longtemps considéré qu'elle restait un facteur relativement faible dans le développement des ICU<sup>68</sup>. De récentes études ont montré que la différence de température entre une zone polluée et une zone non polluée est faible et peut prendre des valeurs positives ou négatives (Arnfield, 2003). Il est donc difficile d'affirmer aujourd'hui que la pollution atmosphérique est un paramètre favorable aux ICU.

#### 4.2. Perturbations de la dynamique des masses d'air

Toute perturbation de la dynamique des masses d'air a des conséquences météorologiques. La topographie et la morphologie du tissu urbain sont à l'origine d'obstacles ou de zones d'écoulement préférentiel pour les masses d'air. Les obstacles vont entraîner une diminution de la vitesse du vent et des turbulences dans les phénomènes de convection verticale de l'atmosphère, induisant une mauvaise circulation des masses d'air qui contribue au développement des ICU.

Les zones d'écoulement préférentiel, au contraire, vont augmenter la vitesse du vent, limitant ainsi le réchauffement l'air et favorisant le refroidissement des surfaces.

<sup>67</sup>TPE N.Y.O, <https://sites.google.com/site/tpehydrocarbures/effets-sur-l-atmosphere>

<sup>68</sup>LANDSBERG H.E., 1981, The urban climate, Academic Press.

#### 4.2.1. Rôle de la topographie

La topographie varie beaucoup selon la ville étudiée. Bien que la littérature fasse état d'une relation causale entre topographie et ICU (Landsberg, 1981)<sup>68</sup>, aucune des études consultées n'étudie cette relation. Dans le cadre d'Oran, ce paramètre ne doit pas être négligé car ce territoire présente des profils topographiques variés (zones encaissées, collines, plateaux, etc.) qui peuvent influencer sur la perturbation des masses d'air.

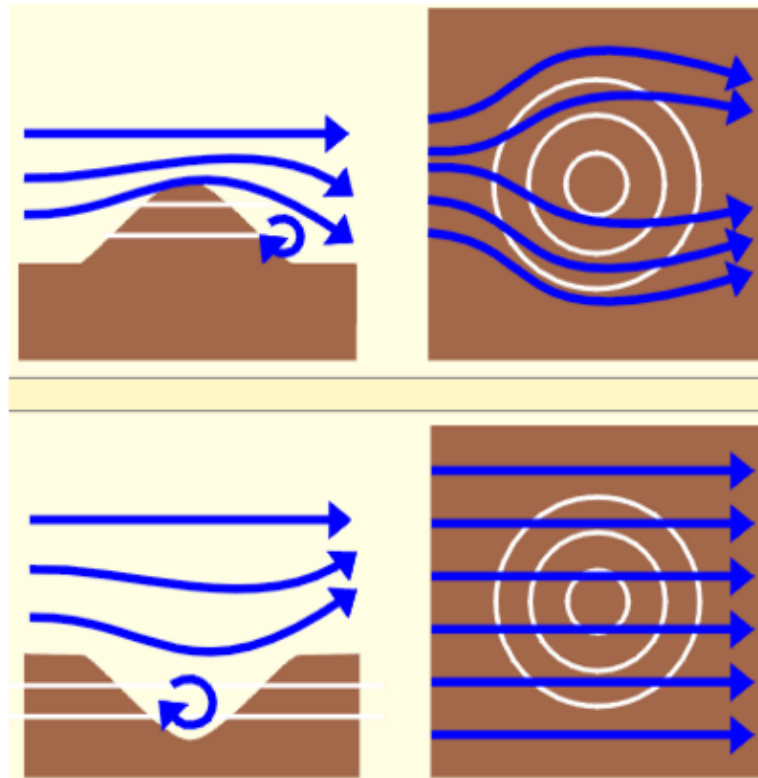


Figure 31: le flux de vent rencontrant une colline et une dépression. Source : M. Le Paige<sup>69</sup>

#### 4.2.2. Rôle de la géométrie des canyons urbains

Le bâti est responsable, par l'obstacle qu'il représente, de la perturbation des masses d'air au niveau de l'UCL (Chudnovsky, 2004). La géométrie des canyons urbains, caractérisée par l'Aspect Ratio, va gouverner les turbulences dans l'écoulement vertical par convection des masses d'air<sup>70</sup>. On constate en effet le développement de turbulences à partir de  $H/W=1$  (Nakamura et Oke, 1988). Ainsi, plus l'Aspect Ratio sera élevé plus les turbulences dans le canyon urbain vont contribuer au réchauffement de l'air dans l'UCL.

69M. Le Paige Architecture et Climat. - E. Gratia - A. De Herde (1998). Guide d'aide à la conception bioclimatique.

70 OKE T.R., SPRONKEN-SMITH R.A., JAUREGUI E., GRIMMOND C.S.B., octobre 1999, « The energy balance of central Mexico City during the dry season », Atmospheric Environment

L'écoulement dans une rue-canyon est constitué d'une recirculation dans le plan transversal à la rue et d'un écoulement longitudinal le long de la rue. Le détail de cet écoulement dépend de la géométrie de la rue et du vent extérieur (vitesse et direction)<sup>71</sup>.

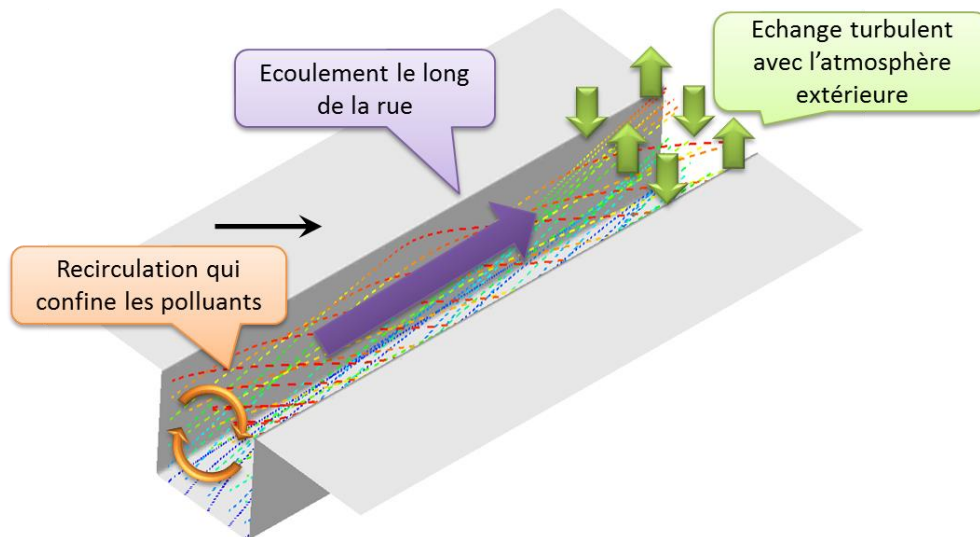


Figure 32 : Structure de l'écoulement dans une rue-canyon<sup>72</sup>

En raison du mouvement de recirculation qui confine l'écoulement transversal à la rue, la vitesse moyenne est nécessairement orientée le long de la rue. Cet écoulement longitudinal résulte d'un équilibre entre l'entraînement par l'écoulement extérieur et le frottement sur les parois de la rue. Moyennant ces hypothèses, [Soulhac et al., 2008](#)<sup>72</sup> ont montré que la vitesse dépend de :

- La vitesse du vent extérieur (quantifiée par la vitesse de frottement).
- L'orientation du vent par rapport à la rue.
- La hauteur (H) et la largeur (W) de la rue.
- La rugosité des parois des bâtiments.

Le bilan de masse de polluant à l'intérieur de la rue garantit l'équilibre des différents flux :

- La source de polluants due au trafic dans la rue.
- Le flux advectif ( Le flux advectif est le contenu en chaleur de la masse transportée par le matériel advecté par unité de temps)<sup>73</sup> de polluants importés par l'intersection amont.
- Le flux advectif de polluants évacués par l'intersection aval.
- Le flux turbulent de polluants échangés avec l'atmosphère extérieure au sommet de la rue.

<sup>71</sup>Modèles théoriques implémentés dans le logiciel SIRANE [http://air.ec-lyon.fr/SIRANE/Article.php?Titre=&File=&Id=SIRANE\\_Doc\\_Theorie&Lang=FR](http://air.ec-lyon.fr/SIRANE/Article.php?Titre=&File=&Id=SIRANE_Doc_Theorie&Lang=FR)

<sup>72</sup>Soulhac, L., Salizzoni, P., Cierco, F.-X. et Perkins, R. J., 2011. The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion: PART I: presentation of the model. Atmospheric Environment. Volume 45

<sup>73</sup><http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/advection-convection.xml>



### 4.2.3. Rôle de la rugosité du tissu urbain

La rugosité du tissu urbain traduit la propension de la ville à s'opposer à l'écoulement de l'air. Cette grandeur caractérise un phénomène macroscopique dont l'échelle est de l'ordre du kilomètre. La rugosité gouverne la diminution de la vitesse du vent au niveau de l'UBL. Plus la rugosité sera importante, plus la circulation de l'air au-dessus des toits de la ville sera perturbée, contribuant ainsi au développement de l'ICU au niveau de la couche de canopée urbaine.

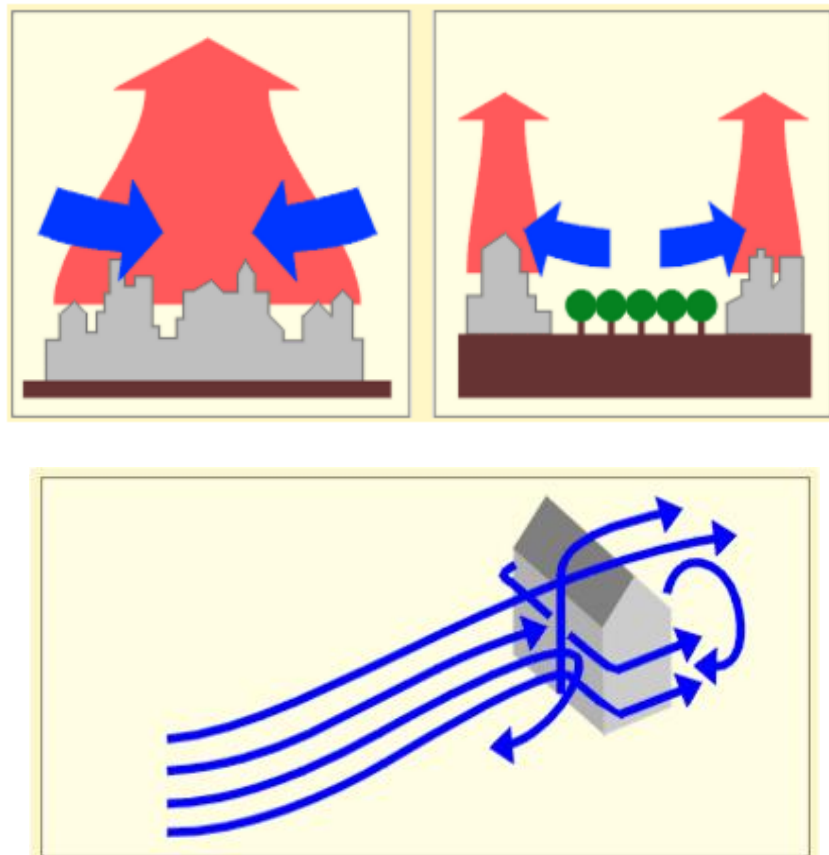


Figure 33 : l'écoulement de l'air et rugosité du tissu urbain. Source : M. Le Paige<sup>74</sup>

A l'heure actuelle, les méthodes mises au point pour évaluer la rugosité d'une surface urbanisée (maquettes en soufflerie, dispersion de traceurs dans l'atmosphère, modèles tri dimensionnel, etc.) et son influence sur les ICU ne font pas l'objet d'un consensus<sup>75</sup>.

74M. Le Paige Architecture et Climat. - E. Gratia - A. De Herde (1998). Guide d'aide à la conception bioclimatique.

75 RICHARD Y., « La ville : climat, pollutions et politiques » in RHONALPENERGIE ENVIRONNEMENT, 12 juin 2007.



### 4.3. Réduction de l'évapotranspiration

Dans le milieu naturel, le phénomène d'évapotranspiration (évaporation au niveau du sol et transpiration foliaire (évaporation de l'eau par les feuilles des plantes) contribue à rafraîchir l'atmosphère. Lors du processus d'évaporation, l'air réchauffé par les rayons du soleil cède de l'énergie à l'eau présente dans le sol ou dans les plantes<sup>76</sup>.

#### 4.3.1. Rôle de l'imperméabilité des surfaces

En ville, les surfaces sont principalement constituées de matériaux imperméables (goudron, ciment, etc.). Ainsi, lorsqu'il pleut, l'eau ruisselle jusqu'aux réseaux de récupération d'eaux pluviales et la surface de la ville sèche rapidement (Taha, 1997). Le phénomène d'évaporation est donc très limité sur les surfaces des zones urbanisées. Cela contribue au stockage, par les matériaux, de l'énergie issue du rayonnement solaire.

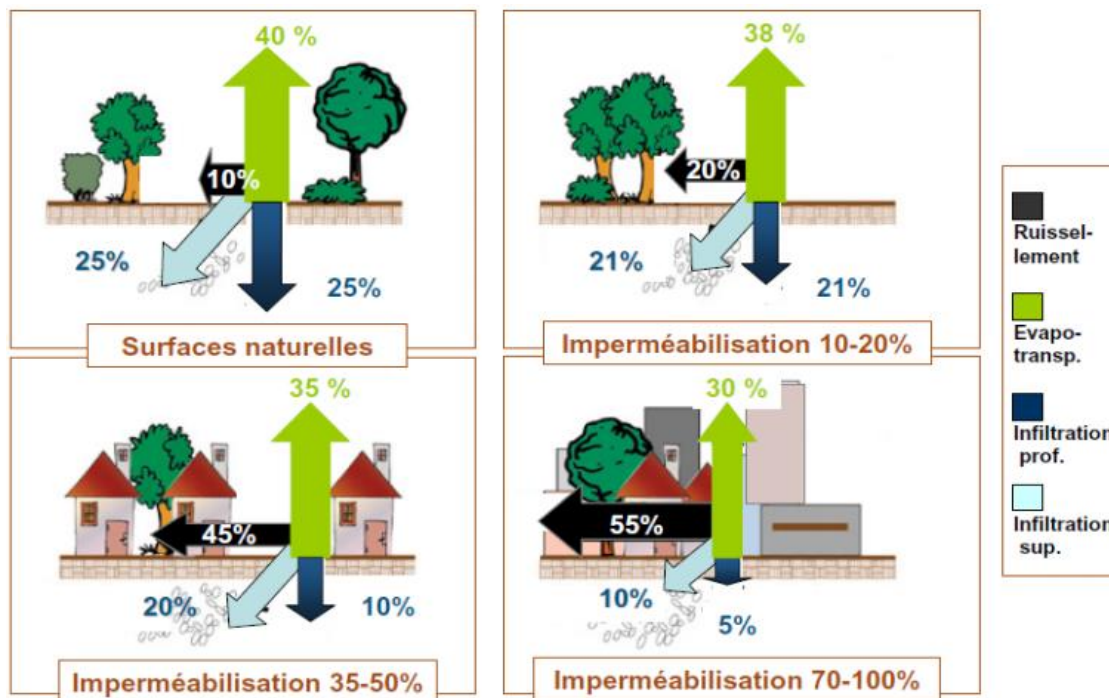


Figure 34 : Importance relative de l'infiltration du ruissellement et de l'évapotranspiration selon l'occupation des sols: exemples schématiques pour différents taux d'imperméabilisation

Source : BARRAUD Sylvie<sup>77</sup>

<sup>76</sup> ACKERMAN S., 2007. Urban Heat Island, University of Wisconsin, Space Science and Engineering Center. Disponible sur Internet : [http://icecap.us/images/uploads/URBAN\\_HEAT\\_ISLAND.pdf](http://icecap.us/images/uploads/URBAN_HEAT_ISLAND.pdf)

<sup>77</sup> BARRAUD Sylvie, Conférence sur : Le cycle de l'eau : incidence possible d'une action locale sur le fonctionnement d'un système, 2008

### 4.3.2. Rôle de l'eau

Grâce au rafraîchissement induit par l'évaporation, les masses d'eau (plans d'eau, cours d'eau, etc.) jouent un rôle protecteur contre les îlots de chaleur. Comme le montre une étude réalisée à Washington D.C., la surface du fleuve Potomac, qui traverse la ville, présente une coupure au niveau du phénomène d'ICU diurne (Landsberg, 1981)<sup>68</sup>. Les mêmes conclusions ont été établies pour les villes de Bonn et Beuel, en Allemagne, avec le Rhin (Landsberg, 1981).

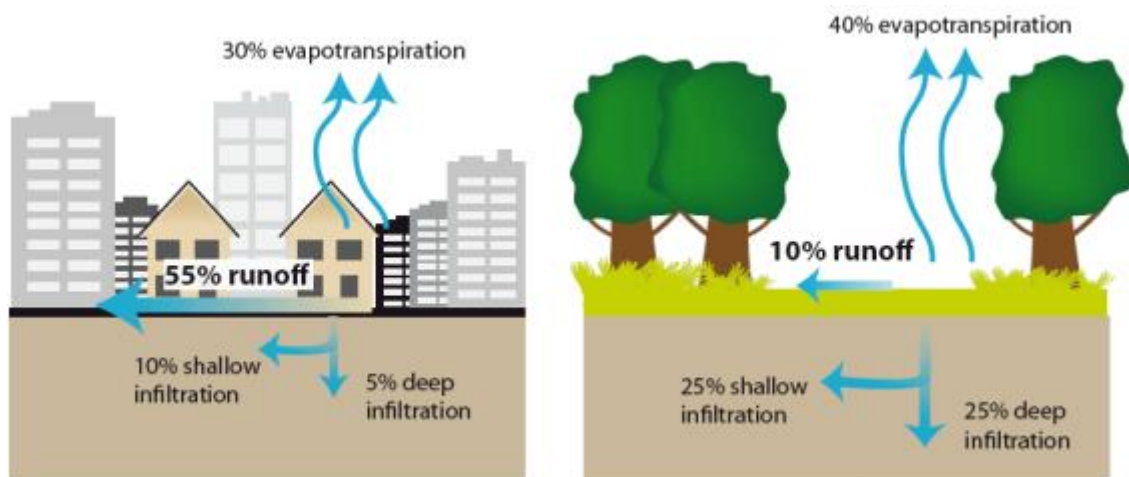


Figure 35 : Disponibilité de l'eau en milieu urbain et en milieu rural.  
Source : US Environmental Protection Agency, 2008<sup>78</sup>

### 4.3.3. Rôle de la végétation

La végétation est défavorable aux ICU pour deux raisons. D'une part, les surfaces accueillant de la végétation sont relativement perméables. L'eau présente dans le sol contribue à rafraîchir l'air et la surface par évaporation (Arnfield, 2003). D'autre part, la végétation, par transpiration foliaire, participe à l'évapotranspiration et donc au rafraîchissement de l'air. Les arbres sont les éléments de la végétation qui s'opposent le plus efficacement aux ICU. Ils présentent en effet une transpiration foliaire importante et apportent un ombrage protégeant du rayonnement solaire direct. En journée, les parcs urbains sont nettement plus frais que le reste de la ville. Ils présentent même des températures inférieures à la périphérie rurale. Certains auteurs parlent d'îlots de fraîcheur<sup>79</sup>. En été, l'après-midi, les parcs peuvent être 1 à 2°C, et jusqu'à 5°C, plus frais que leur environnement urbain (Spronken-Smith et Oke, 1988).

78US Environmental Protection Agency, 2008 : [https://www.usherbrooke.ca/environnement/.../Charland\\_K\\_2014-05-16\\_.pdf](https://www.usherbrooke.ca/environnement/.../Charland_K_2014-05-16_.pdf)

79 SPRONKEN-SMITH R. A., OKE T.R., 1998, « The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates », *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2085-2104.

La nuit, les zones boisées sont le siège d'îlots de chaleur nocturne de faible intensité, alors que les parcs comprenant de grandes surfaces enherbées restent plus frais que la ville de 1 à 2°C.

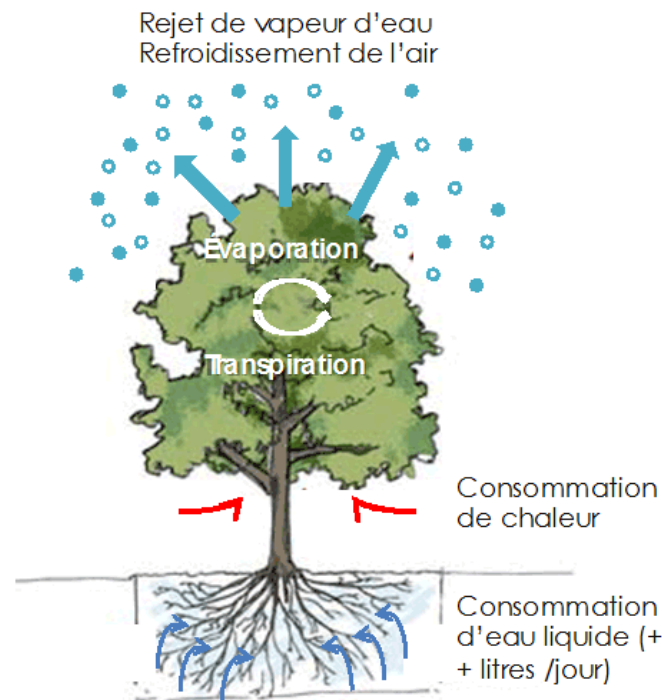


Figure 36: Évapotranspiration du végétal. source : Olivier PAPIN<sup>80</sup>

La nuit, les zones arborées piègent la chaleur libérée par le sol sous forme de rayonnement IR car leur géométrie occulte l'ouverture vers le ciel (Taha, 1997). Les zones boisées sont plus chaudes que la périphérie rurale mais restent néanmoins plus fraîches que le reste de la ville (Spronken-Smith et Oke, 1988).

La présence de végétation (arbres et végétation au sol) peut être caractérisée par l'Indice Différentiel de Végétation Normalisé (Normalized Difference Vegetation Index : NDVI). Cet indice est obtenu par télédétection à partir d'images satellites dans le visible et le proche infrarouge<sup>81</sup>. Sur l'image étudiée, il renseigne sur la quantité et l'activité de la végétation.

#### 4.4. Émission de chaleur par les activités anthropiques

Les activités humaines ont également un impact sur la formation et l'intensité des ICU.

<sup>80</sup> Olivier PAPIN – Bureau d'études ECIC à Bordeaux, BET spécialisé dans l'audit énergétique, le bilan carbone, le suivi d'exploitation et la maîtrise d'œuvre.

<sup>81</sup> WENG Q., LU D., SCHUBRING J., février 2004, « Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies », Remote Sensing of Environment

Les sources de chaleur que représentent les bâtiments (installations industrielles et bâtiments d'habitation), les transports et le métabolisme humain, contribuent à l'augmentation de la température de l'air des villes.

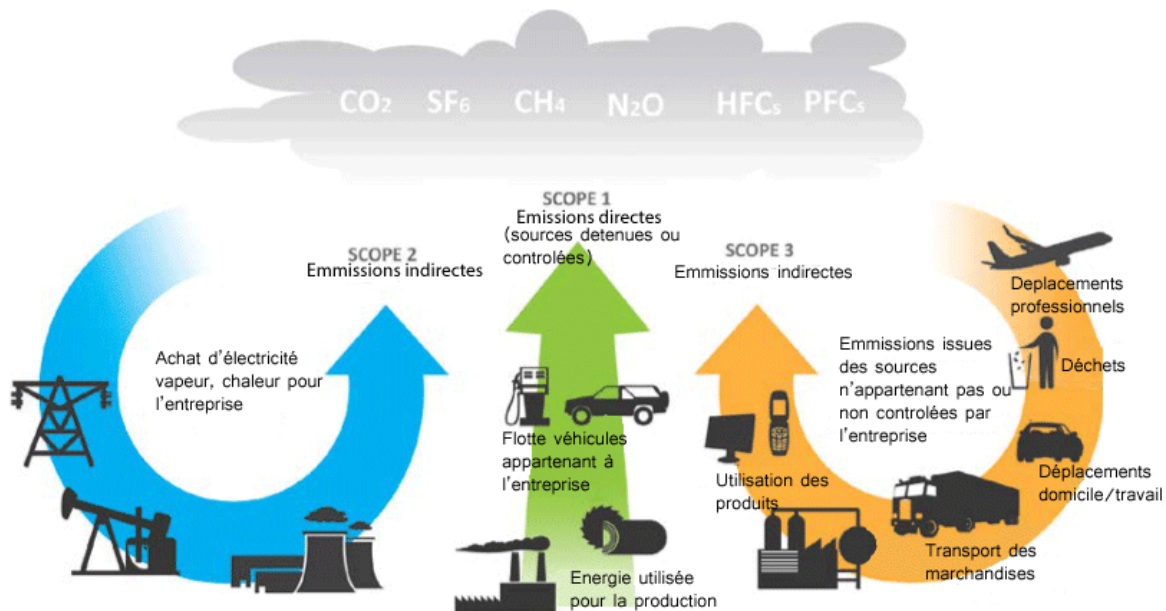


Figure 37 : émission des GES par différents secteurs. source :adème

Dans les études sur la relation entre chaleur anthropique et ICU, cet apport est exprimé sous la forme d'un flux de chaleur en  $W/m^2$ . Cette grandeur est la somme du flux de chaleur émis par chaque source (Sailor et Lu, 2004). L'impact de la chaleur anthropique sur le climat est négligeable en banlieue et à la campagne et n'a une influence sur les ICU que lorsqu'il est combiné avec d'autres paramètres favorables au phénomène. Dans ce cas il peut contribuer au réchauffement des zones urbaines à hauteur de 1 à 3°C (Taha, 1997 ; Ichinose et al., 1999 ; Fan et Sailor, 2005 ; Sailor et Lu, 2004). De tous les paramètres favorables aux ICU, la chaleur anthropique est celui qui contribue le moins au phénomène<sup>83</sup> (Taha, 1997 ; Ichinose et al., 1999 ; Sailor et Lu, 2004).

#### 4.4.1. Rôle des bâtiments

Les sources fixes de chaleur anthropiques sont les installations industrielles et les bâtiments d'habitation.

<sup>82</sup> SAILOR D. J., LU L., juin 2004, « A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas », Atmospheric environment

<sup>83</sup> ICHINOSE T., SHIMODOZONO K., HANAKI K., octobre 1999, « Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo », Atmospheric Environment

La littérature regroupe ces sources sous le terme « bâtiments ». C'est la consommation énergétique des bâtiments qui produit de la chaleur

En été, cette chaleur représente 48% de la chaleur anthropique totale (Sailor et Lu, 2004) et provient des activités industrielles et de la climatisation.

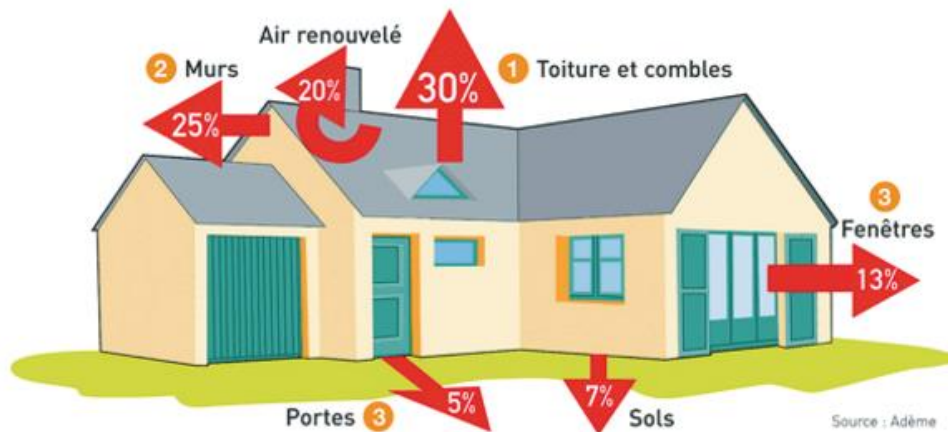


Figure 38 : Perte de chaleur dans une maison. source : ademe, www.ademe.fr

#### 4.4.2. Rôle des transports

Dans les villes, la chaleur émise par les transports représente une part importante de la chaleur anthropique totale. En été, cette chaleur représente 50% de la chaleur anthropique totale (Arnfield, 2003 ; Sailor et Lu, 2004). Les études à ce sujet quantifient l'apport des transports à la chaleur anthropique totale grâce au flux de chaleur émis par les véhicules ou grâce au profil horaire du trafic routier et au caractéristiques des voies circulables (Sailor et Lu, 2004).



Figure 39 : Comparaison des émissions de CO<sub>2</sub> entre les différents modes de transport.

Source : commission européenne : [ec.europa.eu/index\\_fr.htm](http://ec.europa.eu/index_fr.htm)



#### 4.4.3. Métabolisme humain

La chaleur issue du métabolisme humain est aussi prise en compte dans la chaleur anthropique totale. Cet apport peut toutefois être négligé, car il ne représente que 2% de la chaleur anthropique totale (Sailor et Lu, 2004), et n'aura qu'une influence très limitée sur les ICU.

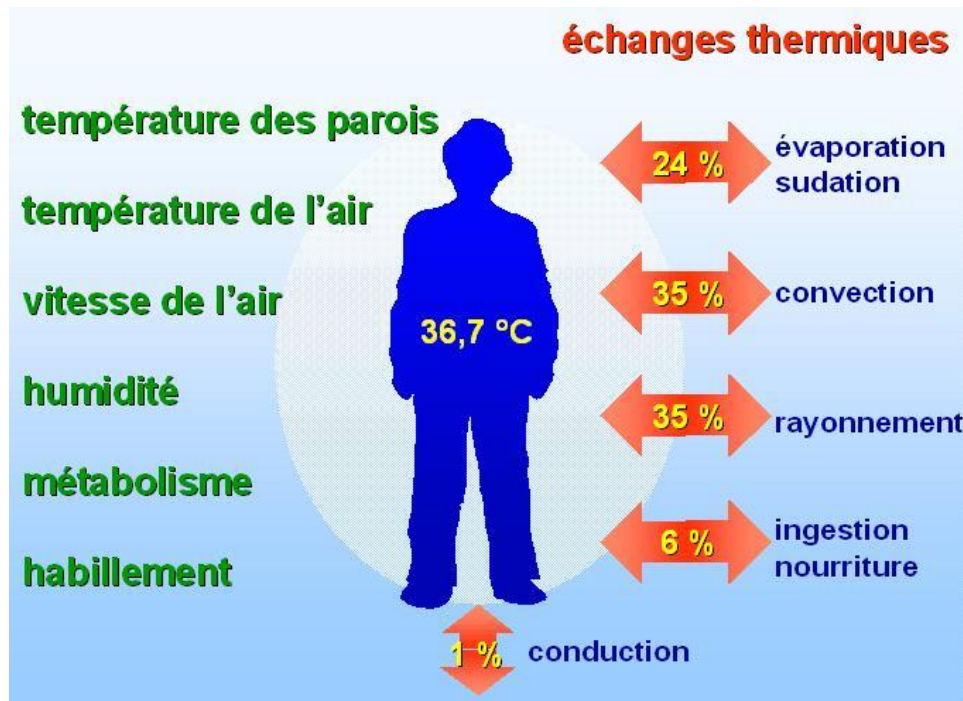


Figure 40: La diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance.  
source : [www-energie2.arch.ucl.ac.be](http://www-energie2.arch.ucl.ac.be)

## 5. Méthodes employées dans l'identification des ICU

### 5.1. Mesures in situ

La méthode d'étude des ICU la plus classique est la réalisation de mesures de température de l'air au niveau de la couche limite urbaine (Oke et al., 1992) ou de la couche canopée urbaine<sup>84</sup> (Nunez et Oke, 1977 ; Spronken-Smith et Oke, 1998). Le calcul de l'intensité des ICU nécessite la mesure de  $T_r$  en un point de référence de la périphérie rurale<sup>85</sup>. Cette température est censée représenter la température de la zone étudiée si elle n'avait pas subi l'urbanisation. Il est possible d'utiliser des stations mobiles installées sur des véhicules pour caractériser les variations spatiales du phénomène<sup>86</sup>.

80 NUNEZ M., OKE T.R., 1977, « The energy balance of an urban canyon », Journal of Applied Meteorology.

85 SPRONKEN-SMITH R. A., OKE T.R., 1998, « The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates », International Journal of Remote Sensing, 19, 2085-2104.

86 HART M., SAILOR D.J. Assessing causes in spatial variability in urban heat islands magnitude, Portland State University: <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/127284.pdf>

Dans les études sur les ICU, de telles mesures ne sont pas utilisées seules. Elles sont souvent utilisées pour le calage de modèles informatiques<sup>87</sup>, statistiques ou cartographiques (Hart et Sailor, 2007).

### 5.1.1. Description de la méthode

Cette méthode a déjà été utilisée pour de nombreuses études d'îlots de chaleur urbain en France comme par exemple à Toulouse dans le cadre de l'expérimentation CAPITOUL (Canopy and Aerosol Particles Interactions in Toulouse Urban Layer)<sup>88</sup>. La méthode de classification UCZ (Urban Climat Zone) de Oke divise de façon théorique le milieu urbain en fonction de sa capacité à influencer le climat local. Ainsi, la méthode vise à classer l'espace selon les caractéristiques du tissu urbain responsable des variations climatiques à l'intérieur du milieu urbain. Le but d'une telle classification est de pouvoir regrouper des espaces urbains homogènes afin de les comparer en faisant varier le moins possible les différents facteurs modifiant le microclimat urbain. Oke définit 7 classes théoriques de zones climatiques urbaines en s'appuyant sur 4 grands critères, les deux premiers sont d'ordre qualitatif alors que les deux derniers sont quantitatifs :

- la description et « l'image » du milieu urbain : Oke décrit rapidement la caractéristique du milieu urbain (Structure urbaine, dimension du bâti, etc.) pour chaque classe ;
- la classe de rugosité issue de la classification de Davenport (2000) qui donne une idée de la rugosité du terrain étudié et donc de son influence sur les déplacements de masses d'air dans le milieu urbain;
- l'« aspect ratio », qui est un rapport entre la hauteur du bâti et l'espacement entre chaque entité du bâti, c'est une grandeur sans unité. Plus ce ratio est grand, plus le bâti est haut et dense (Très proche ou continu), et inversement.
- le pourcentage d'urbanisation ou d'imperméabilité du sol. C'est la proportion moyenne de surface imperméabilisée, le reste représente la couverture perméable (végétation, surfaces en eau, etc.). Plus cette valeur est élevée, plus le milieu urbain est anthropisé et est susceptible d'influencer la température en raison d'une réduction de l'évapotranspiration.

---

87 SZPIRGLAS J., VOOGT J.A., « A validation and performance assessment of the surface heat island model» in FACULTY OF GEOGRAPHICAL SCIENCES, Fifth International Conference on Urban Climate, 1-5 septembre 2003, Lodz, Lodz, Poland : University of Lodz, 2003

88 Houet, T., and G. Pigeon. 2011. Mapping urban climate zones and quantifying climate behaviors An application on Toulouse urban area (France). Environmental Pollution NUNEZ M., OKE T.R., 1977, « The energy balance of an urban canyon », Journal of Applied Meteorology

Les 7 classes UCZ (Urban Climat Zone) résultent de différentes combinaisons de ces 4 paramètres. De la classe 1 à 7, la méthode suit une régression de la densité urbaine.

La classe **UCZ 1** correspond au milieu urbain le plus dense et le plus développé, le bâti est haut, continu ou très proche. Dans la classification de base de Oke, cette première classe donne pour exemple les quartiers d'affaires américains caractérisés par des hauts buildings et un fort taux d'urbanisation. Dans cette classe, la rugosité et l'« aspect ratio » y sont fortement élevés et le pourcentage d'urbanisation est supérieur à 90%. Logiquement, c'est dans ce type de milieu urbain que l'ICU est susceptible d'être le plus marqué.

La classe **UCZ 2** quant à elle, présente un milieu urbain moins dense que la précédente, mais celui-ci reste très important. Pour Oke, l'UCZ 2 caractérise les centres villes anciens. L'espace urbain est très développé, le bâti présent est généralement de 2 à 5 étages et est soit continue, soit très proche. Le revêtement du bâti est souvent de brique ou de pierre. La rugosité et l'« aspect ratio » sont donc inférieurs à la classe UCZ 1. Enfin, l'UCZ 2 se caractérise par un taux d'urbanisation supérieur à 85%.

La classe **UCZ 3** représente globalement le milieu résidentiel dense d'une ville, que l'on trouve généralement dans la première couronne qui entoure le centre-ville. C'est un environnement urbain où le bâti est continu ou proche. Cet environnement est moins affecté par le phénomène de rugosité et l'« aspect ratio » devient moins élevé, le milieu est plus « ouvert » que dans les deux précédentes classes. Enfin, le taux d'imperméabilité se situe entre 70% et 85%.

La classe **UCZ 4** correspond aux zones d'activités qui présentent des spécificités importantes et en font une classe à part entière. Les secteurs d'activités (tertiaires ou industrielles) sont caractérisés par la présence d'un bâti peu élevé mais ayant une grande emprise au sol (entrepôts, usines, centres commerciaux, etc.). La surface au sol est très artificialisée en raison, non seulement des bâtis, mais aussi des surfaces goudronnées (parkings). Le taux d'imperméabilité varie de 70 à 95%. En revanche, ces secteurs urbanisés sont relativement « ouvert » en raison de la faible hauteur du bâti, la rugosité et l'« aspect ratio » y sont donc faiblement élevés.

La classe **UCZ 5** coïncide elle, à peu près, avec le pavillonnaire résidentiel périurbain. Le milieu est moyennement dense et se compose généralement de maisons individuelles de 1 à 2 étages. Le pourcentage d'urbanisation s'élève entre 35 et 65%. Enfin, la rugosité et l'« aspect ratio » sont moyennement importants.



La classe **UCZ 6** décrit un milieu urbain avec un paysage relativement ouvert. L'occupation du sol est mixte où l'on peut parfois trouver de grands bâtis tels que des infrastructures hospitalières, des universités ou un aéroport. Le taux d'imperméabilité est cette fois-ci inférieure à 40%. La rugosité et l'« aspect ratio » sont un peu plus faibles que la classe 5.

Enfin, la classe **UCZ 7** correspond à un environnement rural avec une prédominance d'éléments naturels, à savoir moins artificialisés (zones cultivées ou boisées). La rugosité et l'aspect ratio y sont très faibles et le pourcentage d'urbanisation est inférieur à 10%. De la classe 1 à 7, la méthode suit une régression de la densité du milieu urbain. La méthode est tout de même applicable, transposable, en amenant quelques modifications au niveau des valeurs de certains critères de la classification (Roux d'après Oke, 2004)<sup>89</sup>.

## 5.2. La Télédétection et son apport à l'ICU

La télédétection permet d'étudier les ICU de la SL (la couche de surface). L'imagerie satellite permet de mesurer trois grandeurs physiques relatives aux ICU de la couche de surface : la température de surface du terrain (Land Surface Temperature : LST) (CHAMPIAT d'après Weng et al., 2004)<sup>90</sup>, le NDVI et l'albédo. La télédétection offre l'avantage de pouvoir travailler à l'échelle de toute une ville et ainsi de pouvoir observer les variations spatiales de la température des surfaces sur un vaste territoire. De plus, les outils actuels offrent de bonnes résolutions (16 cm pour les prises de vue aérienne et 1,1 km pour une image satellite type Landsat ETM+ imagery (Weng et al. 2004)). En contrepartie, il s'agit d'une représentation de la réalité à un instant donné.

La télédétection présente toutefois un inconvénient majeur. Les images satellites et les prises de vue aériennes verticales ne permettent pas de mesurer la température des surfaces verticales. Les outils de télédétection ne rendent pas compte de la contribution des façades au phénomène des ICU. Ceci peut être corrigé par des prises de vue obliques, à l'aide caméras infrarouge placées à quelques centaines de mètres d'altitude au sommet de bâtiments (CHAMPIAT d'après Chudnovsky et al., 2004)<sup>90</sup>. Cette méthode se limite à un quartier et on perd l'étendue spatiale et la résolution offerte par l'imagerie satellite et la prise de vue aérienne. En raison des limites de ce type de méthodes, la relation entre température de surface et température de l'air, et donc entre ICU de la couche de surface et ICU de la couche de canopée urbaine, est encore difficile à établir.

89 ROUX Justine L'îlot de Chaleur Urbain à Dijon .Mise en place d'une campagne de mesures urbaines de la température, Université de Bourgogne, UFR Sciences Humaines, Département de Géographie.

90 Clément CHAMPIAT 2008, PREVENTION DES EFFETS SANITAIRES DES VAGUES DE CHALEUR Élaboration d'une méthodologie d'identification des îlots de chaleur urbains.

