
Amélioration d'un modèle prédictif de l'intensité des îlots de chaleur urbains et première approche d'un outil d'aide à la décision en matière de mitigation

Auteur : Fauconnier, Basile-Vladimir

Promoteur(s) : Mercatoris, Benoît; 5428

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18122>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



cerfo

FORMATION
ACCOMPAGNEMENT
RECHERCHE
EN FORESTERIE



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

**Amélioration d'un modèle prédictif de l'intensité des îlots de
chaleur urbains et première approche d'un outil d'aide à la
décision en matière de mitigation**

Basile-Vladimir Fauconnier

Travail de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de
master bioingénieur en sciences et technologies de l'environnement

Année académique 2022-2023

Promoteur : Benoît Mercatoris

Co-promoteur : Richard Fournier

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio

Le présent document n'engage que son auteur.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT



cerfo

FORMATION
ACCOMPAGNEMENT
RECHERCHE
EN FORESTERIE



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

**Amélioration d'un modèle prédictif de l'intensité des îlots de
chaleur urbains et première approche d'un outil d'aide à la
décision en matière de mitigation**

Basile-Vladimir Fauconnier

Travail de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de
master bioingénieur en sciences et technologies de l'environnement

Année académique 2022-2023

Promoteur : Benoît Mercatoris

Co-promoteur : Richard Fournier

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude à l'ensemble des professeurs de la faculté Agro-Bio Tech de Gembloux pour la formation précieuse qu'ils m'ont permis d'acquérir.

Mes remerciements vont tout particulièrement aux enseignants de la section Sciences et Technologies de l'Environnement.

Un immense merci à mon promoteur, Benoît Mercatoris, pour son niveau d'exigence, sa rigueur scientifique, mais également pour son écoute, sa bienveillance et son soutien, que ce soit à Gembloux ou de l'autre côté de l'Atlantique. Je souhaite également remercier chaleureusement mon co-promoteur, Richard Fournier, de l'Université de Sherbrooke. Grâce à lui, j'ai pu orienter mon étude vers ce sujet passionnant. Sa rigueur scientifique, sa confiance en moi et son accueil au sein de son équipe m'ont permis de m'épanouir au Canada.

Mes remerciements s'adressent aussi au personnel du CERFO à Québec. Je tiens à remercier Mathieu Varin, directeur du département en télédétection forestière, ainsi que toute son équipe.

Je tiens à adresser un remerciement particulier à Jean Marchal et à Marc-Antoine pour leur patience et nos nombreuses discussions.

Je veux aussi exprimer ma reconnaissance à mes camarades qui ont rendu ces cinq années d'études véritablement inoubliables, et je les remercie du fond du cœur.

Enfin, je souhaite adresser mes remerciements spéciaux à mon entourage, à ma maman, à mon papa (loup) ainsi qu'à mes grands frères, pour leur soutien indéfectible, leur écoute attentive et leurs encouragements tout au long de ce périple. Je n'oublie pas non plus mes amis, en particulier Rayane, dont le soutien est immense, Timothy, mon frère d'arme depuis l'âge de 8 ans, Zacharie, qui me soutient depuis la troisième année de bachelier, ainsi que Valérian, Antoine et bien d'autres.

Résumé

Les îlots de chaleur urbains représentent des perturbations microclimatiques au sein des villes, engendrées par la morphologie urbaine, les conditions climatiques et l'urbanisation croissante liée à l'exode rural. Leurs impacts sont variés et touchent la santé, le confort, la biodiversité, la gestion des ressources et l'économie. Cette étude vise à mieux appréhender ce phénomène en améliorant la prédiction de l'intensité des îlots de chaleur urbains au Québec, Canada. Elle compare différents modèles de régression, y compris un modèle de référence du « Centre d'Enseignement et de Recherche en Foresterie » (CERFO), et suggère des améliorations pour une évolution continue des modèles prédictifs. Un autre objectif est de quantifier l'effet d'atténuation de stratégies variées, notamment le verdissement et l'usage de matériaux rafraîchissants. L'outil ENVI_met est employé pour visualiser et préliminairement évaluer leurs effets de refroidissement dans des zones urbaines québécoises. Cette première approche quantitative ouvre la voie à une expansion de l'étude dans différentes villes de la région, afin de généraliser les effets et établir une base solide pour un futur outil d'aide à la décision. Les résultats indiquent que le modèle de référence peut être optimisé avec des méthodes de type gradient boosting. Chaque stratégie d'atténuation montre un effet significatif sur le refroidissement, suivant une hiérarchie précise parmi les techniques sélectionnées. Les matériaux rafraîchissants, grâce à leur réflectivité accrue, s'imposent comme la solution prédominante dans les zones examinées en fonction de leur répartition spatiale et temporelle. Cependant, il est crucial de noter que l'enrichissement des données à partir de diverses zones contribuerait à généraliser davantage les conclusions de cette étude.

Mots-clés : ENVI_met, ICU, IICU, gradient boosting, matériaux rafraîchissants, mitigation, prédiction, Québec, verdissement

Abstract

Urban heat islands signify microclimatic disturbances within cities arising from urban morphology, climatic conditions, and escalating urbanization due to rural migration. Their impacts are diverse, encompassing health, comfort, biodiversity, resource management, and the economy. This study aims to comprehensively grasp this phenomenon by refining the prediction of urban heat islands intensity in Quebec, Canada. It compares various regression models, including a reference model from the “Centre d’Enseignement et de Recherche en Foresterie” (CERFO), while proposing enhancements for ongoing predictive model evolution. Another objective is to quantify the attenuation effect of diverse strategies, including greening and the utilization of cooling materials. The ENVI_met tool is utilized to visualize and preliminarily evaluate their cooling effects in Quebec urban zones. This inaugural quantitative approach paves the way for an extended examination in different cities within the region, fostering effect generalization and forming a robust foundation for a prospective decision support tool. Results indicate that the reference model can be optimized using gradient boosting methods. Each attenuation strategy demonstrates a significant cooling effect, following a specific hierarchy among selected techniques. Cooling materials, owing to their enhanced reflectivity, emerge as the predominant solution in examined zones based on their spatial and temporal distribution. However, it is pivotal to note that enriching data from various zones would further generalize the conclusions of this study.

Keywords: ENVI_met, UHI, UHII, gradient boosting, cooling materials, mitigation, prediction, Quebec, greening

Table des matières

1.	INTRODUCTION.....	1
1.1.	CONTEXTE	1
1.2.	FACTEURS INFLUENÇANT LES ICU.....	4
1.2.1.	<i>Le rayonnement électromagnétique</i>	4
1.2.2.	<i>Bilan radiatif de la Terre.....</i>	6
1.2.3.	<i>Bilan thermique</i>	8
1.2.4.	<i>Bilan énergétique.....</i>	9
1.2.4.1.	Bilan énergétique standard	9
1.2.4.2.	Bilan énergétique urbain	10
1.2.5.	<i>Paramètres météorologiques</i>	12
1.2.6.	<i>Topographie.....</i>	13
1.2.7.	<i>Géométrie urbaine.....</i>	14
1.2.7.1.	Canyon urbain	14
1.2.7.2.	Facteur de vue du ciel (FVC)	14
1.2.7.3.	Rapport hauteur/largeur (H/L)	15
1.2.8.	<i>Propriétés physiques du bâtiment.....</i>	16
1.2.8.1.	Albédo	16
1.2.8.2.	Inertie thermique	16
1.2.9.	<i>Couvert naturel</i>	16
1.3.	LES COUCHES LIMITES URBAINES	18
1.4.	TYPES D'ICU.....	19
1.4.1.	<i>ICU dépendant de la température d'air ambiant.....</i>	20
1.4.1.1.	Îlots de chaleur de la couche de canopée urbaine	20
1.4.1.2.	Îlots de chaleur de la couche limite urbaine	20
1.4.2.	<i>ICU dépendant de la température de surface</i>	21
1.4.3.	<i>ICU dépendant de la température souterraine</i>	21
1.5.	STRATÉGIES CARTOGRAPHIQUES DES ICU	22
1.5.1.	<i>Mesure de la température de l'air ambiant.....</i>	22
1.5.2.	<i>Mesure de la température de surface.....</i>	23
1.6.	STRATÉGIES DE MITIGATION DES ICU	26
1.6.1.	<i>Verdissement</i>	27
1.6.2.	<i>Matériaux de hautes technologies et rafraîchissants</i>	27
1.6.3.	<i>Sources interactives d'eau</i>	27
1.7.	CONCLUSION	28
2.	OBJECTIFS	29
3.	MÉTHODOLOGIES	30
3.1.	MODÈLES PRÉDICTIFS DES ICU AU QUÉBEC.....	30
3.1.1.	<i>Zone d'étude</i>	30
3.1.2.	<i>Les variables explicatives</i>	31
3.1.3.	<i>Échantillonnage des données d'entraînement et de validation</i>	31
3.1.4.	<i>Prétraitements</i>	32
3.1.5.	<i>Modélisation</i>	34
3.1.5.1.	Support Vector Machine Regressor (SVR)	35
3.1.5.2.	Multi-Layer Perceptron (MLP)	35
3.1.5.3.	Modèle utilisant un algorithme de Gradient Boosting	35
3.1.6.	<i>Métriques de performance</i>	37
3.2.	ÉTUDE QUANTITATIVE DE L'EFFET D'ATTÉNUATION DES SMICU	38
3.2.1.	<i>Sites d'étude.....</i>	38
3.2.2.	<i>Choix des stratégies de mitigation.....</i>	40
3.2.2.1.	Toits verts extensifs (Extensive Green Roof – EGR)	40

3.2.2.2.	Murs verts vivants (Living Wall – LW).....	40
3.2.2.3.	Chaussées fraîches (Cool Pavement – CP)	40
3.2.2.4.	Toitures fraîches (Cool Roof – CR)	41
3.2.3.	<i>Configuration du modèle numérique sur ENVI_met</i>	41
3.2.3.1.	Modélisation des zones d'étude.....	41
3.2.3.1.1.	Zone d'étude n°1.....	43
3.2.3.1.2.	Zone d'étude n°2.....	43
3.2.3.2.	Scénarios d'atténuation d'ICU	44
3.2.4.	<i>Données météorologiques</i>	46
3.2.5.	<i>Paramétrage d'initialisation</i>	47
4.	RÉSULTATS.....	48
4.1.	MODÈLES PRÉDICTIFS DES IICU AU QUÉBEC.....	48
4.1.1.	<i>Performances des modèles entraînés</i>	48
4.1.2.	<i>Étude statistique des résidus par rapport à l'occupation du terrain</i>	50
4.2.	ETUDE QUANTITATIVE DE L'EFFET D'ATTENUATION DES SMICU	52
4.2.1.	LE COMPORTEMENT DU VENT	52
4.2.2.	<i>Comparaison de l'intensité d'atténuation sur la température</i>	54
4.2.2.1.	Zone d'étude n°1 - $\Delta T^{\circ}\text{C}$	54
4.2.2.2.	Zone d'étude n°2 $\Delta T^{\circ}\text{C}$	57
5.	DISCUSSION	60
5.1.	MODÈLES PRÉDICTIFS DES IICU AU QUÉBEC.....	60
5.2.	ETUDE QUANTITATIVE DE L'EFFET D'ATTENUATION DES SMICU	61
6.	CONCLUSION	64
7.	ANNEXES.....	65
7.1.	BANDES SPECTRALES LANDSAT-8	65
7.2.	INDICES SPECTRAUX.....	65
7.3.	MODÈLE BIDIMENSIONNEL DE LA ZONE D'ÉTUDE N°1	66
7.4.	MODÈLE BIDIMENSIONNEL DE LA ZONE D'ÉTUDE N°2	67
7.5.	RÉSIDUS EN FONCTION DE L'ÉCART DE TEMPÉRATURE PRÉDIT	68
7.6.	DISTRIBUTION DES RÉSIDUS.....	69
7.7.	LOCALE CLIMATE ZONE.....	70
8.	BIBLIOGRAPHIE.....	71

Table des figures

FIGURE 1 : REPRESENTATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE ET D'AIR AMBIANTE LORS DES PHASES NOCTURNES ET DIURNES EN FONCTION DE L'OCCUPATION DU SOL (SOURCE : US EPA, 2014).	1
FIGURE 2 : DISTRIBUTION SPECTRALE DU RAYONNEMENT SOLAIRE ET TERRESTRE (SOURCE : PRINCIPALEMENT DE SELLERS 1965).	5
FIGURE 3 : BILAN RADIATIF DE LA TERRE (SOURCE : "SCHOOLMOUV", N.D.).	6
FIGURE 4 : AU SEIN DU BILAN RADIATIF TERRESTRE, IL FAUT PRENDRE EN COMPTE LA PORTION PROVENANT DU DOMAINE SOLAIRE ET LA PORTION PROVENANT DU DOMAINE INFRAROUGE LONG. CE QUI EST NOTABLE, C'EST QU'UNE PARTIE DU RAYONNEMENT SOLAIRE EST ABSORBE PAR L'ATMOSPHERE, AINSI QU'UNE PARTIE DU RAYONNEMENT EMIS PAR LA TERRE. LES CONSEQUENCES DE CETTE ABSORPTION PAR L'ATMOSPHERE EST QU'UNE PARTIE DE CETTE ENERGIE SERA REEMISE VERS LA TERRE. CELLE-CI VA JOUER UN ROLE IMPORTANT DANS L'EFFET DE SERRE ATMOSPHERIQUE. (SOURCE : LONGDOZ, 2020)	7
FIGURE 5 : METHODOLOGIE PERMETTANT L'ESTIMATION DU FLUX DE CHALEUR ANTHROPIQUE (SOURCE : SAILOR, 2011).	11
FIGURE 6 : L'ILOT DE CHALEUR URBAIN (ICU) DANS PLUSIEURS SITUATIONS GEOGRAPHIQUES (MASSON ET AL., 2020).	13
FIGURE 7 : L'EFFET DU CANYON URBAIN SUR LE PROFIL DE VENT, LA CIRCULATION DE L'AIR ET LA REFLEXION RADIATIVE.	14
FIGURE 8 : (A) LE FACTEUR DE VUE DU CIEL EST DETERMINE EN EVALUANT LA PROPORTION DU CIEL VISIBLE (Ω) AU-DESSUS D'UN POINT D'OBSERVATION DONNE, TEL QU'IL APPARAÎT DANS UNE REPRESENTATION BIDIMENSIONNELLE. (B) L'ALGORITHME EFFECTUE LE CALCUL DE L'ANGLE D'HORIZON Γ DANS N DIRECTIONS (ICI, HUIT DIRECTIONS SONT PRESENTEES), EN SE BASANT SUR UN RAYON SPECIFIQUE R. SOURCE : (KOKALJ ET AL., 2010).....	15
FIGURE 9: REPRESENTATION DE TROIS VALEURS DE RAPPORT HAUTEUR/LARGEUR (H/L) : (A) LE H/L EQUIVAUT A 0.5, CE QUI REPRESENTE UN CANYON URBAIN PEU PROFOND; (B) LE H/L A UNE VALEUR DE 0.8, CE QUI REPRESENTE UN CANYON URBAIN QUI SE DENSIFIE, TOUT EN VOYANT L'IMPACT QUE CELA A SUR LE PARCOURS DU RAYONNEMENT SOLAIRE ; (C) LE H/L EQUIVAUT A 1.5, CE QUI REPRESENTE UN CANYON URBAIN PROFOND ET DENSE, IMPACTANT LARGEMENT LE COMPORTEMENT DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU SEIN DE CELUI-CI. (SOURCE : MUTANI ET AL., 2020)	15
FIGURE 10 : LE COUVERT VEGETAL A UNE INCIDENCE SUR LE BILAN DE REFLEXION, D'ADSORPTION ET DE TRANSMISSION DU RAYONNEMENT SOLAIRE PERMETTANT DES CONDITIONS D'ATTENUATION EFFICACE. DE PLUS, ELLES ONT LE POUVOIR D'EVAPOTRANSPIRATION, PERMETTANT UN ECHANGE DE CHALEUR ENTRE L'ATMOSPHERE ET LA PLANTE A L'AIDE DES STOMATES. CE QUI A COMME EFFET DE REFROIDIR LE MILIEU ENVIRONNANT DES VEGETAUX. (SOURCE : "LE POUVOIR DES ARBRES," 2022)	17
FIGURE 11 : REPRESENTATION CONCEPTUELLE D'UNE VILLE EN FONCTION DES DIFFERENTES ECHELLES, QUI REPRESENTENT CHACUNE D'ENTRE ELLES LES DIVERSES COUCHES LIMITEES QUE L'ON RETROUVE AU SEIN D'UNE VILLE. IL EST CONDITION DE L'ETAT DE LA COUCHE LIMITE DES ZONES URBAINES (UBL) AU SEIN DE LA COUCHE LIMITE PLANETAIRE (PBL), AINSI QUE SES SOUS-COUCHES D'UN POINT DE VUE (A) MESOECHELLE, (B) LOCAL ET (C) MICROECHELLE. (SOURCE : PIRINGER ET AL., 2002)	18
FIGURE 12 : REPRESENTATION DES DIFFERENTES SOUS-COUCHES DE L'ATMOSPHERE TERRESTRE DANS UNE ZONE URBAIN, AINSI QUE DU PROFIL GENERALISE DE LA VITESSE VERTICALE MOYENNE DU VENT (u). LES HAUTEURS CARACTERISTIQUES INCLUENT LA HAUTEUR MOYENNE DES ELEMENTS DE RUGOSITE (ZH), LA SOUS-COUCHE DE RUGOSITE (Zr ET RSL), LE DEPLACEMENT DU PLAN ZERO (Zd) QUI CORRESPOND A ENVIRON 2/3 DE ZH , ET LA LONGUEUR DE RUGOSITE ($Z0$). CETTE DERNIERE EST LA HAUTEUR AU-DESSUS DE Zd A LAQUELLE LE PROFIL DE VENT DE LA CANOPEE EST EXTRAPOLE JUSQU'A ATTEINDRE UNE VITESSE DE VENT NULLE. (SOURCE : OKE ET AL., 2004)	19
FIGURE 13 : REPRESENTATION DE L'INTENSITE DES ICU MOYENS DE LA TEMPERATURE DE L'AIR AMBIANT AU NIVEAU DU SOL ($\Delta T_U - R$) ET AU-DESSUS DU NIVEAU DES TOITS, AVEC LA DIFFERENCE DE L'HUMIDITE ABSOLUE ($\Delta a_U - R$) ENTRE LA ZONE URBAIN ET RURALE. CE SONT LES RESULTATS D'UNE ETUDE SE FAISANT AU SEIN DE LA VILLE DE BALE EN SUISSE. (SOURCE : CHRISTEN ET AL., 2004)	20
FIGURE 14 : LES STRATEGIES DE MITIGATION DU PHENOMENE D'ICU, SE DIVISE A L'HEURE ACTUELLE EN TROIS PRINCIPALES FAMILLES : LA PREMIERE EST LE VERDISSEMENT ("GREENERY"), L'UTILISATION DE MATERIAUX DE HAUTES TECHNOLOGIES ET RAFRAICHISSANTS ("COOL/HIGH-TECH MATERIALS"), AINSI QUE L'UTILISATION DE SOURCES INTERACTIVES D'EAU ("INTERACTIVE WATER FEATURES"). CHAQUE FAMILLE SE VOIT REPARTIR L'ENSEMBLE DES SOLUTIONS D'ATTENUATION ETANT COMPATIBLE AVEC SON PROCEDE ET SON ORIGINE. (SOURCE : BATHAEI ET AL., 2023).....	26
FIGURE 15 : ZONE D'ETUDE GLOBALE REPRESENTANT L'ECOUMENE DE POPULATION SUBDIVISE EN 35 ZONES, AU SEIN DESQUELLES, LES CENTRES DE POPULATION DE 2021 SONT REPRESENTES. (SOURCE : CERFO ET AL., 2023).....	30
FIGURE 16 : CORRELOGRAMME DES VARIABLES SELECTIONNEES ET DIVISEES, AFIN D'ETRE UTILISEE AU SEIN DES MODELES DE REGRESSION PERMETTANT DE PREDIRE L'ICU, AINSI QUE LA VARIABLE D'INTERET QU'EST L'ECART DE TEMPERATURE.....	34
FIGURE 17 : ALGORITME DE GRADIENT BOOSTING TREES (GBT). (SOURCE : PAL, 2020)	36
FIGURE 18 : LA SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA VILLE DE QUEBEC CAPITALE NATIONALE AU SEIN DE LA PROVINCE DE QUEBEC.	38

FIGURE 19 : LA ZONE D'ETUDE NUMERO UNE SE SITUANT AU SEIN DU QUARTIER DU PLATEAU DE LA VILLE DE QUEBEC, CAPITALE NATIONALE.....	39
FIGURE 20 : LA ZONE D'ETUDE NUMERO DEUX SE SITUE AU SEIN DU QUARTIER SAINT-ROCH DE LA VILLE DE QUEBEC, CAPITALE NATIONALE.....	39
FIGURE 21 : BITMAPS CREES SUR QGIS AFIN DE CONSTRUIRE LE MODELE TRIDIMENSIONNEL SUR SPACES D'ENVI_MET.	42
FIGURE 22 : MODELE TRIDIMENSIONNEL DE LA ZONE D'ETUDE N°1.	43
FIGURE 23 : MODELE TRIDIMENSIONNEL DE LA ZONE D'ETUDE N°2.	44
FIGURE 24 : MODELES TRIDIMENSIONNELS REPRESENTANTS CHAQUE SCENARIO DE MITIGATION POUR LA ZONE D'ETUDE N°1.	45
FIGURE 25 : MODELES TRIDIMENSIONNELS REPRESENTANTS CHAQUE SCENARIO DE MITIGATION POUR LA ZONE D'ETUDE N°2.	45
FIGURE 26 : DISPOSITION SPATIALE DES DIFFERENTES STATIONS METEOROLOGIQUES PROCHES DES DIFFERENTES ZONES D'ETUDE.	46
FIGURE 27 : L'ECART DE TEMPERATURE REEL EN FONCTION DES VALEURS PREDITES PAR CHAQUE MODELE. LA LIGNE REPRESENTANT UNE MODELISATION PARFAITE EST REPRESENTEE AVEC UNE ORDONNEE A L'ORIGINE DE 0 ET UNE PENTE DE 1.	48
FIGURE 28 : L'IMPORTANCE EXPLICATIVE DE CHAQUE VARIABLE EN FONCTION DU MODELE DE REGRESSION UTILISE.....	49
FIGURE 29 : MAE DES DIFFERENTS MODELES REPRIS DANS CETTE ETUDE EN FONCTION DES DIFFERENTES OCCUPATIONS DU TERRAIN.	50
FIGURE 30 : DIFFERENCE DES MAE DE CHAQUE MODELE PAR RAPPORT AU MODELE DE REFERENCE.....	50
FIGURE 31 : MAE DES DIFFERENTS MODELES, PAR RAPPORT AUX QUARTILES, REPRIS DANS CETTE ETUDE EN FONCTION DES DIFFERENTES OCCUPATIONS DU TERRAIN.	51
FIGURE 32 : DIFFERENCE DES MAE DE CHAQUE MODELE, EN FONCTION DU QUARTILE, PAR RAPPORT AU MODELE DE REFERENCE.....	51
FIGURE 33 : DISTRIBUTION DE LA VITESSE DU VENT ET DE SA DIRECTION AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE N°1 A DIFFERENTES HEURES DE LA JOURNEE.....	53
FIGURE 34 : DISTRIBUTION DE LA VITESSE DU VENT ET DE SA DIRECTION AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE N°1 A DIFFERENTES HEURES DE LA JOURNEE.....	53
FIGURE 35 : L'EFFET DE REFROIDISSEMENT DU SCENARIO (A), LES TOITURES VERTES, AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE N°1 EN FONCTION DE DIFFERENTS HORAIRES DE LA JOURNEE.	55
FIGURE 36 : L'EFFET DE REFROIDISSEMENT DU SCENARIO (B), LES MURS VIVANTS, AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE N°1 EN FONCTION DE DIFFERENTS HORAIRES DE LA JOURNEE.	55
FIGURE 37 : L'EFFET DE REFROIDISSEMENT DU SCENARIO (C), LES CHAUSSEES FRAICHES, AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE N°1 EN FONCTION DE DIFFERENTS HORAIRES DE LA JOURNEE.....	56
FIGURE 38 : L'EFFET DE REFROIDISSEMENT DU SCENARIO (D), LES TOITURES FRAICHES, AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE N°1 EN FONCTION DE DIFFERENTS HORAIRES DE LA JOURNEE.	56
FIGURE 39 : L'EFFET DE REFROIDISSEMENT DU SCENARIO (A), LES TOITURES VERTES, AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE N°2 EN FONCTION DE DIFFERENTS HORAIRES DE LA JOURNEE.	58
FIGURE 40 : L'EFFET DE REFROIDISSEMENT DU SCENARIO (B), LES MURS VIVANTS, AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE N°2 EN FONCTION DE DIFFERENTS HORAIRES DE LA JOURNEE.	58
FIGURE 41 : L'EFFET DE REFROIDISSEMENT DU SCENARIO (C), LES CHAUSSEES FRAICHES, AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE N°2 EN FONCTION DE DIFFERENTS HORAIRES DE LA JOURNEE.....	59
FIGURE 42 : L'EFFET DE REFROIDISSEMENT DU SCENARIO (D), LES TOITURES FRAICHES, AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE N°2 EN FONCTION DE DIFFERENTS HORAIRES DE LA JOURNEE.	59
FIGURE 43 : MODELE BIDIMENSIONNEL DE LA ZONE D'ETUDE N°1.	66
FIGURE 44 : MODELE BIDIMENSIONNEL DE LA ZONE D'ETUDE N°2.	67
FIGURE 45 : MATRICE DES RESIDUS EN FONCTION DE LA PREDICTION, PAR RAPPORT AU MODELE ET A L'OCCUPATION DU TERRAIN.....	68
FIGURE 46 : MATRICE DES HISTOGRAMMES REPRESENTANT LA DISTRIBUTION DES RESIDUS EN FONCTION DU MODELE ET DE L'OCCUPATION DU TERRAIN.	69
FIGURE 47 : LISTE DES DIFFERENTES CLASSES QUI DEFINISSENT LA CLASSIFICATION LCZ. (SOURCE : STEWART ET AL., 2012)	70

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : LISTE DES VARIABLES REPRISES APRES LA SELECTION ET QUI SONT UTILISEES POUR ENTRAINER LES DIFFERENTS MODELES DE REGRESSION AFIN DE PREDIRE L'IICU.	32
TABLEAU 2 : LISTE DES HYPERPARAMETRES OPTIMISES DU MODELE DE REGRESSION SVR, AINSI QUE SES VALEURS.	35
TABLEAU 3 : LISTE DES HYPERPARAMETRES OPTIMISES DU MODELE DE REGRESSION MLP, AINSI QUE SES VALEURS.....	35
TABLEAU 4 : LISTE DES HYPERPARAMETRES OPTIMISES DU MODELE DE REGRESSION CATBOOST, AINSI QUE SES VALEURS.....	37
TABLEAU 5 : LISTE DES HYPERPARAMETRES OPTIMISES DU MODELE DE REGRESSION LIGHTGBM, AINSI QUE SES VALEURS.....	37
TABLEAU 6 : LISTE DES HYPERPARAMETRES OPTIMISES DU MODELE DE REGRESSION XGBOOST, AINSI QUE SES VALEURS.....	37
TABLEAU 7 : LISTE DES MATERIAUX, DES SOLS ET DES PLANTES UTILISES AU SEIN DES DEUX ZONES D'ETUDE.	42
TABLEAU 8 : LISTE DES DIFFERENTS TYPES D'ARBRES UTILISES AU SEIN DU MODELE TRIDIMENSIONNEL DE LA ZONE N°2	43
TABLEAU 9 : PERFORMANCE DE CHAQUE MODELE QUANTIFIE A L'AIDE DU RMSE ET DU R ²	48
TABLEAU 10 : LA DESCRIPTION DES BANDES SPECTRALES QUE POSSEDENT LE SATELLITE LANDSAT-8.....	65
TABLEAU 11 : LISTE DE L'ENSEMBLES DE INDICES SPECTRAUX CALCULES A L'AIDE DES BANDES SPECTRALES DU SATELLITE LANDSAT-8, QUI SONT DECRITS DANS LE TABLEAU 10 QUI EST REPRIS DANS LES ANNEXES [7.1]	65

1. Introduction

1.1. Contexte

La population mondiale s'est accrue de manière exponentielle de 2.54 à 7.79 milliards entre 1950 et 2020 (Nations, 2019). Certaines projections font état d'un nombre avoisinant les 10 milliards d'individus à l'horizon 2050 (Nations, 2011). Au sein des zones urbaines, la proportion de population s'est également accrue au fil des dernières décennies, dépassant les 50 % en 2008 (Poot et al., 2013). Il est estimé que la population urbaine devrait atteindre 63 % de la population mondiale en 2050, soit près de 6.3 milliards d'habitants (Nations, 2012), induisant une augmentation importante de la superficie des villes. Cette tendance à la migration vers les zones urbaines est d'autant plus marquée parmi les pays occidentaux et du Moyen-Orient. Ainsi, les données provenant de La Banque Mondiale indiquent que la proportion est, en 2021, de 98 % en Belgique, 89 % au Liban, 87 % au Brésil, 85 % en Arabie saoudite, 82 % au Canada, 75 % en Fédération de Russie et 63 % en Chine ("World Bank Open Data," n.d.). Cette expansion urbaine a pour conséquence, à travers l'imperméabilisation des surfaces et la présence de bâtiments, de modifier le climat à l'échelle locale. En particulier le bilan énergétique, lié au rayonnement solaire et aux différents échanges thermiques, est affecté par l'anthropisation du milieu, résultant en l'apparition de zones à température symptomatiquement suréminente, appelées îlots de chaleur urbains (ICU), en comparaison avec les zones environnantes (Foissard, 2015; Landsberg, 1956; Mills et al., 2022). Cette différence de température se démarque davantage durant la phase nocturne (**Figure 1**), par temps calme, sous un ciel de nébulosité nulle et une influence anticyclonique (Bahi et al., 2019). Des hausses localisées de température peuvent être observées tout au long de l'année, avec des pics d'intensité durant les phases hivernales et estivales, où les écarts de température sont les plus importants (Cantat et al., 2004). La cause vient principalement de

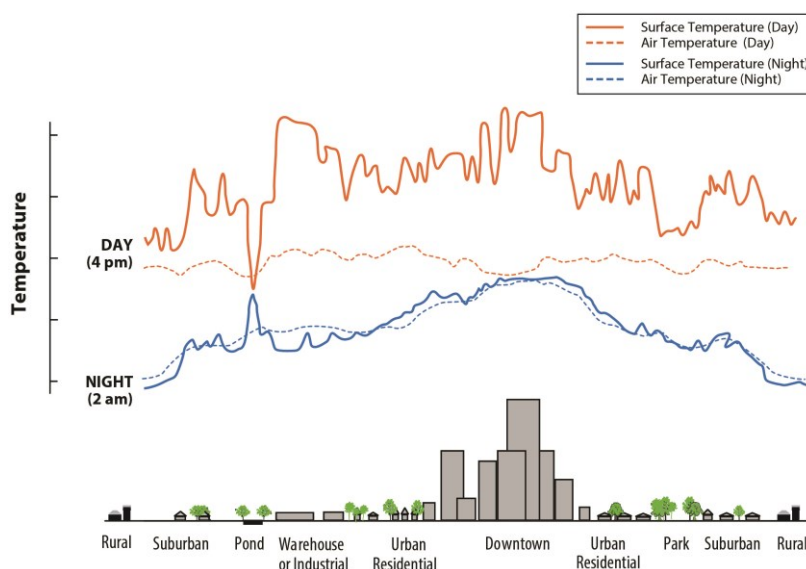


Figure 1 : Représentation de la température de surface et d'air ambiante lors des phases nocturnes et diurnes en fonction de l'occupation du sol (Source : US EPA, 2014).

l'emménagement de la chaleur par les corps qui constituent le système urbain, tels que les bâtiments et les voiries, durant la journée. Cette chaleur emmagasinée est réémise majoritairement la nuit. De plus la dissipation de cette énergie au sein d'une zone urbaine est plus lente comparée à celle d'une zone nue qui se définit quant à elle par une surface terrestre dénuée de corps anthropique et faiblement végétalisée. Ce phénomène favorise la différence de

température (Oke, 1982). D'un point de vue spatio-temporel, la durée d'action des foyers actifs d'ICU peut aller de quelques heures à plusieurs jours, voire mois en fonction de la durée des vagues de chaleur. De plus, le rayon d'influence vertical et horizontal peut s'étendre de plusieurs dizaines ou centaines de mètres d'altitude et de plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres respectivement (Stewart, 2011). Les ICU impliquent plusieurs conséquences touchant conjointement la santé humaine, la biodiversité, l'économie, la gestion des ressources naturelles et anthropiques, etc.

Le phénomène d'augmentation localisée de la température en zone urbaine a mené à un accroissement de la mortalité lors des périodes de canicules survenues ces dernières années (Possega et al., 2022). De plus, les ICU sont associées à une augmentation accrue de stress thermiques, de chocs thermiques et de maladies respiratoires et cardiovasculaires dues à une difficulté du corps à réguler correctement sa température (Bradford et al., 2015). Trois épisodes caniculaires sont particulièrement marquants. En 2003, l'Europe centrale a connu une vague de chaleur se caractérisant par des températures de 35 °C à 40 °C, ce qui provoqua autour de 70 000 morts supplémentaires et des dommages économiques estimés à plus de 13 milliards d'euros (De Bono et al., 2004). En 2010, c'est en Europe de l'Est et en Russie qu'on a dénombré plus de 50 000 morts liées aux fortes chaleurs (Barriopedro et al., 2011). En 2019, l'Europe occidentale fut frappée par une canicule historique avec notamment un record de 46 °C enregistré à Nîmes (France). Cette année-là, plusieurs pays, tels que la Suisse, l'Allemagne, l'Autriche, ont connu le mois de juin le plus chaud jamais enregistré (Vautard et al., 2020). Cette catastrophe naturelle conduira à une surmortalité estimée à 2500 personnes issues principalement de France, des Pays-Bas et de Belgique (CRED, 2020). Ces chiffres peuvent s'alourdir, en considérant que l'intensité des effets des virus à l'origine des maladies respiratoires est accentuée par les températures extrêmes (R. Chen et al., 2018). Le Centre Chinois de Contrôle et de Prévention des Maladies stipule que « *le risque de mortalité provoqué par les maladies respiratoires est de 10.57 % et de 17.48 % pour les problèmes cardiovasculaires* ». Ces maladies affectent les fonctions cardio-pulmonaires, notamment la pression artérielle, la viscosité du sang, le cholestérol sérique et le rythme cardiaque (Huang et al., 2020). Une étude de Lungman et al. (2023) met en avant que ce taux de mortalité lié au vague de chaleur et donc indirectement par les ICU peut se réduire drastiquement, de 39.5 %, si la fraction du couvert végétalisé des villes est de 30 %. Ce qui correspond à une augmentation de 15 % de celui-ci, en sachant que les 93 villes européennes reprises dans cette étude, ont une valeur moyenne du couvert végétalisé de 15 %.

Les stratégies de construction des villes modernes exercent une influence sur les niches écologiques. Le contexte urbain altère les conditions d'existence de la biodiversité en modifiant les facteurs abiotiques (la température, l'humidité, le vent, l'ensoleillement, les précipitations, etc.) et les facteurs biotiques (la présence de nourriture, la prédation, les maladies et le parasitisme, la compétition intra ou interspécifique, etc.) (Salinitro et al., 2018). Le phénomène d'ICU agit comme un filtre écologique, sur la faune et la flore vivant au sein des villes, basé entre autre sur la tolérance de ces communautés d'espèces aux hautes températures (Chown et al., 2015; Hamblin et al., 2017; Piano et al., 2017). Les ICU ont un impact équivalente sur les communautés de mammifères, d'insectes, d'oiseaux et de poissons. Les organismes les moins adaptés aux conditions de forte chaleur disparaissent laissant place aux individus les plus adaptés à cet environnement. Il se peut, qu'il persiste quand même au sein de ces zones défavorables, des

communautés aux distributions d'individus assez limitées, se cloisonnant aux îlots de fraîcheur urbain (ICFU), que cela soit au sein de différentes zones vertes ou des zones à faible couverture imperméabilisée (Frank et al., 2023).

Les ICU ont également une répercussion notable sur l'économie, avec une demande croissante d'énergie pour faire face à l'augmentation des températures à l'intérieur des bâtiments (systèmes de climatisation) (Zhu et al., 2023). Pour exemple, une hausse de 2°C occasionnée par les ICU peut avoir comme conséquence une augmentation de 5 % de la consommation énergétique (Anquez et al., 2011). De plus, pour chaque augmentation de la température de l'air extérieur de un degré, la demande maximale d'électricité augmente de 0.45 % à 4.6 % et accroît la demande énergétique du bâtiment jusqu'à plus de 8.5 % (Santamouris et al., 2015). Le bien-être de la population dans les villes implique la mise en place de systèmes opérationnels et de projets d'urbanisme façonnant le paysage urbain, en faveur d'une réduction du phénomène d'ICU. Il est important de mettre en place des stratégies adaptées pour la gestion des ressources naturelles et anthropiques, telles que l'eau, pouvant forcer une ville à imposer des limites d'utilisation. La gestion des déchets peut également causer des problèmes sanitaires, avec des rues qui peuvent devenir insalubres ou être envahies par des animaux nuisibles, tels que des rats. Les ICU favorisent également l'accentuation de la pollution en augmentant la synthèse d'ozone (O_3) dans l'atmosphère urbaine, par réaction photochimique due à l'augmentation de la température, ce qui peut aggraver la santé publique (Stathopoulou et al., 2008; Swamy et al., 2017). L'accumulation de ces effets néfastes dû aux ICU peut entraîner la formation de zones où l'indice d'habitabilité est médiocre (Bradford et al., 2015). Cette tendance de l'intensification et de la répétition de ce phénomène climatique devrait se poursuivre selon le sixième rapport d'évaluation du GIEC (Masson-Delmotte et al., 2021). Ceci causera davantage de pertes humaines et de dommages économiques tout en suivant un gradient déterminé par le statut socio-économique du lieu (Heaviside et al., 2017). Voilà pourquoi, il est primordial de continuer les recherches sur les ICU, afin de minimiser ses conséquences et de pouvoir prévenir ses effets, dans les régions à forte densité de population, exacerbés par les changements climatiques.

Cela fait déjà 200 ans que les phénomènes d'ICU sont étudiés (Mills et al., 2022). Les premières références datent de 1818, à partir des recherches scientifiques de Luke Howard (1772-1864), un météorologue amateur faisant partie des premiers chercheurs en climatologie urbaine (Gartland, 2012; Howard, 1818a, 1818b). Celui-ci a mesuré la température ambiante de différents sites sous différentes circonstances pour constater « qu'un excès artificiel de température sévit au sein de la ville de Londres en comparaison avec le reste du pays » (Howard, 1833). Son interprétation spécifiait que cette augmentation de température provenait d'un excès de population, des types de structures et de l'utilisation grandissante des combustibles fossiles. Au cours de la seconde partie du 19e siècle s'ensuivent des interprétations similaires à Paris par Emilien Renou (1815-1902) (Renou, 1868, 1855). Une même constatation est faite en outre-Atlantique, au cours de la seconde partie du 20e siècle, avec le climatologue John Murray Mitchell Jr. (1928-1990) (Mitchell Jr, 1961). Il faudra attendre les années 70, du siècle dernier, pour commencer à s'intéresser activement aux acteurs ayant une incidence particulière à l'apparition du phénomène d'ICU (Bahi et al., 2019). Un climatologue canadien, Timothy Richard Oke (1941-), se pencha sur une explication formelle des ICU. Il constata l'omniprésence presque exclusive de ce phénomène dans les villes, indépendamment de la région climatique, en

conséquence de la modification de l'occupation du sol, des propriétés atmosphériques et du développement incessant des villes (Oke, 1995, 1982, 1976, 1973). Non seulement l'étude des ICU est d'intérêt scientifique, mais elle a aussi des répercussions pratiques significatives sur la planification urbaine (Dimitrov et al., 2021). La connaissance scientifique des phénomènes liées aux ICU permettront la mise en place de solutions de mitigation et de leurs effets négatifs, par des modifications de l'environnement urbain axé sur le bien-être de sa population.

1.2. Facteurs influençant les ICU

Afin de mieux appréhender le phénomène d'ICU, il est nécessaire d'inventorier les facteurs influençant son apparition et son intensité. Il existe deux familles de facteurs qui ont un impact significatif. Ceux-ci sont, premièrement, les facteurs naturels qui regroupent le rayonnement solaire, les différents paramètres météorologiques, ainsi que la topographie. La deuxième famille comprend les facteurs anthropiques tels que la géométrie/morphologie urbaine, l'émission de pollution et de chaleur, l'imperméabilisation des surfaces impactant le ruissellement et donc la distribution de l'eau dans la ville et sa rétention, les matériaux de construction, le pourcentage de végétation des zones urbaines, présence de point d'eau et ainsi que la densification urbaine. Dans cette section, chaque aspect sera décrit explicitement de manière individuelle ou inclus dans la description de bilans (thermique, énergétique). Dans un second temps, les solutions de mitigation pour l'atténuation des ICU seront introduites.

