



Etude numérique du potentiel de rafraichissement des techniques de réduction des ilots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen

Jeff Fahed

► To cite this version:

Jeff Fahed. Etude numérique du potentiel de rafraichissement des techniques de réduction des ilots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen. Génie civil. INSA de Toulouse, 2018. Français. NNT : 2018ISAT0024 . tel-02003346

HAL Id: tel-02003346

<https://theses.hal.science/tel-02003346>

Submitted on 1 Feb 2019

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

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



THÈSE

En vue de l'obtention du **DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**

Délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées de
Toulouse

Présentée et soutenue par

Jeff FAHED

Le 16 octobre 2018

**Etude numérique du potentiel de rafraîchissement des
techniques de réduction des ICU sous climat méditerranéens.**

Ecole doctorale : **MEGEP - Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés**

Spécialité : **Génie civil**

Unité de recherche :

LMDC - Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse

Thèse dirigée par

Stephane GINESTET et Luc ADOLPHE

Jury

M. Youssef DIAB, Rapporteur

M. Dominique MARCHIO, Rapporteur

Mme Tathiane MARTINS, Examineur

M. Emmanuel ANTCZAK, Examineur

M. Chady MAALOUF, Examineur

M. Elias KINAB, Examineur

M. Stéphane GINESTET, Directeur de thèse

M. Luc ADOLPHE, Co-directeur de thèse

Résumé:

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain « ICU » souvent observé dans les villes à forte densité urbaine, entraîne des effets négatifs, essentiellement sur le confort thermique extérieur et sur la consommation énergétique des bâtiments. Il est donc primordial d'intégrer des dispositifs d'atténuation de ce phénomène dans la conception des projets et des espaces urbains. Cette thèse vise à étudier les effets des différentes stratégies de limitation d'ICU sur les paramètres microclimatiques sous climat méditerranéen. Le cas d'étude retenu ici est un quartier compact de la capitale libanaise Beyrouth qui est classé comme un territoire artificialisé. Jusqu'à présent, peu de recherches sur le microclimat urbain ont été réalisées dans le cas libanais et on remarque l'absence de code et de mesure d'adaptation aux ICU au Liban. Des simulations numériques sont réalisées à l'aide d'un outil microclimatique « ENVI-met », permettant d'identifier le potentiel rafraichissant de chaque stratégie proposée. Ces stratégies sont basées sur l'augmentation de l'albédo des revêtements du sol et de l'enveloppe des bâtiments, l'augmentation des espaces verts et des surfaces végétalisées, ainsi que sur la mise en place des sources d'eau comme les fontaines et les brumisateurs. Les charges de climatisation relatives à chaque mesure d'atténuation ont été évaluées à l'aide du couplage des données extraites d'ENVI-met avec le logiciel Hourly Analysis Program. Le travail présenté dans cette thèse permet d'évaluer la capacité des scénarios proposés à modifier les charges de climatisation sensibles ainsi que celles latentes. Pour compléter cette approche, le confort du piéton est ensuite étudié en analysant l'indice de confort PET.

Abstract:

The urban heat island "UHI" phenomenon, frequently detected in cities with high urban density, leads to negative impacts especially on outdoor thermal comfort and buildings energy consumption. Accordingly, it is important to integrate mitigation measures into the design of projects and urban spaces. This thesis aims to study the effects of different UHI limitation strategies on microclimatic parameters in Mediterranean climate. The case of study is a compact district of the Lebanese city Beirut which is classified as an artificial territory. Little microclimatic researches have been done for the Lebanese case and there is a lack of codes and adaptation measures to mitigate the effect of UHI. Numerical simulations are realized using "ENVI-met" software, to identify the cooling potential of each proposed strategy. These strategies are based on increasing the albedo of urban surfaces and buildings facades and roofs, increasing green spaces and vegetation surfaces, as well as the implementation of water sources such as fountains and water sprays. The cooling loads for each mitigation strategy were evaluated by linking ENVI-met results to the "Hourly Analysis Program" software. This thesis presented the capacity of the proposed scenarios to modify the sensible and latent cooling loads. The pedestrian comfort is also studied by analyzing the index of comfort PET.

Remerciements

Voici le moment de remercier de tout mon cœur toutes les personnes qui m'ont soutenu durant l'élaboration de cette thèse et qui m'ont accompagné tout au long de ce travail.

Mes remerciements les plus profonds s'adressent tout d'abord à mon directeur de thèse, Stéphane Ginestet, pour ses conseils, son suivi et pour la confiance qu'il m'a accordé dès le début de cette thèse. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour son soutien scientifique ainsi qu'humain, et pour sa disponibilité dans les multiples discussions à distance permettant un bon déroulement de travail.

Je dois également adresser mes remerciements les plus sincères à mon co-directeur de thèse, Luc Adolphe, pour son apport scientifique, ses conseils et ses remarques qui m'ont été très bénéfiques.

Je voudrais aussi remercier mon jury de thèse, M. Emmanuel Antczak d'avoir présidé ce jury, M. Dominique Marchio et M. Youssef Diab d'avoir rapporté et jugé ma thèse. Mes remerciements s'adressent de même à Chady Maalouf et à Tathiane Martins pour avoir accepté d'être membre de ce jury.

Je suis très reconnaissant à Elias Kinab, qui m'a accompagné durant mon séjour au Liban. Je l'en remercie pour ses réflexions et son soutien continu.

Je tiens particulièrement à remercier le laboratoire LMDC pour toutes les facilités qu'il m'a données pour achever ce travail.

J'adresse un grand merci à M. Ibrahim Moukarzel, Professeur à l'Université Libanaise, pour son encouragement et son soutien dès le début du travail.

J'exprime aussi ma reconnaissance à l'équipe d'Envi-met, surtout à M. Bruse fondateur du logiciel, pour leurs aides et leurs réponses à toutes les questions qu'on a interrogé.

Je n'oublie pas à remercier mes collègues de bureau à Beyrouth, mes amis au Liban et à Toulouse, qui m'ont encouragé dans les différentes périodes de la thèse.

Je remercie chaque membre de ma famille et j'adresse ma profonde gratitude à mes parents Abdo et Micheline pour leur bienveillance et leurs encouragements permanents. Ma mère Micheline, merci pour tes prières qui m'ont permis de surmonter les défis et les obstacles. Grand merci à mes frères Joe et Jimmy, pour leur support continu.

Enfin, mes remerciements vont à Dieu pour toutes les grâces dont il nous comble.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Etude bibliographique	3
1.1 Îlot de chaleur urbain	3
1.1.1 L'îlot de chaleur surfacique.....	4
1.1.2 Îlot de chaleur atmosphérique.....	5
1.2 Echelle spatiale et temporelle dans laquelle se produisent les ICU	8
1.3 Les différentes causes du phénomène d'ICU	9
1.3.1 La forme urbaine	10
1.3.2 Les matériaux	11
1.3.3 Couvert naturel	14
1.3.4 Chaleur anthropique	15
1.4 Evaluation statique du phénomène d'ICU	16
1.4.1 ICU et taille de la ville:.....	16
1.4.2 ICU et le rapport d'aspect H/W :.....	17
1.5 Conséquences des ICU.....	18
1.6 Îlots de fraîcheur urbain et mesures d'adaptation aux ICU :.....	18
1.7 Bilan énergétique à l'échelle urbaine.....	20
1.7.1 Le bilan radiatif	20
1.7.2 Le flux anthropogénique.....	23
1.7.3 Le flux convectif.....	24
1.7.4 Le flux latent.....	24
1.7.5 Le flux conductif	24
1.7.6 Le flux stocké	24
1.7.7 Le flux advectif.....	26
1.8 Les effets aérauliques en milieu urbain.....	26
1.8.1 Modèles du champ de vitesse du vent	27
1.8.2 Modèles du champ de vitesse autour du bâtiment	28
1.9 Confort extérieur en milieu urbain.....	33
1.9.1 Etat de l'art	33
1.9.2 Indice PMV.....	34
1.9.3 Indice PPD.....	35
1.9.4 Modèle MEMI et indice PET	35
1.9.5 L'indice « UTCI » (Universal thermal climate index)	38
1.10 ICU dans le contexte climats méditerranéens	40
1.11 Contexte libanais.....	41
1.11.1 Situation actuelle de la typologie des bâtiments libanais :.....	43
1.11.2 Etude bibliographique sur les îlots de chaleur à Beyrouth.....	46

Chapitre 2	Modélisation numérique du microclimat urbain.....	53
2.1	Outils numériques	53
2.1.1	Outils Solène-microclimat :.....	54
2.1.2	Modèle TEB-SURFEX.....	54
2.1.3	ENVI-MET	55
2.2	Modèle physique décrit par ENVI-met.....	56
2.2.1	Flux de vent :	57
2.2.2	Température et humidité.....	59
2.2.3	La turbulence atmosphérique.....	59
2.2.4	Flux radiatifs.....	60
2.2.5	Le modèle du sol.....	62
2.2.6	Le modèle de la végétation	62
2.2.7	Le modèle des surfaces du sol	63
2.2.8	La température des toits et des façades des bâtiments :.....	64
2.2.9	Modèle des gaz et des particules	67
2.2.10	Modèles des fontaines et des sprays d'eau	67
2.2.11	Calcul de la température moyenne radiante Tmrt.....	69
2.3	Méthodes numériques	70
2.4	Avantages identifiés de la version 4.0 d'ENVI-met	72
2.5	Recherches sur le microclimat urbain utilisant ENVI-met	74
Chapitre 3	Simulation microclimatique de l'ICU dans un quartier de la région de Dora à Beyrouth	79
3.1	Description du site :	79
3.2	Simulation du microclimat du quartier Dora avec ENVI-met	81
3.3	Données d'entrée, conditions initiales et aux limites du modèle	82
3.4	Modélisation de la végétation du quartier.....	84
3.5	Premiers résultats issus du modèle.....	84
3.5.1	Température de l'air	85
3.5.2	Influence du facteur de vue de ciel.....	86
3.6	Comparaison des résultats obtenus par ENVI-met avec des données météo de Beyrouth ..	87
3.7	Cartes microclimatiques du modèle :.....	89
3.7.1	Cartes de la température ambiante :.....	89
3.7.2	Cartes de l'humidité spécifique	90
3.7.3	Carte de la température moyenne radiante	92
3.8	Effet du FVC sur la température ambiante et la Tmrt.....	94
3.9	Carte de la température physiologique équivalente (PET)	97
Chapitre 4	Etude numérique du potentiel des différentes techniques de réduction d'ICU. 101	
4.1	Etude du potentiel de la végétalisation	101
4.1.1	Modèle « Vert »	101
4.1.2	Etude de l'impact du modèle vert sur les paramètres microclimatiques	105

4.2	Etude de la modification de l'albédo	114
4.2.1	Modèle du quartier semi-blanc	114
4.2.2	Modèle «Bâtiment Blanc »	123
4.2.3	Modèle du quartier « Blanc »	127
4.2.4	Modèle « Blanc modifié »	131
4.3	Etude du potentiel de rafraîchissement des fontaines et des brumisateurs d'eau.....	134
4.3.1	Modèle « Eau-fontaine »	135
4.3.2	Modèle «Brumisateur»	140
4.3.3	Modèle « Bleu »	144
Chapitre 5 Impact des potentiels de réduction d'ICU sur les charges climatiques et sur le confort extérieur.....		149
5.1	Principe du calcul des charges thermiques dans HAP	149
5.1.1	Apports par transmission des murs extérieurs et des toits :.....	151
5.1.2	Apports par transmission des vitrages	152
5.1.3	Apports par rayonnement solaire traversant les vitrages	152
5.1.4	Apports par les portes	153
5.1.5	Calcul de charges de partition.....	153
5.1.6	Apports par éclairage.....	153
5.1.7	Apports des équipements électriques.....	153
5.1.8	Apports des occupants	154
5.1.9	Apports par infiltration	154
5.2	Choix d'un bâtiment sensible aux techniques de réduction d'ICU	155
5.2.1	Description du bâtiment étudié.....	155
5.2.2	Température des façades.....	156
5.2.3	Température des toits.....	160
5.3	Couplage entre ENVI-met et HAP - Données météorologiques d'entrée.....	161
5.4	Calcul des charges de climatisation	162
5.5	Bâtiment de référence	170
5.5.1	Description du bâtiment de référence et conditions d'entrée.....	170
5.5.2	Calcul des charges de climatisation du bâtiment de référence	171
5.6	Confort du piéton	175
5.6.1	Cartes de la distribution spatiale du PET.....	175
5.6.2	Itinéraire du piéton.....	178
5.6.3	Itinéraire A-G : Cas initial	180
5.6.4	Itinéraire A-G : modèle vert	181
5.6.5	Itinéraire A-G : modèle bleu.....	181
5.6.6	Itinéraire A-G : modèle blanc	182
5.6.7	Itinéraire A-G : modèle bâtiment blanc	184
5.6.8	Itinéraire A-G : modèle « blanc modifié ».....	184

Conclusion et Perspectives.....	187
Annexes.....	192
Références.....	199

Tables des figures

Figure 1.1 : Variation spatiale de la température de l'air le long d'une coupe transversale d'une zone urbanisée montrant le phénomène d'ICU (Pigeon, et al., 2008).....	3
Figure 1.2 : Îlot de chaleur (rouge) et de fraîcheur (bleu et vert) à Montréal (Marthins, 2007).	4
Figure 1.3 : Image d'ICU surfacique à Salt Lake, Utah, 13 Juillet 1998. A gauche la température surfacique la plus élevée, à droite la température surfacique la moins élevée.....	5
Figure 1.4 : Représentation temporelle de l'îlot de chaleur dans une canopée urbaine (faible vitesse de vent et jour ensoleillé), échelle verticale environ 2 °C par unité (Oke, 1982).	6
Figure 1.5 : (a) Forme générale de la couche limite atmosphérique dans une large ville à latitude moyenne durant un jour ensoleillé de l'été durant le jour, (b) C.L.A durant la nuit, (c) comparaison entre la température potentielle d'une zone urbaine et celle rurale, (d) Intensité de l'îlot de chaleur (variation avec l'altitude) (Oke, 1982).....	7
Figure 1.6 : Allure de la variation de la température en fonction de la hauteur à Moscow (zone urbaine) et Zvenigorod (zone environnante) pour 4 aout 2002 et 20 juin 2002 (Khaikine, et al., 2006).....	8
Figure 1.7 : La troposphère et les différentes couches de l'atmosphère terrestre (Ung, 2000).	9
Figure 1.8 : Principaux facteurs influençant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (Dubois, 2014).	10
Figure 1.9 : Phénomène du piégeage radiatif d'après Estournel (Ringebach, 2004).....	11
Figure 1.10 : Thermographie infrarouge des matériaux utilisés dans les travaux de (Doulos, et al., 2004).....	12
Figure 1.11 : Conduction dans un mur ou la place de l'isolant est différente.....	14
Figure 1.12 : Processus physiques principaux à l'origine des modifications radiatives et thermiques du	15
Figure 1.13 : Allure de $\Delta T_u - r$ maximale en fonction de la population à l'Amérique du nord et en Europe (Oke, 1982)	16
Figure 1.14 : Variation de l'intensité maximale d'ICU avec la vitesse du vent de référence (Escourrou, 1991).....	17
Figure 1.15 : Variation de l'intensité maximale d'ICU avec Le rapport H/W pour 31 villes d'Europe, d'Amérique du Nord et d'Asie australe.	18
Figure 1.16 : Modélisation d'un élément de surface urbain (Oke, 1987)	20
Figure 1.17 : Les trois composantes du rayonnement solaire diffus (M'Raoui, et al., 2011).....	21
Figure 1.18 : Relations géométriques reliant la position de la surface inclinée par rapport au soleil et la terre (Chwieduk, 2009).	22
Figure 1.19 : Courbe d'hystérésis montrant la relation entre le flux radiatif net et flux de stockage de chaleur. Les valeurs signalées sur la courbe correspondent aux heures de la journée (Grimmond, et al., 1991).....	25
Figure 1.20 : Profil moyen de la vitesse horizontale du vent dominant en site homogène et en site urbain (Plate & Kiefer, 2001).....	26

Figure 1.21 : Propriétés aérodynamiques typiques pour des zones urbaines homogènes (Grimmond & Oke, 1999)	28
Figure 1.22 : Champ de vitesse du vent autour d'une structure bâtie ainsi que le mouvement de contournement formé (Gandemer, 1981)	28
Figure 1.23 : Les 3 zones d'écoulement autour d'un bâtiment isolé (Gros, 2013)	29
Figure 1.24 : Les différentes paramètres de la cavité frontale (Gros, 2013)	29
Figure 1.25 : Les 3 types d'écoulement dans une rue canyon d'après (Oke, 1987)	31
Figure 1.26 : Quelques effets aérodynamiques observés dans la configuration urbaine (Gandemer, 1975)	32
Figure 1.27 : Représentation des composantes u et v dans une rue canyon ainsi que la distance d (Rockle, 1990)	33
Figure 1.28 : Variation du PPD en fonction du PMV, (ASHRAE, 2009)	35
Figure 1.29: Schéma montrant le concept de calcul de l'UTCI en se basant sur le modèle physiologique de Fiala (Bröde, et al., 2010)	39
Figure 1.30: Echelle de stress thermique selon l'intervalle de l'UTCI (Bras, 2015)	40
Figure 1.31 : Beyrouth un territoire artificialisé, (DAR-IAURIF, 2005)	42
Figure 1.32: Projection du nombre de logement au Liban de 2007 à 2030 (Mourtada, 2010)	42
Figure 1.33: Tissu urbain à Beyrouth (Mourtada, 2010)	43
Figure 1.34: répartition des logements principaux au Liban, selon les localités géographiques, (CAS, 2007)	44
Figure 1.35: Répartition des logements libanais par type en 2007, (CAS, 2007)	44
Figure 1.36: mode de construction au Liban (Mourtada, 2010)	45
Figure 1.37: Pourcentage des résidences principales au Liban par classe d'âge, (CAS, 2007)	46
Figure 1.38: Visualisation de la température maximale, minimale et l'intensité de l'ICU d'une zone urbaine et d'une zone rurale, à Beyrouth, Athènes et Alexandrie, selon le modèle RCM, (Idso & Singer, 2009)	47
Figure 1.39: Albédo des différentes surfaces qui couvrent "Beyrouth" (Kaloustian & Diab, 2015)	49
Figure 1.40: Simulation de la température à 2m au-dessus de la terre pour le jour de janvier (Kaloustian & Diab, 2015)	50
Figure 1.41: Simulation de la température à 2m au-dessus de la terre pour le jour de juillet (Kaloustian & Diab, 2015)	51
Figure 1.42: Différence de la température entre "Horsch Beyrouth" et les 4 autres régions, à 2 m au-dessus de la terre pour le jour de janvier (Kaloustian & Diab, 2015)	51
Figure 1.43: Différence de la température entre "Horsch Beyrouth" et les 4 autres régions, à 2 m au-dessus de la terre pour le jour de juillet (Kaloustian & Diab, 2015)	52
Figure 2.1 : Echange d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère dans TEB– image extraite de www.umn-cnrm.fr	55
Figure 2.2: Plan montrant les sous-modèles d'ENVI-met (Huttner, 2012)	57
Figure 2.3: Tableau montrant la différence de calcul de la température des façades entre la version 3.1 et la version 4.0 d'Envimet (Huttner, et al., 2009)	65
Figure 2.4: Schéma du modèle des 3 nœuds (Huttner, 2012)	65
Figure 2.5 : Exemple des simples murs dans le modèle ENVI-met (Huttner, 2012)	73

Figure 2.6 : Schéma montrant l'implémentation du forçage des variables climatiques dans ENVI-met (Huttner, 2012).....	74
Figure 2.7 : Image de la région Deira (à gauche) et Bastakia (à droite) (Thapar & Yannas, 2008) : Source Google Earth	75
Figure 2.8: Image du Nouvelle Dubai (Marina & greens) (Thapar & Yannas, 2008)	75
Figure 2.9: Modèle Energy Plus et Modèle ENVI-met des travaux de (Yang, et al., 2012).....	76
Figure 3.1 : Image du quartier étudié à Dora Beyrouth, Google earth.	80
Figure 3.2: Photos du quartier à Dora montrant les bâtiments et les routes.	81
Figure 3.3: Le modèle 2D crée à l'aide d'ENVI-met. Les points rouges représentent les récepteurs installés dans le quartier étudié.....	82
Figure 3.4: Le modèle 3D crée à l'aide d'ENVI-met; les blocs gris représentent les bâtiments, la surface noire représente les routes en asphaltes, la couleur bleu Claire indique les pavements de béton alors que les cercles oranges sont les récepteurs installés.	82
Figure 3.5: Température et humidité relative forcée dans le modèle avec ENVI-met.....	83
Figure 3.6: Partie du grand quartier simulé pour extraire les conditions aux limites de Ta et Rh.	83
Figure 3.7: Les arbres de type « C2 » et « OT » définit dans ENVI-met.....	84
Figure 3.8: Récepteurs (2), (5) et (8) dans le modèle ENVI-met.....	85
Figure 3.9 : Température de l'air ambiant à une hauteur de 1.75 m du sol pour 9 et 10 Juillet dans 3 différentes positions (2), (5) et (8).....	86
Figure 3.10 : Facteur de ciel visible pour chacun des différents récepteurs.	86
Figure 3.11 : Comparaison de la température ambiante (9 et 10 Juillet) obtenus par ENVI-met et celle des stations météorologiques « AUB » et « Beyrouth golf ».	87
Figure 3.12 : Instrumentation de la station météorologique Beyrouth Golf, (national wind atlas of Lebanon, 2011).....	88
Figure 3.13 : Cartes de la température ambiante de l'air à une hauteur de 1.75 m à 9:00, 12:00, 15:00 et 18:00.	89
Figure 3.14 : Cartes de la température ambiante de l'air à une hauteur de 1.75 m à 21:00, 00:00, 3:00 et 6:00.	90
Figure 3.15 : Cartes de l'humidité spécifique de l'air à une hauteur de 1.75 m à midi et 15:00..	91
Figure 3.16 : Cartes de l'humidité spécifique de l'air à une hauteur de 1.75 m à minuit et 18:00.	91
Figure 3.17 : Carte de la T_{mrt} à une hauteur de 1.75 m à 21:00, mi-nuit, 3 :00 et 6:00	93
Figure 3.18 : Carte de la T_{mrt} à une hauteur de 1.75 m (le jour) à 9:00, midi, 15:00 et 18:00..	94
Figure 3.19: Graphes montrant la variation de la température ambiante en fonction du FVC à 13:00 le jour et la nuit à 1:00.	95
Figure 3.20 : Graphes montrant la variation de la température moyenne radiante en fonction du FVC à 13:00 le jour.	96
Figure 3.21: Graphes montrant la variation de la température moyenne radiante en fonction du FVC à 1:00 La nuit.....	97
Figure 3.22 : Distribution de la température physiologique équivalente (PET) à une hauteur de 1.5m à 9:00, 12:00, 15:00 et 18:00.	99