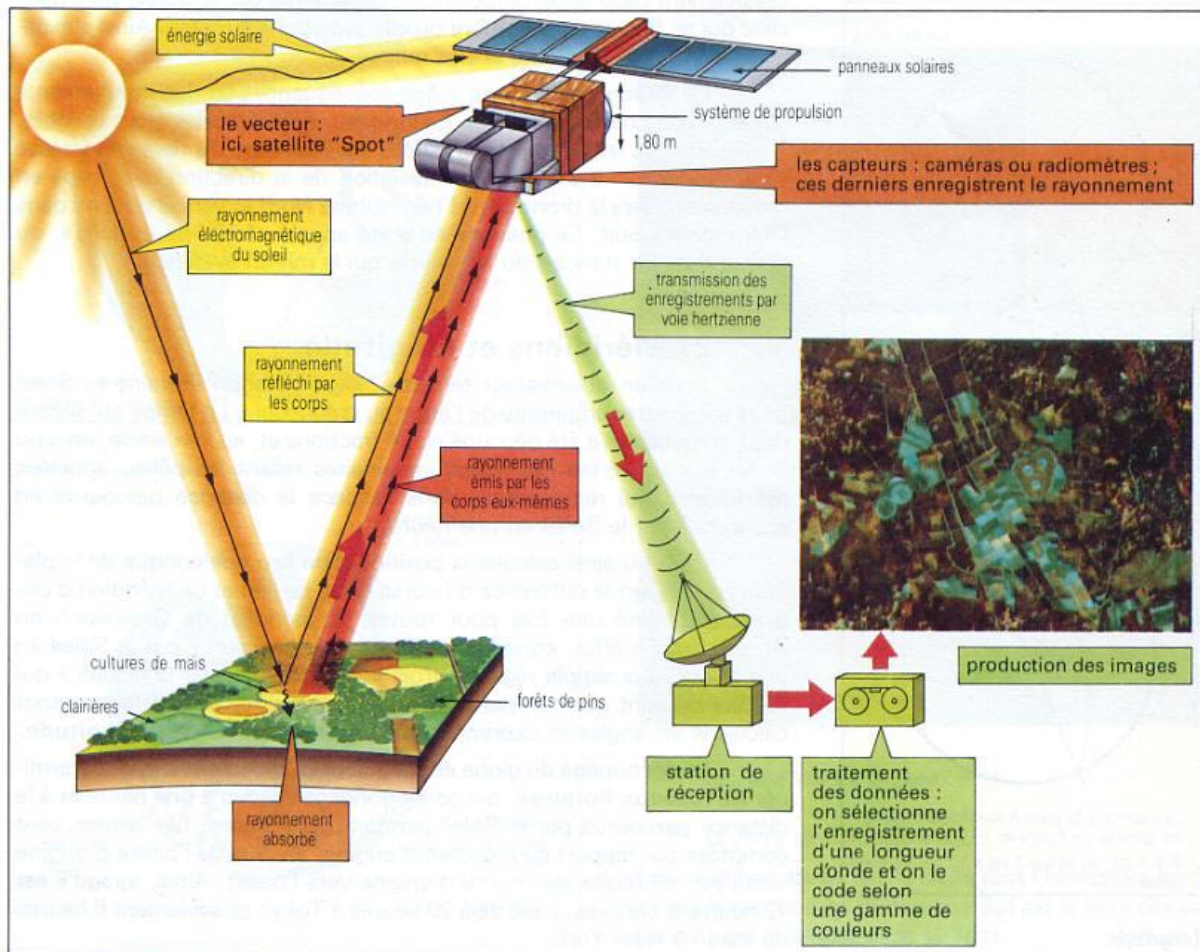


Figure 41 : Principe de la télédétection spatiale .Source : <http://www.alertes-meteo.com/>

La représentation du différentiel de températures en zone urbaine et en zone rurale, peut être réalisée grâce à des images obtenues par télédétection satellitaire, notamment dans l'infrarouge thermique, qui peuvent rendre compte de la température de l'air à 2 mètres de la surface du sol.

L'utilité de la télédétection optique se résume dans l'identification et la localisation des îlots de chaleur urbains par le traitement des images satellitaires et l'extraction des paramètres suivants :

- La température de l'air et du sol;
- La distance par rapport à l'eau ;
- L'indice de végétation normalisé ;
- Un indice d'imperméabilité des surfaces (IS) ;

### 5.2.1. La température de l'air et du sol

La télédétection optique permet la mesure de température par satellite de l'atmosphère à diverses altitudes, et l'estimation du profil vertical de température en utilisant la bande d'absorption du gaz carbonique, centrée sur 15  $\mu\text{m}$  qui se fait par interprétation des mesures de

capteurs sensibles à la luminance terrestre dans le domaine de l'infrarouge. Ces capteurs permettent de sonder l'atmosphère pour repérer les effets des îlots de chaleur urbains.

### 5.2.2. La distance par rapport à l'eau

L'eau joue un rôle de régulateur thermique car dans les périodes les plus froides de l'année, elle sera plus chaude que l'air, dans les périodes les plus chaudes sa température sera plus basse que l'air. Ce phénomène est qualifié d'inertie thermique. Et donc l'indice de la distance des îlots par rapport à l'eau peut nous renseigner sur la température.

### 5.2.3. L'indice d'imperméabilité des surfaces (IS)

Le calcul de l'imperméabilité des surfaces informe sur le degré d'anthropisation d'une région, mais aussi sur la quantité de matériaux ayant une masse thermique élevée et donc une forte capacité à capter et à stocker l'énergie provenant du rayonnement solaire.

Les surfaces fortement imperméables sont principalement des surfaces anthropiques comme les routes, les trottoirs, les cours et allées pavées, les stationnements et les toitures.

### 5.2.4. L'indice de végétation normalisé

Le NDVI permet d'estimer la quantité de végétation présente. Il se calcule à partir des bandes spectrales proches infrarouges et rouge du capteur.

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

Les plantes vertes absorbent une grande partie des radiations solaires dans une zone de longueurs d'onde appelée « PAR » (« Photosynthetically Active Radiation »), dont fait partie la zone du « Rouge ». Par contre, le « PIR » est fortement diffusé (non absorbé : transmis et réfléchi) par la plante. Par conséquent, une plante verte vive apparaît sombre dans le PAR (dont le rouge) car ces longueurs d'ondes sont absorbées par la plante (petite valeur de réflectance), et « brillante » dans le « PIR » car ces longueurs d'ondes sont réfléchies en partie (grande valeur de réflectance).

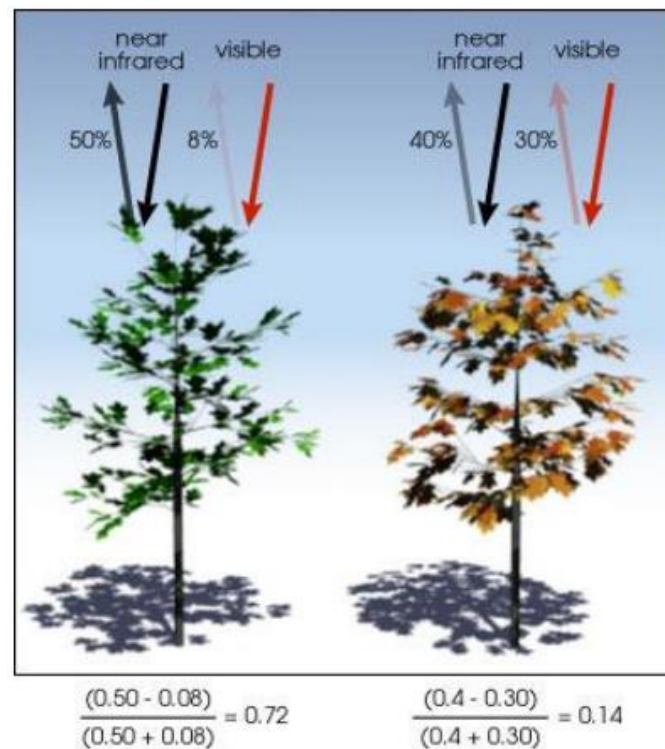


Figure 42 :Explication physique du NDVI. source :Robert Simmon, NASA GSF

Une végétation en bonne santé (gauche) absorbe la plupart de la lumière visible qui l'intercepte et réfléchit une partie importante de la lumière PIR. Une végétation en mauvaise santé ou clairsemée (droite) réfléchit plus de lumière visible et moins de PIR. Les chiffres de la figure ci-contre sont représentatifs de valeurs réelles mais la réalité est bien plus variée. Le NDVI est directement lié à l'activité photosynthétique des plantes et donc à la capacité d'absorption énergétique de la canopée du couvert végétal. Il agit comme indicateur de la biomasse chlorophyllienne des plantes. En termes de réflectance dans le PIR et le Rouge, la neige et les nuages se comportent à l'inverse des plantes vertes.

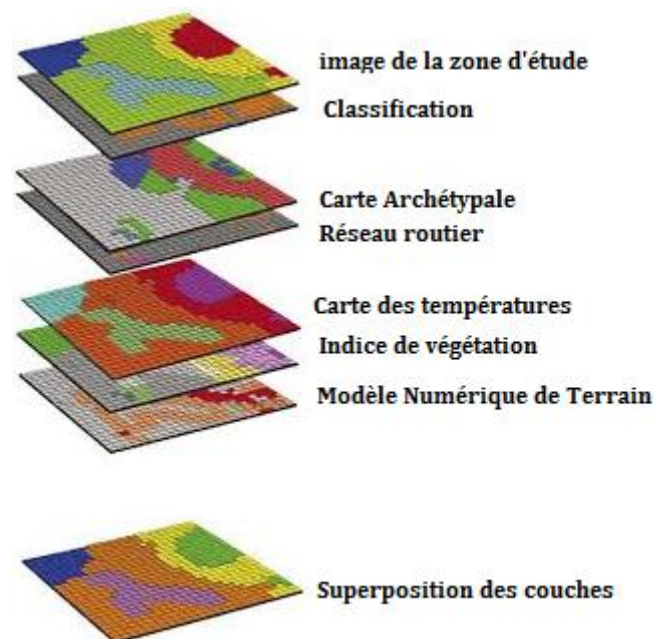
### 5.3. géomatique :

La géomatique est un outil efficace lorsque l'on souhaite étudier les disparités géographiques de variables liées à un phénomène commun. L'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans le champ des ICU est relativement récente et les études à ce sujet sont peu nombreuses. Deux études, réalisées à Lyon <sup>91</sup> et à Rennes (Quénol et al., 2007),

91 BRIDIER S., QUENOL H., KERMADI S., « Méthode d'analyse de la répartition des températures et de l'îlot de chaleur urbain à Lyon » in ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE, XXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Gènes, 2005

proposent de comparer la répartition du bâti et la topographie, supposé comme présentant une relation causale avec les ICU, avec des mesures de températures de l'air in situ et de températures des surfaces issues de la télédétection.

Les résultats de ces études montrent une relation étroite entre température élevée et bâti très dense. Au Québec, dans une vaste démarche d'étude des ICU dans une perspective sanitaire, une publication fait état de la mise en évidence des ICU de Montréal en croisant, à l'aide d'un SIG, données sur le tissu urbain et températures des surfaces<sup>92</sup>. Les résultats montrent que les températures au sol les plus basses sont observées près des plans d'eau et des parcs urbains, les plus élevées étant observées dans les secteurs industriels et les zones résidentielles présentant une forte densité de bâti. Une quatrième étude s'appuyant sur l'utilisation de la géomatique a été menée à Portland, aux Etats-Unis, entre 2006 et 2007 (Hart et Sailor, 2007). L'objectif de ce travail était de mettre en évidence la variabilité spatiale de l'intensité des ICU. L'étude a comporté trois étapes : campagne de mesures in situ, construction d'un modèle de régression statistique et cartographie des ICU à l'aide d'un SIG. Les résultats du modèle de cette étude montrent qu'une grande proportion de surface de canopée arborée dans une maille réduit le risque d'ICU alors qu'une proportion élevée de surface bâtie favorise le risque d'ICU.



**Figure 43 : les principales couches cartographiques utilisées pour déterminer, l'état actuel du territoire urbain.** Source : IlhamTRABELSI

92 LACHANCE G., BAUDOIN Y., GUAY F., mai-juin 2006, « Etude des îlots de chaleurs montréalais dans une perspective de santé publique », Bulletin d'information en santé environnementale: <http://www.inspq.qc.ca/pdf/bulletins/bise/BISE-17-3.pdf>

## 5.4. Modélisation

Des modèles informatiques ont été développés afin de simuler la répartition des températures et des flux énergétiques au sein d'un secteur urbanisé. Il existe deux types de modèle : les modèles atmosphériques, qui simulent la répartition des températures à l'échelle régionale et les modèles thermodynamiques, basés sur les échanges radiatifs et thermiques entre l'atmosphère et les surfaces du tissu urbain. Ces derniers simulent la répartition des températures à l'échelle intra urbaine

### ✓ modèles météorologiques appliqués à l'identification des ICU

**CSU MM** : le Colorado State University Mesoscale Model est un modèle mathématique mis au point à partir d'équations d'équilibre énergétique de la ville. Il s'agit d'une simulation des phénomènes atmosphériques permettant d'obtenir la distribution de température ou de chaleur (en  $W/m^2$ ) au sein d'un système tridimensionnel. Il est utilisé dans de nombreuses études et investigations des îlots de chaleur, en particulier lorsque l'on souhaite traiter la question de la chaleur anthropique, de l'évapotranspiration ou de l'albédo, par une approche thermodynamique et atmosphérique<sup>93</sup>.

**Modèle URBAN 3** : ce modèle simule les émissions IR de la ville en régime permanent. Il permet d'obtenir une représentation des ICU nocturnes en conditions optimales (Terjung et O'Rourke, 1980). Ce modèle n'est valable que pour des vitesses de vent proche de 0 m/s.

**SHIM** : le Surface Heat Island Model (SHIM), simule le refroidissement nocturne des murs, des toits et des routes à l'intérieur d'un canyon urbain, c'est-à-dire les émissions IR de la ville en régime permanent<sup>94</sup>. Il permet d'obtenir une représentation des ICU nocturnes en conditions optimales. Ce modèle n'est valable que pour des vitesses de vent proche de 0 m/s<sup>95</sup>.

**Modèle TEB** : le modèle Town Energy Balance, développé par le CNRM (Masson, 2006), permet d'obtenir des prévisions de température à l'échelle infra urbaine. Il modélise les échanges thermiques entre surfaces urbaines et atmosphère.

---

93 TAHA H., AKBARI H., SAILOR D., RITSCHARD R., 1992. Causes and effects of heat islands: sensitivity to surface parameters and anthropogenic heating, Lawrence Berkeley Lab: <http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/>

94 SZPIRGLAS J., VOOGT J.A., « A validation and performance assessment of the surface heat island model» in FACULTY OF GEOGRAPHICAL SCIENCES, Fifth International Conference on Urban Climate, 1-5 septembre 2003,

95 Masson V (2006) Lodz, Poland : University of Lodz, 2003. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. Bound-Layer Meteor



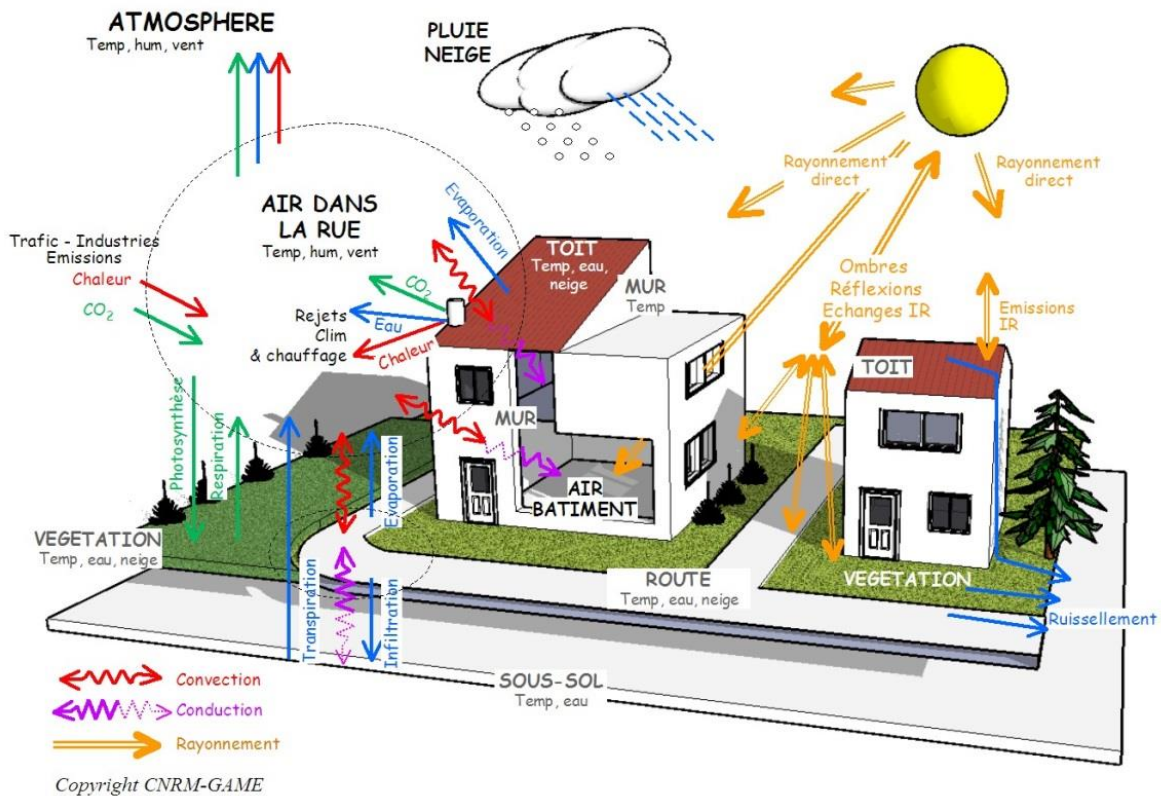


Figure 44: principe du modèle TEB. Source :CNRM

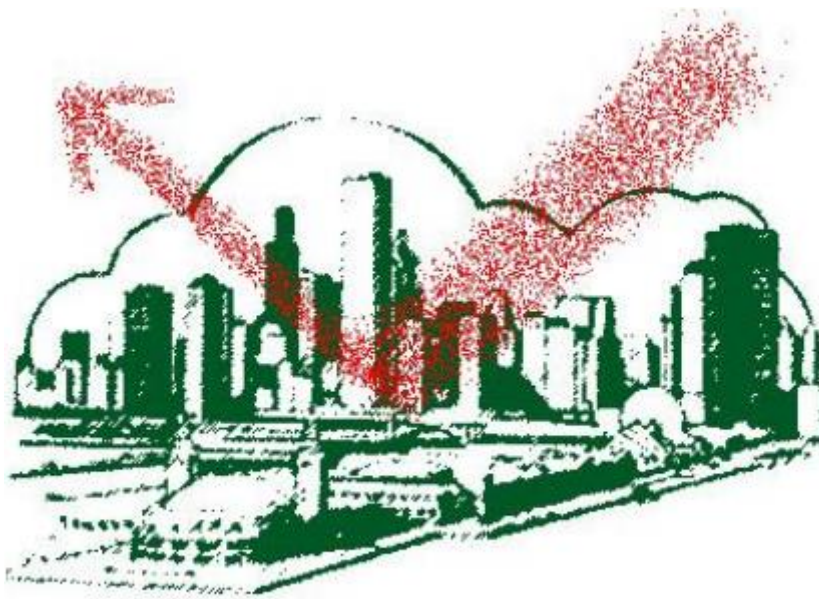
TEB prend en compte un schéma simplifié du bâti en 2D, de typologie de routes, de murs et de toits pour chaque quartier, une composition de l'atmosphère simplifiée entre les bâtiments, et les détails de phénomènes physiques influant sur le micro climat urbain (évaporation, échanges radiatif de chaleur, évaporation, etc.). Il est prévu que TEB soit intégré au modèle météorologique AROME de Météo France, permettant de simuler la météo des villes à une résolution de 2 km.





**CHAPITRE 3:**

*Outils géomatiques pour l'identification  
et la caractérisation des îlots de chaleur urbains*



## 2. La Télédétection dans l'infrarouge thermique

Les applications de l'imagerie dans l'infrarouge thermique couvrent des domaines divers, tels la météorologie, la gestion de l'environnement ou le renseignement militaire. Ces applications exploitent l'information radiométrique spatiale ou spectrale du territoire observé. Cette information est recueillie par des capteurs, et est délivrée aux utilisateurs sous forme d'une image représentative du terrain. L'acquisition de l'image résulte d'un système complexe, où interviennent divers phénomènes physiques et de multiples traitements liés aux sciences de l'information et de la communication (figure 46). Le système d'acquisition d'images de télédétection s'étend du territoire observé, à l'image du terrain fourni par le système. Celle-ci contient différentes mesures et caractéristiques géophysiques ou radiométriques décrivant le terrain. Ces mesures résultent de la combinaison d'un grand nombre de facteurs : radiométrie réelle caractérisant le paysage, interactions onde-matière et onde-atmosphère, traitements informatiques à bord (compression, égalisation...), mémoire de masse, transmission des données au sol, réception, déformatage, décompression..., restitution de l'information (déconvolution, débruitage...) et génération d'une image.

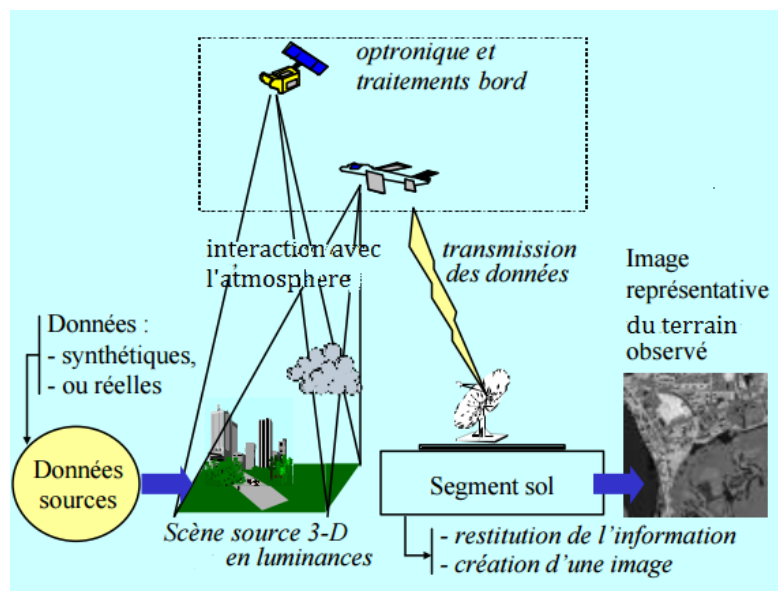


Figure 46 : illustration du système d'observation ; simulation à l'aide de données sources synthétiques ou réelles.

source : TRABELSI d'après Thierry Poglio<sup>96</sup>

<sup>96</sup>Thierry Poglio, Synthèse de paysages dans l'infrarouge thermique pour la simulation d'images de télédétection .THESE présentée pour obtenir le grade de Docteur en SCIENCES de l'Université de Nice - Sophia Antipolis Spécialité " Sciences de l'Univers "le 5 Nov 2013

Dans l'infrarouge thermique, le rayonnement provenant d'un objet est lié à la température de surface des objets, elle-même dépendante de la température régnant en profondeur. Cette complexité est essentiellement due au fait que<sup>97</sup>:

- les objets sont capables d'emmagasiner de l'énergie, puis de la restituer ; la température dépend ainsi à la fois des conditions actuelles et passées qui régissent le comportement des objets,
- les échanges énergétiques à la surface de la Terre n'interviennent pas uniquement par radiation, mais également par convection (influence du vent et de l'évaporation notamment) et par conduction (transfert de chaleur à l'intérieur des matériaux).

La prédiction du rayonnement provenant d'un objet donné dans l'infrarouge thermique nécessite la modélisation des flux d'énergie à la surface et à l'intérieur des objets, ainsi que leur évolution dans le temps. Le rayonnement global qui provient d'un objet se compose de deux parties distinctes, chacune ayant une origine physique différente. Les objets sont placés dans un environnement complexe, duquel ils reçoivent de l'énergie sous forme de radiations. Ces radiations sont dues à des sources aussi diverses que le Soleil, l'atmosphère, ou les autres objets qui composent le paysage. Lorsque ces radiations atteignent un objet, une partie est réfléchi et le reste est transmis ou absorbé. En général, les objets sont opaques : il n'y a pas de radiations transmises à travers les objets. Ceci n'est pas vrai pour certains objets comme les éléments végétaux, les verres, certains plastiques ... La partie du rayonnement incident absorbé interagit avec l'objet. Elle contribue à un accroissement d'énergie interne, qui se traduit par une augmentation de sa température.

D'autres échanges énergétiques perturbent l'équilibre thermique. Les échanges convectifs correspondent aux transferts énergétiques engendrés par les mouvements des masses de fluide. Les échanges conductifs, eux, correspondent au transfert d'énergie cinétique par collisions intermoléculaires. Lors d'un changement de conditions aux limites aux frontières d'un objet, un échange d'énergie a lieu par conduction, des frontières vers l'intérieur de l'objet ou réciproquement. Ces variations d'énergie contribuent à la variation de la température, et notamment de sa température de surface. En fonction de cette température, l'objet restitue au milieu environnant de l'énergie sous forme de rayonnement. Ce rayonnement correspond aux pertes radiatives et est appelé émission propre<sup>96</sup>.

---

97Asrar G., 1989. Theory and Application of Optical Remote Sensing. Chap 15 : quantitative aspects of remote sensing in the thermal infrared. Wiley series in Remote Sensing

### 6.1. Le rayonnement solaire

L'expression rayonnement solaire est utilisée pour désigner le rayonnement ayant pour source le Soleil. C'est un rayonnement directionnel qui dépend des angles zénithal  $\theta_s$  et azimutal  $\varphi_s$  sous lequel le Soleil est vu (figure 47). Au sommet de l'atmosphère, pour une surface orthogonale au rayonnement, il ne dépend que de l'excentricité de l'orbite terrestre. Au niveau du sol, il dépend en plus, de la composition de l'atmosphère et de la localisation de l'objet. En effet, suivant la position du Soleil, l'épaisseur d'atmosphère traversée varie. Au cours de cette traversée, une partie du rayonnement extraterrestre primaire est continûment absorbée par les aérosols et molécules composant l'atmosphère, contribuant ainsi à l'élévation de température de cette dernière. Ces mêmes aérosols et molécules réfléchissent une partie du rayonnement dans des directions différentes de la direction d'incidence du rayonnement primaire. Au niveau du sol, le rayonnement solaire global s'exprime en fonction de deux composantes :

- la composante directe, qui correspond à la partie du rayonnement solaire incident n'ayant subi qu'une atténuation mais pas de changement de direction,
- la composante diffusée, résultant de multiples réflexions et diffusions avec les aérosols et les molécules

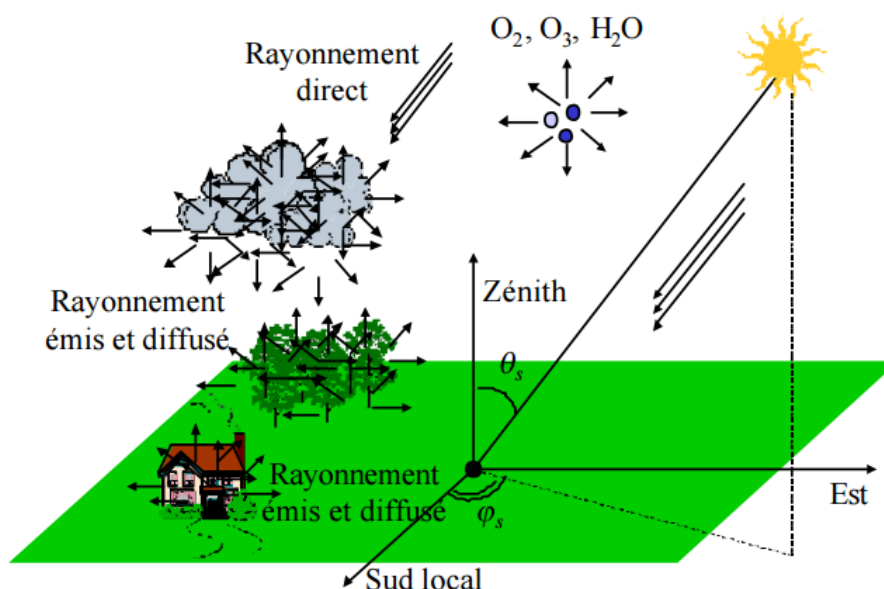


Figure 47: illustration de l'absorption, de la diffusion des rayonnements, et de l'émission par l'atmosphère et le paysage. Source : Thierry Poglio, 2013

## 6.2. Le rayonnement atmosphérique

Le rayonnement atmosphérique correspond au rayonnement émis par les différents gaz, aérosols et molécules, qui composent l'atmosphère. Ces gaz (O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, gaz rares, H<sub>2</sub>O, etc.) possèdent une énergie interne liée à leur température. La composition de l'atmosphère claire peut généralement être supposée figée, à l'exception néanmoins de la concentration en vapeur d'eau et du contenu en aérosols fortement variable, qui ont ainsi une influence importante sur le rayonnement émis. La variation de température de l'atmosphère se traduit également par des variations dans l'intensité de ce rayonnement.

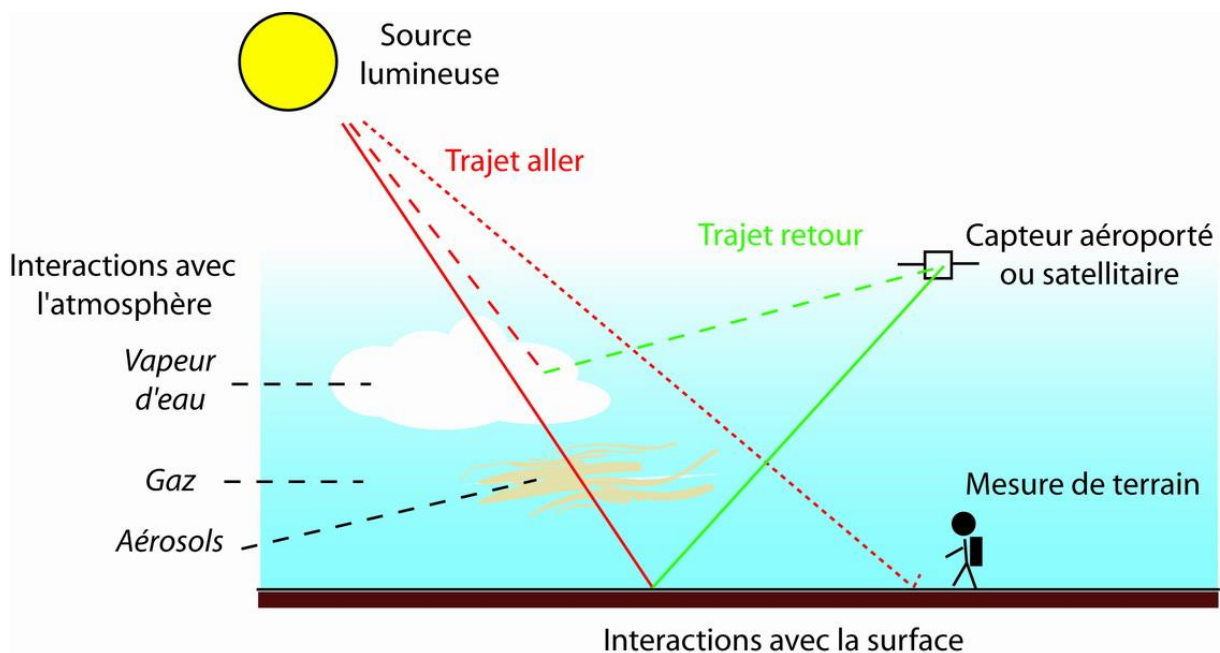


Figure 48 : Schéma du trajet parcouru par le rayonnement électromagnétique avant d'être analysé par un capteur. Dans le cas de données satellitaires ou aéroportées, le rayonnement subi deux fois l'interaction avec l'atmosphère<sup>98</sup>.

## 6.3. La température

La température d'un objet est une grandeur thermodynamique qui caractérise l'état d'excitation des particules, atomes ou molécules, qui le composent. Pour un objet à l'équilibre thermique, cette grandeur reste constante. Cependant, à la surface de la Terre, les objets qui composent un territoire ne sont pas isolés. Des interactions ont lieu à la surface des objets, sous forme radiative et convective, et à l'intérieur des objets et/ou entre les objets, par conduction. L'ensemble de ces variations contribue à faire varier la température des objets. Des sources (chauffages par exemple) doivent être considérées pour certains objets, et contribuent également aux variations de température.

<sup>98</sup> [http://harold-clenet.com/?page\\_id=250](http://harold-clenet.com/?page_id=250)

## 7. Traitement numérique des données de télédétection

Les méthodes de traitement numérique permettent d'utiliser au mieux des données de capteurs disposant de nombreux canaux. Les techniques de correction géométrique des images les rendent superposables à des cartes ou superposables entre elles, permettant des analyses multi-dates. Trois grands types de démarches peuvent être distinguées (figure 49) :

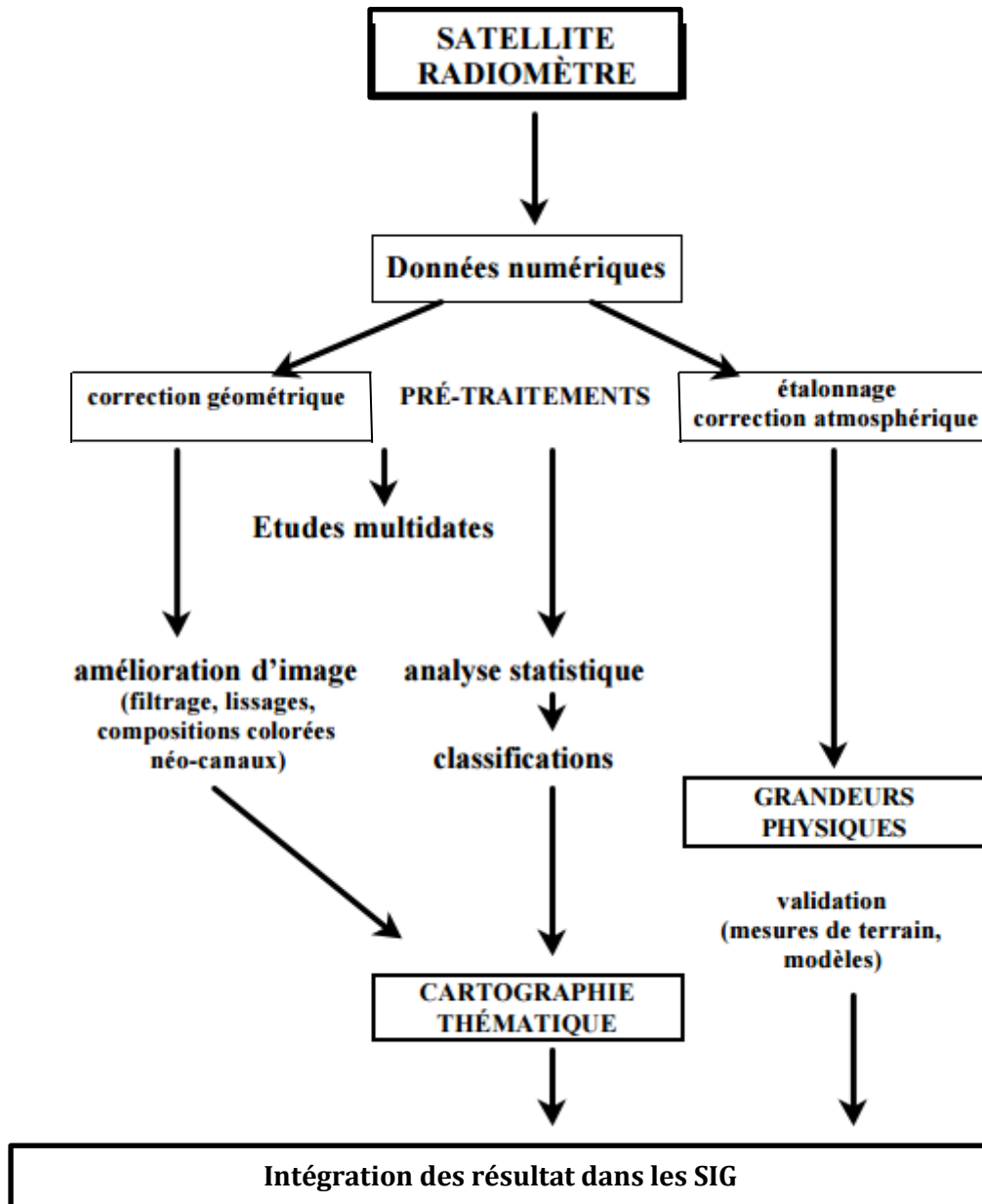


Figure 49 : Méthode de travail en télédétection. Source : TRABELSI d'après Claude Kergomard<sup>96</sup>

<sup>96</sup>Claude Kergomard Professeur Ecole Normale Supérieure Paris : la télédétection aérospatiale 2015

Le premier type consiste à faire soit même, à partir des données brutes, une interprétation visuelle privilégiant tel ou tel type de phénomènes. Ces techniques peuvent être regroupées sous les termes d'édition et amélioration d'image. Les procédés de filtrage ou de lissage permettent d'atténuer, de rehausser, ou d'extraire certains aspects de l'information contenue dans l'image ; le calcul de néo-canaux par combinaison de canaux bruts (l'indice de végétation par exemple) permet de synthétiser l'information multispectrale en vue de faciliter son interprétation.

Le second type de démarche vise à identifier et à classer, par des techniques statistiques, les pixels composant l'image, en vue de transformer celle-ci en une carte thématique de la région. Ces méthodes de classification d'image ont le même objectif que le zonage en photo-interprétation. En géographie, la classification sera le plus souvent une classification dirigée (ou supervisée), qui part d'une connaissance du terrain et du choix d'un certain nombre de sites-test bien identifiés, qui fourniront des échantillons statistiques en vue de la classification. De nombreuses techniques de classification existent. Les plus simples utilisent le seuillage radiométrique pour distinguer quelques grands types de surfaces ; l'application de la technique du seuillage à plusieurs canaux est appelée classification hypercube. La méthode la plus complexe est celle du maximum de vraisemblance qui utilise les probabilités pour aboutir à une classification à la fois plus souple et plus précise.

Le troisième type a pour objectif d'analyser les propriétés de surfaces bien identifiées par un étalonnage et une transformation du signal radiométrique (luminance) mesuré par le capteur en une propriété physique de la surface : un bon exemple de ce traitement physique est l'étude de la température de surface comme notre cas. Le traitement physique a souvent pour objectif de comparer les grandeurs physiques extraites de l'image à des mesures de terrain ou à un modèle qui reproduit la relation entre la radiométrie et la grandeur physique recherchée. Les données, les images ou les classifications issues du traitement numérique de la télédétection sont aujourd'hui souvent exploitées dans les Systèmes d'Information Géographique.

Les SIG sont des logiciels spécialisés dans le maniement et le croisement d'informations géographiques numérisées, en vue de l'analyse et de la gestion des territoires. Dans tous les cas, ces méthodes nécessitent de cumuler des connaissances en physique, en informatique appliquée au traitement d'images et des connaissances thématiques sur la région à étudier.

### **8. Prétraitement des données satellitaires**

Il existe trois types de correction de données satellitaires indispensables afin de permettre des comparaisons des images temporelles (multidates), mais aussi une meilleure compatibilité avec les documents existants (réseau routier, découpage en secteur, NDVI, MNT). Il faudra définir les

transformations et les techniques nécessaires pour l'obtention du produit final qu'est la carte thématique. Dans cette optique, il faut distinguer les différentes corrections à apporter aux images satellitaires (SPOT, LANDSAT, IKONOS, ASTER, QUICKBIRD...) : corrections géométriques, corrections radiométriques et corrections atmosphériques. Les différentes images subissent des prétraitements de base (le géoréférencement) avant d'effectuer les corrections ci-mentionnées. Ainsi, les niveaux de prétraitement d'une scène *Landsat* sont :

- niveau 1A : égalisation des détecteurs dans chaque bande spectrale ;
- niveau 1B : correction radiométrique et géométrique des déformations systématiques introduites par la plateforme ;
- niveau 2A : correction géométrique pour restituer la scène dans une projection géographique donnée sans points d'appui ou points de contrôle ;
- niveau 2B : idem au niveau 2A avec l'intervention des points d'appui qui lui confèrent plus de précision ;
- niveau 3 : idem comme le niveau 2B, mais cette fois-ci, il tient compte des modèles numériques de terrain pour mieux apprécier l'altitude approchée en chaque point.

### 8.1. Corrections géométriques

Les images de télédétection sont acquises sous certaines configurations de visée. L'espace géographique observé a une surface irrégulière. Les images présentent des distorsions dans toutes les dimensions de l'espace.

Origines des distorsions géométriques :

- Obliquité de la prise vue. ‰
- Mouvements du système de balayage et de la plate forme (tangage, roulis). ‰
- Relief du terrain, courbure et rotation de la terre.

Les corrections géométriques permettent : f

- Corriger les distorsions de l'image. f
- Lui attribuer des coordonnées géographiques.

L'opération qui consiste à corriger les distorsions de l'image est appelée Rectification. L'opération qui consiste à affecter l'image à un référentiel géographique est appelée Géoréférencement



8.1.1. Principe de corrections géométriques : corrections par points de contrôle

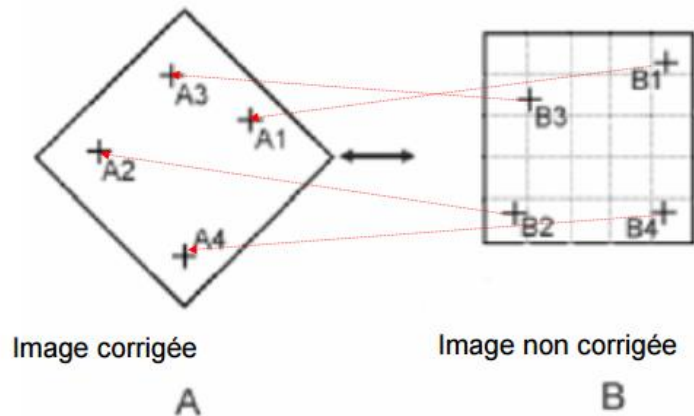


Figure 50 :Principe de corrections géométriques.

La conversion s'effectue grâce à un polynôme d'ordre n.

$x', y'$  coordonnées de l'image corrigée.  $x_0, y_0$  coordonnées image d'origine.

$$\begin{aligned}
 x' &= a + bx_0 + cy_0 + dx_0y_0 + ex_0^2 + fy_0^2 + \dots + qx_0^i y_0^j \\
 y' &= a' + b'x_0 + c'y_0 + d'x_0y_0 + e'x_0^2 + f'y_0^2 + \dots + q'x_0^i y_0^j
 \end{aligned}$$

Pour  $i+j \leq n$

Pour un polynôme d'ordre n : il faut  $(n+1)(n+2)/2$  points de contrôle.

8.1.2. le rééchantillonnage de l'image

**Méthode du plus proche voisin** : Un pixel de l'image corrigée prend la valeur du pixel qui lui est le plus proche sur l'image d'origine.