1.2.1. Le rayonnement électromagnétique

Avant d'aborder les principes physiques responsables des ICU, décrivons l'énergie solaire incidente à l'origine de la température ambiante. L'énergie solaire provient de la fusion solaire qui a démarré depuis plus de 4.57 milliards d'années pour donner à notre soleil le statut d'étoile. Cette source d'énergie nous atteint sous forme de rayonnement électromagnétique, après un voyage d'une unité astronomique (distance moyenne entre la Terre et le Soleil : 149 597 870 700 m). Le rayonnement électromagnétique transfère d'énergie, à travers l'espace, par la propagation d'un champ magnétique et d'un champ électrique émanant de charges en mouvement. Des électrons peuvent être émis ou absorbés à partir de particules du soleil. La longueur d'onde (ou la fréquence) du champ lumineux caractérise cette forme d'énergie. Tous les objets ayant une température supérieure à 0 Kelvin (K), faisant référence au zéro absolu ($-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$), émettent un rayonnement électromagnétique. La relation de Planck-Einstein informe sur la quantité d'énergie véhiculée par une onde électromagnétique en fonction de la longueur d'onde :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

où E est l'énergie électromagnétique (en Joule), h est la *constante de Planck* ($6.62607015 \times 10^{-34} \text{ m}^2\text{kg}\text{s}^{-1}$), c est la constante de la vitesse de propagation de la lumière (en ms^{-1}) et λ est la longueur d'onde (en m). Conformément à cette relation, plus la longueur d'onde est petite (ou plus la fréquence est grande), plus l'énergie électromagnétique sera grande. De manière interreliée, la loi de Wien met en relation le niveau d'agitation moléculaire du corps noir avec son rayonnement. Plus simplement, cette loi met en relation la température de surface d'un astre avec la couleur perçue de cet astre :

$$\lambda_{max} = \frac{\sigma_w}{T_{surf}} \quad (1.2)$$

où λ_{max} est la longueur d'onde perçue de l'astre (en m), σ_w est la *constante de Wien* ($2.89777291 \times 10^{-3} mK$) et T_s est la température de surface de l'objet d'étude (en Kelvin), selon le modèle de corps noir. Cette relation s'applique aux astres émettant (et non réfléchissant) du rayonnement électromagnétique incident. Notre étoile, le Soleil, a une température de surface d'environ $6000 K$. L'équation de Wien nous informe que le soleil émet à une longueur d'onde maximale à $483 nm$. Toutefois, la mesure du rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère terrestre nous montre que le rayonnement incident s'étale surtout dans la gamme de longueurs d'onde visible par l'homme, entre 400 et $700 nm$ (Figure 2). La gamme totale de rayonnement incident sur Terre s'étend de 280 à environ $3000 nm$, appelée gamme d'ondes courtes ou rayonnement solaire (RS). Pour sa part, la Terre émet des rayonnements à une température moyenne d'environ $300 K$, ce qui correspond à une longueur d'onde maximale d'émission autour de $10 \mu m$ selon l'équation de Wien. Sa gamme d'émission s'étend toutefois de 4 à $30 \mu m$, ce qui correspond aux ondes infrarouges dans le spectre électromagnétique, aussi appelée gamme d'ondes longues ou rayonnement thermique (RT). Le taux de rayonnement d'un astre réel aussi appelé un corps gris se rapproche de celui du corps noir mais dépend de sa réponse, c'est-à-dire son émissivité (notée ε). Cette émissivité est donc le rapport entre la luminance du corps gris par rapport au corps noir à la même température (Monchau, n.d.). L'émissivité est exprimée entre 0 et 1 (adimensionnel). Elle décrit la capacité d'un matériau à capturer de l'énergie, puis à la réémettre sous forme de rayonnement électromagnétique. Le taux de rayonnement électromagnétique total, exitance, émis (M) se calcule par :

$$M = \sigma \varepsilon T_{surf}^4 \quad (1.3)$$

où σ est la *constante de Stefan-Boltzmann* ($5.670374 \times 10^{-8} Wm^{-2} K^{-4}$) et T_s est la température de surface du corps à l'étude (en Kelvin). Au niveau du système terrestre, il y a émission d'une part, venant de la surface, RT_1 avec une ε_T^{IRL} qui décrit l'émissivité de la surface de la Terre. Une autre, venant de l'atmosphère, RA avec une ε_A^{IRL} représentant l'émissivité de l'atmosphère terrestre. En somme, la Terre émet moins que le Soleil, et de plus, selon un rayonnement d'une longueur d'onde différente (Figure 2).

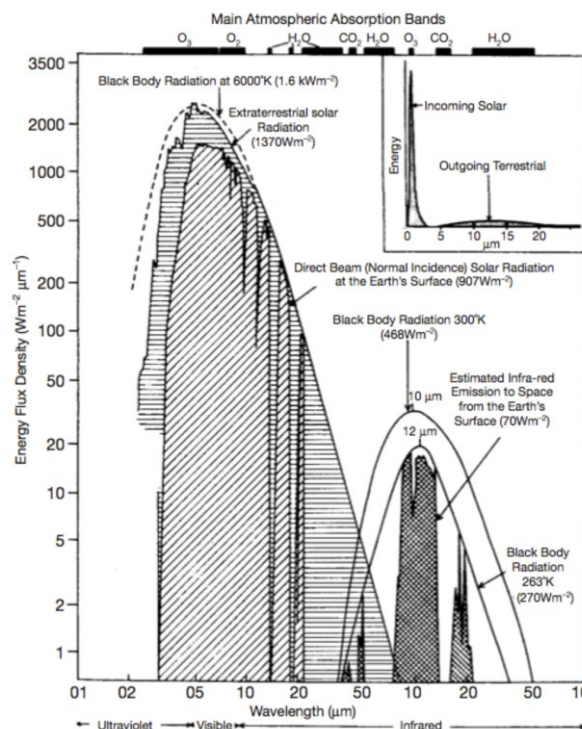


Figure 2 : Distribution spectrale du rayonnement solaire et terrestre (Source : principalement de Sellers 1965).

1.2.2. Bilan radiatif de la Terre

L'atmosphère terrestre est le théâtre d'échanges entre les rayonnements incidents, réfléchis et émis. Un système à l'équilibre, comme la Terre, doit recevoir autant qu'il émet. Par ce fait, l'énergie reçue par le rayonnement solaire est soit absorbée par le système terrestre, soit rejetée vers l'espace.

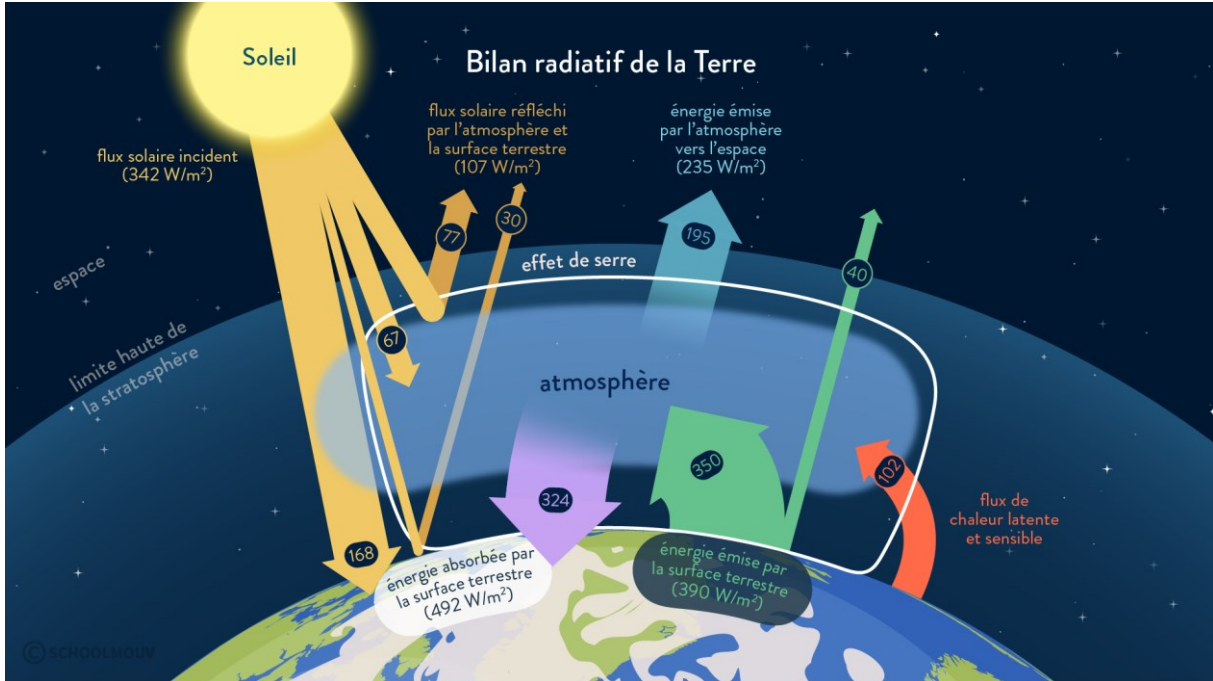


Figure 3 : Bilan radiatif de la Terre (Source : "SchoolMouv", n.d.).

Avant tout, on se doit de comprendre l'origine de la constante solaire qui représente la densité de flux solaire reçu en moyenne à la limite de l'atmosphère par unité de surface terrestre, de 342 W m^{-2} , communément appelé le rayonnement solaire incident (RS_{\downarrow}) (Figure 3). À l'aide de l'équation 1.3, il en ressort que la densité de flux solaire émis ($q_{émis}^S$) est de $6.315 \times 10^7 \text{ W m}^{-2}$, en sachant que la température de la surface du soleil est de 5777 K (Longdoz, 2020). Pour ce qui est du flux solaire émis ($\Phi_{émis}^S$), il se calcule en multipliant $q_{émis}^S$ par la surface solaire, ce qui donne $3.850 \times 10^{26} \text{ W}$. Comme le rayonnement solaire est radial, le flux solaire va se répandre dans l'espace en formant une « sphère d'énergie ». Afin de connaître la densité de flux solaire incident (q_0^S) atteignant l'orbite terrestre, il faut diviser $\Phi_{émis}^S$ par la surface de la sphère englobant l'orbite terrestre jusqu'au noyau terrestre. La résultante de cette équation est la constante solaire, égale à 1367 W m^{-2} . Finalement pour connaître le rayonnement incident ou la densité de flux reçue en moyenne par la Terre à la limite de son atmosphère par unité de surface, il faut diviser la constante solaire par un facteur de quatre, donnant 342 W m^{-2} . Ce facteur permet de tenir compte que la surface sphérique de la Terre est quatre fois plus grande que sa section. Il faut noter que ces valeurs sont des moyennes, elles vont dépendre de l'activité du soleil et de l'excentricité de l'orbite terrestre (assez faible, 2 %) qui est de forme elliptique. Donc, la constante solaire a des valeurs plus élevées dans la portion de son orbite où se trouve son périhélie (1410 W m^{-2}) et plus faibles où se trouve son aphélie (1320 W m^{-2}). Cette valeur moyenne annuelle de la densité de flux solaire à la surface du globe permet, en connaissant sa valeur et son origine, de mieux appréhender la compréhension du bilan radiatif du système terrestre. Le taux de rayonnement solaire incident absorbé (RS_{abs}) par le système terrestre dépend de l'albédo de sa surface (ρ_T^S) et de la réflectance (ρ_A^S) et de la transmission (τ_A^S) par l'atmosphère dans tout le spectre du visible. ρ dépend de la couleur du matériau à la surface réfléchissante, surface qui reçoit le rayonnement incident. Plus un

corps sera clair, plus son albédo sera élevé. Une surface avec un albédo élevé n'a qu'une faible fraction de rayonnement incident absorbé par ce corps, et conséquemment il y a peu d'énergie disponible pour la réémission de l'énergie dans une autre portion du spectre, dans des rayonnements thermiques de ce corps. Les équations suivantes permettent l'obtention du taux de rayonnement incident absorbé (RS_{\downarrow}), le rayonnement absorbé par la Terre émis par l'Atmosphère (RA_{\downarrow}) et le rayonnement émis par la Terre (RT_{\uparrow}):

$$RS_{abs} = \tau_A^s(1 - \rho_T^s) \times RS_{\downarrow} \quad (1.4)$$

$$RA_{\downarrow} = (1 - \rho_A^{IRL}) \times \varepsilon_A^{IRL} \sigma T_A^4 \quad (1.5)$$

$$RT_{\uparrow} = \varepsilon_T^{IRL} \sigma T_T^4 \quad (1.6)$$

où τ_A^s est le facteur de transmission de l'atmosphère terrestre. Une fois RS_{abs} , RA_{\downarrow} et RT_{\uparrow} connus, il est possible de déterminer le rayonnement net, noté Q^* , correspondant au total de rayonnements thermiques et solaires absorbés par la Terre :

$$Q^* = RS_{abs} + RA_{\downarrow} - RT_{\uparrow} \quad (1.7)$$

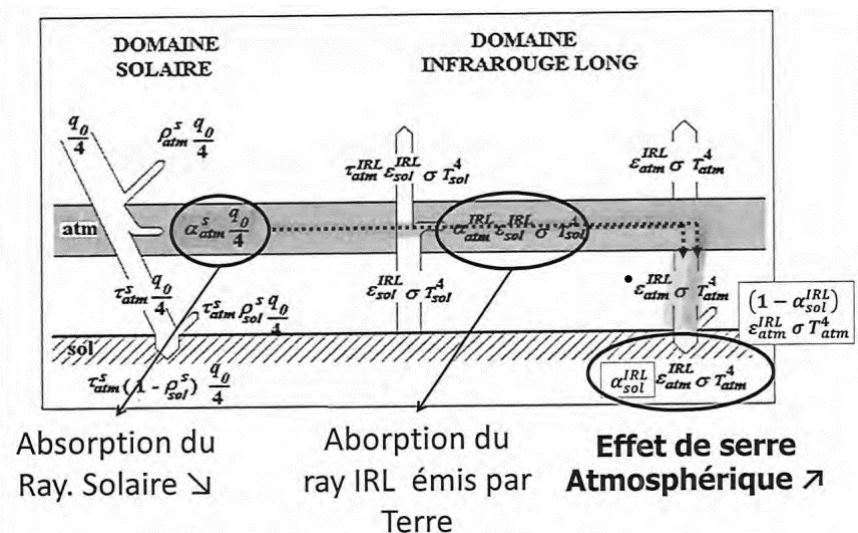


Figure 4 : Au sein du bilan radiatif terrestre, il faut prendre en compte la portion provenant du domaine solaire et la portion provenant du domaine infrarouge long. Ce qui est notable, c'est qu'une partie du rayonnement solaire est absorbé par l'atmosphère, ainsi qu'une partie du rayonnement émis par la Terre. Les conséquences de cette absorption par l'atmosphère est qu'une partie de cette énergie sera réémise vers la Terre. Celle-ci va jouer un rôle important dans l'effet de serre atmosphérique. (Source : Longdoz, 2020)

Le système climatique terrestre est le fruit des échanges entre le rayonnement solaire incident avec l'atmosphère et la surface terrestre. La vie, telle qu'on la connaît, a été possible grâce à cet équilibre qui est coordonné simultanément par l'effet parasol et l'effet de serre produit par la présence de l'atmosphère (**Figure 3** et **Figure 4**). Le premier décrit la réflexion du flux solaire incident par l'atmosphère et la surface terrestre. L'atmosphère est composée de nuages, de particules en suspension (poussières, aérosols), et d'un mélange gazeux dominé par l'azote (N_2 , 78 %) et l'oxygène (O_2 , 21 %). Globalement, 30 % du rayonnement solaire incident est réfléchi par le système Terre-Atmosphère et permet un refroidissement de la Terre. Pour ce qui est de l'effet de serre, celui-ci permet le contraire, réchauffer la planète. En piégeant le rayonnement thermique émit par les objets faisant partie du système terrestre, via certains composés formant l'atmosphère, tels que le dioxyde de carbone (CO_2), la vapeur d'eau (H_2O), le méthane (CH_4), l'ozone (O_3) et bien d'autres. Ceux-ci ont une contribution s'élevant respectivement de 36 à 72 % pour la vapeur d'eau et les nuages, de 9 à 26 % pour le CO_2 , de 4 à 9 %

pour le CH_4 et finalement de 3 à 7 % pour O_3 (Mikhaylov et al., 2020). Par la suite, cette énergie emmagasinée est retransmise d'une part vers l'espace et d'autre part vers la surface terrestre. L'amplification des activités humaines, depuis la révolution industrielle de 1769, par l'exploitation graduelle de ressources fossiles (charbons, pétroles et gaz) a provoqué une diminution drastique des zones de puits de carbone (l'effet de la déforestation), ce qui a contribué à l'accroissement de la concentration des différents composés dans l'atmosphère. Depuis 1896, avec les travaux de Svante Arrhenius sur les conséquences de l'augmentation de la concentration de CO_2 et de vapeur d'eau dans l'atmosphère (Arrhenius, 1896), le monde scientifique connaît bien leur l'impact possible sur le climat terrestre. L'effet de serre a été décrite pour la première fois par Joseph Fourier en 1824. Il a montré, que l'atmosphère fait barrage au rayonnement thermique et solaire et que cela induit l'augmentation de la température terrestre (Fourier, 1827). En somme, l'intensification de cet effet lié à l'humain a pour incidence l'instabilité de la balance énergétique de la Terre, appelé forçage (CNES, 2020), et influence donc son climat. Ce qui accroît sa température frénétiquement, jusqu'à rendre cette planète inhabitable, dans le pire des scénarios, si la tendance ne s'inverse pas.

1.2.3. Bilan thermique

Au sein d'un système, il y a plusieurs manières de faire transiter l'énergie sous forme de chaleur. Le transfert thermique peut provenir d'un échange aérodynamique de chaleur entre deux fluides ou entre un fluide et un solide dû à des gradients thermiques, ce qui se nomme la convection. Deux types de convection sont notables : la convection naturelle et la convection forcée. Ce premier type désigne la formation de cette échange aérodynamique de chaleur lors de la formation d'un courant d'air formé par une variation de densité de l'air provoquée par un gradient thermique. Le suivant fait référence à la formation d'un mouvement forcé des masses d'air par l'implication d'un travail mécanique externe. Il existe aussi la diffusion de l'agitation moléculaire au sein de la matière, naturellement d'un milieu plus chaud vers un milieu plus froid, cela suit un gradient thermique. Que cela soit dans un solide ou un fluide immobilisé, ce transfert se nomme la conduction et peut aussi se réaliser au contact de deux corps. Le rayonnement, thermique, est lui aussi une manière de faire transiter la chaleur. Lorsqu'on se base sur un équilibre, le transfert thermique s'opère selon deux grands flux : le flux de chaleur sensible et le flux de chaleur latente. La chaleur sensible fait référence à une quantité de chaleur absorbée ou émise par un milieu qui voit sa température fluctuer en conséquence, sans aucune répercussion sur son état de la matière. Ce qui est en opposition avec la chaleur latente, il n'est pas condition d'un changement de température du milieu, mais une variation d'enthalpie. Ce qui a comme conséquence son changement d'état physique, soit en absorbant de l'énergie (endothermique) ou soit en dégageant de l'énergie (exothermique). La condensation ou l'évaporation de l'eau au sein de l'atmosphère est l'un des processus réalisés par ce type d'échange. Il est important de noter que la chaleur de vaporisation, qui s'élève à environ $2.5 MJkg^{-1}$ d'eau évaporée, se voit comme un des facteurs ayant un impact déterminant sur le climat, dépendant de la quantité d'énergie qui est relâchée dans l'atmosphère, impactant les précipitations, la circulation des masses d'air, et l'effet de serre (Heisler et al., 2019). Le flux de chaleur latente utilise en grande partie le Q^* , ce qui laisse moins de disponibilité à la transformation de l'énergie en chaleur sensible.

Quand l'énergie ne transite pas sous ces différentes formes, elle est stockée aux niveaux du sol, de l'atmosphère, des océans, des roches, de la végétation et ainsi qu'au sein des corps anthropiques. C'est le flux de stockage de chaleur. Les propriétés physiques des matériaux de construction sont les

facteurs déterminants du stockage de chaleur dans la problématique des ICU. La conductivité thermique, notée λ ($Wm^{-1}K^{-1}$), est la propriété d'un matériau de conduire facilement ou non la chaleur en profondeur, par diffusion, donc de répartir l'énergie en profondeur. La capacité thermique, notée C (JK^{-1}) d'un corps, découvert par Joseph Black (1728-1799), est la quantité d'énergie que doit absorber un matériau pour augmenter sa température d'un Kelvin. Il a deux sous-produits de cette propriété, qui est une grandeur extensive, la capacité thermique molaire ($Jmol^{-1}K^{-1}$) et la capacité thermique spécifique, notée c ($Jkg^{-1}K^{-1}$). Ceux-ci donnent des valeurs de références. Pour résumer, si un matériau a une capacité thermique élevée, celui-ci sera capable d'emmagasiner davantage d'énergie (Gartland, 2012). En fonction de ces deux paramètres, un matériau ayant à la fois une grande conductivité thermique et une grande capacité thermique aura tendance à stocker une grande quantité d'énergie en profondeur, ce qui lui permettra d'atteindre des températures élevées et de se refroidir lentement. Cette caractéristique favorise la continuité et l'amplification des ICU pendant la nuit. En plus, une propriété permet de résumer le comportement du matériau en fonction de sa capacité à emmagasiner de l'énergie thermique et à sa manière de la restituer, elle se nomme l'inertie thermique. Elle dépendra de deux nouvelles propriétés qui sont la diffusivité thermique, qui s'exprime par $\alpha = \frac{\lambda}{\delta c}$ (m^2s^{-1}) et l'effusivité thermique, qui s'exprime par $E_f = \sqrt{\lambda \delta c}$ ($WK^{-1}m^{-2}s^{-1/2}$). Ce premier fait référence à la vitesse de transfert de la chaleur au sein de la matière et dépend de la masse volumique du matériau, notée δ (kgm^{-3}), de sa conductivité thermique et de sa capacité thermique spécifique. L'effusivité se définit comme la propriété d'un matériau à transposer de la chaleur, entre lui-même et son environnement. Il dépend des mêmes paramètres que le précédent facteur. L'inertie thermique joue un rôle important dans la régulation de la température intérieure en limitant les effets des variations rapides de la température extérieure. Elle le fait en créant un décalage temporel entre la température extérieure et celle de la surface intérieure des murs, ainsi qu'en amortissant l'amplitude de la variation. Avec un déphasage suffisant, la chaleur extérieure peut être retardée jusqu'à la fin de la journée, lorsque les conditions extérieures sont plus fraîches aidant au refroidissement dans l'habitat ("Inertie thermique," 2007). Le choix du matériau est relativement important pour faire face aux ICU et donner la garantie du confort aux citoyens en tout temps.

1.2.4. Bilan énergétique

1.2.4.1. Bilan énergétique standard

Conformément au bilan radiatif et thermique terrestre, le bilan énergétique standard d'une surface, tel qu'un sol vierge et plat se trouvant sur Terre, s'écrit de cette manière :

$$Q^* = Q_E + Q_H + Q_G(\pm \Delta Q_{Adv}) \quad (1.6)$$

où Q^* est le rayonnement net, Q_E est le flux de chaleur latente, Q_H est le flux de chaleur sensible et Q_G est le flux de chaleur de stockage dans le sol. Un point important à relever au sujet du Q_E , est que la plus grande part du flux provient du phénomène d'évapotranspiration. Ce qui englobe l'évaporation des masses d'eau de surface ou du sol, ainsi que la transpiration des plantes. Lorsqu'il est sujet d'étude du bilan énergétique d'une ville, d'un massif forestier, d'un champ solaire, etc. il est important de prendre en compte, en plus du bilan de surface au

niveau de la canopée des arbres ou de la toiture des bâtiments, qu'il subsiste un volume sous-jacent à cette surface. Celui-ci peut être interprété comme une boîte fictive (Oke, 1987). Le bilan de ce genre d'étude est plus complexe. Il est nécessaire d'intégrer les stockages de chaleur (ΔQ_S) liés aux corps présents dans ce volume (Grimmond et al., 1995), ainsi que le flux de chaleur résultant du processus d'advection (ΔQ_{Adv}). Ce dernier fait référence au déplacement d'une quantité de chaleur dû au mouvement d'un fluide, comme l'air en mouvement causé par une différence de pression. En raison de la difficulté de mesurer l'advection, il est généralement supposé que cette dernière est faible par rapport à Q^* , d'où la mise de celle-ci au sein de parenthèses (Heisler et al., 2019). La variance de température à travers le globe trouve sa source au niveau des différences provenant des bilans énergétiques, qui sont dépendants de leur zone d'action.

1.2.4.2. Bilan énergétique urbain

Dans une zone urbaine ou périurbaine, la température ne coïncide pas avec celle d'une zone rurale. Cette disparité résulte d'un bilan énergétique différent. La variance provient principalement de la diminution du couvert végétal due à un remplacement par un couvert minéral, ayant des propriétés thermiques relativement divergentes par rapport aux corps retrouvés dans les zones rurales. Le flux de chaleur de stockage (ΔQ_S) se voit modifier en fonction des matériaux utilisés créant cette modification importante avec les zones environnantes. Ce flux reprend aussi la chaleur stockée dans le sol (Q_G). Il existe également une autre source de disparité entre ces zones, ce sont les activités humaines, appelées le flux de chaleur anthropique (Q_f), qui se voit agir comme une source d'énergie rentrante dans le système (Sailor, 2011). Avec ces nouvelles informations, le bilan énergétique d'une zone urbaine s'écrit de cette manière :

$$Q^* + Q_f = Q_E + Q_H \pm \Delta Q_S (\pm \Delta Q_A) \quad (1.7)$$

Le Q_f fait référence aux différentes activités humaines qui produisent de l'énergie sous forme de chaleur. Pour en citer quelques exemples, les sources de chaleur anthropique peuvent être dues à la combustion d'énergie fossile dans la production d'énergie électrique, dans le chauffage et pour la motricité de véhicules en tout genre, aux systèmes de climatisation, à l'éclairage, aux types de bâtiments (commerciaux, industriels et résidentiels) et à bien d'autres (Oke, 1987; Oke et al., 2017). Sailor (2011) amène plus de nuance au terme de Q_f en introduisant les émissions de chaleur et d'humidité provenant de la consommation d'énergie dans les villes. La libération de chaleur anthropique sensible dans l'atmosphère urbaine est principalement issue des systèmes d'évacuation de chaleur tels que les cheminées, les tuyaux d'échappement, la climatisation, le chauffage, etc. Elle peut également provenir de manière indirecte en se propageant à travers l'enveloppe du bâtiment par conduction et en étant transmise à l'environnement urbain par convection et rayonnement. Ces émissions peuvent entraîner un décalage dans le temps de la consommation d'énergie et peuvent aussi varier considérablement en quantité. Au niveau des émissions anthropiques d'humidité, elles sont de deux types. Le premier fait référence à la chaleur extraite par évaporation à l'aide d'un système de refroidissement au sein d'un bâtiment, cette évacuation de chaleur peut s'appeler le chauffage latent anthropique. Elle correspond à une source d'humidité au sein de l'environnement urbain. La deuxième forme se déroule lors d'une combustion d'hydrocarbure (diesel, essence, etc.) dans un moteur, un four ou une turbine à combustion. Durant cette réaction chimique, il y a transformation de réactifs en vapeur d'eau

(H_2O), ce qui a un impact direct sur l'humidité urbaine. Elle correspond à une émission anthropique due à une réaction chimique, contrairement aux émissions de chaleur latente provoquées par un changement de phase. Pour permettre une meilleure estimation du flux de chaleur d'origine anthropique, il est préférable de se pencher sur les secteurs consommant de l'énergie et donc les émetteurs. Les secteurs sont ceux des transports, des bâtiments et de l'industrie. Une quatrième source est aussi présente, le métabolisme humain, mais souvent inférieur à 1 % du Q_f . Donc, elle se voit souvent au sein des estimations externes ignorées. Afin d'avoir des estimations suffisamment précises et complètes de ce flux (**Figure 5**), il est plus judicieux de joindre à la suite d'une approche d'inventaires, une approche de modélisation énergétique des bâtiments (MEB) et des systèmes de transport (TSM). Qui, par la suite, sont sujet d'être validé, grâce à la prise de mesure micrométéorologique locale (Sailor, 2011).

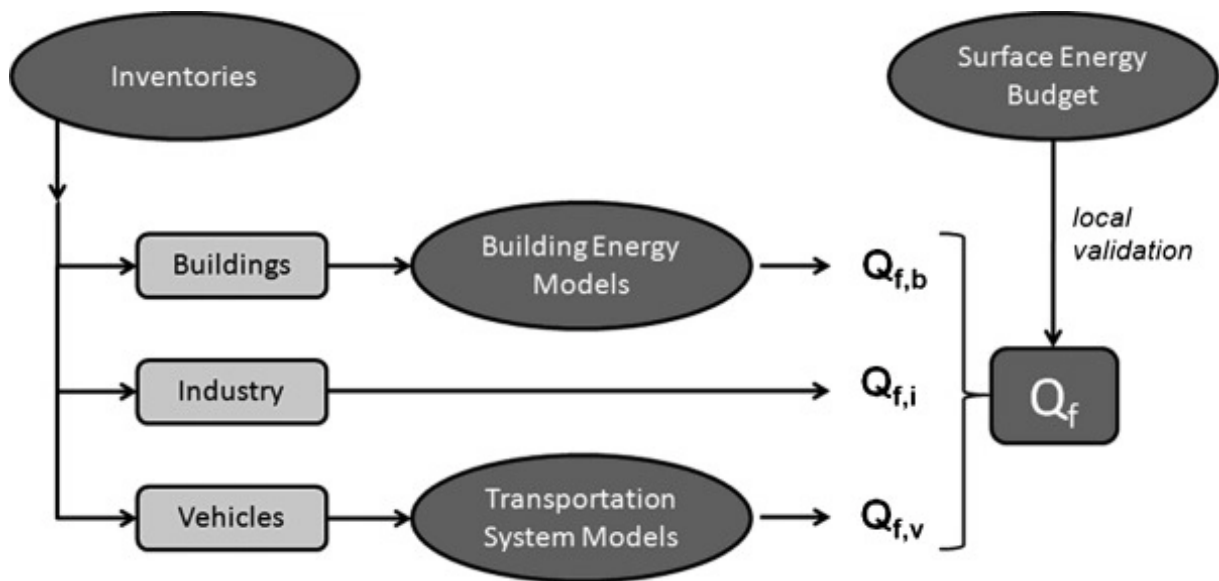


Figure 5 : Méthodologie permettant l'estimation du flux de chaleur anthropique (Source : Sailor, 2011).

Dans certaines villes, la quantité de chaleur produite par la combustion a été évaluée en recensant la consommation d'électricité, de gaz, de pétrole et de ses dérivés, ainsi que d'autres facteurs tels que le nombre de véhicules, la distance parcourue et l'efficacité énergétique. Il est important de noter que le Q_f peut aller de 0 à 300 % du Q^* , principalement selon le degré d'industrialisation de la ville. De plus, l'implémentation de systèmes de climatisation à pour premier but de palier ;a la chaleur dans les édifices, ce qui a le malencontreux effet d'amplifier le réchauffement urbain en augmentant la partie du Q_f (Sailor, 2011). Molnár et al. (2020) se sont intéressés à l'impact qu'a ce flux de chaleur anthropique sur une ville de moyenne taille d'Europe, Szeged, Hongrie. Il en ressort des émissions de chaleur maximum estimées entre 0.6 et 31.2 Wm^{-2} , pouvant être doublées durant la période hivernale. L'incidence sur la température de l'air de la surface simulée peut aller jusqu'à $+1.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour donner plus de précision au niveau de l'échelle temporelle, Fan et al. (2005) ont réalisé une étude d'impact dans la ville de Philadelphia, USA. Leurs conclusions sont que le flux varie de 20 Wm^{-2} la nuit à 50 Wm^{-2} la journée durant l'été. Il faut comparer cela au 700 Wm^{-2} moyen de rayonnement solaire diurne. Il est aisé de se rendre compte que la charge de chaleur durant la journée est négligeable sur l'incidence de la variation de la température durant la journée, mais cause un accroissement de celle-ci de $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ la nuit. Durant la phase hivernale, le flux varie de 35 Wm^{-2} à 85 Wm^{-2} au cours

de la journée, qui est comparé à la moyenne de rayonnement solaire maximum diurne qui est de 460 Wm^{-2} , ce qui est plus élevé qu'en phase estivale, avec un rayonnement solaire maximum nettement plus faible. Il y a augmentation de la température dans les simulations de 0.5 à $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ durant la journée et de 2 à $3 \text{ }^\circ\text{C}$ au cours de la nuit. En somme, le Q_f est généralement plus important au sein des villes industrialisées, de haute altitude et en période hivernale (Heisler et al., 2019).

1.2.5. Paramètres météorologiques

Le monde urbain, en dégradant les espaces naturels, altère le comportement du climat à cette échelle en modifiant ses variables atmosphériques et météorologiques, ce qui a comme incidence l'apparition des ICU. L'intensité des ICU dépend de différents facteurs météorologiques, comme : la vitesse du vent, l'humidité, le niveau de nébulosité, etc.

La vitesse du vent a un effet inverse sur l'intensité des ICU. Plus la vitesse est élevée, plus cela atténue les ICU. En complément, plus le vent est faible, plus l'intensité des ICU sera considérable (Q. Huang et al., 2020). Une étude sur l'impact des différentes conditions de vent (Al-Obaidi et al., 2021), au sein de plusieurs villes d'Australie, renseigne que si la vitesse du vent est inférieure à 2 ms^{-1} , les valeurs d'intensité d'ICU enregistrées sont les plus élevées. Alors que si la vitesse du vent dépasse les 6 ms^{-1} , l'effet des ICU est drastiquement diminué. Par ailleurs, les résultats de cette étude indiquent qu'il existe une valeur seuil de la vitesse du vent au-delà de laquelle la force de l'ICU diminue de manière significative, cette valeur étant d'environ 4 à 5 ms^{-1} . Mais attention, la direction du vent est un facteur crucial, car si les vents sont issus d'environnements secs (par ex. provenant du désert), ils amplifient l'ICU. Tandis que, si les vents proviennent de l'océan, ils ont un effet rafraîchissant sur les zones urbaines, réduisant ainsi l'ICU ou favorisant la formation d'un îlot de fraîcheur urbain.

L'humidité est un facteur important à prendre en compte, car de manière générale, il a les mêmes effets que la vitesse du vent (Q. Huang et al., 2020). Plus sa valeur est grande, plus l'atténuation des ICU est importante et inversement. Donc, des zones climatiques particulièrement humides sont moins sujettes à être impactées fortement par les ICU. Mais, au contraire, ce facteur peut aussi avoir des impacts négatifs sur l'atténuation des ICU et la santé humaine (Zhang et al., 2023). Les valeurs élevées d'humidité ne favorisent pas les transferts d'énergie latente des couverts végétalisés, elles empêchent l'évapotranspiration de s'effectuer normalement afin d'avoir un effet de refroidissement et elles diminuent la capacité du corps humain à réguler normalement sa température corporelle par transpiration suivie de son évaporation. De plus, la valeur de l'humidité peut être augmentée par le trafic routier, en émettant de la vapeur d'eau, qui est l'un des produits de la combustion des hydrocarbures. Dans certaines régions du monde où l'humidité est importante, certaines solutions de mitigation pour réduire l'intensité des ICU, qui visent à augmenter la capacité d'évapotranspiration, voient leur efficacité diminuée drastiquement.

Le niveau de nébulosité, ou la fraction de ciel couvert par des nuages, influence l'intensité des ICU en faisant varier la quantité d'énergie solaire transmise à travers l'atmosphère (Q. Huang et al., 2020). Lors de présence importante de nuages, l'ensoleillement direct diminue et réduit l'intensité des ICU diurnes. La nébulosité empêche le refroidissement durant la nuit, car le rayonnement thermique terrestre est soit absorbé par l'atmosphère, soit réémise en direction du sol. C'est l'inverse si le ciel est clair, l'ensoleillement direct est plus important et augmente l'intensité des ICU diurnes. Mais, il favorise le refroidissement en période nocturne, par émission du rayonnement thermique terrestre directement vers l'espace.

1.2.6. Topographie

Les zones urbaines distribuées autour du globe représentent 1.5 % de la surface des zones émergées. Il y a une grande diversité de zones géographiques et climatiques qui ont diverses influences sur le comportement du microclimat urbain, en raison de la topographie, des masses d'eau, etc. Du fait de la multitude de cas possibles en raison des différentes combinaisons uniques de climat, de géographie et de structure interne, il est impossible de résumer au mieux chaque occurrence. Dans la littérature scientifique, les situations les plus étudiées sont les villes intérieures, les villes côtières, les villes en zone montagneuse et les zones polaires en saison hivernale (**Figure 6**).

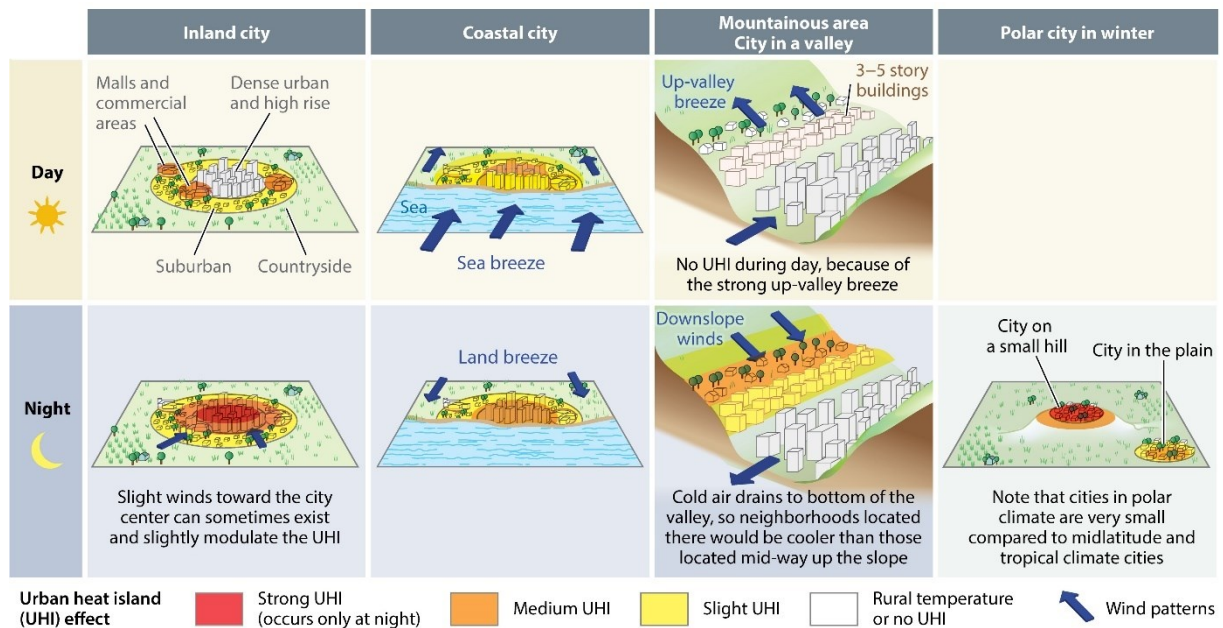


Figure 6 : L'îlot de chaleur urbain (ICU) dans plusieurs situations géographiques (Masson et al., 2020).

Pendant la journée, la périphérie des villes de l'intérieur, en particulier les zones industrielles et commerciales, est généralement plus chaude que les zones rurales. Les villes côtières sont généralement plus fraîches que les villes de l'intérieur, mais peuvent être plus chaudes que les zones environnantes en raison des bâtiments bloquant la brise marine. Les centres urbains sont plus chauds la nuit où les ICU sont forts que dans les zones rurales, à l'exclusion des vallées où les courants orographiques peuvent être l'exception (Masson et al., 2020). La présence de collines peut également moduler l'intensité des ICU la nuit, surtout par temps ensoleillé et froid (Masson et al., 2020). Les villes polaires, peu étudiées jusqu'à récemment, connaissent des ICU plus sévères en hiver, avec des températures moyennes supérieures de 1 – 2 °C, et de 5 – 12 °C dans certaines villes. Contrairement aux villes des latitudes moyennes, où le rayonnement solaire joue un rôle important dans les ICU, la principale source de chaleur dans les villes polaires est le chauffage domestique (Masson et al., 2020). Par exemple, la ville russe d'Apatiti connaît un fort ICU en hiver, avec des différences de température allant jusqu'à 10 °C par rapport à la toundra environnante (Varentsov et al., 2018). Cela vient principalement, du fait que la ville se situe sur une petite colline et de la durée des nuits d'hiver, car la température de l'air à la surface est plus froide que la température de l'air se trouvant une hauteur de quelques dizaines de mètres (Konstantinov et al., 2018). Des effets topographiques similaires ont également été observés dans la ville de Lahti, en Finlande (Suomi, 2018). Ces valeurs hivernales d'ICU correspondent aux valeurs estivales pour les régions métropolitaines des latitudes moyennes.

1.2.7. Géométrie urbaine

1.2.7.1. Canyon urbain

L'aménagement de la ville permet de modéliser la circulation de l'air et de repérer le phénomène de canyon urbain dans le but de le minimiser. Il se caractérise d'abord par une rétention des rayonnements qui entraîne une hausse de la charge radiative due aux inter-réflexions mutuelles, laquelle dépend de la morphologie géométrique des canyons urbains (Bourbia et al., 2004; Vallati et al., 2017). Ce qui a pour conséquence, le jour, d'augmenter la température de l'air, la nuit, de nuire à la réémission de l'énergie accumulée au sein des matériaux vers l'espace, ce qui a pour effet d'augmenter drastiquement l'intensité des ICU nocturnes. De plus, ce phénomène se définit aussi par un emprisonnement de l'air dû à une mauvaise circulation, qui résulte d'une modification du profil de vitesse du vent (**Figure 7**). Cette situation peut causer des fluctuations de température allant jusqu'à une diminution de 1 à 3.8 °C si la vitesse du vent augmente de 1.2 à 2.2 ms^{-1} (Grajeda-Rosado et al., 2022). L'orientation des canyons a une incidence majeure sur la température, pouvant causer un écart positif allant jusqu'à 6.5 °C entre une orientation Est-Ouest et une orientation Nord-Sud (Grajeda-Rosado et al., 2022). La présence de véhicules peut renforcer cet effet, entraînant une augmentation de la température ambiante pouvant atteindre 26 % (Grajeda-Rosado et al., 2022).