Figure 3.23: Distribution de la température physiologique équivalente (PET) à une hauteur de 1.5m à 21:00, 00:00, 3:00 et 6:00	100
Figure 4.1 : Plan du quartier végétalisé créée dans ENVI-met montrant les 3 zones végétalisées du quartier.....	102
Figure 4.2: Emplacement et type des espèces végétalisées dans ENVI-met dans la zone 1.	102
Figure 4.3: Emplacement et type des espèces végétalisées dans ENVI-met dans la zone 2.	103
Figure 4.4: Emplacement et type des espèces végétalisées dans ENVI-met dans la zone 3.	103
Figure 4.5: Modèle 2D du quartier végétalisé créée à l'aide d'ENVI-met montrant les récepteurs installés (points rouges) par rapport aux espèces végétalisées.	104
Figure 4.6: Les arbres 3D utilisées dans la simulation (source ENVI-met).	105
Figure 4.7: Variation de la température de l'air ambiant pour le modèle vert "V" (en vert) et le modèle initiale "I" (en rouge) pour le récepteur (4).....	106
Figure 4.8: Variation de la température de l'air ambiant pour le modèle vert "V" (en vert) et le modèle initiale "I" (en rouge) pour le récepteur (11).....	106
Figure 4.9 : Variation de la température de l'air ambiant pour le modèle vert "V" (en vert) et le modèle initiale "I" (en rouge) pour le récepteur (12).....	107
Figure 4.10: Pourcentage des points de la grille dont la température a diminué par rapport au cas de base à 13:00	107
Figure 4.11: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Vert" et le modèle initial à 1 :00 et 3 :00 (la nuit) et 13:00 et 15:00 (le jour).....	108
Figure 4.12: Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « vert » et le modèle initial à midi.....	109
Figure 4.13: Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « vert » et le modèle initial à minuit.....	109
Figure 4.14 : Variation de la Tmrt pour le modèle vert "V" (en vert) et le modèle initiale "I" (en rouge) pour le récepteur 1.	110
Figure 4.15 : Variation de la Tmrt pour le modèle vert "V" (en vert) et le modèle initiale "I" (en rouge) pour le récepteur 2.	111
Figure 4.16 : Variation de la Tmrt pour le modèle vert "V" (en vert) et le modèle initiale "I" (en rouge) pour le récepteur 6.	111
Figure 4.17 : Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Vert" et le modèle initial pour la nuit, à 1 :00 et 3 :00.....	112
Figure 4.18 : Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Vert" et le modèle initial pour le jour, à 13 :00, 14 :00 et 15 :00.....	113
Figure 4.19: Le modèle semi-blanc crée par ENVI-met montrant les routes en asphalte rouge (parties roses), les pavements et les zones en bétons clairs (parties grises).....	115
Figure 4.20: Le modèle 3D « semi-blanc » crée à l'aide d'ENVI-met; les blocs gris représentent les bâtiments, la surface rose représente les routes en asphalte rouge, la couleur blanche indique les zones en béton clair, alors que les cercles oranges sont les 15 récepteurs installés.	116
Figure 4.21: Variation de la température de l'air ambiant pour le modèle « semi-blanc » (en bleue foncé) et le modèle initial "I" (en rouge) pour le récepteur 1.....	116
Figure 4.22: Variation de la température de l'air ambiant pour le modèle « semi-blanc » (en bleue foncé) et le modèle initial "I" (en rouge) pour le récepteur 4.....	117

Figure 4.23: Variation de la température de l'air ambiant pour le modèle « semi-blanc » (en bleu foncé) et le modèle initial "I" (en rouge) pour le récepteur 12.	117
Figure 4.24: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Semi-blanc" et le modèle initial à 1 :00 et 3 :00 (la nuit), et 13:00 et 15:00 (le jour).	118
Figure 4.25: Graphes montrant la variation de l'écart de température en fonction du FVC à 13:00 le jour et 1:00 la nuit.	119
Figure 4.26: Sous-modèle semi-blanc.	119
Figure 4.27: Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « semi blanc » et le modèle initial à 13 :00 le jour et à 1 :00 la nuit.	120
Figure 4.28: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Semi blanc" et le modèle initial, à 13:00, 15:00 et 17:00, 20:00 .	121
Figure 4.29: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Semi blanc" et le modèle initial la nuit à 1:00 et 3:00.	122
Figure 4.30: Le modèle 3D « Bâtiment Blanc » crée à l'aide d'ENVI-met montrant les nouvelles façades et toitures des bâtiments.	123
Figure 4.31: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Bâtiment blanc" et le modèle initial à 13:00 et 15:00 (le jour).	124
Figure 4.32: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle " Bâtiment blanc" et le modèle initial à 1 :00 et 3 :00 (la nuit).	125
Figure 4.33 : Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « bâtiment blanc » et le modèle initial à 13 :00 le jour et à 1 :00 la nuit.	125
Figure 4.34: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Bâtiment blanc" et le modèle initial, à 13:00, 15:00.	126
Figure 4.35 : Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Bâtiment blanc" et le modèle initial, à 1:00, 3:00 la nuit.	127
Figure 4.36: Le modèle 3D « Blanc » crée à l'aide d'ENVI-met montrant les nouvelles façades et toitures des bâtiments.	127
Figure 4.37: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Blanc" et les deux modèles « initiale » (à gauche) et « semi blanc » (à droite) à 13:00 (le jour).	128
Figure 4.38: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Blanc" et les deux modèles initiale (à gauche) et « semi blanc » (à droite) à 1:00 (la nuit).	129
Figure 4.39: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Blanc" et les deux modèles « initiale » (à gauche) et « semi blanc » (à droite) à 13:00 (le jour).	130
Figure 4.40: Cartes de distribution spatiale de l'écart de la température moyenne radiante entre le modèle "Blanc" et les deux modèles initial (à gauche) et « semi blanc » (à droite) à 1:00 (la nuit).	130
Figure 4.41: Le modèle 3D « Blanc modifié » crée à l'aide d'ENVI-met montrant les nouvelles façades des bâtiments.	131
Figure 4.42: Façades des bâtiments type (gris pour le béton et vert pour le PVC) du modèle « blanc modifié »	131
Figure 4.43: Cartes de distribution spatiale de l'écart de la température ambiante entre le modèle "Blanc modifié" et le modèle « blanc» (à gauche) à 13:00 (le jour) et 1:00 la nuit montrant que l'écart est faible.	132

Figure 4.44: Cartes de distribution spatiale de l'écart de la température ambiante entre le modèle "Blanc modifié" et le modèle « blanc» (à gauche) à 13:00 (le jour) et 1:00 la nuit montrant que l'écart est faible.....	133
Figure 4.45 : Les fontaines du parc André-Citroen à Paris (Figure gauche), quartier au Portugal utilisant des sprays d'eau dans les rues pour le rafraichissement (Figure droite).	134
Figure 4.46: Le système traditionnel "Dry-mist Uchimizu" au Japon (Ishii, et al., 2009).....	135
Figure 4.47: Le système Dry-mist développé par (Ishii, et al., 2009).....	135
Figure 4.48: Le modèle « Fontaine » crée par ENVI-met montrant les 5 fontaines ajoutées.	136
Figure 4.49: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Fontaine" et le modèle initial à 13:00 et 15:00 (le jour).	137
Figure 4.50: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Fontaine" et le modèle initial à 1 :00 et 3 :00 (la nuit).	138
Figure 4.51: Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « Fontaine » et le modèle initial à 13 :00 le jour et à 1 :00 la nuit.	138
Figure 4.52: La direction du vent à 13:00 le jour	139
Figure 4.53: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Fontaine" et le modèle initial, à 13:00 et 1:00	140
Figure 4.54: Brumisateurs installés dans une gare routière japonaise (bigorgne, 2012).....	140
Figure 4.55: Le modèle 2D « Brumisateur » crée par ENVI-met montrant les sprays d'eau ajouté au quartier.	141
Figure 4.56: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Brumisateur" et le modèle initial à 13:00 le jour et 1:00 la nuit.....	142
Figure 4.57: Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « Brumisateur » et le modèle initial à 13 :00 le jour et à 1 :00 la nuit.....	143
Figure 4.58: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Brumisateur" et le modèle initial, à 13:00 et 1:00.....	144
Figure 4.59: Le modèle 2D « Bleu » crée par ENVI-met montrant les sprays d'eau (point rouges) et les fontaines (taches bleues).....	145
Figure 4.60: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Bleu" et le modèle initial à 13:00 le jour et 1:00 la nuit.....	146
Figure 4.61: Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « Bleu » et le modèle initial à 13 :00 le jour et à 1 :00 la nuit.....	146
Figure 5.1: Modèle 3D d'ENVI-met montrant le bâtiment le plus sensible.....	155
Figure 5.2: Modèle 2D montrant l'orientation du bâtiment le plus sensible.	156
Figure 5.3: Modèle 3D montrant la température surfacique élémentaire des parois extérieures à 13 :00.....	157
Figure 5.4: Température surfacique moyenne de la façade f1 (sud-est) du bâtiment de référence à 1.75 m du sol.....	158
Figure 5.5: Température surfacique moyenne de la façade f2 (sud-ouest) du bâtiment de référence à 1.75 m du sol.....	158
Figure 5.6: Température surfacique moyenne de la façade f3 (nord-ouest) du bâtiment de référence à 1.75 m du sol.....	159
Figure 5.7: Température surfacique moyenne de la façade f4 (nord-est) du bâtiment de référence à 1.75 m du sol.....	159

Figure 5.8: Température du toit du bâtiment de référence pour le modèle initial et le modèle blanc.	160
Figure 5.9: Température du toit du bâtiment de référence pour le modèle « blanc » et le modèle « bâtiment blanc »	161
Figure 5.10 : Profil de température humide et sèche dans HAP	162
Figure 5.11: Variation horaire des charges sensibles pour les 5 modèles.	163
Figure 5.12: Variation horaire des charges latentes pour les 4 modèles.	164
Figure 5.13: Variation horaire des charges totales pour les 4 modèles.	165
Figure 5.14: Consommations énergétiques sensibles de climatisation du bâtiment entier sur toute la journée pour chaque modèle.	166
Figure 5.15: Consommations énergétiques latentes de climatisation du bâtiment entier sur toute la journée pour chaque modèle.	167
Figure 5.16: Consommations énergétiques totales de climatisation du bâtiment entier sur toute la journée pour chaque modèle.	167
Figure 5.17: Consommations énergétiques sensibles de climatisation du dernier étage (roof) sur toute la journée pour chaque modèle.	168
Figure 5.18: Consommations énergétiques totales de climatisation du dernier étage (roof) sur toute la journée pour chaque modèle.	169
Figure 5.19: Variation horaire des charges sensibles pour les 5 modèles au niveau du dernier étage.	169
Figure 5.20: Variation horaire des charges totales pour les 5 modèles au niveau du dernier étage.	169
Figure 5.21: Bâtiment de référence dans le modèle initial.	170
Figure 5.22: Modèle 2D du bâtiment de référence dans le modèle vert (à gauche) et dans le modèle bleu (à droite).	171
Figure 5.23: Variation horaire des charges sensibles pour le bâtiment de référence.	171
Figure 5.24: Variation horaire des charges latentes pour le bâtiment de référence.	172
Figure 5.25: Variation horaire des charges totales pour le bâtiment de référence.	173
Figure 5.26: Consommations énergétiques sensibles de climatisation du premier étage du bâtiment de référence sur toute la journée pour chaque modèle (à gauche) et le pourcentage de variation par rapport au modèle initial (à droite).	174
Figure 5.27: Consommations énergétiques totales de climatisation du premier étage du bâtiment de référence sur toute la journée pour chaque modèle (à gauche) et le pourcentage de variation par rapport au modèle initial (à droite).	174
Figure 5.28: Cartes de distribution spatiale de l'écart température physiologique équivalente PET entre le modèle "initial" et les modèles vert, bleu, blanc et bâtiment blanc à 12 :00 (le jour).	176
Figure 5.29: Cartes de distribution spatiale de l'écart température physiologique équivalente PET entre le modèle "initial" et les modèles vert, bleu, blanc et bâtiment blanc à minuit.	177
Figure 5.30: Modèle bleu (à gauche) montrant les fontaines et les brumisateurs. Modèle vert (à droite) montrant les espaces verts.	179
Figure 5.31: L'itinéraire A-G choisi dans le quartier pour le calcul de la PET	179
Figure 5.32: graphique de la Température Physiologique Equivalente sur l'itinéraire A-G dans le cas du modèle initial.	180

Figure 5.33: graphique de la Température Physiologique Equivalente sur l'itinéraire A-G dans le cas du modèle vert.	181
Figure 5.34: graphique de la Température Physiologique Equivalente sur l'itinéraire A-G dans le cas du modèle bleu.	182
Figure 5.35: graphique de la Température Physiologique Equivalente sur l'itinéraire A-G dans le cas du modèle blanc.	183
Figure 5.36: graphique de la Température Physiologique Equivalente sur l'itinéraire A-G dans le cas du modèle bâtiment blanc.	183
Figure 5.37: graphique de la Température Physiologique Equivalente sur l'itinéraire A-G dans le cas du modèle « blanc modifié ».	184

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Echelle de sensation thermique d'ASHRAE (ASHRAE thermal sensation scale) (ASHRAE, 2009)	34
Tableau 1.2 : Exemple des valeurs de la température physiologique équivalente (PET) pour différents scénarios climatiques (Ta : la température de l'air ambiant, T_{mrt} : température moyenne radiante, v : vitesse du vent, VP : la pression de vapeur d'eau) (Höppe, 1999).....	37
Tableau 1.3 : Intervalles de Température Physiologique Equivalente pour les différentes perceptions thermiques humaines et différentes degrés de stress physiologique; pour un métabolisme de 80W et pour une résistance vestimentaire de 0,9 clo (Matzarakis & Mayer, 1996)	37
Tableau 1.4 : Caractéristiques des murs dans les façades des bâtiments à Beyrouth (Kaloustian & Diab, 2015).....	48
Tableau 1.5 : Types des toitures dans les bâtiments à Beyrouth (Kaloustian & Diab, 2015).....	49
Tableau 1.6 : Fraction des surfaces couvrant chaque région simulée par le TEB (Kaloustian & Diab, 2015).....	50
Tableau 3.1 : Pourcentage des surfaces couvrant le quartier étudié	80
Tableau 3.2 : Albédo des différentes surfaces du modèle simulé	84
Tableau 3.3 : Résistance thermique de la vêtue en clo selon la saison (www.lema.ulg.ac.be/urba/Cours/Climat/04-ConfortThermique).....	98
Tableau 4.1: Pourcentage de la surface végétalisée de chaque zone selon le type des arbres et des herbes plantés	103
Tableau 4.2: Description des plantes utilisées dans le modèle selon leur référence dans ENVI-met.	104
Tableau 4.3 : Albédo des surfaces modifiées dans le modèle semi-blanc	114
Tableau 4.4: Pourcentage des surfaces couvrant le quartier « Semi-blanc ».....	115
Tableau 4.5: Albédo des façades et des toitures des bâtiments dans le modèle "Bâtiment blanc"	123
Tableau 4.6 : Caractéristiques des fontaines créées dans le modèle « ENVI-met ».	136
Tableau 5.1 : Consommations énergétiques en kWh intégrées sur la journée étudiée.	165
Tableau 5.2: Consommation énergétiques en kWh intégrées sur la journée étudiée (de 9 Juillet 7:00 à 10 Juillet 7 :00)	174

Nomenclature:

A : Air d'une paroi	$[m^2]$
a_s : Albédo de la surface du sol	-
C : Chaleur spécifique	$[J. Kg^{-1}. K^{-1}]$
C_p : Chaleur spécifique de l'air sec à pression constante	$[J. Kg^{-1}. K^{-1}]$
C_s : Chaleur massique du sang	$[J. Kg^{-1}. K^{-1}]$
c_w : Capacité calorifique du mur	$[J. Kg^{-1}. K^{-1}]$
D_f : Diffusivité thermique	$[m^2/s]$
E : Energie cinétique de turbulence locale	$[m^2. s^{-2}]$
E_f : Effusivité thermique	$[J/K. m^2. s^{\frac{1}{2}}]$
f : Paramètre de Coriolis	$[s^{-1}]$
g : Accélération de la pesanteur	$[m. s^{-2}]$
G : Flux de chaleur du sol	$[W. m^{-2}]$
GS_t : Gains solaires transmis	$[W]$
$GS_{t,direct}$: Composantes directes des gains solaires transmis	$[W]$
$GS_{t,d}$: Composantes diffus des gains solaires transmis	$[W]$
GS_a : Gains solaires absorbés	$[W]$
$GS_{a,direct}$: Composantes directes des gains solaires absorbés	$[W]$
$GS_{a,d}$: Composantes diffus des gains solaires absorbés	$[W]$
H : Flux turbulent de chaleur sensible	$[W. m^{-2}]$
h_c : Coefficient d'échange convectif	$[W. m^{-2}. K^{-1}]$
h_{fg} : Chaleur de vaporisation de l'eau	$[J/Kg]$
I_{cl} : Résistance thermique de la vêtue	$[K. m^2. W^{-1}]$
I_g : flux solaire globale incident	$[W. m^{-2}]$
$I_{h,direct}$: flux direct normal sur une surface horizontale	$[W. m^{-2}]$
$I_{h,d}$: flux direct diffus sur une surface horizontale	$[W. m^{-2}]$
I_r : flux réfléchi total	$[W. m^{-2}]$
$I_{t,direct}$: flux solaire direct total	$[W. m^{-2}]$
$I_{t,d}$: flux solaire diffus total	$[W. m^{-2}]$
$I_{IR,u}$: flux infrarouge net échangé avec les surfaces urbaines	$[W. m^{-2}]$
$I_{IR,a}$: flux infrarouge net échangé avec l'atmosphère.	$[W. m^{-2}]$
$J_{f,evap}$: Flux d'évaporation à la surface des feuilles des arbres	$[m. s^{-1}]$
$J_{f,h}$: Flux de chaleur sensible à la surface des feuilles des arbres	$[K. m. s^{-1}]$
$J_{f,trans}$: Flux de transpiration à la surface des feuilles des arbres	$[m. s^{-1}]$
K : Conductivité thermique	$[W. m^{-1}. K^{-1}]$
K_h : Coefficient d'échange de chaleur	$[m^2. s^{-1}]$
K_q : Coefficient d'échange d'humidité	$[m^2. s^{-1}]$
LE : Flux turbulent de chaleur latente	$[W. m^{-2}]$
$L(T_0)$: Chaleur latente de vaporisation	$[J. kg^{-1}]$
M : Métabolisme du corps	$[W. m^{-2}]$

m_D : Masse d'une gouttelette d'eau	[mg]
N_D : Nombre de gouttelettes dans un volume d'air	-
P : Nombre d'habitants	-
P_{ecl} : Puissance d'éclairage	[W]
P_{eq} : Puissance maximale de l'équipement électrique	[W]
p : Pression d'une particule air à une altitude donnée	[K]
p_0 : Niveau de pression de référence standard	[KPa]
Q_C : Flux conductif	[W. m ⁻²]
Q_c : Flux convectif entre le corps et son entourage	[W. m ⁻²]
Q_{cl} : Flux de rayonnement à courte longueur d'ondes	[W. m ⁻²]
Q_{gl} : Flux de rayonnement à grande longueur d'ondes	[W. m ⁻²]
Q_F : Flux anthropogénique	[W. m ⁻²]
Q_H : Flux convectif	[W. m ⁻²]
Q_L : Flux latent	[W. m ⁻²]
Q_l : Flux de chaleur latente par diffusion de vapeur d'eau au travers de la peau	[W. m ⁻²]
$Q_{l,i}$: Charges latentes provenant de l'infiltration	[W]
Q_{np} : Flux de chaleur échangé entre le noyau du corps et la peau	[W. m ⁻²]
Q_{ph} : Flux de chaleur entre la peau et la surface de la vêtue	[W. m ⁻²]
Q_R : Flux de rayonnement	[W. m ⁻²]
Q_{re} : Flux de chaleur sensible et latente due à la respiration	[W. m ⁻²]
$Q_{s,i}$: Charges sensibles provenant de l'infiltration	[W]
Q_{Tr} : Flux de chaleur latente due à la transpiration	[W. m ⁻²]
Q_φ : Terme source local relative à φ	[$ \varphi . s^{-1}$]
q_{st} : Gains solaires totaux	[W]
R : Constante spécifique de l'air	[J/kg.K]
R_m : est le flux radiatif qui dépend de la T_{mrt}	[W. m ⁻²]
r_D : Rayon d'une gouttelette d'eau	[μm]
S : Largeur de la rue canyon	[m]
S_i : Air de la paroi i	[m ²]
SC : Coefficient global d'ombre	-
S_u, S_v, S_w : Termes de sources ou de puits	[m. s ⁻²]
T : Température d'un milieu homogène	[K]
T_a : Température de l'air ambiant	[K]
T_c : Température du noyau du corps	[K]
T_D : Température de la gouttelette	[K]
T_e : Température sol-air	[K]
T_f : Température surfacique des feuilles des arbres	[K]
T_h : Température surfacique moyenne de l'habillement	[K]
T_i : Température de la paroi i	[K]
T_{int} : Température intérieure d'une pièce	[K]
T_0 : Température surfacique du sol	[K]

T_m : Température moyenne des murs	[K]
T_{mrt} : Température moyenne radiante	[K]
T_s : Température d'une surface.	[K]
T_p : Température d'une particule air à une altitude donnée.	[K]
T_{rc} : Température intérieure constante de la pièce	[K]
t : Temps	[s]
U : vitesse de vent de référence	[m/s]
U : Coefficient de transmission thermique	$[W/m^2 \cdot K]$
u, v, w : vitesse du vent suivant x, y et z	[m/s]
u_g, v_g : Vitesse du vent géostrophique selon x et y	[m/s]
V_i : Débit du renouvellement d'air	[L/s]
W : Vitesse moyenne du vent	[m/s]
W : Largeur des rues	[m]
W_u : Travail utile	$[W \cdot m^{-2}]$
w_D : Quantité d'eau liquide sous forme de gouttelettes dans un volume d'air donné	$[g/m^3]$
z_0 : Longueur de rugosité	[m]
z_d : Hauteur de déplacement	[m]
δQ_A : Flux advectif	$[W \cdot m^{-2}]$
δQ_S : Flux stocké	$[W \cdot m^{-2}]$

Symboles GRECS:

α : Absorptivité d'une surface	
β : Angle d'inclinaison d'une surface	[rad]
λ : Conductivité thermique	$[(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})]$
θ : Température potentielle	[K].
ρ : Masse volumique	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_a : Masse volumique	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_{sa} : Masse volumique du sang	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_w : Masse volumique du mur	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_s : albédo de la surface.	
ρ_t : albédo de la terre.	
ν_s : Débit sanguin allant du noyau du corps vers la peau	$[l \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}]$
ω_{oa} : Humidité spécifique de l'air extérieur	[Kg/Kg]
ω_{int} : Humidité spécifique de l'air à l'intérieur d'une pièce	[Kg/Kg]
σ_{svf} : Facteur de vue de ciel.	
ε : Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	$[m^2 \cdot s^{-3}]$
ε_f : Émissivité de la surface.	
χ : Composante d'une particule dans l'air	$[mg \cdot kg^{-1}]$

σ : Constante de Boltzman [W.m⁻².K⁻⁴]

ΔT_{u-r} : Intensité d'îlot de chaleur urbain désignant la différence de température entre une zone urbaine et une zone rurale.

$\Delta \theta_{u-r}$: Différence de la température potentielle entre une zone urbaine et une zone rurale.

Acronymes:

ACH : Taux de renouvellement d'air (Air change per hour)

FVC : Facteur de vue de ciel

ICU : Îlot de chaleur urbain.