**Méthode d'Interpolation bilinéaire** : Un pixel de l'image corrigée prend la moyenne pondérée par la distance des 4 pixels les plus proches sur l'image d'origine.

**Méthode de convolution ou interpolation cubique** Un pixel de l'image corrigée prend la moyenne pondérée par la distance des 16 pixels les plus proches sur l'image d'origine.

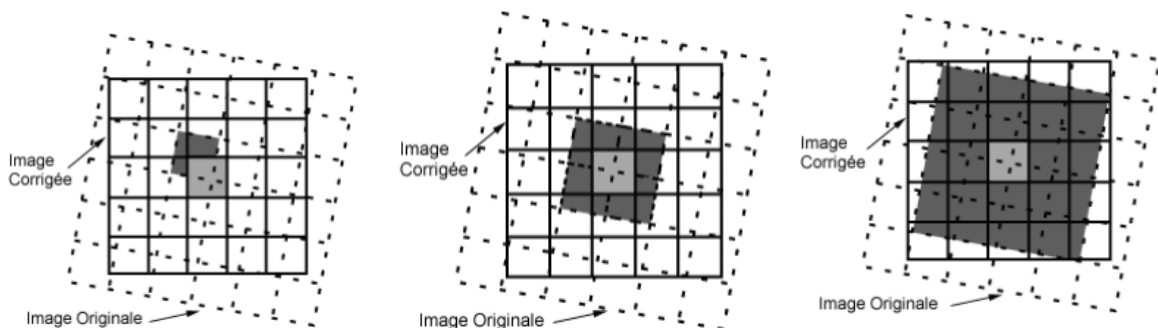
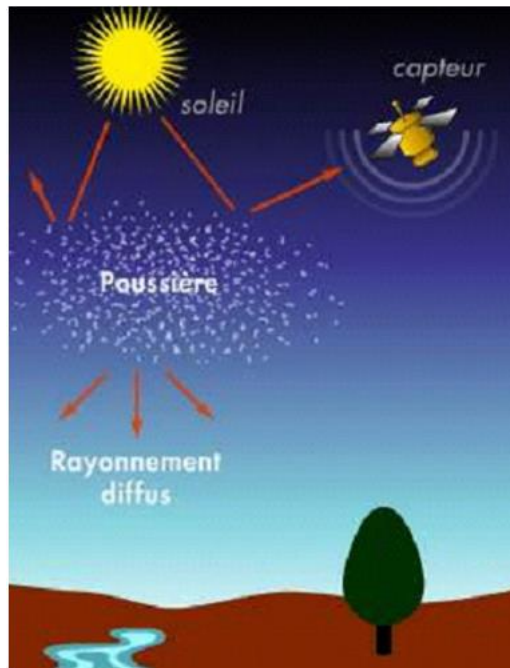


Figure 51 : méthodes de rééchantillonnage

## 8.2. Corrections radiométriques

Il est nécessaire d'en faire au moins pour 2 raisons :

- la lumière solaire qui éclaire les objets est perturbée par sa traversée de l'atmosphère et n'éclaire pas tous les objets sous un même angle.
- la lumière réfléchie par les objets est également perturbée au cours de sa traversée de l'atmosphère en direction du capteur.



**Figure 52 : Perturbations du rayonnement électromagnétique dans l'atmosphère - Présence de gaz et/ou de poussières pouvant absorber et/ou réfléchir le rayonnement et donc en modifier les propriétés spectrales<sup>97</sup>.**

Il faut donc faire des corrections par rapport à des valeurs étalonnées par des radiomètres sur des surfaces connues. Cet appareil fournit des mesures précises de réflectance dans les longueurs d'onde visibles et proche infrarouge sur une surface très petite.

## 8.3. Corrections atmosphériques

Les méthodes de correction des effets atmosphériques sont basées sur des modèles simulant les interactions des ondes électromagnétiques et les différents composants de l'atmosphère.

### 8.3.1. Corrections des effets perturbateurs atmosphériques

#### Niveau 1 : Réflectance exo-atmosphérique

$L = CN/G$   $L$  = luminance ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ )  $CN$  compte numérique (0 à 255)

$G$  : Gain d'étalonnage absolu du capteur (fourni par les entêtes des fichiers images pour chaque bande).

En supposant une diffusion lambertienne :

$\rho = \pi L / E_0 \cos \theta$   $\rho$  = réflectance de l'ensemble objet+atmosphère

$E_0$  = éclairement solaire exoatmosphérique  $W m^{-2}$

$\theta$  = angle zénithal solaire

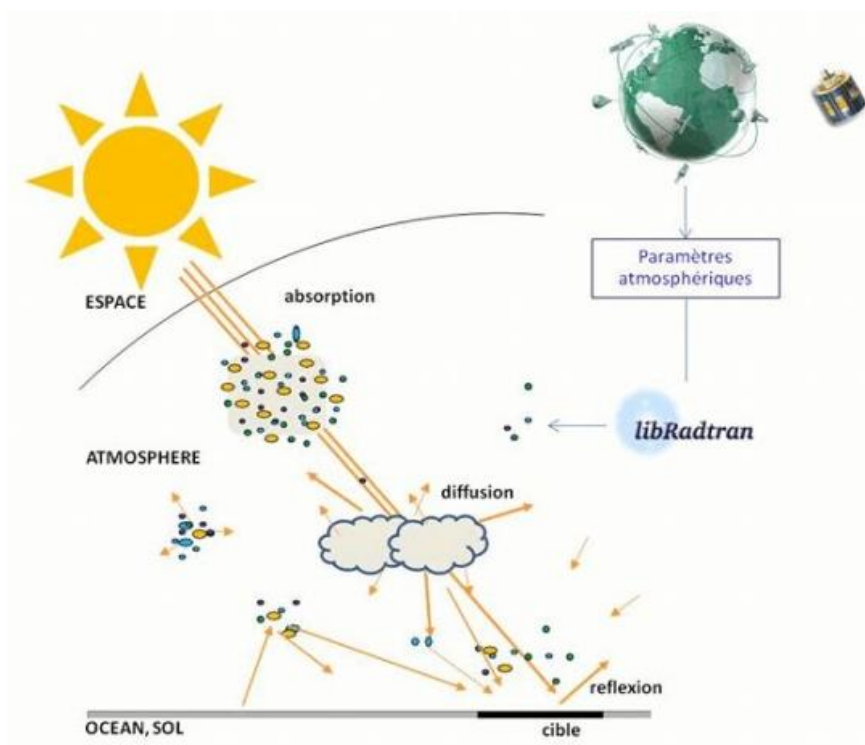


Figure 53: Effet de l'atmosphère sur la mesure radiométrique .source : Tanré (1986)<sup>98</sup>

#### Niveau 2: Réflectance au niveau du sol

Il s'agit d'une méthode simple qui, pour chaque bande, considère que la réflectance minimale mesurée sur l'image non corrigée est due aux effets atmosphériques. Cette réflectance est observée généralement sur les surfaces d'eau libres.

<sup>98</sup>Tanré D., Deroo C., Duhaut P., Herman M., Morcrette J.J., Perbos J. et Deschamps P.Y., 1986 : *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S)*, Document Laboratoire d'Optique Atmosphérique

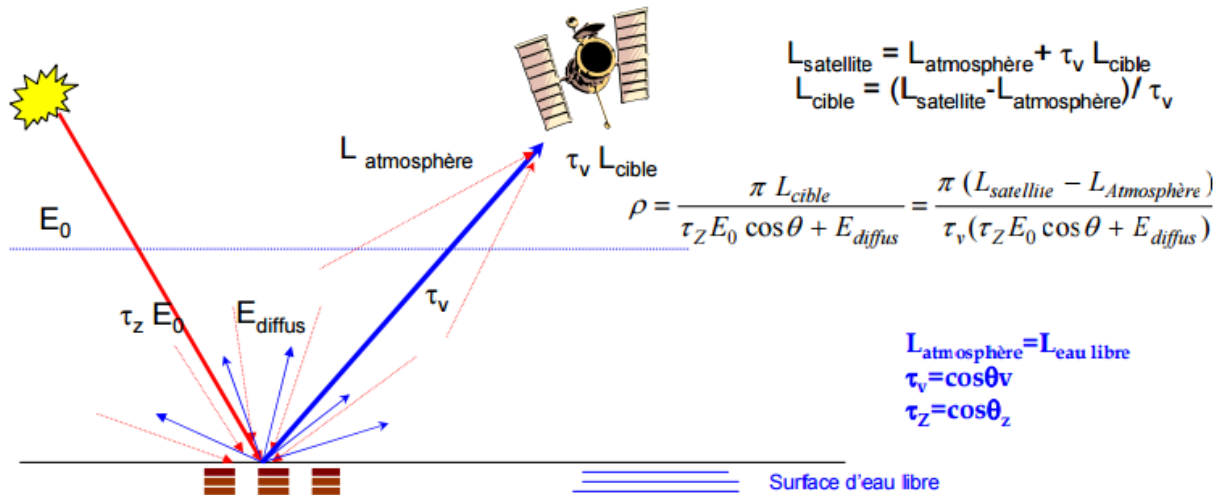


Figure 54: Méthode de corrections atmosphériques DOS : Dark Object Substraction<sup>97</sup>

## 9. L'absorption et la transmission

L'atmosphère est opaque au rayonnement électromagnétique sur de larges portions du spectre.

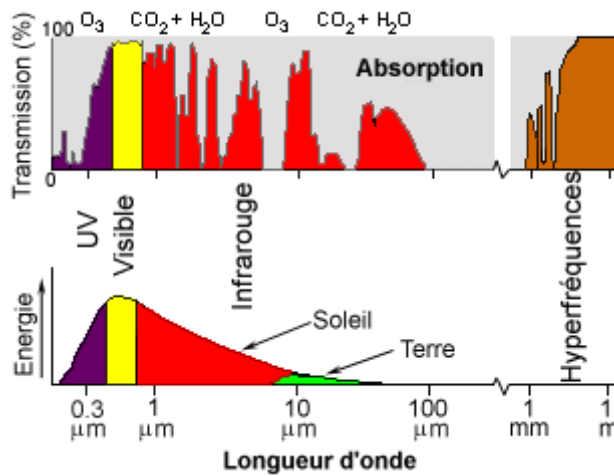


Figure 55 : Composition gazeuse de l'atmosphère et fenêtres d'absorption et de transmission.

Source : d'après le Tutoriel du [Centre Canadien de Télédétection](#)

Mais il existe des fenêtres transparentes exploitables en télédétection. Il convient de retenir des phénomènes d'absorption que<sup>99</sup> :

- l'absorption est totale dans l'UV jusqu'à 0,3 μm (grâce à l'ozone !)
- la transmission est très bonne dans le visible et le PIR
- et que dans le MIR et l'IRL seules quelques fenêtres sont utilisables.

<sup>99</sup> Vincent GODARD, Département de Géographie, Université de Paris 8, 2015

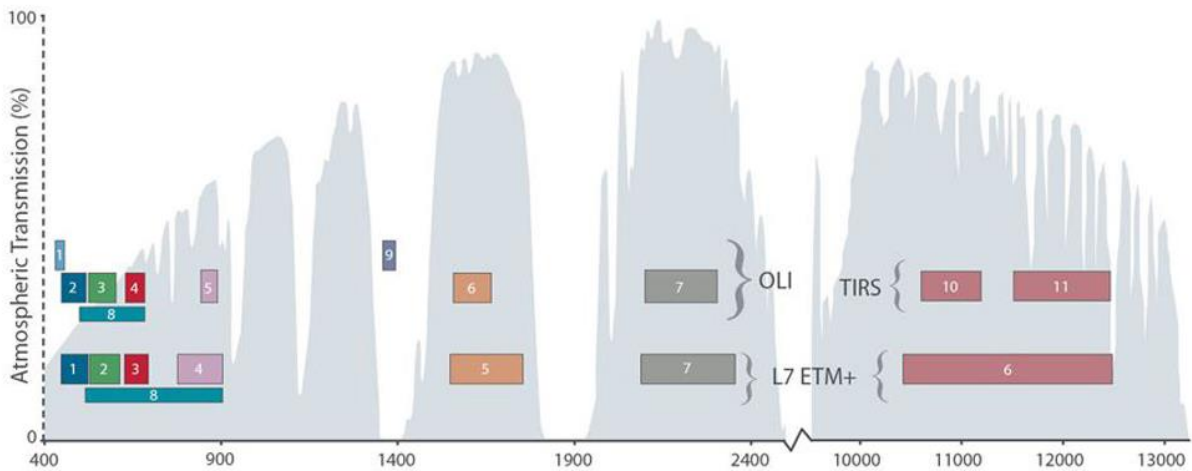


Figure 56 : Fenêtres d'absorption et de transmission et bandes des Landsat 5 TM, 7 ETM+ et Landsat 8 OLI et TIRS. Sources : USGS, <https://www.usgs.gov>

## 10. Les lois physiques

Tout objet à une température supérieure au zéro absolu émet du RÉM, pour étudier l'émission nous avons recours à un objet idéalisé: le corps noir.

Un corps noir a la propriété d'absorber toute l'énergie reçue par une source externe et de l'émettre à l'espace ambiant d'une façon isotrope.

### 10.1. Émission du corps noir

- **Loi de Planck : exitance spectrale**

$$M(\lambda) = \left( \frac{c_1}{\lambda^5} \right) \frac{1}{\left( \exp\left( \frac{c_2}{\lambda T} \right) - 1 \right)} \quad [\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}]$$

Où  $c_1 = 3,742 \times 10^{-16} [\text{W m}^2]$

$c_2 = 1,439 \times 10^{-2} [\text{m K}]$

T = la température cinétique du corps noir (en K)

- **Loi de Stefan-Boltzman**

Corps noir à une Température T (K) → Densité du flux total émis:

$$M = \sigma T^4 [\text{W m}^{-2}]$$

où  $\sigma$  = la constante de Stefan-Boltzmann =  $5,669 \times 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}]$

- **La loi de déplacement de Wien**

Longueur d'onde du pic d'émission d'un corps noir à une Température T (K)

$$\lambda_{\max} = \frac{C}{T} \quad \text{où} \quad C = 2898 [\mu\text{m K}]$$

## 11. Méthodologie : de l'émittance à la température de surface

Les traitements sur les données infrarouges thermiques LANDSAT 5 TM se font en trois étapes :

- Ils font tout d'abord appel au modèle de correction atmosphérique (França et al. 1994) pour réduire les perturbations induites sur le signal électromagnétique par la vapeur d'eau.
- On transforme ensuite l'émissivité thermique des objets au sol en température de brillance, on mesure la luminance correspondant à l'émission d'énergie thermique, l'émissivité se définissant comme l'énergie émise par le corps sous forme de radiations électromagnétiques dépendantes d'un facteur qui leur est propre et qui, en général, est inférieur à l'unité. L'eau pure à, par exemple, une émissivité de 0.993.

L'inertie thermique dépend d'une série de paramètres :

- la conductivité thermique - K (la quantité de chaleur qui peut traverser un volume défini de matière),
  - la capacité thermique ou chaleur spécifique - C (la capacité d'un matériau d'emmagasiner de la chaleur)
  - et la densité globale -  $\delta$  (elle tient compte de la porosité du matériel, du volume global et du poids spécifique).
- Le calcul de l'émissivité thermique, puis de la température de brillance se fait à partir de données exprimées en luminance vraie. Le modèle de passage de la luminance apparente à la luminance vraie a été calculé selon la formule.

$$R = (aX+b)$$

$$R = (aX+b) c$$

avec :

$$a = \frac{L_{MAX_\lambda} - L_{MIN_\lambda}}{Q_{calMax}} \text{ et } b = L_{MIN_\lambda}$$

d : dimension du capteur.

X = DN (compte numérique)

$$c = \frac{\pi \cdot d^2}{E_{SUN_\lambda} \times \cos(\theta)} \times 100$$

$\theta$  : incidence du soleil.

$E_{SUN_\lambda}$  : énergie du soleil

QCALMIN = 1, QCALMAX = 255 and QCAL = Digital Number.

- LMIN $\lambda$  et LMAX $\lambda$  sont les radiances spectrales pour la bande 6, code numérique 1 et 255, Respectivement déduites à partir des fonctions gains (métadonnées).

Le passage de la température de brillance à son expression en température de surface se fait en intégrant les paramètres de calibration du capteur TM5. A titre d'exemple, le calcul de la température radiative au sol de TM s'effectue selon la formule :

$$T(C) = \frac{k2}{\left[ \ln \left( \frac{k1}{L_{SOL}^{VRAIE}} + 1 \right) \right]} - 273$$

où **k1 = 1260.56** et **k2 = 60.776** représentent les constantes spécifiques de calibration du capteur TM5,

**Lv = a\*x+b** où x = digital nombre et **a = 0.0056321**, **b = 0.1238** (constantes pour le calcul de la luminance vraie).

Avec : - T = Température effective au Satellite (Effective at-satellite temperature) en degré Kelvin - K1 = Constante de Calibration 1 - K2 = Constante de Calibration 2 - L $\lambda$  = Radiance spectrale (w/m2\*ster\* $\mu$ m)

La précision théorique est de 1°C. Les températures radiatives des objets sont ensuite étalonnées par rapport à la seule donnée de référence disponible : la température de la surface de l'Océan Atlantique. Elle possède la qualité d'être stable du point de vue thermique, sa variabilité spatiale et temporelle sur la journée étant faible. On obtient une carte des températures des objets au sol.

## Les SIG pour la caractérisation des ICU

### 4. Organisation des données

La structure la plus courante d'une base de données géographique prend la forme de couches d'informations thématiquement homogènes superposées et calées géographiquement sur le même espace. Ces couches peuvent être au format raster ou au format vecteur avec des données attributaires associées sous forme de tables. Il existe plusieurs implémentations. La plus ancienne et la plus courante se fait sous la forme de fichiers distincts organisés dans des répertoires. De plus en plus souvent les données géographiques, spatiales comme attributaires, sont stockées dans des Systèmes de Gestion de Base de Données Spatiales (SGBD-S)<sup>100</sup>.

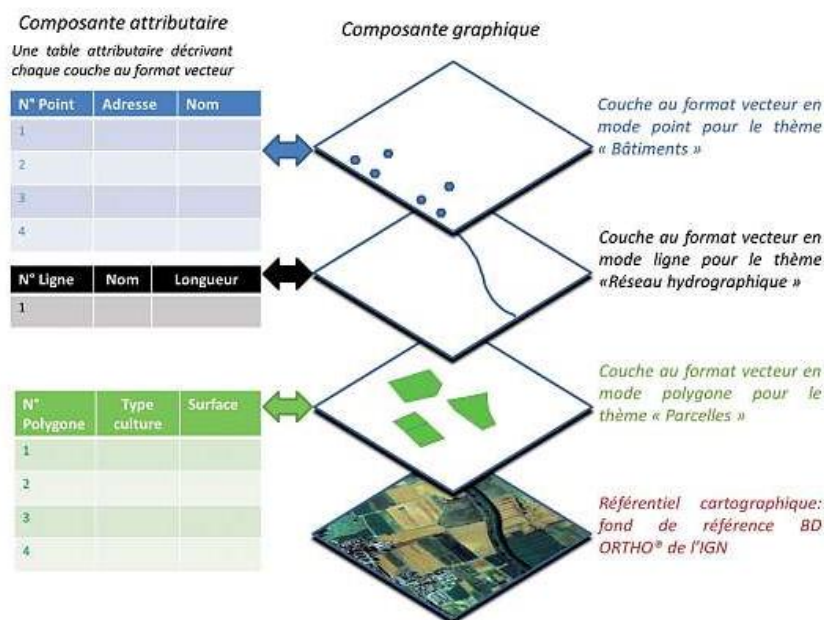


Figure 57: Structure des données.<sup>100</sup>

Le graphique illustre l'organisation en couches des données, sous forme d'un empilement de couvertures graphiquement dessinées superposées à un système d'axes cartésiens x, y représentant le Système de coordonnées commun à toutes les couches d'un même territoire.

### 5. Analyse spatiale des données

L'analyse spatiale des données est un domaine ancien et vaste qui regroupe de nombreuses méthodologies, certaines générales et d'autres plus spécifiques à un champ thématique précis. Les logiciels SIG classiques sont donc loin d'être les seuls outils employés en analyse spatiale.

<sup>100</sup> [www.emse.fr/tice/uved/SIG/Glossaire](http://www.emse.fr/tice/uved/SIG/Glossaire)



Certains viennent de la géostatistique par exemple ou de champs thématiques comme l'écologie du paysage. Dans le domaine des SIG, on appelle parfois Géotraitements ces fonctions analytiques. Certaines se réalisent en mode vecteur, d'autres en mode raster, d'autres encore fonctionnent dans les deux modes. Parmi les fonctions générales susceptibles de s'appliquer dans différents domaines, on peut lister les traitements géométriques d'union et d'intersection, les mesures et calculs de distance euclidienne, de distance coût ou selon un réseau, les analyses de contiguïté et de voisinage, les calculs statistiques, l'algèbre de cartes, l'interpolation spatiale et la géostatistique, les analyses de distribution spatiale, de densité et de potentiel. Quelques exemples classiques plus spécifiques sont l'analyse topographique (pentes, orientations, morphologie, visibilité), les calculs hydrologiques, l'interprétation de données de télédétection...<sup>100</sup>

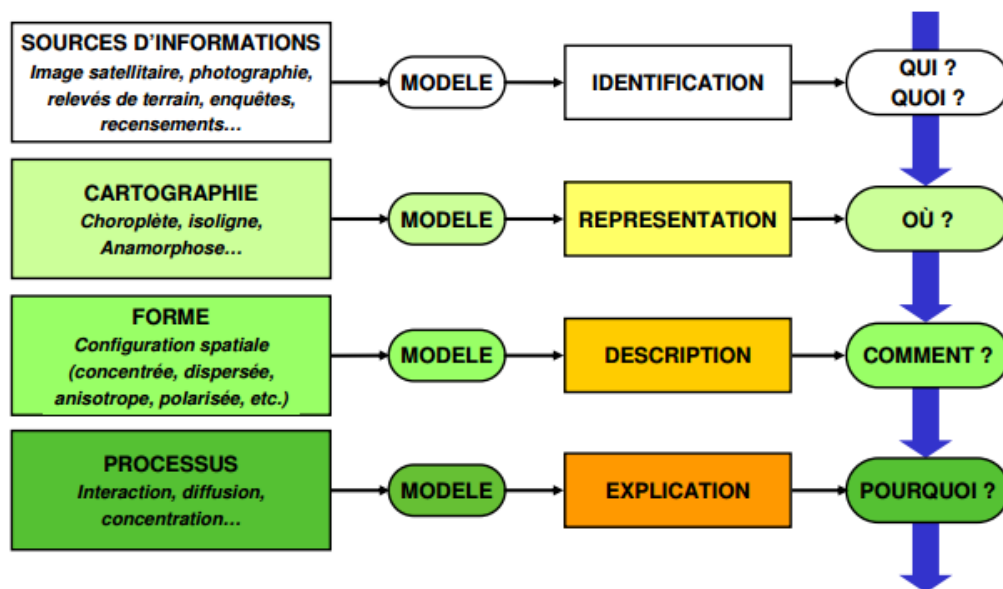


Figure 58: les étapes de l'analyse spatiale. Source : d'après sanders,1998<sup>101</sup>

### 3. Rôle de la géomatique :

SIG, géomatique : ouvrons ici une brève parenthèse sur ces deux vocables qui, dans ce mémoire, sont utilisés l'un pour l'autre, par simple commodité. En fait, alors que le SIG est, souvent assimilé plutôt à un outil, le terme géomatique, apparu il y a seulement une quinzaine d'années, désigne par contre une réalité plus large, plus générique. La géomatique, qui englobe les SIG aux côtés d'autres traitements, a acquis ainsi le statut d'un véritable ensemble disciplinaire cohérent, doté, au-delà des aspects techniques, d'une épaisseur scientifique qui n'est pas toujours reconnue au SIG.

<sup>101</sup>sanders,1998, hidrologia.usal.es/Complementos/Valores\_perm\_porosidad.pdf

Le recours aux SIG ou, de façon plus générale, à la géomatique est devenu commun en géographie de l'environnement.

Ainsi, les méthodes et techniques d'acquisition, de traitement et de restitution de données géoréférencées sont-elles devenues indissociables, de nos jours, de la prévention et de la lutte contre les ilots de chaleur urbains et de la gestion environnementale de l'espace : études d'impact, recherches en histoire de l'environnement, gestion de territoires à statut environnemental reconnu. Cet ordinaire de la géomatique repose sur des fonctionnalités, largement implémentées depuis une dizaine d'années, dans les logiciels disponibles sur le marché : algèbre booléenne et relationnelle et analyses contextuelles, pour l'essentiel. Si le traitement numérique de l'information géographique offre, aujourd'hui, une gamme très fournie d'outils pour l'analyse spatiale, cartographique, statistique et géostatistique, le facteur temps y est, trop souvent encore, approché comme simple attribut parmi d'autres.

### 6.1. L'analyse spatio-temporelle

On peut définir un objet spatio-temporel comme un objet spatial dont la forme et/ou la position varient au cours du temps. L'analyse spatio-temporelle au cœur de notre discipline, s'en retrouve dans notre mémoire, au simple croisement de plans d'information temporels. Sans doute de telles analyses permettent-elles de retracer l'évolution passée d'un phénomène d'ICU, en s'appuyant sur quelques fenêtres temporelles documentées, et de l'expliquer, au moins partiellement, en la reliant à nombre de critères environnementaux.

### 6.2. Relation spatiale

Le SIG est d'abord un concept dynamique et relationnel. Il dépasse de loin le caractère statique d'une banque de données. Cette mise en relation de données différentes mais localisées dans l'espace afin d'en produire une information utile est un trait caractéristique de l'Homme et indispensable à sa survie et son épanouissement matériel. Dès le début des années 90, la recherche en SIG a débouché sur l'établissement puis la formalisation de relations spatiales entre objets appelées relations topologiques. Ces relations rendent compte de la nature du contact (pas de contact, contact aux limites, recouvrement...) existant entre deux objets (relations binaires). Elles sont essentielles notamment pour la vérification de la cohérence des données introduites dans les SIG et sont à la base de bon nombre d'opérateurs d'analyse spatiale.

Travailler sur des entités spatiales implique la capacité de les localiser et de les décrire individuellement, ainsi que de les appréhender collectivement en décrivant leurs relations dans

l'espace. Dans le but de modéliser un territoire dans un SIG pour sa gestion et son analyse, il est primordial d'appréhender les notions de distance, de topologie et d'influence de la dynamique du milieu sur ces notions.<sup>102</sup>

### 6.3. Représentation des données et des résultats

la géomatique permet d'ouvrir un champ de recherche prometteur en matière de modélisation (description formalisée du comportement systémique) et de simulation (son immersion dans le temps), bien au-delà du simple arsenal d'outils techniques auquel on est parfois tenté de la réduire. La conception actuelle de telles problématiques reconnaît le statut exploratoire et la valeur de scénario raisonné des extrapolations du comportement systémique, en quantifiant la validation des résultats tout en l'insérant dans une fourchette de probabilités.

A défaut de pouvoir prédire ce qui est parfois imprédictible, la modélisation systémique et la simulation prospective de dynamiques environnementales forment, avant tout, une démarche scientifique intéressante, dans la compréhension de processus environnementaux très complexes, qui conduit à la fois à approfondir leur connaissance et à soulever de nouvelles questions. Cependant, le débat sur l'utilité de la géomatique en matière de modélisation et de simulation, est loin d'être clos.

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) tiennent une place centrale dans la géomatique puisqu'ils sont les outils informatiques permettant la représentation et l'analyse des données. De plus, près de 80% des données ont un caractère géographique, de ce fait, la dimension géographique des données est trop souvent sous-exploitée alors qu'elle est un véritable avantage concurrentiel et un outil idéal d'aide à la prise de décision.

### 6.4. Géomatique et télédétection :

Les racines de la télédétection et des SIG remontent aux années 1970. Si l'essor du traitement d'image satellitaire a été rythmé par la mise en œuvre de programmes de satellites d'observation de la Terre à haute résolution (Landsat, Spot), les SIG ont une double origine: cartographique et attributaire. D'un côté, les efforts d'automatisation de la cartographie - on parle de la conception cartographique assistée par ordinateur (CCAO) - ont abouti à des logiciels capables de décrire géométriquement l'espace géographique. Parallèlement, le traitement efficace de grandes quantités de données a été rendu possible grâce au développement de systèmes de gestion de bases de données (SGBD).

---

<sup>102</sup>Dominique Schneuwly, Regis Caloz Les concepts spatiaux fondamentaux : <http://www.gitta.info> -.2013

Le géoréférencement de ces données, qualifiées dès lors d'attributaires, et leur rattachement à des entités géographiques représentant l'espace, a ouvert la voie à un traitement de l'information incluant la dimension spatiale - une caractéristique inhérente aux SIG.

## **5. Structuration des données dans un SIG et analyse spatiale**

La fusion des données thermiques et des modes d'occupation des sols ainsi que des conditions météorologiques, à l'aide d'un Système d'Information Géographique, améliore l'interprétation des microclimats et révèle des caractéristiques climatiques inhérentes aux plans d'urbanisme.

### **9.1. Carte des températures de surface (densité du bâti) et plan d'occupation du sol**

La juxtaposition de la carte des températures de surface avec le plan d'occupation des sols permet de lier l'intensité de l'émissivité thermique avec les fonctions urbaines dominantes. Elle est peu pertinente. Les températures de surface renvoient à des modes dominants d'utilisation du sol (habitat, industriel, espaces verts, etc.), mais ce sont surtout les morphologies et les densités de bâti qui déterminent les températures de surface de la ville.

### **9.2. Carte des températures de surface, densité et forme du bâti**

La comparaison de la carte des températures de surface avec l'urbain permet de mettre en correspondance les gradients de température avec le type et la morphologie du bâti et d'en déduire le modèle de ségrégation morpho et socio spatial de la ville.

## **10. Relations spatiales entre les éléments intervenant aux ICU**

### **10.1. Relation spatiale : direction des vents/orientation des rues**

On constate en effet que les intensités d'ICU les plus élevées sont localisées au niveau des rues. Cela traduit la concentration de facteurs favorables aux ICU au niveau des canyons urbains (géométrie de la rue, matériaux de voirie, absence de végétation, imperméabilité des revêtements, transports, etc.). Il faut également préciser qu'au niveau des rues ce modèle rassemble les ICU de la SL et de l'UCL. Au niveau des bâtiments, le modèle cartographique donne des ICU de faible intensité. Ce qui est traduit ici est l'influence des matériaux de toiture sur la température des surfaces de toits ainsi que sur la température de l'air à proximité de ces surfaces.

Les voies les plus étroites ne sont que faiblement ensoleillées, et la plus-value de plantation y est nulle, voire impraticable dans le cas des rues très étroites.

Ici l'indicateur retenu pour qualifier l'étroitesse de la voie est le rapport H/L (hauteur du fond bâti divisé par la largeur de la voie).

Le deuxième indicateur qui permet de qualifier les voies est leur orientation par rapport au Nord. L'orientation déterminera les heures auxquelles le soleil pénètre dans la voie et crée des situations d'inconfort climatique.

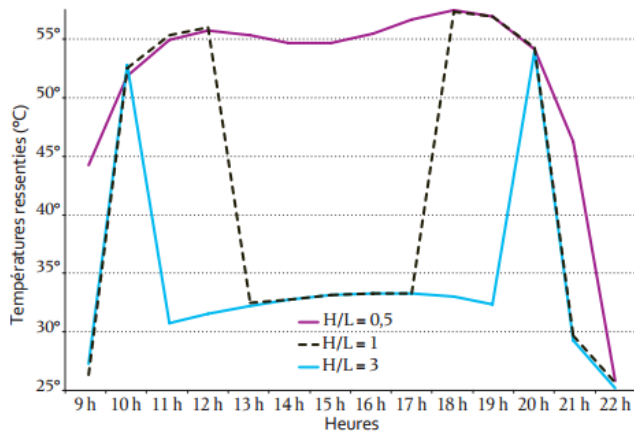


Figure 60 : Confort thermique voies Est-Ouest

Source : apur (Atelier Parisien d'Urbanisme), [www.apur.org/](http://www.apur.org/)

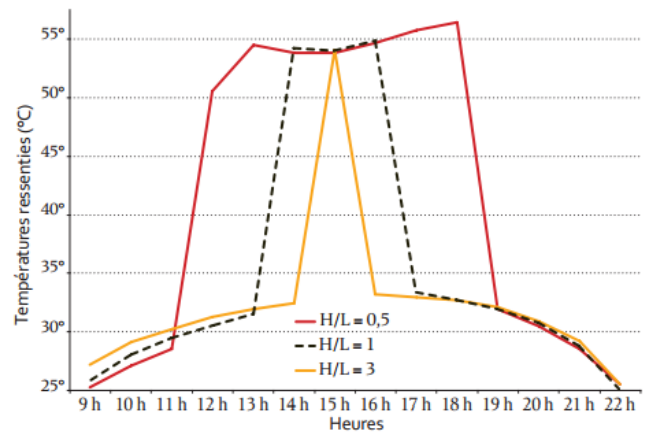


Figure 61 : Confort thermique voies Sud-Nord

Les rues Est-Ouest à Oran sont affectées d'un ensoleillement cumulé plus long que les voies Nord-Sud, l'inconfort thermique y est plus long et plus tardif. Ce dernier point importe car il aura des répercussions la nuit, les voies qui emmagasineront les derniers rayons du soleil seront affectées aussi d'un inconfort qui se prolongera une partie de la nuit.

Les voies Nord à Oran sont inconfortables aux alentours de 13 heures, la plage horaire de l'inconfort s'allonge à mesure que la voie gagne en largeur. Les voies Est-Ouest sont inconfortables le matin, puis le soir. La fenêtre horaire de l'inconfort grandit à mesure que la voie s'élargit.

Enfin, le dernier critère qui intervient dans cette analyse est la position du piéton sur la voie. Pour les voies les plus larges ( $H/L=0,5$  ou  $H/L=1$ ), il existe une réelle différence de confort thermique entre la rive Nord et la rive Sud de la voie. La rive Nord étant systématiquement la plus inconfortable. Cette différence s'estompe à mesure que la voie se rétrécit (ou que  $H/L$  augmente)

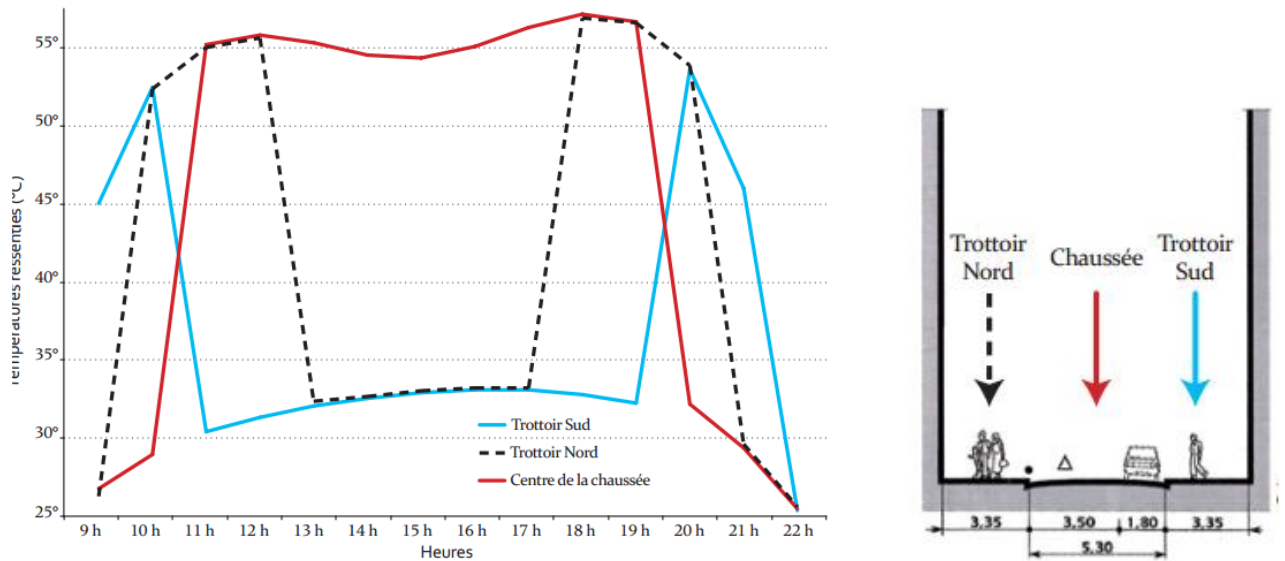


Figure 62 : Confort thermique sur une voie Est-Ouest de 12m (H/L=1).

Source : apur( Atelier Parisien d'Urbanisme), www.apur.org/

## 10.2. Relation spatiale : végétation/ température/vent

Il peut y avoir également la présence d'ICU d'intensité négative ou îlot de fraîcheur. Ces zones correspondent aux zones végétalisées. D'après la définition de l'intensité par la littérature, les ICU d'intensité négative sont des secteurs urbanisés plus frais que la périphérie rurale. Les arbres d'alignement permettent au niveau des rues de réduire les ICU d'un niveau moyen à un niveau faible.

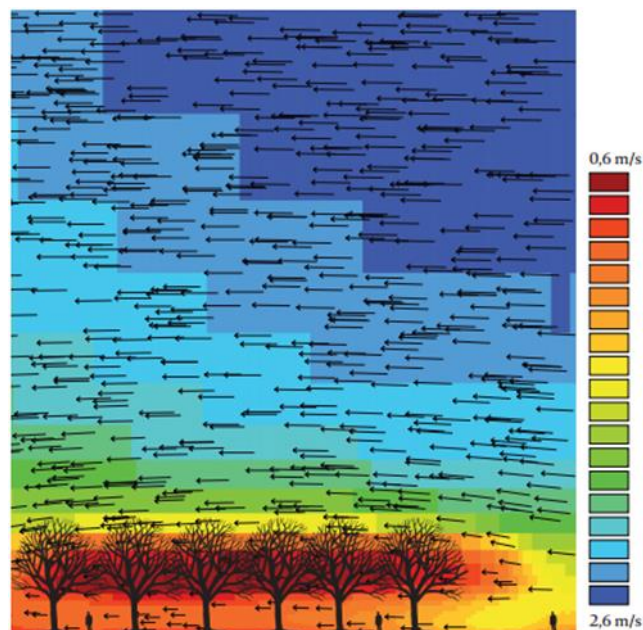


Figure 63 : Réduction de la vitesse des brises thermiques par une plantation d'arbres d'alignements.

Source : apur( Atelier Parisien d'Urbanisme), www.apur.org/

### 10.3. Relation spatiale température /imperméabilisation et nature des matériaux des surfaces

Les ICU intenses se concentrent dans les canyons urbains présentant un fort Aspect Ratio, des trottoirs en asphalte, un trafic important et l'absence d'arbres d'alignement. Il s'agit le plus souvent de canyons orientés est-ouest. Il est difficile d'évaluer si le confort thermique en sera impacté de façon négative car l'évapotranspiration joue aussi en faveur des plantations d'arbres. On tiendra que : dans les voies dans lesquelles des circulations d'air existent de façon systématique les soirs de canicules les plantations peuvent avoir un effet défavorable sur le confort thermique.

On peut schématiquement regrouper les types de sol rencontrés à Oran en trois grandes familles selon les architectes du département d'architecture de l'USTO :

-la famille des matériaux minéraux (granit, grés) et dérivés du pétrole (asphalte, bitume) : ces matériaux sont sombres, ils réfléchissent donc peu l'énergie solaire et de plus ont de grandes capacités de stockage de l'énergie solaire. Cette capacité est renforcée par la couche de béton sur lesquelles ils reposent. La nuit, pendant de longues heures ils rayonneront l'énergie reçue et stockée dans la journée.

- la famille des matériaux sablonneux ou pulvérulent (stabilisé, béton désactivé, terre battue). Ces matériaux sont relativement clairs, ils réfléchissent en partie le rayonnement solaire en journées et stockent très peu d'énergie du fait de leur composition très « aérée ». La couche superficielle de ces matériaux, dont l'aspect est proche du sable, est très peu solidaire du support sur laquelle elle repose. La conductivité thermique entre les couches est très mauvaise, et le stockage de chaleur s'effectue très mal ce qui est atout climatique.

- enfin, les végétaux de surface (pelouses, friches, etc.). Ils tendent à adopter une température proche de celle de l'air afin de ne pas dépérir face à l'intensité du rayonnement solaire, la nuit ils rafraîchissent l'air ambiant par évaporation de l'eau contenue dans le sol. Le mécanisme de régulation climatique très intéressant apporté par le végétal est très largement tributaire de la teneur en eau du sol. Si cette dernière est inférieure au besoin de la plante alors elle n'apporte aucune plus-value climatique et la plante dépérit progressivement.

## Autres outils de mesure des ICU (LIDAR)

Le principe du LiDAR est basé sur l'émission active de photons dans l'atmosphère au moyen d'un laser pulsé. Le système de réception est composé de un ou plusieurs télescopes paraboliques au foyer desquels les signaux sont collectés. En fonction des caractéristiques de l'émission et de la réception, les signaux rétrodiffusés sont transformés par la chaîne électronique de traitement puis analysés pour le calcul de différents composés ou paramètres atmosphériques. Les divers systèmes LiDAR permettent la mesure des aérosols, de la température, de la vapeur d'eau et de l'ozone troposphérique, de l'ozone stratosphérique, du CO<sub>2</sub> etc.