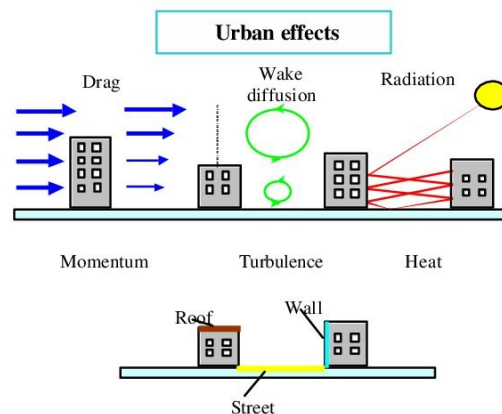


Figure 7 : L'effet du Canyon urbain sur le profil de vent, la circulation de l'air et la réflexion radiative.

1.2.7.2. Facteur de vue du ciel (FVC)

Ce facteur géométrique urbain donne accès à une représentation numérique de la configuration et de la densité du bâti au sein d'une zone urbaine (Han et al., 2023). Il se définit comme une valeur représentant la mesure de la proportion de ciel visible (sans obstruction causée par un bâtiment, un arbre, un corps naturel, etc.) en un point d'observation (**Figure 8**), ayant comme champ d'action un hémisphère (Chorley, 1998; Oke, 1988). La majorité du temps, lorsque le facteur de vue du ciel augmente, l'intensité de l'ICU fait de même. Comme il y a moins d'obstacles pour le rayonnement solaire, les surfaces absorbent plus d'énergie et donc en réémettent davantage, ce qui accroît le phénomène et influence le microclimat urbain (Correa et al., 2012). Au contraire, si le facteur a une valeur faible, l'intensité est diminuée en journée. Mais il provoque durant la nuit une diminution de la vitesse de refroidissement, qui est impactée par les obstacles que le rayonnement thermique affronte au cours de son cheminement vers l'espace, ce qui augmente l'intensité des ICU nocturnes. Giridharan et al. (2007) a montré que l'intensité des ICU augmente avec des valeurs de 0 à 0.3 durant un jour d'été sans nébulosité. Mais à partir de 0.3, voire plus, l'augmentation devient marginale. À la fin de l'été, ils énoncent qu'à partir de 0.4 et plus, l'intensité se voit atténuée. Cela vient de la présence plus

fréquente de vent ayant une vitesse plus importante, ce qui favorise les échanges thermiques entre la surface et l'air, ainsi que son brassage. Des études réalisant des simulations avec différentes valeurs de FVC, allant de 0.3 à 0.85, une à Montréal (Wang et al., 2014), Canada et une autre à Toronto (Wang et al., 2016), Canada, montrent que la variation de ce facteur peut provoquer des différences de 1.5 °C pour la température de l'air urbain. C'est un facteur intéressant à prendre en compte dans les nouveaux projets de construction, car il permet comme vu précédemment, d'avoir un impact positif sur la réduction de l'intensité du phénomène d'ICU.

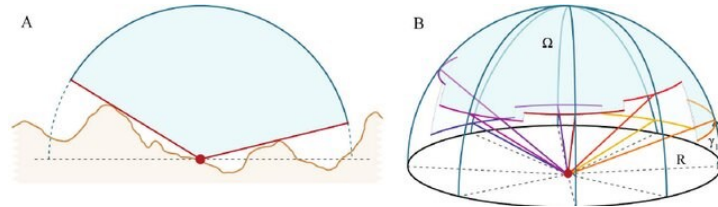


Figure 8 : (A) Le facteur de vue du ciel est déterminé en évaluant la proportion du ciel visible (Ω) au-dessus d'un point d'observation donné, tel qu'il apparaît dans une représentation bidimensionnelle. (B) L'algorithme effectue le calcul de l'angle d'horizon γ dans n directions (ici, huit directions sont présentées), en se basant sur un rayon spécifique R . Source : (Kokalj et al., 2010)

1.2.7.3. Rapport hauteur/largeur (H/L)

Le rapport hauteur/largeur fait référence à la hauteur du bâti délimitant la chaussée, la voirie qui elle-même est d'une certaine largeur (**Figure 9**). C'est un facteur important pour catégoriser les canyons urbains et donc la structure des différentes rues d'une ville (Han et al., 2023). Il existe principalement deux types de canyons urbains. Le premier se traduit comme peu profond, représenté par une valeur de facteur inférieur à 0.5 et le deuxième est désigné comme profond, prenant une valeur supérieure à 2 (Bakarman et al., 2015). Le rapport a une certaine influence sur l'effet d'ICU. De plus, s'il est associé à l'orientation du canyon urbain, cela permet de calculer la quantité de rayonnement solaire direct et diffus qui rentre au sein du système (Bakarman et al., 2015). Une étude à Ghardaia (Ali Toudert et al., 2006), Algérie, a constaté qu'une rue se trouvant au sein d'un canyon peu profond est irradiée significativement plus qu'une rue située dans un canyon de type profond. Il est de l'ordre de 3 heures d'ensoleillement en moins, cela varie en fonction de l'écart de rapport entre les sites de comparaison. Une autre étude en Algérie, à Constantine (Bourbia et al., 2010), a étudié l'impact de différentes valeurs du rapport H/L par rapport à la température du sol et de l'air ambiant, allant de 1 à 6.7 °C. Les résultats montrent que la température de l'air ambiant peut atteindre des écarts de 3 à 6 °C en comparaison avec les milieux environnants. Donc, de manière générale, la température augmente lorsque la valeur du facteur diminue, mais il y a une meilleure circulation de l'air et un refroidissement plus efficace durant la nuit. Une remarque à prendre en compte, c'est que l'écart de température est plus grand au sein des villes se trouvant dans ces zones climatiques dites humides que dans des zones sèches, arides (Bourbia et al., 2010; Shashua-Bar et al., 2004). Il est donc nécessaire de prendre en compte ce paramètre dans les stratégies futures d'urbanisme, en trouvant un compromis pour ne pas avoir une exposition trop importante durant la journée, une circulation de l'air optimale et un effet de refroidissement suffisant durant la nuit, afin d'éviter une intensification des ICU lors de ces périodes.

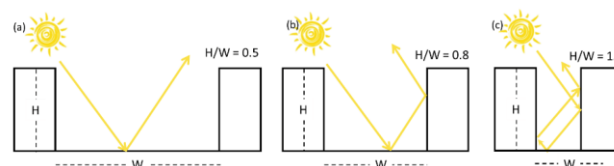


Figure 9: représentation de trois valeurs de rapport hauteur/largeur (H/L) : (a) le H/L équivaut à 0.5, ce qui représente un canyon urbain peu profond; (b) le H/L a une valeur de 0.8, ce qui représente un canyon urbain qui se densifie, tout en voyant l'impact que cela a sur le parcours du rayonnement solaire; (c) le H/L équivaut à 1.5, ce qui représente un canyon urbain profond et dense, impactant largement le comportement du rayonnement solaire au sein de celui-ci. (Source : Mutani et al., 2020)

1.2.8. Propriétés physiques du bâtiment

1.2.8.1. *Albédo*

Comme écrit précédemment, l'albédo fait référence à la fraction du rayonnement électromagnétique reçue qui est réfléchi par la surface du corps. Cette valeur est généralement calculée sur l'ensemble du spectre des ondes courtes ($0.3 - 4 \mu m$) ou bien uniquement sur la partie du visible ($0.4 - 0.7 \mu m$). C'est l'une des propriétés les plus importantes à étudier lors de phénomène d'ICU, ayant un impact sur la quantité d'énergie qui est absorbée et donc logiquement sur la température. En remplaçant les surfaces naturelles par des surfaces artificielles telles que de l'asphalte, du béton, de la brique et bien d'autres, cela permet de modifier sur la valeur de l'albédo en réduisant celui-ci, augmentant par la même occasion la température de surface des corps et contribuant ainsi à l'apparition des ICU et à leur intensification (Tahooni et al., 2023). La valeur de l'albédo dépend de deux caractéristiques du matériau, sa teinte et sa rugosité. En règle générale, une surface claire et lisse a tendance à réfléchir davantage de rayonnement, ce qui se traduit par un albédo plus élevé. Par exemple, l'albédo moyen d'une ville est de 0.15, tandis qu'un champ agricole ou un océan présente un albédo d'environ 0.25 (Oke, 1987). Plusieurs articles montrent que l'albédo est corrélé négativement avec la température de surface et est donc un très bon moyen de mitigation (Chown et al., 2015; Elnabawi et al., 2022; Roman et al., 2016; Santamouris, 2014; Tahooni et al., 2023; Yang et al., 2015). Il est cependant important d'étudier la morphologie urbaine dans les zones où il y a des projets d'augmentation d'albédo, pour éviter le phénomène inter-réflexion mutuelle. Qui est l'une des conséquences de la formation des canyons urbains, en occasionnant l'absorption de l'énergie réfléchi par une autre surface. Ce qui intensifie le phénomène d'ICU, lors de la réémission de cette énergie absorbée par les bâtiments environnants. De plus, des valeurs d'albédo trop importante, comme des surfaces blanches peuvent avoir des effets indésirables comme l'éblouissement de la population ou des pilotes d'aéronefs.

1.2.8.2. *Inertie thermique*

L'inertie thermique est étroitement liée à la capacité d'un composant ou d'un matériau à résister aux variations de flux ou de température. Elle se manifeste par la capacité de stocker la chaleur (ou le froid) et de la libérer ultérieurement vers l'extérieur. Elle est exprimée en termes de flux de chaleur ($Wm^{-2}K^{-1}$) échangé entre les parois du bâtiment et l'ambiance intérieure par mètre carré de surface. L'inertie thermique est également définie par la vitesse à laquelle un bâtiment se refroidit ou se réchauffe. Ainsi, un matériau inerte est caractérisé par le temps qu'il met pour atteindre une nouvelle température d'équilibre lorsqu'il est soumis à une perturbation thermique (Fahed, 2018). Pour qu'une paroi présente une bonne inertie thermique, il est essentiel qu'elle possède une chaleur spécifique élevée, une conductivité élevée et une grande surface d'échange. L'inertie thermique d'un bâtiment contribue au confort en atténuant les variations de température, en évitant les surchauffes estivales et les baisses brutales de température hivernales (Fahed, 2018). De plus, elle permet de limiter les pertes de chaleur, réduisant ainsi la consommation de chauffage dans les bâtiments à occupation continue (Sidler, 2003). Cependant, l'inertie thermique seule n'est pas suffisante ; elle doit être associée à un système de refroidissement nocturne en été pour éliminer la chaleur accumulée pendant la journée. Les matériaux urbains dotés d'une forte inertie thermique absorbent la chaleur et la restituent la nuit, empêchant ainsi le rafraîchissement de la ville (Sidler, 2003).

1.2.9. Couvert naturel

Le couvert naturel fait référence aux différentes sources végétalisées et les sources d'eau qui sont retrouvables au sein des zones urbaines. Ces sources végétalisées (les arbres, l'herbe, les toitures vertes, les murs verts et, etc.) favorisent une atténuation du phénomène d'ICU, en affectant l'humidité

de l'air, la température et la distribution du rayonnement incident. Une diminution du pourcentage de couverture végétalisée amène à une intensification du phénomène. L'atténuation s'opère, en absorbant en moyenne 50 % du rayonnement solaire, qui sert comme source d'énergie afin de réaliser la photosynthèse (**Figure 10**). En captant du CO_2 , une plante photosynthétique réduit la pollution au sein des villes en agissant comme un puits de carbone, en plus de produire de l'oxygène à l'aide de réactions physico-chimiques. Ces échanges améliorent la qualité de l'air des zones urbaines en agissant comme un filtre. En supplément, l'ombrage occasionné par le couvert végétal permet d'atténuer les ICU, en ne laissant passer en moyenne 20 % du rayonnement solaire, et en réfléchissant 30 % de celui-ci. Cet ombrage dépend de plusieurs paramètres, tels que le volume de végétation, sa densité foliaire et la hauteur de canopée (Fahed, 2018). La capacité d'évapotranspiration du couvert végétal permet aussi la diminution des impacts négatifs causés par les ICU en transformant l'eau puisée dans les sols en vapeur d'eau. L'échange de chaleur entre l'atmosphère et le couvert végétal (chaleur latente), occasionné par des gradients de potentiel hydrique à l'aide des stomates, permet l'évaporation de l'eau (Mirzaei et al., 2010). Ce changement de phase, étant un phénomène endothermique, a donc besoin d'énergie extérieure qui provient de l'atmosphère, ce qui procure l'effet de refroidissement du milieu environnant des végétaux, donc la diminution de la température ambiante. Il est toutefois important de noter qu'en relâchant de la vapeur d'eau, l'humidité du milieu va augmenter. Ce pouvoir montre l'effet qu'ont les végétaux sur le microclimat urbain. À titre d'exemple, sous des conditions d'irrigation optimales, un arbre peut être considéré comme un climatiseur évaporatif naturel pouvant évaporer $0.378 m^3$ d'eau par jour (Akbari, 2009; Fahed, 2018). Ce qui est l'équivalent en demande énergétique pour un tel type de climatiseur de $26.7 kWh/jour$ (Bouyer, 2009). Par ailleurs, la présence de sources d'eau est aussi un moyen d'atténuer l'intensité des ICU. Il est possible de retrouver au sein de cette catégorie, des surfaces d'eau, telles que des bassins, des fontaines ou des jets d'eau. De plus, la mise en place de surfaces minérales poreuses avec circulation ou de rétention d'eau peut également contribuer à diminuer l'ICU. Cette méthode exploite le processus d'évaporation, quelques gouttes d'eau s'évaporant dans un courant d'air augmentent son humidité, ce qui favorise le rafraîchissement de la zone concernée. En utilisant ce rafraîchissement évaporatif, il est possible de mettre en place un dispositif efficace pour combattre l'effet de chaleur dans les zones urbaines (Fahed, 2018).

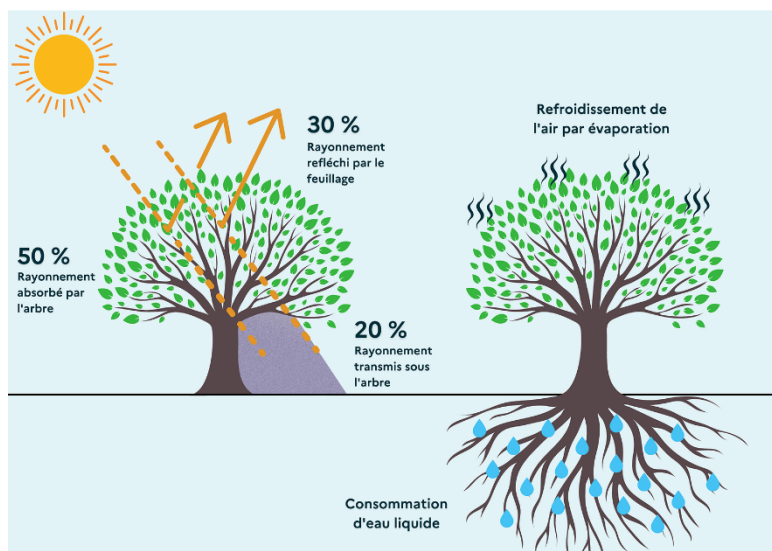


Figure 10 : Le couvert végétal a une incidence sur le bilan de réflexion, d'adsorption et de transmission du rayonnement solaire permettant des conditions d'atténuation efficace. De plus, elles ont le pouvoir d'évapotranspiration, permettant un échange de chaleur entre l'atmosphère et la plante à l'aide des stomates. Ce qui a comme effet de refroidir le milieu environnant des végétaux. (Source : "Le pouvoir des arbres," 2022)

1.3. Les couches limites urbaines

Il est nécessaire de considérer la structure de la couche limite de la Terre au sein des zones urbaines (UBL : *Urban Boundary Layer*) afin de mieux visualiser et de comprendre le comportement du climat urbain. Cette structure provient d'une modification de la couche limite planétaire (PBL: *Planetary Boundary Layer*) par le paysage urbain, façonné par la position des bâtiments, leur hauteur, leur empreinte et l'activité humaine (**Figure 11**). Cette PBL, aussi appelée la couche limite atmosphérique (ABL: *Atmospheric Boundary Layer*) représente la partie inférieure de l'atmosphère qui est directement conditionnée par son contact immédiat avec la surface de la Terre. Elle a comme ordre de grandeur, une profondeur qui fluctue entre 100 m et 3000 m, qui se voit être influencé par la rugosité de la surface, la température, l'humidité et les flux de polluants (Heisler et al., 2019). Durant la journée, le rayonnement solaire réchauffe la surface, ce qui permet l'augmentation de la flottabilité de l'air, dû à une hausse de la température de l'air ambiant par les échanges sensibles entre elle-même et la surface. Le mélange entre l'air moins dense et plus dense crée un mélange de flux turbulent qui dilate cette PBL à sa valeur maximale. Au contraire, la nuit, le refroidissement à la surface par l'émission d'onde thermique occasionne une densification de l'air, car celle-ci se refroidit et donc redescend, ce qui résulte en un flux d'air laminaire lent, rétrécissant la profondeur de la PBL à une valeur aussi faible que 100 m (Oke et al., 2017).

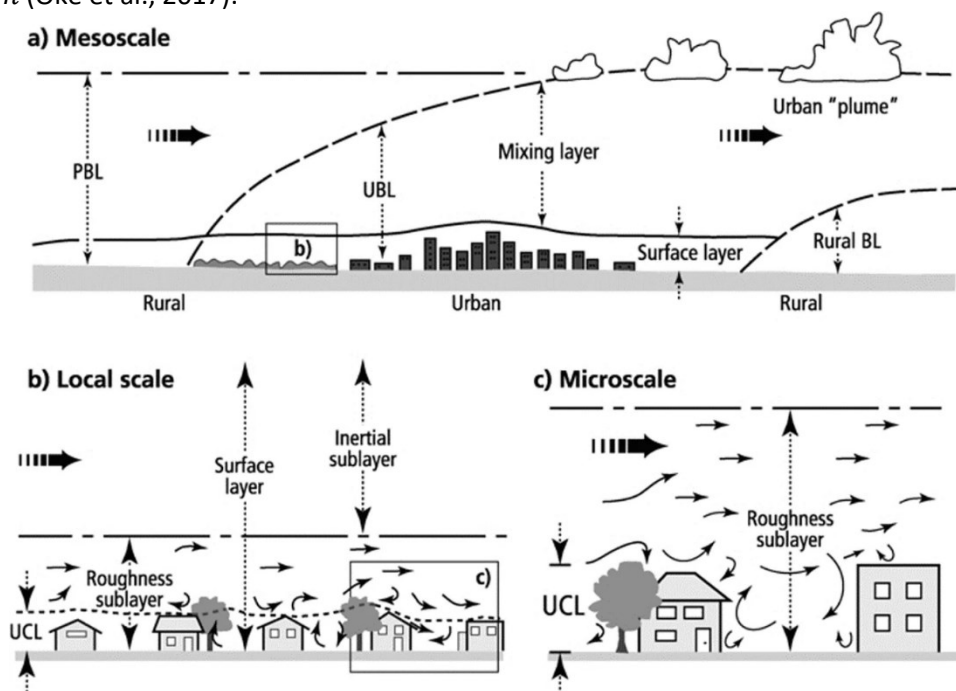


Figure 11 : Représentation conceptuelle d'une ville en fonction des différentes échelles, qui représentent chacune d'entre elles les diverses couches limites que l'on retrouve au sein d'une ville. Il est condition de l'état de la couche limite des zones urbaines (UBL) au sein de la couche limite planétaire (PBL), ainsi que ses sous-couches d'un point de vue (a) mésoéchelle, (b) local et (c) microéchelle. (Source : Piringer et al., 2002)

L'UBL se voit fractionné en sous-couche en fonction de caractéristiques structurelles et dynamiques (Heisler et al., 2019). L'une d'entre elles se nomme la sous-couche limite de canopée urbaine (UCL), faisant référence à l'espace entre la cime des arbres et le sol, dans un contexte forestier, car c'est l'espace où a lieu la majeure partie des échanges d'énergie de rayonnement et de transfert turbulent de vapeur d'eau et de chaleur. Sauf que dans le milieu urbain, la surface active est plus variable que dans une forêt à couvert fermé. Par conséquent cette couche est représentée par l'ensemble de l'espace sous la cime des arbres ou des bâtiments. La sous-couche suivante est appelée la sous-couche limite de rugosité (RSL : *Roughness Surface Layer*). De plus, l'influence des bâtiments et des arbres est dominante dans le comportement du flux de vent et des échanges d'énergies. Il est

possible dans cet espace que représente la RSL, de quantifier l'impact que chaque bâtiments ou arbres a sur le profil de vent et les échanges énergétiques dus à leur rugosité propre. Cette sous-couche s'arrête où la sous-couche inertielle (ISL : *Inertial Surface Layer*) commence. Au sein de celle-ci, l'influence qu'a chaque objet du paysage urbain en fonction de sa rugosité se mélange. Bien qu'il y ait toujours du frottement avec ces différents objets pouvant modifier le profil de vent et la structure turbulente de l'atmosphère, leur influence individuelle n'est plus visible (**Figure 12**). C'est dans ces deux couches, que le profil et la turbulence du vent, la température et l'humidité se voient varier de manière conséquente. Ces variations deviennent quasiment immuables avec la hauteur au-delà de la couche limite de la surface (Heisler et al., 2019). Les propriétés de flottabilité et de mélange dans la PBL ont un impact important sur le profil vertical de la température de l'air et l'amplitude horaire des ICU. On décrit la flottabilité et le mélange en termes de stabilité atmosphérique. Le mélange est fort pendant les journées avec un ciel clair et des vents régionaux faibles, ce qui entraîne une instabilité du PBL. En revanche, pendant les nuits claires, le refroidissement radiatif abaisse la température de la surface, provoquant un écoulement laminaire lent juste au-dessus de la surface et rendant l'atmosphère stable. Lorsque le ciel est couvert ou que les vents régionaux sont forts, ou encore lorsque les deux conditions sont présentes, la température varie peu avec l'altitude, ce que l'on appelle une stabilité neutre. Dans le cas de vents forts, le mélange d'air dans la couche de surface est principalement mécanique, causé par la turbulence générée par les arbres et les bâtiments, plutôt que thermique (Heisler et al., 2019).

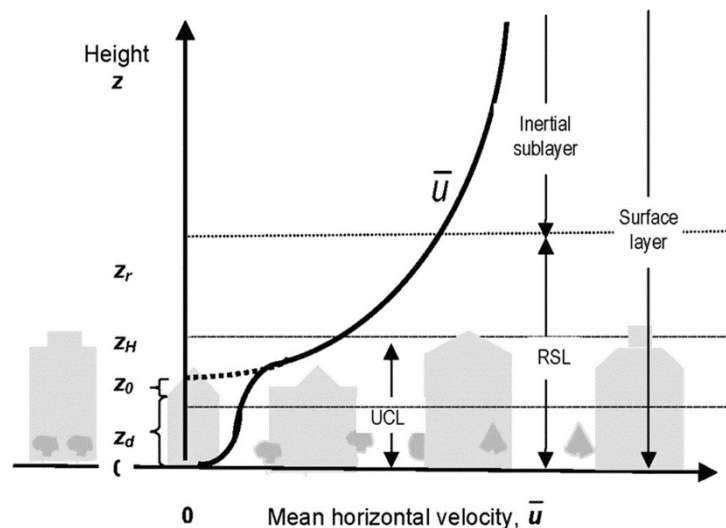


Figure 12 : Représentation des différentes sous-couches de l'atmosphère terrestre dans une zone urbaine, ainsi que du profil généralisé de la vitesse horizontale moyenne du vent (\bar{u}). Les hauteurs caractéristiques incluent la hauteur moyenne des éléments de rugosité (Z_H), la sous-couche de rugosité (Z_r et RSL), le déplacement du plan zéro (Z_d) qui correspond à environ $2/3$ de Z_H , et la longueur de rugosité (Z_0). Cette dernière est la hauteur au-dessus de Z_d à laquelle le profil de vent de la canopée est extrapolé jusqu'à atteindre une vitesse de vent nulle. (Source : Oke et al., 2004)

1.4. Types d'ICU

Au vu de la distribution spatiale et temporelle du phénomène que sont les ICU, étant la conséquence des interactions avec les structures urbaines bâties et végétales, leur intensité et leur échelle d'action diffèrent. Ce qui amène à diviser le phénomène en différent type. Les ICU se divisent en trois catégories (Oke, 2006) : (1) les ICU dépendants de la température d'air ambiant, (2) les ICU dépendants de la température de surface, et (3) les ICU dépendants de la température souterraine.

1.4.1. ICU dépendant de la température d'air ambiant

1.4.1.1. Îlots de chaleur de la couche de canopée urbaine

Les ICU de la couche de canopée urbaine (CL-UHI : *Canopy Layer Urban Heat Island*) permettent de quantifier le phénomène à l'aide de la température de l'air ambiant de la couche limite de canopée. Cette température est prise et mesurée majoritairement entre 1.5 et 3 m au-dessus du sol à l'aide d'un réseau de stations météorologiques fixes ou mobiles (Dimitrov et al., 2021). En comparant cette température à celle se situant à la même hauteur dans une zone rurale voisine, il est possible de détecter un ICU, si la différence entre ses deux températures s'avère particulièrement élevée (Heisler et al., 2019; Oke, 1995, 1976).

1.4.1.2. Îlots de chaleur de la couche limite urbaine

Les îlots de chaleur de la couche limite urbaine (BL-ICU : *Boundary Layer Urban Heat Island*) font référence aux îlots de chaleur se formant dans l'ABL (Oke, 1995; Oke et al., 2017). Étant donné la variabilité notable au sein de l'UBL en rapport avec l'épaisseur et la turbulence apparente au cours d'une journée claire, il en résulte un impact certain sur la fluctuation du phénomène d'ICU (Heisler et al., 2019). Lors de l'étude ce type, en particulier lors des modélisations informatiques à la mésoéchelle, une caractéristique est remarquable dans les résultats : c'est la création d'un panache s'étendant sous le comportement du flux de vent.

Un examen des variations de température entre les environnements urbains et ruraux (**Figure 13**) en relation avec les données du bilan énergétique provenant de la ville de Bâle, Suisse et leurs zones environnantes, révèle des distinctions entre les BL-ICU et les CL-UHI. Le graphique illustre les différences horaires de température entre les zones urbaines et rurales au niveau de la rue, calculées sur une période de 30 jours en plein été, à environ 2.5 m au-dessus du sol. Il met également en évidence les écarts de température à 5 m au-dessus des toits dans un quartier de bâtiments de 10 m de hauteur par rapport aux températures rurales au niveau du sol. Les deux courbes de ΔT_{U-R} montrent des valeurs plus élevées pendant la nuit, indiquant l'effet de l'ICU. Cependant, au niveau de la rue, ΔT_{U-R} ICU est plus important et reste positif à toutes les heures. Au-dessus du niveau du toit, ΔT_{U-R} est négatif à midi, car le mélange vertical à ces heures transporte de l'air relativement frais de la partie supérieure de l'UBL jusqu'au niveau du toit. Pour toutes les heures, la différence d'humidité, Δa_{U-R} , était négative, indiquant une plus grande humidité dans les zones rurales. Cela résulte d'une plus grande évaporation dans les zones rurales agricoles par rapport aux zones urbaines, où la végétation est limitée et les surfaces imperméables sont exposées (Heisler et al., 2019).

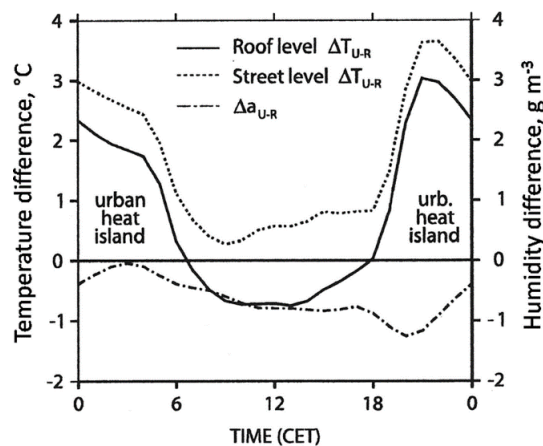


Figure 13 : représentation de l'intensité des ICU moyens de la température de l'air ambiant au niveau du sol (ΔT_{U-R}) et au-dessus du niveau des toits, avec la différence de l'humidité absolue (Δa_{U-R}) entre la zone urbaine et rurale. Ce sont les résultats d'une étude se faisant au sein de la ville de Bâle en Suisse. (Source : Christen et al., 2004)

1.4.2. ICU dépendant de la température de surface

À l'instar des précédents types d'ICU, les ICU de surface (S-UHI : *Surface Urban Heat Island*) sont représentées par la température de surface des objets façonnant le paysage urbain, que cela soit le bâti, la végétation, les chaussées et, etc. Ce type d'ICU n'est pas à confondre avec « la température de surface » généralement citée dans certains rapports climatologiques, afin de représenter la température de l'air à une hauteur de 1.5 m de la surface du sol (Heisler et al., 2019). Ce qui s'avère être situé proche de la surface du sol, en comparaison avec les sondages atmosphériques de la température (effectué à l'aide d'un ballon), traversant les différentes altitudes de l'atmosphère, qui peuvent dépasser les 30 km. Les S-UHI sont étudiés à l'aide des températures de surface terrestre (LST : *Land Surface Temperature*) ou bien par les températures radiantes sortantes grâce aux données mesurées par des capteurs infrarouges thermiques (TIRS : *Thermal InfraRed Sensors*) montés soit sur différents types d'aéronefs, soit par prise manuelle, mais aussi bien montés sur des satellites (LANDSAT, MODIS, etc.) (Voogt et al., 2000; Weng, 2009). Cette température est calculée à l'aide des valeurs mesurées par les capteurs TIRS, en fonction du rayonnement en ondes longues (thermique) des objets de la surface, ayant chacun des propriétés thermodynamiques différentes (Dimitrov et al., 2021). Durant la journée, les différents corps de la surface sont soumis au rayonnement solaire, ce qui implique une augmentation de la température de la surface soumise à cette éclaircissement solaire. Cette température des corps minéraux (imperméables) peut être relativement élevée par rapport à la température de l'air ambiant aux alentours de ces corps (Hartz et al., 2006). Une grande différence avec les ICU de la température de l'air ambiant est l'évolution temporelle de l'ICU-S. En situation nocturne avec un ciel clair, l'intensité des S-UHI est faible, ce qui provient de la réémission de la chaleur captée vers l'espace, se faisant plus facilement, car elle n'est pas obstruée par une couverture nuageuse. Alors que durant la période diurne, le phénomène de S-UHI est fortement intensifié en fonction de niveau de rayonnement solaire incident (Heisler et al., 2019; Voogt et al., 2003).

1.4.3. ICU dépendant de la température souterraine

L'ICU de température souterraine (SS-UHI: *SubSurface-Urban Heat Island*) se penche sur l'étude de l'intensité de ceux situés sous la surface du sol, au sein des différentes couches composant le profil de sol. Permettant de mieux comprendre le comportement des différents paramètres caractérisant le sol, en fonction de la température de celui-ci. Ce type d'ICU est celui le moins bien documenté et étudié. Il est quantifié à l'aide de prises de données de température à différentes profondeurs, à différentes couches du sol/substrat, permettant le mieux possible de représenter la distribution spatiale et temporelle de la température au sein du profil de sol (Dimitrov et al., 2021; Ferguson et al., 2007; Lokoshchenko et al., 2015). L'étude de l'SS-UHI est importante au niveau écologique. La température du sol a un rôle important dans le contrôle des processus écosystémiques tels que la libération du CO_2 par la respiration des racines des végétaux et des organismes du sol, le cycle des nutriments, la disponibilité en azote et les flux d'eau, ce qui affecte l'humidité des sols, qui est paramètre important à prendre en compte dans le comportement du sol (Heisler et al., 2019). En conséquence, le comportement de ces différents processus influence indirectement la croissance d'une plante, mais elle est donc directement touchée par l'évolution de la température. Cette évolution au sein des sols a aussi un impact sur la capacité de stockage du carbone dans ceux-ci, ils agissent comme des puits de carbone (Shaver et al., 2000). La majorité des recherches portant sur les températures du sol en milieu urbain ont principalement examiné les impacts de la couverture d'asphalte sur les températures du sol environnant ou du sol situé sous cette couche d'asphalte (Celestian et al., 2004; Halverson et al., 1981).

1.5. Stratégies cartographiques des ICU

Lorsqu'il est question de cartographier le phénomène d'ICU, il est important de comprendre qu'il est sujet d'une représentation de l'intensité des ICU (IICU). L'intensité se définit comme la différence entre la température (tous types confondus) mesurée au sein d'une zone urbaine et la température mesurée au sein d'une zone environnante, résumant au mieux un milieu non influencé par la ville. Sa formulation mathématique s'écrit de cette manière :

$$IICU_{U-R} = \Delta T_{U-R}^{\circ C/\circ K} = T_U^{\circ C/\circ K} - T_R^{\circ C/\circ K} \quad (1.7)$$

où $T_U^{\circ C/\circ K}$ fait référence à la température (soit en degré Celsius ou Kelvin) dans le milieu urbain et $T_R^{\circ C/\circ K}$ fait référence à la température dans le milieu environnant, rural. Grâce aux cartes de l'IICU, la détection des zones les plus touchées par ces ICU est réalisable rapidement, ce qui permet d'élaborer un plan d'action d'atténuation. Afin de représenter ces phénomènes, il existe plusieurs stratégies de cartographie des ICU en fonction du type. Comme chaque type d'ICU fait référence à une température spécifique, il existe donc plusieurs façons de calculer la température, que celle-ci soit celle de la surface (LST) ou de l'air ambiant. Il existe deux grandes méthodes qui permettent de quantifier l'IICU : la mesure (1) directe et (2) indirecte. La mesure directe fait référence à la mesure de la température de surface ou de l'air ambiant à l'aide de capteurs météorologiques fixes ou mobiles créant un réseau de données. Pour sa part, la mesure indirecte implique la prise de température grâce à des capteurs de télédétection à bord de satellites ou d'aéronefs. Ceux-ci, permettent de capter le rayonnement émis par les corps se trouvant à la surface de la Terre et de retranscrire cette information en une donnée de température de surface.

1.5.1. Mesure de la température de l'air ambiant

La mesure de la température de l'air au niveau de l'UCL est la plus utilisée pour évaluer le comportement des ICU à l'échelle piétonne, à environ 1.5 m de hauteur par rapport à la surface du sol. Cette hauteur représente la hauteur moyenne d'inhalation d'un être humain (Voogt, 2007). On utilise généralement des stations météorologiques pour enregistrer différents paramètres tels que la température, l'humidité, les précipitations, la vitesse et la direction du vent, le rayonnement solaire incident, etc. Les positions des stations sont stratégiquement choisies au sein des villes, idéalement pour former un réseau de collecte de données visant à obtenir une vue minimale en termes d'espace et une vision maximale en termes de temps. Cependant, cette disposition est parfois davantage guidée par des opportunités, ce qui réduit la résolution spatiale et par conséquent la pertinence des résultats obtenus. Parallèlement, des stations météorologiques sont implantées dans les zones périphériques des agglomérations urbaines, permettant ainsi la détermination de l'IICU. Néanmoins, cette approche comporte certaines limites. Tout d'abord, elle souffre d'un manque de précision à l'échelle spatiale, ce qui restreint la fiabilité des données collectées. De plus, la variabilité dans la répartition spatiale des stations au sein des différentes villes peut biaiser les résultats. En effet, les réseaux de stations météorologiques ne sont généralement pas assez denses ou bien répartis pour couvrir toutes les variabilités possibles au sein du paysage urbain. De plus, les instruments de mesure peuvent différer d'une station à une autre, entraînant ainsi des incertitudes et/ou des incohérences dans les données (Filiatreault, 2015).

Une autre méthode de mesure de la température implique de réaliser des parcours à l'aide d'automobiles ou d'autres moyens de transport terrestres. Ce type de prise de mesure permet d'obtenir une représentation spatiale de la température de bonne qualité, au sein de la ville. Un point important à prendre en compte lors de l'application de cette méthode, est de tenter de maintenir les mêmes conditions climatiques tout au long du trajet, notamment la vitesse du vent et le rayonnement

solaire incident. Les limites de cette méthode peuvent être économiques, écologiques (en raison de l'utilisation de combustibles fossiles) et spatio-temporelles (par exemple, être bloqué dans un embouteillage pendant les mesures), ainsi que climatiques. Si les conditions climatiques changent drastiquement lors d'un parcours, il est possible que les résultats ne soient pas utilisables (Filiatreault, 2015).

La mesure de la température au sein de l'UBL nécessite de réaliser un profil de température à l'intérieur de cette couche. Pour cela, certaines stations météorologiques sont réparties sur la hauteur des gratte-ciels en milieu urbain (Voogt, 2007). Dans les zones rurales, des tours météorologiques mesurent également la température à différentes hauteurs. Une autre approche consiste à utiliser des ballons-sondes, qui sont des ballons pressurisés et gonflés à l'hélium, équipés d'une nacelle contenant une radiosonde (ensemble de capteurs destinés à mesurer les conditions de l'atmosphère). Cependant, ces méthodes ont leurs limites, notamment en ce qui concerne le nombre et l'emplacement des stations fixes, qui peuvent mal représenter les ICU, ainsi que le problème d'incertitude et/ou d'incohérence entre les données (Filiatreault, 2015).

1.5.2. Mesure de la température de surface

La grande majorité des études sur les ICU utilisent les images satellitaires ou aériennes. Ces images permettent de produire des cartes de la température de surface d'une ville. Les TIRS sur le satellite Landsat-8 et TIRS-2 sur le satellite Landsat-9 sont parmi les plus utilisés pour les ICU. Landsat-9 est le dernier, donc le plus avancé des capteurs Landsat. Il permet de réduire les interférences lumineuses parasites par rapport aux autres capteurs de la série, ce qui permet d'appliquer de meilleures corrections atmosphériques et d'obtenir des mesures plus précises de la température de surface ("Landsat 9," n.d.).

Le produit brut du capteur est la luminance, qui ne varie pas pour un corps noir car c'est un émetteur considéré isotrope. Cela signifie que les conditions d'émission sont maintenues égales, quelle que soit la direction. Il est alors possible d'établir la relation suivante :

$$L(\lambda, \theta, \phi) = \frac{M(\lambda)}{\pi} \quad (1.8)$$

L'équation fait ici référence à un corps noir. Cette autre relation, ci-dessous, permet d'avoir la même conclusion, mais cette fois, avec un corps gris. Ce qui représente un corps n'ayant pas une émissivité proprement égale à 1, tout au long du spectre électromagnétique. Pour ce faire, il faut poser l'hypothèse que l'émetteur est aussi isotrope. Donc, la formule se traduit de cette manière :

$$L(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \times \frac{M(\lambda, T)}{\pi} \quad (1.9)$$

où $L(\lambda)$ est la luminance du corps gris à une certaine longueur d'onde (*en $Wm^{-2}\mu m^{-1}$*) correspondant à la température. Pour avoir la représentation sur tout le spectre thermique, il faut appliquer l'intégrale sur les longueurs d'ondes thermiques concernées. Le terme $\varepsilon(\lambda)$ représente l'émissivité qui est la capacité d'un matériau ou d'une surface à absorber le flux de rayonnement incident et de réémettre celui-ci. C'est un fait qui permet de comprendre pourquoi certaines surfaces ont des valeurs de température mesurées différentes de la réalité. Un point à prendre en compte dans les erreurs, pouvant être produites lors de la mesure de celles-ci. $M(\lambda, T)$ est l'exitance du corps noir à la température de l'objet ou de la scène d'étude, son unité est le $Wm^{-2}\mu m^{-1}$. Ce que le capteur va enregistrer est la luminance totale, ce qui représente l'addition de la luminance du corps gris, $L_{cg}(\lambda)$, et de la luminance de l'atmosphère totale, ce qui est directement émis vers l'espace, $L_A(\lambda)$, et ce qui est émis vers la surface, $L_{ciel}(\lambda)$. Les équations qui vont suivre feront état de la démonstration du

cheminement des différentes formes de luminance que nous pouvons retrouver sur Terre et qui parviendront au niveau du capteur. Il est par conséquent important de comprendre l'origine des différentes sources , pour pouvoir réaliser le chemin inverse, afin de calculer la valeur au niveau du sol. Voici les différentes équations utiles à ce cheminement :

$$\rho(\lambda) \times L_{ciel}(\lambda) = L_{ciel}^*(\lambda) = (1 - \varepsilon(\lambda)) \times L_{ciel}(\lambda) \quad (1.10)$$

Cette formule est spécifique pour les objets opaques, représente la partie de la luminance de l'atmosphère en direction de la surface et qui réfléchiée par la surface, qui par la suite atteindra le capteur.

$$L_{sol}(\lambda) = L_{cg}(\lambda) + L_{ciel}^*(\lambda) \quad (1.12)$$

$$L_{sol}(\lambda) = [\varepsilon(\lambda) \times L_{cn}(\lambda)] + [(1 - \varepsilon(\lambda)) \times L_{ciel}(\lambda)] \quad (1.13)$$

La formule suivant reprend en compte la luminance du corps gris qui provient des objets se trouvant à la surface ainsi que le résultat de l'équation précédente, donnant la luminance totale provenant de la surface vers le capteur.

$$L_{cap}(\lambda) = L_{sol}(\lambda) \times \tau_A(\lambda) + L_A(\lambda) \quad (1.14)$$

où $\tau_A(\lambda)$ est la valeur de transmission au niveau de l'atmosphère et le $L_A(\lambda)$ représente la partie de la luminance atmosphérique qui est dirigée directement vers le capteur. Cette dernière équation est l'expression finale qui permet de visualiser ce qui arrive au niveau du capteur et donc, ce qui est mesuré par celui-ci. D'où l'importance de suivre ce cheminement, car cela permet de détecter les données des équations qui sont connues et non connues. Ici, La L_{cap} est connue. Ce qui est recherché ici est la L_{sol} et les inconnues sont donc la τ_A et $L_A(\lambda)$. L'équation 1.14 peut être reformulée pour permettre d'obtenir la valeur de luminance au niveau du sol qui s'établit de cette façon :

$$L_{sol} = \frac{L_{cap} - L_A}{\tau_A} \quad (1.15)$$

La dernière étape avant l'estimation de l'émissivité et de l'obtention des valeurs de température, est l'étape qui permet de passer des valeurs de luminance de surface à une valeur de luminance du corps émettant cette forme d'énergie. Pour ce faire, il est important de se référer à la formule 1.13. Il en ressort la nécessité d'être en possession d'une valeur d'émissivité. Le point le plus important, est de se rendre compte, qu'il n'est pas sujet de calculer la luminance d'un corps gris mais d'un corps noir. Cette équation peut être notée de cette manière :

$$L_{obj} = \frac{L_{sol} - (1 - \varepsilon) \times L_{ciel}}{\varepsilon} \quad (1.16)$$

Les valeurs de la L_A et de la τ_A qui se retrouve dans l'équation 1.15, ainsi que la valeur de la L_{ciel} qui elle se retrouve en 1.16, peuvent être estimées à partir de l'analyse de la composition de l'atmosphère, ce qui revient à étudier le profil atmosphérique et le profil des aérosols. Ces valeurs sont calculables à l'aide de modèles simulant le comportement de l'atmosphère à une date précise en fonction des bandes étudiées. Par ex. MODTRAN (MODTRAN, n.d.), 6SV (Vermote et al., 1997) et REFLECT (Bouroubi, 2009).