C.L.A : Couche limite atmosphérique

IFU : Îlot de fraîcheur urbaine

HAP : Hourly analysis program

LAD : Densité de la surface des feuilles des plantes (leaf area density) [m²/m³]

PMV : Predicted Mean Vote

PPD : Predicted percentage dissatisfied

PET : Température physiologique équivalente.

PVC : Polychlorure de vinyle.

Rh : Humidité relative.

TEB : Town energy balance

TFM : Méthode de la fonction de transfert.

UTCI : Indice climat thermique universel (Universal Thermal Climate Index)

Introduction générale

Le changement climatique est l'un des plus grands et sérieux dangers auquel l'humanité est confrontée. L'apparition des îlots de chaleur urbains (ICU) détectés dans les villes et provoquant une augmentation supplémentaire de la température de l'air, va amplifier le phénomène pour les populations urbaines. Le phénomène d'ICU est principalement lié aux actions humaines et ses impacts sont importants sur l'environnement, la santé et la consommation énergétique. Il est possible de limiter ce phénomène, en agissant dès maintenant en proposant des solutions et des stratégies d'adaptation. Depuis quelques dizaines d'années, l'analyse des îlots de chaleur a fait l'objet de nombreux projets et recherches dans plusieurs pays et sous différents climats, traduisant le fait que la conception des bâtiments doit prendre en considération l'interaction du bâtiment avec son environnement. La complexité du problème est due aux nombreuses interactions entre la morphologie urbaine et les phénomènes physiques et thermo-aérauliques. Les mesures observées montrent que la température des centres villes peut atteindre dans certains cas 10°C de plus que dans les régions rurales environnantes. L'élévation de la température va affecter principalement les charges climatiques des bâtiments. En hiver, l'effet est positif provoquant une réduction de la consommation liée aux systèmes de chauffage, alors qu'en été la consommation énergétique nécessaire pour la climatisation est amplifiée avec une intensité plus importante dans les villes chaudes. Les travaux de (Santamouris, et al., 2001) ont montré que les charges thermiques d'un bâtiment de référence dans le centre d'Athènes, pourraient être doublées par l'effet d'îlot de chaleur et que le coefficient de performance COP des systèmes de climatisation était réduits de 25%. Parallèlement, l'élévation des températures instantanées maximales conduit aussi à une augmentation des puissances de crête de climatisation affectant le dimensionnement des systèmes d'air conditionné. Cette augmentation des charges de climatisation entraîne une élévation de la demande d'électricité urbaine et des émissions de CO₂. A leur tour, les systèmes de climatisation dégagent une quantité de chaleur dans l'ambiance extérieure créant une sorte d'auto-amplification de l'intensité d'îlot de chaleur.

L'objectif principal de cette thèse est d'analyser et de quantifier à l'aide d'une série de simulations microclimatiques, l'effet du phénomène d'ICU sur la consommation énergétique de climatisation d'une part, et sur le confort du piéton d'autre part, pour un cas d'un climat méditerranéen. Ce travail vise à déterminer le potentiel de rafraîchissement de différentes stratégies d'adaptation en saison chaude dans le but d'intégrer ces stratégies dans la conception des projets urbains et dans les réglementations de construction.

Ce travail de thèse s'articule comme suit :

Le chapitre 1 présente une étude bibliographique du phénomène d'ICU, montrant ses causes et ses effets. Nous exposons dans ce chapitre les transferts de chaleur et de masse à l'échelle urbaine, ainsi que la notion du confort extérieur en présentant les indices d'évaluation. Ce

chapitre se termine par une présentation des ICU dans le contexte des climats méditerranéens et dans le cas particulier du Liban.

Le travail de thèse va s'appuyer sur la simulation numérique de ces phénomènes. L'outil numérique de simulation « ENVI-met » et les sous-modèle physiques de cet outil sont présentés dans le chapitre 2, ainsi que le principe de l'approche numérique pour la résolution des équations modélisant les sous-modèles. A la fin de ce chapitre, nous présentons une série de recherches récentes utilisant l'outil ENVI-met.

Dans le chapitre 3, nous abordons le cas d'un quartier dense de la ville Beyrouth. Des simulations à l'aide d'ENVI-met sont réalisées permettant d'analyser les variations spatiales et temporelles des paramètres microclimatiques. De plus, à l'aide d'une approche statistique, nous analysons les résultats obtenus et recherchons des relations entre le facteur de vu de ciel et les températures ambiantes et radiantes.

Dans le chapitre 4, l'analyse du potentiel des différentes techniques de réduction des ICU est réalisée. Dans un premier temps, nous étudions l'impact des surfaces végétalisées en implémentant les modèles d'arbres d'ENVI-met dans le quartier choisi. Dans un deuxième temps, l'effet de la modification de l'albédo des matériaux composants le quartier, est évalué. Cette partie de l'étude s'inscrit dans le contexte de l'utilisation d'un fort albédo au niveau de l'enveloppe des bâtiments et des sols. A la fin de ce chapitre, nous étudions le potentiel rafraichissant des sources d'eau à l'échelle du quartier en testant les effets des fontaines et des brumisateurs d'eau sur le microclimat urbain.

L'impact des scenarios de réduction d'ICU sur les charges de climatisation est présenté dans le chapitre 5. L'étude est réalisée en couplant ENVI-met avec le logiciel « Hourly Analysis Program ». Cette étude consiste à comparer les variations des charges climatiques sensibles et latentes de deux types bâtiments : un bâtiment « sensible » (le plus influencé par les techniques d'adaptation) et un bâtiment de référence situé au milieu du quartier. Pour compléter notre approche, à la fin de ce chapitre, une évaluation du confort extérieur est menée en étudiant un itinéraire piéton dans le quartier. La température physiologique équivalente PET est choisie comme indicateur pour évaluer les modifications engendrées par les stratégies proposées.

Chapitre 1 Etude bibliographique

Le changement climatique est devenu aujourd'hui une réalité et ses impacts sont présents dans les domaines de l'environnement (écosystèmes, qualité d'air), de la santé humaine et de l'évolution des modes de vie. Le réchauffement climatique va s'accroître dans les prochaines décennies du fait des émissions des gaz à effet serre et de l'action de l'homme. Comme ces activités humaines se concentrent dans les zones urbaines, les villes contribuent d'une façon directe aux dérèglements climatiques. En 1995, la vague de chaleur qui a frappé Chicago a tué entre 550 et 800 personnes (Klinenberg, 2003). De même, la vague de chaleur survenue en Europe durant l'été 2003 appelée « canicule européenne de 2003 », a contribué à la mort d'environ 30 000 personnes dont 15 000 en France (Fouillet, et al., 2006). Une autre étude sur l'impact de la température ambiante sur la mortalité aux Pays-Bas (Huynen, et al., 2001), montre que chaque degré au-dessus de la valeur optimale de température entraîne une augmentation de la mortalité de 2.72 %. Parallèlement au changement climatique, les villes connaissent un phénomène particulier, appelé îlot de chaleur urbain, qui va aggraver la situation.

1.1 Îlot de chaleur urbain

On définit l'îlot de chaleur urbaine « ICU » comme une zone urbaine dont la température est significativement plus élevée que celle des zones environnantes (Anquez & Herlem, 2011). L'ICU peut aussi être expliqué comme étant une élévation localisée de la température dans un milieu urbain par rapport à la température moyenne de cette zone. La Figure 1.1 illustre ce phénomène montrant une différence de température entre les zones rurales et le centre-ville. Ce phénomène qui est principalement nocturne, est dû à la présence des surfaces imperméables (routes, etc.) et de nombreux bâtiments dans les zones urbaines qui stockent de la chaleur durant la journée et la relâchent durant la nuit.

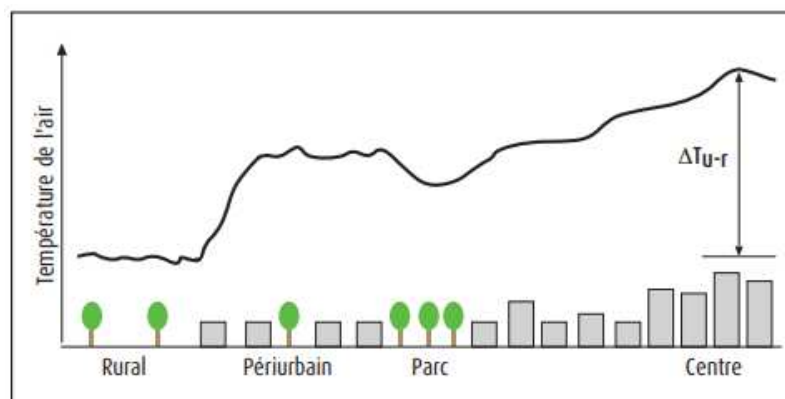


Figure 1.1 : Variation spatiale de la température de l'air le long d'une coupe transversale d'une zone urbanisée montrant le phénomène d'ICU (Pigeon, et al., 2008)

Luc Howard a été le premier à prédire que la température dans la zone urbaine serait supérieure de celle des zones rurales (Howard, 1833). Les travaux de Chandler (Chandler, 1970) (Chandler, 1976) et surtout de Tim Oke (Oke, 1974) (Oke, 1979) ont permis de fixer les

caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain et leurs effets sur les villes. Ces travaux nous permettent de généraliser la définition de l'ICU à une zone à topographie plate, dont la population est supérieure à 100 000 habitants, et durant un jour d'été ensoleillé (pas de nuage et une faible vitesse de vent).

La différence de température entre celle observée dans une ville et celle observée dans une zone avoisinante peut atteindre une valeur considérable. Selon Oke, les écarts de température peuvent aller de 2 °C pour une ville de 1 000 habitants à 12 °C pour une mégapole de plusieurs millions d'habitants (Oke, 1988). Citons un cas frappant : celui de Saint-Laurent à Montréal. En juin 2005, la température du quartier industriel (40,6 °C) était de 17 °C supérieure à celle d'un parc urbain (23,2 °C) situé à proximité, et de 9 °C supérieure à celle d'un quartier résidentiel situé au centre des espaces verts et industriels (Marthins, 2007).

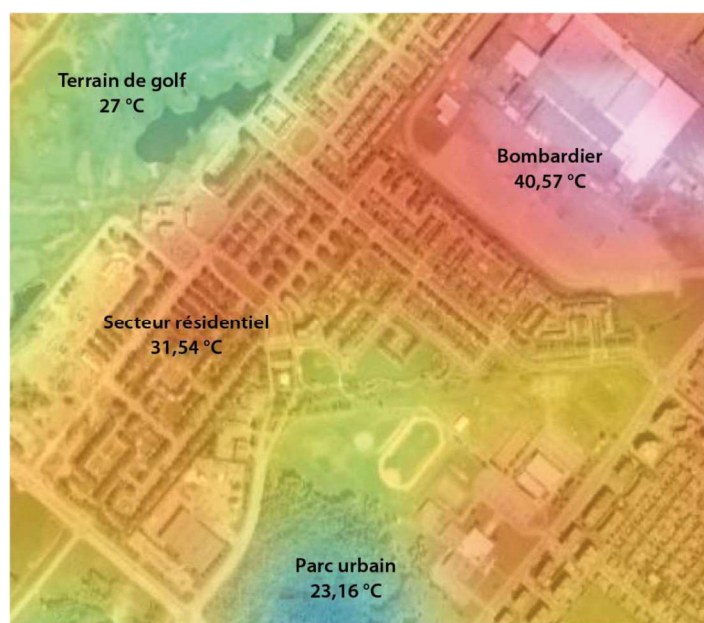


Figure 1.2 : Îlot de chaleur (rouge) et de fraîcheur (bleu et vert) à Montréal (Marthins, 2007).

On distingue deux types d'ICU: l'îlot de chaleur surfacique et l'îlot de chaleur atmosphérique.

1.1.1 L'îlot de chaleur surfacique

Les surfaces directement exposées au rayonnement solaire comme les toitures et les chaussées, peuvent avoir une température de 27 à 50 °C plus grande que la température de l'air environnant (Berdahl & Bretz, 1997). Cet îlot existe durant la journée et la nuit, mais il est plus important durant la journée du fait des rayonnements solaires. La différence de température surfacique entre la zone urbaine et la zone rurale peut atteindre 10 à 15 °C durant la journée et 5 à 10 °C durant la nuit (Vooght & Oke, 2003).

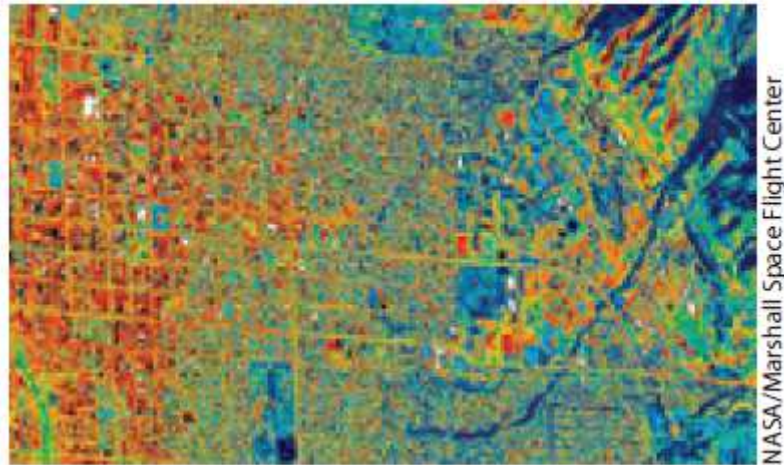


Figure 1.3 : Image d'ICU surfacique à Salt Lake, Utah, 13 Juillet 1998. A gauche la température surfacique la plus élevée, à droite la température surfacique la moins élevée.

Cependant la grandeur de l'îlot de chaleur urbain surfacique dépend essentiellement du rayonnement solaire. Cette grandeur varie selon les saisons et est maximale durant l'été. Pour estimer la température surfacique, la technologie de télédétection / caméra infrarouge (remote sensing en anglais) peut être adoptée (Eva Wong et al, 2008). La Figure 1.3 montre l'ICU surfacique dans la ville Salt Lake, durant la journée de 13 juillet 1998. Cette image est prise d'un avion par télédétection ; la température des zones blanches est environ 70 °C, alors que la température des zones bleues foncées est environ 30 °C.

1.1.2 Îlot de chaleur atmosphérique

La différence de température de l'air entre le centre-ville et les zones environnantes, permet de définir l'îlot de chaleur atmosphérique. Selon Oke (Oke, 1976), ce type d'îlot se divise en deux types : ICU dans la canopée urbaine et ICU dans la couche limite.

La canopée urbaine correspond à une couche d'air partant du sol urbain arrivant au sommet des toitures des bâtiments ou au sommet d'un arbre. En effet l'interaction entre les structures urbaines et les paramètres micro-météorologique engendre des mouvements de turbulence qui rendent la canopée urbaine souvent perturbée (Athamena, 2012).

La couche limite s'étend du sommet des toitures des bâtiments jusqu'à plusieurs dizaines de mètres au-dessus des toitures. La distance entre la surface du sol et la limite de la couche urbaine (C.L.A) ne dépasse pas les 1.5 km (selon Oke cette distance est entre 0.5 et 1.5 km). Il est à noter qu'au-delà de cette couche, l'atmosphère n'est pas influencée par la surface urbaine.

1.1.2.1 ICU atmosphérique dans la canopée urbaine

La température surfacique affecte la température de l'air de la canopée urbaine dans une zone déterminée. En effet la présence des surfaces végétalisées et des bassins d'eau diminue la température de l'air, alors que dans les zones industrielles et les zones à densité de bâti élevée,

la température de l'air est plus élevée. La différence de la température moyenne annuelle de l'air dans une grande ville et une zone environnante varie entre 1 °C et 3 °C (Oke, et al., 1997).

La Figure 1.4 (Oke, 1982) montre la variation de la température de l'air dans une zone urbaine et une zone rurale en fonction de l'heure de la journée, ainsi que la différence de la température ΔT_{u-r} entre ces deux zones, appelée aussi intensité de l'îlot de chaleur. Il est évident d'après l'allure du graphique, que l'ICU atmosphérique est phénomène nocturne. ΔT_{u-r} atteint des valeurs plus importantes durant la nuit, surtout durant la période qui suit juste le coucher du soleil.

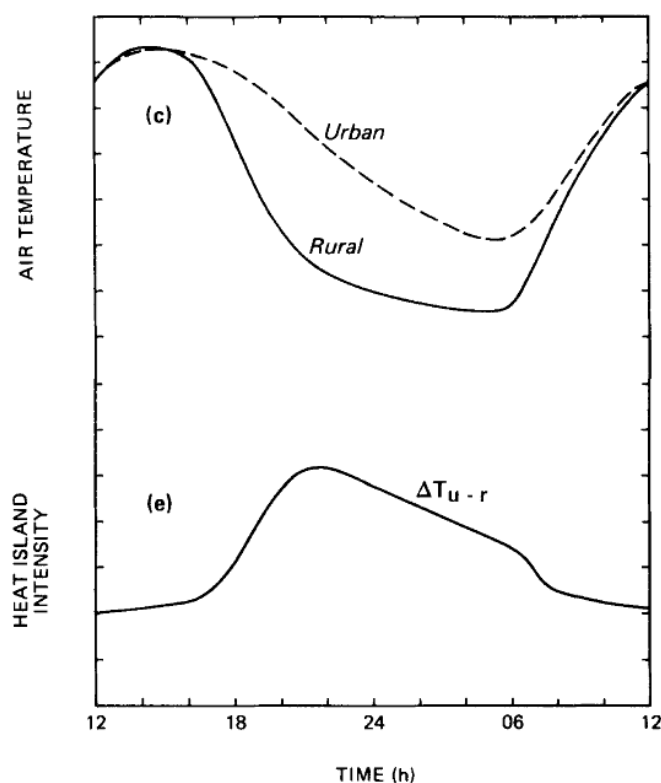


Figure 1.4 : Représentation temporelle de l'îlot de chaleur dans une canopée urbaine (faible vitesse de vent et jour ensoleillée), échelle verticale environ 2 °C par unité (Oke, 1982).

1.1.2.2 ICU atmosphérique dans la couche limite

La couche limite atmosphérique C.L.A est définie par la partie de la troposphère qui est soumise directement à l'influence des surfaces terrestres (bâtiments, lacs, sol...) à l'échelle de la journée. L'altitude moyenne de cette couche est de l'ordre de 1 km, mais cette épaisseur est très variable et dépend de la zone étudiée. Cette couche est caractérisée par des transferts de chaleur entre la surface et l'atmosphère.

La Figure 1.5 (a et b) montre l'allure de la C.L.A d'après les travaux d'Oke. L'intensité de l'îlot de chaleur urbain dans la C.L.A est exprimé selon Oke par $\Delta \theta_{u-r}$, θ étant la température potentielle d'une particule d'air qui est définie par la température que cet air aurait s'il subit une

transformation adiabatique telle que sa pression finale est p_0 (niveau de pression de référence standard 100 kPa). L'expression de la température potentielle exprimée en Kelvin s'exprime par :

$$\theta = T_p \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad [1.1]$$

Avec T et p sont respectivement la pression et la température d'une particule d'air à une altitude donnée, R la constante spécifique de l'air (287 J/kg.K) et C_p la chaleur spécifique de l'air sec à pression constante (1004 J/kg.K).

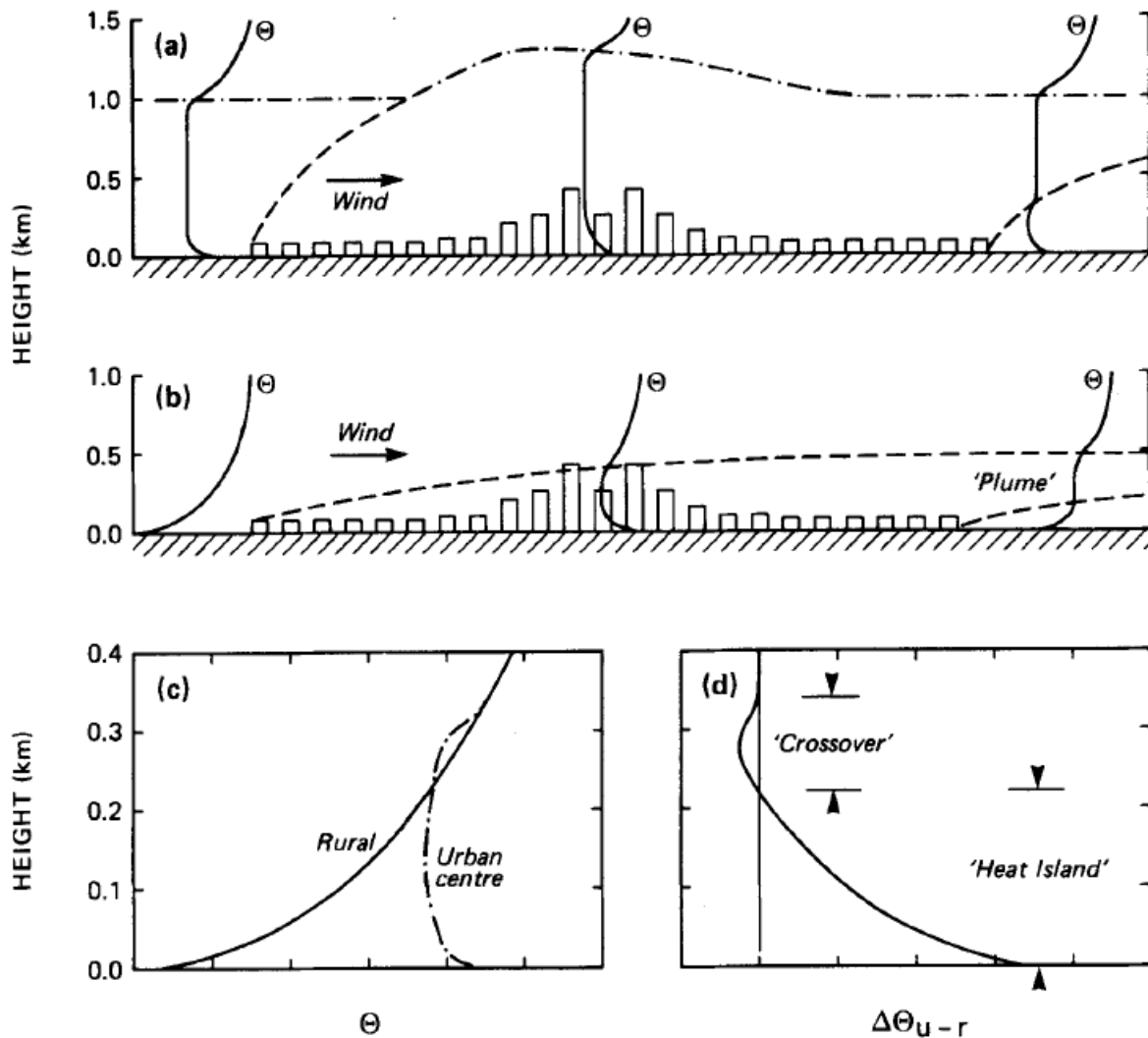


Figure 1.5 : (a) Forme générale de la couche limite atmosphérique dans une large ville à latitude moyenne durant un jour ensoleillé de l'été durant le jour, (b) C.L.A. durant la nuit, (c) comparaison entre la température potentielle d'une zone urbaine et celle rurale, (d) Intensité de l'îlot de chaleur (variation avec l'altitude) (Oke, 1982).