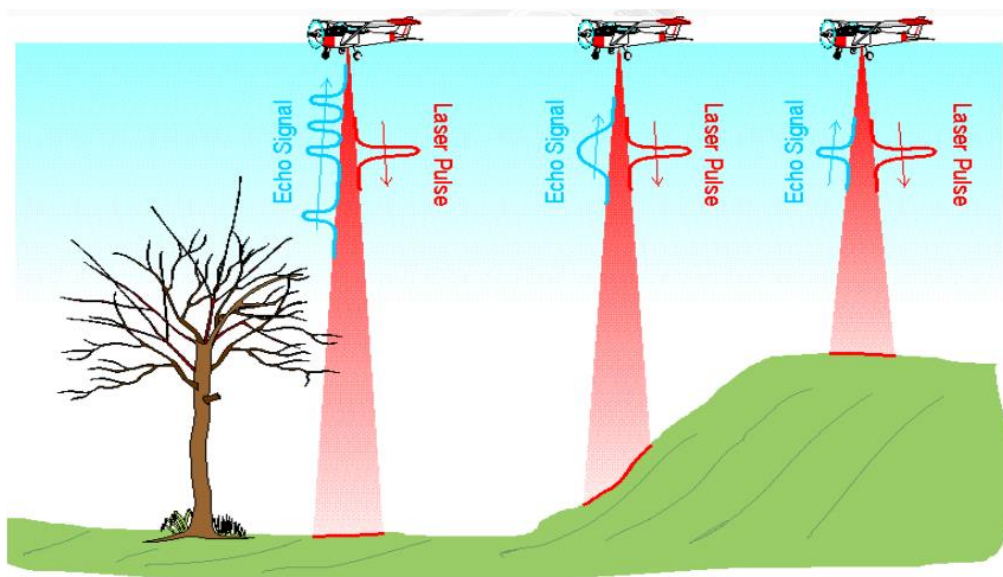


Figure 63 : Prise de vues et positionnement cinématique. source :Forum ENSG – PPMD 2012

### 1. Principe du lidar

Le principe utilisé est voisin de celui du radar, d'où le nom de Lidar (Light Detection And Ranging) qui s'applique à la fois à l'instrument et à la méthode de télédétection correspondante. Il s'agit d'une technique optique active de mesure à distance, par opposition aux techniques passives de télédétection d'une source de rayonnement naturel. Grâce à l'exploitation des propriétés de cohérence spatiale et temporelle spécifiques des sources laser, le lidar se différencie aussi des autres instruments de mesure à distance utilisant une source de lumière conventionnelle. Un lidar comporte toujours un émetteur et un récepteur (figure 64). La source est un laser, généralement impulsionnel, émettant dans un domaine de transparence de l'atmosphère soit, typiquement, entre 0,3 et 10  $\mu\text{m}$ .



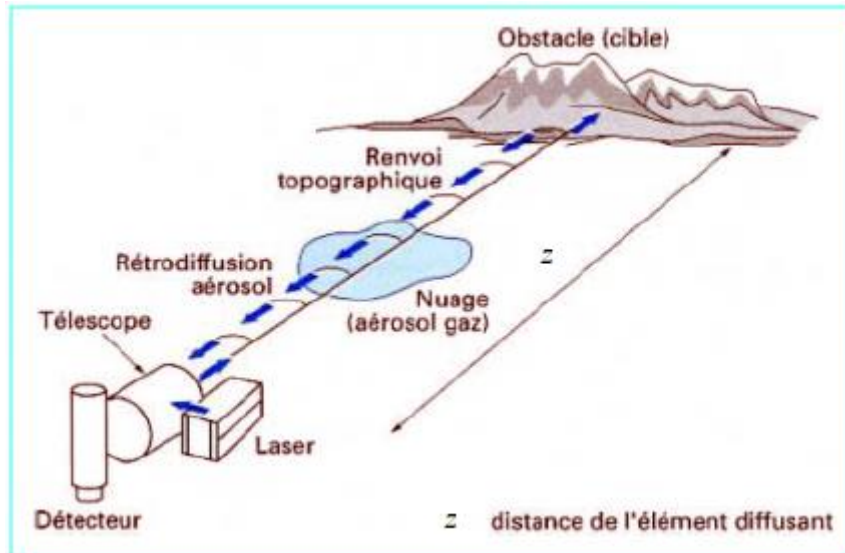


Figure 64 : Principe du lidar atmosphérique. source : (J. Cornillault CILAS)<sup>103</sup>

À l'heure actuelle, il existe trois techniques lidar disponibles pour les observations habituelles. Ensemble, ils couvrent une plage de hauteur du sol à la basse thermosphère : Raman de rotation (pour les observations de la sol à la stratosphère supérieure), la technique d'intégration (à partir de la stratosphère inférieure à la mésopause), et la technique de la fluorescence de résonance (à partir de la région à mésopause thermosphère inférieur). Comme toute mesure optique dans l'atmosphère, qui ne dépend pas du soleil ou d'un autre objet céleste en tant que source de rayonnement, ces techniques sont utilisées de préférence la nuit lorsque le bruit de fond est faible.

Cependant, les systèmes de haute puissance avec détection de signal spectral étroite ont à ce jour été mis en place qui a également un bon rendement dans des conditions de jour. D'autres techniques lidar pour le profilage de température sont en cours de développement tels que résolution lidar haute spectrale (HSRL) et différentielle lidar d'absorption (DIAL).

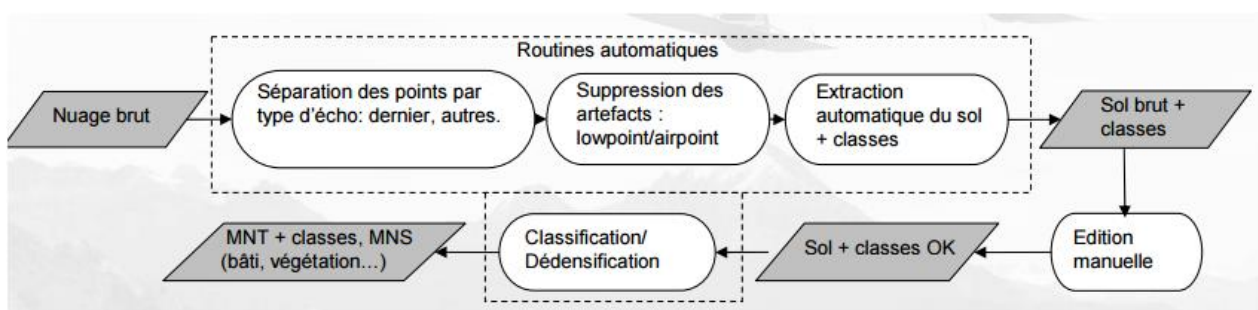


Figure 65 : Traitement des données Lidar. source : Forum ENSG – PPMD 2012

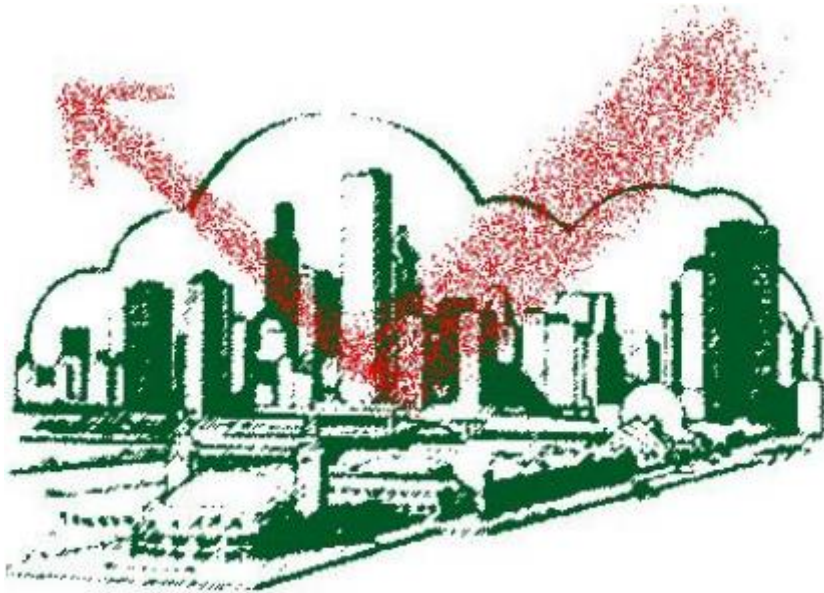
103 Jean CORNILLAULT : base documentaire scientifique et technique - Techniques de l'Ingénieur





## CHAPITRE 4:

### *Stratégies d'adaptation aux îlots de chaleur urbains*



Dans ce chapitre nous avons pris les mesures d'adaptation et les stratégies prises par le Canada et d'autres pays européens car en Algérie le volet de l'adaptation aux îlots de chaleur urbains est inexistant et souvent présent mais il reste encore dans un état embryonnaire.

## **6. Mesures atténuant les effets ICU**

Suite aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé, à travers le monde, les agences de santé ont mis en place diverses interventions pour lutter contre les effets de la chaleur accablante et des îlots de chaleur urbains. Pour diminuer le risque des ICU, il est possible d'une part de tenter de diminuer le phénomène et d'autre part de diminuer la vulnérabilité des populations. Idéalement, dans un plan d'adaptation, les deux types de mesures vont de pair afin de limiter l'impact des ICU.

### **6.1. Mesure d'aménagement**

Afin de limiter la formation d'ICU et augmenter le confort thermique de la population, des aménagements réduisant le phénomène d'ICU peuvent être envisagés. Les principes de base sont d'augmenter la quantité de végétation, de diminuer les surfaces absorbant la chaleur ou leur efficacité à l'absorber. Il est reconnu que la végétation urbaine est un moyen efficace et économique pour limiter les effets des ICU<sup>104</sup>. Pour augmenter la quantité de verdure, plusieurs méthodes peuvent être utilisées telles que la foresterie urbaine, les toits verts ou encore les murs végétaux. À ce jour, la plantation d'arbres en parc, en carré de trottoir ou en cour arrière, reste la plus simple, la moins coûteuse et la plus rentable<sup>105</sup>. Les arbres urbains peuvent aider à rafraîchir, assainir l'air et ils absorbent des quantités d'eau de ruissellement. Ils contribuent à augmenter la valeur d'une propriété et peuvent influencer le moral de la population. Les bénéfices de l'arbre en ville sont connus depuis longtemps. Le parlementaire John Evelyn au 17<sup>e</sup> siècle avait reconnu que les arbres ainsi que la morphologie urbaine pouvaient influencer la qualité de l'air de Londres. Après le grand incendie de 1666, il avait fait des recommandations pour la plantation massive d'arbres dans la ville de Londres<sup>106</sup>.

---

104 Solecki, W.D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J. et Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*.

105 Direction des Grands Parcs et du Verdissement (DGPV) (2012). Plan d'action canopée 2012-2021. In Ville de Montréal. Ville de Montréal.

[http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands\\_parcs\\_fr/media/documents/pac\\_juin\\_2012\\_final.pdf](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands_parcs_fr/media/documents/pac_juin_2012_final.pdf).

106 Grimmond, S. (2011). London's urban climate: historical and contemporary perspectives. In *economic and social research council. city weathers: meteorology and urban design 1950-2010*.

[http://www.sed.manchester.ac.uk/architecture/research/csud/workshop/programme/Grimmond\\_CimateOfLondon.pdf](http://www.sed.manchester.ac.uk/architecture/research/csud/workshop/programme/Grimmond_CimateOfLondon.pdf).

Autrement, les revêtements à albédo faible absorbent la chaleur des rayons de soleil durant le jour et selon leur capacité de stockage continue de chauffer l'air même après le coucher du soleil. Parmi ces surfaces, les toitures des bâtiments représentent une superficie d'environ 10 % à 15 % de toute la superficie d'une ville. Finalement, les revêtements verticaux des bâtiments peuvent absorber beaucoup de chaleur. Les revêtements extérieurs naturels, à albédo élevé, ou le verdissement des surfaces est aussi bénéfique pour limiter l'impact des ICU. Cette mesure aide à diminuer une des causes des ICU soit l'effet de masse thermique des bâtiments.

## **6.2. Mesure visant la réduction de la pollution atmosphérique et des GES**

Étant donné que la qualité de l'air joue un rôle important dans l'amplitude des effets des ICU, les mesures visant la réduction des émissions contribuent à la réduction du phénomène. Toute diminution aurait des effets bénéfiques sur la lutte aux ICU et sur la qualité de l'air urbain. Le transport reste l'activité des principales activités émettant des GES et responsable de 50 % de la chaleur anthropique<sup>107</sup>.

Pour diminuer les effets des ICU, il est préférable de travailler sur trois volets :

- les mesures de sécurité civile en prévention directe à court terme,
- à moyen terme les aménagements réducteurs,
- à long terme la diminution de l'émission de GES ainsi qu'un plan d'urbanisation à long terme.

En combinant ces mesures, la diminution du phénomène ainsi que la vulnérabilité des populations sont prises en compte. Sachant que les changements climatiques apporteront des vagues de chaleur et des hausses de températures de plus longue durée et à des températures plus élevées, il devient des plus pertinents d'adapter l'urbanité à ses changements. Le tableau suivant présente les avantages, les désavantages ainsi que les bénéfices associés aux différentes mesures permettant la réduction des ICU.

---

107 Sailor, D.J. et Lu, L. (2004). A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. Atmospheric Environment.

Mesures	Causes	Avantage et co-bénéfices	désavantage
<b>Verdissement et plantation d'arbres</b>	La masse thermique des bâtiments et des revêtements.  La chaleur anthropique et la pollution  Diminution ou absence de couvert végétal	Augmente le confort thermique (Bélangier Michaud, 2013)  Cout faible.  Améliore la qualité de l'air.  Meilleure gestion des eaux de ruissellement.  Améliore la qualité des espaces.	Nécessite un entretien
<b>Diminuer les surfaces à albédo faible</b>	La masse thermique des bâtiments et du revêtement	Diminue les températures ambiantes. Améliore la durabilité des matériaux. Aide à la climatisation	Coûts élevés. Technologie émergente.
<b>Réduction de la pollution atmosphérique</b>	La chaleur anthropique et la pollution	Diminution de l'amplitude des ICU  Améliore la qualité de l'air. Diminue les épisodes de smog.	Exigeant en mesure de contrôles et de suivi.
<b>Mesures palliatives à court terme</b>	La masse thermique des bâtiments et des revêtements. La chaleur anthropique et la pollution. Diminution ou absence de couvert végétal. Variable incontrôlable	Diminue le risque sur les populations vulnérables lors d'épisode de chaleur.	Ne résout pas le problème à la source.  Suivi exigeant.

**Tableau 3 : Sommaire des mesures typiques de réduction des effets des ICU en liens aux 4 causes des ICU : avantages, co-bénéfices, et désavantages.** source : Ysabelle Filiatreault<sup>108</sup>.

## 7. S'adapter, implanter et aménager

« L'adaptation aux changements climatiques est un processus par lequel les communautés et les écosystèmes s'ajustent aux changements et effets associés, afin de limiter les conséquences négatives et de profiter des bénéfices potentiels. Pour les milieux humains, l'adaptation permet de se préparer aux nouvelles conditions climatiques. »<sup>109</sup> permettant de définir les différentes mesures d'adaptation. À l'intérieur du plan d'adaptation, il est possible d'établir certaines mesures à mettre en place. Dans ce chapitre, il sera question de la planification à l'adaptation au CC et plus spécifiquement au phénomène d'ICU. Il sera aussi question des différents types d'aménagement permettant d'atténuer les effets des ICU, leurs potentiels de rendement ainsi que les incitatifs à leur mise en place.

<sup>108</sup>Ysabelle Filiatreault Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable en vue de l'obtention du grade de Maîtrise en environnement (M. Env.)

<sup>109</sup> Ouranos (2010). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. In Ouranos. Ouranos. [http://www.ouranos.ca/media/publication/111\\_PlanadaptationCC-Guidemunicipalites-Ouranos.pdf](http://www.ouranos.ca/media/publication/111_PlanadaptationCC-Guidemunicipalites-Ouranos.pdf)

Quels sont les outils disponibles pour permettre de mieux préparer les villes au CC et aux ICU?

### **7.1. Plan d'adaptation**

La contribution du deuxième Groupe de travail au 5e rapport sur l'évolution du climat du GIEC s'est orientée sur l'évaluation de la gestion des incidences des CC sur les systèmes naturels et humains. Le rapport traite de la résilience au CC, entre autres, en y examinant « les moyens de réduire et de gérer les incidences et les risques liés au changement climatique à l'aide de mesures d'adaptation et d'atténuation. »<sup>110</sup> Les risques associés au CC tel que le stress thermique, les inondations, la pollution atmosphérique ou encore les pénuries d'eau sont amplifiés pour les populations qui n'ont pas accès aux infrastructures ou aux services d'adaptation. (GIEC, 2014) Étant donné que les risques associés aux CC affecteront majoritairement les zones urbaines la mise en œuvre de mesures d'adaptation permet de favoriser la résilience des villes et de la population aux CC. (GIEC, 2014) Un processus d'adaptation doit permettre l'identification des impacts anticipés, leurs risques potentiels, et trouver les options d'adaptation<sup>111</sup>. Les interventions nécessaires sur un territoire afin de limiter les effets des CC, dont les ICU, doivent être planifiées, maximisant ainsi la capacité des systèmes humains à s'adapter (GIEC, 2014).

Le cadre de l'adaptation peut prendre plusieurs formes et plusieurs outils ont été développés à travers le monde. (Ouranos, s.d.) Ces cadres comportent des étapes différentes, mais convergent vers les mêmes objectifs, c'est-à-dire l'identification des problématiques, les mesures d'adaptation et le suivi d'implantation et de résultats de celles-ci. The United Kingdom Climate Impact Programme a développé plusieurs outils à l'adaptation aux CC. (Ouranos, s.d.) La figure 65 illustre les huit principales étapes visées dans un processus d'adaptation tel que conçu par le programme<sup>111</sup>.

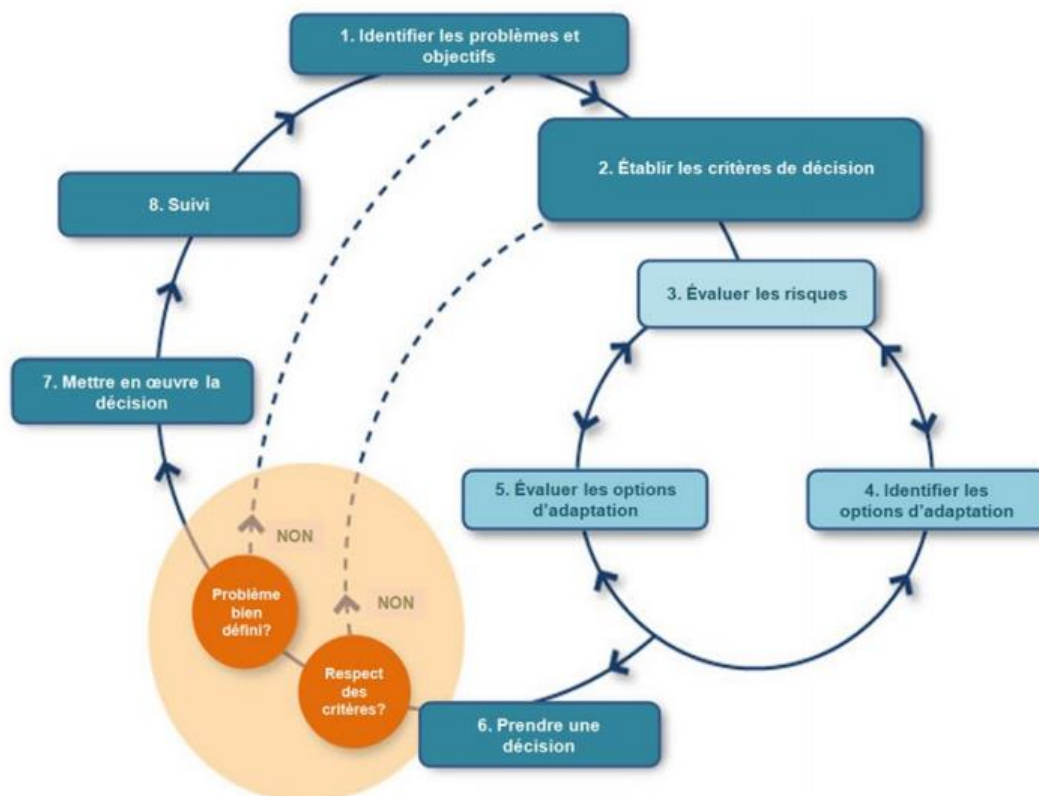
La plupart des pays ont maintenant amorcé ou implanté des cadres, plans ou des politiques d'adaptation aux CC. (GIEC 2014) En Europe, plusieurs politiques d'adaptation, en lien, par exemple, avec la gestion côtière ou l'aménagement du territoire, sont implantées à plusieurs niveaux dans les administrations publiques. (GIEC 2014) En Amérique du Nord, il est préconisé, par les autorités publiques, que la démarche de planification des mesures d'adaptation soit implantée à l'échelle municipale.

---

110 GIEC (2014). Changements climatiques 2014 Incidences, adaptation et vulnérabilité. In GIEC. GIEC. [http://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5\\_SPM\\_French.pdf](http://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5_SPM_French.pdf)

111 Ouranos (s.d.). Le processus d'adaptation. In Ouranos. Vers l'adaptation aux changements climatiques. <http://adaptation.ouranos.ca/fr/processus-adaptation/>





**Figure 65 : Principales étapes dans un cadre d'adaptation au CC adapté de l'anglais .**

source : Ouranos, s.d.

Afin de diminuer les risques et de s'adapter des CC, le GIEC « affirme qu'il faut une stratégie équilibrée entre la réduction des GES et l'adaptation aux changements climatiques ». (Ouranos, 2010) Le plan d'adaptation est un outil permettant de planifier, d'orienter et de prioriser les outils d'adaptation aux CC sur un territoire. Le plan sert à identifier les principaux risques, à les cartographier, à les hiérarchiser et prévoir des mesures nécessaires afin de pallier aux risques pouvant affecter la population, les activités et le territoire des municipalités<sup>112</sup>.

Il permet aussi de localiser les endroits susceptibles de subir les effets des changements climatiques et de cartographier la vulnérabilité du territoire. L'implantation de stratégies ou de mesures d'adaptation permet de réduire la vulnérabilité des populations et d'influencer la prise de décision quant à l'application des mesures d'atténuation des CC.

Le plan d'adaptation doit contenir entre autres, une synthèse, une introduction, le contexte (physique, administratif) une évaluation des impacts actuels et potentiels, l'analyse des vulnérabilités, l'appréciation des risques, gestion des risques et mesures d'adaptation, échéancier, les moyens pour la mise en œuvre, les mécanismes de suivi et de mise à jour.

112 Ouranos (2010). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. In Ouranos. Ouranos. [http://www.ouranos.ca/media/publication/111\\_PlanadaptationCC-Guidemunicipalites-Ouranos.pdf](http://www.ouranos.ca/media/publication/111_PlanadaptationCC-Guidemunicipalites-Ouranos.pdf)

Afin d'orienter la production des plans d'adaptation, le consortium Ouranos a conçu des guides et des méthodologies pour leur élaboration en 5 étapes. La première étape est d'évaluer les impacts du climat actuel. Sommairement, cette étape permet d'analyser les facteurs climatiques qui influencent et affectent à ce jour la municipalité. Il peut être intéressant de dégager des expériences du passé qui ont dépassé « la capacité de la population ou de l'administration municipale de les gérer adéquatement » les impacts des CC. (Ouranos, 2010) Ensuite, le consortium Ouranos, indique que la deuxième étape en vue de la mise en œuvre d'un plan d'adaptation est de « définir les impacts potentiels des changements climatiques et analyser les vulnérabilités » (Ouranos, 2010). Cette étape vise la compréhension des vulnérabilités existantes sur le territoire tant sociales, qu'économiques, qu'environnementales. Ainsi les orientations et stratégies à affecter au territoire seront en lien avec les secteurs vulnérables. La troisième étape consiste en la « réalisation d'une appréciation des risques ». (Ouranos, 2010) Cette étape comprend une identification des risques climatiques affectant le territoire, une classification et une priorisation de ceux-ci. La quatrième étape est de « trouver et prioriser des options pour gérer les risques reconnus ». Elle permet d'établir et de hiérarchiser les objectifs d'adaptation. Ensuite, la 5e étape est de « Produire et mettre en œuvre le plan d'adaptation. »<sup>112</sup>

## **7.2. Aménagement réducteur d'ICU et potentiel de rendement**

Pour faire face aux ICU, les solutions d'adaptation, à intégrer dans un plan d'adaptation, peuvent prendre plusieurs formes. Un assemblage des trois types de mesures telles qu'identifier précédemment soit, les mesures de sécurité civile en réaction ou en prévention à court terme, les aménagements réducteurs à moyen terme, et la diminution de l'émission de GES pour une prévention à long terme permettent de se prémunir contre les ICU. Seulement, pour contrer le problème, les mesures visant l'aménagement du territoire permettent d'améliorer les conditions climatiques urbaines et sont principalement sous la responsabilité des municipalités.

Essentiellement, les principes de base qui sont liés à l'aménagement des villes permettant la réduction des ICU sont d'augmenter la végétation et de réduire les surfaces à albédo faible<sup>113</sup>. Les mesures de verdissement sont directement en lien avec la notion de biens et services écologiques. Ces mesures permettent à la fois d'augmenter le couvert végétal urbain, d'assainir l'air, d'assurer une gestion efficace des eaux de ruissellement tout en diminuant les risques associés chez les populations vulnérables.

---

113 Trottier, A. (2007). Toitures végétales : implantation de toits verts en milieu institutionnel. Maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal.

Les principales mesures d'aménagement étudiées dans cette section sont celles dont il est possible d'obtenir beaucoup d'information et dont leur productivité dans la lutte aux ICU est vérifiable. Les mesures présentées dans ce chapitre sont la plantation d'arbres, la végétalisation des toits et des murs des bâtiments, la végétalisation des surfaces minérales, ainsi que l'emploi de revêtement à albédo faible pour les toitures et les murs des bâtiments.

### 7.2.1. Plantation d'arbres

La plantation d'arbres, adaptée à la ville, est une mesure peu coûteuse, efficace et facile à mettre en place dans un objectif d'amélioration du climat urbain<sup>114</sup>. En plus de réduire la température de l'air durant la saison estivale, la forêt urbaine apporte plusieurs bénéfices tels que l'amélioration de la qualité de l'air, l'absorption d'eau de ruissellement, l'amélioration du paysage urbain ou encore l'augmentation la valeur des propriétés. (DGPV, 2012) Parmi les effets, l'arbre permet d'empêcher les rayons solaires d'atteindre les surfaces à albédo faible et de réfléchir les rayons solaires. L'arbre peut diminuer la température et par le fait même les effets des ICU. Aussi, les feuilles des arbres utilisent des rayons infrarouges, pour la photosynthèse et certains des rayons absorbés peuvent provenir de l'irradiation des surfaces à albédo faible. Il faut aussi comptabiliser l'évapotranspiration des arbres dans l'équation permettant de rafraîchir l'air<sup>106</sup>. En combinant ces mécanismes, on peut espérer une diminution de la température ambiante de 0,04 à 0,2 °C par pourcentage d'augmentation de la canopée, soit en moyenne de 1 °C par 10 % d'augmentation<sup>115</sup>.

La forêt urbaine peut améliorer la qualité de l'air par la séquestration du CO<sub>2</sub>, par l'interception des particules en suspension ou par le captage de polluants atmosphériques en particulier l'ozone ou le dioxyde de soufre. (Vergriete et Labrecque, 2007) Les études sur la séquestration du carbone par les arbres urbains sont nombreuses. Les taux résultant des études varient beaucoup, entre 2,5 et 35/kg par an. (Vergriete et Labrecque 2007) Le taux de séquestration du carbone varie en fonction de plusieurs critères : le type d'espèces, le climat, la taille de l'arbre, son taux de croissance, le taux d'exposition au soleil et polluants, leur santé, etc. Le taux pour Montréal, selon l'étude de Dubé (2006), un arbre à grand déploiement, tel qu'un chêne, un érable, un orme ou un tilleul, peut en moyenne séquestrer annuellement près de 11,4 de /kg par an de CO<sub>2</sub><sup>115</sup>.

---

114 Direction des Grands Parcs et du Verdissement (DGPV) (2012). Plan d'action canopée 2012-2021. In Ville de Montréal. Ville de Montréal.

[http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands\\_parcs\\_fr/media/documents/pac\\_juin\\_2012\\_final.pdf](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands_parcs_fr/media/documents/pac_juin_2012_final.pdf)

115 Vergriete, Y. et Labrecque, M. (2007). Rôles des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain : revue de littérature et tentative d'extrapolation au contexte montréalais . In Agrireseau. Agrireseau.

<http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-pepiniere/documents/pdf891.pdf>

De plus, la réduction de ces polluants permet aussi la réduction des épisodes de smog et par le fait même aide à diminuer l'ampleur du phénomène d'ICU. Les gros arbres, en santé, ayant un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) plus grand que 77 cm peuvent filtrer près de 1,4 kg de polluant annuellement. (Gaumont, 2007)

L'ozone troposphérique, soit celui mesuré à hauteur d'Homme, est principalement formé par des réactions photochimiques impliquant les oxydes nitreux (NOx), et les composés organiques volatils (COV)<sup>116</sup>. Cette réaction nécessite des températures chaudes expliquant l'augmentation de l'ozone en été ou lors d'épisode de chaleur. (Gaumont, 2007) Les études faisant état de la diminution de l'ozone atmosphérique en corrélation avec l'accroissement de la canopée sont nombreuses. Selon Luley et Bond (2002), l'augmentation de la canopée new-yorkaise de 10 % engendrerait une réduction des particules d'ozone de 3,0 à 3,8 %. (Vegriete et Labrecque, 2007)

Également, les particules en suspension dans l'air affectent l'amplitude des effets des d'ICU et représentent une menace à la santé publique puisqu'elles occasionnent ou aggravent des problèmes respiratoires chez les populations vulnérables. Les particules de moins de 10 micromètres (PM10) sont des particules fines et les particules de moins de 2,5 micromètres (PM2,5) sont considérées comme très fines. Il s'agit principalement des deux types de particules en suspension mesurables lors d'étude de la qualité de l'air. (Gaumont, 2007) Les arbres et végétaux ont la capacité d'intercepter les particules en se collant aux feuilles et aux branches et par la suite, la pluie se charge de les déposer au sol. (Gaumont, 2007) L'air d'une rue sans arbres peut contenir entre 10 000 à 12 000 particules par litre d'air tandis que la rue voisine bordée d'arbres n'en compterait que 3 000. (Gaumont, 2007) Selon la Fondation canadienne de l'arbre, 7 000 particules en suspension par litre d'air peuvent être captées par un arbre mature en bonne santé. (Gaumont, 2007). On estime qu'un arbre mature en milieu urbain peut intercepter près de 20 kg de poussières par année<sup>116</sup>. Les conifères auraient un meilleur taux de captation des particules fines dues à leurs aiguilles qui maximise les surfaces de contact de l'air. (Vergriete et Labrecque, 2007)

Afin de concevoir la foresterie urbaine et d'obtenir des résultats probants, l'essence de l'arbre doit être choisie en fonction de plusieurs critères tels que sa capacité à croître dans des conditions urbaines, la qualité du sol, le taux d'ensoleillement, le taux d'humidité, l'espace disponible pour le développement racinaire, etc.

---

116 Gaumont, C. (2007). Le verdissement montréalais pour lutter contre les îlots de chaleur urbains, le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique. In CREM. Conseil régional de l'environnement de Montreal. <http://www.cremtl.qc.ca/sites/default/files/upload/documents/publications/leverdissementmontrealais.pdf>

### 7.2.2. Végétalisation des surfaces minérales

Les surfaces minérales urbaines, telles que les routes, trottoirs, stationnements occupent une grande partie des espaces urbains. Parmi ces surfaces minérales, les stationnements, les rues et les ruelles possèdent un fort potentiel de végétalisation. Ces surfaces d'asphalte, souvent peu utilisées, contribuent à l'effet d'ICU. Les bénéfices obtenus sont proportionnels aux taux de végétalisation et de diminution des surfaces asphaltées.



**Figure 66 : Exemples de ruelles vertes montréalaises : de champêtre à classique** .source : Soverdi, s.d.b<sup>118</sup>

Les espaces de stationnement sont souvent des espaces imperméabilisés, peu végétalisés et exposés au rayonnement du soleil. Ils sont à eux seuls des espaces à îlots de chaleur. De plus, les stationnements sont des sources importantes de polluants « à cause des véhicules qui, même arrêtés, produisent encore 16 % des émissions de ces gaz. » (Vergriete et Labrecque, 2007)

Afin de réduire leur impact négatif sur la chaleur, il est recommandé que la canopée recouvre au moins 50 % de la surface asphaltée. (Gaumont, 2007)

---

117 Direction des Grands Parcs et du Verdissement (DGPV) (2012). Plan d'action canopée 2012-2021. In Ville de Montréal. Ville de Montréal.

[http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands\\_parcs\\_fr/media/documents/pac\\_juin\\_2012\\_final.pdf](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands_parcs_fr/media/documents/pac_juin_2012_final.pdf)

118 Soverdi (s.d.b). Ruelles Vertes. In Soverdi. Soverdi. <http://www.soverdi.org/ruelles-vertes>

### 7.2.3. Végétalisation des bâtiments : toits et murs

En milieu urbain dense, il n'est pas toujours possible de planter des arbres ou de verdir les rues. Les arbres nécessitent de l'espace pour croître et un système racinaire étendu pour lui permettre d'être en santé. Lors de situation conflictuelle avec le cadre bâti urbain, il est possible de compter sur la végétalisation des surfaces de toits ou de murs. Les plantes installées sur les toits n'accumulent pas de chaleur tandis qu'une toiture noire en accumule beaucoup.

Environ 10 à 13 % de la surface des villes sont des toits. Selon une étude allemande, il est prétendu qu'en verdissant 5 % de tous les toits et murs d'une ville, le climat urbain serait sain<sup>119</sup>. Pour les toitures, les systèmes de verdissement sont multiples et depuis plusieurs années les bénéfiques ont été prouvés. Les toitures vertes peuvent être conçues en système extensif ou intensif. La différence se situe globalement dans la quantité de terreau. Un système extensif est composé de substrat mince (5 à 20 cm) donc, l'apport en eau ainsi que le choix des végétaux sont limités<sup>120</sup>.

Un système intensif possède un plus sol épais (20 cm et plus), souvent muni d'un système d'irrigation offrant des conditions de croissance plus faciles et donc une plus grande variété de plantes et mêmes d'arbres. (Trottier, 2007).



Figure 67 : Exemple d'un végétal et d'un mur de plantes grimpantes.

source: éco habitation, 2013 [www.ecohabitation.com](http://www.ecohabitation.com)

Pour le bâtiment, l'avantage d'une toiture verte tant intensif qu'extensif se situe majoritairement dans une diminution de la demande en climatisation l'été ainsi qu'une prolongation de la membrane d'étanchéité étant donné qu'elle est protégée des UV et intempéries par une couche de végétation<sup>121</sup>.

---

119 Parmentier, A. (2010). Élaboration d'un outil d'aide à la décision pour atténuer le phénomène d'îlots de chaleur en milieu urbain. Maîtrise en génie de l'environnement, École des technologies supérieures, Montréal

120 Trottier, A. (2010). Toitures végétales : implantation de toits verts en milieu institutionnel (2). Maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal.

121 Cosgrove, E. et Spino, A. (2015). Toits végétaux : étape par étape, avantages et inconvénients. In éco habitation. <http://www.ecohabitation.com/guide/toits-vegetaux-etape-etapeavantages-inconvenients>.



En ce qui concerne la lutte aux ICU les deux systèmes de toitures vertes s'équivalent en termes de bénéfices sur la température. La différence qu'apporte un système envers l'autre est en lien avec l'apport de la plantation et de l'absence d'absorption solaire par les matériaux de toiture. (Vergriete et Labrecque, 2007) Malgré le fait que la toiture végétale apporte plusieurs bénéfices environnementaux, ces structures sont marginalisées. Ce manque de popularité s'explique possiblement par peu de réduction des coûts pour le chauffage et l'économie d'énergie est principalement reliée aux frais de climatisation l'été<sup>121</sup>.

En plus des toits, les murs des constructions exposées au soleil peuvent faire l'objet d'une végétalisation soit par des plantes grimpantes ou par des murs végétalisés. Les murs végétalisés sont des structures où les plantes poussent dans un substrat placé à la verticale, le long d'un mur. Il s'agit d'une solution de verdissement efficace, mais coûteuse et demandant beaucoup d'entretien. La plantation de plantes grimpantes semble être une solution de verdissement des parois verticales avantageuse, et peu coûteuse. Cette solution offre sensiblement les mêmes avantages environnementaux qu'un mur végétalisé.

Tout comme les toitures vertes, l'effet recherché est avant tout lié à la surface couverte plus qu'à la densité du couvert végétal. (Vergriete et Labrecque, 2007). Les plantes grimpantes, implantées sur les façades ensoleillées (sud, sud-ouest) peuvent réduire les fluctuations de température du mur de 50 %, et ce quotidiennement. Un mur ainsi recouvert ne dépasse pas les 30 °C, et ce même en période de canicule. Alors que le même mur non végétalisé peut atteindre 60 °C. (Vergriete et Labrecque, 2007). Il est évalué qu'au Québec, les réductions annuelles de GES que peuvent offrir un mur vert sont de 123,2 kg/kWh au Québec et que le potentiel de rafraîchissement du mur vert serait de 33 %<sup>122</sup>. La figure 67 illustre les deux types de végétalisation des murs soient le mur végétal et le mur couvert de plantes grimpantes.

Autrement, selon l'étude de Sakai, les toits plats accumuleraient 3 fois plus de chaleur que les toits en pente<sup>123</sup>. Souvent, en ville, la réglementation urbanistique exige des toits plats.

#### **7.2.4. Revêtement de surface à albédo élevé**

Les surfaces à albédo élevé reflètent les radiations au lieu de les absorber. Plusieurs études ont démontré l'efficacité des revêtements à albédo élevé dans la diminution des températures diurnes pour les secteurs urbains présentant les caractéristiques d'ICU<sup>124</sup>.

---

122 SCHL (2007). Recherche sur les toits et les murs verts à Québec. In SCHL. Société d'hypothèque et de logement. <https://www03.cmhcschl.gc.ca/catalog/productDetail.cfm?cat=127&itm=30&lang=fr&fr=142058471182>.

123 Sakai, S., Iizawa, I., Umetani, K., Onishi, M., Ito, A., Ono, K., Yajima, A. et Amemura, N. (2007). Old and New Mechanisms of the Urban Heat Island: Thermal Inertia and Fractal Surface.

124 Oleson, K.W., Bonan, G.B. et Feddema, J. (2010). Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. *Geophysical Research Letters*

L'efficacité des toitures blanches contre la lutte aux ICU dépend notamment de la contribution des toitures à revêtement typique dans le phénomène ICU.

La figure 68 illustre une toiture blanche dans l'arrondissement de Rosemont à Montréal. Les toitures blanches et revêtements extérieurs pâles peuvent toutefois présenter des désavantages pour les villes nordiques en hiver. Toutefois, par des simulations informatiques, il a été démontré que l'implantation de toiture blanche dans la ville permettrait d'obtenir une réduction de 33 % du phénomène d'ICU. (Oleson et autres, 2010) Cette étude a été menée par des modèles climatiques sur une grande échelle et les résultats sont simulés par un changement d'albédo sur la ville entière. Taha et al ont démontré que l'augmentation de l'albédo de surface sur une grande échelle dans 10 villes des États-Unis peut réduire la température ressentie à l'échelle de la canopée de 0,5 à 1,5. Synnefa et al ont fait la démonstration que l'augmentation de l'albédo des toits sur une grande échelle a permis de diminuer, en moyenne, l'effet d'ICU de 12 degrés Celsius à Athènes en Grèce. (Oleson et autres, 2010)



**Figure 68 : Photo d'une toiture blanche dans Rosemont.** Source : RNC, 2014b<sup>125</sup>

---

125Ressources Naturelles Canada (2014). Mesures visant la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain dans Rosemont-La Petite-Patrie. In Gouvernement du Canada. Ressources Naturelles Canada. [http://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/mun/pdf/13-0616-Rosemont%20Case%20Study\\_f.pdf](http://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/mun/pdf/13-0616-Rosemont%20Case%20Study_f.pdf)



### **7.3. Incitatif à l'aménagement**

Selon le GIEC, les concepts et outils de planification d'adaptation aux CC sont reconnus. Toutefois, leur mise en œuvre et leur application sont réduites. (GIEC, 2014) La mise en œuvre des mesures d'atténuation, inscrite dans un cadre de planification, est un aspect déterminant dans l'adaptation au CC et aux ICU. Même si l'aménagement du territoire est de compétence municipale, les CC affectent plusieurs systèmes ou services publics, tels que la santé, les travaux publics, ou encore l'approvisionnement et le traitement des eaux. Ainsi, l'adaptation concerne plusieurs niveaux décisionnels et, pour favoriser la mise en œuvre de projet visant la réduction des ICU, des incitatifs réglementaires ou financiers doivent généralement être proposés aux municipalités. Les aménagements visant la réduction des ICU sont souvent plus coûteux que les aménagements urbains traditionnels. De multiples programmes existent dans le monde afin d'inciter ou d'obliger des aménagements réducteurs d'ICU.

#### **7.3.1. Gouvernement, villes et municipalités**

Pour inciter les municipalités à se doter d'un plan ou d'une stratégie d'adaptation, il faut que les paliers supérieurs de gouvernement soutiennent financièrement les initiatives et favorisent la mise en œuvre de plan d'adaptation. De cette façon, les mesures seront ciblées sur les problématiques territoriales et les orientations à grandes échelles sont essentielles dans l'adaptation au CC.

La réglementation municipale peut jouer un rôle important dans la mise en œuvre de mesures d'adaptation aux ICU. Il existe plusieurs exemples de réglementation encadrant la mise en œuvre de toit vert sur la planète. Par exemple, la ville de Tokyo possède un règlement municipal obligeant les nouveaux bâtiments privés de plus de 1000 mètres carrés et les bâtiments publics d'au plus 250 mètres carrés à se doter d'un toit vert sur au moins 20 % de la superficie de la toiture<sup>126</sup>. Depuis 2010, Toronto devient la première ville nord-américaine à imposer des toits verts pour tout nouveau bâtiment industriel, commercial ou résidentiel de plus de 2000 mètres carrés de plancher<sup>127</sup>. La surface exigée recouverte d'un toit vert est proportionnelle à la surface du bâtiment allant de 20 à 60 %<sup>128</sup>.