L'obtention de l'émissivité peut se réaliser de différentes manières, comme l'utilisation de l'occupation du sol, en fournissant une valeur précise d'émissivité aux différentes classes, ou bien à travers la génération de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI : *Normalized Differential Vegetation Index*). Le NDVI se calcule selon un rapport de bandes spectrales :

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1.17)$$

Dans le cas du capteur Landsat-9, ce sont les bandes *B3* et *B4*, en réflectance au niveau du sol, qui représentent la bande se trouvant dans le rouge, de la portion du visible (*R*), et la portion du proche infra-rouge (*NIR*). Celui-ci est normalisé, va donc de -1 à 1 pour ses limites, mais est souvent représenté de 0 à 1, car ce qui est négatif est souvent considéré comme de l'eau. Le NDVI permet de rapidement visualiser s'il y a présence ou non d'une végétation verte vivante. De plus, l'estimation du NDVI permet d'attribuer une certaine valeur d'émissivité.

Finalement, afin de calculer une température à l'aide de la luminance, il faut appliquer la loi de Planck. Celle-ci représente la distribution de la luminance ou de l'excitance énergétique spectrale du rayonnement thermique du corps noir à l'équilibre thermique en fonction de sa température thermodynamique. Max Planck a démontré que la luminance énergétique spectrale d'un corps noir par unité de longueur d'onde, s'exprime de cette façon :

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (1.18)$$

où *h* est la constante de Planck, le $c = c_0/n$, avec c_0 qui représente la vitesse de la lumière et le *n* qui fait allusion à l'indice de réfraction du milieu. Le *c* est donc la vitesse de propagation du rayonnement provenant du corps noir dans le milieu, le *k* fait référence à la constante de Boltzmann et le *T*, ici, est la température de surface du corps noir. Attention celui-ci est en Kelvin (°K). Par la suite, il est possible de joindre plusieurs paramètres de cette formule, dans le but de faciliter et de compresser celle-ci. Comme, $K1 = 2hc^2/\lambda^5$ et $K2 = hc/\lambda k$, ce qui revient à cette simplification qui est :

$$L(\lambda, T) = K1 \times \frac{1}{\exp\left(\frac{K2}{T}\right) - 1} \quad (1.19)$$

L'équation suivante, est la transformation de cette dernière pour trouver la température (*T* °C) :

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L(\lambda)} + 1\right)} - 273.15 \quad (1.20)$$

L'imagerie satellitaire présente certains avantages, tels que son faible coût et sa capacité à couvrir une vaste zone d'étude. Cependant, elle est limitée par sa résolution spatiale. De plus, elle ne permet pas de capturer des données sur les émissions provenant de surfaces verticales et est restreinte en termes de fréquence de mesure, car les satellites effectuent des acquisitions à des heures précises en fonction de la zone d'étude. Par conséquent, il est possible que pendant la prise de données, la zone étudiée soit partiellement couverte de nuages, ce qui limite l'étude de la température de surface. Malgré ces limitations, l'approche de mesure par imagerie satellitaire reste simple et rapide, ce qui permet aux professionnels de l'urbanisme, de la cartographie et de la géomatique d'obtenir des données utilisables rapidement (Filiatreault, 2015; Voogt, 2007).

Une autre méthode de calcul de la température de surface consiste à utiliser un relevé thermique obtenu à l'aide d'un radiomètre fixé à un avion ou à un drone. Cette option est relativement coûteuse, mais sa mise en œuvre est relativement simple. Elle offre l'avantage de représenter plus précisément la zone d'étude et de fournir des données sur les surfaces verticales, à l'instar de l'imagerie satellitaire. Cependant, les scientifiques ont la liberté de choisir les méthodes qu'ils utilisent, et les protocoles pour la mise en place de ces systèmes peuvent être moins élaborés (Filiatreault, 2015; Voogt, 2007).

Une dernière méthode est possible, celle-ci s'effectue au niveau du sol, à l'aide d'un thermomètre numérique à rayonnement thermique. Cette option permet des relevés à distance de la température de surface des bâtiments ou des revêtements de chaussée. Comparée à l'imagerie satellitaire, cette méthode offre une précision beaucoup plus fine, mais la représentation spatiale de la zone d'étude devient plus fastidieuse et laborieuse. Cependant, pour les mesures utilisées dans un bilan thermique des bâtiments, c'est une approche très intéressante (Filiatreault, 2015; INSPQ, 2009).

1.6. Stratégies de mitigation des ICU

Dans un monde où le phénomène des îlots de chaleur urbains se fait de plus en plus ressentir en raison de l'urbanisation croissante, il est également exacerbé par l'impact de plus en plus fréquent et intense du changement climatique sur le microclimat à différentes échelles des zones urbaines. Depuis la découverte de cet événement climatique, les recherches universitaires et indépendantes se poursuivent, permettant de proposer divers stratagèmes de mitigation des ICU, ayant pour but d'atténuer leur échelle d'action et leur intensité, voire de créer des îlots de fraîcheur urbains (IFU) et donc augmenter le confort humain dans ces zones (Gaitani et al., 2007; Han et al., 2023; Kuttler, 2011). La **Figure 14** met en avant les différents moyens de mitigations connus actuellement. Il existe trois grandes familles de stratégies : le verdissement, l'utilisation de matériaux de hautes technologies et rafraîchissants, ainsi que l'utilisation de source d'eau (Bathaei et al., 2023). De nos jours, il est aussi sujet de l'optimisation de la géométrie du bâti, se concentrant sur le FVC, le rapport H/L, ainsi que l'orientation des canyons urbains. L'objectif principal des stratégies de mitigations des ICU est d'équilibrer le gain et la perte d'énergie sous forme de chaleur au sein des villes, en diminuant l'effet de chauffage causé principalement par le rayonnement solaire et accroître l'effet de perte de chaleur ou de refroidissement des corps constituant le paysage urbain. Les résultats sortants de la mise en place de ces stratégies ont fourni des effets escomptés sur le climat et sur la réduction indéniable des températures dans les zones urbaines, tout en atténuant l'effet d'ICU qui était désiré (Fintikakis et al., 2011; Han et al., 2023; Santamouris et al., 2012). Compte tenu de la diversité des régions climatiques, il est important de noter que le potentiel d'atténuation varie en fonction de celles-ci pour chaque type de stratégie de mitigation. La plupart des études portant sur le potentiel des stratégies d'atténuation se concentrent sur une mesure spécifique, dans des conditions climatiques particulières, avec des caractéristiques régionales et des hypothèses de recherche spécifiques. Bien que leurs résultats soient concluants et pertinents, il reste complexe de résumer la généralité du potentiel de ces différentes mesures pour tous les cas possibles. D'autre part, la combinaison de plusieurs solutions de mitigation permet une meilleure homogénéité de l'atténuation des températures, bien que cela soit encore faiblement étudié et documenté (Battista et al., 2022; Han et al., 2023; Lai et al., 2019).

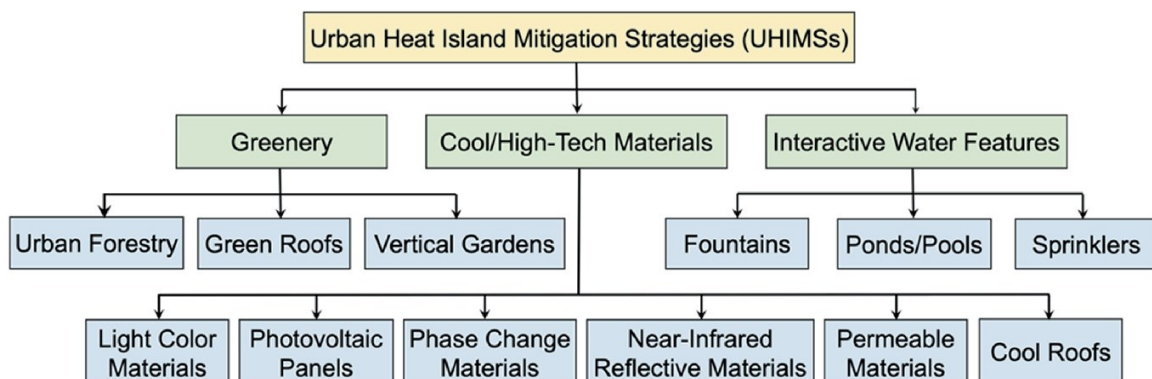


Figure 14 : les stratégies de mitigation du phénomène d'ICU, se divise à l'heure actuelle en trois principales familles : la première est le verdissement ("Greenery"), l'utilisation de matériaux de hautes technologies et rafraîchissants ("Cool/High-Tech Materials"), ainsi que l'utilisation de sources interactives d'eau ("Interactive Water Features"). Chaque famille se voit répartir l'ensemble des solutions d'atténuation étant compatible avec son procédé et son origine. (Source : Bathaei et al., 2023)

1.6.1. Verdissement

Les méthodes de verdissement consistent en la volonté de réduire la rugosité de surface, la température de surface, la température intérieure des bâtiments, ainsi que la température de l'air ambiant. Elles se basent sur le pouvoir d'évapotranspiration des plantes comme effet de refroidissement de l'air ambiant, permettant aussi de créer des surfaces ombragées qui réduisent la température de surface, que cela soit au niveau du revêtement de la chaussée ou du bâti, ainsi que la température à l'intérieur des bâtiments, car elles agissent comme un isolant naturel, influençant la consommation d'énergie en diminuant celle-ci. Elles permettent aussi la captation de la pollution, la réduction de gaz à effet de serre, la protection contre les rayons ultraviolets (UV), la meilleure gestion des eaux dans le sol, en diminuant le ruissellement. Les différents effets produits par ces méthodes accroissent la santé et le confort des citoyens (Bathaei et al., 2023). Lorsqu'il est sujet de verdissement, il est régulièrement cité les infrastructures vertes urbaines (IVB) se cantonnant à la végétation à l'échelle du site (parcs, chaussées vertes, etc.) et la végétation intégrée au bâtiment (VIB). La VIB regroupe les méthodes de toitures vertes et de murs verts (Zhu et al., 2023).

1.6.2. Matériaux de hautes technologies et rafraîchissants

À l'instar du verdissement, il est question de l'utilisation de matériaux anthropiques qui possèdent des propriétés physico-chimiques particulières ayant un effet positif en vue d'atténuer les ICU. Le principal objectif de l'utilisation de ces nouveaux matériaux est la diminution de la température en reflétant une partie du spectre de rayonnement électromagnétique, en particulier le rayonnement solaire incident, tout en augmentant l'émissivité thermique. Ces revêtements ont aussi un rôle en matière de gestion de l'eau leur permettant de contrôler leur humidité et ainsi que pour la production d'électricité grâce à la conversion de l'énergie solaire en un courant électrique (Bathaei et al., 2023). Cette famille de stratégies d'atténuation est composée de méthodes comme : chaussées perméables (Han et al., 2023), chaussées de couleur claire (Akbari, 2009; Bathaei et al., 2023; Ghenai et al., 2023), toitures fraîches (Bathaei et al., 2023; Elnabawi et al., 2022; Macintyre et al., 2019; Roman et al., 2016; Santamouris, 2014), matériaux à changement de phase (MCP) (Roman et al., 2016), matériaux ou panneaux photovoltaïques (PV) (Brito, 2020; Efthymiou et al., 2016; Yang et al., 2013) et matériaux réfléchissants dans le proche infrarouge (Cui, 2012; Yang et al., 2013). L'ensemble de ces stratégies présentent leurs lots d'avantages et d'inconvénients. À titre de référence, les toitures fraîches sont relativement efficaces dans la réduction de la charge thermique, se répercutant directement sur une valeur de la température de surface drastiquement plus faible, favorisant l'atténuation des ICU. Mais celles-ci sont enclines à subir des stress thermiques réguliers et qui sont d'amplitudes diverses, ce qui influence négativement leur durabilité (Pisello et al., 2017). Les panneaux photovoltaïques ont une influence moindre sur l'atténuation des ICU et faible sur le microclimat urbain (Brito, 2020). Mais, ils sont intéressants dans la production d'énergie renouvelable durable, servant à réduire les coûts énergétiques des bâtiments (Efthymiou et al., 2016). En ce qui concerne les matériaux réfléchissants dans le proche infrarouge, un des avantages est d'avoir une réflectance qui n'affecte pas l'acuité visuelle des piétons ou des pilotes d'avions. De plus, l'utilisation de ce type de revêtement permet de développer des chaussées froides de teinte foncée mais ayant une forte réflexion, ce qui a un impact sur l'atténuation des ICU (Bathaei et al., 2023; Xie et al., 2019).

1.6.3. Sources interactives d'eau

La dernière famille de stratégies de mitigation des ICU repose sur l'effet d'évaporation de l'eau en vapeur d'eau. Plusieurs techniques sont utilisées, telles que la création d'étangs artificiels, l'installation de fontaines ou encore l'utilisation de brumisateurs (la pulvérisation d'eau sous forme de brouillard).

Toutes ces techniques nécessitent une importante demande en volume d'eau, ce qui peut être complexe à gérer en cas de pénurie d'eau ou de restrictions de sa consommation. La plupart des recherches sur le terrain informent sur l'effet réel que peuvent avoir ces stratégies basées sur l'évaporation des masses d'eau dans l'environnement à l'échelle micro (Bathaei et al., 2023; Hathway et al., 2012).

1.7. Conclusion

Étant donné les différentes études qui apportent des réponses au phénomène qui sévit dans les zones urbaines et périurbaines, il est nécessaire, en regard du défi climatique actuel, d'utiliser toutes nos compétences technologiques et nos connaissances pour en comprendre davantage. Il faut développer une stratégie d'analyse spatiale qui définira la méthode de mitigation à appliquer, en vue de faire face à l'intensification du phénomène d'îlots de chaleur, étant donné les projections climatiques relatives aux pour les décennies à venir. En somme, l'étude des ICU est un sujet de plus en plus important dans un contexte de changement climatique. Les villes sont confrontées à des défis majeurs en matière de qualité de vie pour leurs habitants. La compréhension de l'impact des zones urbaines sur le climat est essentielle pour faire face à ces défis. Les chercheurs, les décideurs politiques, les urbanistes et les habitants doivent travailler ensemble pour trouver des solutions adaptées et durables qui permettront de réduire les risques pour la santé et la sécurité des habitants, ainsi que pour la qualité de l'environnement urbain dans son ensemble. En intégrant les dernières avancées technologiques et en s'appuyant sur les connaissances passées, il est possible de façonner des zones urbaines résilientes qui offrent une qualité de vie à tous les résidents.

2. Objectifs

Les objectifs principaux de cette étude sont doubles :

- D'une part, la modélisation de l'ICU en utilisant des modèles de régression ;
- D'autre part, la quantification des effets de refroidissement induits par les diverses SMICU.

En premier lieu, l'accent est mis sur l'entraînement de différents types de modèles de régression visant à prédire l'intensité de l'ICU. L'objectif est de comparer les performances de chaque modèle à celui de référence, établi par le Centre d'Enseignement et de Recherche en Foresterie (CERFO) sous la forme d'un modèle de Random Forest, afin de déterminer si, en utilisant les mêmes données d'entraînement, le modèle du CERFO reste la meilleure option dans ce contexte. Par ailleurs, cette étude ouvre la voie à des réflexions sur de nouvelles améliorations possibles, telles que l'introduction de nouvelles variables d'entraînement ou de nouveaux algorithmes de prédiction.

En deuxième lieu, l'objectif de ce travail est de quantifier l'effet de refroidissement induit par différentes stratégies de mitigation. Il vise également à visualiser leurs comportements et leurs distributions spatiales et temporelles par rapport à la géométrie urbaine et aux conditions climatiques. Cette approche permet de hiérarchiser l'intensité d'atténuation en fonction de la zone d'étude, facilitant ainsi la prise de décision quant au choix d'une stratégie d'atténuation de l'ICU dans un projet. Il s'agit d'une première étape dans la simulation des effets des Solutions de Mitigation de l'Îlot de Chaleur Urbain (SMICU), en vue du développement futur d'un outil d'aide à la décision permettant de choisir la solution de mitigation ayant l'effet le plus optimal dans un contexte spécifique.

3. Méthodologies

3.1. Modèles prédictifs des ICU au Québec

3.1.1. Zone d'étude

La zone d'étude s'étend sur l'écoumène de population se situant au sein de la région de Québec, qui est une province du Canada. La population du Québec compte plus de 8 500 000 habitants en 2021 et une densité de $5.5 \text{ hab}/\text{km}^2$, sur un territoire s'étendant sur plus de $1\,500\,000 \text{ km}^2$ ("Québec," 2023). Selon la classification du climat de Köppen ("Classification de Köppen," 2022), le Québec possède trois types de climats. Au nord, le climat se réfère à un type *ET* (Toundra), la partie centrale est caractérisée par un type de climat *Dfc* (Subarctique) et au sud, un climat de type *Dfb* (Continental humide avec été tempéré) ("Québec," 2023). L'écoumène de population se définit par les zones où se trouvent des surfaces habitées et des centres de population minimale selon la définition de « Statistiques Canada » ("Centre de population (CTRPOP)," n.d.). Les données reprises pour l'écoumène se basent sur le recensement effectué en 2021. La superficie de cette zone représente $185\,453 \text{ km}^2$. Une zone tampon de 2 km est ajoutée à la zone d'étude, ce qui permet une simplification des analyses et de certifier l'intégrité des données, par la suite cette zone a été séparée en 35 zones (CERFO et al., 2023, 2022) (**Figure 15**).

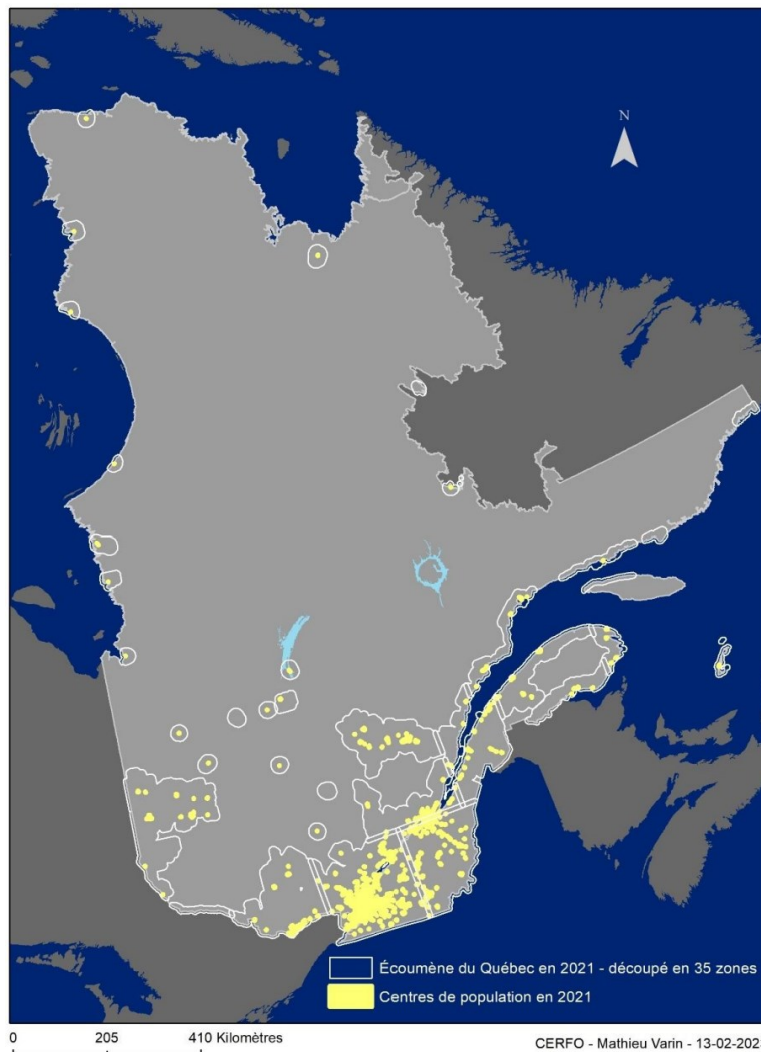


Figure 15 : Zone d'étude globale représentant l'écoumène de population subdivisé en 35 zones, au sein desquelles, les centres de population de 2021 sont représentés. (Source : CERFO et al., 2023)

3.1.2. Les variables explicatives

La description de la méthodologie qui fait référence aux différentes prises de données et leur prétraitement n'est pas abordée au sein de cette étude, car ne faisant pas partie des objectifs, qui est la comparaison de la performance de différents modèles de prédiction sur l'IICU. La méthode de collecte de données et de leur prétraitement est retrouvable au sein des différents rapports du CERFO à ce sujet (CERFO et al., 2023, 2022).

Au sein de ces différents rapports, un ensemble de variables a été calculé, permettant de représenter au mieux la diversité du paysage et ce qui influence le plus le phénomène d'IICU. En prenant, en compte que cette étude permet de prédire l'IICU au sein d'un territoire vaste et diversifié d'un point de vue du climat. Ce qui réduit considérablement les variables possibles à considérer comme élémentaires au sein d'un modèle de prédiction général et non empirique à une ville. Il a été choisi d'incorporer au sein de ces variables explicatives, des variables faisant référence à l'occupation du territoire, se répartissant en six classes : Eau Lac, Sol Agricole, Urbain Pur, Urbain Mixte, Végétation Arborescente, Végétation Basse. Un démixage spectral est effectué, afin de définir la perméabilité du lieu. Celui-ci se base sur le fait que, la résolution est de 15 m, donc qu'au sein d'un pixel, il est possible de retrouver plusieurs sources d'occupation différentes. Cette méthode permet de donner au pixel une probabilité d'appartenance à un type d'occupation du sol définissant la perméabilité du lieu. Cette occupation du sol se compose de quatre classes : Végétation, Eau, Sol nu et Construction. Un ensemble d'indices spectraux a été calculé, ceux-ci sont au nombre de 33 et repris au sein du **Tableau 11** qui se trouve au sein des **Annexes [7.2]** (Crocchi, 2022). Ils permettent de mettre en lumière de l'information cachée au sein des différentes bandes. Une variable faisant référence à la saison d'acquisition a été créée, soit ÉTÉ, soit AUTOMNE. Elle permet de représenter l'effet de la saison sur la phénologie. Il est possible de visualiser pour des images acquises au mois septembre, un changement de couleur au niveau du feuillage. Ce qui a un effet direct sur les indices spectraux mesurés. En même temps, une autre variable est créée et celle-ci se réfère au numéro de la semaine de l'année d'acquisition de la donnée. Cette variable permet d'orienter la prédiction en lui imposant une valeur faisant référence à la semaine considérée comme la plus chaude de l'année, ce qui donne une représentation de l'IICU à une période critique. Les valeurs de la longitude (x), de la latitude (y) et de l'altitude font partie de ces variables explicatives. Ces variables permettent de prendre en considération le changement de climat en fonction de la position géographique du lieu. Finalement, des variables de type topologiques sont calculées. Elles reprennent principalement des variables de distance euclidienne. Au sein de ces variables topologiques, il existe quatre sous-groupes : distance aux lacs, considérant aussi les mers et les fleuves, distance aux lacs, mais ici considérant les rivières de type surfacique, analyse de voisinage et distance par rapport à l'occupation du territoire et du démixage spectral. Le troisième sous-groupe calcule la superficie d'eau surfacique qui est retrouvable à plusieurs distances au tour du pixel focal, à un rayon de soit 15 m, 30 m et 45 m. Le quatrième sous-groupe fait référence à une distance euclidienne par rapport au pixel de référence et aux différentes classes d'occupation du territoire, ainsi qu'aux probabilités des différentes classes d'occupation du sol définissant la perméabilité du sol. Comme explicitement dit dans le rapport du CERFO, « les sous-groupes trois et quatre sont présents afin de tenter de mesurer l'effet de la transmission de la chaleur en fonction de la proximité aux infrastructures anthropiques » (CERFO et al., 2022; Guo et al., 2015).

3.1.3. Échantillonnage des données d'entraînement et de validation

En ce qui concerne la prise de données d'entraînement et de validation, le rapport du CERFO explique brièvement sa méthodologie. Afin de représenter l'entièreté de la zone d'étude, 46 images Landsat-8 ont été acquises. Pour chaque image, l'ensemble des variables explicatives est calculé, la température de surface est calculée, ainsi que le choix d'un point de référence de l'image. Celui-ci est

choisi dans un lieu où l'influence des zones urbaines devient presque inexistante ou nulle. Ce point de contrôle est situé au sein de contexte forestier, représentatif en milieu rural. De plus, si c'est possible, il est situé au niveau de la superposition des images, ce qui permet d'éviter l'introduction de biais éventuels. Par la suite, l'écart de température (IICU) qui est la variable d'intérêt, celle qu'il faut prédire, est calculée en réalisant la différence entre la température de surface et la température qui se trouve au niveau du point de référence. Pour ce qui est de l'échantillonnage, celui-ci est réalisé en effectuant une sélection aléatoire d'un maximum de 1000 pixels par classe d'occupation du territoire, ainsi que par zone d'analyse, ce qui a permis d'extraire un total de 47 912 observations.

En vue de séparer l'ensemble des observations en jeu de données d'entraînement et de validation, il a été nécessaire de réaliser plusieurs tests vu l'inhomogénéité des données d'un point de vue spatial, venant du fait que les observations ont été prises aléatoirement. Premièrement, ils ont calculé l'indice de Moran, ce qui permet d'identifier la présence d'autocorrélation spatiale. Afin de résoudre le problème d'autocorrélation spatiale, ils ont réalisé une analyse de la répartition spatiale des points pour identifier des *clusters*. Finalement, pour répartir les données au sein des deux jeux, il a été question d'une sélection aléatoire par domaine bioclimatique, classe d'occupation du territoire et par *clusters*, séparant les observations en un jeu d'entraînement qui représente 80 % (38 328 observations) des données et donc 20 % (9 584 observations) pour le jeu de validation.

3.1.4. Prétraitements

Pour utiliser les données d'entraînement et de validation, quelques étapes de préparation ont été nécessaires. Tout d'abord, l'ensemble des observations contenant des données manquantes (*NA*) a été supprimé. Ensuite, une sélection des variables a été réalisée en ne retenant que celles dont la corrélation est inférieure à 90 % selon l'indice de corrélation de *Spearman*, ce qui a permis de retenir 32 variables. Finalement, parmi ces 32 variables, il y en a trois de type qualitatif : *semaine*, *OccTerr*, *Img_index*. Lors de l'utilisation de modèles de régression, toutes les variables de ce type sont transformées en variables continues pour être utilisées au sein de ces modèles. Ici, ces variables ont été transformées en variables fictives (*dummies*), répartissant chaque valeur de la variable qualitative en une colonne ayant une réponse binaire (**Tableau 1** et **Figure 16**).

Tableau 1 : Liste des variables reprises après la sélection et qui sont utilisées pour entraîner les différents modèles de régression afin de prédire l'IICU.

Variables	Description
img_index_AUTOMNE img_index_ETE	Saison (été/automne)
OccTerr_SolAgricole OccTerr_UrbainMixte OccTerr_UrbainPur OccTerr_VegetationArborescente OccTerr_VegetationBasse	Classe d'occupation du territoire tel que prédit par le modèle d'occupation du territoire
Semaine_23.0 Semaine_24.0 Semaine_25.0 Semaine_26.0 Semaine_27.0 Semaine_28.0 Semaine_29.0	Semaine d'acquisition de l'image de température

Semaine_30.0	
Semaine_32.0	
Semaine_33.0	
Semaine_34.0	Semaine d'acquisition de l'image de température
Semaine_38.0	
Semaine_39.0	
Sol_nu	Probabilité d'appartenance à la classe «Sol nu» (démixage)
Construction	Probabilité d'appartenance à la classe «Construction» (démixage)
Vegetation	Probabilité d'appartenance à la classe «Végétation» (démixage)
Eau	Probabilité d'appartenance à la classe de démixage «Eau»
D_EAU_LIN	Distance à l'eau (linéaire)
D_EAU_SURF	Distance à l'eau (surfacique)
DistanceDemix_Construction	Distance aux zones bâties (démixage)
DistanceDemix_Eau	Distance aux pixels de la classe «Eau» (démixage)
DistanceDemix_Sol_nu	Distance aux pixels de la classe «Sol nu» (démixage)
DistanceDemix_vegetation	Distance aux pixels de la classe «végétation» (démixage)
DistanceOccTerr_EauLac	Distance aux pixels de la classe «EauLac» (modèle occupation du territoire)
DistanceOccTerr_SolAgricole	Distance aux pixels de la classe «SolAgricole» (modèle occupation du territoire)
DistanceOccTerr_UrbainMixte	Distance aux pixels de la classe «UrbainMixte» (modèle occupation du territoire)
DistanceOccTerr_UrbainPur	Distance aux pixels de la classe «UrbainPur» (modèle occupation du territoire)
DistanceOccTerr_VegetationArborescente	Distance aux pixels de la classe «VégétationArborescente» (modèle occupation du territoire)
DistanceOccTerr_VegetationBasse	Distance aux pixels de la classe «VégétationBasse» (modèle occupation du territoire)
EauVoisinage	Superficies d'eau surfacique dans le voisinage (15 m)
EauVoisinage5x5	Superficies d'eau surfacique dans le voisinage (30 m)
EauVoisinage7x7	Superficies d'eau surfacique dans le voisinage (45 m)
ABDI1_B5_B6	Angle-Based Drought Index
GI	Greenness Index
MBWI	Multi-Band Water Index
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
NBR	Normalized Burn Ratio
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NMDI3	Normalized Multi-band Drought Index
x	Longitude
y	Latitude
ALT	Altitude

principaux avantages : premièrement, elle évite que les attributs ayant des valeurs dans des plages numériques plus importantes dominent ceux avec des valeurs dans des plages numériques plus petites. Deuxièmement, elle permet de réduire la complexité numérique lors des calculs. L'ensemble de cette étude comparative a nécessité l'usage de langage de programmation tel que *Python* et *R*.

3.1.5.1. Support Vector Machine Regressor (SVR)

Le SVR est une méthode d'apprentissage supervisée, apparue à la fin des années 1970 (Drucker et al., 1996). La SVR offre une approximation non paramétrique puissante de la relation entre les indices urbains/végétation et les ICU. Cette méthode est couramment utilisée dans les applications de télédétection, notamment pour la prédiction du LST et de la SST (Température de Surface de la Mer) (Hasanlou et al., n.d.; Moser et al., 2009). Les hyperparamètres optimaux sont présentés dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : liste des hyperparamètres optimisés du modèle de régression SVR, ainsi que ses valeurs.

Hyperparamètres	Valeurs
Kernel	rbf
Gamma	0.008
Epsilon	1
C	20

3.1.5.2. Multi-Layer Perceptron (MLP)

Le MLP est un type de réseau de neurones artificiels constitué de plusieurs couches de neurones et a été introduit pour la première fois en 1965 (Minsky et al., 1972). Il est capable d'apprendre des relations complexes entre les données, ce qui en fait un modèle puissant pour la régression. Les hyperparamètres optimaux sont présentés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : liste des hyperparamètres optimisés du modèle de régression MLP, ainsi que ses valeurs.

Hyperparamètres	Valeurs
La taille du réseau de neurones	(200,100,50)
Fonction d'activation	logistic
Solveur	sgd
Alpha	0.01
Taux d'apprentissage	constant

3.1.5.3. Modèle utilisant un algorithme de Gradient Boosting

L'ensemble des modèles utilisés fait partie de la technique d'apprentissage nommé Ensemble Learning. Cette technique permet d'obtenir de meilleure performance en prédiction par une meilleure stabilité et une meilleure généralisation venant de la combinaison des prédictions obtenues grâce à différents modèles. Tout cela se fait en calculant la moyenne des erreurs individuelles de chaque modèle, afin de minimiser au mieux le risque d'*OverFitting* (surajustement). Donc la prédiction finale qui est retenue est généralement la moyenne des prédictions individuelles. Au sein de cette technique d'apprentissage, il existe deux méthodes : le *bagging* et le *boosting*. Dans cette étude, c'est le *boosting*

qui a été choisi. Le principe général de cette méthode est de construire plusieurs modèles en série, qui apprend du modèle précédent ce qui permet de réduire l'erreur du suivant (Wong, 2022).

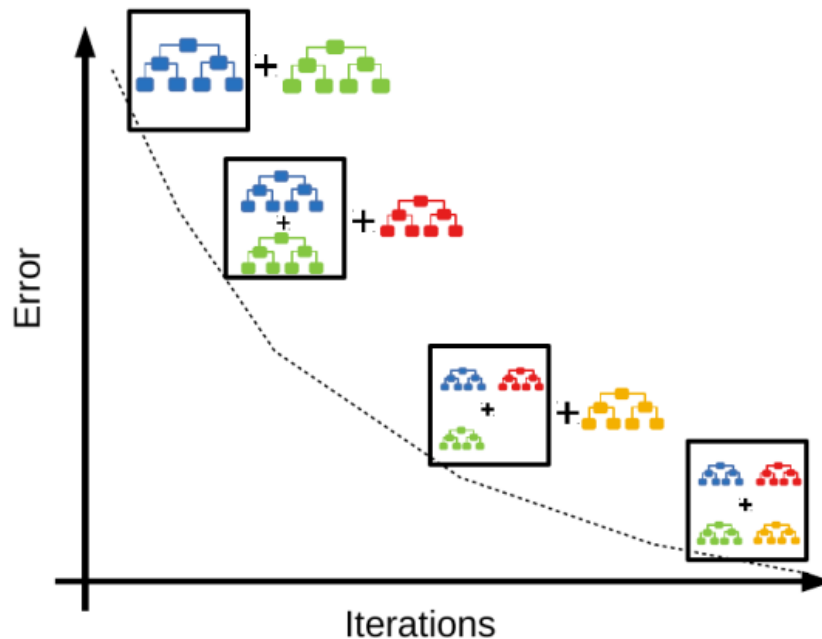


Figure 17 : Algorithme de Gradient Boosting Trees (GBT). (Source : Pal, 2020)

CatBoost, *LightGBM* et *XGBoost* sont tous des algorithmes de *Gradient Boosting Trees* (GBT) utilisés pour résoudre des problèmes de régression et de classification. Chacun de ces modèles présente des caractéristiques uniques qui les distinguent des autres :

- *CatBoost* est une bibliothèque de *boosting* développée par Yandex. *CatBoost* peut traiter les variables continues et catégorielles sans nécessiter de mise à l'échelle ou de transformation préalable. Cette caractéristique simplifie la préparation des données et en fait un choix puissant pour les ensembles de données hétérogènes, combinant des variables catégorielles et continues. De plus, *CatBoost* utilise une variante de l'algorithme de gradient *boosting*, qui améliore la vitesse d'apprentissage et les performances grâce à une technique d'élagage symétrique de régularisation (*Regularized Symmetric Tree Pruning*). Cette combinaison de fonctionnalités offre des performances élevées et un risque réduit de surajustement. ("What Is CatBoost?," n.d.; Wong, 2022) ;
- *LightGBM*, développé par Microsoft, se concentre principalement sur l'efficacité et la vitesse. Il utilise une approche de split vertical, ce qui lui permet de construire l'arbre plus rapidement en utilisant moins de mémoire, grâce à l'élagage par histogramme (*Histogram binning*). *LightGBM* est souvent privilégié pour les ensembles de données de grandes tailles, où il peut offrir des temps d'apprentissage significativement plus courts tout en conservant des performances élevées ("LightGBM documentation," n.d.; Wong, 2022) ;
- *XGBoost* (open source), quant à lui, est considéré comme l'une des premières et des plus populaires implémentations de *boosting*. Il combine les techniques de *boosting* traditionnelles avec une régularisation avancée, ce qui le rend robuste face au surajustement. *XGBoost* est réputé pour ses performances élevées, sa gestion efficace de la mémoire et sa capacité à traiter divers types de données (Wong, 2022; "XGBoost Documentation," n.d.).

Les hyperparamètres optimaux de chaque modèle de RBT sont repris dans les **Tableau 4**, **Tableau 5** et **Tableau 6**.

Tableau 4 : liste des hyperparamètres optimisés du modèle de régression CatBoost, ainsi que ses valeurs.

Hyperparamètres	Valeurs
Nombre d'itération	3200
Taux d'apprentissage	0.08
Profondeur maximale	10

Tableau 5 : liste des hyperparamètres optimisés du modèle de régression LightGBM, ainsi que ses valeurs.

Hyperparamètres	Valeurs
Type de boost	gbdt
Nombre de feuilles	75
Profondeur maximale	35
Taux d'apprentissage	0.04
Nombre d'estimateurs (arbres)	1600

Tableau 6 : liste des hyperparamètres optimisés du modèle de régression XGBoost, ainsi que ses valeurs.

Hyperparamètres	Valeurs
Type de boost	gbtree
Nombre d'estimateurs (arbres)	3200
Profondeur maximale	7
Taux d'apprentissage	0.015
Rapport de sous-échantillon des instances d'entraînement	0.8

3.1.6. Métriques de performance

La performance de chaque modèle entraîné est quantifiée en calculant certaines métriques telles que le RMSE et le R^2 , donc suivent leur expression mathématique :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.1)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i y_i - \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \sum_{i=1}^n y_i / n}{\left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 - (\sum_{i=1}^n \hat{y}_i)^2 / n \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2 / n \right)} \right)^2 \quad (3.2)$$

où y_i est la donnée réelle de la variable d'intérêt à l'instant i ($i = 1, 2, \dots, n$), \hat{y}_i est la donnée prédite correspondante et n est le nombre total d'observations.