La Figure 1.5 (c) montre la variation de la température potentielle avec l'altitude dans une zone urbaine et une zone rurale durant la nuit. Le graphe 3(d) indique l'intensité de l'I.C.U ; il est clair que cette intensité est importante pour les faibles hauteurs et diminue avec l'altitude pour atteindre une valeur négative lorsqu'on s'approche des limites de la C.L.A (effet crossover).

D'autre part, la Figure 1.6 montre l'allure de la variation de la température de l'air en fonction de l'altitude d'après les travaux de (Khaikine, et al., 2006). La zone urbaine étudiée est Moscou et la zone environnante est Zvenigorod. Les résultats montrent que l'intensité d'ICU est plus importante durant la nuit. Il est aussi remarquable que la différence de température dans la zone de canopée urbaine est plus importante dans le mois de juin (environ 6 °C) que celle observée en aout (environ 2 °C).

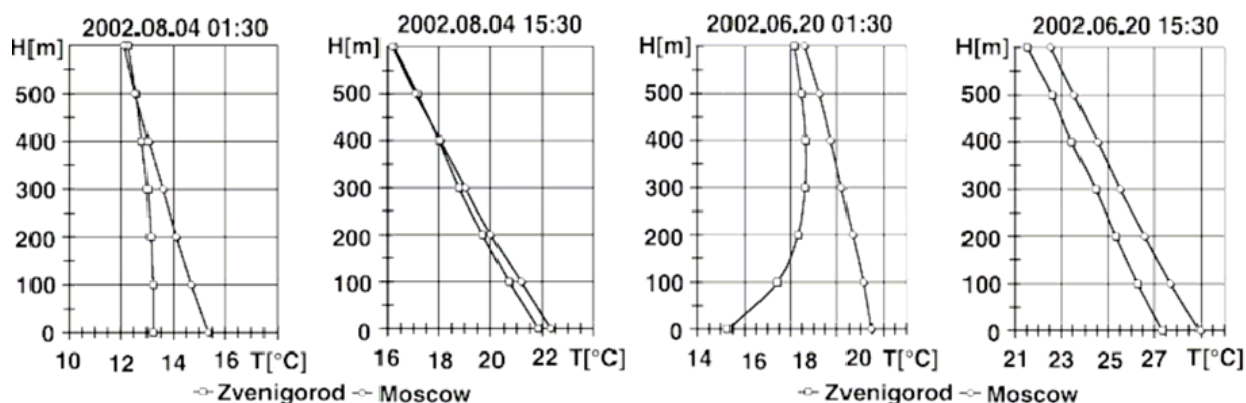


Figure 1.6 : Allure de la variation de la température en fonction de la hauteur à Moscou (zone urbaine) et Zvenigorod (zone environnante) pour 4 août 2002 et 20 juin 2002 (Khaikine, et al., 2006).

1.2 Echelle spatiale et temporelle dans laquelle se produisent les ICU

L'échelle temporelle dépend de deux variabilités : la variabilité diurne provoquée par la rotation de la terre autour d'elle-même et la variabilité saisonnière conditionnée par l'évolution d'incidence solaire. Le décalage de température entre un mois et un autre ou une saison et une autre est dû à l'inertie thermique des océans et de l'atmosphère. En se basant sur les données de Météofrance, Bouyer explique dans sa thèse (J.Bouyer, 2009) que l'apparition et la disparition d'un phénomène météorologique particulier ne sont pas complètement désordonnées, mais que le phénomène se maintient et évolue distinctement durant un certain intervalle de temps pouvant varier de la dizaine de minutes à quelques heures, voire à plusieurs jours.

La notion d'échelle temporelle ne prend de sens que lorsqu'elle est associée à une échelle spatiale; on parle alors habituellement d'échelles spatio-temporelles.

L'échelle spatiale est décrite par l'échelle horizontale ou échelle de surface, et par l'échelle verticale ou échelle atmosphérique. L'échelle microclimatique est la plus petite échelle spatiale horizontale définie par les spécialistes. Elle s'applique sur quelques milliers de mètres carrés.

De plus, l'atmosphère terrestre est divisée en plusieurs couches atmosphériques verticales comme indique la Figure 1.7 : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère. La troposphère est la basse atmosphère et son ordre de grandeur est de dizaine de kilomètre ; elle est de 7 km aux pôles et atteint une vingtaine de km au-dessus de la zone équatoriale. Les interactions entre l'atmosphère et la surface terrestre sont limitées à la troposphère qui contient la couche limite atmosphérique.

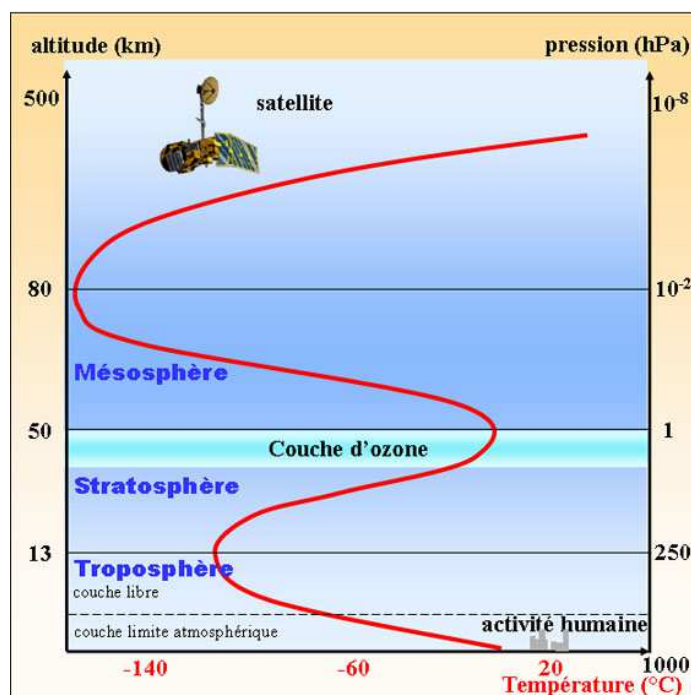


Figure 1.7 : La troposphère et les différentes couches de l'atmosphère terrestre (Ung, 2000).

1.3 Les différentes causes du phénomène d'ICU

L'apparition des îlots de chaleur urbains est due à la combinaison de facteurs naturels et anthropiques. Les trois principales catégories des facteurs naturels sont la climatologie, la météorologie et la topographie de la ville. Ces facteurs ne peuvent pas être influencés par la planification urbaine. A contrario, les facteurs humains ou anthropiques peuvent être le sujet d'études d'aménagements urbains dans le but de proposer des solutions de limitation des îlots de chaleur urbains. Parmi les principaux facteurs anthropiques on cite l'urbanisation, la forme architecturale des villes, le revêtement des matériaux notamment le choix de l'albédo des surfaces extérieures, la pollution, l'émission de chaleur anthropique (rafraîchissement et chauffage des bâtiments, transports, industrie...) et la diminution du couvert naturel. Ce dernier est l'un des facteurs principaux influençant l'urbanisation : d'après Marc Canorel l'urbanisation

est définie d'un point de vue physique, comme étant la substitution du couvert végétal par des surfaces minérales (bitume, pierre, etc.) (Canorel, 2009). La Figure 1.8 résume ces facteurs qui influent principalement l'intensité de l'îlot de chaleur urbaine.

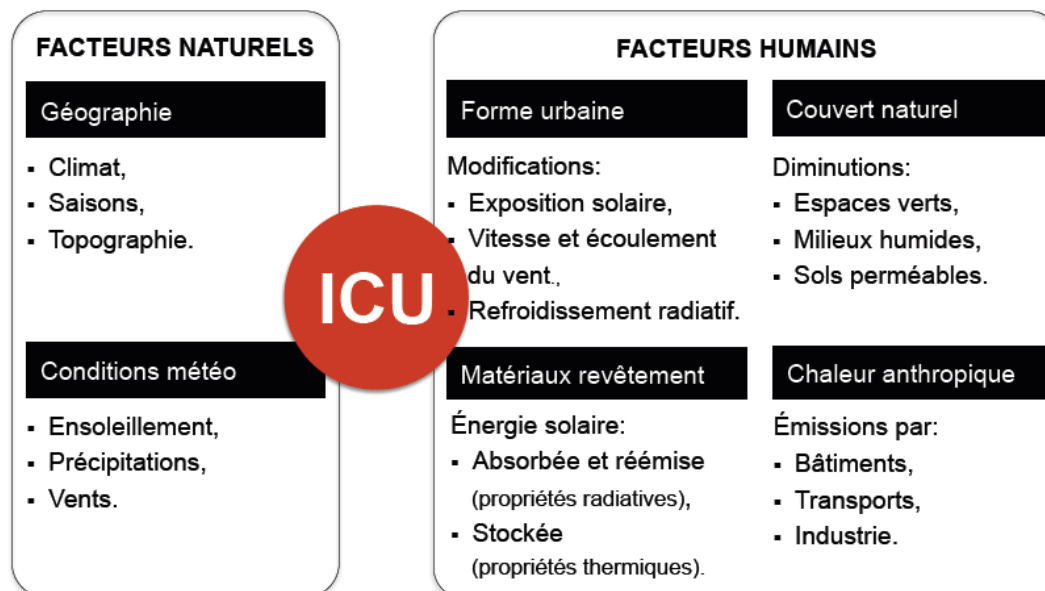


Figure 1.8 : Principaux facteurs influençant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (Dubois, 2014).

1.3.1 La forme urbaine

La forme urbaine des villes peut impacter le microclimat urbain comme étant un facteur qui agit sur le vent dominant et sur la distribution du rayonnement solaire. D'une part, les ombres provoqués par les bâtiments limitent l'accès à la ressource solaire et réduisent la température surfacique des matériaux. Ces ombres seront d'autant plus importantes que le prospect du tissu urbain est élevé (Adolphe, et al., 2002). Nous rappelons que le prospect est défini par le rapport entre la hauteur moyenne des bâtiments d'une rue et sa largeur.

D'autre part, l'orientation des rues par rapport aux vents dominants peut affecter l'intensité de l'ICU en influant sur la vitesse et la turbulence du vent (Sacre, 1983). Par exemple, dans le cas d'un quartier dense aux rues sinueuses, les vents seront ralentis et la chaleur de la ville ne sera pas facilement dissipée.

Un autre facteur anthropique est le piégeage radiatif qui est illustré dans la Figure 1.9. Ce phénomène est défini par le fait que les rayons solaires subissent des multi-réflexions sur les parois des bâtiments dans une zone urbaine à fort prospect, avant d'être redirigés partiellement vers l'atmosphère. Une grande quantité de rayonnement solaire sera ainsi stockée par les matériaux urbains puis émise à nouveau sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde. Ces rayonnements seront piégés de la même manière que les rayons solaires (Colombert, 2008). L'intensité du piégeage radiatif est fortement liée au rapport « W/H » de la largeur de la rue W

sur la hauteur des bâtiments H . Citons les travaux de Johansson qui a mesuré les températures d'air dans deux différentes rues de la ville de Fez au Maroc. L'étude porte sur une rue étroite dans la vieille ville ayant un rapport W/H égal à 0.1, et sur une autre rue plus large dans la nouvelle ville ayant un rapport W/H égal à 1.6. Les résultats ont montré que les températures d'air en été ne dépassent pas 32 °C dans la vieille ville, alors que dans la rue de la nouvelle ville les températures atteignent les 41 °C (Johansson, 2006).

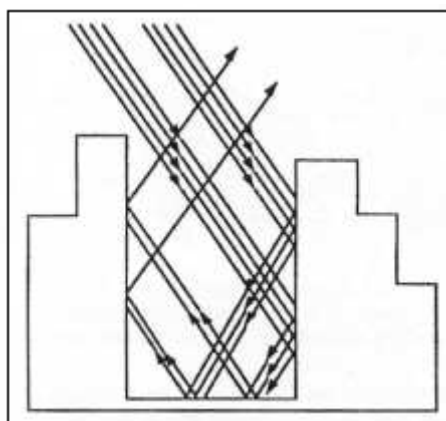


Figure 1.9 : Phénomène du piégeage radiatif d'après Estournel (Ringebach, 2004).

1.3.2 Les matériaux

Les matériaux constituant les revêtements de sol, les pavements et l'enveloppe des bâtiments ont un impact important sur l'ICU. En effet, les matériaux des milieux urbains ont une tendance à absorber la chaleur durant le jour et la réémettre plus tard la nuit. Ce qui explique que l'intensité de l'ICU est plus importante durant la nuit du fait de la restitution de chaleur par les matériaux des villes. La capacité des matériaux à capter la chaleur dépend de deux principales grandeurs : l'albédo et l'inertie thermique.

1.3.2.1 Albédo

L'albédo ou réflectivité solaire désigne le rapport de l'énergie solaire réfléchiée par une surface sur l'énergie solaire totale reçue par cette surface. Ce rapport permet de déterminer la quantité de la chaleur absorbée par les matériaux. De manière générale, le fort albédo des matériaux à revêtement clair réduit le stockage de chaleur. A l'échelle de la ville, l'albédo représente la réflectivité moyenne des surfaces hétérogènes formant la zone étudiée. L'albédo diffère d'une région à une autre : pour les villes européennes et américaines, l'albédo varie entre 0.15 et 0.3, alors que dans quelques villes nord-africaines l'albédo est compris entre 0.45 et 0.6 (surfaces claires).

Une étude expérimentale réalisée par Doulos sur 93 matériaux utilisés pour les revêtements du sol et des façades des bâtiments, a montré que la différence de température de surface entre 2 différents matériaux peut atteindre les 25 °C (Doulos, et al., 2004). Les mesures de températures surfaciques ont été faites par thermographie sur des échantillons exposés aux rayonnements solaires. Cette étude révèle un écart maximal de 6.9 °C entre la température surfacique des

matériaux clairs et la température de l'air. Alors que cet écart varie entre 10.2 °C et 15.5 °C pour les matériaux foncés.

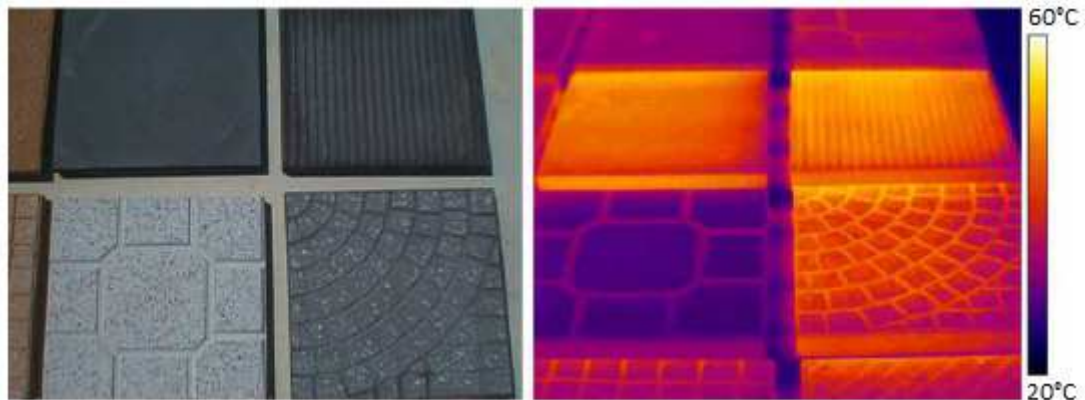


Figure 1.10 : Thermographie infrarouge des matériaux utilisés dans les travaux de (Doulos, et al., 2004).

D'après Prado et al, l'albédo des zones urbaines est généralement plus faible que celui des zones rurales ce qui contribue à l'augmentation des températures des matériaux urbains créant un îlot de chaleur urbain (Prado & Ferreira, 2005).

D'autre part, Ringenbach a réalisé des simulations sur une rue canyon. Il a observé qu'au moment où l'intensité du rayonnement solaire est maximale, une augmentation de la température de surface de 3 °C se produit lorsqu'il y a réduction de un dixième de l'albédo (Ringenbach, 2004).

Enfin, les travaux expérimentaux d'Asaeda ont montré que le stockage de chaleur et la température surfacique de l'asphalte et du béton sont beaucoup plus important que dans le cas du sol nu (Asaeda, et al., 1996).

1.3.2.2 Inertie thermique

La notion d'inertie thermique est liée à la faculté d'un composant ou d'un matériau à résister à une variation de flux ou de température (Adolphe, 2011). Cette notion peut être aussi expliqué par le fait d'emmagasiner de la chaleur (ou du froid) et de la restituer ensuite à l'extérieur. Elle exprime le flux de chaleur ($W/m^2.K$) échangé par les parois du bâtiment avec l'ambiance intérieure par mètre carré de sol. On définit aussi l'inertie thermique par la vitesse à laquelle un bâtiment se refroidit ou se réchauffe. Donc, un matériau inerte est un matériau qui met un temps long à atteindre une nouvelle température d'équilibre lorsqu'il est soumis à une perturbation thermique.

L'inertie thermique est caractérisée par 2 paramètres :

- la diffusivité d'un matériau a (m^2/s) qui représente la capacité à transmettre ou diffuser une variation de température et s'exprime par $a = \frac{\lambda}{\rho C}$. Avec λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) la conductivité thermique du matériau, ρ ($kg.m^{-3}$) sa masse volumique et C

($J.Kg^{-1}.K^{-1}$) sa chaleur spécifique. Plus elle est faible, la vitesse de propagation de la chaleur dans un corps est lente et ensuite le déphasage est grand.

- L'effusivité thermique E_f ($J/K.m^2.s^{\frac{1}{2}}$) qui caractérise la capacité d'un matériau à absorber une puissance thermique et s'exprime par $E_f = \sqrt{\lambda \rho C}$. Lorsque l'effusivité est grande, la chaleur interne sera absorbée rapidement par le mur et donc l'élévation de la température est lente.

Donc, une paroi ayant une bonne inertie doit posséder une forte chaleur spécifique, une conductivité élevée et une grande surface d'échange. De plus, l'inertie thermique d'un bâtiment demeure une source de confort, comme étant en capacité d'atténuer les fluctuations de température en évitant les surchauffes en été et la chute brutale de température en hiver. De même, l'inertie peut limiter les pertes de chaleur ce qui diminue la consommation du chauffage dans les bâtiments à occupation continue (Sidler, 2003). L'inertie thermique est une condition nécessaire au confort, mais elle n'est pas suffisante ; elle doit être associée à un système de refroidissement nocturne en été pour éliminer la chaleur emmagasinée pendant la journée. Pour mettre en évidence l'effet de l'inertie sur la consommation du chauffage en hiver, il faut distinguer entre occupation continue et celle non continue. Dans les bâtiments à occupation continue, l'inertie conduit à la diminution de la consommation de chauffage, alors que dans les bâtiments à occupation intermittente l'inertie provoque des surconsommations d'énergie en hiver puisqu'elle maintient la température intérieure à un niveau trop élevé en période d'inoccupation (Sidler, 2003). Enfin, dans le cadre de l'étude qui nous concerne, les matériaux urbains dont l'inertie est élevée absorbent de la chaleur pour la restituer la nuit, empêchant le rafraichissement de la ville (Liébard & Herde, 2005).

L'inertie thermique dépend de plusieurs paramètres : la masse thermique, la configuration du bâtiment, l'isolation thermique (positionnement et dimensionnement) et le type de sollicitation agissant sur le bâtiment (Adolphe, 2011).

Pour étudier la relation entre la masse thermique et l'inertie, rappelons l'équation du transfert conductif dans un milieu homogène qui est de la forme :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad [1.2]$$

L'extrapolation du régime permanent et l'intégration de l'équation de l'équilibre thermique permet d'écrire la relation suivante dans un bâtiment de masse équivalente M, de volume V, de chaleur spécifique C, entouré d'une isolation G et dans lequel une puissance P est dissipée.

$$T = T_{ext} + \frac{P}{G.V} \left(1 - e^{-\frac{G.V}{M.C}t} \right) \quad [1.3]$$

L'équation [1.3] montre que la variation de la température est une fonction exponentielle de la masse avec les volume, chaleur spécifique et isolation constants. Plus un corps est léger, plus il répond rapidement à une sollicitation thermique. Un bâtiment fabriqué entièrement en bois (structure légère), présente une faible inertie thermique ; il y a un risque de surchauffe en été pendant la journée, et une augmentation de la consommation du chauffage en hiver comme les apports solaires ne seront pas conservés. Pour augmenter l'inertie thermique de ce type de

maison, il va falloir augmenter la masse des éléments internes de la maison : cloisons en briques, dalles en bétons, dalles de plancher... Lorsque la masse intérieure d'une maison en bois est importante, le principe se rapproche alors d'une maison en pierre isolée par l'extérieur (Euroméditerranée, 2010).

Mais cette caractérisation de l'inertie par la masse reste simplifiée pour plusieurs raisons. En effet lorsque le régime permanent est atteint en hiver et la différence de température entre intérieur et extérieur est grande, le flux de chaleur dépend essentiellement de la conductivité thermique et très peu de la capacité thermique. En outre (Givoni, 1978) a montré que l'effet de la masse sur les températures est négligeable pour les surfaces claires (blanches) et bien ventilées, seules les surfaces sombres et non ventilées sont affectées par la masse.

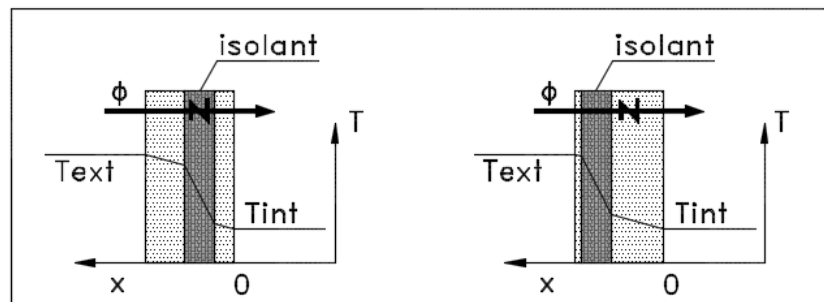


Figure 1.11 : Conduction dans un mur ou la place de l'isolant est différente.

D'autre part, l'inertie du bâtiment sera influencée par la configuration du bâtiment lorsque les surfaces vitrées des façades sont grandes et lorsque les apports solaires sont importants. Donc il faut réduire les grandes surfaces vitrées et mal protégées du soleil dans les bâtiments.

L'isolation thermique a un effet sur l'inertie du bâtiment. En effet, une paroi constituée d'un matériau et d'un isolant est d'autant plus inerte lorsque l'isolant est placé à l'extérieur de la paroi. La réponse du local à une perturbation thermique sera plus rapide si l'isolation est placée à l'intérieur.

1.3.3 Couvert naturel

Ce paramètre désigne surtout les arbres, les aménagements végétaux et les espaces en eau. La présence des espaces verts affecte la distribution du rayonnement solaire, la température et l'humidité de l'air. Les arbres permettent de créer un effet d'ombrage et de réfléchir une partie du rayonnement solaire par leur feuillage, comme indiqué sur la Figure 1.12. Ce pouvoir dépend de la volumétrie de la végétation, de la densité foliaire et de la hauteur des arbres. Les végétaux sont aussi capables à absorber l'eau du sol puis la restituer dans l'atmosphère par transpiration. En conséquence, le taux d'humidité dans l'air va augmenter dans le milieu environnant les végétaux (Musy, 2005). Ainsi les végétaux affectent le microclimat urbain grâce au phénomène d'évapotranspiration qui se base sur l'évaporation et la transpiration de l'eau simultanément dans l'atmosphère. Ce phénomène contribue à la baisse de la température physiologique de l'air ambiant (PET) et peut améliorer le confort. Ainsi, dans de bonnes conditions d'irrigation, un arbre peut être considéré comme un climatiseur évaporatif naturel de 0,378 m³/jour (Akbari, et al., 1992). Ce taux d'évapotranspiration est équivalent à 26.7 kWh/jour (Bouyer, 2009).