---

126 Boucher, I. (2006). Toits verts. In Gouvernement du Québec. MAMROT.

[http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire\\_municipal/veille/toits\\_verts.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire_municipal/veille/toits_verts.pdf)

127 Novae (2014). Toronto: première ville nord-américaine à exiger des toits verts. In Novae. Novae.

<http://novae.ca/actualites/2012-04/toronto-premi%C3%A8re-ville-nord-am%C3%A9ricaine-%C3%A0-exiger-des-toits-verts>

128 City of Toronto (2014). Green Roofs. In City of Toronto. City of Toronto.

<http://www1.toronto.ca/wps/portal/contentonly?vgnextoid=3a7a036318061410VgnVCM10000071d60f89RCRD#industria>

De pair avec la réglementation des politiques incitatives peuvent être mises en place. Certains exemples inspirants, pour l'aménagement des toits verts, ont été exécutés en Europe. D'abord, en Allemagne, treize municipalités ont réduit les frais reliés à la gestion des eaux pluviales et ces réductions de coûts ont été redistribuées aux bâtiments où des toits verts ont été installés. (Boucher, 2006) En Autriche, la ville de Linz a, depuis 1989, encouragé la mise en œuvre de plus de 200 toits verts en payant jusqu'à 30 % de la facture d'aménagement. (Boucher, 2006) Les 3066 mètres carrés de toiture de l'hôtel de ville de Chicago ont fait l'objet de l'aménagement d'un toit vert. Les températures des journées chaudes sur le toit sont passées de maximum de degrés Celsius à des températures variant entre 29 et 38 °C (Boucher, 2006) À Montréal, l'arrondissement Rosemont-Petite-Patrie a été précurseur en adoptant, en 2011, une réglementation exigeant maintenant des toitures blanches ou vertes pour toutes les nouvelles de toitures et pour les réfections complètes de toiture<sup>129</sup>. La lutte aux stationnements conventionnels va de pair avec la lutte aux ICU<sup>130</sup>.

Les municipalités peuvent jouer un rôle important dans la mise en œuvre de stationnement plus vert par l'adoption de règlements. Les municipalités ont le pouvoir d'exiger la délivrance d'un permis pour des travaux d'aménagement ou de réaménagement de stationnement. (Boucher, 2013) Leur taille, le nombre de cases, leur végétalisation, le choix du revêtement, peuvent s'inscrire à l'intérieur d'une réglementation. (Boucher, 2013)

### **7.3.2. Rôle de l'intervention communautaire**

Dans la mise en œuvre d'un plan d'adaptation, les municipalités ne peuvent directement intervenir sur le domaine privé. C'est pourquoi les intervenants communautaires peuvent contribuer à la mise en œuvre du plan d'adaptation. Les intervenants communautaires peuvent aussi jouer un rôle d'accompagnateur dans le cadre de projet de verdissement du domaine privé. À Montréal, les projets de ruelles vertes sont dirigés d'abord par les citoyens. Les ruelles étant généralement du domaine public, l'approbation de l'arrondissement est nécessaire<sup>131</sup>. Près d'une centaine de ruelles vertes ont vu le jour depuis 1995 à Montréal<sup>132</sup>.

---

129 Dumont, A. (2014). Toits blancs : une question de santé publique, selon le maire. In ruemasson.com. Rue Masson. <http://ruemasson.com/2014/12/19/toits-blancs-une-question-de-sante-publique-selon-lemaire/>

130 Boucher, I. (2013). La lutte aux îlots de chaleur urbains par l'aménagement des aires de stationnement. In Gouvernement du Québec. MAMROT.

[http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement\\_territoire/documentation/lutte\\_ilots\\_chaleur.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement_territoire/documentation/lutte_ilots_chaleur.pdf)

131 Ressources Naturelles Canada (2014). Mesures visant la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain dans [http://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/mun/pdf/13-0616-Rosemont%20Case%20Study\\_f.pdf](http://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/mun/pdf/13-0616-Rosemont%20Case%20Study_f.pdf)

132 Regroupement des éco quartiers (2015). Ruelle verte. In Charbonneau, S. Regroupement des éco quartiers. [http://www.eco-quartiers.org/ruelle\\_verte](http://www.eco-quartiers.org/ruelle_verte)

Le financement pour la mise en œuvre de ruelles vertes provient de diverses sources et l'écoquartier apporte un support au groupe de citoyens souhaitant aménager leur ruelle verte (Regroupement éco quartier, 2015)

Ces initiatives communautaires permettent de bonifier l'implantation d'aménagement municipal et ainsi contribuer à la mise en place de mesures d'adaptation. Le verdissement communautaire peut préconiser des implantations de petits projets dans des secteurs à population vulnérable. Les projets de verdissement impliquant les résidents sont souvent un très grand succès public. Les citoyens sont des acteurs utilisant le territoire et le suivi des projets de verdissement communautaire est plus facile puisque les gens y demeurent et voient l'évolution du projet<sup>133</sup>.

### **7.3.3. Objectif d'aménagement**

Toutes les mesures d'aménagement réducteur d'ICU ainsi que les incitatifs à l'aménagement doivent s'inscrire dans un cadre tel qu'un plan d'adaptation dont l'objectif principal est de réduire les effets et les impacts des CC sur le territoire et sur les populations. Cette grande intention doit pouvoir se décortiquer en objectif quantifiable. Afin de mesurer la progression, l'implantation et l'efficacité des interventions, il est nécessaire de fixer les objectifs mesurables. (Ouranos, 2010)

L'implantation d'aménagement réducteur de chaleur permettra d'obtenir des résultats quant à la diminution des effets des ICU. La réduction de ses effets peut aussi faire partie des objectifs élaborés dans le cadre du plan d'adaptation. Toutefois, les objectifs élaborés dans le cadre de la diminution des impacts des ICU doivent être évalués en fonction des hausses indéniables des températures que les CC apportent<sup>134</sup>.

Les objectifs mesurables doivent être accompagnés d'indicateurs de performance. L'élaboration des indicateurs servira à suivre la progression des interventions du projet d'adaptation.

## **8. Indicateurs potentiels et suivi des mesures**

Une fois les mesures d'atténuation identifiées et mises en place, comment mesure-t-on la progression des effets des ICU? Comment est-il possible de valider si les mesures mises en place fonctionnent?

---

133 Charbonneau, E. (2014). Plan d'adaptation aux changements climatiques de la ville de Montréal. Communication orale. Plan d'adaptation aux changements climatiques de la ville de Montréal, 12 novembre, Ville de Montréal.

134 Webster, A., Gagnon-Lebrun, F., Desjarlais, C., Nolet, J., Sauvé, C. et Uhde, S. (2008). L'évaluation des avantages des coûts de l'adaptation aux changements climatiques. In Ouranos. MAMROT.

[http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire\\_municipal/etudes\\_donnees\\_statistiques/evaluation\\_avantages\\_couts\\_adaptation.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire_municipal/etudes_donnees_statistiques/evaluation_avantages_couts_adaptation.pdf)

D'abord, il faut déterminer ce qu'est un indicateur et à quoi il sert. Ensuite, les indicateurs identifiés sont séparés en 2 catégories : les indicateurs directs et indirects.

Parmi les indicateurs directs, la température et les indices de verdissement sont à l'étude. Ces indicateurs sont en liens directs avec les causes des ICU. Les indicateurs directs sont issus des outils de mesures des ICU. Parmi ceux-ci, la température et le taux de croissance des végétaux et surface végétalisée sont étudiés. En ce qui concerne les indicateurs indirects, ils proviennent des effets qu'entraînent les ICU, soit la santé, la densification des populations, la qualité de l'air.

L'élaboration de ces indicateurs pourrait permettre d'évaluer la performance et le taux d'implantation des aménagements visant la réduction des ICU. Tout d'abord, il est important d'expliquer l'importance des indicateurs dans la mise en œuvre d'un plan d'adaptation au CC. Le GIEC affirme que l'adaptation au CC s'est limitée à l'élaboration des risques associés aux CC, à l'établissement de la vulnérabilité et la planification de l'adaptation. Les outils de planification de l'adaptation aux CC sont reconnus sur une grande partie du globe, mais leur application et leur mise en œuvre sont réduites. (GIEC, 2014)

Très peu de gouvernements, se sont attardés au processus de mise en œuvre et de suivi des mesures. (GIEC, 2014) Pourtant, la mise en œuvre d'un plan d'adaptation est l'une des étapes cruciales dans l'atteinte de la résilience urbaine. Le plan d'adaptation doit intégrer des méthodes de suivi et des indicateurs afin d'assurer la performance des stratégies implantées. Également, les mécanismes de suivi permettent d'ajuster, de réviser, de bonifier le plan en fonction des objectifs, et ce de façon périodique. (Ouranos, 2010)

Ensuite, afin de suivre la progression de la mise en place des mesures d'adaptation ou d'aménagement, il est pertinent d'identifier des indicateurs permettant de mesurer la différence entre la situation actuelle et la validation de l'atteinte des objectifs du plan. L'indicateur doit permettre de mesurer la progression des impacts en référence à la situation de statu quo et de mesurer l'impact d'une ou plusieurs solutions d'adaptation. (Ouranos, 2010)

Afin de déterminer les indicateurs pour l'adaptation aux CC et ICU, les principes élaborés dans le domaine de la gestion de projet pourraient s'appliquer. Les objectifs ainsi que les indicateurs de performance, dans le cadre d'un projet, doivent répondre à plusieurs critères. Ils doivent pouvoir aider à faire un constat quantifiable et traçable de la situation.

Ils doivent pouvoir être mise à jour périodiquement. (Villeneuve, 2013) Idéalement, ils doivent être « SMART » c'est-à-dire, spécifiques, mesurables, atteignables, réalistes et fixés dans le

temps<sup>135</sup>. Le tableau 4 décrit chacune des caractéristiques d'un indicateur intelligent. L'indicateur intelligent parle de façon efficace et aide à la prise de décision.

Qualificatif	définition
<b>Spécifiques</b>	Description claire et compréhensible, adaptée au contexte et à l'objectif.
<b>Mesurable</b>	quantifiable en quantité ou en qualité
<b>Atteignable</b>	En lien avec les risques et faisable
<b>Raisnable</b>	Réaliste
<b>Temporel</b>	Echéancier fixé dans le temps

**Tableau 4 : Caractéristique d'un indicateur intelligent.** source : Villeneuve, 2013.<sup>135</sup>

L'élaboration de ces indicateurs permettra d'évaluer la performance et le taux d'implantation pour l'adaptation aux ICU. Les indicateurs présentés ci-après répondent aux critères SMART. Les impacts physiques de la mise en œuvre de mesure d'adaptation ou d'aménagement réducteur d'ICU doivent pouvoir être quantifiés assez précisément afin de pouvoir répondre aux objectifs du plan. Aussi, les mesures visant la lutte aux ICU doivent être associées à un effet quantifiable sur la population et le territoire. (Ouranos, 2010)

## **8.1. Indicateurs directs**

### **8.1.1. Température et outils de mesure**

Selon les modèles climatiques, les températures annuelles augmenteront. La température est un indicateur de l'augmentation des ICU, étant donné que les aménagements réducteurs de d'ICU vise la normalisation des températures urbaines. Pour mesurer l'évolution thermique des ICU, il faut comparer le territoire dans un intervalle de temps donné.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées. L'étude de Streukler, à Houston, a fait la démonstration de la croissance des ICU par la comparaison d'un lot de cartes mesurant les ICU à 12 ans d'intervalle<sup>136</sup>.

Afin d'optimiser l'identification des ICU, la mesure de la température devrait impliquer deux méthodes, soit une mesure de la température directe, « par exemple des stations météorologiques ou des traverses automobiles et par une mesure éloignée telle que l'imagerie satellite.

---

135 Villeneuve, C. (2013). ENV 704 Développement durable dans les organisations. Université de Sherbrooke, Centre universitaire de formation en environnement et développement durable (CUFE)

136 Streutker, D.R. (2003). Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. Remote Sensing of Environment

L'imprécision du portrait par satellite peut être comblée par des données terrain. (Streutker, 2003) En couplant les relevés thermiques aux cartes d'occupation du territoire, il est possible de diriger les efforts et des recommandations en fonction des usages du sol. Les différents climats urbains, tels qu'identifiés dans la théorie du Local Climate Zone, nécessitent des objectifs différents pour favoriser la diminution des ICU. Chaque type d'environnement construit de la ville ne peut répondre aux mêmes objectifs d'atténuation puisque les effets des ICU ne sont pas répartis équitablement sur le territoire urbain.

### **8.1.2. Indice de verdissement et mesure de l'évolution de la canopée**

Les îlots de chaleur urbains sont principalement liés à dévégétalisation urbaine<sup>137</sup>. M. Baudouin et son équipe du département de géographie de l'UQAM ont comparé les données sur la région du Grand Montréal de 1984 et de 2005. L'étude des cartes d'évolution thermique de l'agglomération montréalaise superposées aux cartes de pertes de couvert forestier ont permis d'atteindre un constat clair : la corrélation entre l'augmentation des ICU et la perte de couvert végétal (Reeves, 2011). Afin de valider la quantité de végétation sur le territoire de l'agglomération, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est l'indice le plus souvent préconisé<sup>138</sup>. Au moyen d'images satellites auxquelles on applique un filtre, il est possible d'évaluer le NDVI<sup>139</sup>. La valeur du NDVI varie entre -1 et +1. Les indices entre 0 et -1 démontrent l'absence ou la faible présence de végétation, tandis que les valeurs de 0 à +1 indiquent une présence considérable du couvert végétal. (Cavayas et Beaudouin, 2008)

L'indice de prédilection pour mesurer l'ampleur du couvert forestier est l'indice de canopée. Il est reconnu qu'un indice de canopée élevé permet d'atténuer les effets des ICU et améliore la rétention des eaux de pluie<sup>140</sup>. La canopée est la superficie, rapportée au sol, qu'occupe la couronne des arbres, de plus de 3 mètres de diamètre. La couronne de l'arbre représente l'étendue de ses feuilles et ses branches<sup>141</sup>. L'indice de canopée permet d'établir le couvert arborescent du territoire et aussi permet de valider la croissance ou la décroissance de la foresterie urbaine. (Jutras, 2015)

---

137 Reeves, F. (2011). Planète Cœur. Québec, Multimondes

138 Cavayas, F. et Baudouin, Y. (2008). Étude des biotopes urbains et périurbains de la cmm - Volets 1 et 2. In CMM. Étude des biotopes urbains et périurbains de la cmm.

[http://cmm.qc.ca/biotopes/docs/volets\\_1\\_et\\_2.pdf](http://cmm.qc.ca/biotopes/docs/volets_1_et_2.pdf)

139 Jutras, P. (2015). Mesure de l'indice de canopée. Communication orale. rencontre, 22 janvier, Montréal.

140 Boisvert, P. (2013). Plantation d'arbres: à vos pelles! In La presse. La presse.

<http://www.lapresse.ca/maison/cour-et-jardin/jardiner/201311/08/01-4708749-plantation-darbresa-vos-pelles.php>

141 Ville de Montréal (2015). Suivi de la qualité de l'air. In Ville de Montréal. Ville de Montréal

Puisque l'arbre urbain est soumis à plusieurs stress tels que la pollution, les sels de déglacage ou encore l'espace restreint pour le développement racinaire, la croissance en est affectée. C'est pourquoi l'indice de canopée a dépassé le taux de plantation d'arbres dans la mesure de l'étendue de la forêt urbaine. (Jutras, 2015).

L'indice de canopée permet de mesurer la croissance réelle des arbres et ainsi obtenir une meilleure estimation des bénéfices. Il permet également d'obtenir des renseignements indispensables afin de notamment prévenir et identifier, les ICU<sup>142</sup>. L'indice de canopée permet d'ajouter un niveau de précision supplémentaire au NDVI.

L'image LIDAR peut aussi être superposée d'une carte de l'occupation du territoire. La superposition de ses deux cartes permet d'analyser le couvert végétal en fonction de l'utilisation du territoire. Puisque la ville n'est pas homogène et que la densification des infrastructures est inégale à travers le territoire, il est plus facile de faire des constats et d'ajuster les efforts en fonction du territoire public ou privé ou encore en fonction des usages, résidentiels, commerciaux, institutionnels. Selon Dr Pierre Jutras, il est préférable de mesurer l'indice de canopée aux 5 ans. (Jutras, 2015) En 5 ans, la croissance des arbres est peu significative, mais suffisamment importante pour valider les objectifs du plan et d'ajuster le tir si nécessaire. (Jutras, 2015).

### **3.2. Indicateurs indirects**

Les indicateurs indirects permettent d'évaluer, entre autres, certains contributeurs à l'accroissement du phénomène et des bénéfices associés aux aménagements réducteurs d'ICU. La mesure de ces bénéfices peut servir d'indicateur de performance pour plusieurs stratégies d'adaptation. Ils peuvent aussi servir à valider d'autres interventions préconisées dans le plan d'adaptation. Les indicateurs indirects ont été sélectionnés en fonction de leur faisabilité et de leur lien avec les aménagements réducteurs d'ICU.

#### **3.2.1. Indice de densité de population et urbanisation**

L'augmentation de la population et de l'urbanisation sont souvent précurseur d'augmentation des ICU.

---

142 Direction des Grands Parcs et du Verdissement (DGPV) (2012). Plan d'action canopée 2012-2021.

[http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands\\_parcs\\_fr/media/documents/pac\\_juin\\_2012\\_final.pdf](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands_parcs_fr/media/documents/pac_juin_2012_final.pdf)

Les secteurs peuplés de la ville sont associés aux ICU<sup>143</sup>. L'occupation du territoire et la progression de la minéralisation du territoire se font généralement au détriment des espaces naturels ou verts et la température au sol augmente lorsque l'urbanisation entraîne la perte d'un boisé. (Reeves, 2011). Le taux de population par secteur pourrait s'avérer un indicateur indirect des ICU. L'étude du Dr Streulker des images satellites et des images aéroportées de la ville de Houston prises à 12 ans d'intervalle a permis d'observer la corrélation entre l'augmentation de la population l'augmentation et des ICU au cours de cette période<sup>144</sup>. L'accroissement ou la diminution des populations permet de tirer des liens annonciateurs d'ICU et permettent de réagir avec l'implantation de mesures palliatives à court terme dans ses secteurs fortement peuplés.

Les ICU sont majoritairement présents dans les secteurs industriels et dans les secteurs résidentiels les plus densément peuplés et minéralisés<sup>144</sup>.

### **3.2.2. Indice de santé et sécurité publique**

Une relation directe a été démontrée entre l'intensité des ICU et les hausses des maladies et de la morbidité (Nombre d'individus atteints par une maladie dans une population donnée et pendant une période déterminée) liées à l'inconfort thermique<sup>145</sup>. L'étude de Smargiassi a démontré que la mortalité est plus élevée dans les secteurs plus chauds par rapport aux secteurs plus frais<sup>146</sup>. En implantant des mesures d'adaptation dans les secteurs à prioriser, ceci aurait pour effet de diminuer les températures, diminuant les risques de mortalité associés.

L'inconfort thermique n'est pas également répandu au travers du territoire montréalais. Les personnes défavorisées économiquement constituent un groupe de la population urbaine plus à risque d'éprouver de l'inconfort lors d'épisode de chaleur. (Tairou et autres, 2010) Souvent, la défavorisation économique est aussi accompagnée de défavorisation sociale. Ces quartiers occupés par des populations défavorisées ou vulnérables ont souvent des taux faibles de couvert végétal et présentent un fort potentiel d'ICU. (Gendron-Bouchard, 2013) Afin d'orienter les interventions, les secteurs comportant des concentrations de populations vulnérables sont identifiés.

---

143 Tairou, F.O., Bélanger, D. et Gosselin, P. (2010). Proposition d'indicateurs aux fins de vigie et de surveillance des troubles de la santé liés à la chaleur. In Institut Nationale de Santé Publique du Québec. Institut Nationale de Santé Publique du Québec. [www.inspq.qc.ca/pdf/.../1079\\_IndicateursVigieSanteChaleur.pdf](http://www.inspq.qc.ca/pdf/.../1079_IndicateursVigieSanteChaleur.pdf)

144 Streutker, D.R. (2003). Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. Remote Sensing of Environment

145 Solecki, W.D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J. et Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards



L'indice de défavorisation permet d'identifier les secteurs ou les populations sont caractérisées par une défavorisation sociale ainsi qu'économique<sup>147</sup>. Ces secteurs sont ensuite couplés au secteur présentant un fort potentiel d'ICU. La juxtaposition de ces données permet de tirer des conclusions quant à la vulnérabilité des populations aux ICU.

Les épisodes de chaleur et les ICU influent fortement sur le système de santé. (Tairou et autres, 2010) En cas de crise, le système de santé publique doit pouvoir répondre aux besoins et offrir un service adéquat. Pour faire face aux épisodes de chaleur accablante, chaque région doit se doter de plans d'action en cas de chaleur accablante. Ces plans sont généralement conçus par les agences de santé et services sociaux des régions concernées. Ces plans revendiquent, entre autres, la collaboration des municipalités afin de mettre en place des aménagements réducteurs d'ICU (Ouranos, 2010) Plusieurs paramètres de la santé publique permettraient d'évaluer l'efficacité des mesures d'adaptation en lien avec la santé des populations. La chaleur peut occasionner des inconforts, de la morbidité (la déshydratation, l'hyperthermie, le coup de chaleur) ou la mortalité dépendamment de l'exposition et de la vulnérabilité des populations. (Tairou et autres, 2010).

Plusieurs indicateurs du taux de taxation du système de santé lors d'épisode de chaleur pourraient s'avérer utiles. L'indicateur sanitaire fréquemment utilisé est le taux de mortalité. (Tairou et autres, 2010) En plus du taux de morbidité ou de mortalité, le transport ambulancier des victimes des ICU permettrait d'améliorer les constats lors de période de chaleur accablante. (Tairou et autres, 2010) Également, les consultations téléphoniques d'Info-Santé pourraient indiquer l'ampleur de la morbidité ou des stress thermiques. (Tairou et autres, 2010) Les stratégies d'adaptation en milieu urbain visant la lutte aux ICU doivent être associées à des indicateurs permettant de quantifier l'évolution du taux de mortalité ou de morbidité<sup>148</sup>. Également, la qualité de l'air joue un rôle important sur l'état de santé des populations vulnérables. Les aménagements réducteurs de chaleur qui ont comme bénéfices associés d'améliorer la qualité de l'air pourraient avoir un impact positif sur l'état de santé de la population urbaine vulnérable. C'est pourquoi il est primordial de prioriser les secteurs à ICU où résident des populations vulnérables afin d'implanter des mesures d'atténuation aux ICU.

---

146 Smargiassi, A., Goldberg, M.S., Plante, C., Fournier, M., Baudouin, Y. et Kosatsky, T. (2009). Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands. *Journal of epidemiology and community health*

147 GendronBoucher, 2013 La lutte aux îlots de chaleur urbains par l'aménagement des aires de stationnement. In Gouvernement du Québec. MAMROT.

[http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement\\_territoire/documentation/lutte\\_ilots\\_chaleur.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement_territoire/documentation/lutte_ilots_chaleur.pdf)

148 Webster, A., Gagnon-Lebrun, F., Desjarlais, C., Nolet, J., Sauvé, C. et Uhde, S. (2008). L'évaluation des avantages des coûts de l'adaptation aux changements climatiques. In Ouranos. MAMROT.

[http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire\\_municipal/etudes\\_donnees\\_statistiques/evaluation\\_avantages\\_couts\\_adaptation.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire_municipal/etudes_donnees_statistiques/evaluation_avantages_couts_adaptation.pdf)

### 3.2.3. Indice de qualité de l'air

Puisque les ICU peuvent contribuer, entre autres, à la formation de 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), les aménagements réducteurs d'ICU ont souvent comme bénéfices associés l'amélioration de la qualité de l'air. (Giguère, 2009) La végétalisation des espaces urbains permet de capter une partie des poussières et de plusieurs polluants atmosphériques. (Solecki et autres, 2005)

La réduction des polluants atmosphériques pourrait témoigner de la diminution des activités polluantes (transport, industrie, etc.) ou de l'implantation d'aménagements lesquels sont en lien avec les objectifs d'un plan d'adaptation. La mesure de la quantité des polluants comprenant l'ozone, les particules fines, le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote et le monoxyde de carbone mis en relation avec les données de référence correspondante permet d'identifier l'indice de qualité de l'air (IQA)<sup>149</sup>. Le polluant obtenant le plus haut indice est celui qui qualifie l'IQA. (MDDELCC, 2002) À partir de cette valeur de référence, on considère la qualité de l'air en fonction de critères sur la santé humaine. (MDDELCC, 2002)

Un indice compris entre 1 et 25 est considéré bon entre 26 et 50 acceptable et 51 et plus mauvais. (Ville de Montréal, 2015)

Afin de permettre un relevé plus juste de la progression des mesures d'adaptation aux ICU, il faut implanter des stations d'échantillonnage dans les secteurs d'ICU. Ces mesures de l'IQA couplé aux températures de la ville permettront de tirer des conclusions quant à l'amélioration de la qualité de l'air. Ceci permettra d'indiquer l'implication des mesures d'adaptation aux ICU dans l'amélioration de la qualité de l'air dans ces secteurs.

La quantité de particules fines est aussi révélatrice de la pollution atmosphérique puisqu'elles contribuent grandement au smog urbain<sup>150</sup>. La végétation peut intercepter une partie des particules fines grâce au feuillage et les diriger vers les eaux de ruissellement.

Finalement, l'indice de qualité de l'air permet de valider plusieurs objectifs transversaux de la lutte aux ICU et à l'adaptation au CC puisque l'état de santé de la population urbaine devrait s'améliorer au rythme de l'amélioration de la qualité de l'air et de la diminution des températures urbaines. (Vergriete et Labrecque, 2007)

---

149 MDDELCC (2002). Indice de la qualité de l'air (IQA). In Gouvernement du Québec. MDDELCC.

<http://www.iqa.mddelcc.gouv.qc.ca/contenu/calcul.htm>

150 MDDELCC (2015). Infosmog. In MDDELCC. MDDELCC. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/AIR/infosmog/index.htm>

#### 4. Suivi des mesures

La mise en place de stratégies de mitigation des CC ou des ICU a pour grand objectif la résilience urbaine. Toutefois, cet objectif est difficile à mesurer. C'est pourquoi les indicateurs, décrits dans ce chapitre, peuvent aider à tirer des conclusions quantitatives quant à la progression des ICU et de ses effets. Selon les termes de référence élaborés pour les municipalités par le MDDELCC dans le cadre de mise en œuvre d'un plan d'adaptation, une partie du plan doit faire la démonstration des mécanismes de suivi et de mise en places des mesures d'adaptation. (MDDELCC, 2006)

Ces mécanismes de suivi doivent faire l'objet d'un inventaire, doivent être priorisés et permettre d'être mise à jour. (MDDELCC, 2006)

Indicateurs	Exemples de méthode de suivi	Mise à jour de l'indicateur
Indice de canopée	Nombre d'arbres plantés	À tous les 5 ans afin de valider la progression de la croissance et de l'implantation des arbres et en fonction des relevés aériens disponibles
Température	Nombre de permis octroyé pour les toitures blanches/vertes	Les comparaisons dans la littérature s'effectuent aux 10 ans, mais aussi en fonction des relevés satellites et aériens disponibles.
Densité	Nombre de nouveaux permis de construction d'habitation	En fonction des données disponibles
Santé publique	Nombre de mortalité lié avec la chaleur. Nombre d'hospitalisation, de transfert ambulancier et d'appel à info-santé en lien avec l'inconfort thermique et le lieu de résidence	En fonction des données disponibles. Toutefois, un rapport annuel permet de tirer des conclusions quant à l'évolution
Qualité de l'air	Mesure de la qualité de l'air (RSQA)	Les données sont disponibles quotidiennement. Toutefois, un rapport annuel permet de tirer des conclusions quant à l'évolution de la qualité de l'air

Tableau 5 : Sommaire des mesures de suivi et des indicateurs de performance.  
source : Filiatreault\_Ysabelle

Les indicateurs présentés dans ce chapitre pourraient servir lors de l'élaboration du suivi des mesures d'adaptation dans le cadre d'un plan d'adaptation au CC et plus particulièrement dans la lutte aux ICU. Ces indicateurs doivent être révisés. La mise à jour des indicateurs devrait s'effectuer en fonction des disponibilités des données, du taux de croissance et du rythme d'implantation des stratégies d'adaptation.

Certains indicateurs méritent donc d'être mesurés quotidiennement, annuellement, ou à chaque 5 ans. Il est judicieux de prévoir les indicateurs de performance des mesures d'adaptation, mais il faut aussi valider l'implantation de ces mesures. Afin de s'assurer de la mise en place des stratégies des ICU, certains objectifs d'aménagement quantifiables peuvent être fixés.

Il est possible de dénombrer, par exemple, le nombre d'arbres planté annuellement ou la quantité de permis octroyés pour des toitures blanches ou vertes. En combinant les mesures de suivi au potentiel de rendement des stratégies d'adaptation, les indicateurs devraient pouvoir valider la progression ou la diminution des ICU.

## **5. Efficacité énergétique et green building**

Il s'agit d'une construction saine, utilisant des matériaux naturels. Ils considèrent qu'un bâtiment doit avant tout s'adapter à l'homme, le bien être des occupants étant capital. Ces partisans du [green building](#) condamnent l'utilisation de substances toxiques dans la fabrication industrielle des matériaux de construction. Les experts en économie d'énergie ont pour objectif de limiter, grâce à des technologies ultramodernes, les impacts négatifs de l'habitat humain sur l'[environnement](#) et de réduire la consommation d'énergie des immeubles, des maisons et des appartements. En effet, ils préconisent une isolation thermique renforcée et des techniques de construction pointues.

Le green building est conçu pour réduire l'impact global de l'environnement bâti, sur la santé humaine et l'environnement naturel par :

- L'utilisation efficace de l'énergie, l'eau et d'autres ressources ;
- Protéger la santé des occupants et l'amélioration de la productivité des employés ;
- Réduire les déchets, la pollution et dégradation de l'environnement.

L'efficacité énergétique est un axe majeur et un composant essentiel pour le green building. Elle devient même le critère majeur de son succès. Le green building doit toujours être équipé de [solutions](#) qui permettent de mieux gérer l'énergie électrique, réduire la consommation et contribuer à fournir une énergie de qualité<sup>151</sup>.

---

151 [http://www.legrand.com/FR/green-building-description\\_12849.html](http://www.legrand.com/FR/green-building-description_12849.html)

## **5.1. Le gaspillage**

Depuis dix ans, les observateurs dénoncent les pics de consommation d'énergie liés aux équipements de climatisation de confort. Ils pointent, entre autres, un dimensionnement inadéquat, des entretiens et une maintenance inexistantes ou inadaptées, le maintien de certaines technologies obsolètes et énergivores.

Les systèmes de climatisation et les pompes à chaleur réversibles d'une puissance frigorifique nominale supérieure à 12 kilowatts sont des équipements utilisés pour le confort. Ils affichent des consommations d'énergie sans rapport avec les besoins réels, soit parce qu'ils sont mal dimensionnés, soit parce qu'ils ne sont pas correctement entretenus ou gérés. Le gaspillage n'a aucune place dans le green building<sup>151</sup>.

## **5.2. Economie d'énergie**

On entend par économies d'énergie l'ensemble des actions économiquement rentables entreprises pour réduire les consommations d'énergie, par la mise en place d'équipements adaptés dans les installations électriques, par exemple. L'objectif est aussi de consommer l'énergie de façon optimale.

Les principales mesures permettant des économies d'énergies regroupent les actions suivantes :

- bonne isolation thermique de toutes les parties extérieures (murs, fenêtres, toit, etc.) ;
- suppression des ponts thermiques et autres « fuites d'énergies » ;
- bonne étanchéité de l'enveloppe extérieure du bâtiment ;
- réduction des déperditions thermiques dues à la ventilation ;
- efficacité d'une chaudière à inertie réduite.
- optimisation de la gestion de l'électricité (la réduction de la puissance installée, la gestion centralisée, l'utilisation des équipements de gestion d'éclairage, etc.) <sup>151</sup>.

## **5.3. L'énergie renouvelable**

### **5.3.1. Le système solaire**

Les systèmes de chauffage solaires peuvent être installés dans tous les types de bâtiments. L'utilisation de l'énergie solaire pour préchauffer l'air extérieur avant son admission à l'intérieur d'un bâtiment peut contribuer à réduire considérablement les frais de chauffage dans le résidentiel comme dans le tertiaire. Les systèmes de chauffage solaires sont particulièrement efficaces pour les grands bâtiments, comme les hôpitaux, les hangars, les écoles et les gymnases, de même que pour les immeubles résidentiels à plusieurs étages<sup>151</sup>.

### **5.3.2. La géothermie**

La géothermie consiste en l'extraction de l'énergie contenue dans le sol afin de l'utiliser pour la climatisation, le chauffage ou pour la transformer en électricité. La mise en place d'un système de pompes à chaleur géothermique représente un investissement important, mais il permet d'être propriétaire d'une source inépuisable d'énergie qui procurera de 60% à 70% de l'énergie de chauffage du bâtiment. Les systèmes de géothermie peuvent être installés sur des maisons neuves ou en rénovation. La géothermie permet donc de réduire considérablement l'utilisation d'énergies fossiles ou électriques qui émettent beaucoup plus de gaz à effet de serre et qui sont généralement moins rentables à long terme. La géothermie est naturellement un paramètre du green building<sup>151</sup>.

### **5.3.3. D'autres sources d'énergies**

Avec l'énergie solaire et la géothermie, l'énergie éolienne est la troisième grande source d'énergie du green building. L'énergie éolienne est aujourd'hui l'énergie propre la moins coûteuse à produire, ce qui explique l'engouement fort pour cette technologie.

L'énergie de l'eau ou énergie hydraulique est majoritairement produite par le déplacement ou l'accumulation d'eau douce ou d'eau de mer.

La biomasse est à l'origine issue de la photosynthèse, l'énergie solaire étant stockée sous forme d'hydrates de carbone par les végétaux qui utilisent le gaz carbonique atmosphérique. Le terme "biomasse" désigne au sens large l'ensemble de la matière vivante (la masse totale de matière vivante). Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie sous forme de biogaz, de biocarburants ou directement par combustion : le bois et les déchets organiques d'origine agricole ou urbaine, etc. L'énergie de la biomasse est exploitée par les filières du biogaz, des biocarburants et du bois<sup>151</sup>.

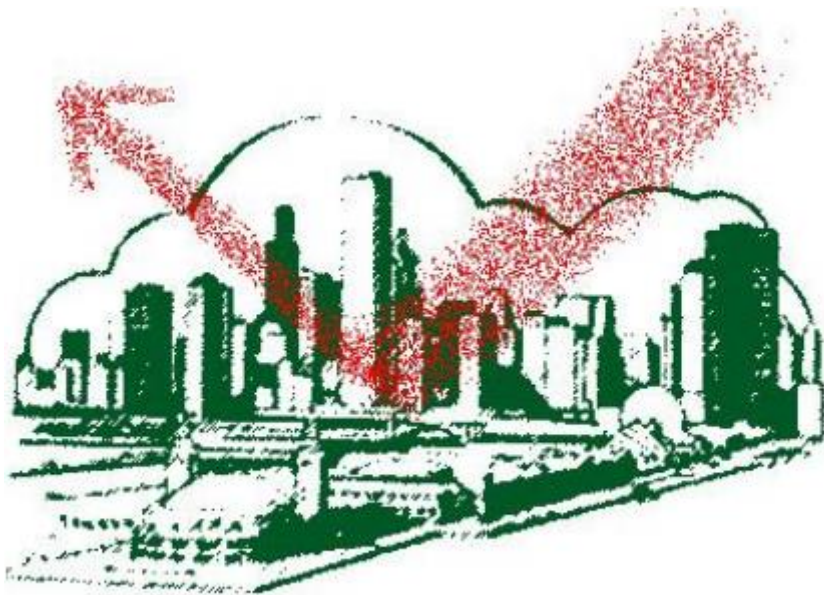






# *Partie pratique*

*Approche méthodologique*



### 2. Démarche méthodologique

Il faut en premier lieu sélectionner les paramètres liés au tissu urbain et aux activités anthropiques ayant une influence sur le phénomène des ICU. Afin de rendre compte de l'influence de ces paramètres sur l'intensité du phénomène, il faut choisir plusieurs indicateurs pour chaque paramètre. Un indicateur par paramètre sera ensuite sélectionné. L'extraction et le traitement des indicateurs seront réalisés à l'aide d'outils géomatiques et de télédétection, à partir des bases de données de la ville d'Oran.

De même, chaque indicateur, en fonction de son influence sur l'intensité des ICU par rapport aux autres indicateurs, sera pondéré par un coefficient multiplicateur. Ces indicateurs seront intégrés à un outil géomatique (par exemple Spatial Analyst) afin d'établir un modèle cartographique d'ICU.

#### 5.1. Hypothèses

La validité du modèle cartographique qui sera mis en place dépend des hypothèses suivantes :

- On suppose que la relation causale entre les paramètres décrits dans la littérature et les ICU est vérifiée sur le territoire d'Oran
- On suppose que les indicateurs sélectionnés sont les plus pertinents pour caractériser l'intensité des ICU. La pertinence des indicateurs issus de la littérature est soutenue par une publication (Arnfield, 2003), synthétisant l'état de l'art sur les ICU. La pertinence des indicateurs a de plus été discutée et validée au cours d'échanges avec des experts en urbanisme, écologie urbaine, géomatique ou en énergétique.
- Cette réflexion sur la pertinence des indicateurs implique également le fait que les indicateurs sélectionnés mesurent bien un risque d'ICU intense.
- On suppose, dans un souci de simplification, qu'il existe une relation linéaire (sauf exception) entre la valeur des indicateurs et l'intensité des ICU.
- On suppose que les conditions optimales pour le développement des ICU sont réunies (conditions anticycloniques stables (ciel dégagé et vent très faible ( $v < 1\text{m/s}$ )).
- La saison pour laquelle le modèle est valable est l'été.
- Les échelles d'étude du microclimat urbain qui ont été prises en compte dans ce travail sont la SL (Surface Layer) et l'UCL (Urban Canopy Layer). Il s'agit d'échelles permettant d'étudier le phénomène des ICU à l'échelle infra urbaine et ainsi de caractériser les variations intra urbaines des îlots de chaleur.

Ce sont également, de par leur caractère intra urbain les échelles les plus adaptées à la caractérisation de l'exposition de la population aux ICU.

## 6. Choix des paramètres

La revue bibliographique a mis en évidence les phénomènes microclimatiques, liés à l'urbanisation, la topographie et l'impact des activités anthropiques, à la base des ICU.

Ces phénomènes sont causés par une série de paramètres, présentés dans le **tableau 6**. Un travail de sélection de ces paramètres a été réalisé, il s'est appuyé sur plusieurs réunions et échanges avec des producteurs ou gestionnaires de données, des chercheurs en géographie ou en climatologie, des urbanistes, des géomaticiens.

Phénomène microclimatique	paramètres
<b>Rétention de la chaleur</b>	Propriétés radiatives et thermiques des matériaux
	Géométrie des canyons urbains
	Exposition du relief au rayonnement solaire.
	Exposition des canyons urbains au rayonnement solaire
	Exposition des façades au rayonnement solaire
	Ombrage
	Pollution atmosphérique
<b>Perturbation de la dynamique des masses d'air</b>	Topographie
	Géométrie des canyons urbains
	Rugosité du tissu urbain
	Imperméabilité des surfaces
<b>Réduction de l'évapotranspiration</b>	Rareté des masses d'eau
	Rareté de la végétation
	Chaleur émise par les transports
<b>Emission de chaleur par les activités anthropiques</b>	Chaleur émise par les bâtiments (hors industrie)
	Chaleur émise par l'industrie
	Chaleur émise par le métabolisme humain

Tableau 6 : paramètres influençant les ICU

### 6.1. Paramètres exclus

Les paramètres ne répondant pas aux critères de sélection ont été exclus. L'exclusion de certains paramètres mérite d'être éclairée :

- **Rugosité du tissu urbain** : la mesure d'un tel paramètre sur une surface urbanisée n'est pas chose aisée. Ce paramètre a été exclu car il ne répond pas au critère de l'échelle d'étude. En effet, la rugosité influe sur l'ICU de l'UBL(: Urban Boundary Layer).
- **Exposition des façades au rayonnement solaire** : ce paramètre aurait permis de représenter l'influence du rayonnement solaire sur les façades ne bordant pas les canyons urbains (comme les façades de bâtiments situés dans les cœurs d'îlots de bâti). Toutefois, la

complexité de l'extraction d'un indicateur caractérisant ce paramètre (orientation des façades) aurait nécessité le recours à une véritable expertise SIG difficile à mobiliser dans le temps imparti.

- **Industrie** : la zone étudiée ne présente pas d'installations industrielles émettant significativement de la chaleur.
- **Métabolisme humain** : ce paramètre a une influence négligeable sur les ICU.
- **Pollution atmosphérique** : ce paramètre a une influence négligeable voire nulle sur les ICU.
- **Exposition du relief au rayonnement solaire** : L'indicateur choisi pour le représenter était l'orientation des pentes du terrain.

### 6.2. Paramètres sélectionnés

Les paramètres répondant aux critères de sélection ont été retenus. Ils sont présentés dans le **tableau 7**.

Paramètre	Indicateur(s) possible(s)
<b>Propriétés thermiques et optiques des matériaux</b>	Albédo
<b>Géométrie des canyons urbains</b>	Sky View Factor
	Aspect ratio
<b>Exposition des canyons urbains au rayonnement solaire</b>	Orientation des rues
<b>Ombrage</b>	Surface d'ombres portées
	Surface végétalisée (zone boisée)
<b>Imperméabilité des surfaces</b>	Surface imperméable
<b>Rareté des masses d'eau</b>	Surface en eau
<b>Rareté de la végétation</b>	NDVI
	Surface végétalisée
<b>Chaleur émise par les transports</b>	Flux de chaleur émis
<b>Chaleur émise par les bâtiments (climatisation)</b>	Flux de chaleur émis

Tableau 7 : paramètres sélectionnés et indicateurs possibles

Un indicateur unique a ensuite été sélectionné pour chaque paramètre, en fonction de la disponibilité des données. Les indicateurs retenus sont présentés dans le **tableau 8**.