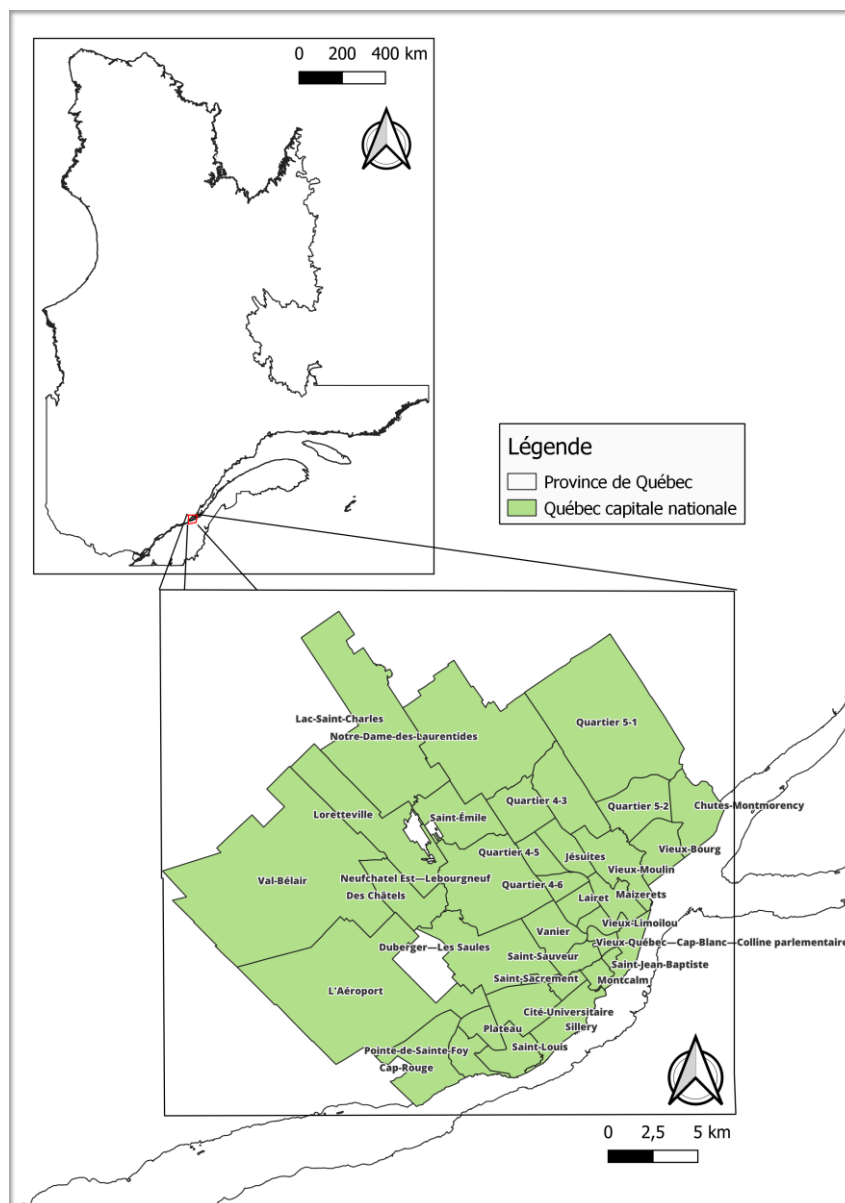
Par la suite, une étude statistique des résidus de chaque modèle est réalisée en se concentrant sur la performance de prédiction en fonction du type d'occupation du terrain. Afin de quantifier cette étude, la *Mean Absolute Error* (MAE) est calculée pour chaque modèle en fonction du type d'occupation, pour permettre une comparaison avec le modèle de référence du CERFO. L'expression mathématique du MAE est reprise ci-dessous :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3.3)$$

3.2. Étude quantitative de l'effet d'atténuation des SMICU

3.2.1. Sites d'étude

Le choix des deux sites d'étude a été fait au sein de la ville de Québec, situé dans la province du Québec au Canada (**Figure 18**). L'accessibilité à différentes données, que cela soit météorologique ou au niveau du terrain, a poussé le choix de cette ville. Il est nécessaire de prendre des zones d'étude reprises dans des zones ayant une vulnérabilité très forte aux vagues de chaleur et un indice d'ICU assez important, permettant d'étudier efficacement et pertinemment l'effet des différentes stratégies d'atténuation des ICU. Afin de réaliser ce choix, la superposition des cartes produites par le CERFO au niveau de l'indice d'ICU ("Données Québec," n.d.) et de la carte de vulnérabilité créée par l'ULaval ("Vagues de chaleur," n.d.) a été utilisée pour diriger les différents choix. De plus, afin d'apporter plus de nuances à l'étude, le choix des zones a été aussi fait permettant d'avoir deux types de configuration urbaine très différente au niveau du type de bâti, de sa densité et en fonction de la couverture végétalisée présente.



Le premier choix est une zone se trouvant au niveau du quartier du Plateau au nord-ouest de l'intersection entre l'autoroute Henry IV et l'autoroute Duplessis ($46^{\circ}45'54.1''N$ $71^{\circ}18'20.8''W$) et se trouve à une altitude de 93 m (**Figure 19**). Ce lieu a été choisi pour son type de résidences, qui s'apparente à des habitations à loyer modéré, s'entourant d'espace assez ouvert, avec de la végétation, ainsi que pas mal de surface recouverte de matériaux minéraux comme de l'asphalte et du béton servant aux routes, aux parkings, aux trottoirs, ainsi qu'aux infrastructures diverses. Ce lieu est aussi habité par des personnes n'ayant pas des revenus très élevés, cela fait de celui-ci, une zone très propice à une étude quantitative de l'effet de différentes stratégies d'atténuation des ICU.

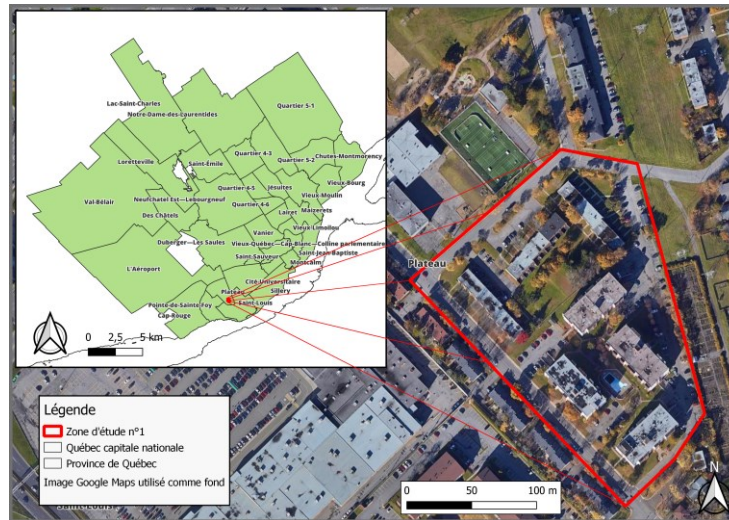


Figure 19 : la zone d'étude numéro une se situant au sein du quartier du Plateau de la ville de Québec, capitale nationale.

Le second choix est une zone se trouvant au niveau du quartier de Saint-Roch (**Figure 20**), situé à l'ouest proche du quartier adjacent qui est Saint-Sauveur ($46^{\circ}48'47.9''N$ $71^{\circ}13'39.0''W$) et se trouve à une altitude de 8 m. Ce lieu a été choisi pour son emplacement, dans une zone très urbanisée, dense, des voiries étroites, un trafic assez soutenu au niveau des transports routiers et des habitants. Le trafic est principalement dû au Boulevard Charest Est, qui se situe à l'extrémité sud du lieu d'étude et la présence d'une multitude de bâtiments ayant des fonctions différentes (cinéma, restaurant, résidentiel, commercial, etc.). C'est une zone très intéressante du point de vue de sa faible couverture végétalisée et de sa faible superficie pour celle-ci au niveau du sol, mais aussi du comportement des différentes conditions climatiques au sein d'un paysage urbain typique des centres-villes, qui en fait une zone de prédilection pour cette étude. Ainsi qu'un bon sujet de comparaison avec l'autre lieu d'étude.



Figure 20 : la zone d'étude numéro deux se situe au sein du quartier Saint-Roch de la ville de Québec, capitale nationale.

3.2.2. Choix des stratégies de mitigation

Étant donné du choix des lieux et de certains critères au niveau de ces différentes solutions de mitigation telles que la durabilité, le temps d'intégration (comprenant sa pose et en ce qui concerne le verdissement, le développement de la végétation), le niveau de destruction occasionné pour la mise en place et la résilience. Quatre solutions de mitigations ont été choisies pour une première approche. Celles-ci sont :

- Le verdissement par toits verts extensifs ;
- Le verdissement par murs verts vivants ;
- Les chaussées fraîches ;
- Les toitures fraîches.

3.2.2.1. Toits verts extensifs (*Extensive Green Roof – EGR*)

Les toitures vertes extensives se définissent comme une fine couche de végétation recouvrant le toit, en comparaison avec la toiture verte intensive (IGR : *Intensive Green Roof*) qui, elle permet l'implémentation d'une végétation plus haute avec des arbustes, des buissons. Les grosses différences entre les deux lors du choix des stratégies adopté sont les coûts pouvant être de cinq à vingt fois le prix d'un EGR par rapport à un IGR (Boucher, 2006) et la refonte intégrale du toit qui permet de soutenir le poids de l'IGR. De plus, les EGR peuvent, sans modification préalable du toit de soutenance, être installés (Iaria et al., 2022). D'un point de vue écologique, les EGR permettent une filtration des particules volatiles de l'air, une réduction des gaz à effet de serre (CO_2), tout en produisant de l'oxygène qui provient du processus de la photosynthèse, une diminution du ruissellement de l'eau au niveau du sol en captant celle-ci et ainsi qu'un développement de nouvelles niches écologiques. Cette stratégie augmente la durabilité des toitures en réduisant drastiquement le stress thermique de celle-ci. De plus, au niveau économique, elle diminue la demande énergétique par la réduction des températures de surface (Han et al., 2023).

3.2.2.2. Murs verts vivants (*Living Wall – LW*)

Les murs verts vivants se définissent comme une couche de végétation recouvrant le mur, mais ayant un support sur celui-ci à l'aide de technique d'attache et d'un substrat (Han et al., 2023). Ce qui est différent d'une autre catégorie de murs verts qui sont les façades vertes (GF : *Green Façade*). Les GF ne s'encrent pas au mur, mais sont des plantes qui poussent au niveau du pied du bâtiment afin que durant leur développement celles-ci viennent grimper sur le mur. D'un point de vue, temps d'intégration, les GF prennent plus de temps à se développer, alors que LW peuvent être installés assez rapidement sans demander un temps d'attente au niveau du développement. Les points cruciaux entre les deux sont les coûts et l'espace de plantation au niveau du sol pour les GF. Pour ce qui est des avantages écologiques et économiques, ainsi que pour la durabilité, ils sont généralement les mêmes que pour les toitures vertes.

3.2.2.3. Chaussées fraîches (*Cool Pavement – CP*)

Les chaussées fraîches sont basées sur l'augmentation de la réflexion par le remplacement des matériaux standards par des matériaux hautement réfléchissants sur la chaussée (Nwakaire et al., 2020). L'utilisation de ce type de matériaux affecte par leur propriété de réflectance élevée en ondes courtes et d'émission élevée en ondes longues (Elnabawi et al., 2022), généralisée à l'aide de l'indice de réflexion solaire (IRS), la capacité à absorber et à retenir l'énergie thermique au sein des matériaux. Ce qui en résulte une diminution de la température de surface, ainsi que la diminution de la température de l'air ambiant au niveau de l'UCL (Elnabawi et al., 2022; Ghenai et al., 2023; Pisello et

al., 2013). Donc ça permet l'amélioration du confort urbain. De plus, l'utilisation de ce type de matériau diminue l'amplitude des stress thermiques améliorant sa durabilité. Les inconvénients majeurs sont sa capacité d'éblouissement, son esthétisme, les coûts de modification et ainsi que la destruction parfois obligatoire de l'ancien matériau. Il existe plusieurs techniques d'augmentation de la réflectivité (Qin, 2015). Pour ce qui est des chaussées en asphalte, il y a : agrégat de couleur claire (Anak Guntor et al., 2014), l'enduit superficiel d'usure (Pomerantz et al., 2003) et la peinture à forte réflectivité dans le proche infrarouge (Xie et al., 2019). Pour ce qui est du béton, il y a : augmentation de l'albédo du béton en hydratant celui-ci lors de sa conception (Levinson et al., 2002), remplacement partiel du ciment Portland par des scories et des cendres volantes (Boriboonsomsin et al., 2007) et le revêtement blanc (*Whitetopping*) (Sultana, 2010).

3.2.2.4. Toitures fraîches (*Cool Roof – CR*)

Les toitures fraîches partagent exactement les mêmes propriétés de fonctionnement sur l'augmentation de la réflectivité que les chaussées fraîches (Han et al., 2023). Ils permettent une diminution de la demande énergétique du bâti. De plus, les avantages que procurent les CR se propagent au-delà de l'échelle du bâti, puisqu'il existe des effets ressentis à des échelles allant de la rue à la ville (Elnabawi et al., 2022). Il existe plusieurs techniques d'augmentation de la réflectivité : l'application d'enduit qui est spécifique au revêtement de base, l'application de mousses artificielles, application de couverture multicouche (BUR), le bitume modifié, ainsi que les membranes monocouches (Zinzi, 2010).

3.2.3. Configuration du modèle numérique sur ENVI_met

Le logiciel ENVI_met a été utilisé pour réaliser les simulations des différentes zones d'étude en fonction des différents scénarios. Il se base sur le modèle SVAT (Sol, Végétation et Atmosphère Transfère). Cet outil permet la modélisation tridimensionnelle du microclimat notamment, mais pas exclusivement des milieux urbains, en prenant en compte le comportement des différents milieux et les interactions entre les divers éléments du milieu, tels que l'atmosphère, le sol, les structures anthropiques, la végétation, les éléments aquatiques, ainsi que les sources de pollution. Le modèle permet la simulation de variables climatiques régulièrement étudiées comme la température de l'air ambiant, l'humidité relative et la vitesse du vent (ENVI_met, n.d.). La version utilisée est la V5.5.1, licence étudiante, celle-ci est payante et permet la simulation d'éléments de verdissement.

La démarche à suivre afin de réaliser les simulations est : (1) créer un fichier ENVI_met *Spaces* (.INX) reprenant la construction de modèles tridimensionnels, (2) encoder les données météorologiques du terrain au sein d'un fichier ENVI_met *Forcing Manager* (.FOX), (3) paramétrer la simulation telle que la date et l'heure de début et le temps de simulation, quels fichiers .INX utilisés, quelles variables météorologiques doit être forcées et le tout enregistré dans un fichier ENVI_met *ENVI-guide* (.SIMX) et (4) lancement de la procédure de vérification et du début de la simulation à l'aide de *ENVI-core*. L'application *Leonardo* intégrée à ENVI_met a été utilisée pour extraire les résultats des différentes simulations.

3.2.3.1. Modélisation des zones d'étude

Pour représenter le lieu d'étude, il a fallu créer une *bitmap* de chaque lieu à l'aide du logiciel QGIS. Reprenant des données de voiries, d'infrastructures publiques, d'emprise des bâtiments, d'inventaires d'arbres, de modèles numériques de terrain (MNT), ainsi que des modèles de hauteur de canopée (MHC). Ce dernier a servi pour prélever la hauteur de chaque bâtiment. Une échelle a été implémentée permettant d'ajuster la zone au sein de l'espace de modélisation dans la partie *Spaces* de ENVI_met, afin d'avoir les bonnes dimensions. Les bitmap sont reprises au sein de la **Figure 21**, ci-dessous :

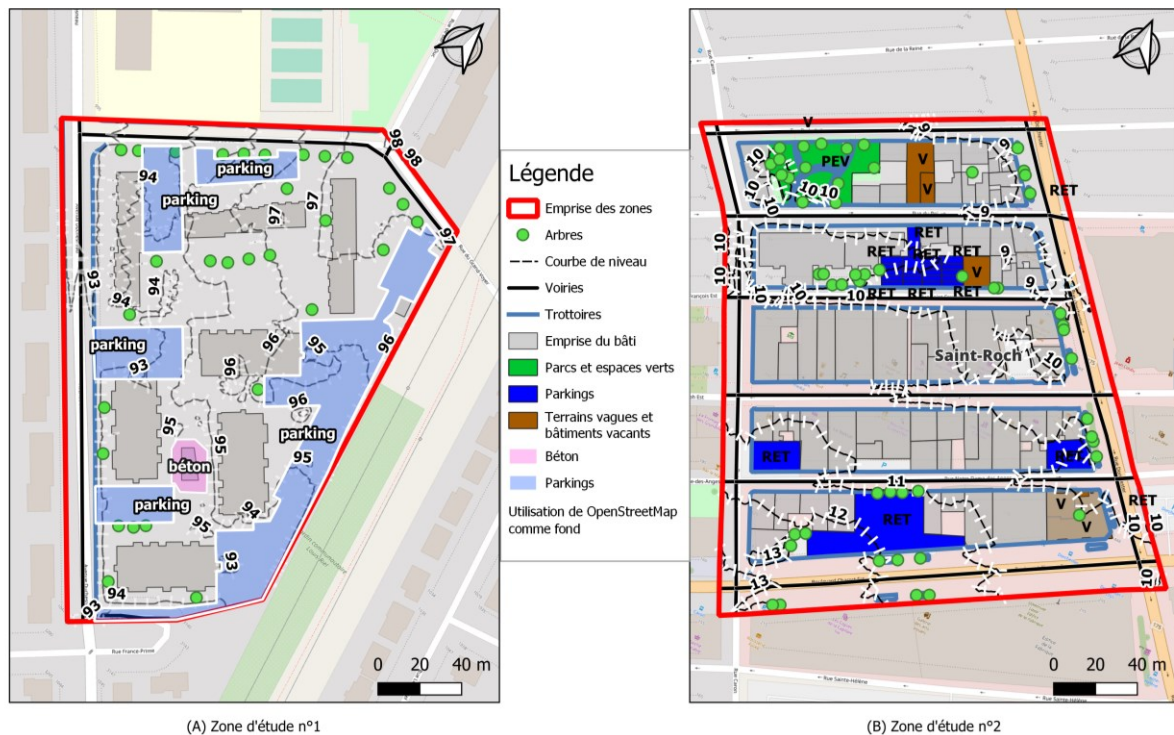


Figure 21 : bitmaps créés sur QGIS afin de construire le modèle tridimensionnel sur Spaces d'ENVI_met.

À l'intérieur de l'interface de *Spaces*, dans les paramètres du modèle, la localisation de la zone, la géométrie du modèle et l'altitude par rapport à la mer sont à encoder. La localisation et l'altitude sont propres à chaque zone d'étude. En ce qui concerne la géométrie d'entrée, elle sera la même pour les deux zones. La grille est constituée de $50(x) \times 50(y) \times 40(z)$ cellules avec une largeur/profondeur de 5 m et une hauteur de 1.75 m. La seule chose qui est différente est la rotation du modèle par rapport à la direction nord des bitmaps (-25° pour la zone n°1 et -43° pour la zone n°2). Important à noter, lorsqu'un modèle possède des bâtiments proches de ses limites, il se peut que la simulation plante pour anomalie dans les valeurs de sortie. Car les cellules proches des limites ne peuvent pas refléter les influences de la même manière que celles situées à l'intérieur du modèle. L'ajout de cellules d'imbrications (*nesting cells*), qui sont considérées comme des cellules fictives dans le modèle, est conseillé et permet ainsi de déplacer la frontière du modèle. Vu l'apparition de ce problème au sein des simulations de la zone d'étude n°2, il a été décidé de rajouter trois cellules d'imbrications à celle-ci. Pour ce qui est des matériaux, au niveau de la surface, des murs et des toitures des bâtiments (lors de la modélisation des zones d'étude dans le cas sans stratégie d'atténuation des ICU), ils ont été tous utilisés et proviennent de la database du logiciel, sans modification. C'est de même pour la végétation et le type de sol. La liste des différents matériaux et types de sols utilisés au sein des deux zones est reprise dans le **Tableau 7** ci-dessous :

Tableau 7 : liste des matériaux, des sols et des plantes utilisés au sein des deux zones d'étude.

Élément	ENVI_met ID	Description
<i>Natural surfaces</i>	000000	<i>Default Sandy Loam</i>
<i>Roads and Pavements</i>	0200ST	<i>Asphalt Road</i>
	0200PG	<i>Concrete Pavement Gray</i>
<i>Special Surfaces</i>	CELLAR	<i>Default soil profile underneath a building</i>
<i>Grass</i>	0200XX	<i>Grass 25 cm aver. Dense</i>
<i>Wall/Roof Constructions</i>	000000	<i>Default Wall/Roof – moderate insulation</i>

3.2.3.1.1. Zone d'étude n°1

Le modèle de la zone n°1 comprend 14 bâtiments. Ils sont constitués de matériaux de base pour les toitures et les murs. La taille du bâti peut aller de 4 m à 19 m. La partie nord de la zone est constituée majoritairement de bâtiments ayant une hauteur de 6 m. Alors que la partie sud, se démarque avec une hauteur de 14 – 15 m. Il y a une vraie différence entre la partie sud et nord, ce qui peut amener à des résultats très distincts au sein du milieu, principalement pour l'effet de CR et de GR. La végétation est principalement composée d'herbes et d'arbres au nombre de 30. L'essence de ces arbres est le *Norway Maple (young)* [010030] avec une hauteur de canopée de 9.89 m et une superficie de 35.4 m², communément appelé Érable plane. La modélisation tridimensionnelle de cette zone est visualisable à partir de la **Figure 22** et la disposition des bâtiments et de la végétation, ainsi que la hauteur de chaque bâtiment est reprise par un modèle bidimensionnel dans la **Figure 43** au sein des **Annexes [7.3]**.

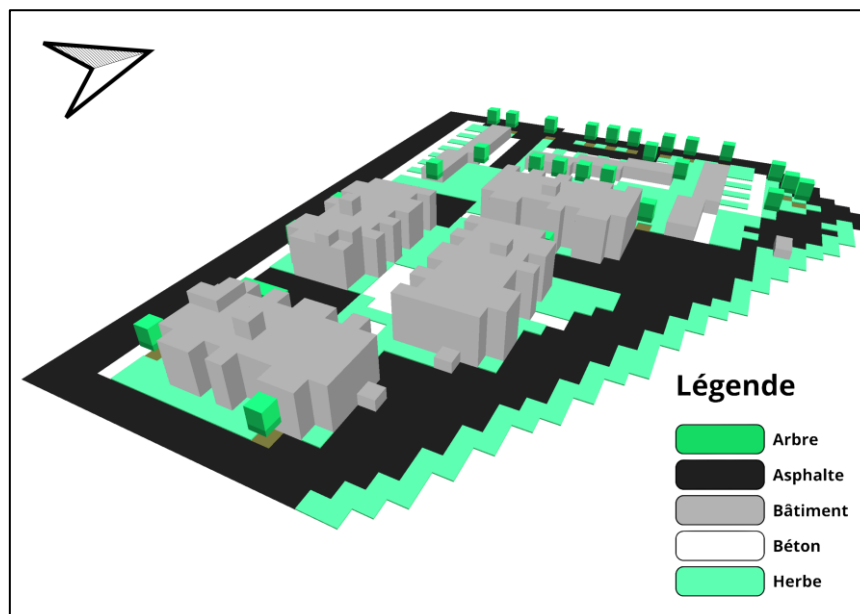


Figure 22 : Modèle tridimensionnel de la zone d'étude n°1.

3.2.3.1.2. Zone d'étude n°2

La zone n°2 reprend 60 bâtiments ayant des tailles diverses, allant de 4 m à 28 m. La distribution spatiale de la hauteur du bâti est très hétérogène, ce qui représente conformément la géométrie urbaine classique d'un centre ville. En ce qui concerne la végétation, il y a au sein de la zone, un espace vert, comprenant la majorité des arbres de grandes tailles. Il existe quand-même d'autres arbres distribués au sein de la zone, mais qui ont une taille bien plus petite. Le nombre d'arbres s'élève à 46, comprenant 11 essences forestières différentes, venant des données d'inventaire du Québec. La liste des différents arbres implémentés dans le modèle est disponible dans le **Tableau 8**. La modélisation tridimensionnelle de cette zone est visualisable à partir de la **Figure 23** et la disposition des bâtiments et de la végétation, ainsi que la hauteur de chaque bâtiment est reprise par un modèle bidimensionnel dans la **Figure 44** au sein des **Annexes [7.4]**.

Tableau 8 : liste des différents types d'arbres utilisés au sein du modèle tridimensionnel de la zone n°2

Nom	ID	Hauteur (m)	Superficie (m ²)
<i>Norway Maple (young)</i>	010030	9.89	35.4
<i>Norway Maple (middle)</i>	020030	14.82	164.6
<i>Cylindric, small trunk, dense, small</i>	02OSDS	5	9

<i>Cylindric, medium trunk, dense, small</i>	020MDS	5	9
<i>Common Ash (middle)</i>	020080	15.52	89.47
<i>LEGACY : Fraxinus</i>	0000CC	18	121
<i>LEGACY : Fraxinus Excelsior</i>	0000B5	20	121
<i>Flower-/ Manna-Ash (middle)</i>	020180	13.45	98.9
<i>LEGACY : Pinus Pinea</i>	0000PP	15	121
<i>Pinus Tree</i>	010027	10.47	23.1
<i>Wild Cherry Plena (middle)</i>	020140	11.87	56
<i>Swedish Whitebeam (middle)</i>	020130	15.8	37.7
<i>Little Leaf Lime (young)</i>	010010	9.77	26.5
<i>LEGACY : Ulmus Hollandica</i>	0000B6	10	25
<i>LEGACY : Ulmus Minor</i>	0000E1	20	361
<i>Dutch Elm (old)</i>	030120	21.02	36.6

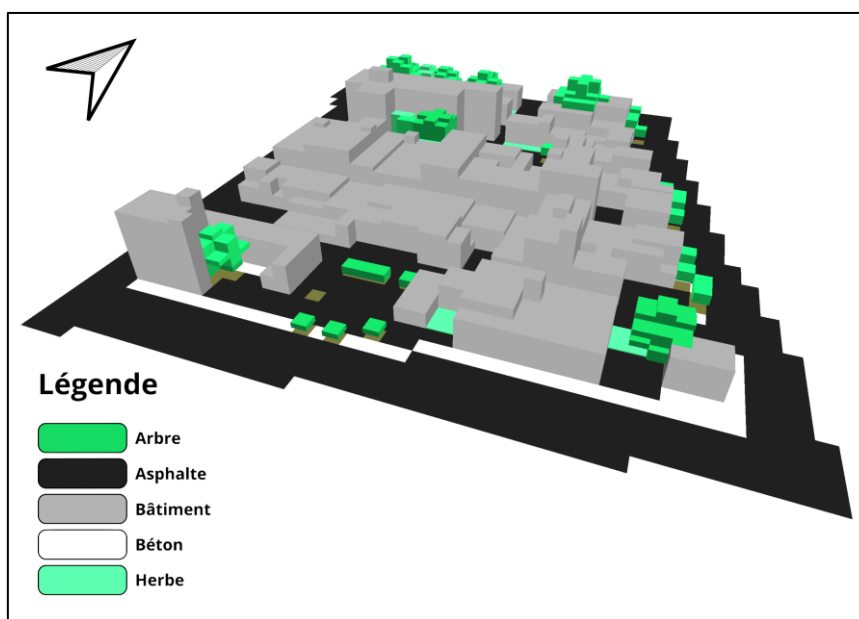


Figure 23 : Modèle tridimensionnel de la zone d'étude n°2.

3.2.3.2. Scénarios d'atténuation d'ICU

Comme précédemment évoqué, au sein de cette étude, quatre types de stratégie d'atténuation des ICU sont testés, comparés entre eux et entre les deux zones d'étude. Les modifications apportés aux matériaux et au terrain permettant de représenter ces différentes solutions sont :

- Pour le scénario (A), il y a implémentation de toitures vertes au bâti à l'aide de l'option Greenings d'ENVI_met, reprenant le verdissement par défaut avec un substrat sablo-limoneux et une zone d'air entre la toiture et le substrat, servant d'isolant. Le seul paramètre qui a été modifié est l'augmentation du LAI (*Leaf Area Index*) à une valeur de 3, ce qui est repris de manière générale dans la littérature permettant de diminuer plus efficacement les ICU (Iaria et al., 2022).
- Pour le scénario (B), il y a implémentation de murs vivants au bâti. Il n'y a aucune différence au niveau du matériau utilisé par rapport au scénario (A).

Les murs verts et les toitures vertes ont été installés où c'était propice à leur mise en place par visualisation préalable sur Google Earth.

- Pour le scénario (C), il y a modification de la réflectance au niveau de la chaussée. Les changements apportés sont une augmentation de l'albédo du matériau *Asphalt Road* et du matériau *Concrete Pavement Gray* d'une valeur de 0.12 à 0.5 et de 0.3 à 0.7 respectivement.
- Pour le scénario (D), il y a modification de la réflectance au niveau de la toiture du bâti. Le *Default Wall/Roof – moderate insulation* s'est vu modifier sa couche de *Default Plaster [0200PL]* en modifiant l'absorption et la réflectance, passant de 0.6 à 0.2 et de 0.4 à 0.8 respectivement.

L'ensemble des modélisations des différents scénarios sont repris dans les **Figure 24** et **Figure 25** :

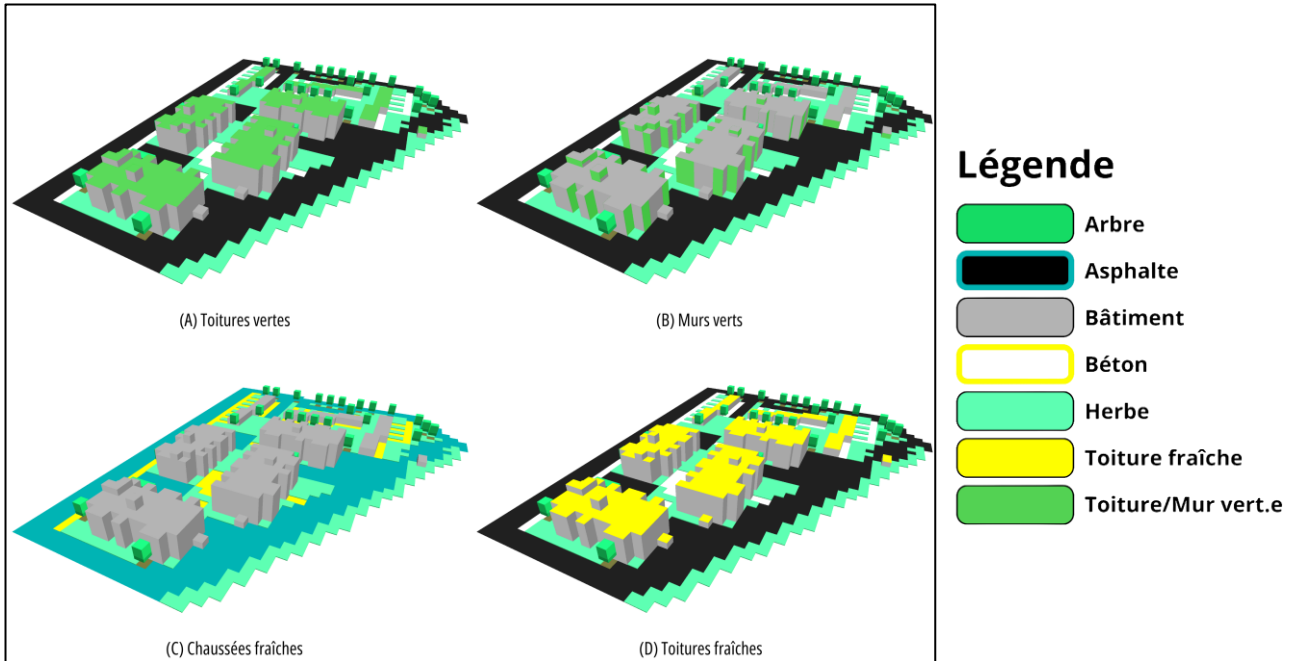


Figure 24 : modèles tridimensionnels représentant chaque scénario de mitigation pour la zone d'étude n°1.

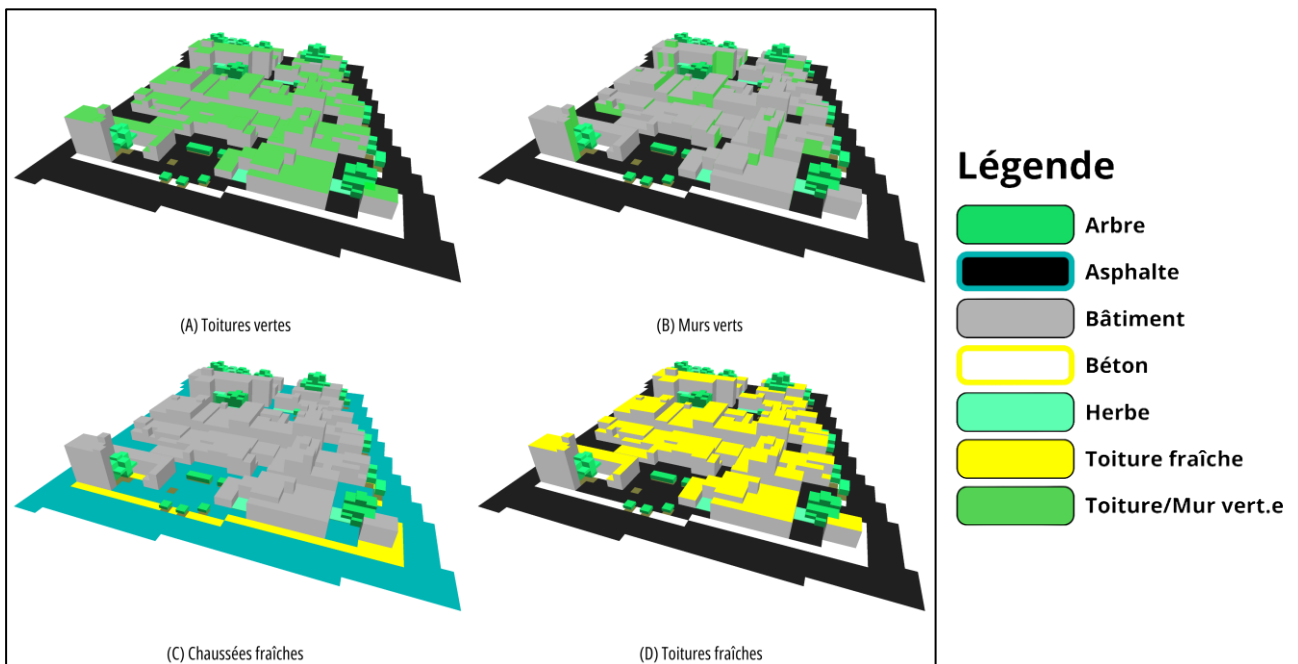


Figure 25 : modèles tridimensionnels représentant chaque scénario de mitigation pour la zone d'étude n°2.

3.2.4. Données météorologiques

Les données météorologiques servant au forçage, à la limite du modèle, ont été encodées grâce aux mesures effectuées par différentes stations météorologiques de la ville de Québec. Il n’y a pas eu de prélèvement direct sur site afin d’avoir la meilleure représentation spatiale et temporelle des conditions climatiques durant notre simulation. Il a donc fallu chercher des stations météorologiques étant les plus proches des lieux d’étude. Ce qui a aussi été un critère lors du choix des différentes zones. La **Figure 26** permet de visualiser l’emplacement des différentes stations météorologiques disponibles et étant proches des zones. Henry IV est la station la plus proche de la zone d’étude n°1, mais est située au niveau d’une autoroute. Elle est sujette à mesurer des données qui seront fortement influencées par le trafic routier, modifiant le profil de vent, sa direction, dû aux turbulences occasionnés, ainsi que l’augmentation de la température et l’humidité relative. Ce qui rend la station inapte à notre étude. Pour pallier ce problème, la station de L’ULaval a été choisie comme remplaçante, se situant à une distance à vol d’oiseau de 2250 m, par comparaison la station Henry IV se situe à 1600 m. Étant quand-même proche d’une Avenue, son emplacement se trouve au niveau des parkings du Centre de Foresterie des Laurentides et entourée de champs expérimentaux. Les mesures météorologiques se font à une hauteur de 10 m pour le vent et 2 m pour la température et l’humidité. Pour la zone n°2, c’est la station St-Sauveur qui est la plus proche, 400 m, et se trouvant en plein milieu urbain, caractérisant correctement la zone d’étude. Les mesures météorologiques se font à une hauteur de 4 m pour l’ensemble des données.

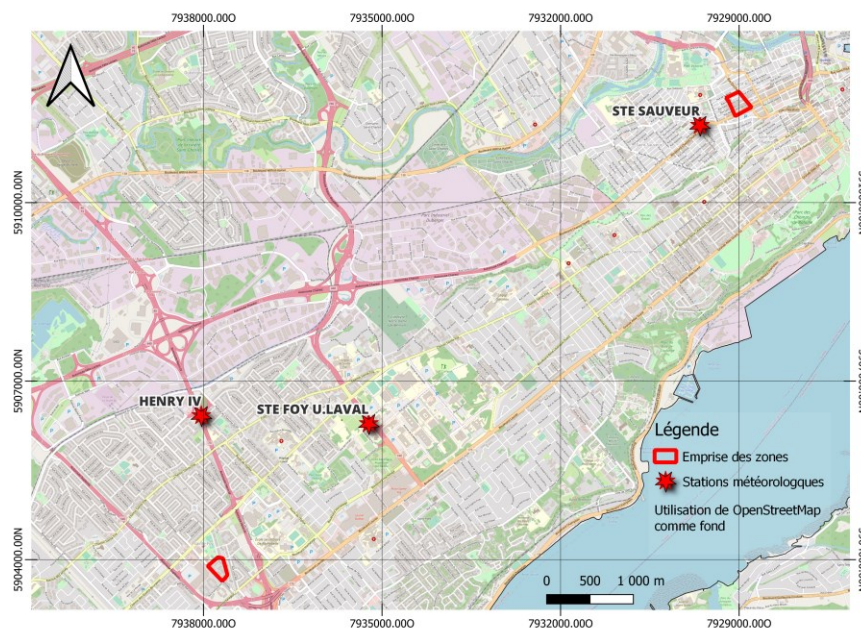


Figure 26 : Disposition spatiale des différentes stations météorologiques proches des différentes zones d’étude.

Pour ce qui est des données nécessaires au bon fonctionnement des simulations, il est demandé d’encoder des valeurs de température, d’humidité relative, de direction et de vitesse du vent. Il peut être aussi possible d’encoder le rayonnement solaire direct et diffus ainsi que la hauteur de précipitation. L’ensemble des valeurs encodées ont été forcées par le logiciel au cours des simulations. En ce qui concerne l’ensoleillement et les précipitations, le forçage n’a pas été réalisé, car pas de données disponibles du rayonnement solaire au niveau des stations météorologiques et les précipitations étaient nulles durant la plage temporelle choisie. Les différentes données ont été collectées grâce à celles disponibles sur le site Environnement Canada pour la station ULaval (Environnement et Changement climatique Canada, 2011) et par le service en ligne d’Info-Climat pour

les dernières stations (MELCCFP, 2022). Il est important de vérifier les changements de direction et la vitesse du vent au cours du temps, car si ces changements se font de façon trop abruptes (plus de 90°) ou la présence d'une vitesse trop faible, cela peut créer de l'instabilité au niveau de la simulation provoquant des erreurs et donc l'arrêt de la simulation. Lors des détections de changement trop important, une moyenne est réalisée en prenant la valeur précédente, à risque et suivante. Finalement l'ensemble est enregistré dans un fichier de type .FOX.

3.2.5. Paramétrage d'initialisation

Les simulations débuteront le 16 juillet 2022 à 18h00 et finiront le 18 juillet 2022 à 00h00, ce qui représente un temps de simulation de l'ordre de 30h. Les six premières heures sont importantes, elles servent de période transitoire afin d'obtenir des résultats plus précis pour la journée d'intérêt. Le choix de cette période de simulation est en phase avec la période la plus chaude enregistrée à Québec, l'été 2022. Le pas de temps encodé pour l'ajustement du flux de vent est maintenu à sa valeur de défaut ainsi que les pas de temps dynamiques, pour ne pas risquer un problème d'instabilité. Il est possible de jouer avec ces paramètres permettant une réduction du temps de simulation. La moyenne de temps enregistrée pour l'ensemble des simulations est de 21h.

4. Résultats

4.1. Modèles prédictifs des ICU au Québec

4.1.1. Performances des modèles entraînés

L'objectif de cette section de l'étude est d'évaluer si le choix d'utiliser un modèle de *Random Forest*, fait par le CERFO, constitue la meilleure option en comparaison avec d'autres types de modèles de régression. À cette fin, cinq modèles ont été entraînés puis validés à l'aide d'un jeu de données de test, permettant d'évaluer la performance d'un modèle en présence de nouvelles données. Cette performance a été quantifiée au moyen de mesures statistiques telles que le RMSE et le R^2 . Un modèle présentant un RMSE se rapprochant de 0 et un R^2 proche de 1 est considéré comme statistiquement robuste et performant. Le **Tableau 9** présente l'ensemble des résultats issus du processus de validation de chaque modèle. Il est notable que tous les modèles de *Gradient Boosting* affichent les meilleures performances. Comparativement, les modèles SVR et MLP présentent des résultats similaires, mais en deçà en termes de performance brute. La **Figure 27** représente la distribution des écarts de températures observés repris dans le jeu de test en fonction des données prédites par chaque modèle.

Tableau 9 : performance de chaque modèle quantifié à l'aide du RMSE et du R^2 .

Modèle	RMSE	R^2
SVR	2.169	0.763
MLP	2.168	0.763
XGBoost	1.812	0.834
LightGBM	1.833	0.831
CatBoost	1.808	0.835
Random Forest-CERFO	1.99	0.81

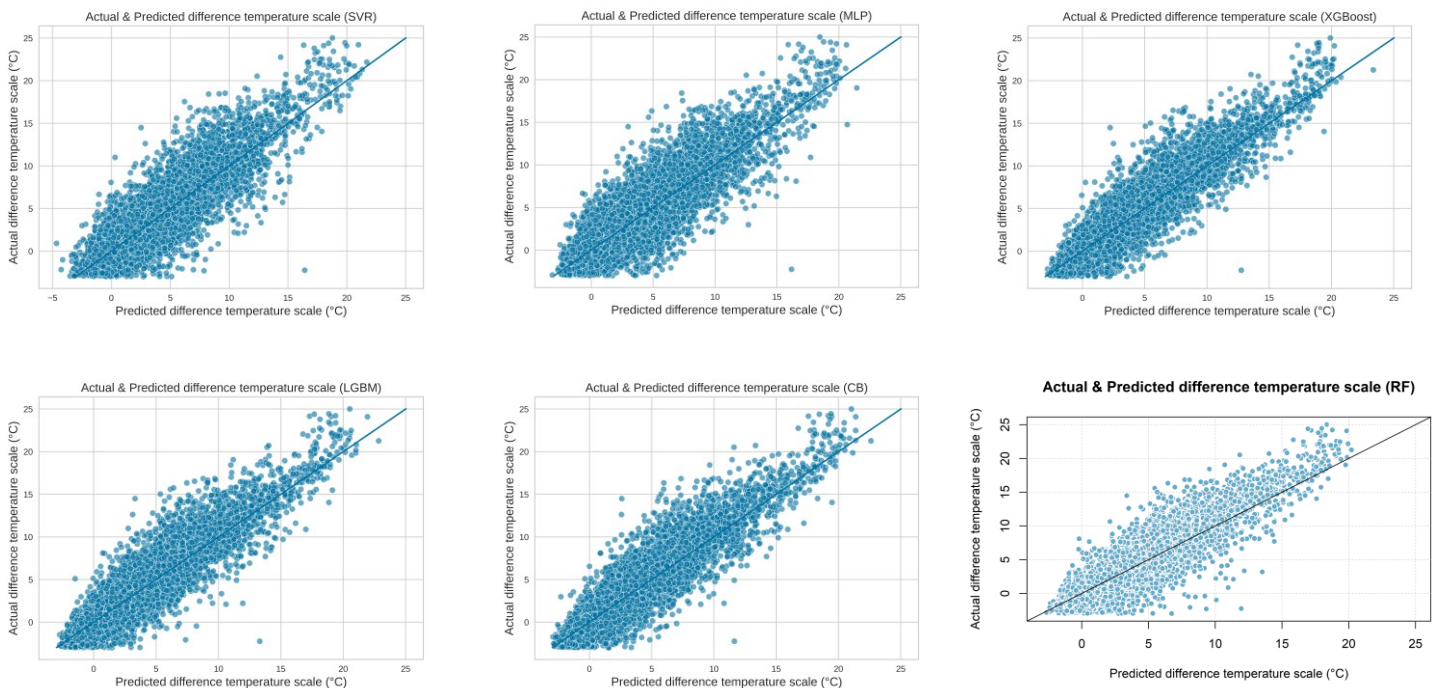


Figure 27 : l'écart de température réel en fonction des valeurs prédites par chaque modèle. La ligne représentant une modélisation parfaite est représentée avec une ordonnée à l'origine de 0 et une pente de 1.