De plus, grâce à leur pouvoir isolant en hiver et rafraîchissant en été, l'utilisation des murs végétaux et des toitures végétalisées ont des conséquences positives sur la performance énergétique des bâtiments. La température maximale d'un mur végétal est de 30 °C alors que celle d'un mur classique atteint 60 °C (Adolphe, et al., 2015), d'où la réduction de la consommation énergétique nécessaire à la climatisation.

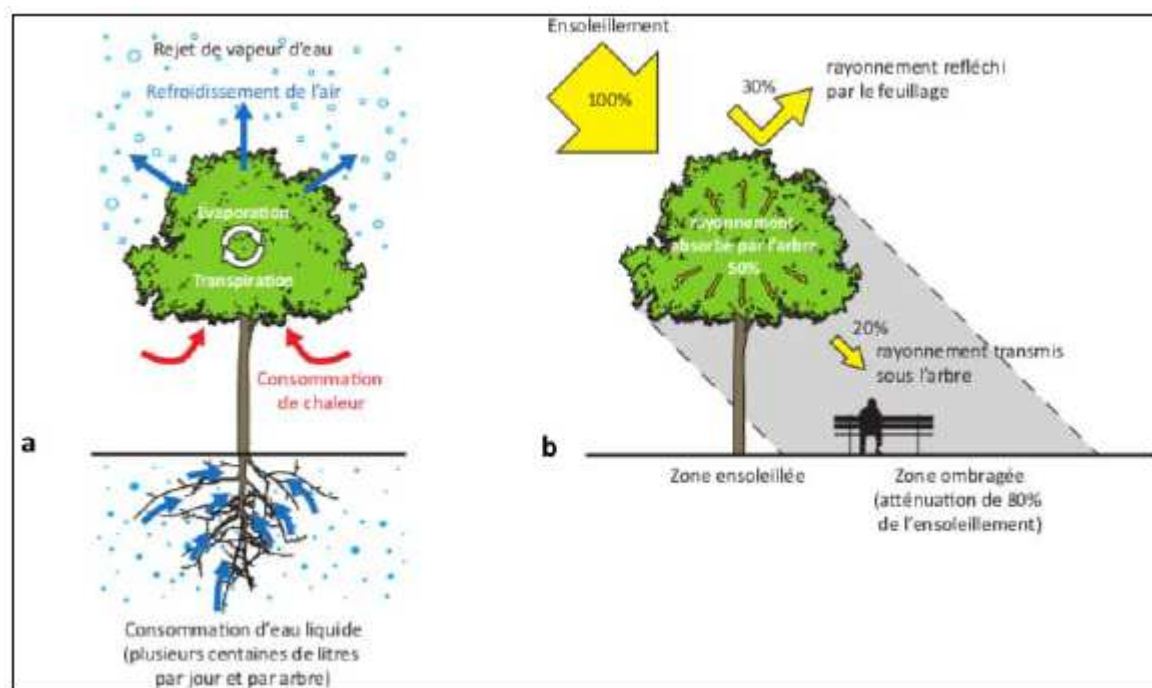


Figure 1.12 : Processus physiques principaux à l'origine des modifications radiatives et thermiques du climat urbain (Munk, 2013).

D'autre part, l'utilisation de surfaces d'eau, la présence de bassins d'eau, de fontaines ou de jet d'eau, ou même la mise en place de surfaces minérales poreuses avec circulation d'eau contribue à diminuer l'ICU. L'évaporation de quelques gouttes d'eau dans un courant d'air rend ce dernier plus humide et favorise le rafraîchissement de la zone étudiée. Le rafraîchissement évaporatif constitue alors un dispositif efficace pour lutter contre l'ICU. Ces techniques de refroidissement évaporatif ont permis de réduire en moyenne la température ambiante à Séville de 5 °C (Brophy, et al., 2000). Les travaux de Nikolopoulou ont montré que la mise en place des fontaines, des étangs et des piscines au village olympique d'Athènes, ont permis de réduire la température ambiante de 4 °C (Nikolopoulou, 2004). De même, une baisse de la température d'environ 3.6 °C est observée aux alentours de la « Cheonggyecheon », une rivière de Séoul en Corée du Sud.

1.3.4 Chaleur anthropique

La chaleur anthropique est majoritairement issue de l'industrie, du transport et de la climatisation des bâtiments. D'après Oke, le flux de chaleur anthropique peut atteindre 117 W/m² en valeur annuelle (Oke, 1987). La production de la chaleur anthropique dépend essentiellement du nombre d'habitants de la ville, et des caractéristiques des bâtiments (taille, densité et fonction). Les systèmes de climatisation à air dégagent des charges thermiques qui

s'ajoutent à l'ambiance extérieure. On constate un phénomène d'auto-amplification : plus il fait chaud, plus il y a utilisation des climatiseurs qui génèrent des charges thermiques vers l'extérieur (Adnot, et al., 2004). Des études réalisées sur Paris, ont montré que si la puissance de climatisation double, l'intensité d'ICU augmente de $+0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+1.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Munck, et al., 2010).

1.4 Evaluation statique du phénomène d'ICU

L'intensité maximale d'ICU peut être estimée grâce à des formules empiriques qui dépendent des quelques caractéristiques de la ville et de certains paramètres microclimatiques.

1.4.1 ICU et taille de la ville:

La taille de la ville est essentiellement mesurée par sa population. La Figure 1.13 illustre 2 droites de régression reliant l'intensité maximale à la population pour deux différentes régions l'Europe et pour l'Amérique du Nord. Les résultats montrent que lorsque le nombre d'habitants augmente l'intensité de l'îlot de chaleur croît. Mais l'allure de $\Delta T_{u-r(\max)}$ en fonction de P est différente entre les deux régions. La morphologie est différente entre les villes européennes et celles d'Amérique ; en Amérique, la hauteur des bâtiments est importante et les villes possèdent une grande densité, alors qu'en Europe les villes sont moins élevées avec une densité de population moyenne.

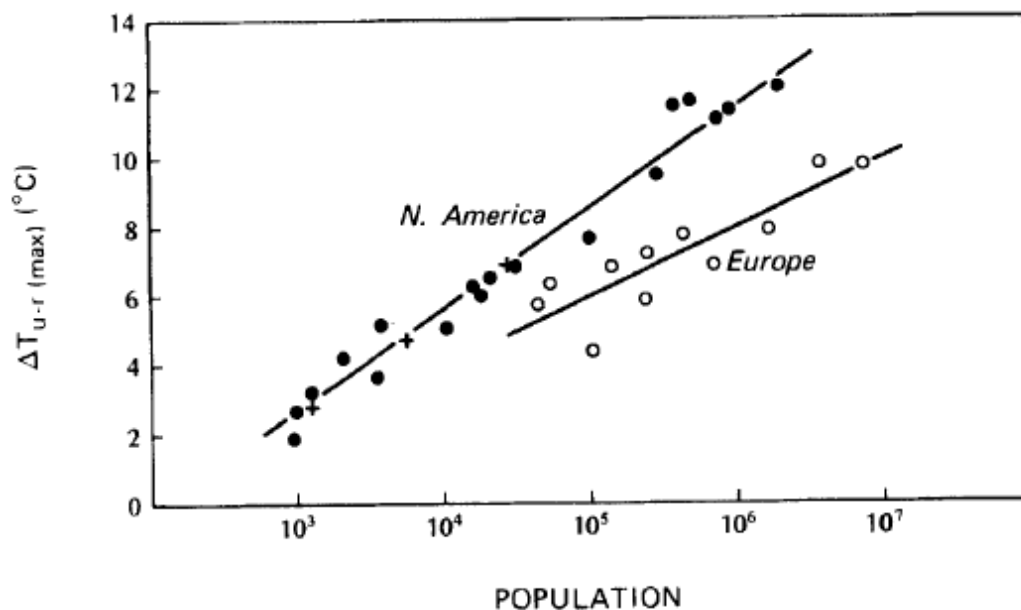


Figure 1.13 : Allure de ΔT_{u-r} maximale en fonction de la population à l'Amérique du nord et en Europe (Oke, 1982)

Plusieurs formules empiriques ont été établies pour trouver une relation entre ΔT_{u-r} maximale et la population (OKE, 1973). Oke propose, par exemple, une expression qui dépend de la population et la vitesse du vent (OKE, 1982, b) :

$$\Delta T_{u-r(\max)} = \frac{P^{0.25}}{(4U)^{0.5}} \quad [1.4]$$

avec P le nombre d'habitants, et U la vitesse de vent de référence (m/s).

D'autre part, la Figure 1.14 montre les résultats d'une étude sur la ville de Paris indiquant que lorsque la vitesse du vent augmente l'intensité d'ICU diminue (Escourrou, 1991).

Vitesse du vent de référence (m/s)	Intensité de l'îlot de chaleur (K)
1	4.5
2	3.4
3	3.4
4	2.6
5	2.2

Figure 1.14 : Variation de l'intensité maximale d'ICU avec la vitesse du vent de référence (Escourrou, 1991).

1.4.2 ICU et le rapport d'aspect H/W :

Le rapport d'aspect H/W avec H (hauteur des bâtiments) et W (largeur des rues) affecte fortement l'intensité d'ICU. En effet, une zone urbaine avec un rapport H/W élevé se refroidit plus lentement comme le facteur de vue de ciel dans cette zone est faible. Le potentiel de restitution de la chaleur par rayonnement à grande longueur d'onde vers l'atmosphère est alors faible. Le graphe de la Figure 1.15 illustre la corrélation entre le rapport d'aspect et $\Delta T_{u-r(\max)}$ pour 31 villes de l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie australe (Oke, 1988). Oke exprime cette corrélation selon la formule suivante :

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 7.45 + 3.97 \ln \frac{H}{W} \quad [1.5]$$

Cette corrélation a été validée pour un rapport H/W qui varie entre 0 et 3.5, comme l'indique le graphe de la Figure 1.15.

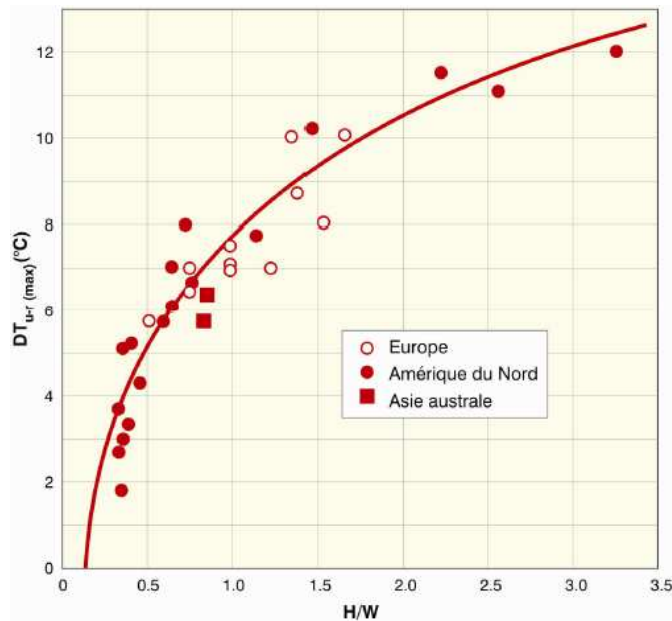


Figure 1.15 : Variation de l'intensité maximale d'ICU avec Le rapport H/W pour 31 villes d'Europe, d'Amérique du Nord et d'Asie australe.

1.5 Conséquences des ICU

Pour les spécialistes du génie climatique, le réchauffement climatique présente des conséquences surtout sur la consommation énergétique d'un bâtiment. En effet l'ICU contribue à l'augmentation de la demande d'énergie et d'électricité pour le rafraîchissement en été alors que ce réchauffement climatique présente une conséquence positive en diminuant la consommation énergétique nécessaire au chauffage du bâtiment en hiver.

D'une manière plus générale, l'îlot de chaleur urbain a des impacts négatifs sur la santé humaine, l'évaporation des eaux naturelles, l'approvisionnement en eau et entraîne un changement des écosystèmes terrestres et aquatiques au niveau de leur structure (Desjarlais, et al., 2010). L'îlot de chaleur contribue aussi à l'augmentation de l'inconfort.

Pour atténuer les îlots de chaleur, des mesures d'adaptations peuvent être envisagées pour résoudre ce problème climatique.

1.6 Îlots de fraîcheur urbain et mesures d'adaptation aux ICU :

Un îlot de fraîcheur urbain (IFU) est défini par un périmètre urbain dont l'action rafraîchissante permet d'éviter ou de contrer directement ou indirectement les effets des îlots de chaleur (Fernandez & Deshaies, 2013). Du point de vue physique, l'IFU a pour but d'améliorer le rafraîchissement passif des îlots urbains. Pour cela, les ingénieurs, les architectes et les urbanistes sont amenés à développer des méthodes de conceptions permettant d'atténuer les

effets de l'îlot de chaleur. En plus de l'implémentation des espaces verts et des sources d'eau dans les zones urbaines, d'autres scénarios peuvent être adoptés pour atténuer les îlots de chaleurs : citons la forme urbaine et la forme architecturale des bâtiments, limitation du prospect (rue large et bâtiments bas), limitation de l'emprise au sol et construction moins compacte, et limitation de la densité bâtie. Mais le potentiel d'actions de ces leviers sur l'ICU reste modéré. Le revêtement urbain et la nature des matériaux utilisés dans la construction des toitures et des façades jouent aussi un rôle important dans l'atténuation des îlots de chaleur. En effet, l'utilisation des matériaux à albédo élevé permet de diminuer la quantité de rayonnement solaire absorbée par une surface et par suite contribue à la diminution de la température surfacique des bâtiments. A contrario, un faible albédo adopté dans la construction augmente la température de surface qui peut atteindre 80 °C (Giguère, 2009) et contribue alors à l'îlot de chaleur urbain. L'utilisation des matériaux clairs à albédo élevé est donc une mesure efficace pour atténuer l'ICU. Les effets négatifs de ce levier d'action est l'augmentation de la consommation du chauffage et l'inconfort du piéton.

Dans la littérature, plusieurs organisations proposent des stratégies pour diminuer les impacts des ICU.

Ouranos, qui est un consortium de recherche sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques créé en 2001 (Desjarlais, et al., 2010), présente des stratégies d'adaptation aux changements climatiques se reposent sur plusieurs éléments citons ; la conception de technologies optimales, la modification et l'adaptation des politiques et des normes, la détermination des enjeux prioritaires, etc.

Ces dernières années, la ville de Toronto a proposé plusieurs politiques de limitation d'ICU (Penney, 2008) (Rinner, et al., 2011). En 2009, « Toronto Green Standard » a présenté un ensemble de normes à intégrer dans les nouveaux bâtiments dans le but de réduire l'effet d'ICU (Giguère, 2009). Ces préconisations recommandent d'utiliser un albédo élevé sur les toitures des bâtiments. D'autre part, « Toronto Green Development Standard » recommande que 30 % des parkings soit ombragés par des arbres (Wanga, et al., 2016).

D'autre part, en France, l'observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, l'ONERC créée en 2001, a piloté en 2008 et 2009, avec le Département de lutte contre l'effet de serre du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, un groupe interministériel sur l'évaluation des impacts du changement climatique, l'adaptation et les coûts associés (ONERC, 2009).

Plus récemment, un projet îlot de fraîcheur urbain IFU (Martins, et al., 2016) a étudié la « ZAC Montaudran Aerospace » à Toulouse. Ce projet a permis d'identifier et d'analyser les scénarios et les dispositifs qui permettent de modifier le microclimat. Les principaux facteurs influant l'ICU étudié dans ce projet sont la forme urbaine ou architecturale, matériaux, végétation et eau, (Adolphe, et al., 2015). La densité végétale a présenté un effet prépondérant dans la réduction de la température physiologique et son potentiel d'action sur l'ICU est très important. Les effets négatifs de ce levier d'action sont la consommation d'eau pour la végétation et l'augmentation de l'éclairage. Les résultats ont montré que l'utilisation des surfaces en eau et la présence des bassins est la stratégie la plus performante. L'effet négatif de ce levier est la grande consommation d'eau et surtout d'eau potable. A Lyon, le projet EVA (eau-végétation-albédo) a étudié récemment la mise en œuvre de ces solutions sur site.

Pour mieux comprendre l'interaction Ville-Environnement, il est primordial d'appréhender le bilan énergétique à l'échelle urbaine.

1.7 Bilan énergétique à l'échelle urbaine

Le bilan énergétique d'une surface urbaine est la somme algébrique des flux énergétiques qu'elle échange avec son environnement. Ainsi l'équation du bilan énergétique est de la forme :

$$Q_R + Q_F = Q_H + Q_L + Q_C + \delta Q_S + \delta Q_A \quad [1.6]$$

Où Q_R est le bilan radiatif appelé aussi flux de rayonnement, Q_F est le flux anthropogénique, Q_H est le flux convectif, Q_L et Q_C sont respectivement le flux latent et le flux conductif, δQ_S est le flux stocké et δQ_A est le flux advectif.

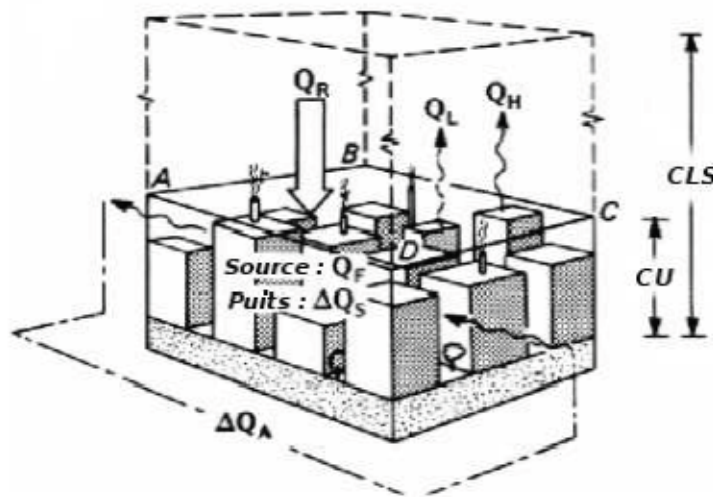


Figure 1.16 : Modélisation d'un élément de surface urbain (Oke, 1987)

1.7.1 Le bilan radiatif

Généralement le rayonnement se décompose en deux types: le rayonnement solaire et le rayonnement thermique. Q_R s'écrit alors :

$$Q_R = (1 - \rho_s)I_g + I_{IR,u} + I_{IR,a} \quad [1.7]$$

Avec ρ_s : albédo de la surface.

I_g : flux solaire globale incident (W/m^2).

$I_{IR,u}$: flux infrarouge net échangé avec toutes les surfaces appartenant à la canopée urbaine (batiments, route, sol...).

$I_{IR,a}$: flux infrarouge net échangé avec l'atmosphère.

1.7.1.1 Rayonnement solaire

Le flux solaire incident globale est la somme du flux direct provenant de la voûte céleste, du flux diffus par les particules atmosphériques et le flux réfléchi par les surfaces urbaines :

$$I_g = I_{t,\text{direct}} + I_{t,d} + I_r \quad [1.8]$$

Avec: $I_{t,\text{direct}}$ est le flux direct total (W/m^2), $I_{t,d}$ est la somme des flux diffus (W/m^2) et I_r est le flux réfléchi par la terre.

La Figure 1.17 montre les trois composantes du rayonnement solaire diffus : le diffus isotropique, le diffus de l'horizon et le diffus de la circonférence du soleil.

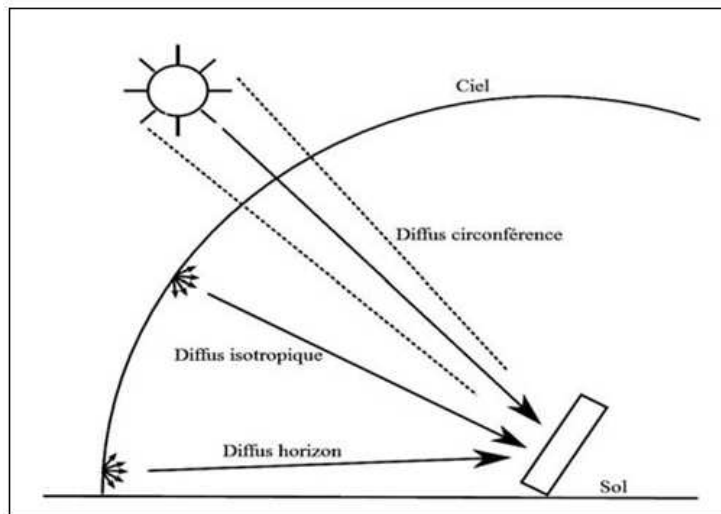


Figure 1.17 : Les trois composantes du rayonnement solaire diffus (M'Raoui, et al., 2011)

Environ 50 % de l'énergie solaire est absorbée par la surface terrestre, 30 % est réfléchi vers l'atmosphère et près de 20 % de cette énergie est absorbée par celle-ci. Il est à noter que les rayonnements direct et diffus sont mesurés dans les stations météorologiques à l'aide de capteurs spécialisés ou estimés à l'aide des modèles empiriques.

Pour les surfaces inclinées, le modèle isotropique (Loutzenhiser, et al., 2007) appelé modèle du ciel isotrope, est le modèle le plus simple qui permet de donner une bonne estimation du calcul du rayonnement solaire direct et diffus sur une surface inclinée. Ce modèle observé par (Hottel & Woertz, 1942) et (Duffie & Beckman, 1991) suppose la diffusion isotropique et néglige la diffusion de l'horizon et celle de la circonférence du soleil. En prenant en considération un facteur de visibilité entre le plan étudié et le ciel et la réflexion des flux par la terre, le flux solaire total tombant sur une surface inclinée, Figure 1.18, peut s'exprimer par :

$$I_t = I_{h,direct} \cdot R_b + I_{h,d} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + I_h \cdot \rho_s \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad [1.9]$$

Avec:

- β étant l'angle d'inclinaison de la surface.
- $I_{h,direct}$ étant le flux direct normal sur une surface horizontale.
- $I_{h,d}$ étant le flux direct diffus sur une surface horizontale.
- R_b le facteur géométrique de la surface inclinée et s'exprime par $R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$.
- ρ_s réflectivité de la terre.

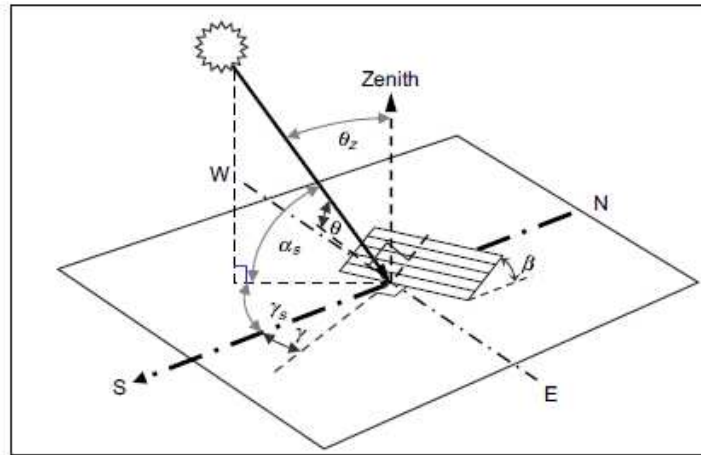


Figure 1.18 : Relations géométriques reliant la position de la surface inclinée par rapport au soleil et la terre (Chwieduk, 2009).