Phénomène représenté	Paramètre	Indicateur retenu
<b>Rétention de la chaleur</b>	Propriétés thermiques et optiques des matériaux	Albédo
	Géométrie des canyons urbains	Aspect ratio
	Exposition des canyons urbains au rayonnement solaire	Orientation des rues
	Ombrage	Surface végétalisée (zone boisée)
<b>Perturbation de la dynamique des masses d'air</b>	Géométrie des canyons urbains	Aspect ratio
	Imperméabilité des surfaces	Surface imperméable
<b>Réduction de l'évapotranspiration</b>	Rareté des masses d'eau	Surface en eau
	Rareté de la végétation	Surface végétalisée

Tableau 8 : indicateurs retenus

## 7. Extraction des indicateurs

Les indicateurs sélectionnés peuvent être extraits des bases de données d'Oran à l'aide d'outils géomatiques et de télédétection. Les couches cartographiques obtenues à l'issue de ces extractions présentaient des données sous forme de vecteurs (polygones) ou d'images (rasters).

### 7.1. Albédo

La valeur de l'albédo des matériaux est bien documentée dans la littérature (Taha 1997 ; Audience). L'extraction de cet indicateur a consisté à classifier les matériaux de revêtement du sol et des toitures utilisés dans la construction à Oran avec la coopération d'architectes. Les matériaux des façades ne sont pas identifiés dans la littérature comme jouant un rôle dans le stockage de la chaleur. Ils ont donc été négligés.

Matériaux	Couleur	Utilisation	Albédo retenu
Sol nu, terre	Brun	Surfaces naturelles	0,2
Enrobé bitumeux	Gris-noir	Chaussée	0,07
Asphalte	Noir	Trottoir	0,05
Béton	Gris	Trottoir	0,25
Béton bitumeux	Gris-noir	Trottoir	0,15
Dalles Pavées	Gris clair-Beige	Trottoir	0,45
Enduits Superficiels	Noir	Trottoir	0,05
Sable	Brun clair	Trottoir	0,15
Métal	Argenté/Bleu/Vert	Toitures industrielles	0,5
Tuile sombre	Gris-noir	Toitures d'habitation	0,15
Tuile claire	Rouge/Brun-Rouge	Toitures d'habitation	0,35
Béton revêtu	Gris-noir	Toits terrasse	0,1

Tableau 9 : classe de matériaux utilisés a Oran et albédos correspondants.

### 7.2. Aspect ratio

La méthode suivie est celle proposée par Oke en 1981. Elle consiste à moyenner la hauteur des bâtiments bordant un tronçon de voie (**H**) et à calculer la largeur des rues à partir des bases de données de la voirie (**W**). Une fois ces valeurs calculées, le rapport hauteur moyenne des bâtiments sur largeur des rues sera calculé :  $AR = H/W$ . On obtiendra des polygones représentant l'emprise au sol de la chaussée, des trottoirs et des sols nus avec un champ attributaire 'AR'.

### 7.3. Orientation des rues

Chaque rue sera classée selon trois classes en fonction de son orientation : nord-sud, est-ouest et autre (nord- ouest ,sud -est et nord- est , sud ouest). Pour chaque tronçon de voie, l'angle formé par le tronçon avec l'axe nord ( $\alpha$ ), dans le sens horaire, sera calculé. On obtiendra ainsi des polygones représentant l'emprise au sol de la chaussée avec un champ attributaire 'Classe d'orientation'.

Orientation	Classe	$\alpha$
N-S	1	]-22,5 ; 22,5[ + ]157,5 ; 202,5[
Autre	2	[22,5 ; 67,5] + [112,5 ; 157,5] + [202,5 ; 245,5] + [292,5 ; 337,5]
E-O	3	] 67,5 ; 112,5[ + ]247,5 ; 292,5[

Tableau 10 : classes d'orientation des rues

### 7.4. Surface imperméable

Cet indicateur peut être extrait sous ArcGIS à partir de la classification des espaces végétalisés. On considéra que tout ce qui appartenait au 'domaine artificialisé' dans cette classification (bâti,

voirie, etc.) sera imperméable, ainsi que dans une moindre mesure, les surfaces plantées imperméables. On obtiendra des polygones représentant les surfaces imperméables avec un champ attributaire '**classe de surface imperméable**' (surface artificialisée ou surface plantée imperméable).

### 7.5. Surface en eau

Cet indicateur existe déjà dans la base de données.

### 7.6. Surface végétalisée

Les surfaces végétalisées sont extraites sous ArcGIS à partir de la base de donnée 'classification de la végétation'. Chaque polygone dispose d'un champ attributaire '**Classe de végétation**'.

## 8. Hiérarchisation des paramètres

Tous les paramètres identifiés précédemment n'ont pas la même influence sur les ICU. Pour rendre compte de cette réalité, les indicateurs seront hiérarchisés. Aucune étude ne donne la hiérarchisation des paramètres en fonction de leur influence sur les d'ICU. On peut toutefois noter les théories suivantes : la géométrie du canyon urbain est le paramètre influent le plus les ICU (Saaroni et al., 2000 ; Arnfield, 2003). De même, certains auteurs soulèvent le fait que les propriétés radiatives et thermiques des matériaux ont approximativement la même influence sur les ICU (Terjung et O'Rourke, 1980; Arnfield, 2003).

L'influence des autres paramètres n'apparaissant pas dans la littérature, on a considéré qu'ils avaient une influence significative sur les ICU bien qu'inférieure à celle de la géométrie des canyons urbains et des propriétés des matériaux. Pour l'eau, nous savons qu'elle tend à faire disparaître le phénomène d'ICU au niveau des surfaces qu'elle recouvre (Landsberg, 1981).

On a ainsi attribué des rangs aux paramètres afin de les hiérarchiser. Le rang 1 correspond aux paramètres ayant l'influence la plus élevée sur les ICU et le rang 3 l'influence la plus faible. Le rang nul correspond à l'eau.

---

SAARONI H., BEN-DOR E., BITAN A., POTCHER O., avril 2000, « Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel », *Landscape and Urban Planning*

ARNFIELD J.A., 2003, «Two decades of urban climate research: a review of turbulences, exchanges of energy and water ant the urban heat islands », *International journal of climatology*

TERJUNG W. H., O'ROURKE P.A., août 1980, « Simulating the causal elements of urban heat islands », *Boundary-Layer Meteorology*

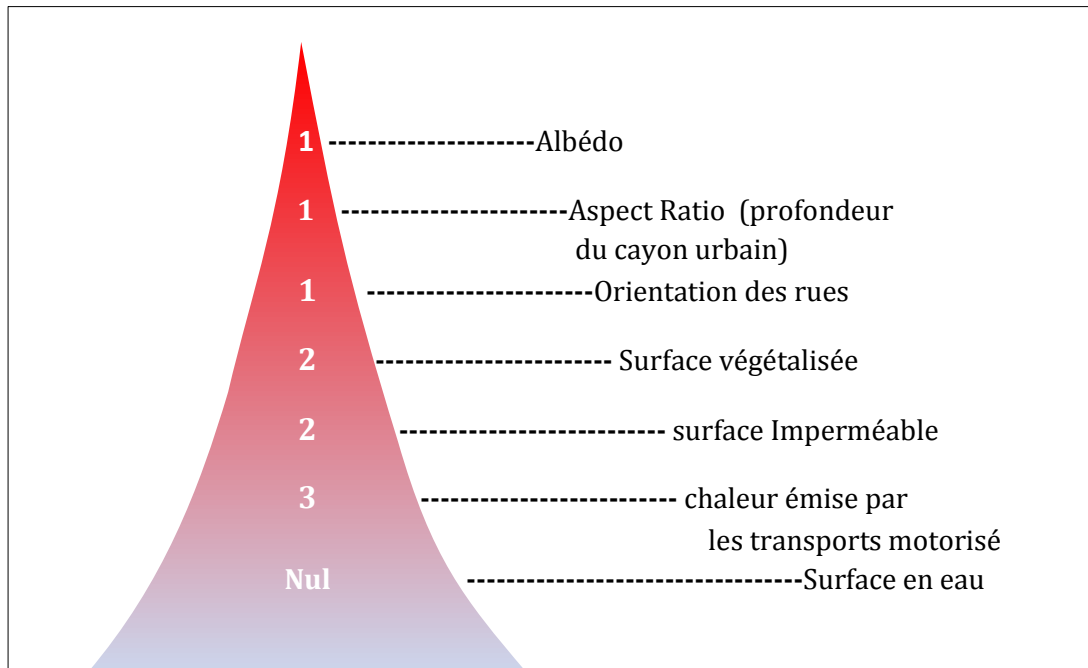


Figure 69 : Hiérarchisation des éléments influent sur l'augmentation des ilots de chaleur.

source : illustré d'après Clément CHAMPIAT

### 5. Pondération des indicateurs

Il n'existe pas dans la littérature, d'étude intégrant l'influence de tous les paramètres, ni d'étude établissant de rapport chiffré sur la proportion de l'influence d'un paramètre par rapport aux autres sur les ICU. L'attribution des coefficients de pondération sera cependant appuyée sur le bilan énergétique et l'équation d'équilibre énergétique (annexe 2). On va ainsi tenter d'établir la proportion de l'influence des indicateurs sur l'intensité des ICU la pondération diffère d'une zone à une autre :

$$Q^* = Q_h + Q_e + \Delta Q_s$$

Une étude a montré qu'en été, on pouvait observer la répartition suivante (Arnfield, 2003) :

$$Q_h = 40\%Q^* ; Q_e = 30\%Q^* \text{ et } \Delta Q_s = 30\%Q^*$$

Certains des paramètres utilisés dans cette étude ont une influence sur le bilan énergétique. Les membres de l'équation peuvent donc être associés à certains des indicateurs. En s'appuyant sur la répartition des membres de l'équation, un coefficient multiplicateur de pondération sera proposé :



Flux de chaleur	Indicateur	%Q*	Pondération
Qh	Aspect Ratio	40	8
$\Delta Q_s$	Albédo	30	6
Qe	Surface imperméable	30	6
	Surface végétalisée		

Tableau 11 : échelle de pondération

Pour la chaleur anthropique, plusieurs études ont évalué la moyenne journalière estivale du flux d'énergie radiative total (Q\*) et de la chaleur anthropique totale (Qf) (Oke et Maxwell 1975 ; Taha, 1997 ; Arnfield, 2003 ; Sailor et Lu, 2004). A partir des valeurs présentées dans ces différentes études, des valeurs adaptées au contexte de la zone d'étude sont proposées :

$$Q^* = 400 \text{ W/m}^2 \text{ et } Q_f = 20 \text{ W/m}^2 \text{ soit } Q_f = 5\%Q^*$$

En se basant sur la hiérarchisation réalisée précédemment, les informations ci-dessus ont été complétées et corrigées pour obtenir les coefficients de pondération suivants :

Rang	Indicateur	Coefficient de pondération
1	Albédo	8
1	Aspect Ratio	8
2	Orientation des rues	6
2	Surface imperméable	6
2	Surface végétalisée	6
Nul	Surface en eau	1

Tableau 12 : coefficients de pondération

## Application

### 1. Description de la zone d'étude

#### 1.1. Situation géographique

Oran se trouve au bord de la rive sud du bassin méditerranéen, elle se situe au nord-ouest de l'Algérie, à 432Km à l'ouest de la capitale Alger. La ville s'élève au fond d'une baie ouverte au nord sur le Golfe d'Oran ; elle est dominée à l'ouest par la montagne de l'Aïdour (429m d'altitude) qui la sépare de la commune de Mers-el-Kbir. Au sud, elle est bordée par les communes d'Es Senia, par le plateau de Moulay Abdelkader al-Jilani, et au sud-ouest par une grande sebkha, la commune de Bir El Djir constitue sa banlieue est. (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Oran>)

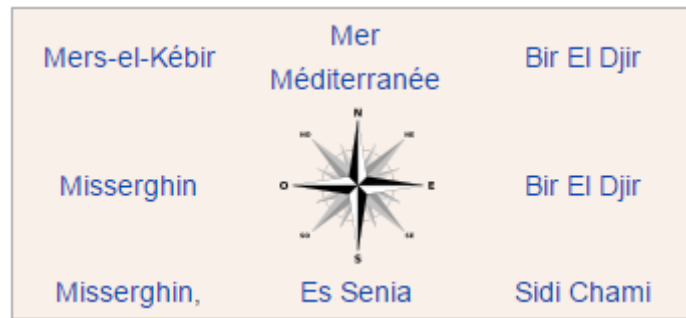


Figure 70 :Communes limitrophes d'Oran. source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Oran>

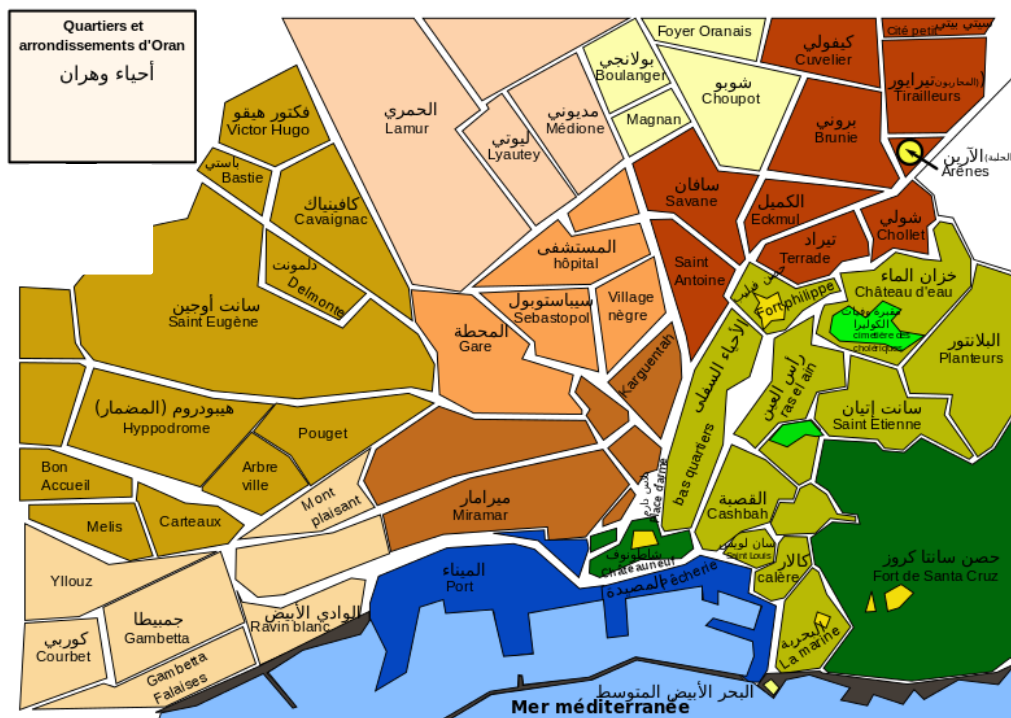


Figure 71 : Les quartiers et arrondissements d'Oran. source : INCT

## 1.2. Géographie administrative : Arrondissements et quartiers

Oran est divisée en douze arrondissements également appelés « secteurs urbains ». Chaque arrondissement ou secteur a sa propre antenne communale, administrée par un délégué communal élu qui gère les affaires administratives, techniques, politiques et sociales.

Le quartier historique par excellence est Sidi El Houari que l'on appelle aussi « les bas quartiers ». Il est considéré comme « le vieil Oran » et recèle à ce jour l'empreinte des diverses occupations qu'a connues la ville : espagnole, ottomane et française. Pour cette étude nous allons utiliser ces secteurs qui sont devenu à présent tous des secteurs mixtes pour expliquer le phénomène des ICU, ils seront intégrés dans la base de données de notre SIG.

Arrondissement	Ancienne appellation	Nouvelle appellation
1	Lamur	El-Hamri
2	La Marine	Hai Imam El-Houari
3	Protin	Es-Saada
4	Saint-Eugène, Delmonte, Les Castors, Petit Lac	Al-Maqarri
5	Medioni, Lyautey, Lamur, Saint-Hubert	El-Hamri
6	Boulangier, Choupot, Magnan, Sananès	El-Badr
7	Carteaux, Point du Jour, Gambetta, Falaises	Es-Seddikia
8	Canastel	El-Menzeh
9	Miramar, Bel Air, Saint-Pierre	El-Emir
10	Maraval, Cuvelier, les Palmiers	El-Othmania
11	Cité Petit, Planteurs	Bouamama
12	Eckmühl, Saint-Antoine.	Muhieddine

Tableau 13 : Anciennes et nouvelles appellations des arrondissements d'Oran. source : duch d'Oran

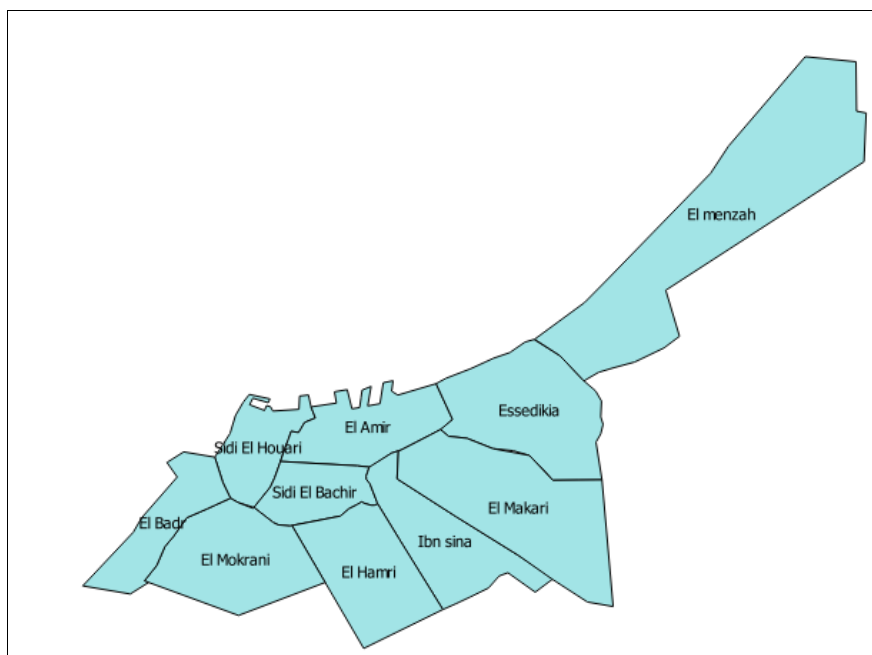


Figure 72 : Les secteurs d'Oran. source : duch d'Oran

### 1.3. Climat :

Oran bénéficie d'un climat méditerranéen classique marqué par une sécheresse estivale, des hivers doux, un ciel lumineux et dégagé. Pendant les mois d'été, les précipitations deviennent rares voire inexistantes, et le ciel est lumineux et dégagé. L'anticyclone subtropical recouvre la région oranaise pendant près de quatre mois. En revanche la région est bien arrosée pendant l'hiver. Les faibles précipitations (420 mm de pluie) et leur fréquence (72,9 jours par an) sont aussi caractéristiques de ce climat (tableau14).

Mois	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année
Températures minimales moyennes (°C)	5,6	7,2	8,3	10,1	12,7	16,8	19,0	19,8	18,1	13,8	9,7	6,8	12,3
Température moyennes (°C)	10,9	12,3	13,8	15,5	18	21,9	24,6	25,5	23,7	19,5	15,3	12	17,7
Température maximales moyennes (°C)	16,3	17,4	19,4	20,9	23,3	27,1	30,2	31,3	29,3	25,2	20,9	17,3	23,3
Moyennes mensuelles de précipitations (mm)	43	45	34	20	30	4	3	3	9	22	38	44	294
Nombre de jours avec pluie	8,7	8,5	7,1	7,2	6,9	2,0	1,3	1,8	3,6	6,6	8,4	8,8	72,9

Tableau 14 : Données climatiques à Oran de l'année 2014. Source : Weatherbase, statistiques sur 21 ans

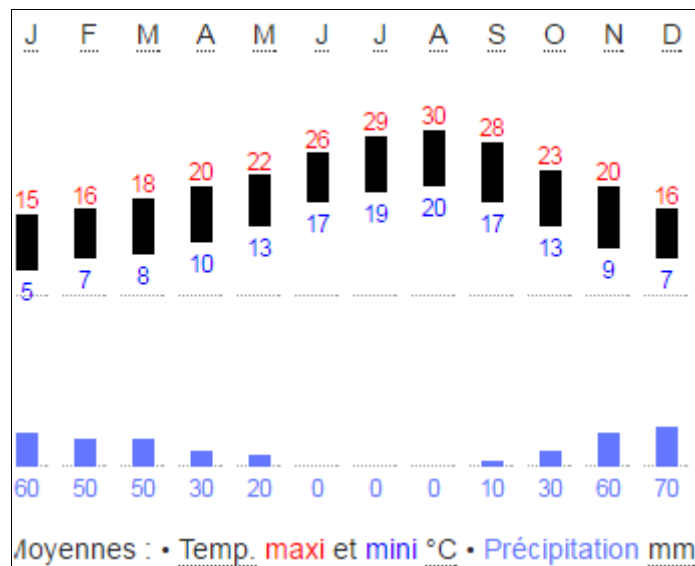


Figure 73 : Diagramme climatique de la ville d'Oran de l'année 2014. Source : Weatherbase, statistiques sur 21 ans

## 2. Données utilisées et leurs traitements

Différents types de données sont nécessaires pour la réalisation de cette étude, mais le délai nous a pas permis de tout collecter et de traiter. Ces données constituent la base servant à constituer la scène sur laquelle on a drapé la carte des températures, le réseau routier et les secteurs:

- Image satellite à très haute résolution *Landsat 7* de la ville d'Oran avec une résolution spatiale de 1m prise le 06 Novembre 2014 ;

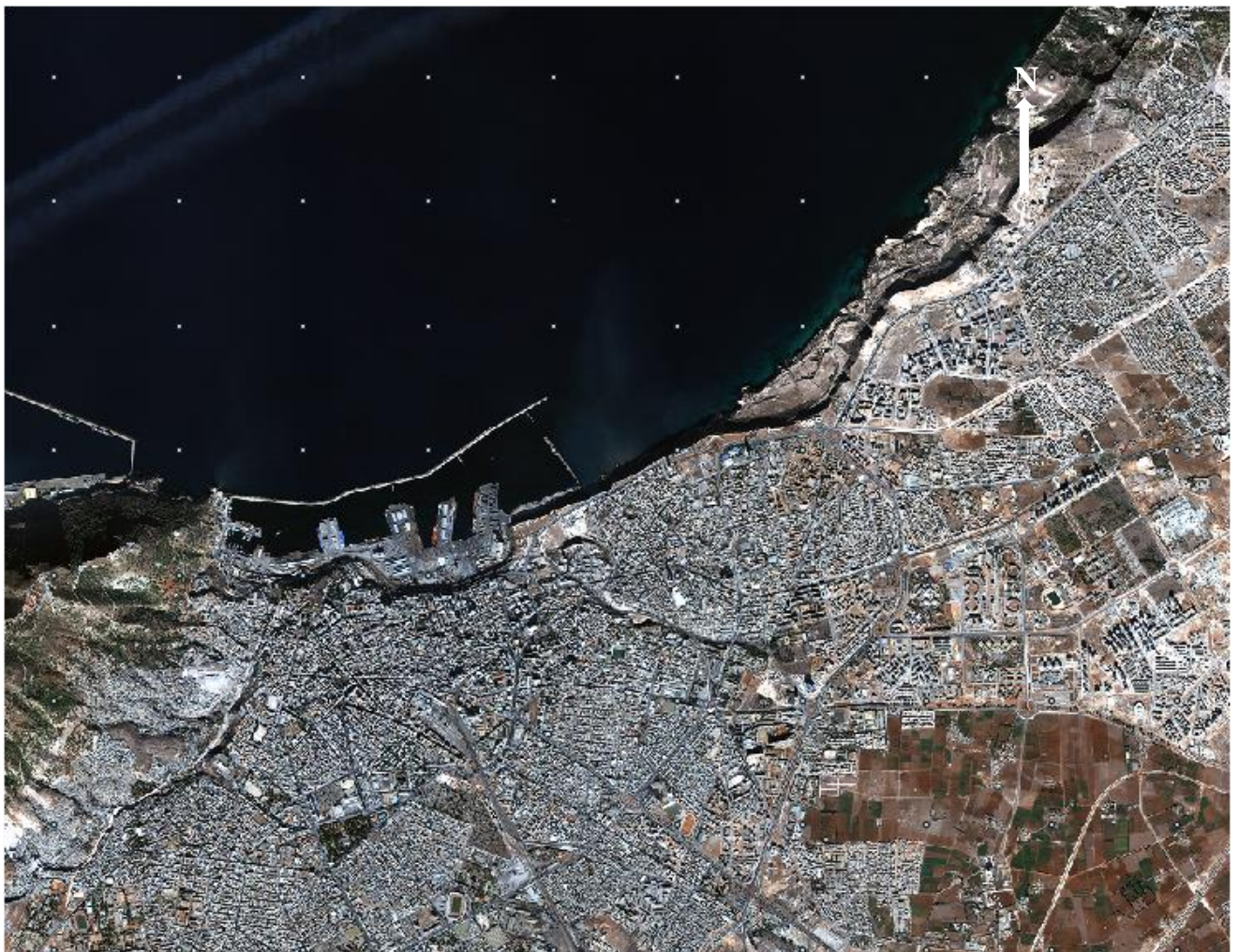


Figure 74 :image satellite *Landsat 7* de la ville d'Oran (06 Novembre 2014)

Echelle 1:50 000



- Modèle Numérique de Terrain et Modèle Numérique d'Élévation. Le MNT et le MNE ont été mesurés lors du même vol avec un laser aéroporté (LiDAR) d'une précision altimétrique de 30 cm.

Données	Date de prise de vue	Type de format	résolution	Bandes
MNT_LIDAR	2012	Ascii grid (.asc)	30 cm	MNT
MNE_LIDAR	2012	Ascii grid (.asc)	30 cm	MNE
Image satellite <i>Landsat 7</i>	2014	(.tif)	1 m	TM
Image satellite <i>Landsat 5</i>	2014	(.tif)	30 m	TM
SECTEURS D'ORAN	2016	(.dxf)		
RESEAUX ROUTIER	2016	(.dxf)		

Tableau 15: Présentation des données utilisées.

- Image satellite *Landsat 5* enregistrée sur la bande infrarouge thermique prise le 11 août 2014 à 10h34 mn à partir de laquelle on va extraire juste la ville d'Oran avec une résolution de 30 m et ressortir par la suite les températures au sol LST (Land Surface Temperature).

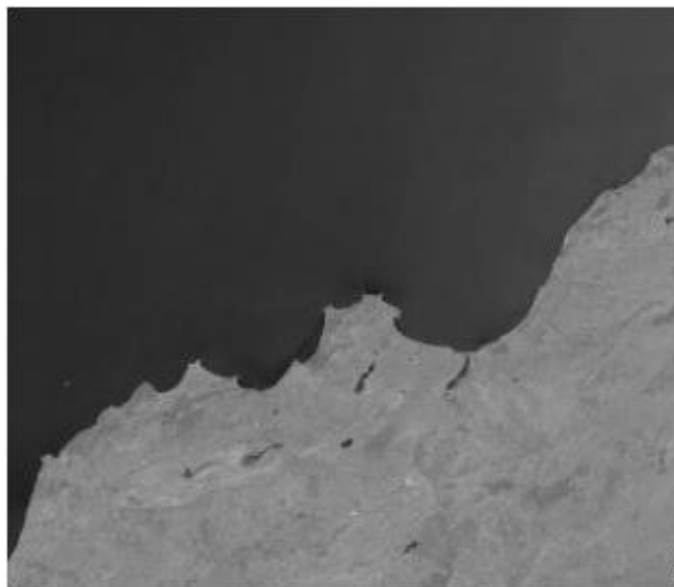


Figure 75 : Toute la scène en infrarouge thermique du satellite *Landsat 5* (11 août 2014)

L'exploitation de ces données a nécessité le recours à des traitements spécifiques.

## 7. Modélisation du relief

Afin d'exploiter le MNT sous ArcGis, nous avons créé un TIN (Triangulated Irregular Network). Il faut ensuite transformer les géométries linéaires et surfaciques en points pour les intégrer dans le calcul des sommets dans la triangulation. Pour cela, le recours à l'extension 3D Analyst s'est avéré nécessaire.

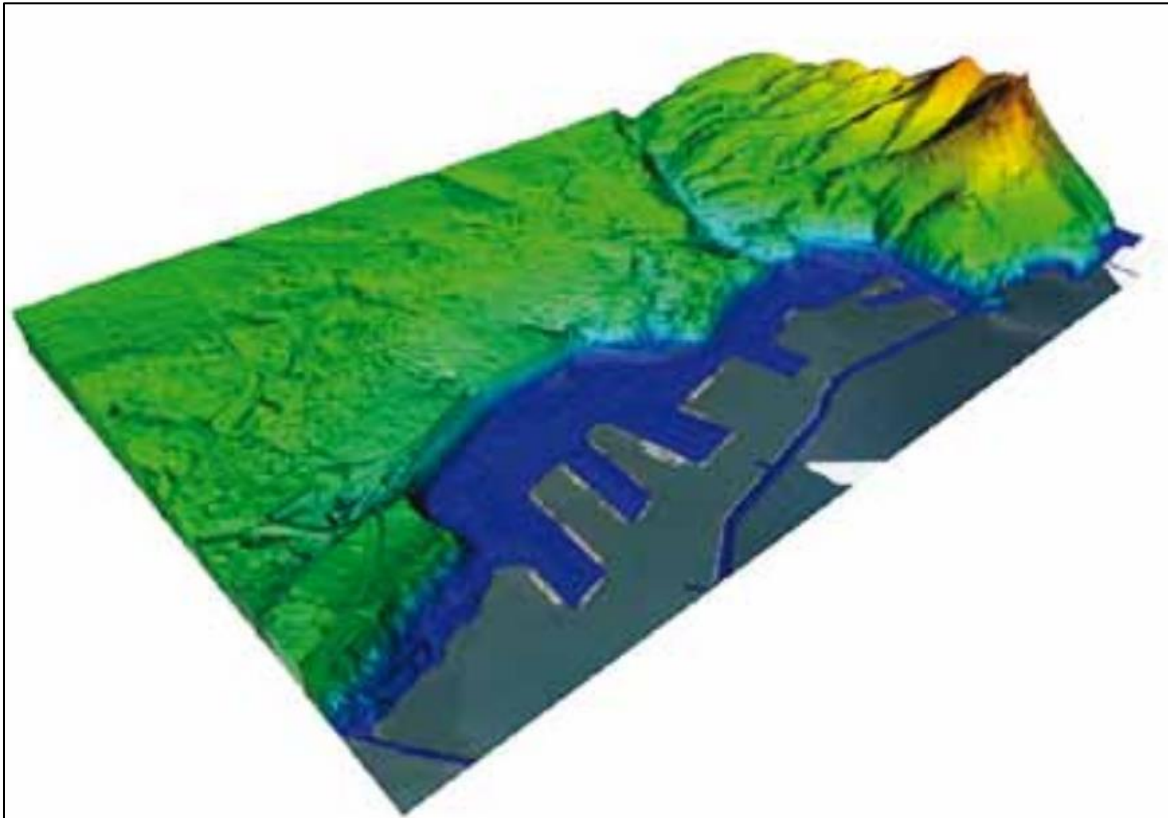


Figure 76 : Transformation du MNT en TIN avec 3D Analyst.

Dans ArcScene, nous avons drapé l'image satellite sur le MNT afin d'obtenir une image de la ville avec son relief. Nous obtenons alors une représentation du relief de la zone en 3D (figure77).

Par la suite, nous avons intégré le MNT dans le logiciel 3dsMax pour obtenir un rendu plus réaliste. Ce logiciel est développé par Autodesk, 3dsMAX est la référence en matière de logiciel de création et de rendu 3D de qualité professionnelle, tout comme son format de données natif, \*.3ds, qui est reconnu par globalement tous les logiciels gérant des objets en 3 dimensions. Ce logiciel n'est pas du tout spécifique au domaine de la géomatique ou de l'architecture, il est énormément utilisé dans l'industrie du cinéma qui représente un réel moteur et source d'inspiration dans l'ouverture des villes. L'image satellite a dû également subir plusieurs traitements afin de la rendre exploitable par le logiciel 3dsMax, l'image est pyramidée automatiquement par le logiciel ArcGIS pour optimiser la navigation.

Malheureusement, le logiciel 3dsMax ne peut lire directement ce cliché. Après de nombreux tests, un paramétrage optimal a été trouvé, qui a permis d'importer l'image satellite dans 3dsMax. L'image ne doit être composée que de trois bandes et ne doit pas être pyramidée. La bande proche infrarouge IR ne servant qu'à réaliser des analyses de télédétection, on ne garde donc que les trois bandes visibles RVB. Enfin, l'image satellite est exportée vers un autre format que le TIFF, comme par exemple le JPEG. Ce type de format est compressé ce qui allège donc l'image.



Figure 77 : Image satellite drapée sur le MNT.

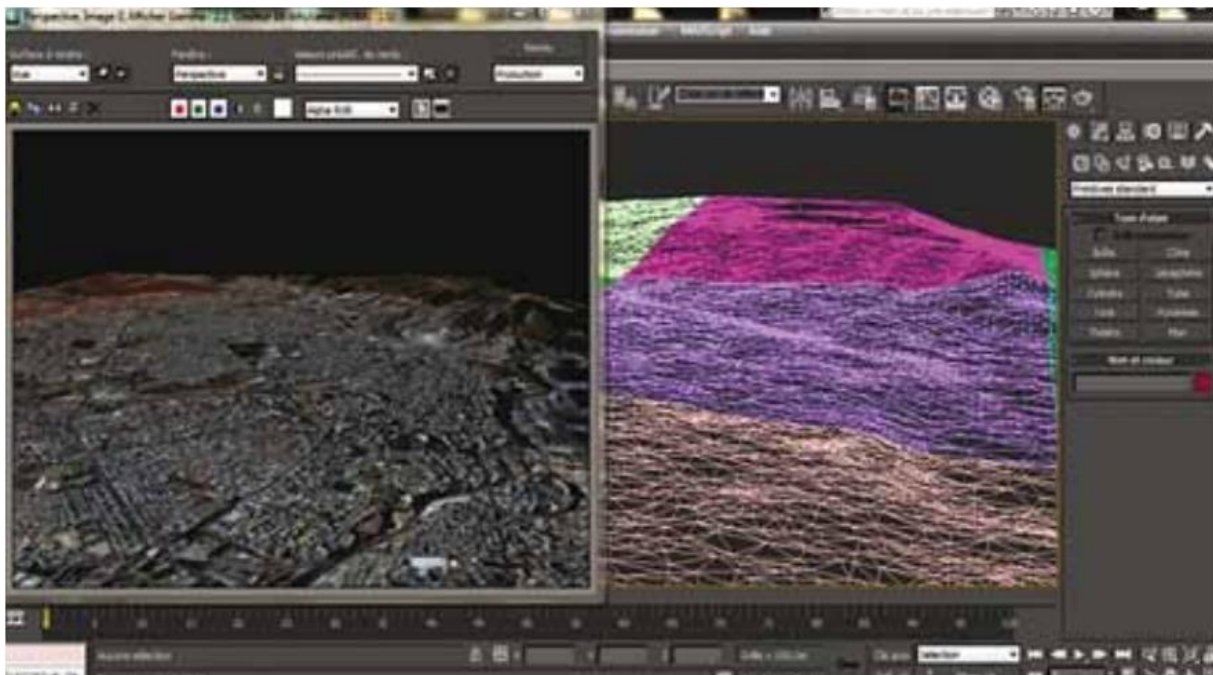


Figure 78 : Modélisation du relief sur 3dsMax



### 8. Extraction de la hauteur du bâti à l'aide de données LiDAR

Cette étude se propose de montrer dans quelle mesure il est possible d'utiliser le capteur LiDAR afin d'estimer la hauteur du bâti car c'est un paramètre qui a une influence remarquable sur l'ICU. La méthode la plus adéquate pour estimer les hauteurs du bâti en utilisant un jeu de données LiDAR consiste à obtenir un modèle numérique de hauteur de haute précision de la zone d'étude. La génération d'un MNH peut se faire par soustraction d'un modèle numérique de terrain dans un modèle numérique d'élévation. Par la suite, il est alors possible d'extruder chaque bâtiment selon la hauteur obtenue à partir des données LiDAR pour donner plus de réalisme.

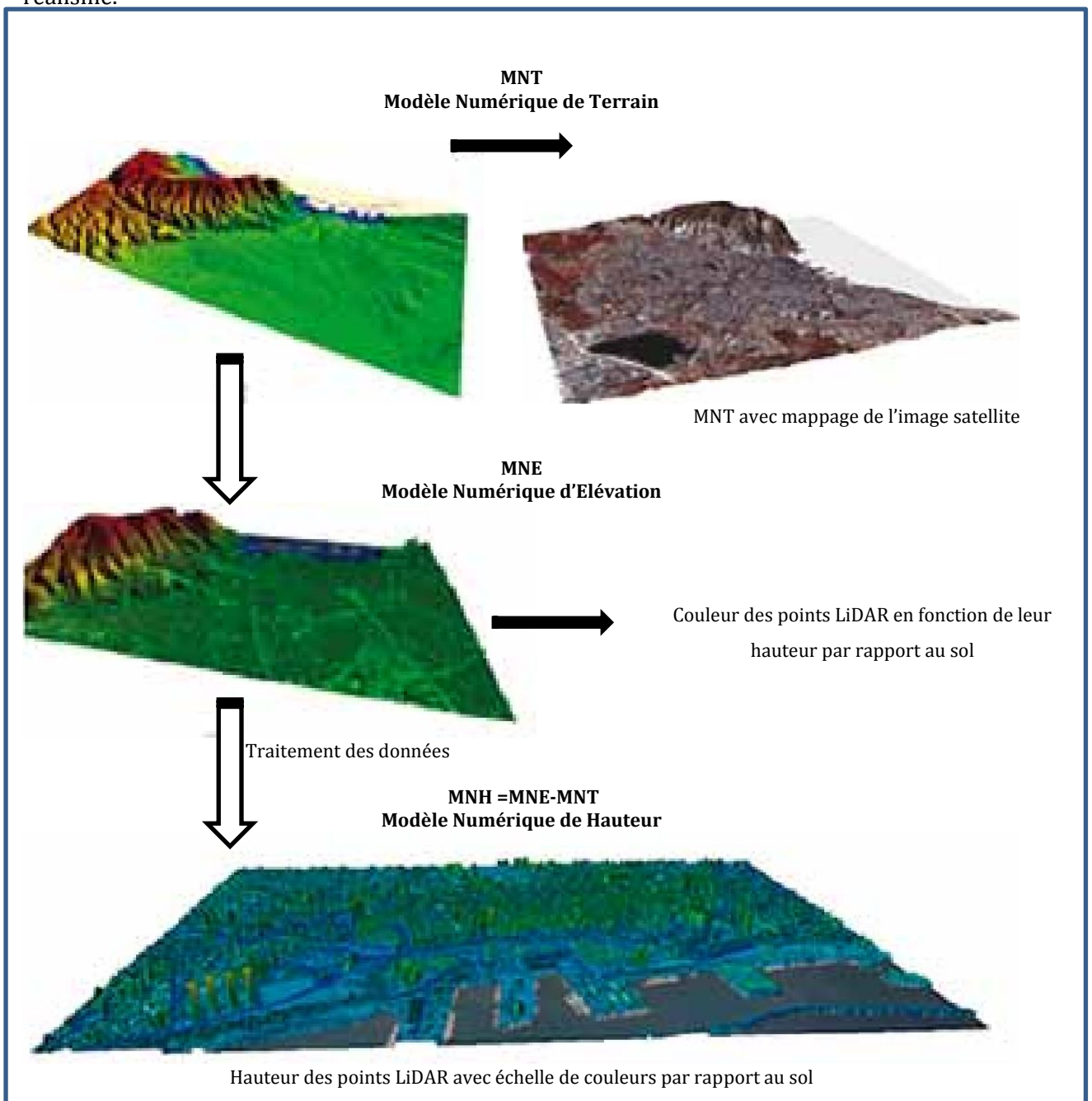


Figure 79 : Illustration de la méthode de traitement des données LiDAR.

## 9. Création de la carte de température

Le capteur TM (Thematic Mapper) à bord de Landsat 5 se caractérise par une résolution spatiale de 30 m ; il opère dans 7 bandes spectrales ou canaux.

Bande	Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	Rayonnement Electromagnétique	Intérêts et applications
1	0.45 - 0.52	Visible (Bleu)	Cartographie des eaux côtières, différenciation du sol et de la végétation
2	0.52 - 0.60	Visible (Vert)	Estimation de la vigueur de la végétation
3	0.63 - 0.69	Visible (Rouge)	Zone d'absorption de la chlorophylle donnant l'état de différenciation de la végétation
4	0.76 - 0.90	Infrarouge proche	Surveillance de la Biomasse et délimitation de zones immergés
5	1.55 - 1.75	Infrarouge moyen	Mesures de l'humidité du sol et de la végétation; différenciation entre la neige et les nuages
6	10.40- 12.50	Infrarouge Thermique	Cartographie thermique, études de l'humidité du sol et mesures des contraintes engendrés par la chaleur sur les plantes
7	2.08 - 2.35	Infrarouge moyen	Cartographie hydrothermale

Tableau 16 : Application des différents canaux de Landsat TM

<http://www.unige.ch/ses/geo/cours/td/#programme>

L'image a fait l'objet d'une correction géométrique qui la rend superposables à l'image Landsat7 (projection UTM) et aux autres couches ; la résolution commune a été ramenée à 10 m.