Une analyse statistique a permis d'extraire la valeur explicative de chaque variable, à l'aide de permutation, au sein des différents modèles (**Figure 28**). La latitude (y) est la variable qui explique le plus les variations d'écart de température réelle, qu'importe le modèle. Le top cinq est suivi par la distance à la végétation arborescente, la semaine (plus spécifiquement la 26e), la longitude (x) et l'altitude en ce qui concerne les modèles de *gradient boosting*. Pour SVR et MLP, l'altitude se voit moins expliquer les variations, ce sont les indices spectraux de manière générale qui expliquent davantage celles-ci. Une variable ayant une importance égale à zéro, indique que celle-ci n'est pas utile pour la prédiction.

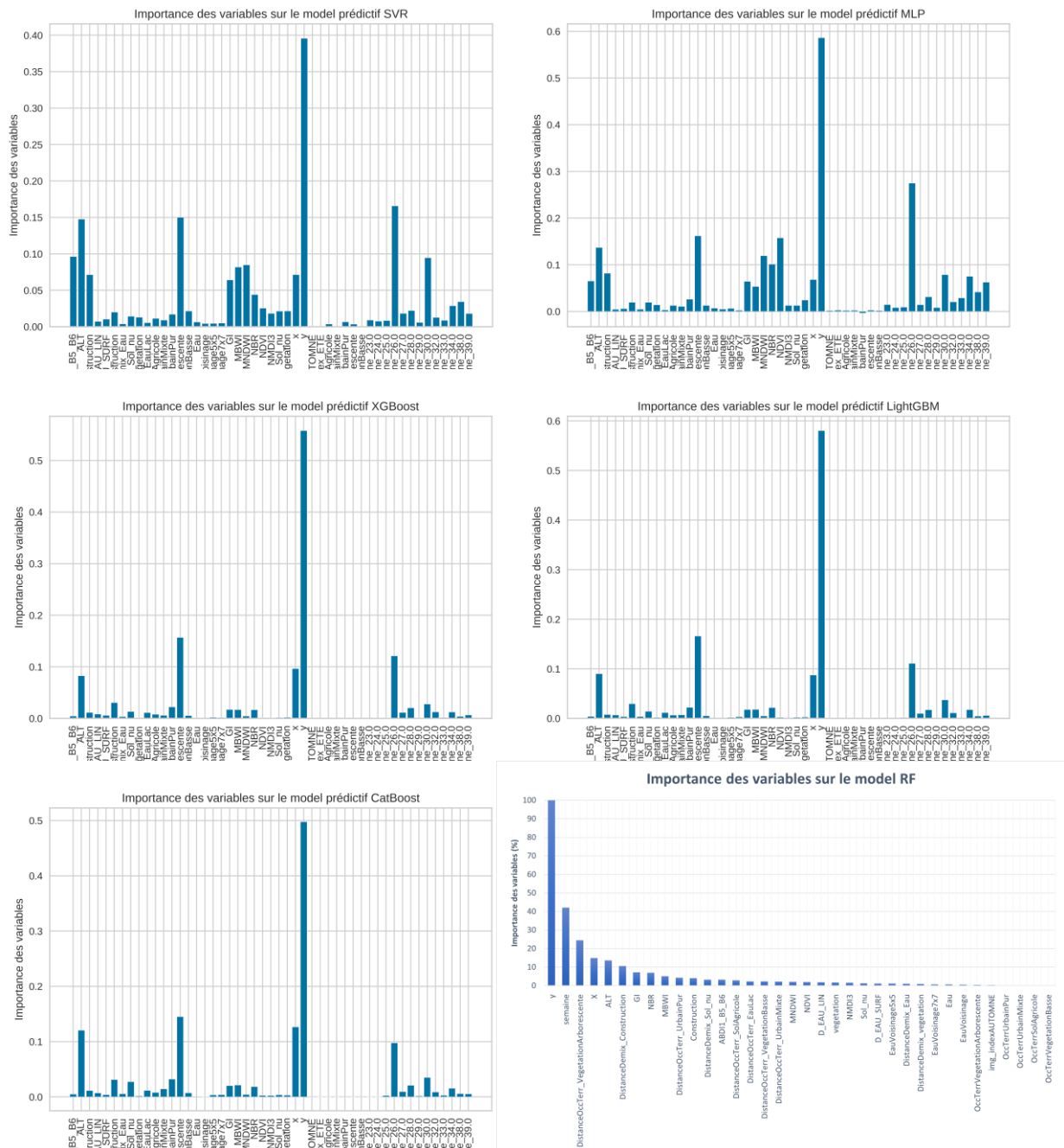


Figure 28 : L'importance explicative de chaque variable en fonction du modèle de régression utilisé.

4.1.2. Étude statistique des résidus par rapport à l'occupation du terrain

Étant donné l'impossibilité d'effectuer des comparaisons au moyen d'une carte de référence des écarts de température, une étude statistique a été entreprise pour analyser la distribution des résidus provenant des diverses occupations du terrain. Les représentations graphiques des résidus en fonction de l'écart de température, ainsi que leurs distributions sont reprises au sein des **Figure 45** et **Figure 46** dans les **Annexes [7.5,7.6]**. En sachant que les ICU sont principalement situés au sein des zones urbaines, c'est un bon moyen d'évaluer la performance des modèles. De plus, cette étude vise à évaluer la présence d'anomalies dans la distribution des écarts de température et à effectuer une comparaison de la performance de chaque modèle par rapport au modèle de référence. De manière générale, l'occupation du terrain représentant les zones urbaines pures sont plus sujettes à de l'erreur, ainsi que les zones urbaines mixtes (**Figure 29**). En termes de performance, les modèles de *gradient boosting* sont nettement meilleurs au sein de ces zones que les autres. Le SVR et le MLP présentent plus d'erreurs dans chacune des différentes occupations du terrain en comparaison avec le modèle de référence. Les différences en termes de MAE par rapport au modèle de référence se trouvent dans la **Figure 30**. Le XGB se voit être le meilleur modèle permettant de prédire les écarts de température au niveau des zones urbaines.

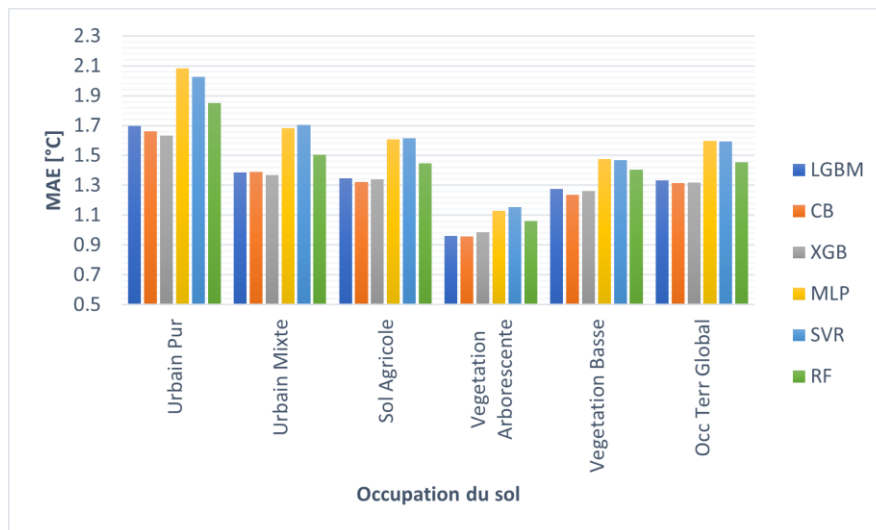


Figure 29 : MAE des différents modèles repris dans cette étude en fonction des différentes occupations du terrain.



Figure 30 : Différence des MAE de chaque modèle par rapport au modèle de référence.

La même étude est réalisée, mais cette fois-ci à partir des différents quantiles. Le but est de calculer le MAE pour les valeurs inférieures au premier quartile (q1), supérieur au troisième quartile (q3) et entre le premier et le troisième représentant la moyenne (q2). Cela permet de mieux comprendre le comportement de chaque modèle lorsqu'ils doivent prédire de grandes valeurs ou à l'inverse de petites valeurs qui se trouvent ne pas être abondantes. De manière générale, il y a une tendance à l'augmentation de l'erreur plus la valeur de l'écart de température croît (**Figure 31**). La différence montre que dans les zones urbaines, au niveau du premier quartile, les gradient boosting ont relativement le même comportement de prédiction que le *random forest*, pour ce qui est du q2 et du q3, il y a une nette amélioration (**Figure 32**). Pour ce qui est du SVR et du MLP, leurs performances sont toujours inférieures, qu'importe le quartile.

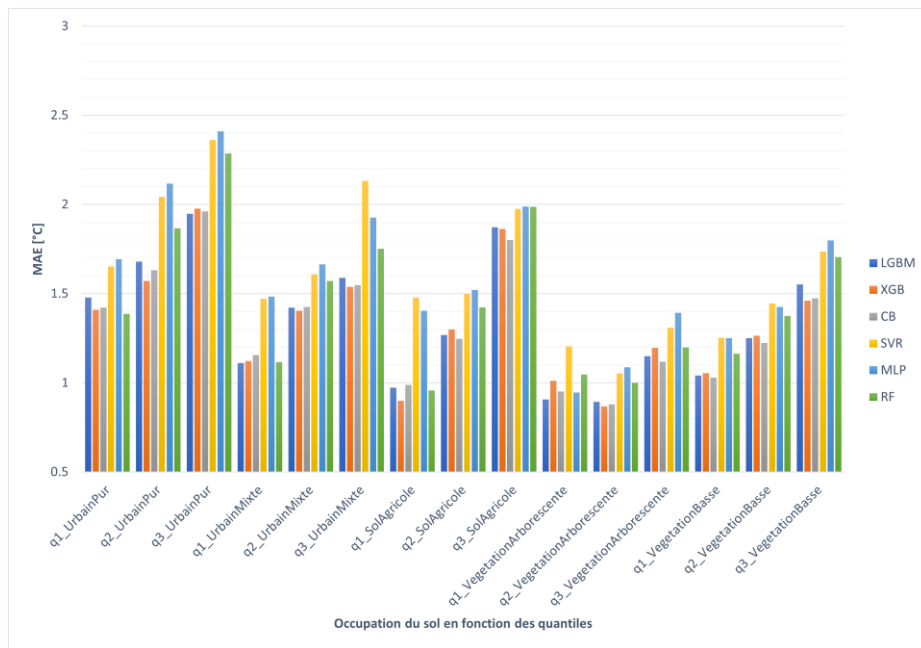


Figure 31 : MAE des différents modèles, par rapport aux quartiles, repris dans cette étude en fonction des différentes occupations du terrain.

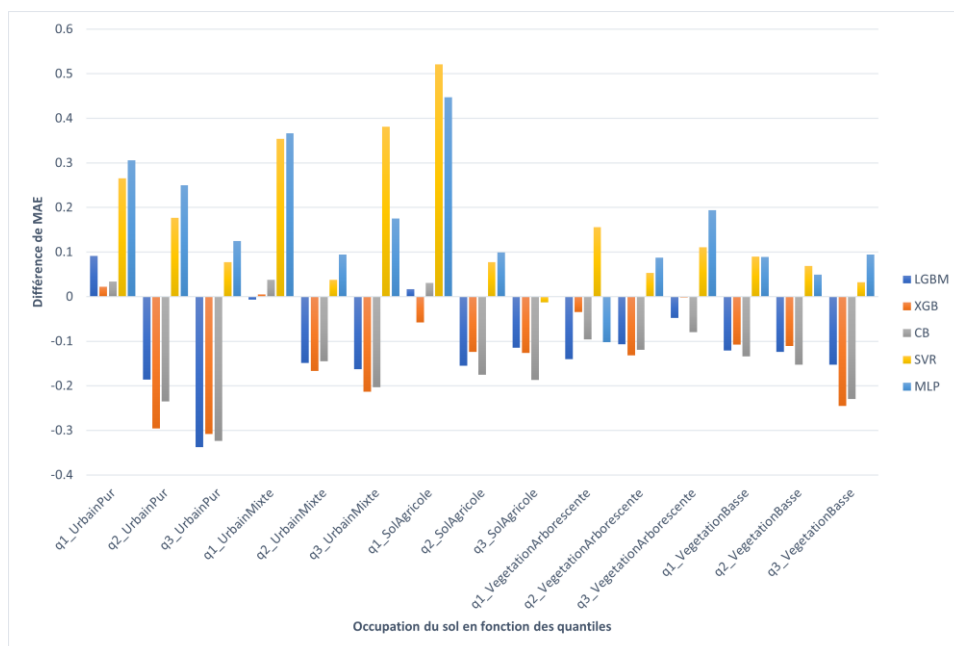


Figure 32 : Différence des MAE de chaque modèle, en fonction du quartile, par rapport au modèle de référence.

4.2. Etude quantitative de l'effet d'atténuation des SMICU

Au sein de cette section, l'étude quantitative de l'effet d'atténuation des SMICU est présentée à l'aide de deux paramètres expliquant le mieux les variations : (1) la température et (2) la vitesse du vent. Chaque résultat est représenté suivant trois horaires différents : (1) 13h, (2) 18h et (3) 22h. Ce qui permet d'avoir une représentation spatiale et temporelle de l'évolution de l'effet de refroidissement. De plus, la hauteur de comparaison se fait à hauteur de 1.575 m (intrinsèque au logiciel *Leonardo*), à une échelle piétonne. Il est important de noter que les valeurs en bordure doivent être rejetées, car elles ne représentent pas la réalité et sont intrinsèquement liées aux conditions aux limites définies par le modèle. Chaque modèle ne représente que la zone d'intérêt, mais celle-ci est entourée par d'autres infrastructures qui influencent également le comportement des conditions climatiques dans la zone. Ces infrastructures ne sont pas représentées, car elles n'auraient été que partiellement incluses et auraient été trop proches des frontières du modèle, créant de l'instabilité. De plus, l'augmentation de la zone ne fait que reporter le problème, par la présence d'autres infrastructures adjacentes. En somme, le but de cette section est de visualiser l'effet d'atténuation de chaque scénario de mitigation au scénario de base, représentant la zone sans aucune modification, afin de relever certaines conclusions sur les effets positifs ou négatifs de chaque stratégie.

4.2.1. Le comportement du vent

Le flux de vent joue un rôle majeur dans la régulation des échanges convectifs qui se déroulent au sein de l'atmosphère, ainsi que dans les échanges de chaleur entre l'air ambiant, la végétation, les bâtiments et les êtres humains. Ce flux peut être altéré par la géométrie urbaine, ayant des valeurs élevées de rugosité, ce qui joue sur la hauteur de la couche limite anémométrique. De plus, la disposition des chaussées et des bâtiments a une incidence significative sur la création de passages préférentiels de l'air ou, au contraire, sur la réduction de ces flux, créant ainsi des zones où le mouvement de l'air est limité. Le comportement du flux de vent a donc une influence nette sur la distribution de la température au sein des zones urbaines.

Pour ce paramètre, les résultats ne représenteront que le scénario de base, car la vitesse de vent ne montre aucun changement significatif par rapport aux autres scénarios. Les **Figure 33** et **Figure 34** représentent les vecteurs de vent illustrés par leur intensité dans la zone d'étude n°1 et n°2 dans un plan XY et dans un plan XZ à une valeur de 137.5 pour Y.

- Dans la zone n°1, les vitesses sont majoritairement plus élevées à 13h et décroissent au fur et à mesure de la journée. Le profil est bien influencé par la géométrie de la zone, créant des zones de flux préférentielles et réduisant considérablement la vitesse, voire totalement derrière les obstacles et dans les régions étroites ne faisant pas face vent. Il est possible de rencontrer des vents allant jusqu'à max 3.33 ms^{-1} au sein du profil vertical et jusqu'à max 2.99 ms^{-1} au sein du profil horizontal. La provenance du vent vient du SO (sud-ouest) et reste inchangée. Au sein du profil vertical, la présence d'obstacle montre bien son influence sur le profil de vent.
- Dans la zone n°2, la grosse différence est la vitesse maximale, celle-ci ne dépasse pas la valeur de 1.37 ms^{-1} . Ce qui montre bien l'influence qu'un milieu urbain dense a sur le profil de vent. La vitesse se voit être proche de nulle au sein des différentes rues constituant la zone, montrant l'influence de l'orientation du bâti sur le profil de vent. Dans le profil vertical, le profil de vent suit la morphologie urbaine, ne permettant pas une circulation optimale de l'air au sein des différentes chaussées. Ce qui tend à une augmentation de la température dans ces lieux. Au niveau de la direction, le vent vient du SO durant la journée et change de sens au début de soirée, venant du NE.

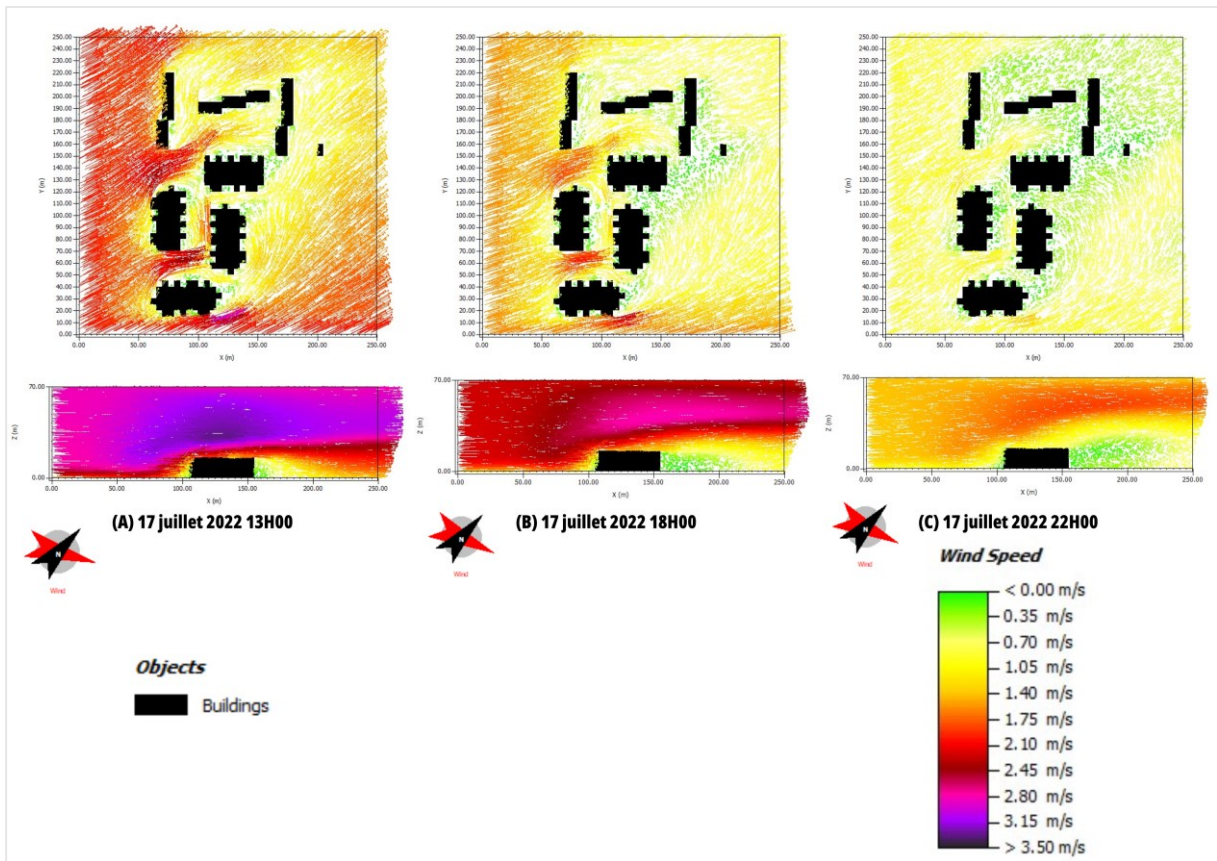


Figure 33 : distribution de la vitesse du vent et de sa direction au sein de la zone d'étude n°1 à différentes heures de la journée.

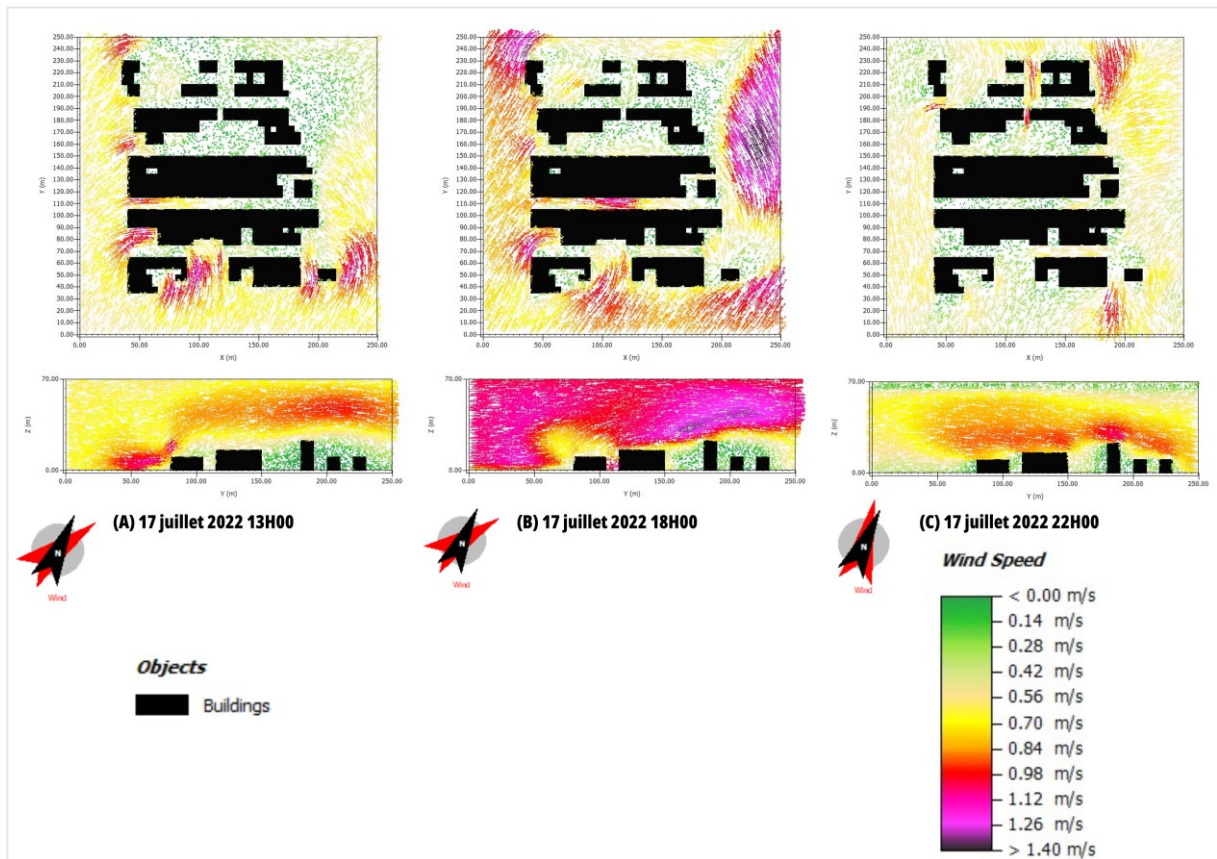


Figure 34 : distribution de la vitesse du vent et de sa direction au sein de la zone d'étude n°1 à différentes heures de la journée.

4.2.2. Comparaison de l'intensité d'atténuation sur la température

Les résultats relatifs à l'intensité d'atténuation de chaque scénario de mitigation sont quantifiés à l'aide de la différence de température de l'air ambiant entre le scénario de mitigation et scénario sans aucune modification. L'ensemble des résultats montre que la distribution spatiale est influencée par le profil de vent et sa direction au cours de la journée, ainsi qu'à la géométrie du bâti créant des formes de panache diverses.

4.2.2.1. Zone d'étude n°1 - $\Delta T^{\circ}C$

— Scénario (A) - Toitures Vertes (**Figure 35**) :

Dans ce scénario, l'effet d'atténuation est principalement localisé au niveau des toitures vertes. L'intensité maximale, atteignant environ $-0.78^{\circ}C$ à 13h, correspond à l'optimum de l'effet d'évapotranspiration. Cet effet est également ressenti au niveau du piétonnier, mais de manière moins prononcée, avec une atténuation allant jusqu'à $-0.51^{\circ}C$. L'atténuation n'est pas uniforme dans toute la zone, mais se produit principalement là où les bâtiments font face au vent, créant une réduction de température plus importante au pied des bâtiments, qui diminue avec la distance et évolue avec le profil du vent. Au fil de la journée, cet effet d'atténuation diminue progressivement. À 18h, malgré des valeurs maximales de $-0.48^{\circ}C$, la distribution est réduite en raison de la baisse de la vitesse du vent. À 22h, l'atténuation au niveau du piétonnier est au maximum de $-0.10^{\circ}C$. Pendant la nuit, les stomates des plantes se ferment pour limiter la transpiration, car la photosynthèse ne se produit plus.

— Scénario (B) - Murs Vivants (**Figure 36**) :

Dans ce scénario, l'effet de refroidissement est principalement concentré à l'emplacement des murs verts sur toute leur hauteur. L'effet est moins étendu spatialement, que dans le scénario précédent. L'intensité reste relativement constante dans le temps au niveau des HLM. Les profils verticaux dans le plan YZ montrent une intensité élevée, particulièrement dans les enclaves où la vitesse du vent est faible, permettant un effet de refroidissement prolongé tout au long de la journée, y compris la nuit. Les valeurs peuvent atteindre $-0.52^{\circ}C$ à 13h, $-0.99^{\circ}C$ à 18h et $-0.61^{\circ}C$ à 22h. Au niveau du piétonnier, l'effet est moins marqué, avec des différences de température allant jusqu'à $-0.30^{\circ}C$ à 13h et 18h, et se rapprochant de $-0^{\circ}C$ à 22h.

— Scénario (C) - Chaussées Fraîches (**Figure 37**) :

Dans ce scénario, l'effet de refroidissement se propage sur l'ensemble de la zone. L'intensité varie en fonction de la présence de matériaux frais à proximité. Les différences de température peuvent atteindre jusqu'à $-1.73^{\circ}C$ à 13h, $-0.84^{\circ}C$ à 18h et $-0.22^{\circ}C$ à 22h.

— Scénario (D) - Toitures Fraîches (**Figure 38**) :

Dans ce scénario, les résultats présentent une distribution spatiale similaire à celle du scénario (A), car les deux scénarios concernent les toits, bien que l'effet de refroidissement diffère. À 13h, l'atténuation maximale est d'environ $-0.37^{\circ}C$ au niveau du piétonnier et de $-0.48^{\circ}C$ dans le profil vertical. À 18h, les valeurs maximales sont respectivement de $-0.33^{\circ}C$ et $-0.03^{\circ}C$ à 22h.

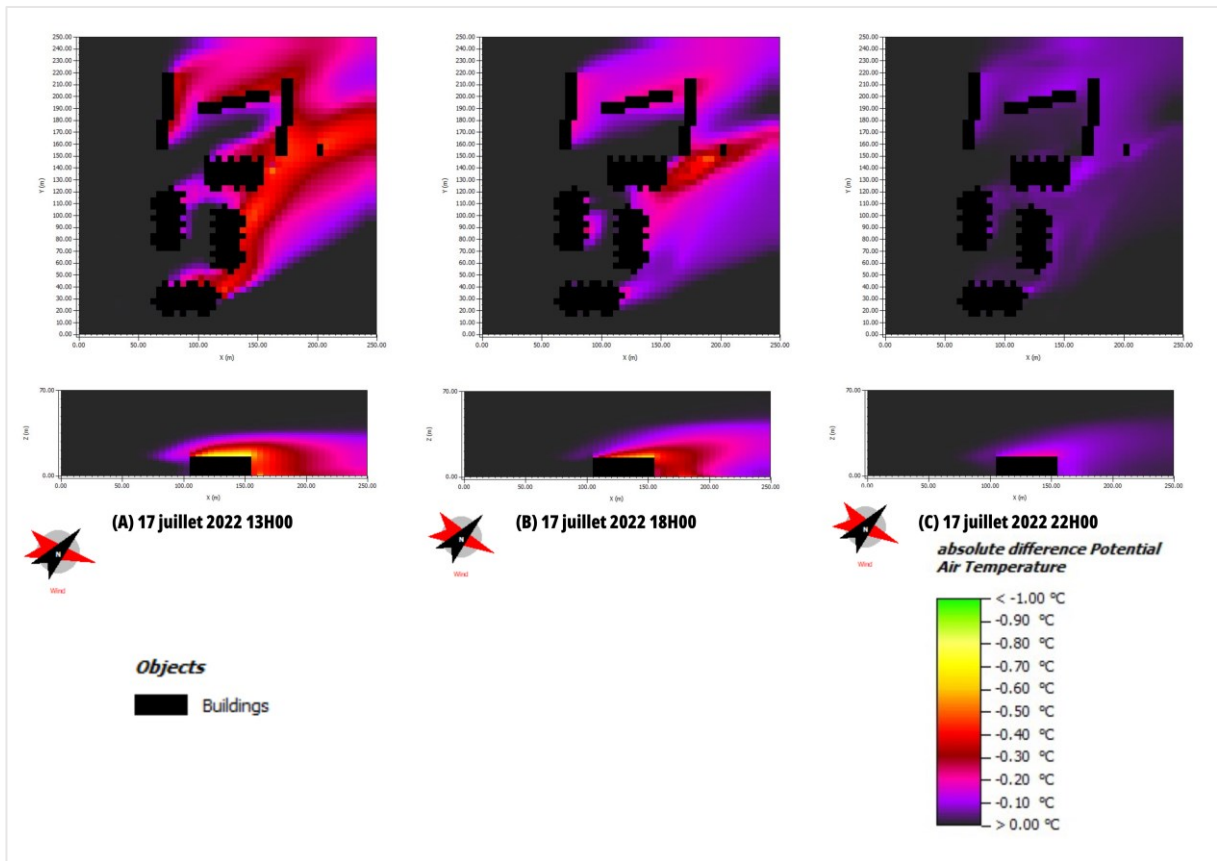


Figure 35 : l'effet de refroidissement du scénario (A), les toitures vertes, au sein de la zone d'étude n°1 en fonction de différents horaires de la journée.

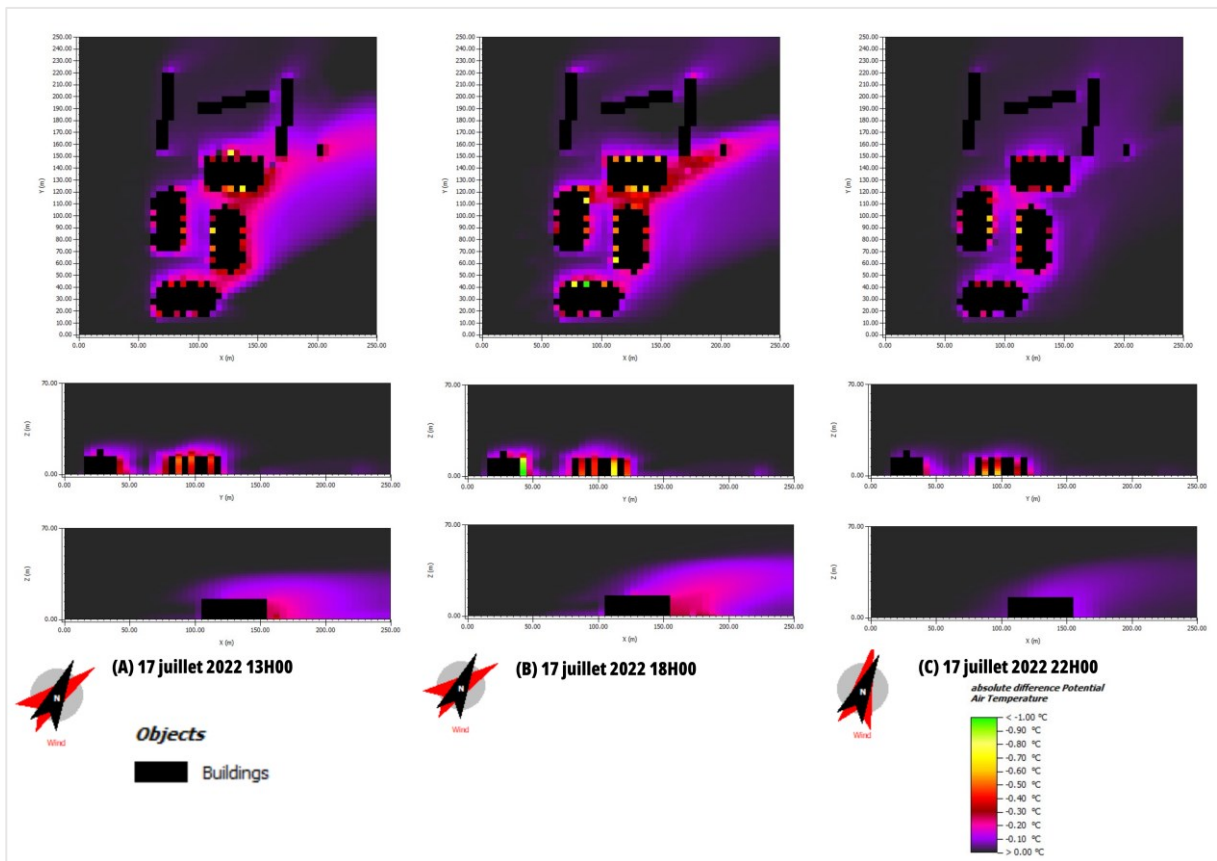


Figure 36 : l'effet de refroidissement du scénario (B), les murs vivants, au sein de la zone d'étude n°1 en fonction de différents horaires de la journée.

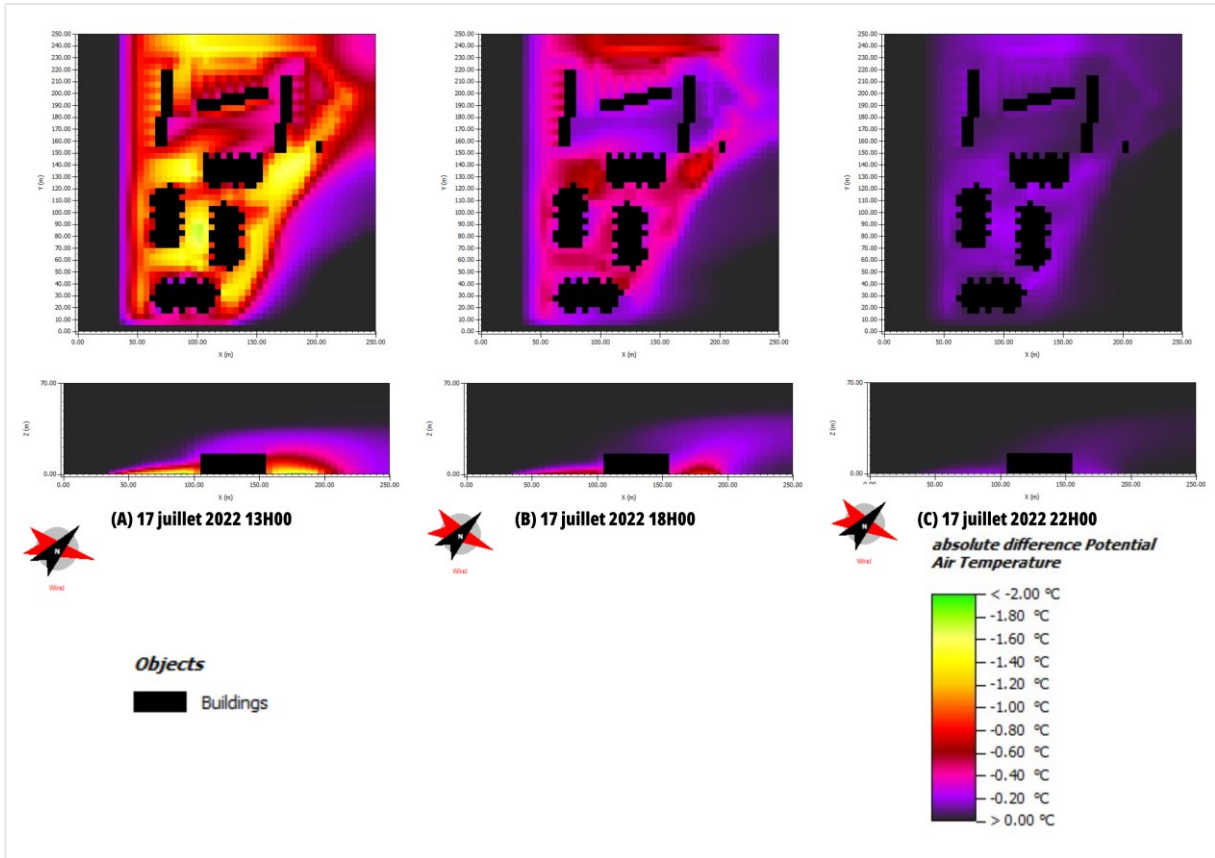


Figure 37 : l'effet de refroidissement du scénario (C), les chaussées fraîches, au sein de la zone d'étude n°1 en fonction de différents horaires de la journée.

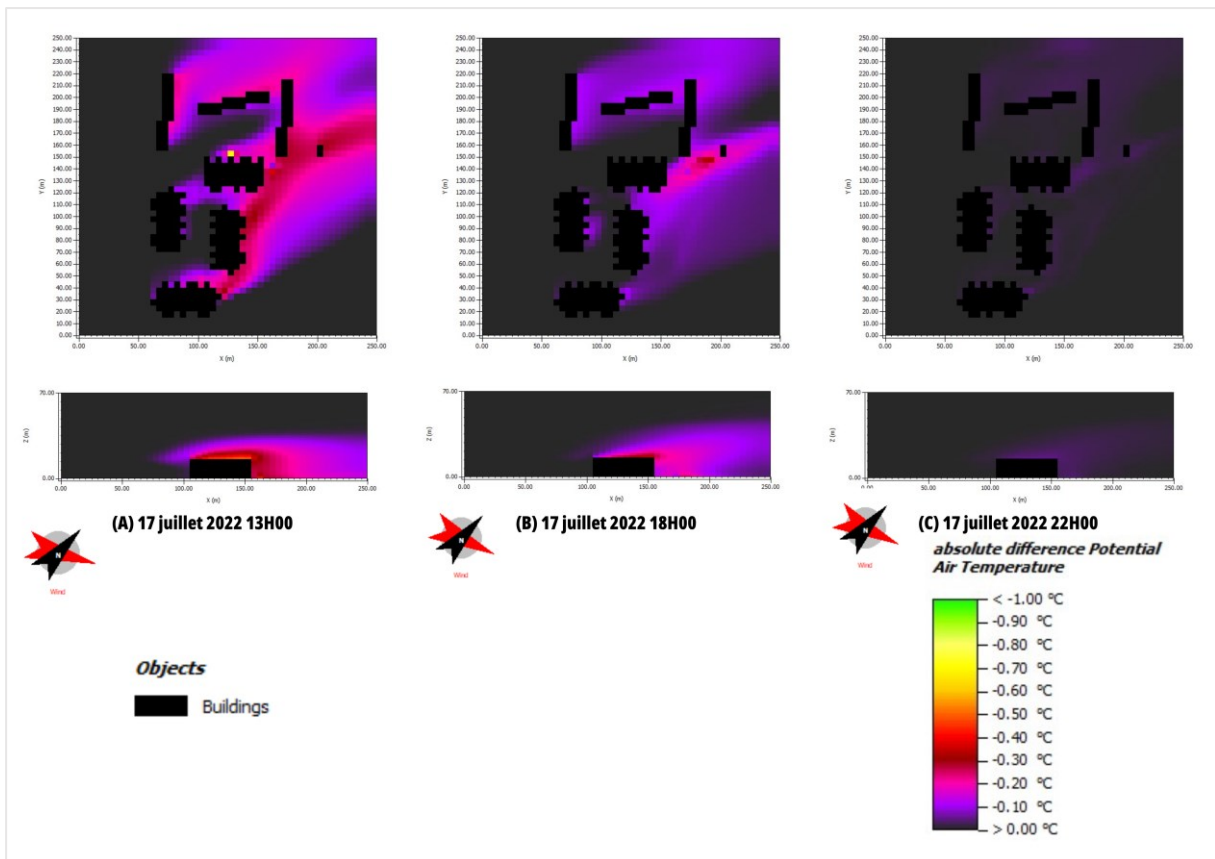


Figure 38 : l'effet de refroidissement du scénario (D), les toitures fraîches, au sein de la zone d'étude n°1 en fonction de différents horaires de la journée.