Le flux solaire incident est réduit de 2 à 20 % dans les zones urbaines (Arnfield, 2003) du fait de la couche atmosphérique polluée mais une augmentation du flux diffus est à relever.

La quantité de flux solaire absorbée par une surface dépend des matériaux de construction essentiellement de l'albédo de cette surface. Cet albédo varie avec le temps à cause du dépôt des poussières et du vieillissement des surfaces.

1.7.1.2 Rayonnement thermique

Tout corps ayant une température T et se comportant comme un corps gris, émet un rayonnement thermique dans toutes les directions et la densité de ce rayonnement $I_{IR,u}$ (pour les grandes longueurs d'ondes (I.R)) est défini par la loi de Stéphan Boltzman :

$$I_{IR,u} = \varepsilon \sigma T^4 \quad [1.10]$$

Avec $I_{IR,u}$ est l'intensité du rayonnement infrarouge émis par la surface de température T et d'émissivité ε , σ est la constante de Stéphan Boltzman ($5.6 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$).

Un échange radiatif de grande longueur d'ondes existe donc entre les surfaces urbaines. Le flux net échangé par une surface est la somme des flux nets perdus et des flux nets reçus (Annexe A).

Comme la température des surfaces dans la ville est généralement plus grande que celle des surfaces rurales, alors le flux infrarouge émis dans les zones urbaines est plus important. Selon Delaunay, plusieurs mesures réalisées aux Etats-Unis (Delaunay, 1995) ont montré que le flux infrarouge émis par les surfaces urbaines est de 20 % plus grand que celui mesuré à la campagne aux Etats-Unis.

D'autre part, l'atmosphère émet aussi des rayonnements infrarouges. On définit le rayonnement infrarouge atmosphérique par le flux infrarouge émis par les particules de vapeur d'eau, de gaz carbonique, des aérosols et d'autres particules polluantes de la couche atmosphérique. Son intensité dépend essentiellement de la température et de la composition chimique de la couche limite urbaine. Sa valeur peut être déterminée par les données météorologiques ou explicitée par des formules empiriques (Vinet, 2000) (Robitu, 2005). Inversement au flux solaire incident, le rayonnement infrarouge en ville est d'environ 5 % plus important par rapport aux zones rurales dans l'étude de (Mestayer & Anquetin, 1994).

1.7.2 Le flux anthropogénique

Ce flux correspond à la somme de production de chaleur des véhicules, de l'industrie, des bâtiments et des équipements urbains. Ce flux est variable et dépend de plusieurs facteurs, surtout du degré d'industrialisation de la ville et de la densité de celle-ci. (Bozonnet, 2006).

Dans les climats froids, l'intensité du flux anthropogénique est plus élevée en hiver (Taha, 1997). Pour la plupart des villes américaines, Q_F varie entre 20 W/m^2 et 40 W/m^2 en été, et entre 70 W/m^2 et 210 W/m^2 en hiver (Taha, 1997).

Il est à noter que la chaleur anthropique a pour effet de diminuer la consommation du chauffage en hiver, mais elle favorise d'autre part l'îlot de chaleur urbain (Escourrou, 1980).

1.7.3 Le flux convectif

Dans ce paragraphe, on définit le flux convectif comme un mode de transfert aérodynamique de chaleur entre une surface solide et l'air due à des gradients thermiques. On distingue deux types de convections : la convection naturelle et celle forcée. Lorsqu'un courant d'air apparaît sous l'effet d'une différence de densité de l'air due à un gradient thermique de l'air, on parle de la convection naturelle. Lorsque le mouvement du fluide est forcé par un travail mécanique externe, on parle de convection forcée.

Le flux convectif s'exprime par :

$$Q_H = h_c(T_s - T_a) \quad [1.11]$$

h_c étant le coefficient d'échange convectif ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Plusieurs corrélations empiriques permettent d'explicitier le coefficient h_c qui dépendent principalement de la vitesse du vent, de la température de l'air, du régime de l'écoulement et de la configuration des surfaces considérées de la ville (Inard, 1988) (Vinet, 2000).

1.7.4 Le flux latent

On définit le flux de chaleur latente comme étant l'énergie échangée par un corps lors de son changement de phase. Dans le cas des villes, ce flux est dû à la vapeur d'eau dégagée par les sols, les végétaux et les surfaces poreuses. Notons que si l'air des villes durant le jour est plus sec, la nuit il devient humide.

Pour caractériser l'état de l'humidité d'une zone urbaine, on introduit le nombre de Bowen $\beta = \frac{Q_H}{Q_L}$ qui représente le rapport entre le flux sensible vertical et le flux latent vertical.

1.7.5 Le flux conductif

La conduction correspond à la propagation de l'énergie thermique dans un solide. La chaleur diffuse ainsi naturellement des zones les plus chaudes vers les zones les plus froides. Il est à noter que ce mode de transfert ne peut avoir lieu que dans un milieu matériel continu. Ce mode de transfert est caractérisé par la loi de Fourier, et la densité du flux convectif s'exprime par :

$$q_c = -K.\text{grad}T \quad [1.12]$$

K étant la conductivité thermique du matériau ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Les conductivités thermiques dépendent des matériaux, et par suite le flux conductif dans un site urbain dépend des matériaux de constructions utilisées.

1.7.6 Le flux stocké

ΔQ_S est défini par la variation de la quantité de chaleur stockée par la zone urbaine. Les phénomènes radiatifs et thermiques conduisent à l'accumulation de la chaleur à l'intérieur des matériaux et du sol, qui sera restitué à l'atmosphère durant la nuit. Selon Ringenbach, ce flux

est l'une des principales sources d'énergie durant la période nocturne (Ringebach, 2004). Il est très difficile de mesurer directement le flux ΔQ_S absorbé par une surface urbaine. Plusieurs corrélations empiriques ont été explicitées permettant de trouver une relation entre ΔQ_S et le flux radiatif net Q_R .

(Oke, 1981), a introduit une relation linéaire entre ΔQ_S et Q_R durant la journée :

$$\Delta Q_S = (0.2a + 0.33b)Q_R + 3a - 24b \quad [1.13]$$

Durant la nuit et selon Oke aussi, cette relation devient :

$$\Delta Q_S = (0.54a + 0.9b)Q_R \quad [1.14]$$

Avec a et b représente respectivement les fractions des espaces verts et des espaces bâtis, et le site étudié est une zone urbaine de Vancouver.

En 1991, (Grimmond, et al., 1991), ont introduit un nouveau modèle, appelé OHM (Objective Hystérésis Model). Ce modèle, non linéaire, permet de trouver une valeur instantanée et plus précise de ΔQ_S qui s'écrit comme suite :

$$\Delta Q_S = a_1 Q_R + a_2 \frac{\partial Q_R}{\partial t} + a_3 \quad [1.15]$$

a_1 et a_3 sont les fractions des espaces verts et bâtis, a_2 est le coefficient d'hystérésis et $\frac{\partial Q_R}{\partial t}$ est la dérivée temporelle du flux radiatif.

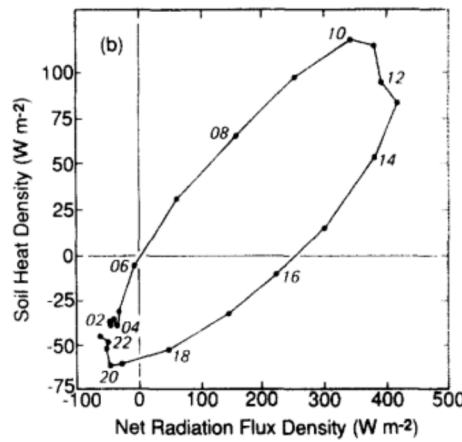


Figure 1.19 : Courbe d'hystérésis montrant la relation entre le flux radiatif net et flux de stockage de chaleur. Les valeurs signalées sur la courbe correspondent aux heures de la journée (Grimmond, et al., 1991).

La Figure 1.19 représente la courbe d'hystérésis développée par Grimmond, donnant la relation entre ΔQ_S et Q_R .

1.7.7 Le flux advectif

Le flux advectif correspond à la quantité de chaleur fournie ou prélevée à la masse d'air circulant dans le volume fictif et associé à l'élément de surface urbaine (Bouyer, 2009). δQ_A dépend de l'écart de température de l'air qui entre et qui sort du volume considéré. Ce flux est dû au gradient spatial de température, d'humidité et de vent (Rizwan, et al., 2008).

Ce flux est souvent négligé dans les études en milieu urbain (Pigeon, et al., 2007), comme sa valeur est relativement faible à l'échelle urbaine (Eliasson, et al., 1999).

1.8 Les effets aérauliques en milieu urbain

L'écoulement du vent est l'un des principaux facteurs qui affecte le microclimat urbain. Ce facteur influe également sur le confort extérieur des piétons dans les espaces extérieurs. Dans la couche limite atmosphérique, le vent tend à équilibrer les différentes zones de pression. Le mouvement du vent n'est pas constant, il varie en grandeur et en direction selon les saisons. Ces variations peuvent même être horaires. En milieu homogène, un profil logarithmique selon l'altitude est utilisé pour représenter le profil vertical de la vitesse moyenne de l'air due au vent dominant. Dans la canopée urbaine, le profil de la vitesse de l'air est modifié et perturbé dû à la configuration discontinue du tissu urbain. La Figure 1.20 montre la variation du profil moyen du vent dominant entre un site homogène et un site urbain. Des forces de frottement sont induites par la rugosité du sol (bâtiments, obstacles, arbres...), conduisent à une réduction de la vitesse moyenne de l'air dans la canopée urbaine. Cette réduction s'accompagne d'une création de turbulence. Ainsi la vitesse du vent s'écrit comme une superposition d'une vitesse moyenne et d'une vitesse fluctuant en fonction du temps.

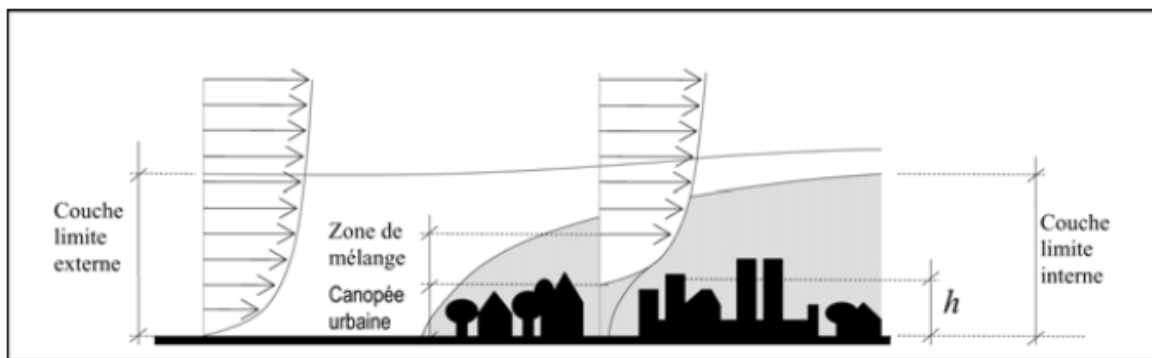


Figure 1.20 : Profil moyen de la vitesse horizontale du vent dominant en site homogène et en site urbain
(Plate & Kiefer, 2001)

La diminution de la vitesse moyenne du vent est remarquable et peut être de 50 % par rapport à celle mesurée aux niveaux des surfaces d'eau libre (Brophy, et al., 2000). La Figure 1.20 indique qu'à partir de la zone de mélange, le profil se comporte de nouveau comme celui du milieu homogène. Dans ce qui suit, divers modèles développés pour le calcul du profil vertical du vent sont présentés.

1.8.1 Modèles du champ de vitesse du vent

Le modèle le plus simple est basé sur un profil exponentiel exprimant la vitesse $u(z)$ à une hauteur z en fonction d'une vitesse de référence u_{ref} pris à une hauteur z_{ref} :

$$u_z = u_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^k \quad [1.16]$$

k étant un coefficient empirique qui dépend de la stabilité de l'atmosphère qui varie entre 0.21 et 0.41 (Counihan, 1973).

Un autre modèle exprime l'écoulement du vent à l'aide d'un profil logarithmique dépendant de la longueur de rugosité z_0 qui représente l'altitude à laquelle la vitesse moyenne s'annule (Nicholson, 1975). Ce modèle prend en considération la rugosité des surfaces urbaines sur le profil de vitesse du vent. La vitesse du vent s'exprime alors :

$$u_z = u_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad [1.17]$$

Un modèle plus détaillé a été développé pour le calcul de la vitesse dans la canopée urbaine à une hauteur z inférieure à la hauteur maximale des bâtiments H_{max} (Macdonald, 2000). La vitesse du vent s'écrit alors :

$$u_z = (u_{bat\ max}) \left[A \left(\frac{z}{H_{max}} - 1 \right) \right] \quad [1.18]$$

Avec A est un coefficient empirique appelé coefficient d'atténuation qui dépend de la densité urbaine, et $u_{bat\ max}$ correspond à la vitesse du vent au niveau de la hauteur maximale des bâtiments.

Pour les hauteurs z au-dessus de H_{max} , on suppose que le niveau du sol est décalé d'une hauteur z_d appelé hauteur de déplacement. En effectuant un changement de coordonnées dans l'équation (1.17), tout en décalant la hauteur z d'une distance z_d , le profil vertical de la vitesse du vent s'exprime alors :

$$u_z = u_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad [1.19]$$

Les paramètres z_0 et z_d varient selon la densité urbaine et la hauteur des bâtiments. La Figure 1.21 montre une estimation des valeurs de z_0 et z_d (Grimmond & Oke, 1999).

Dans ce qui suit, différents modèles permettant de calculer les champs de vitesse autour des bâtiments sont présentés.

Types de zones urbaines	Hauteur de déplacement z_d (m)	Longueur de rugosité z_0 (m)
Densité et hauteur faibles (bâtiments à 1 ou 2 étages)	2 - 4	0,3 - 0,8
Densité et hauteur faibles (bâtiments à 2 ou 3 étages)	3,5 - 8	0,7 - 1,5
Forte densité et grande hauteur (bâtiments à 6 étages)	7 - 15	0,8 - 1,5
Immeubles de grande hauteur	>12	>2,0

Figure 1.21 : Propriétés aérodynamiques typiques pour des zones urbaines homogènes (Grimmond & Oke, 1999)

1.8.2 Modèles du champ de vitesse autour du bâtiment

La structure du bâtiment modifie l'écoulement de l'air due à une interaction vent-bâtiment. La Figure 1.22 (Gandemer, 1981) illustre les champs de vitesse autour d'une construction isolée tout en montrant les mouvements tourbillonnaires formés ainsi que le contournement du bâtiment par le vent. Lorsque le vent tombe à une façade d'un bâtiment de forme parallélépipède, plusieurs zones perturbées d'écoulement sont distinguées. Les travaux de Rockle permettent de décrire ces zones grâce à des formules empiriques qui dépendent de l'intensité et la direction du vent dominant ainsi de la géométrie du bâtiment (Rockle, 1990).

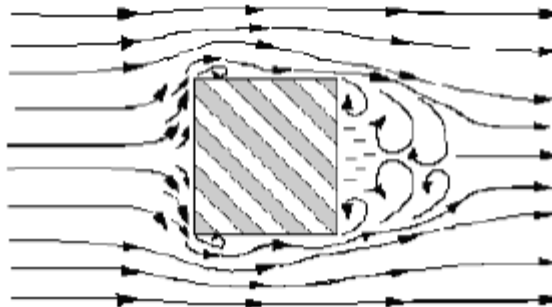


Figure 1.22 : Champ de vitesse du vent autour d'une structure bâtie ainsi que le mouvement de contournement formé (Gandemer, 1981).

a- Cas d'un bâtiment isolé

Rockle distingue 3 principales zones d'écoulement autour du bâtiment lors d'une direction du vent normale à la façade : la cavité frontale, la cavité d'écoulement inversé et la zone de cisaillement. La Figure 1.23 montre ces 3 zones autour d'un bâtiment parallélépipédique. La zone frontale est décomposée en deux sous-zones :

- Zone de déplacement.
- Zone frontale de turbulence.

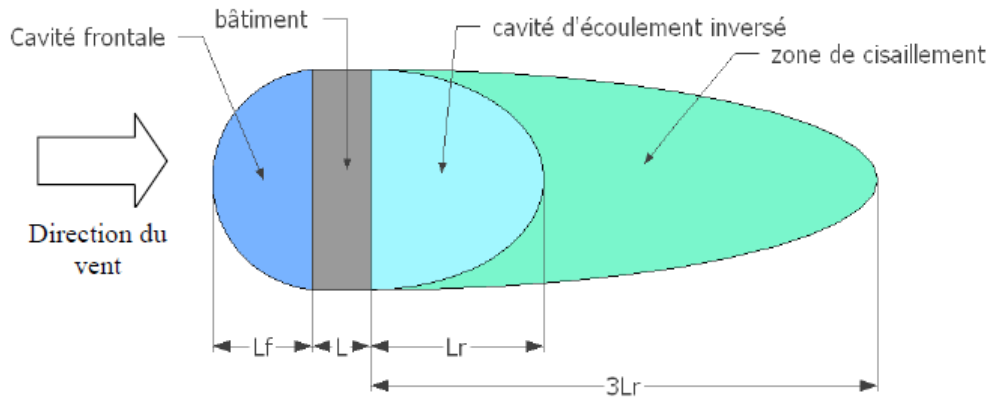


Figure 1.23 : Les 3 zones d'écoulement autour d'un bâtiment isolé (Gros, 2013)

Les 2 sous-zones sont montrées dans la Figure 1.24, et les paramètres L_f et L_{f1} définissent ces zones et s'exprime (Bagal, et al., 2003) :

$$L_{f1} = \frac{0.6 \frac{W}{H}}{\left(1 + 0.8 \frac{W}{H}\right)} \quad [1.20]$$

$$L_f = \frac{1.5 \frac{W}{H}}{\left(1 + 0.8 \frac{W}{H}\right)} \quad [1.21]$$

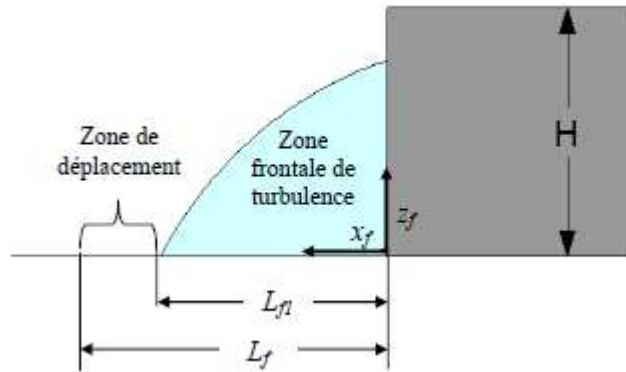


Figure 1.24 : Les différentes paramètres de la cavité frontale (Gros, 2013)

Dans la zone de déplacement, les vitesses d'air subissent une réduction de l'intensité sans aucun changement au niveau de la direction. Les vitesses s'écrivent alors :

$$u_z = 0.4u_H \left(\frac{z}{H}\right)^{0.16} \quad [1.22]$$

Contrairement à la zone de déplacement, les vitesses d'air subissent un changement d'intensité et d'orientation. A l'aide des coordonnées x_f et z_f depuis la base des bâtiments comme l'indique la Figure 1.24, les vitesses u et w respectivement suivant les axes x et z sont représentés par (Bagal, et al., 2003) :

$$u = u_H \left(0.6 \cos \left(\frac{\pi z_f}{0.5H} \right) + 0.05 \right) \left(-0.6 \sin \left(\frac{\pi x_f}{L_{f1}} \right) \right) \quad [1.23]$$

$$w = w_H \left(-0.1 \cos \left(\frac{\pi x_f}{L_{f1}} \right) - 0.05 \right) \quad [1.24]$$

D'autre part, la longueur L_r correspondante à la longueur de la cavité d'écoulement inversé, s'écrit d'après Rockle par :

$$L_r = \frac{1.8W}{\left(1 + 0.24 \frac{W}{H} \right) \left(\frac{L}{H} \right)^{0.3}} \quad [1.25]$$

Les vitesses u et v suivant les axes x et y , qui dépendent des coordonnées (x_r, y_r, z_r) qui sont les distances depuis la base du bâtiment du côté opposé à la direction du vent, s'écrivent alors :

$$\frac{u}{u_H} = - \left[1 - \left(\frac{x_r}{d(y_r, z_r)} \right)^2 \right] \quad [1.26]$$

$$\frac{v}{v_H} = - \left[1 - \left(\frac{y_r}{d(y_r, z_r)} \right)^2 \right] \quad [1.27]$$

Avec

$$d(y_r, z_r) = L_r \sqrt{\left[1 - \left(\frac{z_r}{H} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{y_r}{W} \right)^2 \right]} - \frac{L}{2} \quad [1.28]$$

Dans la zone de cisaillement, qui est comprise entre L et $3L$, les vitesses u et v sont définies par :

$$\frac{u}{u_H} = \left[1 - \left(\frac{d(y_r, z_r)}{x} \right)^{1.5} \right] \quad [1.29]$$

$$\frac{v}{v_H} = \left[1 - \left(\frac{d(y_r, z_r)}{x} \right)^{1.5} \right] \quad [1.30]$$

b- Cas d'une rue canyon

A l'échelle d'une rue de type canyon, on distingue 3 types d'écoulement dans une ville qui dépendent du rapport d'aspect W/H , Figure 1.25. Pour un rapport W/H supérieur à 2.5 l'écoulement est à rugosité isolée. Lorsque les bâtiments sont plus proches avec un rapport W/H compris entre 1.54 et 2.5, il y a interférence entre les zones d'écoulement de chaque propre bâtiment et l'écoulement devient alors à interférence de sillage. Lorsque le rapport devient inférieur à 1.54, l'écoulement est appelé rasant (Oke & Nakamura, 1988).

La Figure 1.26 montre quelques effets aérodynamiques observés dans une ville. Citons : l'effet Venturi, l'effet Wise et l'effet de canalisation. L'effet « venturi » est provoqué par des bâtiments formant un angle ouvert au vent. A l'étranglement on observe la zone critique de confort qui correspond à la vitesse maximale du vent. L'effet « wise » correspond à la formation des tourbillons au pied de tours lorsqu'un bâtiment plus bas est placé parallèlement et en amont du bâtiment élevé. L'effet canalisation correspond à une rue limitée de part et d'autre par des bâtiments.