Nous regrouperons les fonctions de traitement de l'image en quatre catégories :

1. Prétraitement
2. Rehaussement de l'image
3. Transformation de l'image
4. Classification et analyse de l'image

On appelle fonctions de **pré-traitement** les opérations qui sont normalement requises avant l'analyse principale et l'extraction de l'information. Les opérations de pré-traitement se divisent en **corrections radiométriques** et en **corrections géométriques**. Les corrections radiométriques comprennent entre autres, la correction des données à cause des irrégularités du capteur, des bruits dus au capteur ou à l'atmosphère, et de la conversion des données afin qu'elles puissent représenter précisément le rayonnement réfléchi ou émis mesuré par le capteur.

Les corrections géométriques comprennent la correction pour les distorsions géométriques dues aux variations de la géométrie Terre-capteur, et la transformation des données en vraies coordonnées (par exemple en latitude et longitude) sur la surface de la Terre.

Les fonctions de rehaussement ont pour but d'améliorer l'apparence de l'imagerie pour aider l'interprétation et l'analyse visuelles. Les fonctions de rehaussement permettent **l'étirement des contrastes** pour augmenter la distinction des tons entre les différents éléments d'une scène, et le **filtrage spatial** pour rehausser (ou éliminer) les patrons spatiaux spécifiques sur une image.

Les opérations de **classification et d'analyse d'image** sont utilisées pour identifier et classifier numériquement des pixels sur une image. La classification est habituellement faite sur des banques de données multispectrales, et ce procédé donne à chaque pixel d'une image une certaine classe ou thème basé sur les caractéristiques statistiques de la valeur de l'intensité du pixel. Il existe une variété d'approches prises pour faire une classification numérique.

Deux approches générales sont utilisées, soit la classification **supervisée qui a été utilisée dans cette étude** et la classification **non supervisée**.

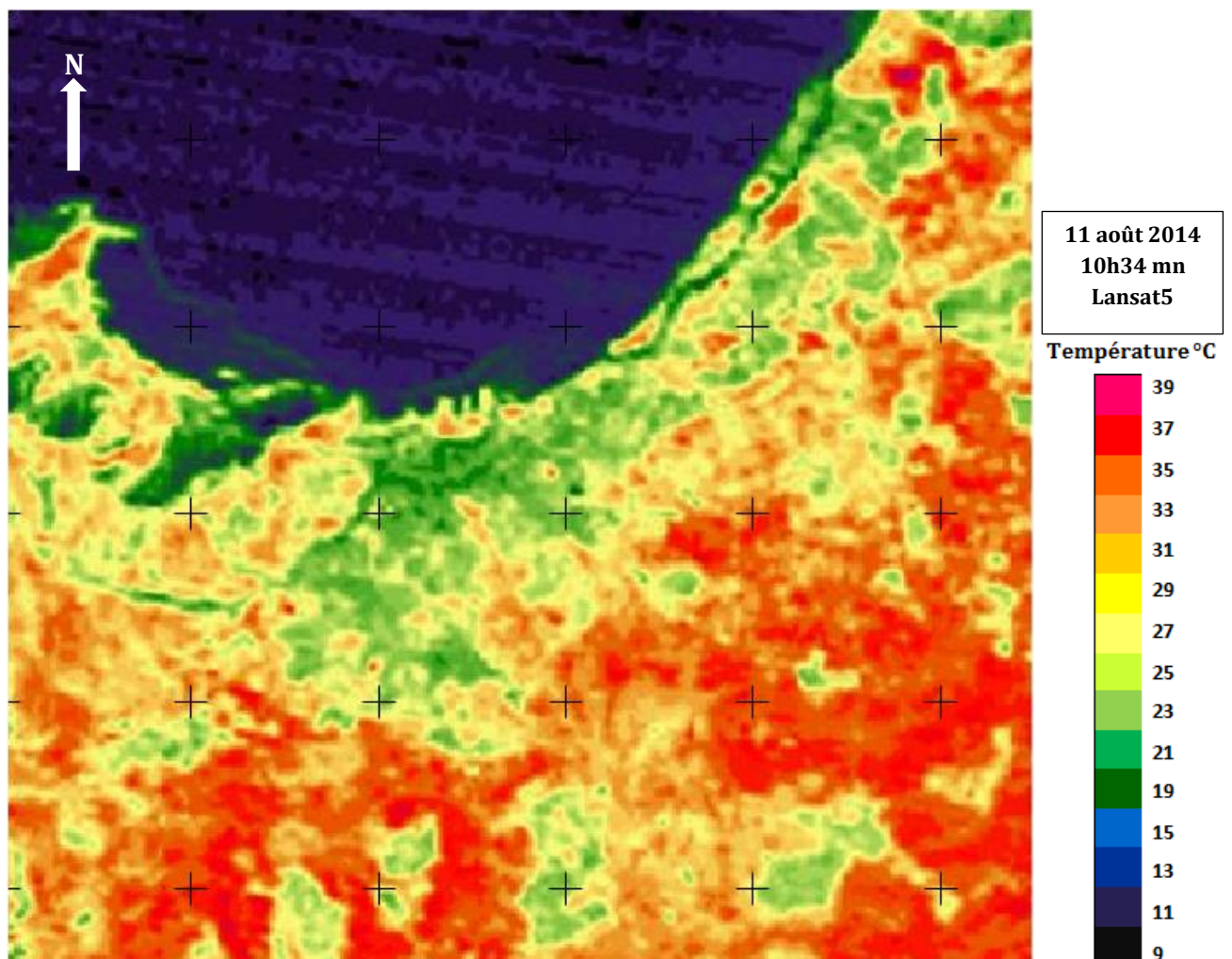


Figure 80 : Carte thermique de la ville d'Oran . Echelle 1:100 000.



Un des éléments intervenant sur ce phénomène doit apparaitre en couche séparé et aide a comprendre les résultats issues de la carte thermique est la végétation.

Puisque nous ne disposons pas de cette donnée nous avons calculé le NDVI de cette image (figure 81) puis nous avons appliqué un masque sur les autres classes faisant apparaitre juste la végétation (figure 82).

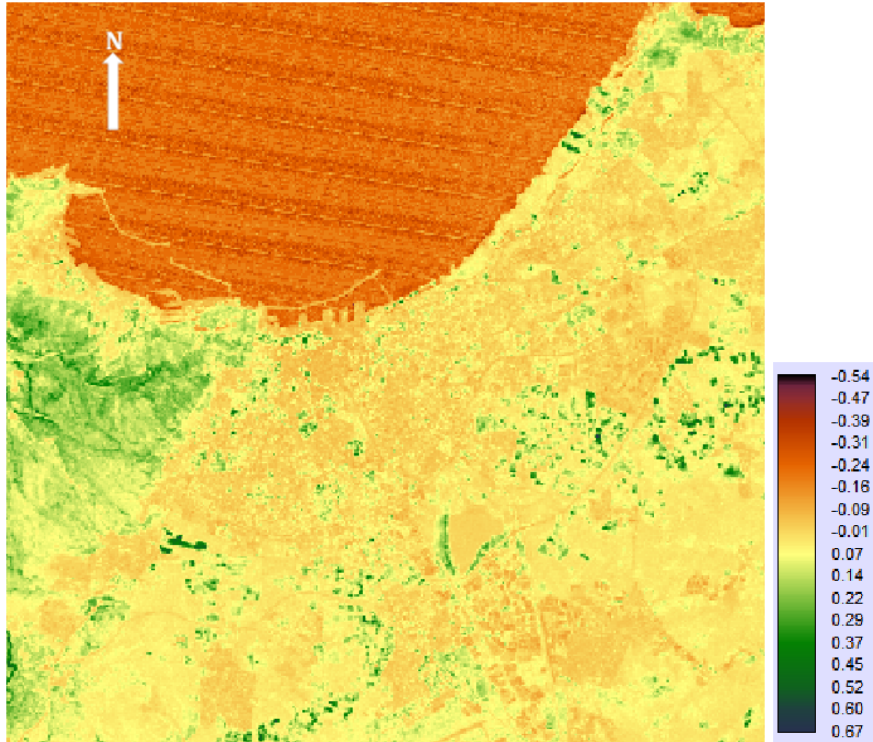


Figure 81 : Masque végétation sur la ville d'Oran. Echelle 1:100 000

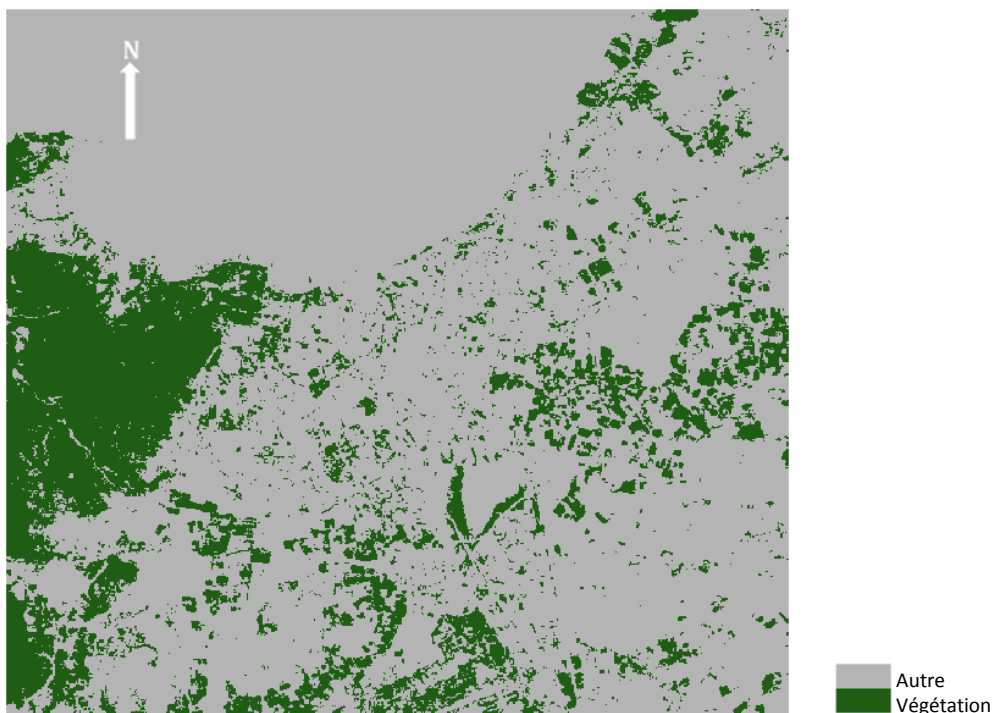


Figure 82 : Masque végétation sur la ville d'Oran. Echelle 1:100 000

Nous avons souhaité diviser la région en secteur à l'aide du réseau routier et classifier par la suite chaque secteur en catégorie d'habitat, mais après consultation avec les urbanistes nous avons trouvé qu'il faudra donc descendre à l'échelle du quartier car les secteurs sont devenus tous mixtes ; ce sont des aires diversifiées comportant une composition variée d'activités et de l'habitation. Plusieurs de ces secteurs recouvrent des aires présentant un potentiel d'intensification du nombre de logements, de commerces, des immeubles à bureaux, des immeubles commerciaux, des immeubles comportant de l'industrie légère ainsi que des équipements collectifs ou institutionnels.

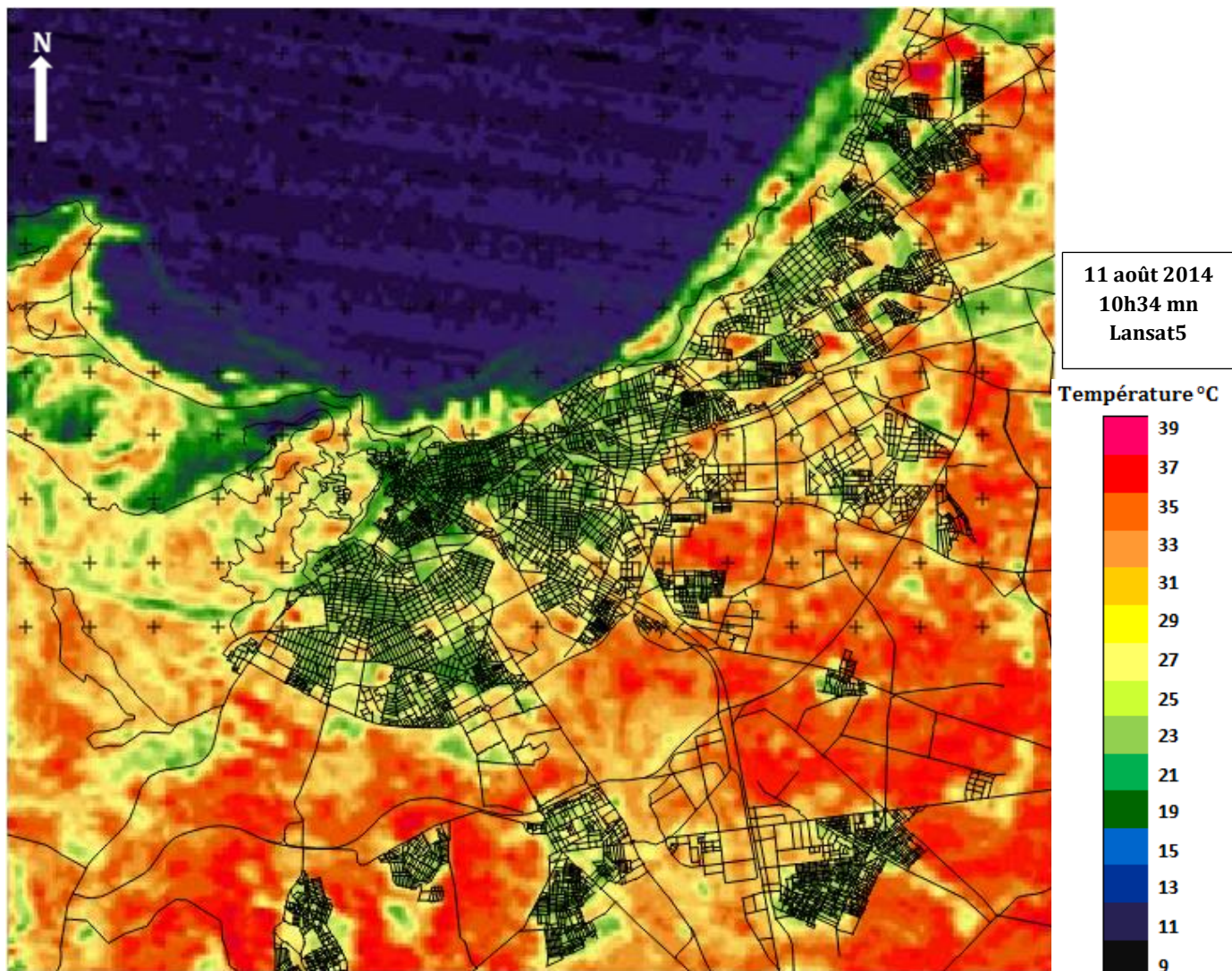


Figure 83 : Réseau routier superposé sur la carte thermique de la ville d'Oran. Echelle 1:100 000



Pour pouvoir expliquer le contraste de température nous avons superposé les couches et tenté de trouver une explication logique à l'existence de l'îlot de chaleur urbains.

Afin de mieux localiser les endroits nous avons rendu la carte thermique transparente a 50% le résultat été le suivant :

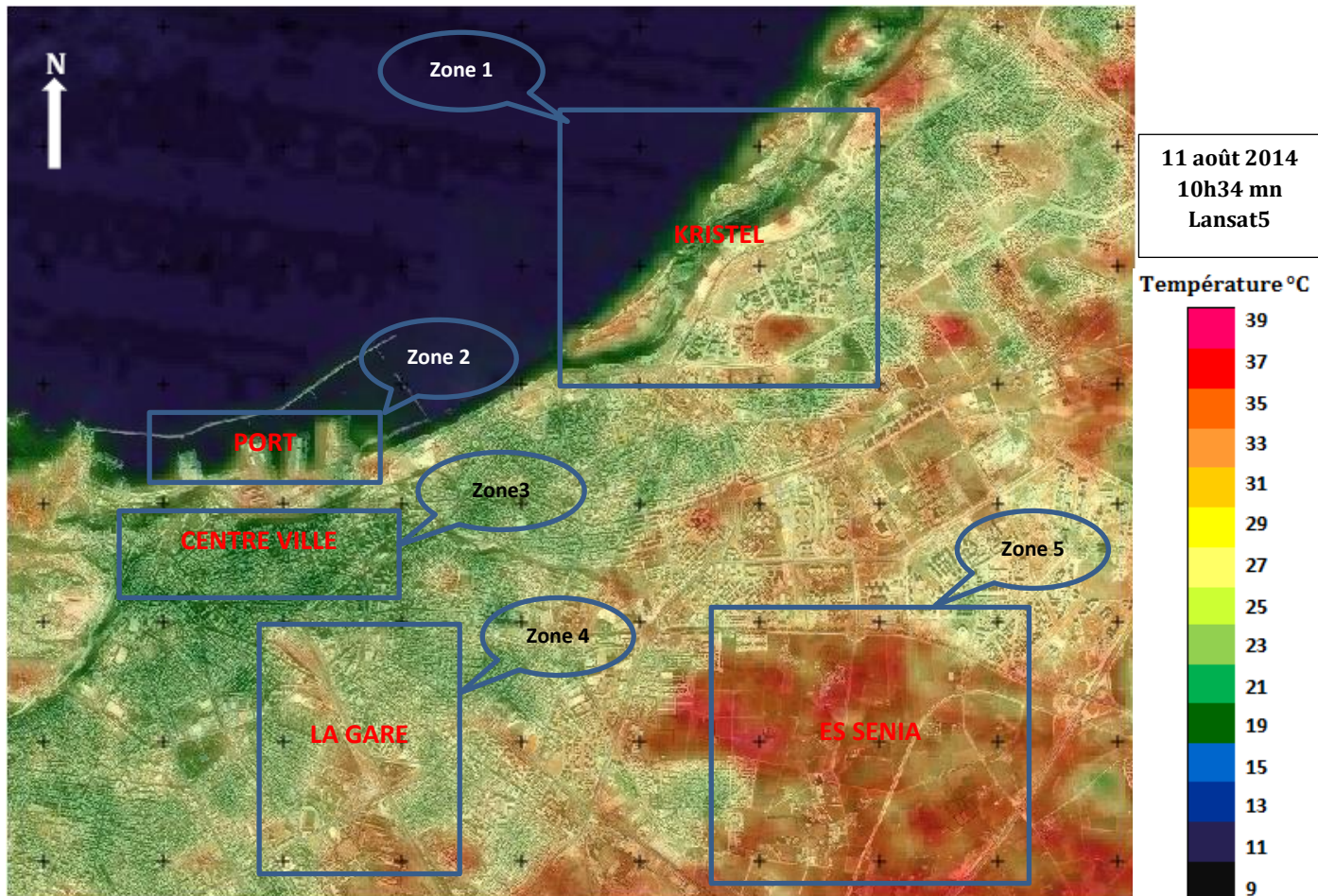


Figure 84 : Carte thermique drapée sur l'image de la ville d'Oran. Echelle 1:100 000

## 10. Discussion des résultats

### Zone1

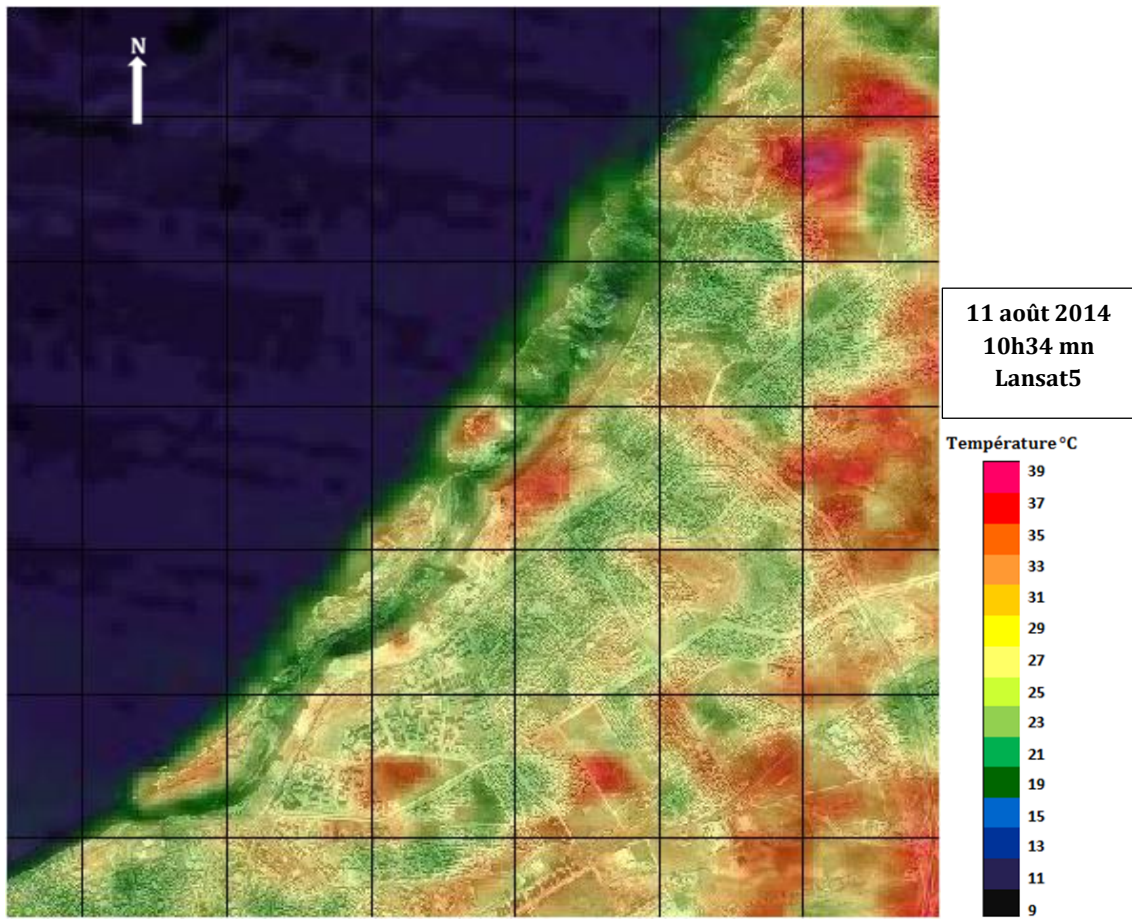


Figure 85 : Carte thermique drapée sur l'image de la zone 1. Echelle 1 :50 000



Figure 86 : Masque végétation drapé sur l'image  
Echelle 1 :50 000



Figure 87 : Zoom sur la zone 1 (Kristel).  
Echelle 1 :50 000



**Kristel** est une zone qui s'élève de 150m du niveau de la mer elle présente une falaise qui contient de la végétation élément qui explique la fraîcheur présente dans ce site elle est rafraichie par une brise de vallée et une brise de mer.

L'orientation par rapport au soleil est un autre facteur déterminant, dans le contrôle climatique à l'échelle urbaine qui doit être considéré car l'image est prise le matin à 10h34mn donc les rayons sont obliques et forment une ombre portée qui fait baisser la température. Dans le climat méditerranéen, c'est l'orientation qui définit la quantité d'énergie solaire incidente sur une paroi verticale. Le rayonnement solaire, en tant que support d'énergie, agit sur la circulation des basses couches atmosphériques. Le rayonnement agit en effet sur les champs de température, auxquels s'associent des champs de vent locaux, tels que les brises thermiques cycliques journalières, principalement dans le cadre de situations anticycloniques bien prononcées.

En été, l'orientation des rues et façades de bâtiments la plus défavorable est l'EST-OUEST, car ici le moment où l'énergie solaire incidente est la plus forte correspond à celui où la température extérieure est la plus élevée. L'orientation l'EST-OUEST reçoit la même quantité d'énergie, mais pendant la matinée, lorsque la température d'air est plus basse. L'orientation NORD-SUD, elle, reçoit moins d'énergie et c'est la mieux protégée contre le rayonnement solaire. La brise montante a pour effet dès son apparition de ralentir la hausse de température par suite de la détente de l'air qui remonte la falaise en partant du niveau de 10 m.

Elles sont la résultante globalisée des brises de pente et du réchauffement différentiel entre la vallée et la plaine environnante. Sur les pentes montagneuses l'air a tendance à s'élever durant la journée, cela crée une dépression au pied des montagnes qui "aspire" l'air le long des falaises. Les brises de vallée souffleront donc le plus souvent, des vallées de basses altitudes vers les vallées de hautes altitudes en journée, et inversement la nuit

La présence de quelques endroits chauds au cœur de la fraîcheur revient à ce que ces endroits sont nus et ne contiennent pas de végétation donc ils sont directement exposés au rayonnement solaire.

Comme le terrain est très accidenté, la distribution des écoulements d'air l'est aussi. Ainsi, la distribution verticale des vitesses est découpée en deux zones : la canopée urbaine qui s'étend du sol jusqu'en haut des bâtiments, et la couche limite urbaine qui s'étend bien au-delà des toitures. L'estimation des vitesses de vent dans une ville est un problème d'une grande importance pour l'intégration de stratégies de ventilation naturelle ou de rafraîchissement passif.



**Zone2**

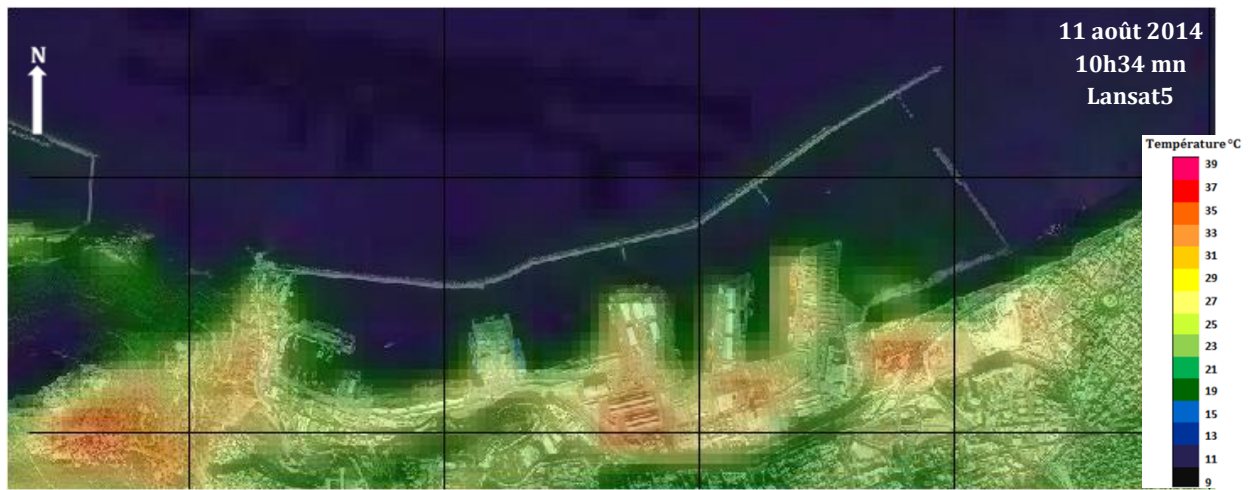


Figure 88 : Carte thermique drapée sur l'image de la zone 2. Echelle 1 :25 000

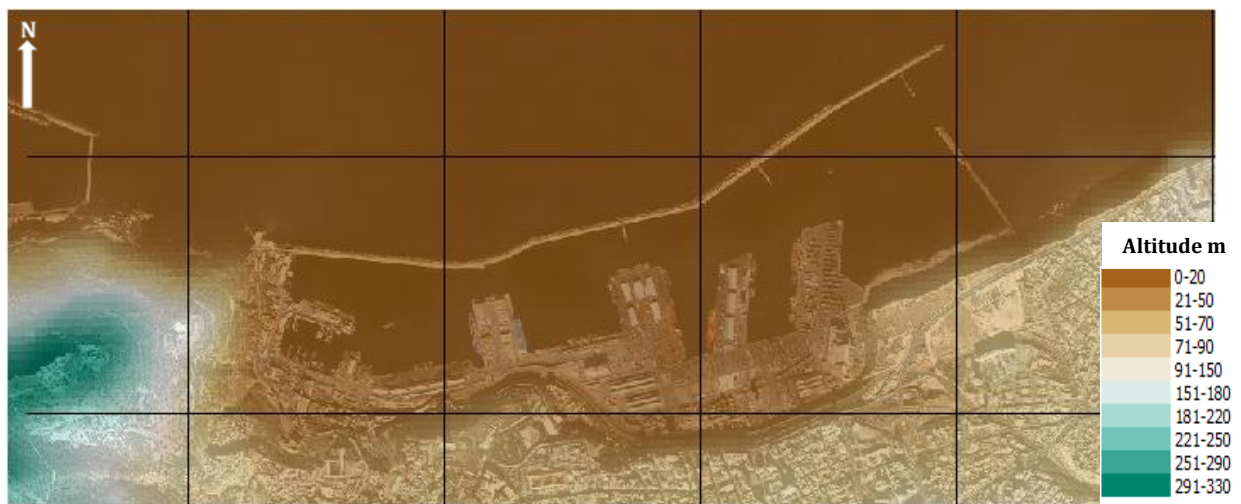


Figure 89 : MNT drapée sur l'image de la zone 2. Echelle 1 :25 000

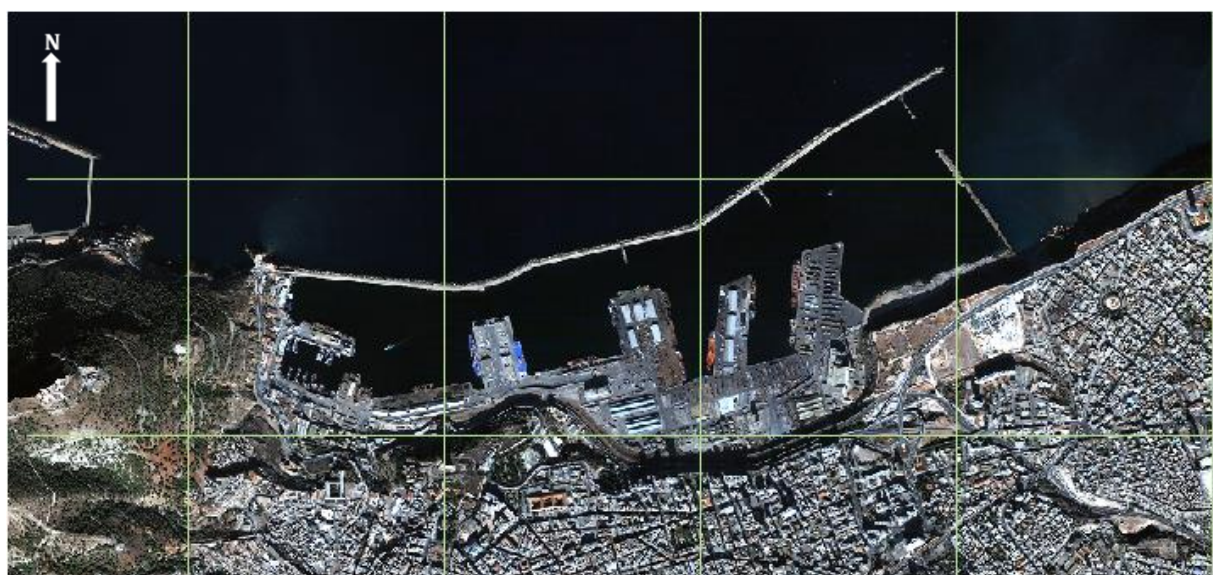


Figure 90 : Zoom sur la zone 2 (Le Port d'Oran). Echelle 1 :25 000

**Le port d'Oran** est une zone très proche de la mer mais malgré cela elle présente un îlot de chaleur est cela est dû à la minéralisation des surfaces des quais.

La géométrie urbaine et la nature des surfaces jouent un rôle important dans le microclimat urbain et des études ont démontré la forte relation qu'il y a entre différents paramètres météorologiques et la géométrie urbaine. Ils ont, ainsi, été identifiées comme étant des facteurs déterminants pour expliquer l'îlot de chaleur urbain à travers ces processus de stockage de l'énergie. La relation directe entre température de l'air, températures de surfaces est confirmée dans cette zone.

La présence des containers ainsi que les hangars avec des toitures métalliques explique cette hausse des températures car ce sont des surfaces à albédo élevé qui reflètent les radiations au lieu de les absorber, sans oublier les quais qui sont en béton.

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 oranais a une capacité thermique de 2 400 à 2 640 kJ.°C<sup>-1</sup> .m<sup>-3</sup> alors qu'elle est seulement 1 350 kJ.°C<sup>-1</sup> .m<sup>-3</sup> pour la terre sèche de 1 350.

Le piégeage radiatif de la lumière par les surfaces des containers et hangars est une des caractéristiques de la structure du port engendrant une augmentation locale de température. Bien que le rayonnement solaire direct soit plus fort en intensité en milieu rural qu'en milieu urbain, les effets des rayons infrarouges sont pourtant plus importants en ville. En effet, les flux radiatifs issus des multi-réflexions de la lumière sur les parois des containers et sur le sol ne sont pas redirigés vers le ciel systématiquement mais absorbés par le matériau progressivement. Cela se traduit donc par une augmentation globale de l'albédo de cet espace urbain.

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.



**Zone 3**

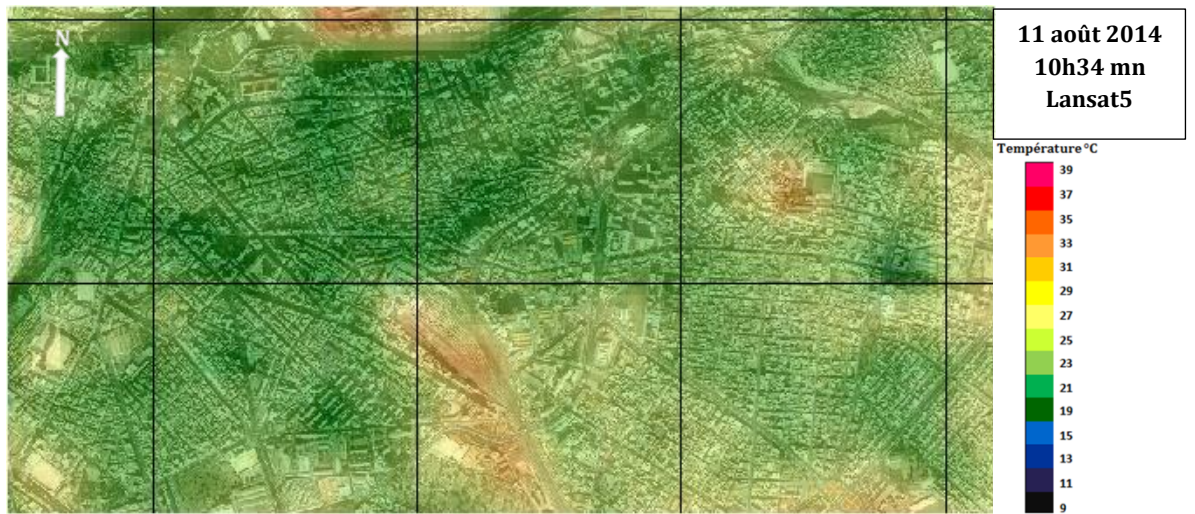


Figure 91 : Carte thermique drapée sur l'image de la zone 3. Echelle 1 :25 000



Figure 92 : Masque végétation drapé sur l'image Echelle 1 :25 000



Figure 93 : MNT drapée sur l'image de la zone 3 (centre-ville d'ORAN). Echelle 1 :25 000

**Le centre-ville d'Oran** qui s'élève du niveau de la mer de 90m est bien exposé au vent.

Pigeon et al 2006 présente une méthode originale (à partir de simulations numériques) pour optimiser le placement d'un réseau dense de capteurs météorologiques en ville. Elle a été appliquée sur Marseille (pendant la campagne ESCOMPTE). Les observations montrent que, si la nuit le centre-ville historique dense présente le classique îlot de chaleur, par contre le jour le centre-ville est l'endroit le plus frais de la ville ! C'est parce qu'il est près de la côte

Une différence de chauffage en surface peut conduire à des différences de pression et une structure de vent spécifique. Ceci est communément observé le long des côtes (brise de mer) ou le long des pentes (brises de montagne et de vallées). Ceci peut se produire, avec une intensité moindre, pour de grandes forêts. Nous pouvons observer la présence d'une brise urbaine, la brise urbaine atteint 1 à 2 m/s, avec un flux convergent dans les 100-200m proches de la surface, et une branche divergente à 1500m de hauteur.

Il a été prouvé théoriquement et expérimentalement que la vitesse du vent à une hauteur donnée est systématiquement plus faible en moyenne temporelle que celle enregistrée à la même hauteur en milieu ouvert. Cependant, la vitesse du vent en milieu urbain peut être plus élevée à la condition que l'écoulement du vent dans la couche limite atmosphérique et la direction des rues sont identiques qui est le cas du centre ville d'Oran. Ce scénario n'a lieu que si l'inertie de l'écoulement est supérieure au frottement visqueux à l'intérieur du canyon urbain.

Le vent est un écoulement qui tend à équilibrer les zones de pressions différentes dans l'atmosphère. Ce mouvement peut être caractérisé localement par les équations de conservation de la quantité de mouvement, de la masse et de l'énergie.

L'eau et la végétation constituent des moyens de rafraîchissement : par évaporation et évapotranspiration, elles rafraîchissent l'air dans la journée. Cependant, l'eau ruisselle tellement rapidement vers les émissaires artificiels (égouts...) à cause de l'imperméabilité du sol urbain qu'elle n'a pratiquement pas le temps de s'évaporer. Soulignons que l'évaporation entraîne un rafraîchissement de l'air car le passage de l'état liquide à l'état gazeux consomme des calories (environ 600 par gramme d'eau évaporé) ce qui peut expliquer la fraîcheur marquée en ville.

La végétalisation de pleine terre est plus efficace que celle des toits pour rafraîchir l'air de la ville. Les toits végétalisés ont une influence limitée sur le confort extérieur mais peuvent améliorer l'isolation du bâti. Dans tous les cas, la végétation doit être suffisamment arrosée pour avoir un effet rafraîchissant en été, ce qui implique de développer des systèmes de gestion de l'eau à l'échelle locale (récupération d'eau à l'échelle du quartier ou du bâtiment).



**Zone 4**

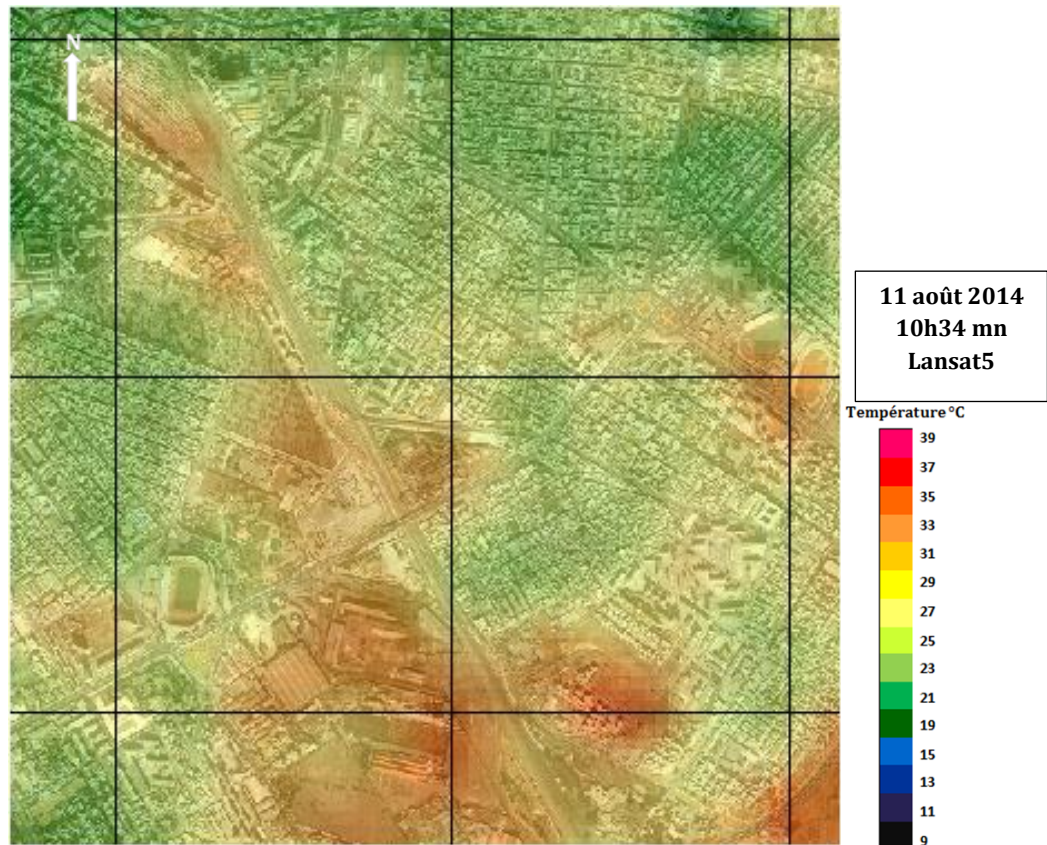


Figure 94 : Carte thermique indiquant la zone 4. Echelle 1 :25 000



Figure 95 :Zoom sur la zone 4(La Gare d'Oran). Echelle 1 :12 500

**La gare d'Oran** est une zone qui se trouve à 170m plus élevée par rapport à la mer et elle présente un îlot de chaleur important.

En effet, les rails et leurs voisinage, selon leurs albédo (indice de réfléchissement d'une surface) absorbent ou réfléchissent l'énergie solaire. Cette énergie est ensuite restituée lentement sous forme d'infrarouge (chaleur) ce qui explique la hausse des température dans cette zone.

L'usage des sols est une phase importante dans la conception urbaine .En effet, cette dernière apparaît comme étant décisive dans la localisation des différentes activités urbaines, telle que l'habitat et l'industrie selon l'exigence de chacun en matière de conditions climatiques.

La végétalisation des surfaces est une mesure souvent mise en place dans les villes et aussi la plus connue du public : toitures ou murs végétaux, plantations ponctuelles de végétaux, création de parcs, végétalisation de centres commerciaux ou d'aires de stationnement, développement de jardins privés ou collectifs, etc. on peut trouver certaines de ces pratiques dans cette zone sur lesquelles les températures sont faibles D'après l'Observatoire national sur les Effets du Réchauffement Climatique, la végétation influence plus fortement le climat urbain comparé à l'albédo. La manière la plus efficace pour diminuer la température en ville consisterait donc à augmenter les surfaces végétales en combinant des arbres plantés et des toitures végétalisées.