4.2.2.2. Zone d'étude n°2 $\Delta T^{\circ}C$

— Scénario (A) - Toitures Vertes (**Figure 39**) :

Dans ce scénario, l'effet d'atténuation est distribué dans le sens du vent et est généralement homogène sauf à certains endroits où l'effet peut être plus intense. Comme la vitesse du vent est assez faible à 13h, l'effet d'atténuation se diffuse dans un plus grand volume pouvant aller jusqu'à 70 m de hauteur et englobant chaque ruelle de la zone. L'effet de panache est moins prononcé. Au contraire à 18h la vitesse est légèrement plus élevée, ce qui se constate sur la diffusion de l'effet d'atténuation qui suit la couche limite de canopée. Pour 22h, la direction du vent a changé de sens, sa vitesse est plus faible, poussant l'effet d'atténuation vers le SO en ayant un panache assez diffus. En ce qui concerne les intensités en fonction de l'horaire, au niveau du piétonnier, à 13h, celle-ci peut être de maximum $-2.52^{\circ}C$, mais majoritairement entre -0.5 et $-1.0^{\circ}C$. Dans la soirée, à 18h, la valeur maximale est de $-1.46^{\circ}C$, mais majoritairement entre -0.25 et $-0.5^{\circ}C$. Dans la nuit, à 22h, la valeur maximale est de $-0.38^{\circ}C$, mais plus généralement de $-0.25^{\circ}C$.

— Scénario (B) - Murs Vivants (**Figure 40**) :

Dans ce scénario, la distribution de l'effet de refroidissement va surtout dépendre des lieux où le mur vivant a été installé. L'effet est important très proche de ces murs, mais se disperse mal, car la plupart de ces murs se trouvent dans des canyons urbains avec une mauvaise circulation de l'air, diminuant la diffusion de l'effet. Comme pour le scénario (A), la distribution en hauteur est influencée par l'évolution de la vitesse du vent au cours de la journée. En ce qui concerne les valeurs d'atténuation, elles sont soit de maximum $-1.60^{\circ}C$ à 13h, mais majoritairement entre -0.35 et $-0.53^{\circ}C$, soit de maximum $-1.39^{\circ}C$ à 18h, mais en moyenne $-0.4^{\circ}C$ et soit de maximum $-0.38^{\circ}C$ et en moyenne $-0.18^{\circ}C$.

— Scénario (C) - Chaussées Fraîches (**Figure 41**) :

Dans ce scénario, l'effet de refroidissement se propage sur l'ensemble de la zone. L'intensité varie en fonction de la présence de matériaux frais à proximité. Sa distribution se voit hétérogène influencée par la géométrie, créant de l'ombrage ainsi que par la direction du vent et de sa vitesse. Les différences de température peuvent atteindre jusqu'à soit un maximum de $-3.38^{\circ}C$ à 13h, mais majoritairement entre -1.05 et $-1.75^{\circ}C$, soit un maximum de $-1.53^{\circ}C$ à 18h, mais majoritairement entre -0.35 et $-1.05^{\circ}C$ et soit un maximum de $-0.75^{\circ}C$ à 22h, mais en moyenne $-0.35^{\circ}C$.

— Scénario (D) - Toitures Fraîches (**Figure 42**) :

Dans ce scénario, les résultats présentent une distribution spatiale similaire à celle du scénario (A), car les deux scénarios concernent les toits, bien que l'effet de refroidissement diffère. À 13h, l'atténuation maximale est de $-1.57^{\circ}C$, mais majoritairement entre -0.3 et $-0.6^{\circ}C$ au niveau du piétonnier et de $-0.76^{\circ}C$ dans le profil vertical au niveau du toit. À 18h, la valeur maximale est de $-0.88^{\circ}C$, mais majoritairement entre -0.2 et $-0.3^{\circ}C$. Pour 22h la valeur maximale est de $-0.19^{\circ}C$, mais en moyenne $-0.1^{\circ}C$.

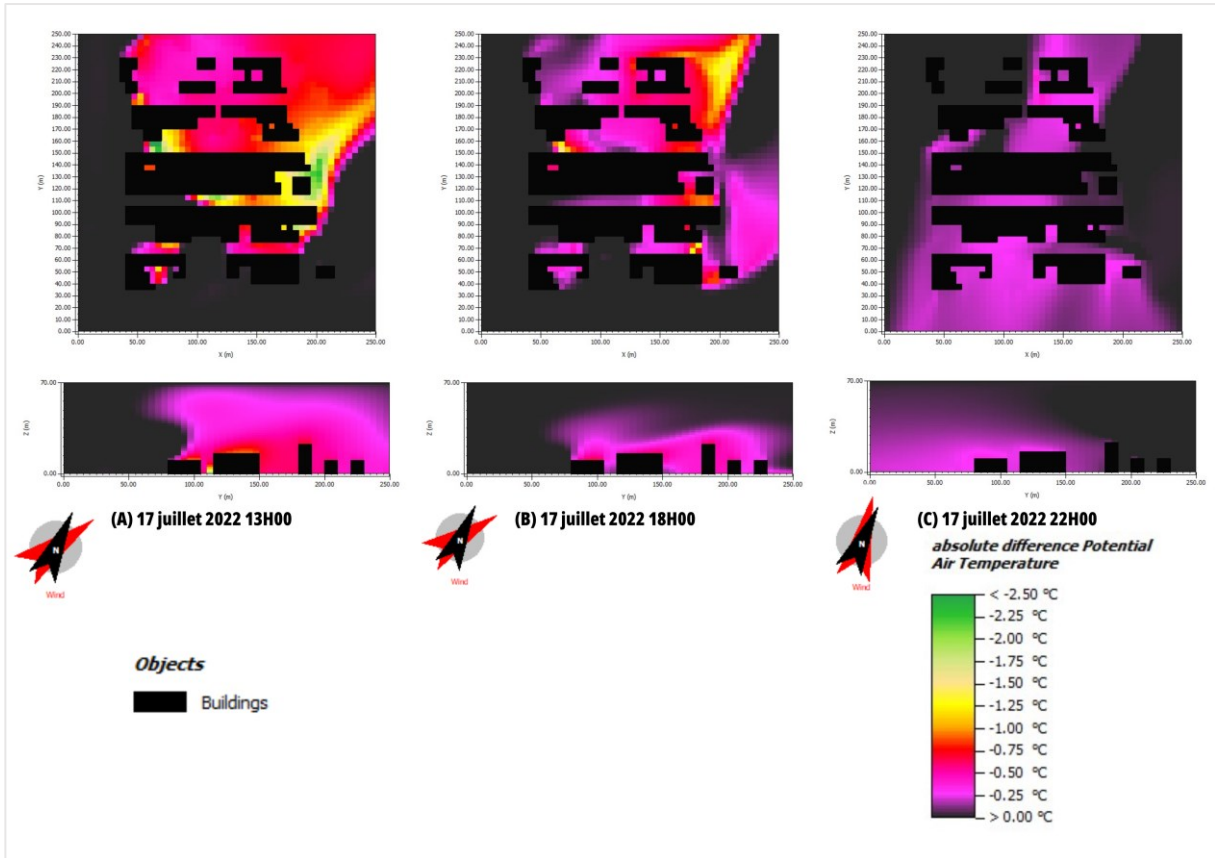


Figure 39 : l'effet de refroidissement du scénario (A), les toitures vertes, au sein de la zone d'étude n°2 en fonction de différents horaires de la journée.

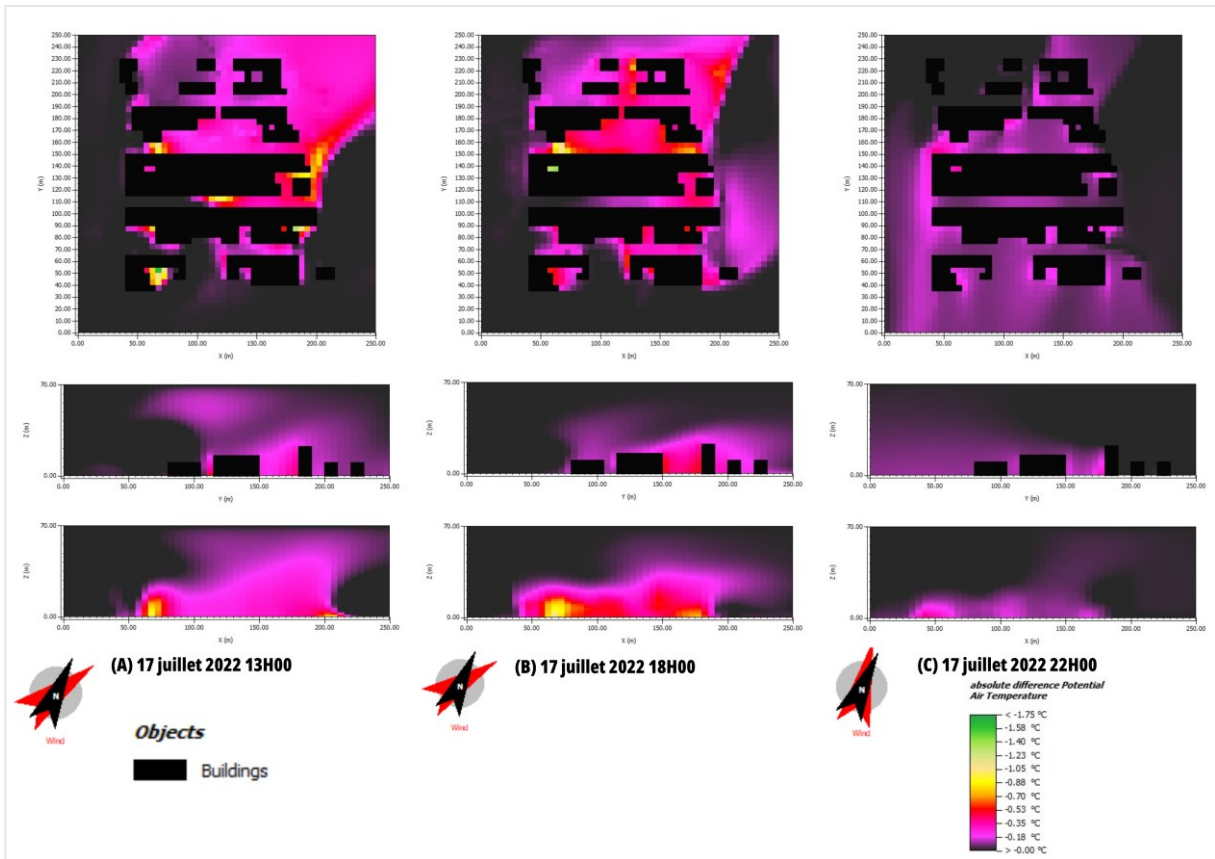


Figure 40 : l'effet de refroidissement du scénario (B), les murs vivants, au sein de la zone d'étude n°2 en fonction de différents horaires de la journée.

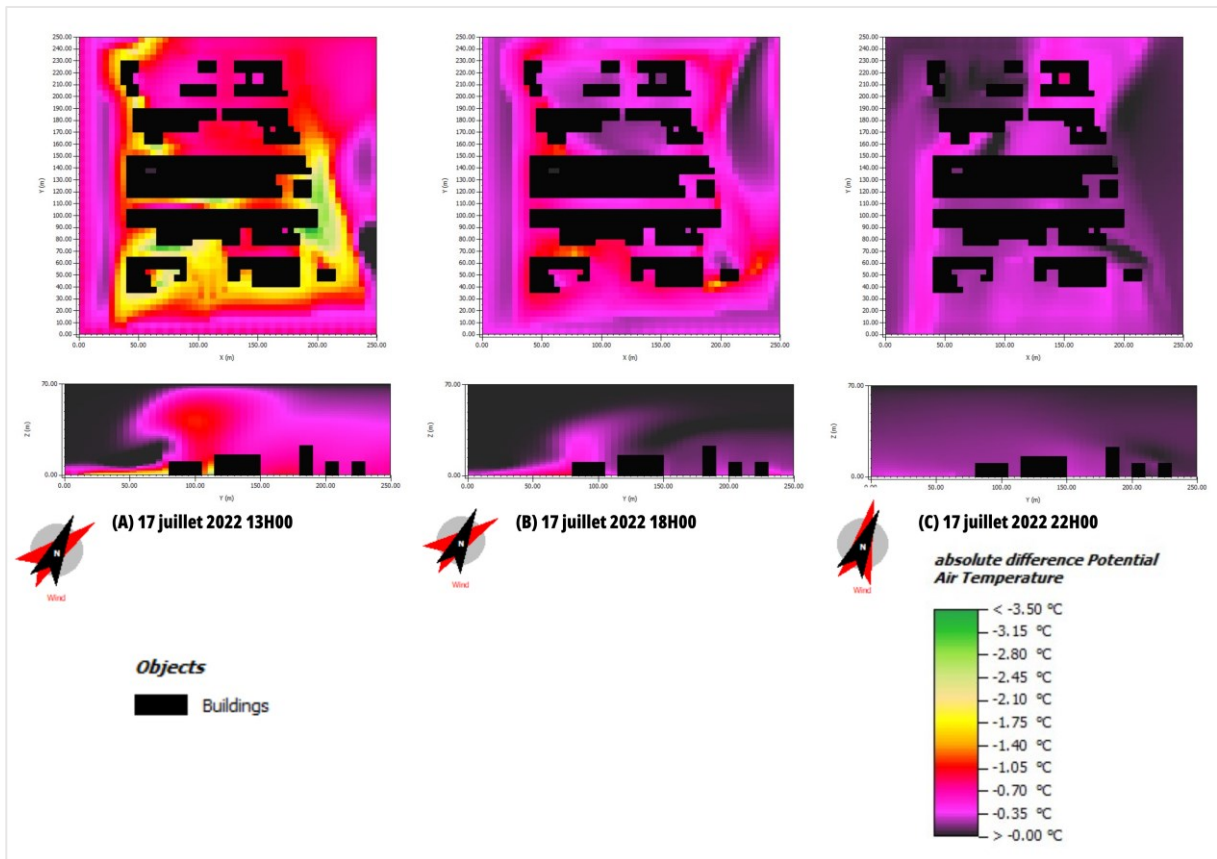


Figure 41 : l'effet de refroidissement du scénario (C), les chaussées fraîches, au sein de la zone d'étude n°2 en fonction de différents horaires de la journée.

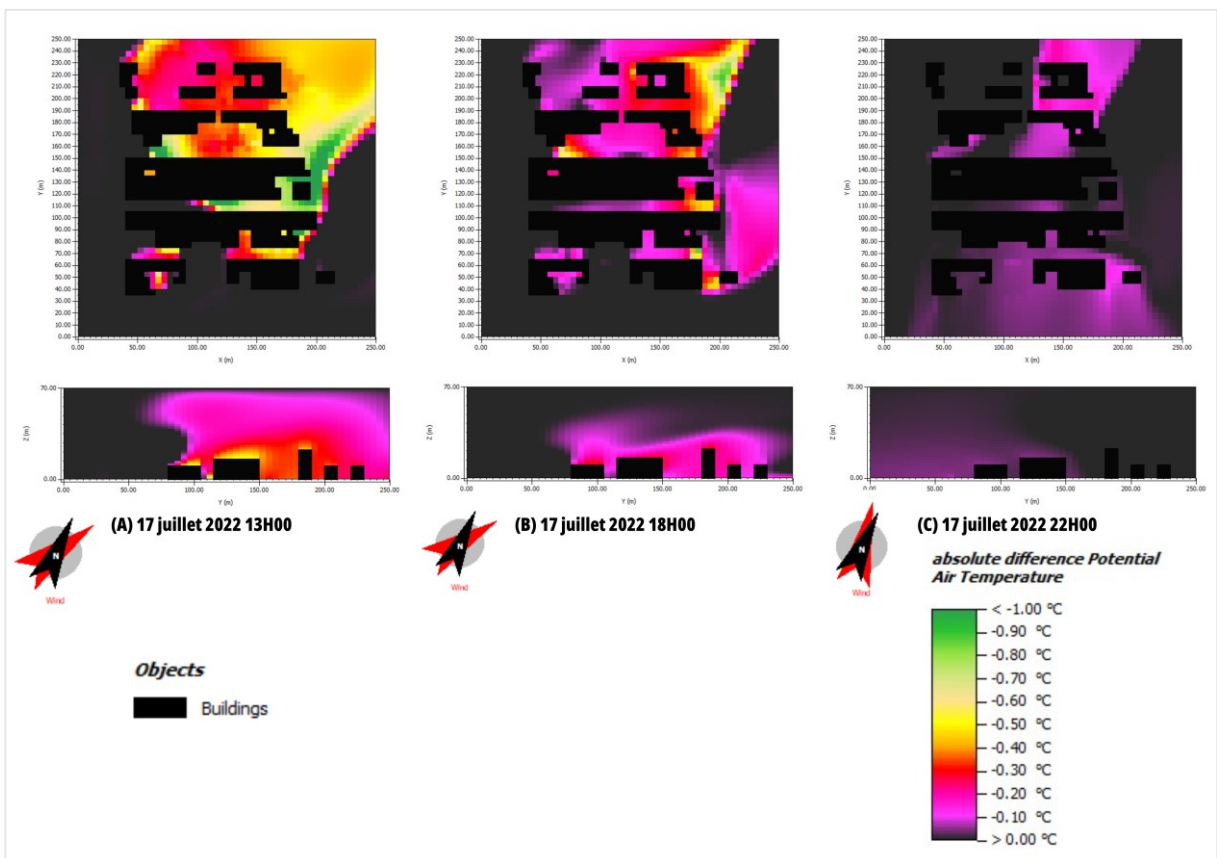


Figure 42 : l'effet de refroidissement du scénario (D), les toitures fraîches, au sein de la zone d'étude n°2 en fonction de différents horaires de la journée.

5. Discussion

5.1. Modèles prédictifs des IICU au Québec

Notre étude se distingue de l'approche courante dans la littérature scientifique. L'accent est mis sur le développement d'un modèle de régression visant à généraliser les prédictions de l'IICU à travers la région du Québec, Canada, en sélectionnant rigoureusement les variables qui expliquent le mieux les variations de température. Contrairement aux études qui portent sur des zones restreintes, cette approche holistique n'a pas la même connotation que les études empiriques, ce qui rend difficile la comparaison. En parallèle à la prédiction de l'IICU, notre étude s'attèle à comparer méthodiquement divers modèles de régression avec celui de référence du CERFO. Cette analyse révèle des performances différentes, identifie les facteurs déterminants de précision et propose des pistes d'amélioration. L'exploration essaie de perfectionner l'analyse de l'IICU, accentuant l'optimisation des prédicteurs et la pertinence des modèles de régression dans le contexte géographique complexe de la région québécoise.

L'analyse approfondie des performances des modèles de régression révèle que les modèles de *Gradient Boosting*, tels que *XGBoost*, *LightGBM* et *CatBoost*, sont plus performants en comparaison avec le modèle de référence *Random Forest* élaboré par le CERFO en termes de précision de prédiction, comme en témoignent les valeurs inférieures de RMSE [°C] (*XGBoost* : 1.812, *LightGBM* : 1.833, *CatBoost* : 1.808 vs. *Random Forest-CERFO* : 1.99) et les valeurs supérieures de R^2 (*XGBoost* : 0.834, *LightGBM* : 0.831, *CatBoost* : 0.835 vs. *Random Forest-CERFO* : 0.81). Sur la base de ces performances, le modèle *CatBoost* émerge comme un modèle recommandé pour la prédiction globale. En se focalisant spécifiquement sur les zones urbaines, le modèle *XGBoost* se distingue par des différences de MAE [°C] significatives par rapport au modèle de référence (RF) : -0.22 pour les zones urbaines pures et -0.135 pour les zones urbaines mixtes, confirmant ainsi sa pertinence pour appréhender les variations complexes de l'IICU dans ces contextes spécifiques.

D'un point de vue général, l'ensemble des modèles éprouvent des difficultés à fournir une prédiction précise lorsque les écarts de température sont importants. Ce problème provient probablement de la variation de la température et de sa faible représentation dans l'ensemble des données collectées pour l'entraînement du modèle, ce qui compromet la qualité des prédictions. On peut également noter que les erreurs augmentent spécifiquement dans les zones urbaines en raison de la multitude de facteurs qui influencent les conditions climatiques urbaines, nécessitant une prise en compte exhaustive. Les résultats révèlent que les modèles SVR et MLP accordent une importance significative à toutes les variables, en contraste avec les modèles de *Gradient Boosting* et *Random Forest*. Cette disparité peut résulter de la difficulté, inhérente aux modèles tels que SVR et MLP, à gérer la multicollinéarité. Les modèles basés sur des algorithmes de type arbres de décision permettent une meilleure gestion de ce cas de figure, en sélectionnant une seule variable lors de chaque division. La distinction entre *Random Forest* et les modèles de *Gradient Boosting* réside dans la manière dont ils apprennent cette sélection de variable : *Random Forest* crée plusieurs arbres, chacun pouvant privilégier une variable différente, tandis que *Gradient Boosting* privilégie une variable unique et exclut l'autre du modèle final en cas de corrélation proche de 1 (T. Chen et al., 2018).

L'absence d'une carte de référence pour les écarts de température est regrettable. Elle aurait, en effet, permis une étude plus approfondie de la distribution spatiale des prédictions de chaque modèle et une meilleure compréhension des facteurs impactant les performances des divers modèles. La recherche des meilleurs hyperparamètres, effectuée à l'aide de la grille de recherche, a présenté une contrainte majeure en termes de temps, limitant ainsi la rapidité de l'entraînement des modèles. Pour résoudre cette contrainte, une approche a consisté à restreindre la portée de cette recherche, compte

tenu de l'aspect chronophage et de l'observation d'améliorations marginales en matière de performance. Par ailleurs, l'analyse des modèles de régression dans un contexte où de nombreuses variables diverses sont en jeu complexifie considérablement l'interprétation des facteurs qui influencent la performance des modèles.

En vue d'améliorer la performance de la prédiction de l'ICU, en particulier dans les zones urbaines, une approche prometteuse consisterait à adopter une classification plus détaillée de l'occupation du territoire. Une classification en *Local Climate Zone* (LCZ) pourrait être explorée dans cette optique (Stewart et al., 2012). Cette classification se compose de 10 classes définissant les caractéristiques urbaines, ainsi que de 7 classes caractérisant la couverture du sol. Les descriptions exhaustives de chaque classe se trouvent dans la **Figure 47 des Annexes [7.7]**. Cette approche offre une plus grande variabilité par rapport à la simple distinction entre zones urbaines pures et mixtes abordée dans cette étude. Une telle diversité devient essentielle en raison de la complexité intrinsèque des paysages urbains. La indisponibilité d'une carte de référence a malheureusement restreint les possibilités d'éclaircissements dans cette étude. De plus, l'utilisation de cette classification permettrait l'incorporation de paramètres géométriques urbains tels que le facteur de vue du ciel, le rapport hauteur-largeur des bâtiments, leur hauteur, ainsi que la perméabilité du sol, et d'autres caractéristiques pertinentes de l'environnement urbain. Les travaux de Dimitrov et al. (2021) ont mis en évidence des variations de température significatives en fonction des différentes classes urbaines de la LCZ. De même, les recherches d'Abougendia (2023) ont révélé l'influence des classes de LCZ sur les ICU diurnes et nocturnes au Caire, en Égypte, avec des écarts allant de 9.68 °C pour la LCZ 7 à 5.62 °C pour la LCZ 1, et jusqu'à 7.88 °C pour la LCZ 3.

5.2. Etude quantitative de l'effet d'atténuation des SMICU

Dans cette partie de l'étude, l'objectif principal était d'entreprendre une première approche quantitative pour évaluer l'effet d'atténuation de différentes SMICU. Cette approche initiale a inclus l'utilisation de chaussées fraîches et de toitures fraîches, en modifiant leur réflectivité, ainsi que l'intégration de toitures vertes et de murs verts. Pour faciliter cette évaluation, l'outil ENVI_met a été utilisé pour simuler le comportement des conditions climatiques dans le contexte des différentes solutions de mitigation. Cette approche vise à fournir des informations cruciales sur les impacts potentiels de ces stratégies sur l'atténuation des ICU.

Les données résultantes révèlent principalement l'influence considérable du vent sur la répartition spatiale de l'effet d'atténuation à travers les deux zones d'étude, en tenant compte de sa direction et de sa vitesse, ainsi que de la configuration urbaine. Dans la zone n°1, où la vitesse du vent est notablement plus élevée qu'en zone n°2, cet écart s'explique principalement par la localisation de la zone sur un plateau en périphérie de la ville. Cette situation favorise un vent moins entravé par les obstacles que dans le contexte plus dense de la zone n°2. À noter que les distributions verticales et horizontales, adoptent la forme d'un panache dirigé selon la direction du vent, avec des influences provenant des obstacles et de la vitesse du vent.

Les résultats démontrent une hiérarchisation similaire des effets d'atténuation entre les différentes solutions. Les chaussées fraîches se démarquent par leur capacité à engendrer le refroidissement le plus intense. En outre, cet effet s'étend sur toute la zone, bien que son efficacité diminue à mesure que l'on s'éloigne de la source. Il est donc crucial de planifier la répartition optimale de cette solution pour garantir un effet uniforme. Une étude menée à Athènes, ayant augmenté l'albédo de l'asphalte et du béton respectivement à 0.7 et 0.78, a révélé des effets de refroidissement allant jusqu'à moins de 2 °C durant les périodes de pics de chaleur (Santamouris et al., 2012).

Les toitures fraîches génèrent également un effet de refroidissement, mais leur action est évidemment centrée au niveau des toits. Cet effet se propage plus loin que celui des chaussées fraîches, principalement en raison de la meilleure convection due à la vitesse de l'air accrue au niveau des toits. Toutefois, cette répartition n'est pas aussi étendue que celle des chaussées fraîches, qui couvrent une surface plus grande. Des recherches menées par Santamouris (2014) ont indiqué que l'augmentation de l'albédo des toits peut conduire à un effet de refroidissement pouvant atteindre $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

L'efficacité des toitures vertes dépend surtout de la direction du vent. Une différence majeure se manifeste la nuit : si les chaussées fraîches se sont montrées plus efficaces en journée, les toitures vertes prennent l'avantage la nuit. En effet, en l'absence de rayonnement solaire, la chaleur est dissipée principalement par rayonnement thermique. Les toitures vertes maintiennent un certain effet de refroidissement nocturne grâce à la transpiration des plantes, qui perdure même lorsque leurs stomates sont fermés. L'étude menée par Santamouris (2014) a révélé que l'utilisation de toitures vertes peut réduire la température ambiante de 0.3 à $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Quant aux murs verts, leur effet de refroidissement est cantonné à leur emplacement et leur impact spatial est moins étendu que celui des solutions précédentes. Dans des zones urbaines où la circulation de l'air est limitée, les murs verts peuvent présenter un intérêt particulier.

Les résultats obtenus mettent en évidence une variable importante à prendre en compte dans l'effet des toitures vertes sur le piétonnier : la hauteur des bâtiments environnants. Selon une étude (Iaria et al., 2022), cet effet d'atténuation peut être influencé significativement par la hauteur du toit. Plus spécifiquement, il a été observé que cet effet commence à se réduire à partir d'une hauteur de toit d'environ 10 m , atteignant un point où aucun effet n'est perceptible à une hauteur de toit d'environ 40 m . Cette dynamique suggère que les toitures vertes ont un impact plus marqué sur les niveaux inférieurs et moyens des bâtiments, offrant un effet d'atténuation progressivement réduit à mesure que la hauteur du bâtiment augmente.

Cependant, ce schéma est inversé pour les murs verts. Leur effet d'atténuation tend à s'accroître à mesure que la surface végétalisée augmente, et ce jusqu'à un certain point. Conformément à une analyse précédente (Iaria et al., 2022), cette atténuation commence à se stabiliser à partir d'une hauteur de végétation d'environ 6 m . Au-delà de cette hauteur, les bénéfices de l'effet de refroidissement des murs verts connaissent une diminution, indiquant une stagnation de l'efficacité à des hauteurs plus élevées.

Ces observations soulignent l'importance de considérer la configuration verticale des structures urbaines dans l'application et l'optimisation des solutions de mitigation des îlots de chaleur urbains. La combinaison de toitures vertes et de murs verts peut ainsi offrir des avantages différenciés en fonction de la hauteur des bâtiments et de la végétalisation, contribuant à une planification urbaine plus précise et plus efficace.

Certaines limitations sont associées au logiciel en ce qui concerne la résolution spatiale des zones d'étude. Dans la version de base sans licence, les zones d'étude sont restreintes à des dimensions de $50 \times 50 \times 40$ unités, ce qui restreint les options disponibles pour obtenir une résolution spatiale appropriée dans l'étude. De plus, la version Lite ne comprend pas la possibilité d'explorer différentes stratégies de verdissement. Si une telle fonctionnalité est nécessaire, elle a un coût de 299.99 € . La dimension temporelle est également une considération cruciale, influençant considérablement la durée de l'étude. L'investissement en temps peut varier d'un minimum de 6 h à une journée, voire plusieurs jours à plusieurs semaines de temps de simulation, en fonction de facteurs tels que l'étendue de la zone d'étude, la résolution, les paramètres climatiques imposés, la discrétisation temporelle et

ainsi que le matériel informatique utilisé. Dans notre cas, la zone n°1 a mis en moyenne 25h pour tourner, ainsi que 18h pour la zone n°2.

Il est recommandé de faire preuve de circonspection dans l'interprétation de l'ensemble de nos résultats, car en effet ils ne reproduisent pas fidèlement la réalité. De plus, Les résultats devraient également être validé par des données collectées sur le terrain. Ces résultats doivent être considérés comme une première étape vers la quantification des effets d'atténuation. L'objectif ultime est de généraliser ces effets pour obtenir une représentation plus précise selon des conditions environnementales spécifiques, permettant aux consultants de mieux définir les stratégies appropriées pour une zone donnée avec des caractéristiques morphologiques et climatiques spécifiques. L'objectif sous-jacent de cette démarche consiste à répliquer cette étude dans plusieurs localités distinctes, dans le but d'accumuler une quantité suffisante de données. Cette approche méthodologique permettra ultimement de parvenir à des conclusions significatives quant à l'efficacité potentielle de diverses stratégies d'atténuation des ICU. Ces conclusions, étayées par une analyse approfondie des données, joueront un rôle essentiel en tant que socle pour la conception d'un outil d'aide à la décision. Cet outil deviendra un guide crucial dans le processus de sélection de la technique d'atténuation la plus appropriée dans des lieux spécifiques, caractérisés par des conditions climatiques particulières.

6. Conclusion

À la conclusion de cette étude, nous avons constaté que l'utilisation du modèle de prédiction Random Forest n'était pas le choix optimal en tant que modèle de régression pour anticiper les ICU dans la région de Québec, au Canada. Notre objectif d'améliorer le modèle prédictif a été atteint, démontrant qu'en favorisant un modèle de type *Gradient Boosting*, les performances globales étaient supérieures à celles de son prédécesseur. Nous avons observé une amélioration d'environ 10 % pour le RMSE, passant de 1.99 °C à 1.808 °C, ainsi qu'une hausse de 3 % pour le R², passant de 0.81 à 0.835 dans le cas du modèle *CatBoost*. Sur un plan plus spécifique, en ce qui concerne l'occupation des zones urbaines, le modèle *XGBoost* s'est révélé être la meilleure solution. Nous avons identifié plusieurs perspectives d'amélioration, en particulier en ce qui concerne l'intégration de nouvelles variables dans le modèle et la création d'une carte de référence des ICU pour valider plus efficacement les futurs modèles.

La seconde partie de ce travail s'est concentrée sur une étude quantitative de l'effet d'atténuation de différentes solutions de mitigation sur le phénomène d'ICU de la canopée. Dans cette phase, nous avons représenté deux zones de test à l'aide du logiciel ENVI_met, qui modélise les transferts entre la végétation, le sol et l'atmosphère. Nous avons appliqué divers scénarios reflétant les solutions d'atténuation préalablement choisies en fonction de critères multiples. Les simulations ont démontré une hiérarchisation des techniques, donnant la priorité aux chaussées fraîches, suivies des toitures vertes, des murs verts et enfin des toitures fraîches. Les effets de refroidissement maximum respectifs à 13h ont été de -1.73 °C, -0.78 °C, -0.52 °C et -0.37 °C pour la zone n°1, et de -3.38 °C, -2.52 °C, -1.6 °C et -1.57 °C pour la zone n°2. Les résultats révèlent une nette différence en raison des variations des conditions climatiques au sein de l'environnement urbain. Cette première approche doit être développée en multipliant les zones d'étude dans différentes villes pour généraliser les effets d'atténuation de chaque solution dans des contextes spécifiques. Cette démarche constituera la base d'un outil d'aide à la décision destiné aux urbanistes, afin de les guider dans leurs futures planifications.

En ce qui concerne ma contribution personnelle, j'ai joué un rôle actif en effectuant une comparaison approfondie entre différents types de modèles de régression. Mon objectif était de déterminer le meilleur modèle adapté à nos circonstances particulières. J'ai également contribué en proposant des réflexions visant à améliorer continuellement les prédictions des cartes prédictives d'ICU. En utilisant un logiciel spécifique, j'ai pu visualiser et quantifier l'effet rafraîchissant des diverses stratégies d'atténuation que j'ai choisies. Ce travail a posé les bases essentielles pour le développement ultérieur d'un outil d'aide à la prise de décision, destiné à guider les futurs projets d'aménagement dans un contexte urbain.

7. Annexes

7.1. Bandes spectrales Landsat-8

Tableau 10 : La description des bandes spectrales que possèdent le satellite Landsat-8

Capteur	N° de bande	Description	Plage de longueurs d'onde (nm)	Résolution spatiale (m)
OLI	1	Côtière	435 – 451	30
	2	Bleue	452 – 512	30
	3	Verte	533 – 590	30
	4	Rouge	636 – 673	30
	5	Proche infrarouge	851 – 579	30
	6	Infrarouge à ondes courtes #1	1 566 – 1 651	30
	7	Infrarouge à ondes courtes #2	2 107 – 2 294	30
	8	Panchromatique	503 – 676	15
	9	Cirrus	1 363 – 1 384	30
TIRS	10	Infrarouge thermique #1	10 600 – 11 190	100
	11	Infrarouge thermique #2	11 500 – 12 510	100

OLI : *Operational Land Imager*, TIRS : *Thermal InfraRed Sensor*.

7.2. Indices spectraux

Tableau 11 : Liste de l'ensembles de indices spectraux calculés à l'aide des bandes spectrales du satellite Landsat-8, qui sont décrits dans le **Tableau 10** qui est repris dans les **Annexes [7.1]**.

Indice spectral	Équation	Référence
ADBI1	$B5 * \text{atan}((B5-B6)/(865-1609))$	(Liu et al., 2010)
ADBI2	$B5 * \text{atan}((B5-B7)/(865-2200.5))$	(Liu et al., 2010)
AEWI	$(4*(B3-B6)-(0,25*B5+2.75*B7))$	(Feyisa et al., 2014)
BAI	$1/((0.1-B4)^2+(0.06-B5)^2)$	(Chuvieco et al., 2002)
GBNDVI	$(B5-(B3+B2))/(B5+(B3+B2))$	(Wang et al., 2007)
GDVI	$B5-B3$	-
GI	$B3/B4$	-
GNDVI	$(B5-B3)/(B5+B3)$	(Xue et Su, 2017)
MBWI	$3*B3-B4-B5-B6-B7$	(Cordeiro et al., 2021)
MCARI1	$1.2*(2.5*(B5-B4)-1.3*(B5-B3))$	(Haboudane, 2004)
MCARI2	$1.5*(2.5*(B5-B4)-1.3*(B5-B3))/\text{sqrt}((2*B5+1)^2-(6*B5-5*\text{sqrt}(B4))-0.5)$	(Haboudane, 2004)
MNDWI	$(B3-B6)/(B3+B6)$	(Xu, 2006)
MSAVI	$0.5*((2*B5+1)-\text{sqrt}((2*B5+1)^2-8*(B5-B4)))$	(Xue et Su, 2017)
MSI	$B6/B5$	(Huntjr et Rock, 1989)
MTVI1	$1.2*(1.2*(B5-B3)-2.5*(B4-B3))$	(Haboudane, 2004)
MTVI2	$1.5*(1.2*(B5-B3)-2.5*(B4-B3))/\text{sqrt}((2*B5+1)^2-(6*B5-5*\text{sqrt}(B4))-0.5)$	(Haboudane, 2004)
NBR	$(B5-B7)/(B5+B7)$	(García et Caselles, 1991)
NDMI	$(B5-B6)/(B5+B6)$	(Taloor et al., 2021)
NDTI	$(B6-B7)/(B6+B7)$	(Chaves et al., 2020)
NDVI	$(B5-B4)/(B5+B4)$	(Gamon et al., 1995)
NDWI	$(B3-B5)/(B5+B3)$	(Mustafa et al., 2017)

NHI	$(B6-B3)/(B6+B3)$	(Schindler et al., 2021)
NISI	$(B2+B3+B4-B5)/(B2+B3+B4+B5)$	(Su et al., 2022)
NMDI3	$(B4-B6-B7)/(B4+B6+B7)$	(Han et al., 2019)
NRVI	$(B4/B5-1)/(B4/B5+1)$	(Xue et Su, 2017)
OSAVI	$1.16*(B5-B4)/(B5+B4+0.16)$	(Rondeaux et al., 1996)
RDVI	$(B5-B4)/\text{sqrt}(B5+B4)$	(Roujean et Breon, 1995)
RVI	$B5/B4$	(Bannari et al., 1995)
SAVI	$(B5-B4)/(B5+B4+0.5)*1,5$	(Huete, 1988)
STI	$B6/B7$	(Chaves et al., 2020)
WBI	$(B2-B4)/(B2+B4)$	(Chaves et al., 2020)

7.3. Modèle bidimensionnel de la zone d'étude n°1

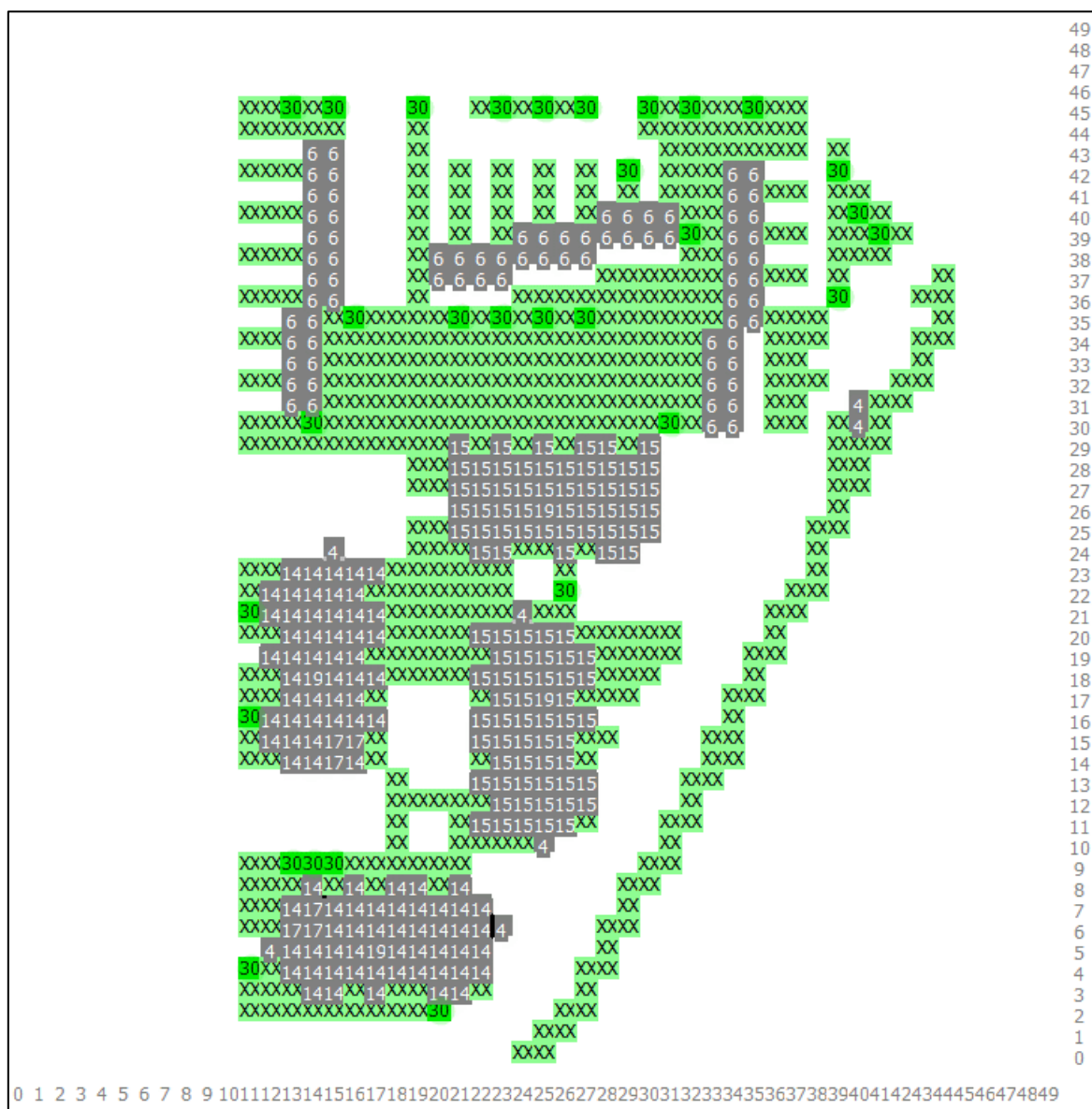


Figure 43 : modèle bidimensionnel de la zone d'étude n°1.