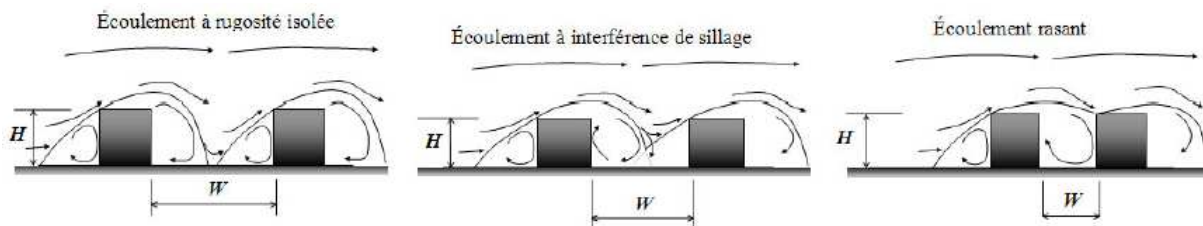
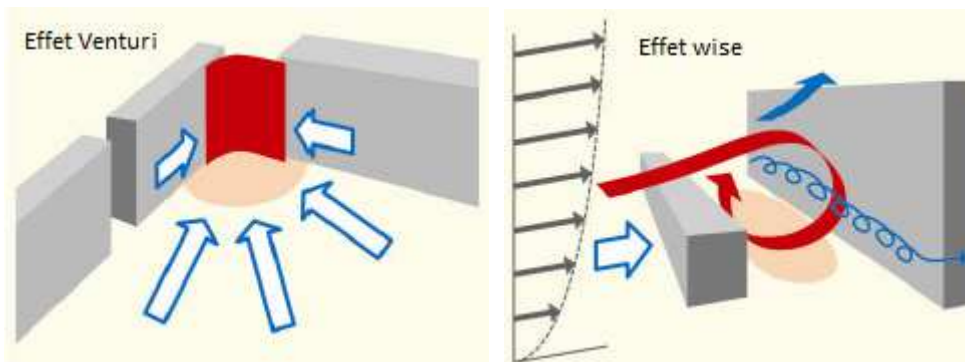


Figure 1.25 : Les 3 types d'écoulement dans une rue canyon d'après (Oke, 1987)



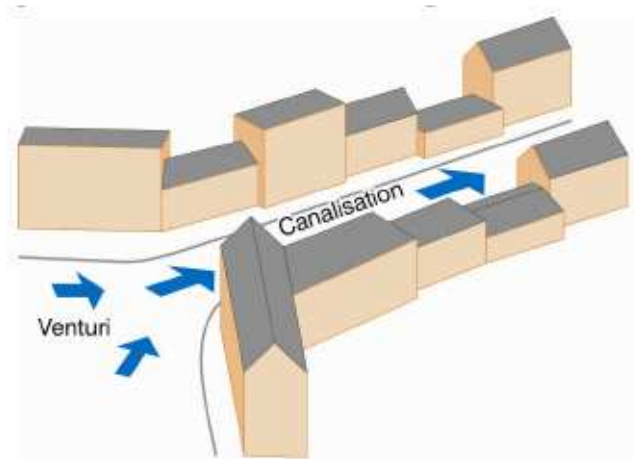


Figure 1.26 : Quelques effets aérodynamiques observés dans la configuration urbaine (Gandemer, 1975)

Il est bien clair que l'interaction des bâtiments va affecter la vitesse du vent dans une rue canyon. Dans le cas d'un écoulement à rugosité isolée, le bâtiment se comporte comme un bâtiment isolé et la vitesse du vent est calculée à partir des formules énoncées dans le paragraphe 1.8.2 (a). Pour un écoulement de type rasant, les composantes u et w de la vitesse de l'air dans la rue canyon sont calculées par :

$$\frac{u}{u_H} = -\frac{d}{0.5S} \left(\frac{S-d}{0.5S} \right) \quad [1.31]$$

$$\frac{w}{u_H} = -\left| \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{0.5S} \right) \right| \left(1 - \frac{S-d}{0.5S} \right) \quad [1.32]$$

Avec S la largeur de la rue canyon, et d la position du point étudié dans la rue canyon, Figure 1.27.

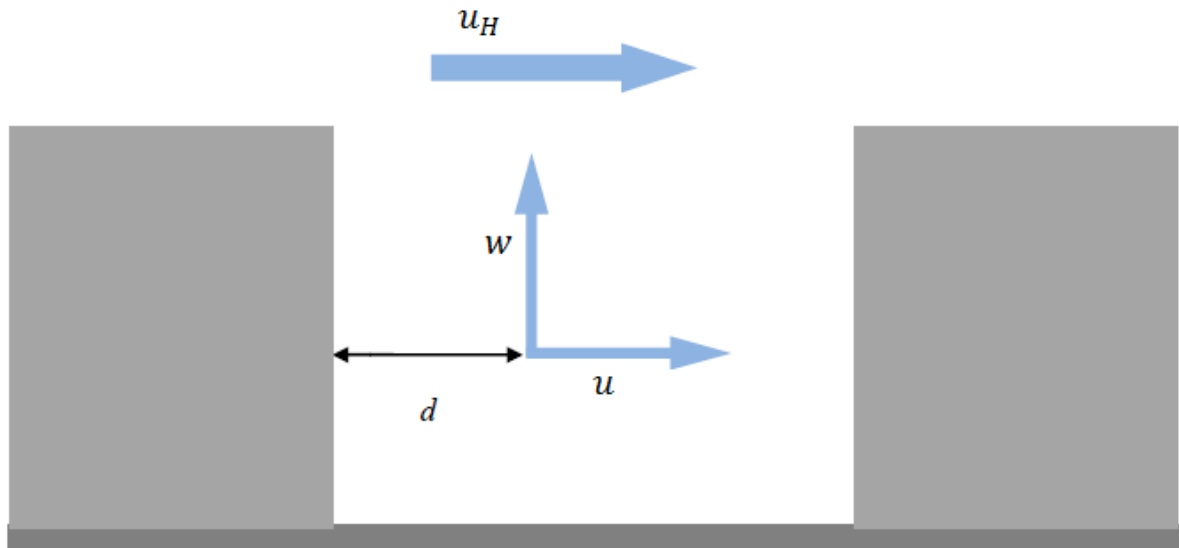


Figure 1.27 : Représentation des composantes u et v dans une rue canyon ainsi que la distance d (Rockle, 1990)

1.9 Confort extérieur en milieu urbain

Les impacts des îlots de chaleur sont aussi très importants au niveau du confort thermique des piétons. Nous définissons dans ce paragraphe la notion du confort extérieur tout en présentant les indices qui permettent de décrire ce confort en milieu urbain.

1.9.1 Etat de l'art

La notion du confort thermique a été définie de plusieurs manières et selon différents indicateurs. Le confort thermique est lié au comportement physique du corps (sieste, déplacement, sport...). La température de l'air est un facteur important dans la définition de la sensation thermique et souvent la plus utilisée, mais ne reflète pas seule parfaitement le confort qui selon Fanger dépend de plusieurs paramètres. Ces paramètres sont le métabolisme, l'habillement, la température ambiante de l'air, la température des parois, l'humidité relative et la vitesse de l'air. Il existe une autre approche du confort est celle de la notion de confort adaptatif. Cette notion se différencie de celle de Fanger par l'intégration de deux aspects : l'adaptation climatique et la capacité d'interaction dans un environnement qui semblerait inconfortable.

L'homme étant homéotherme (température centrale est constante et indépendante du milieu extérieur), il cherche à assurer en continu son équilibre thermique. La modélisation du confort thermique, se base sur l'équation de l'équilibre thermique du corps humain:

$$M + W_u + R_m + Q_c + Q_l + Q_{re} + Q_{Tr} + S_e = 0 \quad [1.33]$$

Où M est le métabolisme du corps (W/m^2), W_u est le travail utile (W/m^2), R_m est le flux radiatif (W/m^2) qui dépend de la température moyenne radiante, Q_c est le flux convectif entre le corps et son entourage (W/m^2), Q_l

est le flux de chaleur latente par diffusion de vapeur d'eau au travers de la peau (W/m^2), Q_{re} est le flux de chaleur sensible et latente due à la respiration (W/m^2), Q_{Tr} est le flux de chaleur latente due à la transpiration (W/m^2), et S_e est le stockage d'énergie dans le corps humain (W/m^2) qui représente la différence entre l'énergie interne produite et l'énergie perdue par le corps dans l'environnement. Les termes de cette équation sont positifs si l'énergie est gagnée par le corps et négatifs si l'énergie est perdue par le corps.

D'après l'ASHRAE (ASHRAE, 2009), le confort thermique est défini comme étant un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement. Pour exprimer la sensation du confort thermique, ASHRAE a développé une échelle appelé « ASHRAE thermal sensation scale », tableau 1.1. Plusieurs corrélations ont été développées pour trouver les valeurs de l'indice de sensation thermique de l'échelle d'ASHRAE (ASHRAE, 2009).

Tableau 1.1: Echelle de sensation thermique d'ASHRAE (ASHRAE thermal sensation scale) (ASHRAE, 2009)

+3	chaud
+2	tiède
+1	Légèrement tiède
0	neutre
-1	Légèrement frais
-2	frais
-3	froid

Macpherson, en 1926, a déterminé les 6 facteurs affectant la sensation thermique : la température de l'air ambiant, la vitesse du vent, l'humidité relative, la température moyenne radiante, le métabolisme et l'habillement (Goldman, 1999).

1.9.2 Indice PMV

En 1972, l'indice PMV vote moyen prévisible (Predicted Mean Vote) a été développé par Fanger (Fanger, 1972) pour décrire le confort thermique. Cet indice a d'abord été utilisé pour la description du confort thermique à l'intérieur des bâtiments, mais plus tard il a été utilisé pour décrire le confort en milieu extérieur, (Honjo, 2009). Il est calculé à partir de l'équation modifiée de Fanger, qui a été développée (Jendritzky & Nübler, 1981) pour un milieu extérieur. ASHRAE (ASHRAE, 2009) exprime l'indice PMV décrit par Fanger selon l'équation suivante :

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)S_e \quad [1.34]$$

Généralement, les valeurs de PMV sont comprises entre -4 (très froid) et +4 (très chaud). Selon cette échelle, le confort thermique sera estimé. En effet, la zone du confort s'étale entre -1 (légère fraîcheur) et +1 (légère chaleur). La sensation thermique optimale correspond à une valeur nulle du PMV. Une valeur positive indique que la température de l'air est plus grande que celle qui correspond au confort, alors qu'une valeur négative signifie que la température de l'air est plus basse que la température correspondante au confort optimale. Mais Il est à noter que le PMV dépend du climat de la zone étudié et il peut atteindre des valeurs inférieures et supérieures respectivement à -4 et +4.

1.9.3 Indice PPD

Dans ce contexte, un autre indice est utilisé pour caractériser le confort thermique, le PPD qui est le pourcentage prévisible d'insatisfait (Predicted percentage dissatisfied) indiquant le pourcentage des personnes insatisfaites. Cet indice dépend directement du PMV, et Fanger (Fanger, 1982) relie ces deux indices selon l'équation [1.35] :

$$PPD = 100 - 95 e^{[-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)]} \quad [1.35]$$

La Figure 1.28 montre la variation du PPD en fonction du PMV. L'analyse du graphique montre que le PPD augmente lorsque le PMV s'éloigne de la valeur zéro, ce qui est évident. Pour un PMV égal à -1 ou +1, près de 25 % des personnes ne seront pas satisfaites. Il est à noter aussi, que même pour un PMV égal à zéro, il y a encore 4 % de personnes insatisfaites.

Cependant, le modèle de Fanger ne donne pas une description totalement réaliste des conditions thermiques du corps humain vu que les processus thermo-physiologiques ne sont pas considérés dans ce modèle ; par exemple selon ce modèle la température moyenne de la peau et le taux de transpiration dépendent seulement de l'activité humaine et non pas des conditions climatiques (Höppe, 1999).

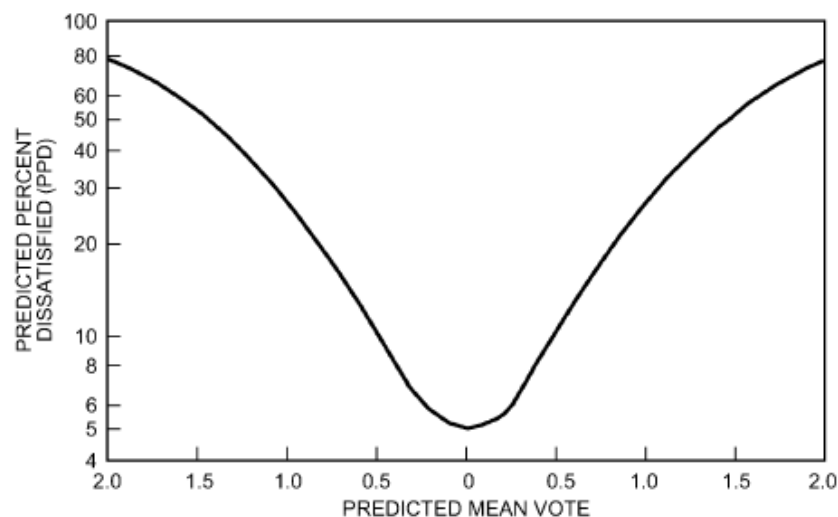


Figure 1.28 : Variation du PPD en fonction du PMV, (ASHRAE, 2009)

Ces indices montrent leurs limites lorsqu'on aborde les conditions extérieures. En effet sous climat extrême (Ridha, 2017), le calcul direct du PMV peut donner des valeurs de +7, ce qui ne correspond à aucune réalité physique. D'autres indices, plus adaptés aux conditions extérieures ont ainsi été développés

1.9.4 Modèle MEMI et indice PET

Un autre indice qui reflète une réalité plus conforme du confort thermique extérieur est le PET (température physiologique équivalente). Cet indice prend en considération les processus de base de la thermorégulation, comme le rétrécissement ou la dilatation des vaisseaux sanguins périphériques, et le taux de transpiration physiologique (Höppe, 1993). Le calcul de cet indice

est basé sur le modèle du bilan énergétique des individus MEMI (Munich Energy balance model for individuals) (Höppe, 1999). Le modèle MEMI est basé sur l'équation de l'équilibre thermique du corps humain équation [1.33] en intégrant quelques paramètres du modèle de Gagge (Gagge, et al., 1971) (two-node model). Quelques termes de l'équation (1.31) dépendent de la température surfacique moyenne de l'habillement T_h , de la température de la peau T_p ou bien du taux de transpiration t_{Tr} . T_h et T_p dépendent des conditions climatiques du milieu ambiant, alors que t_{Tr} dépend des conditions climatiques et de la température noyau du corps T_c . Cette dernière est affectée par l'activité humaine et les conditions de l'environnement. La quantification des températures T_h , T_p et T_c nécessitent en plus de l'équation (1.31), deux équations supplémentaires. La première équation représente le flux de chaleur échangé entre le noyau du corps et la peau. Ce flux est donné par :

$$Q_{np} = v_s \times \rho_{sa} \times C_s \times (T_c - T_p) \quad [1.36]$$

Où v_s est le débit sanguin allant du noyau du corps vers la peau ($l.s^{-1}.m^{-2}$), ρ_s est la masse volumique du sang (kg/l), C_s est la chaleur massique du sang ($J.kg^{-1}.K^{-1}$).

La deuxième équation exprime le flux de chaleur entre la surface de la peau et la surface de la vêtue :

$$Q_{ph} = \frac{1}{I_{cl}} \times (T_c - T_p) \quad [1.37]$$

Où I_{cl} est la résistance thermique de la vêtue ($K.m^2.W^{-1}$).

La résolution du système formé par les trois équations [1.33], [1.36] et [1.37] permet de trouver l'état thermique du corps pour n'importe quelles conditions données (type d'activité, type d'habillement, conditions climatiques).

L'indice PET a été introduit par (Mayer & Höppe, 1987). Cet indice est basé sur le modèle MEMI et est défini comme étant la température de l'air (intérieur ou extérieur) à laquelle, dans un local typique intérieur, sans vent et rayonnement solaire, le bilan d'énergie du corps humain est équilibré avec les mêmes températures interne et de peau que celles obtenues dans les conditions à évaluer (Höppe, 1999).

Le tableau 1.2 montre la température physiologique équivalente PET pour plusieurs scénarios (Höppe, 1999). En examinant les valeurs du tableau 1.2, on remarque que pour un jour d'été ensoleillé, avec une température de l'air ambiant de 30 °C, la température physiologique équivalente PET atteint une valeur de 43 °C. Pour les mêmes conditions climatiques (jour d'été avec $T_a = 30$ °C), si la personne n'est pas soumise directement aux irradiations solaires et est située à l'ombre, la PET diminue de 14 °C pour atteindre 29 °C.

Tableau 1.2 : Exemple des valeurs de la température physiologique équivalente (PET) pour différents scénarios climatiques (T_a : la température de l'air ambiant, T_{mrt} : température moyenne radiante, v : vitesse du vent, VP : la pression de vapeur d'eau) (Höppe, 1999).

Scénario	T_a (°C)	T_{mrt} (°C)	v (m/s)	VP (hPa)	PET (°C)
Chambre typique	21	21	0.1	12	21
Hiver ensoleillé	-5	40	0.5	2	10
Hiver, ombre	-5	-5	5	2	-13
été ensoleillé	30	60	1	21	43
Eté, ombre	30	30	1	21	29

Pour les climats tempérés, (Matzarakis & Mayer, 1996) ont établis une échelle des températures physiologiques PET qui est basée sur des mesures et des enquêtes réalisées sur un certain nombre de piétons. Le tableau 1.3 montre cette échelle en exprimant la perception thermique et le degré de stress physiologique selon chaque intervalle de PET. En termes de PET, l'intervalle de confort thermique pour le climat tempéré selon l'échelle de Matzarakis et Mayer est entre 18 °C et 23 °C. Il est à noter que les valeurs de PET correspondent à un métabolisme de 80W et une résistance vestimentaire de 0.9 clo.

Tableau 1.3 : Intervalles de Température Physiologique Equivalente pour les différentes perceptions thermiques humaines et différentes degrés de stress physiologique; pour un métabolisme de 80W et pour une résistance vestimentaire de 0,9 clo (Matzarakis & Mayer, 1996)

PET	Perception thermique	Degré de stress physiologique
4°C	Très froid	Stress extrême dû au froid
8°C	Froid	Stress fort dû au froid
13°C	Frais	Stress modéré dû au froid
18°C	Légèrement frais	Stress léger dû au frais
23°C	Confort	Pas de stress thermique
29°C	Légèrement tiède	Stress léger dû à la chaleur
35°C	Tiède	Stress modéré dû à la chaleur
41°C	Chaud	Stress fort dû à la chaleur
	Très chaud	Stress extrême dû à la chaleur

Ainsi, la PET est l'un des indices les plus utilisés pour la description du confort thermique extérieur. De plus, cet indice a aussi été adopté dans les lignes directrices de planifications urbaines et régionales en Allemagne (VDI, 1998).

Différents études ont montré que l'intervalle de la PET indiquant un état acceptable de confort varie entre une région et une autre. En 2009, (Lin, 2009) montre que cet intervalle se situe entre 21.3 °C et 28.5 °C pour un climat subtropical humide et chaud à Taiwan, alors que sous climat européen pour un climat tempéré, il se situe entre 18 °C et 23 °C. Une autre étude statistique réalisée en 2011 par Mahmoud (Mahmoud, 2011 a)) (Mahmoud, 2011 b)), s'est focalisée sur

une enquête du confort thermique l'échelle des parcs urbains du Caire en Egypte. Selon Mahmoud, la PET correspondant au confort se situe entre 22 °C et 30 °C en été, et entre 21 et 29 °C durant l'hiver. Il est bien clair que ces valeurs sont plus grandes que celles proposées en l'Europe. En 2012, (Elnabawi, et al., 2016) ont effectué une autre étude statistique concernant le confort thermique dans une région chaude et humide du Caire. L'enquête est faite sur 320 cas (68.4 % hommes et 31.6 % femmes) : 160 cas durant l'été entre 26 juin et 2 juillet 2012, et 160 cas durant l'hiver entre 19 et 25 décembre 2012. Le logiciel Rayman est utilisé pour calculer la PET. Les résultats ont montré que pour un confort acceptable, la PET se situe entre 23 °C et 32 °C. Les valeurs de cette étude sont plus grandes (1-2 °C) que celles de l'étude de Mahmoud citée ci-dessus. La PET la plus confortable pour les personnes ayant participé à l'étude est de 29 °C durant l'été, alors qu'en hiver elle est d'environ 24.5 °C. Ceci indique que la valeur optimale de PET varie entre les saisons et que les personnes acceptent une température plus élevée en été qu'en hiver.

Ces études montrent que le confort extérieur ne dépend pas seulement des approches physiologiques et du climat étudié, mais qu'il dépend aussi des facteurs psychologiques (adaptation à une situation, habitude...) ainsi que de l'adaptation du comportement d'une personne vis-à-vis de l'environnement, de la technologie et de sa culture (Elnabawi, et al., 2016).

Une limitation de cet indice, est que son calcul est basé sur des modèles de bilan énergétique stationnaires, en supposant que les individus sont exposés pendant une longue période aux conditions climatiques extérieures (Bonhomme, et al., 2015).

1.9.5 L'indice « UTCI » (Universal thermal climate index)

Un nouvel indice a été développé par les scientifiques pour exprimer le comportement thermique en conditions climatiques extérieures. Cet indice est l'indice climat thermique universel « UTCI » (Universal Thermal Climate Index) mené dans le cadre de l'activité de la Société Internationale de la Biométéorologie. En 2009, l'UTCI a été validé pour être utilisé dans l'étude du confort thermique dans les espaces extérieures. Il est basé sur un modèle dynamique du mécanisme thermorégulateur du corps humain. Contrairement aux autres indices, l'UTCI se base sur un modèle thermorégulateur dynamique et instationnaire dit dynamic multi-node Fiala model. Ce modèle est applicable pour tous les climats, ainsi que pour de courtes et de longues périodes d'exposition. D'après (Bröde, et al., 2010), ce modèle prend en compte les différents niveaux d'isolation du corps humain dus aux vêtements. Il permet de simuler les échanges thermiques à l'intérieur du corps humain, ainsi que les échanges qui ont lieu entre l'intérieur du corps et la surface, en tenant compte des particularités anatomiques, thermiques et physiologiques (Fiala, et al., 1999).

Les données d'entrée du modèle UTCI sont :

- La température de l'air
- La vitesse du vent.
- La pression de vapeur d'eau.
- La température moyenne radiante.
- Le niveau de métabolisme.
- L'isolation des vêtements.

Selon Jendritzky et al (Jendritzky, et al., 2002), plusieurs hypothèses sont prises en considération pour le calcul de l'UTCI: la vitesse de marche de l'individu est supposé de 4 km/h, le niveau métabolique est alors environ 135 W/m² et l'isolation par les vêtements est entre 0.4 clo et 2.6 clo. Pour la direction du vent, on suppose que le vent souffle de côté à 90 degrés du piéton et la hauteur de mesure du vent est 1.1 m du sol.

Pour déterminer l'UTCI, un environnement de référence est défini de la façon suivante : humidité relative de 50 %, pression de vapeur d'eau inférieure à 20 hPa, température de l'air égale à la température moyenne radiante et avec une vitesse de l'air faible. Par suite, la valeur de l'UTCI pour des conditions climatiques données, est définie comme étant la température de l'air de l'environnement de référence qui produit le même stress thermique que l'environnement étudié (Bröde, et al., 2010). La Figure 1.30 montre le niveau de stress thermique selon les valeurs de l'UTCI. Il est évident que le confort thermique (absence de stress thermique) correspond à des valeurs d'UTCI comprises entre + 9 et 26 °C.