Il existe des matériaux de surface comme le ballast qui est utilisée dans les chemins de fer dans le but de transmettre les efforts engendrés par le passage des [trains](#) au sol, sans que celui-ci ne se déforme par tassement. Il sert aussi à enchâsser les [traverses](#) afin d'assurer leur résistance aux déformations longitudinales, particulièrement importante pour la technique des soudés. Le ballast a une grande capacité à stocker de la chaleur lorsque le soleil chauffe la voie alors que l'air ambiant lui-même reste doux .il s'avère que l'albédo et la capacité thermique des surfaces dans cette zone y sont plus élevées que dans les autres quartiers.

La relation entre la végétation et la température de surface est très importante, puisque l'état de la végétation et l'humidité de surface définissent le potentiel d'évapotranspiration et donc de chaleur latente, par opposition à la chaleur sensible. Il faut remettre de la nature en ville pour contrecarrer les effets de l'artificialité des surfaces urbaines car la végétation joue un rôle de régulateur.



**Zone 5**

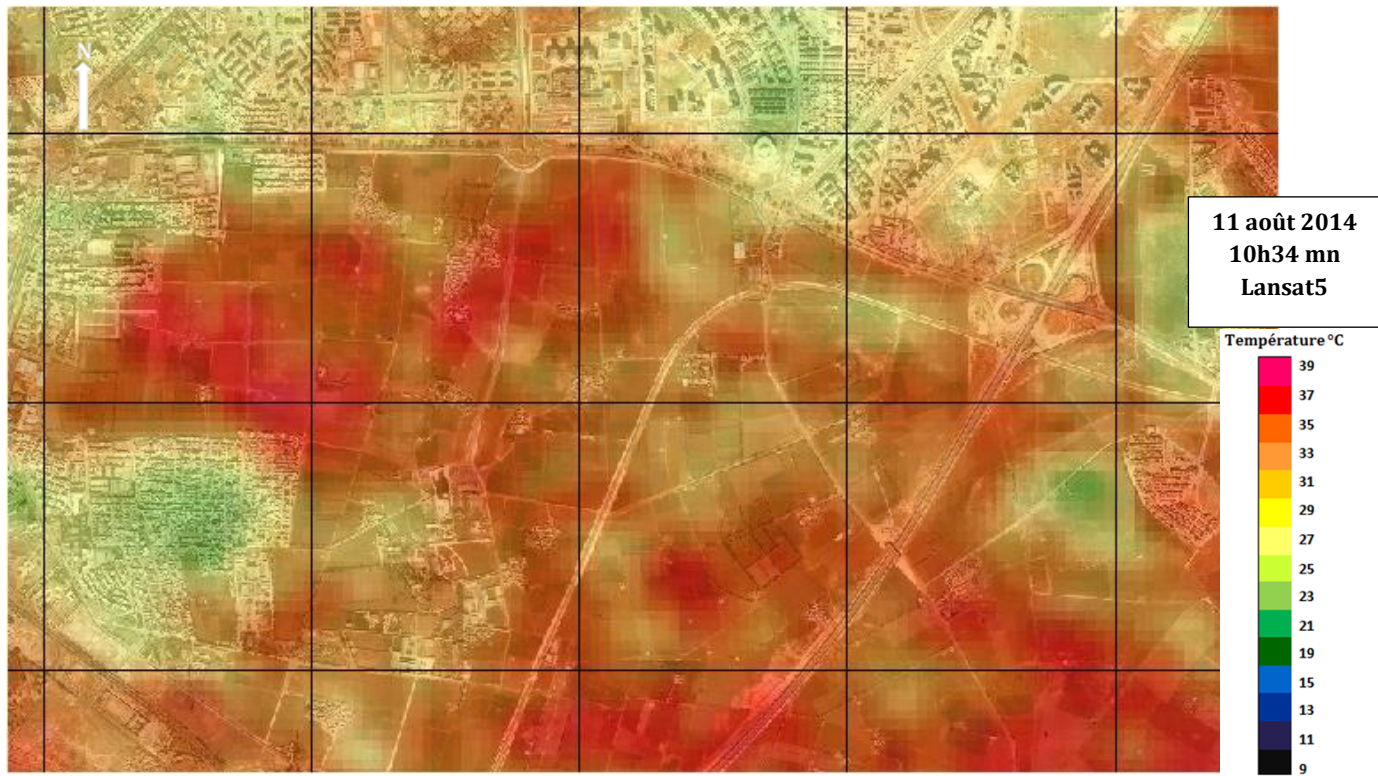


Figure 96 : Carte thermique indiquant la zone 5. Echelle 1 :25 000



Figure 97 : Zoom sur la zone 5(ES SENIA). Echelle 1 :25 000



**ES SENIA** une zone qui démontre que l'amplitude de température est plus importante dans les quartiers industriels qui sont caractérisés par des surfaces à faible inertie thermique (tel que le béton), que dans les quartiers du centre ville bâtis principalement en pierre blanche et que dans les parcs urbains.

La présence de surfaces non couvertes engendre une réduction de l'humidité de surface occasionnée par un déficit de précipitation et une radiation incidente plus importants que la normale.

Les propriétés physiques des matériaux de surfaces peuvent générer des anomalies thermiques importantes et influencer la valeur du pixel. L'albédo et l'émissivité de surface varient en fonction de la nature du sol (l'émissivité varie aussi en fonction de la longueur d'onde). La température d'une surface est inversement corrélée à son albédo. On observe que les températures de surface des zones bâties en centre ville sont moindres que les banlieues industrielles comme ES SENIA.

L'ICU dépend également des vents. Un vent fort va favoriser la circulation de l'air et donc diminuer le réchauffement du substratum urbain par un air chaud. A l'inverse, un vent faible entraîne une stagnation des masses d'air qui ont alors le temps de réchauffer le bâti : ainsi, plus le temps est calme et dégagé, plus l'îlot de chaleur urbain est intense. De plus, la forme urbaine joue sur le régime des vents : une rue étroite et encaissée, formant un canyon, empêchent les vents de circuler et fait alors stagner les masses d'air.

Les écoulements d'air en milieu urbain sont également très instables du fait de la forte variabilité de la température d'un endroit à un autre. On observe également dans les villes un écoulement global centripète qui s'élève au-dessus du centre-ville et retombe sur les zones périphériques comme c'est le cas de cette image.





## **Conclusion :**

### **Limites & points de sensibilité**

La diversité des configurations de l'îlot de chaleur urbain repose donc sur la complexité des interrelations entre :

- des données géographiques stables (situation, site, type d'urbanisation...);
- des données végétales et atmosphériques déterminées par des événements cycliques (saisons);
- des données atmosphériques aléatoires (types de circulation et types de temps).

Malgré les simulations numériques, il reste difficile de prévoir un ICU.

En effet, pour prédire un fort ICU, il convient de prévoir un temps clair et calme. Ce type de temps s'observe généralement dans les périodes anticycloniques, ce qui relève de la circulation atmosphérique générale. Or, si les centres météorologiques sont capables de prévoir avec une assez grande fiabilité la situation synoptique à courte et moyenne échéance, en revanche la prévision des types de temps est plus délicate car ils s'observent à des échelles parfois plus fines que la maille des modèles de prévision.

Dans le plan vertical, il arrive fréquemment que des phénomènes de basses couches viennent « brouiller » la qualité globale d'une prévision. Quand il s'agit de nuages bas, cela remet alors totalement en cause les mécanismes de formation de l'ICU en bloquant le refroidissement nocturne par rayonnement. La connaissance du terrain des prévisionnistes est alors essentielle pour interpréter les sorties de modèles et adapter les prévisions à l'échelle locale, en fonction de facteurs géographiques comme la présence d'une grande agglomération. En intégrant les spécificités de la ville, les modèles de prévision météorologiques d'échelle synoptique pourraient permettre de prévoir l'intensité de l'ICU. Cette connaissance du phénomène d'îlot de chaleur permettra ainsi :

- de connaître les matériaux et les formes urbaines à utiliser dans la conception ;
- d'avoir une meilleure connaissance des effets des dispositions dans un contexte donné ;
- d'adapté une conception au climat urbain.

L'utilisation des outils de mesure offerts par la télédétection permettrait donc de déterminer avec une grande précision les échelles de score et les coefficients de pondération des indicateurs liés à la température des surfaces, en particulier l'albédo. La mesure du NDVI permettrait également de déterminer les surfaces végétalisées avec une information sur leur activité chlorophyllienne et donc sur leur propension à participer au phénomène d'évapotranspiration.

L'acquisition d'une image prise dans l'après-midi et d'une seconde prise au milieu de la nuit permettrait de distinguer les ICU diurnes et nocturnes au niveau de la ville, ce que nous n'avons pas pu faire.

Les phénomènes contribuant à la formation d'îlots de chaleur sont multiples, à savoir : la croissance urbaine, l'occupation massive des sols par la transformation et la réduction d'espaces verts, à travers leur remplacement par des matériaux qui absorbent la chaleur comme les toits, les murs des bâtiments ainsi que les chaussées

Ces éléments représentent des facteurs importants de modification du climat local des villes, sans oublier un des facteurs dont la contribution au développement des îlots de chaleur urbain est significative, à savoir la présence de flux de chaleur lié au chauffage urbain, à la circulation automobile et à l'activité industrielle. Les causes de ce phénomène sont donc multiples, leurs interactions complexes et relèvent principalement des caractéristiques thermiques de la surface du sol propres à la ville, mais aussi de ses propriétés géométriques qui déterminent la rugosité. En effet, la sensibilité du champ de températures aux changements de ces paramètres peut être approchée à l'aide de modèles incluant selon le cas les caractéristiques énergétiques, radiatives et géométriques. D'ailleurs, certains modèles laissent supposer que les villes pourraient techniquement « renverser » l'îlot de chaleur urbain et empêcher ses impacts sur le bilan d'énergie simplement en augmentant l'albédo des toits , des revêtements et en reboisant l'aire urbaine

On stipule que l'îlot de chaleur urbain a une forme caractéristique fortement liée aux caractéristiques topographiques et géométriques de la ville, c'est-à-dire aux grands types d'occupations du sol, et ce, par temps avec ciel clair et vent calme à une même heure .

En résumé, il est donc possible de caractériser un site quelconque à l'aide de certains indices tels que la densité du bâti, la moyenne du ratio de la hauteur moyenne des immeubles sur la largeur moyenne des rues (H/L), le facteur de visibilité du ciel (Sky- view factor), l'albédo,... En effet, le processus d'urbanisation produit des changements radicaux dans la nature de la surface, en premier lieu par l'occupation des sols qui n'applique pas toujours les règles d'urbanisme et encore moins la prise en compte des facteurs du climat lors de la conception urbaine.

Les phases post- conception urbaine, présentent elles aussi une multitude des défaillances qui contribuent à l'apparition de l'îlot de chaleur urbain et donc à l'augmentation par une façon ou par une autre de la température de nos îlots à savoir : le traitement des façades, l'aménagement des espaces extérieurs, la conception d'espaces verts, la couleur des toits, l'absence d'éléments d'eau...

Il est difficile cependant, en se basant sur les connaissances actuelles, de concevoir une ville idéale permettant de lutter contre le phénomène des ICU. Néanmoins, davantage de fraîcheur peut être ressentie dans une ville en combinant une stratégie de ventilation et en privilégiant des aménagements de végétation (parcs, jardins, murs végétaux) et d'eau (jets et chutes d'eau).

En complément des actions liées à la structure de la ville, celles liées à la présence de points d'eau et de surfaces végétalisées constituent donc d'autres facteurs contrôlables pour influencer sur la présence et l'intensité des ICU. Cela montre aussi que les enjeux sont croisés entre l'installation en ville de surfaces végétalisées et aquatiques et une disponibilité des ressources en eau sur le territoire urbain. Par ailleurs, il convient de privilégier des actions qui amènent des bénéfices multiples. La végétation en ville a un rôle potentiel rafraîchissant (par évapotranspiration et ombrage) qui est bénéfique pour la santé de la population en offrant des lieux (parcs et jardins) favorables pour la protection du rayonnement ultraviolet et adaptés à la pratique d'une activité physique. La végétation en ville peut améliorer la qualité de l'air par la production d'oxygène, la captation du dioxyde de carbone ainsi qu'en piégeant les particules en suspension dans l'air. Elle contribue également à conserver une bonne qualité des eaux (en limitant les eaux de ruissellement), à réduire la consommation d'énergie (la végétation rafraîchit l'air, ce qui diminue le besoin en climatisation), à rendre la ville agréable et à développer certains bienfaits sociétaux (des zones de verdure diminuent le stress).

La végétalisation des surfaces protège aussi de l'érosion due aux vents et à l'eau, diminue la réverbération du rayonnement solaire par un effet de filtre ou d'écran, et atténue aussi certaines fréquences sonores, etc. Limiter le phénomène d'îlot de chaleur urbain demande la mise en œuvre d'actions individuelles et locales mais aussi une mise en œuvre de politiques publiques plus globales au niveau des villes. Chaque individu peut agir pour réduire sa consommation énergétique en privilégiant l'achat d'appareils électroménagers certifiés économes en énergie ou en utilisant des lampes à faible consommation électrique et des détecteurs de présence dans les pièces, etc. D'autre part, une meilleure gestion de la consommation énergétique peut être mise en place si le trafic routier est mieux régulé. L'utilisation en ville de transports en commun (métro, tram, bus, trains...) et de transports actifs (vélo et marche à pied) est un autre exemple de bénéfices multiples. L'usage des transports actifs contribuent en effet à réduire le flux de chaleur anthropique lié aux transports motorisés et sont bénéfiques pour la santé humaine en encourageant l'activité physique. Par ailleurs, les transports en commun qui nécessitent le développement d'infrastructures spécifiques (chaussées, pistes cyclables ou espaces voiries) peuvent aider au rafraîchissement de l'air avec une intégration de la végétation en ville et une meilleure gestion des eaux pluviales. Une conception plus durable des villes peut aussi être

privilegiée avec des aménagements végétalisés et en utilisant des matériaux du bâti thermiquement économes.

En matière de gestion urbaine, les SIG offrent de multiples possibilités d'analyse ou de simulation. Ils ont d'abord trouvé d'importantes applications pour la gestion urbaine, qui constitue aujourd'hui encore un domaine très important de leur utilisation. Afin de faciliter le diagnostic des endroits touchés par la hausse des températures, un balayage complet doit se faire en utilisant des images à très haute résolution et intégrer les résultats dans un SGBD apparaît comme une solution intéressante.

L'intérêt de cette étude a été fortement enrichi par l'utilisation de la technologie des SIG afin de constituer un outil d'analyse d'un tissu urbain existant. L'étude présentée dans ce mémoire peut être perçue comme une étude de faisabilité technique pour explorer le potentiel des SIG en vue de réaliser une représentation tridimensionnelle de la zone d'étude exploitable pour la gestion des îlots de chaleur urbains.

L'enjeu d'une bonne connaissance du phénomène d'îlot de chaleur est essentiel afin :

- de préserver un confort d'été satisfaisant dans les années à venir et notamment lors d'épisodes climatiques critiques face aux changements climatiques et canicules récurrentes d'ici la moitié du 21<sup>ème</sup> siècle ;
- de limiter les consommations d'énergie accrue pour refroidir les bâtiments ;
- de limiter l'effet sur la santé des populations ;
- de créer des puits de fraîcheur dans les espaces urbains.

## Bibliographie

- 1 Diminution de 2,7% par décennie depuis 1978 dans l'océan arctique
- 2 Hausse des précipitations dans l'Est de l'Amérique du Nord et du Sud, le Nord de l'Europe et le centre de l'Asie, tandis que diminution dans le Sahel, les zones méditerranéennes, l'Afrique Australe et l'Asie du Sud.
- 3 En moyenne + 1,8 mm par an depuis 1961
- 4 Dioxyde de carbone, méthane, oxyde nitreux, hydrofluorocarbures, perfluorocarbures, hexafluorure de soufre, dont les émissions sont pondérées par leur pouvoir de réchauffement global.
- 5 Selon le cinquième rapport d'évaluation du GIEC
- 6 Degré par lequel un système risque d'être affecté négativement par les effets des changements climatiques sans pouvoir y faire face, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes (Rapport 2007, GIEC)
- 7 HIDALGO J. et al., *Advances in urban climate modeling*, 2008
- 8 HOWARD L., « The climate of London », 1820 ; OKE dans les années 1970 ; en France, ESCOURROU G.  
« Le climat et la ville », 1991
- 9 Augmentation du nombre de jours chauds, des précipitations (inondations urbaines), de la période de développement de la végétation (perte de biodiversité), mais diminution des rosées, brumes et brouillards urbains contribuant à épurer l'air des aérosols, pollens et poussières en suspension.
- 10 Rubrique géographie, "Algérie: milieu naturel, climat", IN Encyclopédie Encarta sur CD-ROM, Paris, Encarta, 2013.
- 11 GIEC. 2014. Bilan 2014 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
- 12 Dubois, C., O. Bergeron, A. Potvin, et L. Adolphe. 2012. « Adapting cities to climate change: heat and urban form. » In *Proceedings of the 8th International Conference on Urban Climates and the 10th Symposium of the Urban environment*, 4. Dublin.
- 13 IAU îdF - Les îlots de chaleur urbains - répertoire de fiches connaissances, île de France novembre 2010. <http://www.iau-idf.fr>
- 14 E. Bozonnet. Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments-cas des rues canyons. Thèse de doctorat, Université de Rochelle, 2005.
- 15 T.R. Oke. *Boundary layer climates*. Methuen and co. London, 2nd edition, 1987.
- 17 M. Rotach. On the influence of the urban roughness sub layer on turbulence and dispersion. *Atmospheric environment*
- 18 E. Bozonnet. Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments-cas des rues canyons. Thèse de doctorat, Université de Rochelle, 2005.
- 19 Arnfield. A.J, 2003: The urban heat island, *International Journal Climatology*
- 20 Rotach. M. W, 2005: Structure of the Urban Boundary Layer, Chap. 2, *Meteorology applied to Urban Air Pollution*, 2001: Representation of the field data, *Proceedings of the Third International Conference on Urban Air Quality*. Loutraki, Greece
- 21 Delmas. R. G, Mégie. V. H, Peuch, 2005: Physique et chimie de l'atmosphère, *Thèse de Doctorat de l'Université de Paris*.

- 22** J. Gandemer & A. Guyot. Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti. Ministère de l'Équipement, Direction de l'Aménagement foncier et de l'Urbanisme, Paris, 1976.
- 23** T.R. Oke. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and building*, 1988
- 24** S. Reiter. Elaboration d'outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception des ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes. Thèse de doctorat, Université de Louvain, 2007.
- 25** M. Nikolopoulou & K. Steemers. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for design urban spaces. *Energy and Buildings*.
- 26** D. Walton, V. Dravitzki & M. Donn. The relative influence of wind, sunlight and temperatures on user comfort in urban outdoor spaces. *Building and environment*.
- 27** B. Givoni, M. Noguchi, H. Saaroni, O. Pochter & Y. Yaacovand S. Becker. Outdoor thermal comfort research issues. *Energy and buildings*
- 28** J. Vinet. Contribution à la modélisation thermo aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieures. Thèse de doctorat, Ecole d'architecture de Nantes, 2000.
- 29** F. A. Toudert & H. Mayer. Numerical effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in a hot and dry climate. *Building and Environment*
- 30** Jacques Laravoire et al. Annexe nationale à la NF EN 1991-1-4 :2005, 2005. Disponible sous le lien <http://www.scribd.com/doc/14498865/Eurocode-NF-EN-199114>.
- 31** F. Thellier. Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Une approche de l'étude de confort. Tése de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, 1989.
- 32** CERTU. Confort thermique. Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opérations de constructions publiques, 2003.
- 33** M. Balandraux. Confort thermique, température et humidité [Webpage]. 2007. Disponible sous le lien <http://www.medecine-preventive.ch/fra/humidite.php>.
- CERTU. Confort thermique. Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opérations de constructions publiques, 2003.
- 34** J. Vinet. Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieures. Thèse de doctorat, Ecole d'architecture de Nantes, 2000.
- 35** Denis, 2014 Hébert in *Climate Change and Heat Islands*, [www.academia.edu](http://www.academia.edu)
- 36** US EPA. 2008. « Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies ». US Environmental Protection Agency (EPA). <https://www.epa.gov>
- 37** Florent Rullier, 2012 La place du paysagiste en ville dans un contexte de réchauffement climatique global. La question des îlots de chaleur urbains, application à Montréal
- 38** Food and Agriculture Organization, 2002 - <http://www.fao.org>
- 39** l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie : [www.ademe.fr/](http://www.ademe.fr/)
- 40** Groupe intergouvernemental sur le changement climatique (CCEC): <http://www.ipcc.ch>
- 43** Guigère, M. 2009. Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. INSPQ. [http://www.inspq.gc.ca/pdf/publications/988\\_MesuresIlotsChaleur.pdf](http://www.inspq.gc.ca/pdf/publications/988_MesuresIlotsChaleur.pdf)
- 44** Parmentier, A. 2010. Élaboration d'un outil d'aide à la décision pour atténuer le phénomène d'îlots de chaleur en milieu urbain. <http://espace.etsmtl.ca/311/>
- 45** Oke, T.R. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967).
- 46** Taha, H. 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat.



- 47** Fan, H., and D. J. Sailor. 2005. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. Atmospheric Environment
- 48** ROUX Justine , Mémoire en vue de l'obtention du MASTER 1 Transports Mobilité Environnement Climat Juin 2014
- 49** Champiat, C. 2008. Prévention des effets sanitaires des vagues de chaleur : Élaboration d'une méthodologie d'identification des îlots de chaleur urbains sur le territoire du Grand Lyon. <http://blogs.grandlyon.com/plan-climat/files/downloads/2010/09/23509087-CHAMPIATMemoire-IGS.pdf>
- 50** US EPA. 2008. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies | Heat Island Effect. <http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm>.
- 51** 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. Agricultural sciences. 2012.
- 52** Lemonsu 2003, modélisation des processus de surface et de la couche limite en milieu urbain, CNRM
- 53** ONERC. 2010. Rapport au Premier ministre et au Parlement : villes et adaptation au changement climatique. Rapport au Premier ministre et au Parlement. France.
- 54** Dubois, C., O. Bergeron, A. Potvin, et L. Adolphe. 2012. « Adapting cities to climate change: heat and urban form. »
- 55** OKE T.R., MAXWELL G.B., février 1975, « Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver »,
- 56** TAHA H., 1997, « Urban Climates and heat islands : albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat »
- 57** MILLS G., 2005. The Urban Canopy Layer Heat Island. IAUC Teaching Resources, [http://www.epa.gov/hiri/resources/news\\_Jan05.html#story1](http://www.epa.gov/hiri/resources/news_Jan05.html#story1)
- 58** ACKERMAN S., 2007. Urban Heat Island, University of Wisconsin, Space Science and Engineering Center. [http://icecap.us/images/uploads/URBAN\\_HEAT\\_ISLAND.pdf](http://icecap.us/images/uploads/URBAN_HEAT_ISLAND.pdf)
- 59** Colombert, M. 2008. « Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville ». France: Université Paris-Est.
- 60** NAKAMURA Y., OKE T.R., 1988, « Wind, temperature and stability conditions in an eastwest oriented urban canyon », Atmospheric Environment.
- 61** OKE T.R., 1981, « Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations », International Journal of Climatology.
- 62** TAREB, « Architecture Basse Energie », IN Energie dans l'environnement urbain, <http://www.learn.londonmet.ac.uk>.
- 63** SANTAMOURIS M., ADNOT J. et al., 2004, Cooling the cities, Paris : Les Presses de l'École des Mines de Paris
- 64** TERJUNG W. H., O'ROURKE P.A., août 1980, « Simulating the causal elements of urban heat islands », Boundary-Layer Meteorology
- 65** Pierre P. Kastendeuch, Modélisation du bilan radiatif et d'énergie d'un canyon urbain à Strasbourg
- 66** CHUDNOVSKY A., E. BEN-DOR E., SAARONI H., novembre 2004, « Diurnal thermal behaviour of selected urban objects using remote sensing measurements », Energy and Buildings.
- 67** Mathilde BUREAU, étudiante à l'ENSAIA La fonction thermorégulatrice de l'arbre en ville, <http://web04.univ-lorraine.fr/ENSAIA/marie/web/ntic/pages/2012/bureau.html>
- 68** TPE N.Y.O , <https://sites.google.com/site/tp hydrocarbures/effets-sur-l-atmosphere>

- 68** LANDSBERG H.E., 1981, The urban climate, Academic Press.
- 69**M. Le Paige Architecture et Climat. - E. Gratia - A. De Herde (1998). Guide d'aide à la conception bioclimatique.
- 70** OKE T.R., SPRONKEN-SMITH R.A., JAUREGUI E., GRIMMOND C.S.B., octobre 1999, « The energy balance of central Mexico City during the dry season », Atmospheric Environment
- 71** Modèles théoriques implémentés dans le logiciel SIRANE [http://air.ec-lyon.fr/SIRANE/Article.php?Titre=&File=&Id=SIRANE\\_Doc\\_Theorie&Lang=FR](http://air.ec-lyon.fr/SIRANE/Article.php?Titre=&File=&Id=SIRANE_Doc_Theorie&Lang=FR)
- 72** Soulhac, L., Salizzoni, P., Cierco, F.-X. et Perkins, R. J., 2011. The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion: PART I: presentation of the model. Atmospheric Environment. Volume 45
- 73** <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/advection-convection.xml>
- 74**M. Le Paige Architecture et Climat. - E. Gratia - A. De Herde (1998). Guide d'aide à la conception bioclimatique.
- 75** RICHARD Y., « La ville : climat, pollutions et politiques » in RHONALPENERGIE ENVIRONNEMENT, 12 juin 2007.
- 76** ACKERMAN S., 2007. Urban Heat Island, University of Wisconsin, Space Science and Engineering Center. Disponible sur Internet : [http://icecap.us/images/uploads/URBAN\\_HEAT\\_ISLAND.pdf](http://icecap.us/images/uploads/URBAN_HEAT_ISLAND.pdf)
- 77** BARRAUD Sylvie, Conférence sur : Le cycle de l'eau : incidence possible d'une action locale sur le fonctionnement d'un système, 2008
- 78** US Environmental Protection Agency, 2008 : [https://www.usherbrooke.ca/environnement/.../Charland\\_K\\_2014-05-16\\_.pdf](https://www.usherbrooke.ca/environnement/.../Charland_K_2014-05-16_.pdf)
- 79** SPRONKEN-SMITH R. A., OKE T.R., 1998, « The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates », International Journal of Remote Sensing, 19, 2085-2104.
- 80** Olivier PAPIN – Bureau d'études ECIC à Bordeaux , BET spécialisé dans l'audit énergétique, le bilan carbone, le suivi d'exploitation et la maîtrise d'œuvre.
- 81** WENG Q., LU D., SCHUBRING J., février 2004, « Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies », Remote Sensing of Environment
- 82** SAILOR D. J., LU L., juin 2004, « A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas », Atmospheric environment
- 83** ICHINOSE T., SHIMODOZONO K., HANAKI K., octobre 1999, « Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo », Atmospheric Environment
- 84** NUNEZ M., OKE T.R., 1977, « The energy balance of an urban canyon », Journal of Applied Meteorology.
- 85** SPRONKEN-SMITH R. A., OKE T.R., 1998, « The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates », International Journal of Remote Sensing, 19, 2085-2104.
- 86** HART M., SAILOR D.J. Assessing causes in spatial variability in urban heat islands magnitude, Portland State University: <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/127284.pdf>
- 87** SZPIRGLAS J., VOOGT J.A., « A validation and performance assessment of the surface heat island model» in FACULTY OF GEOGRAPHICAL SCIENCES, Fifth International Conference on Urban Climate, 1-5 septembre 2003, Lodz, Lodz, Poland : University of Lodz, 2003
- 88** Houet, T., and G. Pigeon. 2011. Mapping urban climate zones and quantifying climate behaviors An application on Toulouse urban area (France). Environmental Pollution NUNEZ M., OKE T.R., 1977, « The energy balance of an urban canyon », Journal of Applied Meteorology

- 89** ROUX Justine L'îlot de Chaleur Urbain à Dijon .Mise en place d'une campagne de mesures urbaines de la température, Université de Bourgogne, UFR Sciences Humaines, Département de Géographie.
- 90** Clément CHAMPIAT 2008, PREVENTION DES EFFETS SANITAIRES DES VAGUES DE CHALEUR Élaboration d'une méthodologie d'identification des îlots de chaleur urbains.
- 91** BRIDIER S., QUENOL H., KERMADI S., « Méthode d'analyse de la répartition des températures et de l'îlot de chaleur urbain à Lyon » in ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE, XXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Gènes, 2005
- 92** LACHANCE G., BAUDOIN Y., GUAY F., mai-juin 2006, « Etude des îlots de chaleurs montréalais dans une perspective de santé publique », Bulletin d'information en santé environnementale: [http:// www.inspq.qc.ca/pdf/bulletins/bise/BISE-17-3.pdf](http://www.inspq.qc.ca/pdf/bulletins/bise/BISE-17-3.pdf)
- 93** TAHA H., AKBARI H., SAILOR D., RITSCHARD R., 1992. Causes and effects of heat islands: sensitivity to surface parameters and anthropogenic heating, Lawrence Berkeley Lab: <http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/>
- 94** SZPIRGLAS J., VOOGT J.A., « A validation and performance assessment of the surface heat island model» in FACULTY OF GEOGRAPHICAL SCIENCES, Fifth International Conference on Urban Climate, 1-5 septembre 2003,
- 95** Masson V (2006) Lodz,Poland : University of Lodz, 2003. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. Bound-Layer Meteor
- 96**Thierry Poglio, Synthèse de paysages dans l'infrarouge thermique pour la simulation d'images de télédétection .THESE présentée pour obtenir le grade de Docteur en SCIENCES de l'Université de Nice - Sophia Antipolis Spécialité " Sciences de l'Univers "le 5 Nov 2013
- 97**Asrar G., 1989. Theory and Application of Optical Remote Sensing. Chap 15 : quantitative aspects of remote sensing in the thermal infrared. Wiley series in Remote Sensing
- 98** [http://harold-clenet.com/?page\\_id=250](http://harold-clenet.com/?page_id=250)
- 99** Vincent GODARD, Département de Géographie, Université de Paris 8,2015
- 100** [www.emse.fr/tice/uved/SIG/Glossaire](http://www.emse.fr/tice/uved/SIG/Glossaire)
- 101**sanders,1998, [hidrologia.usal.es/Complementos/Valores\\_perm\\_porosidad.pdf](http://hidrologia.usal.es/Complementos/Valores_perm_porosidad.pdf)
- 102**Dominique Schneuwly, Regis Caloz Les concepts spatiaux fondamentaux : <http://www.gitta.info> -.2013
- 103** Jean CORNILLAULT : base documentaire scientifique et technique - Techniques de l'Ingénieur
- 104** Solecki, W.D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J. et Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards.
- 105**Direction des Grands Parcs et du Verdissement (DGPV) (2012). Plan d'action canopée 2012-2021. In Ville de Montréal. Ville de Montréal. [http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands\\_parcs\\_fr/media/documents/pac\\_juin\\_2012\\_final.pdf](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands_parcs_fr/media/documents/pac_juin_2012_final.pdf).
- 106** Grimmond, S. (2011). London's urban climate: historical and contemporary perspectives. In economic and social research council. city weathers: meteorology and urban design 1950-2010. [http://www.sed.manchester.ac.uk/architecture/research/csud/workshop/programme/Grimmond\\_C\\_limateOfLondon.pdf](http://www.sed.manchester.ac.uk/architecture/research/csud/workshop/programme/Grimmond_C_limateOfLondon.pdf) .
- 107** Sailor, D.J. et Lu, L. (2004). A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. Atmospheric Environment.

**108**Ysabelle Filiatreault Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable en vue de l'obtention du grade de Maîtrise en environnement (M. Env.)

**109** Ouranos (2010). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. In Ouranos. Ouranos. [http://www.ouranos.ca/media/publication/111\\_PlanadaptationCC-Guidemunicipalites-Ouranos.pdf](http://www.ouranos.ca/media/publication/111_PlanadaptationCC-Guidemunicipalites-Ouranos.pdf)

**110** GIEC (2014). Changements climatiques 2014 Incidences, adaptation et vulnérabilité. In GIEC. GIEC. [http://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5\\_SPM\\_French.pdf](http://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5_SPM_French.pdf)

**111** Ouranos (s.d.). Le processus d'adaptation. In Ouranos. Vers l'adaptation aux changements climatiques. <http://adaptation.ouranos.ca/fr/processus-adaptation/>

**112** Ouranos (2010). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. In Ouranos. Ouranos. [http://www.ouranos.ca/media/publication/111\\_PlanadaptationCC-Guidemunicipalites-Ouranos.pdf](http://www.ouranos.ca/media/publication/111_PlanadaptationCC-Guidemunicipalites-Ouranos.pdf)

**113** Trottier, A. (2007). Toitures végétales : implantation de toits verts en milieu institutionnel. Maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal.

**114** Direction des Grands Parcs et du Verdissement (DGPV) (2012). Plan d'action canopée 2012-2021. In Ville de Montréal. Ville de Montréal.

[http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands\\_parcs\\_fr/media/documents/pac\\_juin\\_2012\\_final.pdf](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands_parcs_fr/media/documents/pac_juin_2012_final.pdf)

**115** Vergriete, Y. et Labrecque, M. (2007). Rôles des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain : revue de littérature et tentative d'extrapolation au contexte montréalais . In Agrireseau. Agrireseau. <http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-pepiniere/documents/pdf891.pdf>

**116** Gaumont, C. (2007). Le verdissement montréalais pour lutter contre les îlots de chaleur urbains, le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique. In CREM. Conseil régional de l'environnement de Montreal.

<http://www.cremtl.qc.ca/sites/default/files/upload/documents/publications/leverdissementmonrealais.pdf>

**117** Direction des Grands Parcs et du Verdissement (DGPV) (2012). Plan d'action canopée 2012-2021. In Ville de Montréal. Ville de Montréal.

[http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands\\_parcs\\_fr/media/documents/pac\\_juin\\_2012\\_final.pdf](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands_parcs_fr/media/documents/pac_juin_2012_final.pdf)

**118** Soverdi (s.d.b). Ruelles Vertes. In Soverdi. Soverdi. <http://www.soverdi.org/ruelles-vertes>

**119** Parmentier, A. (2010). Élaboration d'un outil d'aide à la décision pour atténuer le phénomène d'îlots de chaleur en milieu urbain. Maîtrise en génie de l'environnement, École des technologies supérieures, Montréal

**120** Trottier, A. (2010). Toitures végétales : implantation de toits verts en milieu institutionnel (2). Maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal.

**121** Cosgrove, E. et Spino, A. (2015). Toits végétaux : étape par étape, avantages et inconvénients. In éco habitation. <http://www.ecohabitation.com/guide/toits-vegetaux-etape-etapeavantages-inconvenients>.

**122** SCHL (2007). Recherche sur les toits et les murs verts à Québec. In SCHL. Société d'hypothèque et de logement.

<https://www03.cmhcschl.gc.ca/catalog/productDetail.cfm?cat=127&itm=30&lang=fr&fr=142058471182>.

**123** Sakai, S., Iizawa, I., Umetani, K., Onishi, M., Ito, A., Ono, K., Yajima, A. et Amemura, N. (2007). Old and New Mechanisms of the Urban Heat Island: Thermal Inertia and Fractal Surface.

- 124** Oleson, K.W., Bonan, G.B. et Feddema, J. (2010). Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. *Geophysical Research Letters*
- 125** Ressources Naturelles Canada (2014). Mesures visant la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain dans Rosemont–La Petite-Patrie. In Gouvernement du Canada. Ressources Naturelles Canada. [http://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/mun/pdf/13-0616-Rosemont%20Case%20Study\\_f.pdf](http://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/mun/pdf/13-0616-Rosemont%20Case%20Study_f.pdf)
- 126** Boucher, I. (2006). Toits verts. In Gouvernement du Québec. MAMROT. [http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire\\_municipal/veille/toits\\_verts.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire_municipal/veille/toits_verts.pdf)
- 127** Novae (2014). Toronto: première ville nord-américaine à exiger des toits verts. In Novae. Novae. <http://novae.ca/actualites/2012-04/toronto-premi%C3%A8re-ville-nord-am%C3%A9ricaine-%C3%A0-exiger-des-toits-verts>
- 128** City of Toronto (2014). Green Roofs. In City of Toronto. City of Toronto. <http://www1.toronto.ca/wps/portal/contentonly?vgnextoid=3a7a036318061410VgnVCM10000071d60f89RCRD#industrial>
- 129** Dumont, A. (2014). Toits blancs : une question de santé publique, selon le maire. In ruemasson.com. Rue Masson. <http://ruemasson.com/2014/12/19/toits-blancs-une-question-de-sante-publique-selon-lemaire/>
- 130** Boucher, I. (2013). La lutte aux îlots de chaleur urbains par l'aménagement des aires de stationnement. In Gouvernement du Québec. MAMROT. [http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement\\_territoire/documentation/lutte\\_ilots\\_chaleur.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement_territoire/documentation/lutte_ilots_chaleur.pdf)
- 131** Ressources Naturelles Canada (2014). Mesures visant la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain dans [http://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/mun/pdf/13-0616-Rosemont%20Case%20Study\\_f.pdf](http://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/mun/pdf/13-0616-Rosemont%20Case%20Study_f.pdf)
- 132** Regroupement des éco quartiers (2015). Ruelle verte. In Charbonneau, S. Regroupement des éco quartiers. [http://www.eco-quartiers.org/ruelle\\_verte](http://www.eco-quartiers.org/ruelle_verte)
- 133** Charbonneau, E. (2014). Plan d'adaptation aux changements climatiques de la ville de Montréal. Communication orale. Plan d'adaptation aux changements climatiques de la ville de Montréal, 12 novembre, Ville de Montréal.
- 134** Webster, A., Gagnon-Lebrun, F., DesJarlais, C., Nolet, J., Sauvé, C. et Uhde, S. (2008). L'évaluation des avantages des couts de l'adaptation aux changements climatiques. In Ouranos. MAMROT. [http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire\\_municipal/etudes\\_donnees\\_statistiques/evaluation\\_avantages\\_couts\\_adaptation.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire_municipal/etudes_donnees_statistiques/evaluation_avantages_couts_adaptation.pdf)
- 135** Villeneuve, C. (2013). ENV 704 Développement durable dans les organisations. Université de Sherbrooke, Centre universitaire de formation en environnement et développement durable (CUFE)
- 136** Streutker, D.R. (2003). Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment*
- 137** Reeves, F. (2011). Planète Cœur. Québec, Multimondes
- 138** Cavayas, F. et Baudouin, Y. (2008).  tude des biotopes urbains et périurbains de la cmm - Volets 1 et 2. In CMM.  tude des biotopes urbains et périurbains de la cmm. [http://cmm.qc.ca/biotopes/docs/volets\\_1\\_et\\_2.pdf](http://cmm.qc.ca/biotopes/docs/volets_1_et_2.pdf)
- 139** Jutras, P. (2015). Mesure de l'indice de canopée. Communication orale. rencontre, 22 janvier, Montréal.

- 140** Boisvert, P. (2013). Plantation d'arbres: à vos pelles! In La presse. La presse.  
<http://www.lapresse.ca/maison/cour-et-jardin/jardiner/201311/08/01-4708749-plantation-darbresa-vos-pelles.php>
- 141** Ville de Montréal (2015). Suivi de la qualité de l'air. In Ville de Montréal. Ville de Montréal
- 142** Direction des Grands Parcs et du Verdissement (DGPV) (2012). Plan d'action canopée 2012-2021.  
[http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands\\_parcs\\_fr/media/documents/pac\\_juin\\_2012\\_final.pdf](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands_parcs_fr/media/documents/pac_juin_2012_final.pdf)
- 143** Tairou, F.O., Bélanger, D. et Gosselin, P. (2010). Proposition d'indicateurs aux fins de vigie et de surveillance des troubles de la santé liés à la chaleur. In Institut Nationale de Santé Publique du Québec. Institut Nationale de Santé Publique du Québec.  
[www.inspq.qc.ca/pdf/.../1079\\_IndicateursVigieSanteChaleur.pdf](http://www.inspq.qc.ca/pdf/.../1079_IndicateursVigieSanteChaleur.pdf)
- 144** Streutker, D.R. (2003). Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. Remote Sensing of Environment
- 145** Solecki, W.D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J. et Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards
- 146** Smargiassi, A., Goldberg, M.S., Plante, C., Fournier, M., Baudouin, Y. et Kosatsky, T. (2009). Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands. Journal of epidemiology and community health
- 147** GendronBoucher, 2013 La lutte aux îlots de chaleur urbains par l'aménagement des aires de stationnement. In Gouvernement du Québec. MAMROT.  
[http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement\\_territoire/documentation/lutte\\_ilots\\_chaleur.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement_territoire/documentation/lutte_ilots_chaleur.pdf)
- 148** Webster, A., Gagnon-Lebrun, F., Desjarlais, C., Nolet, J., Sauvé, C. et Uhde, S. (2008). L'évaluation des avantages des coûts de l'adaptation aux changements climatiques. In Ouranos. MAMROT.  
[http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire\\_municipal/etudes\\_donnees\\_statistiques/evaluation\\_avantages\\_couts\\_adaptation.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire_municipal/etudes_donnees_statistiques/evaluation_avantages_couts_adaptation.pdf)
- 149** MDDELCC (2002). Indice de la qualité de l'air (IQA). In Gouvernement du Québec. MDDELCC. <http://www.iqa.mddelcc.gouv.qc.ca/contenu/calcul.htm>
- 150** MDDELCC (2015). Infosmog. In MDDELCC. MDDELCC.  
<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/AIR/infosmog/index.htm>
- 151** [http://www.legrand.com/FR/green-building-description\\_12849.html](http://www.legrand.com/FR/green-building-description_12849.html)