7.4. Modèle bidimensionnel de la zone d'étude n°2

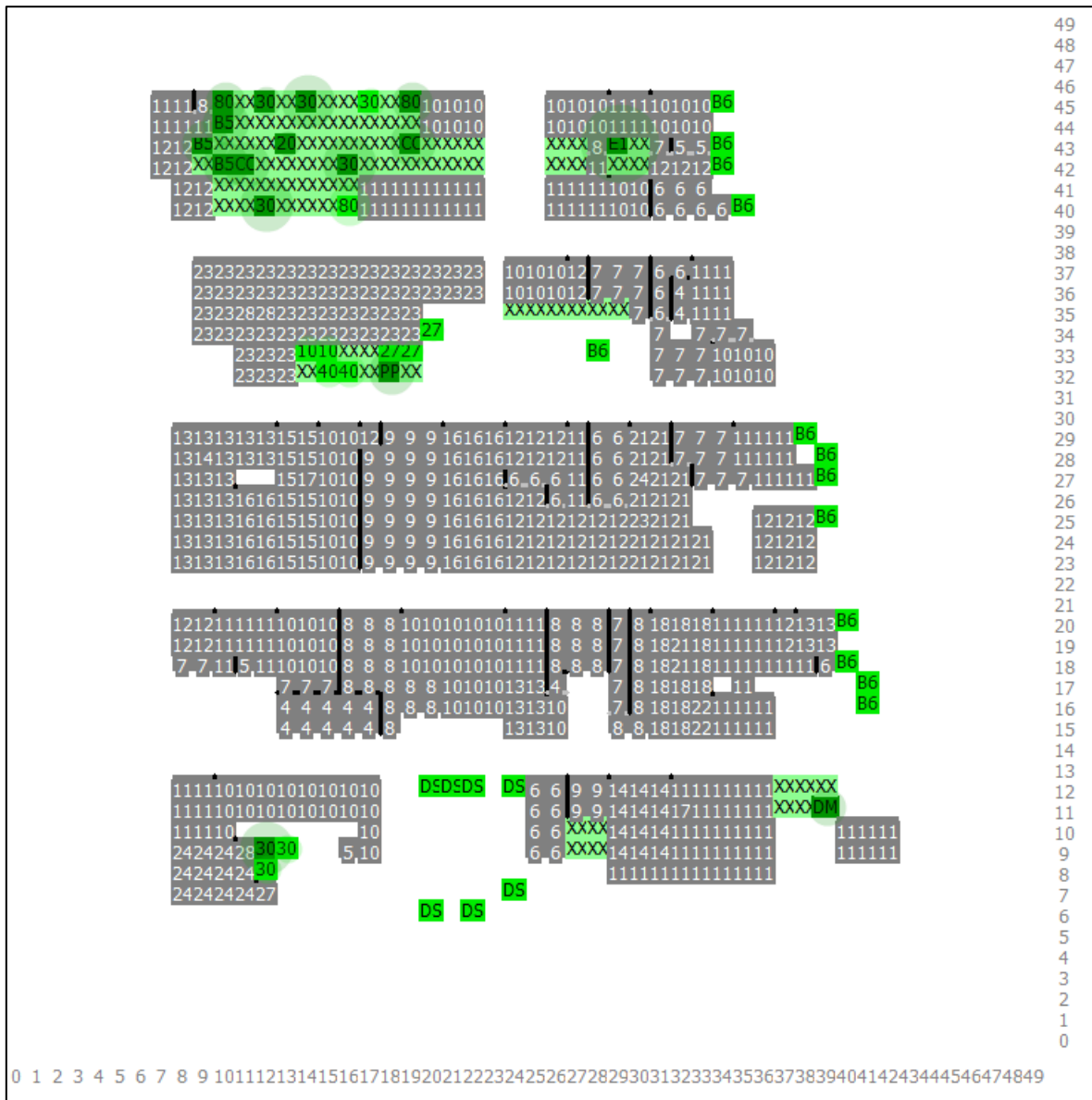


Figure 44 : modèle bidimensionnel de la zone d'étude n°2.

7.5. Résidus en fonction de l'écart de température prédit

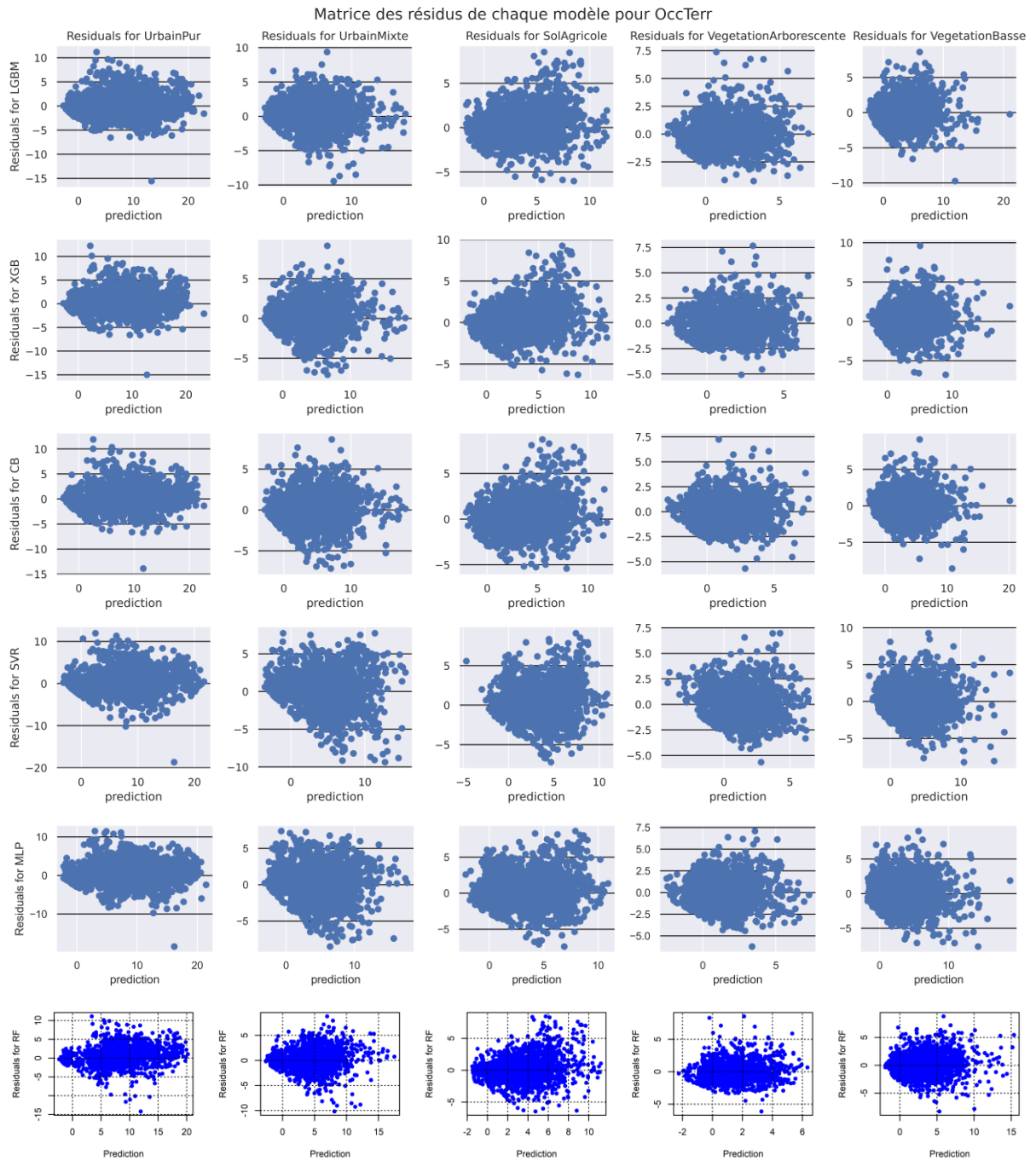


Figure 45 : matrice des résidus en fonction de la prédiction, par rapport au modèle et à l'occupation du terrain.

7.6. Distribution des résidus

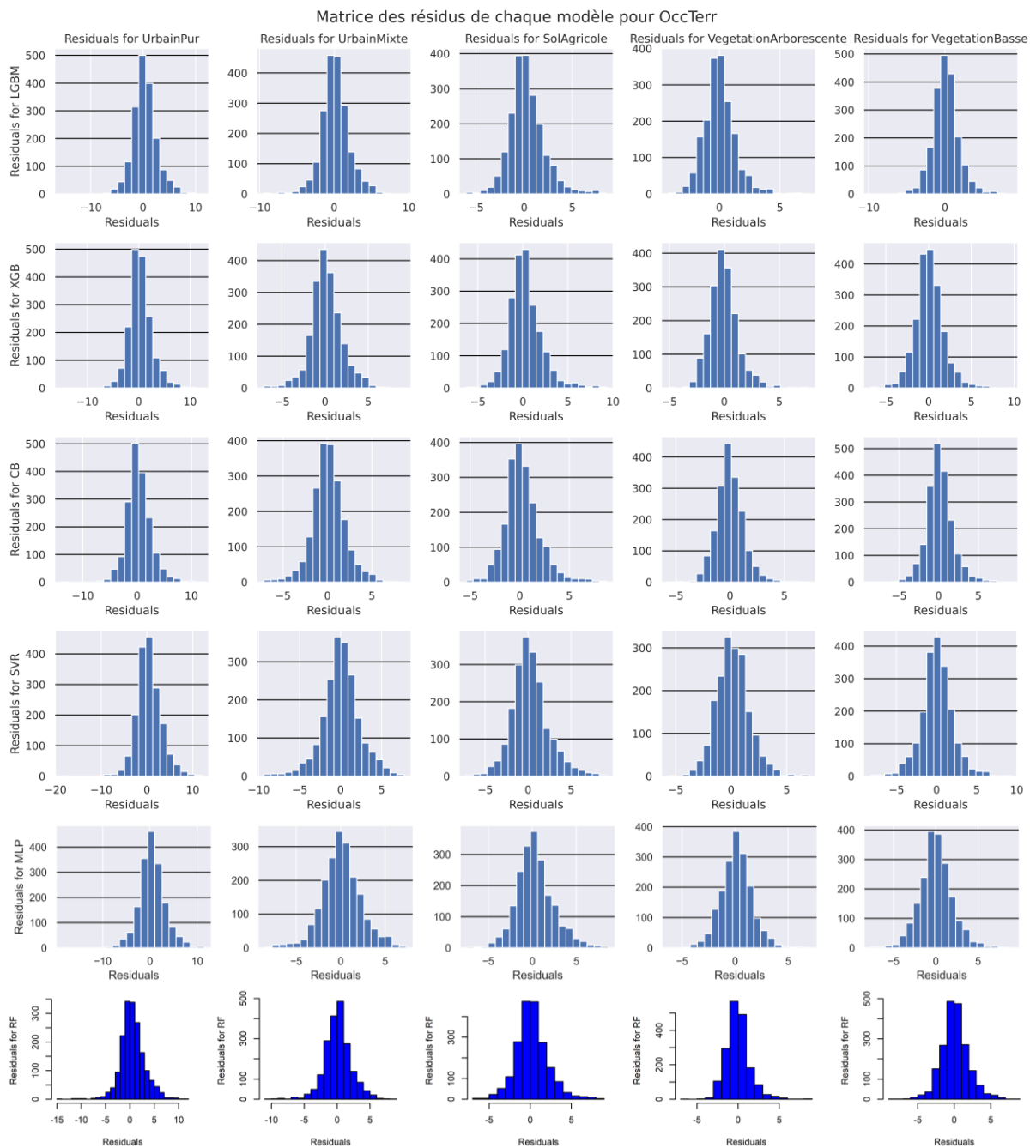


Figure 46 : matrice des histogrammes représentant la distribution des résidus en fonction du modèle et de l'occupation du terrain.

7.7. Locale Climate Zone











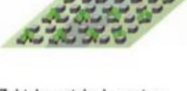






Built types	Definition	Land cover types	Definition
 <p>1. Compact high-rise</p>	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>A. Dense trees</p>	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>2. Compact midrise</p>	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>B. Scattered trees</p>	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>3. Compact low-rise</p>	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>C. Bush, scrub</p>	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
 <p>4. Open high-rise</p>	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>D. Low plants</p>	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
 <p>5. Open midrise</p>	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>E. Bare rock or paved</p>	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
 <p>6. Open low-rise</p>	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	 <p>F. Bare soil or sand</p>	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
 <p>7. Lightweight low-rise</p>	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	 <p>G. Water</p>	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
 <p>8. Large low-rise</p>	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	VARIABLE LAND COVER PROPERTIES	
 <p>9. Sparsely built</p>	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	Variable or ephemeral land cover properties that change significantly with synoptic weather patterns, agricultural practices, and/or seasonal cycles.	
 <p>10. Heavy industry</p>	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	<p>b. bare trees</p>	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
		<p>s. snow cover</p>	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		<p>d. dry ground</p>	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		<p>w. wet ground</p>	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Figure 47 : Liste des différentes classes qui définissent la classification LCZ. (Source : Stewart et al., 2012)

8. Bibliographie

- Abougendia, S.M., 2023. Investigating surface UHI using local climate zones (LCZs), the case study of Cairo's River Islands. *Alex. Eng. J.* 77, 293–307. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.071>
- Accueil [WWW Document], n.d. . ENVI-Met. URL <https://www.envi-met.com/fr/> (accessed 8.8.23).
- Akbari, H., 2009. *Cooling our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing.*
- Ali Toudert, F., Mayer, H., 2006. Numerical Study on the effects of aspect ratio and orientation on an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Build. Environ.* 41, 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>
- Al-Obaidi, I., Rayburg, S., Pórolniczak, M., Neave, M., 2021. Assessing the Impact of Wind Conditions on Urban Heat Islands in Large Australian Cities. *J. Ecol. Eng.* 22, 1–15. <https://doi.org/10.12911/22998993/142967>
- Anak Guntor, N.A., Md Din, M.F., Ponraj, M., Iwao, K., 2014. Thermal Performance of Developed Coating Material as Cool Pavement Material for Tropical Regions. *J. Mater. Civ. Eng.* 26, 755–760. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000859](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000859)
- Animation : bilan radiatif de la Terre [WWW Document], 2020. . cnes. URL <https://cnes.fr/media/animationjeunesbilanradiatifpng> (accessed 4.14.23).
- Anquez, P., Herlem, A., 2011. Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions. *Chaire Responsab. Soc. Dév. Durable – Univ. Qué. À Montr.*
- Arrhenius, S., 1896. XXXI. *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground.* *Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci.* 41, 237–276. <https://doi.org/10.1080/14786449608620846>
- Bahi, H., Radoine, H., Mastouri, H., 2019. Urban Heat Island: State of the Art. 7th Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC.
- Bakarman, M.A., Chang, J.D., 2015. The Influence of Height/width Ratio on Urban Heat Island in Hot-arid Climates. *Procedia Eng., Defining the future of sustainability and resilience in design, engineering and construction* 118, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.408>
- Barriopedro, D., Fischer, E.M., Luterbacher, J., Trigo, R.M., García-Herrera, R., 2011. The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science* 332, 220–224. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1201224/SUPPL_FILE/BARRIOPEDRO-SOM.PDF
- Bathaei, B., Abdel-Raheem, M., 2023. Parameters Affecting Selection of the Mitigation Strategies of Heat Island Effect, in: Walbridge, S., Nik-Bakht, M., Ng, K.T.W., Shome, M., Alam, M.S., el Damatty, A., Lovegrove, G. (Eds.), *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2021, Lecture Notes in Civil Engineering.* Springer Nature, Singapore, pp. 465–477. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0503-2_38
- Battista, G., de Lieto Vollaro, E., Evangelisti, L., de Lieto Vollaro, R., 2022. Urban Overheating Mitigation Strategies Opportunities: A Case Study of a Square in Rome (Italy). *Sustainability* 14, 16939. <https://doi.org/10.3390/su142416939>
- Boriboonsomsin, K., Reza, F., 2007. Mix design and benefit evaluation of high solar reflectance concrete for pavements. *Transp. Res. Rec.* 11–20. <https://doi.org/10.3141/2011-02>
- Boucher, I., 2006. *Les toits verts.* MAMR.
- Bourbia, F., Awbi, H.B., 2004. Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate: Part 1: Air and surface temperature measurements. *Renew. Energy* 29, 249–262. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00170-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00170-8)
- Bourbia, F., Boucheriba, F., 2010. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renew. Energy* 35, 343–347. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.017>
- Bouroubi, Y.M., 2009. REFLECT : logiciel de restitution des réflectances au sol pour l'amélioration de la qualité de l'information extraite des images satellitales à haute résolution spatiale.
- Bouyer, J., 2009. *Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments.*

- Bradford, K., Abrahams, L., Hegglin, M., Klima, K., 2015. A Heat Vulnerability Index and Adaptation Solutions for Pittsburgh, Pennsylvania. *Environ. Sci. Technol.* 49, 11303–11311. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.5B03127>
- Brito, M.C., 2020. Assessing the Impact of Photovoltaics on Rooftops and Facades in the Urban Micro-Climate. *Energies* 13, 2717. <https://doi.org/10.3390/en13112717>
- Cantat, Olivier, 2004. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. <http://journals.openedition.org/norois> 75–102. <https://doi.org/10.4000/NOROIS.1373>
- Celestian, S.B., Martin, C.A., 2004. Rhizosphere, Surface, and Air Temperature Patterns at Parking Lots in Phoenix, Arizona, U.s. 30, 245–252.
- Centre de population (CTRPOP) [WWW Document], n.d. URL <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/92-195-x/2011001/geo/pop/pop-fra.htm> (accessed 8.5.23).
- CERFO, Budei, B.C., Marchal, J., Nininahazwe, F., Genest, M.-A., Bour, B., Varin, M., 2023. Cartographie des îlots de chaleur et de fraîcheur dans le Québec urbain à l'aide d'imagerie satellitaire Landsat-8/9 (2020-2021-2022) et analyse de changement.
- CERFO, Marchal, J., Bour, B., Budei, B.C., Nininahazwe, F., Armellin, C., Varin, M., 2022. Cartographie des îlots de chaleur et de fraîcheur dans le Québec urbain à l'aide d'imagerie satellitaire Landsat-8 (2013-2014).
- Chen, R., Yin, P., Wang, L., Liu, C., Niu, Y., Wang, W., Jiang, Y., Liu, Y., Liu, J., Qi, J., You, J., Kan, H., Zhou, M., 2018. Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities. *BMJ* 363, k4306. <https://doi.org/10.1136/bmj.k4306>
- Chen, T., Benesty, M., He, T., 2018. Comprendre votre ensemble de données avec Xgboost.
- Chorley, R.B., Richard Chorley, Roger G. Barry, The late Richard, 1998. Boundary layer climates, in: *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge.
- Chown, S.L., Duffy, G.A., 2015. Thermal physiology and urbanization: perspectives on exit, entry and transformation rules. *Funct. Ecol.* 29, 902–912. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12478>
- Classification de Köppen, 2022. . Wikipédia.
- Correa, E., Ruiz, M.A., Canton, A., Lesino, G., 2012. Thermal comfort in forested urban canyons of low building density. An assessment for the city of Mendoza, Argentina. *Build. Environ.* 58, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.007>
- CRED, 2020. Disaster year in review 2019.
- Croci, M., 2022. Vegetation Indices.
- Cui, Y., 2012. Study and development of near-infrared reflective and absorptive materials for energy saving application (Doctor of Philosophy). Carleton University, Ottawa, Ontario. <https://doi.org/10.22215/etd/2012-09578>
- De Bono, A., Peduzzi, P., Kluser, S., Giuliani, G., 2004. Impacts of summer 2003 heat wave in Europe.
- Dimitrov, S., Popov, A., Iliev, M., Fan, C., 2021. An Application of the LCZ Approach in Surface Urban Heat Island Mapping in Sofia, Bulgaria. <https://doi.org/10.3390/atmos12111370>
- Drucker, H., Burges, C.J.C., Kaufman, L., Smola, A., Vapnik, V., 1996. Support Vector Regression Machines, in: *Advances in Neural Information Processing Systems*. MIT Press.
- Efthymiou, C., Santamouris, M., Kolokotsa, D., Koras, A., 2016. Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation. *Sol. Energy* 130, 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.054>
- Elnabawi, M.H., Alhumaidi, A., Osman, B., Alshehhi, R., 2022. Cool Roofs in Hot Climates: A Conceptual Review of Modelling Methods and Limitations. *Buildings* 12, 1968. <https://doi.org/10.3390/buildings12111968>
- Environnement et Changement climatique Canada, 2011. Données historiques - Climat - Environnement et Changement climatique Canada [WWW Document]. URL https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html (accessed 8.9.23).
- Fahed, J., 2018. Etude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des îlots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen (phdthesis). INSA de Toulouse.

- Fan, H., Sailor, D.J., 2005. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmos. Environ.* 39, 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.09.031>
- Ferguson, G., Woodbury, A.D., 2007. Urban heat island in the subsurface. *Geophys. Res. Lett.* 34. <https://doi.org/10.1029/2007GL032324>
- Filiatreault, Y., 2015. Changements climatiques et îlots de chaleur : indicateurs de performance pour les mesures d'adaptation (Essai). Université de Sherbrooke.
- Fintikakis, N., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, M., Assimakopoulos, D.N., Fintikaki, M., Albanis, G., Papadimitriou, K., Chryssochoides, E., Katopodi, K., Doulas, P., 2011. Bioclimatic design of open public spaces in the historic centre of Tirana, Albania. *Sustain. Cities Soc.* 1, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2010.12.001>
- Foissard, X., 2015. L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise.
- Fourier, J., 1827. Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Mém. L'Académie R. Sci. L'Institut Fr.* 7, 570–604.
- Frank, S.D., Backe, K.M., 2023. Effects of Urban Heat Islands on Temperate Forest Trees and Arthropods. *Curr. For. Rep.* 9, 48–57. <https://doi.org/10.1007/s40725-022-00178-7>
- Gaitani, N., Mihalakakou, G., Santamouris, M., 2007. On the use of bioclimatic architecture principles in order to improve thermal comfort conditions in outdoor spaces. *Build. Environ.* 42, 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.08.018>
- Gartland, L.M., 2012. *Heat Islands*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849771559>
- Ghenai, C., Rejeb, O., Sinclair, T., Almarzouqi, N., Alhanaee, N., Rossi, F., 2023. Evaluation and thermal performance of cool pavement under desert weather conditions: Surface albedo enhancement and carbon emissions offset. *Case Stud. Constr. Mater.* 18. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E01940>
- Giridharan, R., Lau, S.S.Y., Ganesan, S., Givoni, B., 2007. Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. *Build. Environ.* 42, 3669–3684. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.09.011>
- Grajeda-Rosado, R.M., Alonso-Guzmán, E.M., Escobar-Del Pozo, C., Esparza-López, C.J., Sotelo-Salas, C., Martínez-Molina, W., Mondragon-Olan, M., Cabrera-Macedo, A., 2022. Anthropogenic Vehicular Heat and Its Influence on Urban Planning. *Atmosphere* 13. <https://doi.org/10.3390/ATMOS13081259>
- Grimmond, C.S.B., Oke, T.R., 1995. Comparison of Heat Fluxes from Summertime Observations in the Suburbs of Four North American Cities. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 34, 873–889. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<0873:COHFFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<0873:COHFFS>2.0.CO;2)
- Guo, G., Wu, Z., Rongbo, X., Chen, Y., LIU, X., Zhang, X., 2015. Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. *Landsc. Urban Plan.* 135, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.007>
- Halverson, H.G., Heisler, G.M., 1981. Soil temperatures under urban trees and asphalt. US Department of Agriculture, Forest Service.
- Hamblin, A.L., Youngsteadt, E., López-Urbe, M.M., Frank, S.D., 2017. Physiological thermal limits predict differential responses of bees to urban heat-island effects. *Biol. Lett.* 13, 20170125. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2017.0125>
- Han, D., Zhang, T., Qin, Y., Tan, Y., Liu, J., 2023. A comparative review on the mitigation strategies of urban heat island (UHI): a pathway for sustainable urban development. *Clim. Dev.* 15, 379–403. <https://doi.org/10.1080/17565529.2022.2092051>
- Hartz, D.A., Prashad, L., Hedquist, B.C., Golden, J., Brazel, A.J., 2006. Linking satellite images and hand-held infrared thermography to observed neighborhood climate conditions. *Remote Sens. Environ., Thermal Remote Sensing of Urban Areas* 104, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.12.019>
- Hasanlou, M., Mostofi, N., n.d. Investigating Urban Heat Island Estimation and Relation between Various Land Cover Indices in Tehran City Using Landsat 8 Imagery.

- Hathway, E.A., Sharples, S., 2012. The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Build. Environ.* 58, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.013>
- Heaviside, C., Macintyre, H., Vardoulakis, S., 2017. The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Curr. Environ. Health Rep.* 4, 296–305. <https://doi.org/10.1007/S40572-017-0150-3/FIGURES/1>
- Heisler, G.M., Brazel, A.J., 2019. The Climate System, in: Hall, M.H.P., Balogh, S.B. (Eds.), *Understanding Urban Ecology: An Interdisciplinary Systems Approach*. Springer International Publishing, Cham, pp. 137–173. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11259-2_7
- Howard, L., 1833. *The Climate of London Deduced from Meteorological Observations, Made in the Metropolis, and at Various Places Around it.*
- Howard, L., 1818a. *The Climate of London : Deduced from Meteorological Observations. Volume 1, The Climate of London : Deduced from Meteorological Observations. Volume 1.* publisher not identified, Place of publication not identified.
- Howard, L., 1818b. *The Climate of London : Deduced from Meteorological Observations. Volume 2, The Climate of London : Deduced from Meteorological Observations. Volume 2.* publisher not identified, Place of publication not identified.
- Huang, H., Deng, X., Yang, H., Li, S., Li, M., 2020. Spatial Evolution of the Effects of Urban Heat Island on Residents' Health. *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.* 27. <https://doi.org/10.17559/TV-20200503211912>
- Huang, Q., Li, L., Lu, Y., Yang, Y., Li, M., 2020. The roles of meteorological parameters in Shanghai's nocturnal urban heat island from 1979 to 2013. *Theor. Appl. Climatol.* 141, 285–297. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03214-3>
- Iaria, J., Susca, T., 2022. Analytic Hierarchy Processes (AHP) evaluation of green roof- and green wall-based UHI mitigation strategies via ENVI-met simulations. *Urban Clim.* 46, 101293. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101293>
- Ilots de chaleur/fraîcheur urbains et écarts de température relatifs 2020-2022 - Données Québec [WWW Document], n.d. URL <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/ilots-de-chaleur-fraicheur-urbains-et-ecarts-de-temperature-relatifs-2020-2022> (accessed 8.7.23).
- Inertie thermique, 2007. . *Energ. Plus Site*. URL <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/autres-phenomenes-thermiques/inertie-thermique/> (accessed 4.19.23).
- Jungman, T., Cirach, M., Marando, F., Barboza, E.P., Khomenko, S., Masselot, P., Quijal-Zamorano, M., Mueller, N., Gasparrini, A., Urquiza, J., Heris, M., Thondoo, M., Nieuwenhuijsen, M., 2023. Cooling cities through urban green infrastructure: a health impact assessment of European cities. *The Lancet* 401, 577–589. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)02585-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)02585-5)
- Konstantinov, P., Varentsov, M., Esau, I., 2018. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic. *Environ. Res. Lett.* 13, 075007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacb84>
- Kuttler, W., 2011. Climate change in urban areas. Part 2, Measures. *Environ. Sci. Eur.* 23, 21. <https://doi.org/10.1186/2190-4715-23-21>
- Lai, D., Liu, W., Gan, T., Liu, K., Chen, Q., 2019. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Sci. Total Environ.* 661, 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062>
- Landsat 9 | Service géologique des États-Unis [WWW Document], n.d. URL <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9> (accessed 7.31.23).
- Landsberg, H.E., 1956. The climate of towns. *Man's Role Chang. Face Earth* 2, 584–606.
- Levinson, R., Akbari, H., 2002. Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete. *Cem. Concr. Res.* 32, 1679–1698. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00835-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00835-9)
- Lokoshchenko, M.A., Korneva, I.A., 2015. Underground urban heat island below Moscow city. *Urban Clim.* 13, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.04.002>

- Longdoz, B., 2020. Cours de Physique de l'environnement, Bachelier. Gembloux Agro-Bio Tech.
- Macintyre, H.L., Heaviside, C., 2019. Potential benefits of cool roofs in reducing heat-related mortality during heatwaves in a European city. *Environ. Int.* 127, 430–441. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.065>
- Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., Voogt, J., 2020. Urban Climates and Climate Change. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 45, 411–444. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ENVIRON-012320-083623>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., others, 2021. Climate change 2021: the physical science basis. *Contrib. Work. Group Sixth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Change* 2.
- Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains | INSPQ [WWW Document], 2009. . Inst. Natl. Santé Publique Qué. URL <https://www.inspq.qc.ca/publications/988> (accessed 7.31.23).
- Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., Burkhardt, T., 2020. Global climate change and greenhouse effect. *Entrep. Sustain. Issues* 7, 2897–2913. [https://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21))
- Mills, G., Stewart, I.D., Niyogi, D., 2022. The origins of modern urban climate science: reflections on 'A numerical model of the urban heat island.' *Prog. Phys. Geogr.* 46, 649–656. https://doi.org/10.1177/03091333221107212/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_03091333221107212-FIG1.JPEG
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, 2022. Données du Réseau de surveillance du climat du Québec.
- Minsky, M., Papert, S.A., 1972. *Perceptrons: an introduction to computational geometry*, 2. print. with corr. ed. The MIT Press, Cambridge/Mass.
- Mirzaei, P., Haghighat, F., 2010. Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations. *Build. Environ.* 45, 2192–2201. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.001>
- Mitchell Jr, J.M., 1961. The temperature of cities. *Weatherwise* 14, 224–258.
- MODTRAN® [WWW Document], n.d. URL <http://modtran.spectral.com/> (accessed 8.8.23).
- Molnár, G., Kovács, A., Gál, T., 2020. How does anthropogenic heating affect the thermal environment in a medium-sized Central European city? A case study in Szeged, Hungary. *Urban Clim.* 34, 100673. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100673>
- Monchau, J.-P., n.d. Émissivité thermique, calcul et méthodes de mesure | Themacs Ingénierie. Themacs Ingénierie. URL <https://themacs-engineering.com/mesure-de-lemissivite-thermique/> (accessed 4.17.23).
- Moser, G., Serpico, S., 2009. Automatic Parameter Optimization for Support Vector Regression for Land and Sea Surface Temperature Estimation From Remote Sensing Data. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans. On* 47, 909–921. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2005993>
- Nations, U., 2019. World population prospects 2019. Online edition, Rev 1, United Nations, Department of Economic and Social Affairs. *Popul. Div.* 108–108.
- Nations, U., 2012. World Urbanization Prospects The 2011 Revision.
- Nations, U., 2011. World Population Prospects: The 2010 Revision, Volume I: Comprehensive Tables.
- Nwakaire, C.M., Onn, C.C., Yap, S.P., Yuen, C.W., Onodagu, P.D., 2020. Urban Heat Island Studies with emphasis on urban pavements: A review. *Sustain. Cities Soc.* 63, 102476. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102476>
- Oke, T., 2006. Towards better communication in urban climate. *Theor. Appl.*
- Oke, T.R., 1995. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. *Wind Clim. Cities* 81–107.
- Oke, T.R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy Build.* 11, 103–113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
- Oke, T.R., 1987. *Boundary layer climates*. Routledge.
- Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 108, 1–24.
- Oke, T.R., 1976. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat Islands. *Atmosphere* 14, 268–277. <https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>
- Oke, T.R., 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environ.* 1967 7, 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)

- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J.A., 2017. *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Piano, E., De Wolf, K., Bona, F., Bonte, D., Bowler, D.E., Isaia, M., Lens, L., Merckx, T., Mertens, D., van Kerckvoorde, M., De Meester, L., Hendrickx, F., 2017. Urbanization drives community shifts towards thermophilic and dispersive species at local and landscape scales. *Glob. Change Biol.* 23, 2554–2564. <https://doi.org/10.1111/gcb.13606>
- Pisello, A.L., Fortunati, E., Fabiani, C., Mattioli, S., Dominici, F., Torre, L., Cabeza, L.F., Cotana, F., 2017. PCM for improving polyurethane-based cool roof membranes durability. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 160, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.09.036>
- Pisello, A.L., Santamouris, M., Cotana, F., 2013. Active cool roof effect: impact of cool roofs on cooling system efficiency. *Adv. Build. Energy Res.* 7, 209–221. <https://doi.org/10.1080/17512549.2013.865560>
- Pomerantz, M., Akbari, H., Chang, S.-C., Levinson, R., Pon, B., 2003. Examples of cooler reflective streets for urban heat-island mitigation : Portland cement concrete and chip seals (No. LBNL-49283, 816205). <https://doi.org/10.2172/816205>
- Poot, J., Pawar, S., 2013. Is Demography Destiny? Urban Population Change and Economic Vitality of Future Cities. *J. Urban Manag.* 2, 5–23. [https://doi.org/10.1016/S2226-5856\(18\)30062-1](https://doi.org/10.1016/S2226-5856(18)30062-1)
- Possega, M., Aragão, L., Ruggieri, P., Santo, M.A., Di Sabatino, S., 2022. Observational evidence of intensified nocturnal urban heat island during heatwaves in European cities. *Environ. Res. Lett.* 17, 124013–124013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ACA3BA>
- Qin, Y., 2015. A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52, 445–459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.177>
- Québec, 2023. . Wikipédia.
- Renou, E., 1868. Differences de temperature entre la ville et la campagne. *Annu. Société Météorologie Fr.* 3, 83–97.
- Renou, E.J., 1855. *Instructions météorologiques*. Éditeur non identifié.
- Roman, K.K., O'Brien, T., Alvey, J.B., Woo, O., 2016. Simulating the effects of cool roof and PCM (phase change materials) based roof to mitigate UHI (urban heat island) in prominent US cities. *Energy* 96, 103–117. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.082>
- Sailor, D.J., 2011. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *Int. J. Climatol.* 31.
- Salinitro, M., Alessandrini, A., Zappi, A., Melucci, D., Tassoni, A., 2018. Floristic diversity in different urban ecological niches of a southern European city. *Sci. Rep.* 8, 15110. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33346-6>
- Santamouris, M., 2014. Cooling the cities—A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol Energy* 103, 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A., Kolokotsa, D., 2015. On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy Build., Renewable Energy Sources and Healthy Buildings* 98, 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.052>
- Santamouris, M., Xirafi, F., Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Vassilakopoulou, K., 2012. Improving the Microclimate in a Dense Urban Area Using Experimental and Theoretical Techniques - The Case of Marousi, Athens. *Int. J. Vent.* 11, 1–16. <https://doi.org/10.1080/14733315.2012.11683966>
- Shashua-Bar, L., Swaid, H., Hoffman, M.E., 2004. On the correct specification of the analytical CTTC model for predicting the urban canopy layer temperature. *Energy Build.* 36, 975–978. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.013>
- Shaver, G.R., Canadell, J., Chapin, F.S., Gurevitch, J., Harte, J., Henry, G., Ineson, P., Jonasson, S., Melillo, J., Pitelka, L., Rustad, L., 2000. Global Warming and Terrestrial Ecosystems: A Conceptual Framework for Analysis: Ecosystem responses to global warming will be complex and varied. Ecosystem warming experiments hold great potential for providing insights on ways terrestrial ecosystems will respond to upcoming decades of climate change.

- Documentation of initial conditions provides the context for understanding and predicting ecosystem responses. *BioScience* 50, 871–882. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0871:GWATEA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0871:GWATEA]2.0.CO;2)
- Sidler, O., 2003. L'inertie thermique des bâtiments Consommation et confort d'été en climat méditerranéen. ENERTECH.
- Stathopoulou, E., Mihalakakou, G., Santamouris, M., Bagiorgas, H.S., 2008. On the impact of temperature on tropospheric ozone concentration levels in urban environments. *J Earth Syst Sci* 117, 227–236. <https://doi.org/10.1007/s12040-008-0027-9>
- Stewart, I.D., 2011. Redefining the urban heat island. University of British Columbia. <https://doi.org/10.14288/1.0072360>
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Sultana, S., 2010. Extending asphalt pavement life with thin whitetopping (PhD Thesis). Kansas State University.
- Suomi, J., 2018. Extreme temperature differences in the city of Lahti, southern Finland: Intensity, seasonality and environmental drivers. *Weather Clim. Extrem.* 19, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.12.001>
- Swamy, G., Shiva Nagendra, S.M., Schlink, U., 2017. Urban heat island (UHI) influence on secondary pollutant formation in a tropical humid environment. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1325417> 67, 1080–1091. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1325417>
- Tahooni, A., Kakroodi, A.A., Kiavarz, M., 2023. Monitoring of land surface albedo and its impact on land surface temperature (LST) using time series of remote sensing data. *Ecol. Inform.* 75, 102118. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102118>
- Vagues de chaleur [WWW Document], n.d. . Atlas Vulnérabilité. URL <http://atlas-vulnerabilite.ulaval.ca/vague-de-chaleur/> (accessed 8.7.23).
- Vallati, A., Mauri, L., Colucci, C., Ocloń, P., 2017. Effects of radiative exchange in an urban canyon on building surfaces' loads and temperatures. *Energy Build.* 149, 260–271. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.05.072>
- Varentsov, M., Konstantinov, P., Baklanov, A., Esau, I., Miles, V., Davy, R., 2018. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city. *Atmospheric Chem. Phys.* 18, 17573–17587. <https://doi.org/10.5194/acp-18-17573-2018>
- Vautard, R., Van Aalst, M., Boucher, O., Drouin, A., Hausteijn, K., Kreienkamp, F., Van Oldenborgh, G.J., Otto, F.E.L., Ribes, A., Robin, Y., Schneider, M., Soubeyroux, J.M., Stott, P., Seneviratne, S.I., Vogel, M.M., Wehner, M., 2020. Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe. *Environ. Res. Lett.* 15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ABA3D4>
- Vermote, E.F., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., Morcette, J.-J., 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35, 675–686. <https://doi.org/10.1109/36.581987>
- Voogt, J., 2007. How Researchers Measure Urban Heat Islands.
- Voogt, J.A., Grimmond, C., 2000. Modeling surface sensible heat flux using surface radiative temperatures in a simple urban area. *J. Appl. Meteorol.* 39, 1679–1699.
- Voogt, J.A., Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ., Urban Remote Sensing* 86, 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Wang, Y., Akbari, H., 2014. Effect of Sky View Factor on Outdoor Temperature and Comfort in Montreal. *Environ. Eng. Sci.* 31, 272–287. <https://doi.org/10.1089/ees.2013.0430>
- Wang, Y., Berardi, U., Akbari, H., 2016. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy Build., SI: Countermeasures to Urban Heat Island* 114, 2–19. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>
- Welcome to LightGBM's documentation! — LightGBM 4.0.0.99 documentation [WWW Document], n.d. URL <https://lightgbm.readthedocs.io/en/latest/> (accessed 8.6.23).

- Weng, Q., 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 64, 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007>
- What Is CatBoost? (Definition, How Does It Work?) | Built In [WWW Document], n.d. URL https://builtin.com/machine-learning/catboost?overridden_route_name=entity.node.canonical&base_route_name=entity.node.canonical&page_manager_page=node_view&page_manager_page_variant=node_view-panels_variant-13&page_manager_page_variant_weight=3 (accessed 8.6.23).
- Wong, K.J., 2022. CatBoost vs. LightGBM vs. XGBoost [WWW Document]. Medium. URL <https://towardsdatascience.com/catboost-vs-lightgbm-vs-xgboost-c80f40662924> (accessed 8.6.23).
- World Bank Open Data [WWW Document], n.d. . World Bank Open Data. URL <https://data.worldbank.org> (accessed 5.2.23).
- XGBoost Documentation — xgboost 1.7.6 documentation [WWW Document], n.d. URL <https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/> (accessed 8.6.23).
- Xie, N., Li, H., Zhao, W., Zhang, C., Yang, B., Zhang, H., Zhang, Y., 2019. Optical and durability performance of near-infrared reflective coatings for cool pavement: Laboratorial investigation. *Build. Environ.* 163, 106334. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106334>
- Yang, J., Ogunkah, I.C.B., 2013. A Multi-Criteria Decision Support System for the Selection of Low-Cost Green Building Materials and Components. *J. Build. Constr. Plan. Res.* 1, 89–130. <https://doi.org/10.4236/jbcpr.2013.14013>
- Yang, J., Wang, Z.-H., Kaloush, K.E., 2015. Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a ‘silver bullet’ for mitigating urban heat island? *Renew. Sustain. Energy Rev.* 47, 830–843. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.092>
- Zhang, K., Cao, C., Chu, H., Zhao, L., Zhao, J., Lee, X., 2023. Increased heat risk in wet climate induced by urban humid heat. *Nature* 617, 738–742. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05911-1>
- Zhu, S., Causone, F., Gao, N., Ye, Y., Jin, X., Zhou, X., Shi, X., 2023. Numerical simulation to assess the impact of urban green infrastructure on building energy use: A review. *Build. Environ.* 228. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109832>
- Zinzi, M., 2010. Cool materials and cool roofs: Potentialities in Mediterranean buildings. *Adv. Build. Energy Res.* 4, 201–266. <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0407>