Parmi ces indices qu'on a présenté dans cette partie, c'est le PET qui sera utilisé dans la suite de la thèse puisque cet indice reflète une réalité du confort extérieur contrairement aux indices PPD et PMV qui présentent des limitations sous climats chauds et extrêmes. De même le calcul de la PET a été validé dans le calcul du logiciel « ENVI-met » qu'on a utilisé pour nos simulations. Par contre, ce logiciel a montré au cours de notre travail, des limitations pour le calcul de l'UTCI aux alentours des bâtiments.

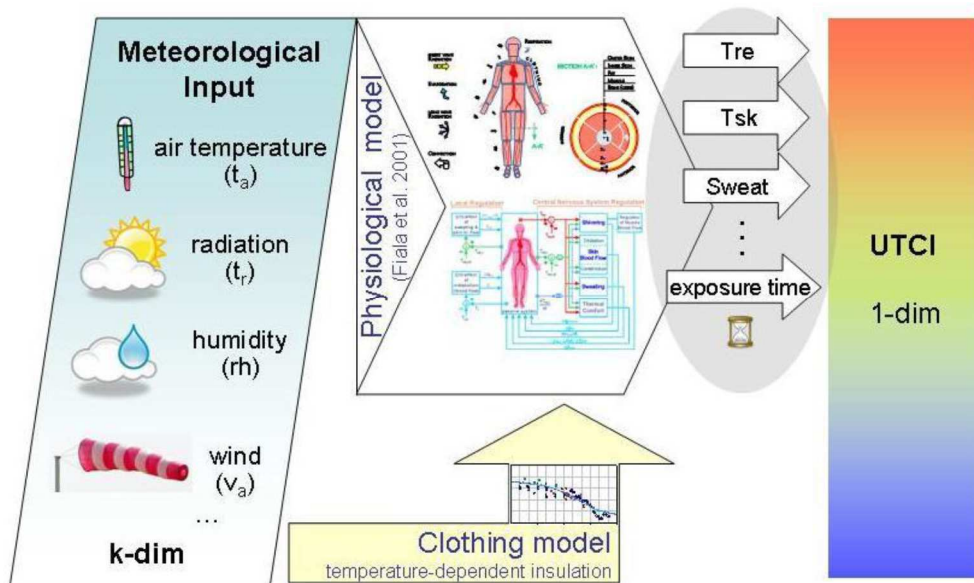


Figure 1.29: Schéma montrant le concept de calcul de l'UTCI en se basant sur le modèle physiologique de Fiala (Bröde, et al., 2010).

UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

Figure 1.30: Echelle de stress thermique selon l'intervalle de l'UTCI (Bras, 2015)

1.10 ICU dans le contexte climats méditerranéens

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain a déjà fait l'objet de plusieurs études numériques et expérimentales réalisées sur les villes méditerranéennes.

L'effet de l'ICU à Barcelone a été étudié par Carmen Moreno-Garcia. Les résultats ont montré que durant la nuit, le centre-ville est de 2.9 °C plus chaud que l'aéroport (Moreno-Garcia, 1993).

Pour la France, dans l'étude expérimentale de (Dupont, et al., 1999), une comparaison entre une zone rurale et une zone urbaine a été faite durant l'hiver 1995. (Dupont, et al., 1999) ont constaté que l'intensité de l'îlot de chaleur varie entre 0 °C et 6 °C, et la valeur maximale de cette intensité est observée à 8:00 le matin. (Robitu, et al., 2006) ont étudié l'effet des arbres et des étangs d'eau sur le confort thermique extérieur dans une cour en France. Ils ont calculé que l'indice PMV a diminué de 3.4 à 0.54. Les impacts des techniques d'atténuation d'ICU à Lyon

ont été le sujet d'étude de (Bozonnet, et al., 2013). A l'aide du logiciel Solène, il a été montré que les façades vertes sont le scénario le plus efficace pour la diminution de la consommation énergétique, en relativisant ces résultats qui sont limités au cas étudié et peuvent être différents pour une autre configuration urbaine.

En complément, différents travaux sur l'ICU ont été effectués pour l'Italie. (Bonacquisti, et al., 2005) ont développé un modèle de canopée urbaine pour simuler le microclimat urbain à Rome. L'étude a montré que le phénomène d'ICU est nocturne et est détecté durant l'hiver et l'été. L'intensité d'ICU atteint 2°C en hiver et 5°C en été. Récemment en 2015, l'analyse de l'îlot de chaleur urbain à Venise a été réalisée par (Peron, et al., 2015) en utilisant le logiciel ENVI-met. Ils ont démontré que la substitution des pavements et des toitures par des matériaux plus clairs et des surfaces végétalisées perméables, a conduit à la réduction de la température d'air de 4°C. D'autres études ont été réalisées montrant les impacts de l'ICU sur la santé dans différentes villes italiennes ; citons la ville Bologne (Bertocchi, et al., 2011), et la ville Milan (Pichierri, et al., 2012).

L'ICU en Grèce a fait aussi l'objet de plusieurs études. Le confort humain dans des cours à Thessaloniki Grèce, a été étudié par (Chatzidimitriou & Yannas, 2004). Ceux-ci ont montré que l'addition des végétations et des bassins d'eau a un effet rafraichissant en été, et un effet de réchauffement en hiver. Les auteurs ont aussi montré que des ouvertures au niveau du rez-de-chaussée provoquent une augmentation de la vitesse de l'air et une diminution de la température en été. A contrario, un effet négatif est observé en hiver d'où la nécessité de fermer ces ouvertures à cette saison. (Vardoulakis, et al., 2013) ont étudié l'effet de l'ICU dans une petite ville de l'ouest de la Grèce. Ils ont constaté que cet effet est dominat durant la nuit. La valeur mensuelle moyenne de l'intensité de l'ICU au mois d'août 2010, est de l'ordre de 3.8°C durant la nuit, alors que l'intensité horaire instantanée la plus élevée était de 5.6°C.

Pour le Liban qui est un pays très artificialisé (surtout la capitale Beyrouth), peu d'études sur l'ICU ont été réalisées.

1.11 Contexte libanais

Le Liban est un pays situé à l'est de la méditerranée. Sa superficie totale atteint 10 452 km² et sa population était en 2013, de 4 223 553 habitants selon la Banque Mondiale. Environ 87 % de cette population vit dans les villes et les zones urbaines (Kaloustian & Diab, 2015). Le programme des Nations Unies pour les établissements humains ONU-Habitat (UNH, 2011), estime que la population libanaise atteindra 4 587 000 personnes en 2020 et que 89 % des habitants occuperont les zones urbaines. Il est évident que la densité de population dans les villes libanaises est grande. La capitale Beyrouth est l'une des villes qui possède la plus grande densité urbaine au Moyen-Orient avec 400 000 habitants répartis sur 21.47 km² (MOE/LEDO/ECODIT, 2001). D'après l'étude sur l'utilisation des terres préparée par « National Land Use Mater Plan » (DAR-IAURIF, 2005), Beyrouth est classée comme étant un territoire artificialisé, Figure 1.31.

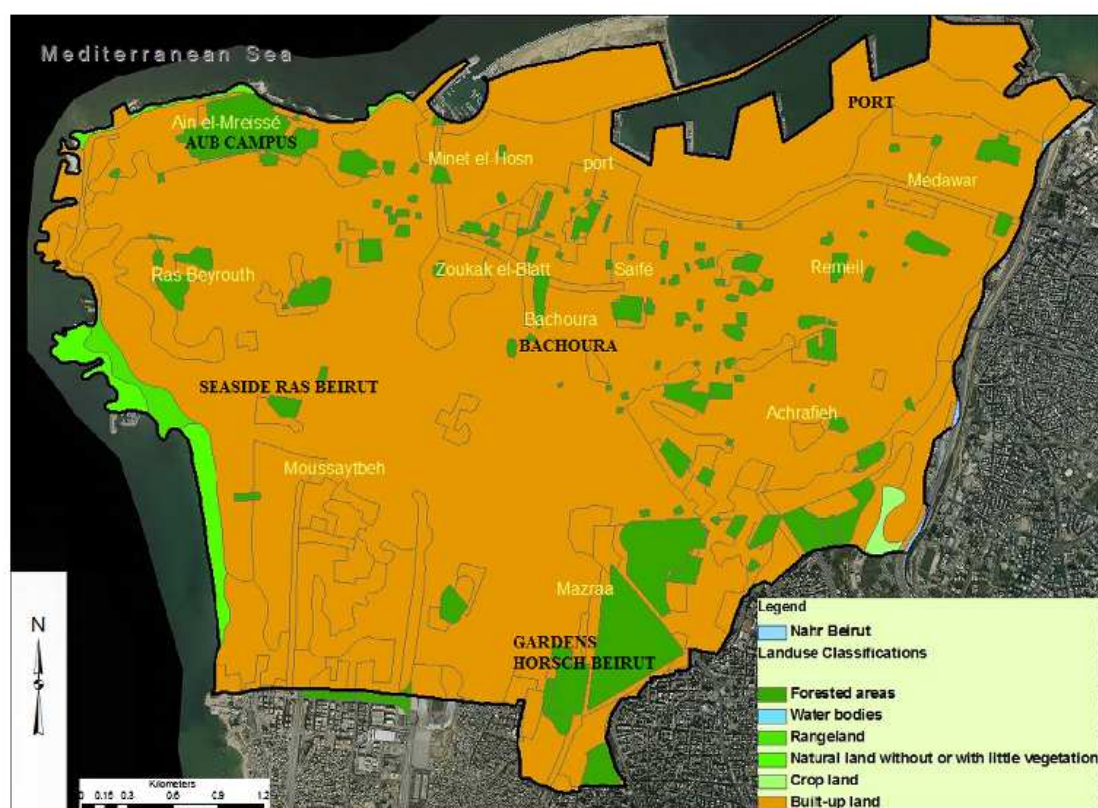


Figure 1.31 : Beyrouth un territoire artificialisé, (DAR-IAURIF, 2005)

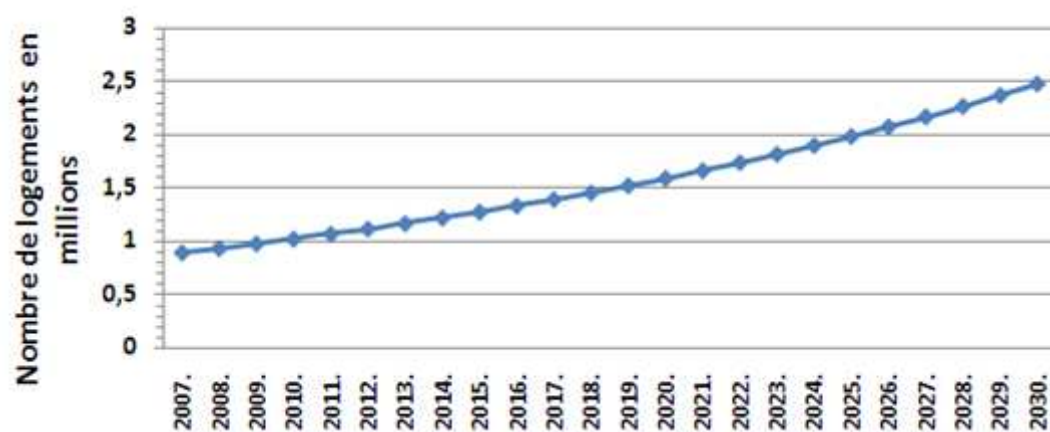


Figure 1.32: Projection du nombre de logement au Liban de 2007 à 2030 (Mourtada, 2010)

L'augmentation de la construction de logements dans les années qui viennent sera importante, (Figure 1.32). De fait, la surface urbaine construite va sensiblement augmenter. Cette augmentation est estimée à environ 10 km² par an durant les 30 prochaines années. L'absence d'organisation du secteur du bâtiment dans le pays conduira à l'augmentation du phénomène d'îlot de chaleur urbain. Ceci traduit donc l'importance de l'étude du phénomène d'îlot de chaleur urbain dans une ville dense comme Beyrouth.

Un aperçu historique de la typologie des bâtiments anciens au Liban est montré en annexe B. La plupart de ces types qui ont survécu en l'état sont rares. La plupart a été détruite ou transformée à cause de la guerre et l'absence d'une politique patrimoniale qui sauvegarde l'architecture traditionnelle libanaise.

Le paragraphe suivant fournit une étude bibliographique sur la situation actuelle de la typologie des bâtiments libanais.

1.11.1 Situation actuelle de la typologie des bâtiments libanais :

La construction libanaise neuve se caractérise par un développement de grands bâtiments résidentiels comportant en moyenne 4 à 6 étages. Cette construction est plus dense entre 0 et 1000 m d'altitude, avec une prépondérance pour la vente plutôt que la location (FFEM, 2005). Les constructions, surtout à Beyrouth sont très massives, longues et à grande densité comme indique la Figure 1.33. Ces dernières années, la construction de grandes tours (plus de 20 étages) a commencé surtout au centre-ville.

Le paragraphe suivant présente les différents types des bâtiments existants au Liban, leur répartition géographique ainsi que leur répartition par localités géographiques.



Figure 1.33: Tissu urbain à Beyrouth (Mourtada, 2010)

1.11.1.1 Typologie des bâtiments existant :

En 2007, le nombre de logements principaux était 888 813 (Mourtada, 2010). 31 % de ces bâtiments se trouvent au Mont-Liban, alors que les autres se répartissent entre Beyrouth, le Nord, le Sud et le Bekaa. Le diagramme de la Figure 1.34 montre la répartition des logements principaux par localités géographiques.

D'autre part, la plupart des logements sont des appartements, environ 67 % repartis entre appartements dans un immeuble (61 %) et appartement dans un complexe résidentiel (6 %), Figure 1.35. La surface moyenne de ces logements est d'environ 130 m².

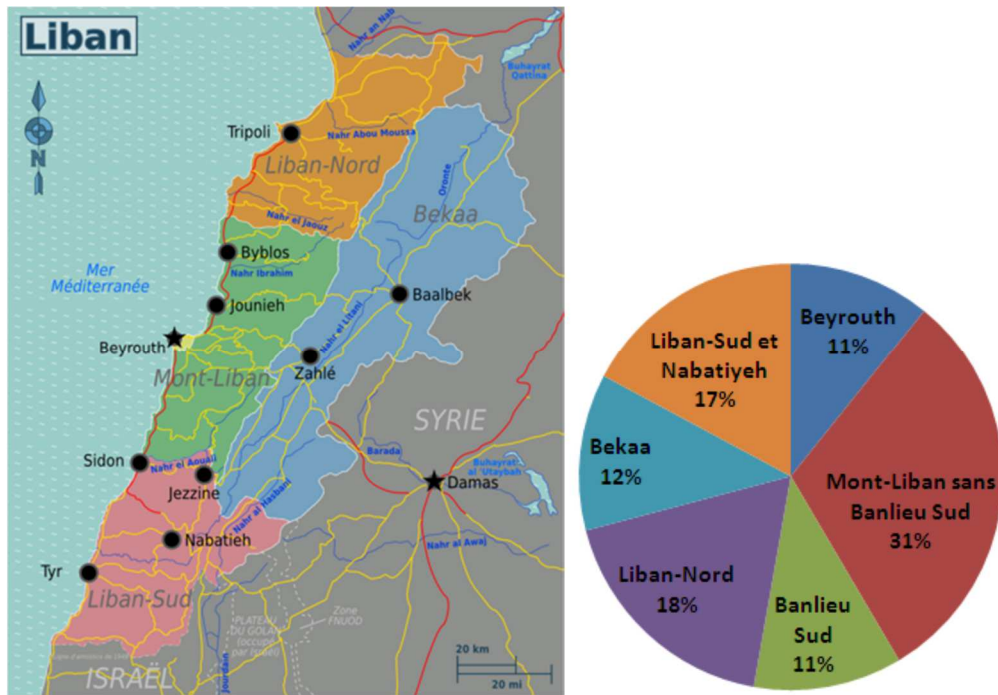


Figure 1.34: répartition des logements principaux au Liban, selon les localités géographiques, (CAS, 2007)

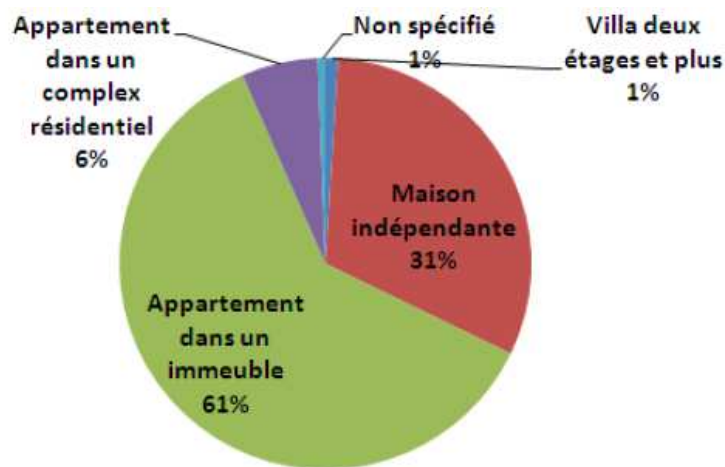


Figure 1.35: Répartition des logements libanais par type en 2007, (CAS, 2007).

1.11.1.2 Mode de construction

Au Liban, la plupart des constructions (neuves et anciennes) ne comportent pas d'isolation thermique. La majorité de ces immeubles fait appel à des techniques de construction classiques des années 1960 comme indiqué sur la Figure 1.36.

Les structures poteaux et les poutres coulées sur place forment la structure du bâtiment. Généralement les façades ne sont pas isolées et elles sont construites en parpaings creux de 14 ou 20 cm d'épaisseur sans contre cloison. Le parpaing creux de 12 à 15 cm avec enduits ciment de part et d'autre, constitue les séparatifs verticaux entre les logements.

Les planchers construits sont en béton armé : planchers à poutrelle et hourdis avec dalle de répartition coulée sur place. Les planchers bas ne sont pas isolés. Le sol est couvert par du carrelage sur sable ou du marbre sur mortier.



Figure 1.36: mode de construction au Liban (Mourtada, 2010).

De même, les toitures ne sont pas isolées dans la plupart des constructions. Généralement, elles sont formées de toitures terrasses (24 cm hourdis), et leur structure est conçue de façon à supporter les réservoirs d'eau et les équipements de climatisations et de ventilation. Dans certains cas, un revêtement en asphalte peut être posé pour assurer l'étanchéité des toitures.

Les fenêtres et les portes fenêtres installées sont de type coulissant horizontalement. Dans la majorité des cas elles sont constituées d'un simple vitrage. Le double vitrage est rarement adopté.

La ventilation des logements est de type VMC et dans certains bâtiments il n'y a que de la ventilation naturelle. Dans certains cas et surtout dans les bureaux, de l'air neuf est soufflé dans les pièces.

Le mode de construction décrit ci-dessus, montre clairement que l'organisation du secteur de la construction des bâtiments n'est soumis à aucune norme d'isolation thermique. L'utilisation de ces méthodes traditionnelles favorise la vitesse de construction sans prendre en compte les problèmes résultants de ces méthodes et leurs effets nuisibles, notamment sur la consommation énergétique. Des projets de normes d'isolation thermique sont en préparation. Ces normes ne sont pas obligatoires, c'est pour cela que jusqu'à maintenant elles ne sont adoptées ni appliquées. Parmi ces normes, nous citons la Norme Libanaise « NL 68 : 1999 » intitulée : « Guide de l'isolation thermique et du confort thermique du bâtiment » élaborée en collaboration avec le CSTB France (LIBNOR, 1999). En 2005, « Thermal standard for building in Lebanon » est un autre projet de norme qui a été finalisé et développé dans le cadre du projet LEB/GEF/G35 (UNDP, et al., 2005). De même en 2010, l'ordre des ingénieurs a préparé « le projet de réglementation thermique des bâtiments » en collaboration avec l'ECOTECH », avec l'appui de l'ADEME et de l'ALMEE. Ce projet a été accepté par LIBNOR.

Enfin, il est à noter que les aspects positifs de ce mode de construction sont par excellence la rapidité de construction, les coûts faibles et l'absence des contraintes qui peuvent ralentir le chantier.

1.11.1.3 Réhabilitation des bâtiments existants :

La Figure 1.37 montre la répartition des principales résidences libanaise par classe d'âge de construction en 2004. Il est clair qu'environ 57 % des logements ont dépassé les 25 ans et que 22 % ont plus de 49 ans et ont besoin d'être réhabilités. Plusieurs options sont proposées pour assurer une bonne réhabilitation thermique et peuvent être très efficaces. Parmi les mesures qui doivent être mises en place, citons l'isolation des toitures et des murs, les protections solaires des fenêtres, l'intégration de chauffe-eau solaires, l'installation d'éclairage efficace... Ces mesures de réhabilitation ne sont que rarement appliquées.

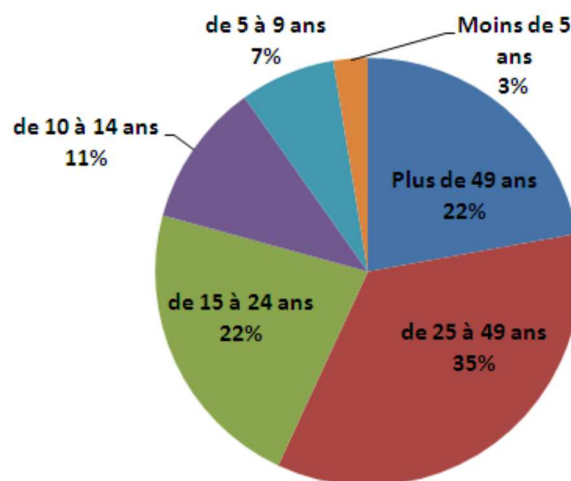


Figure 1.37: Pourcentage des résidences principales au Liban par classe d'âge, (CAS, 2007).

Dans la partie qui suit, nous présentons une étude bibliographique sur les travaux des îlots de chaleur et les microclimats urbains au Beyrouth.

1.11.2 Etude bibliographique sur les îlots de chaleur à Beyrouth

Cette partie présente des études de la littérature réalisées sur le microclimat urbain et l'îlot de chaleur au Liban. Plusieurs études ont été réalisées dans ce contexte, citons les travaux de (McCarthy, 2009), (Idso & Singer, 2009), et plus récemment les travaux de (Kaloustian & Diab, 2015).

(McCarthy, 2009) a réalisé des simulations permettant de mettre en évidence les caractéristiques des îlots de chaleur urbains dans des régions méditerranéennes. En utilisant le modèle RCM (Met Office Hadley Centre Regional Climate Model), McCarthy a comparé les caractéristiques des ICU pour trois différentes régions : Athènes, Alexandrie et Beyrouth. Ses travaux montrent

que l'effet de l'îlot de chaleur urbain à Beyrouth est le plus grand parmi les trois régions. Les graphes de la Figure 1.38 montrent les températures maximales et minimales et la différence de température (intensité ICU) entre une zone urbaine et une zone rurale. Il est évident d'après les graphes, que le phénomène d'ICU est important lorsque la température est minimale (durant la nuit) alors que les valeurs de l'intensité de l'ICU durant le jour sont petites et peuvent avoir des valeurs négatives comme dans le cas d'Alexandrie. Durant les mois de juillet et août, l'intensité de l'ICU à Beyrouth atteint sa valeur maximale pour dépasser les 7°C. Alors que la valeur maximale de l'intensité d'ICU à Alexandrie et Athènes est de l'ordre 2 à 3°C durant les mois d'avril, mai et juin.

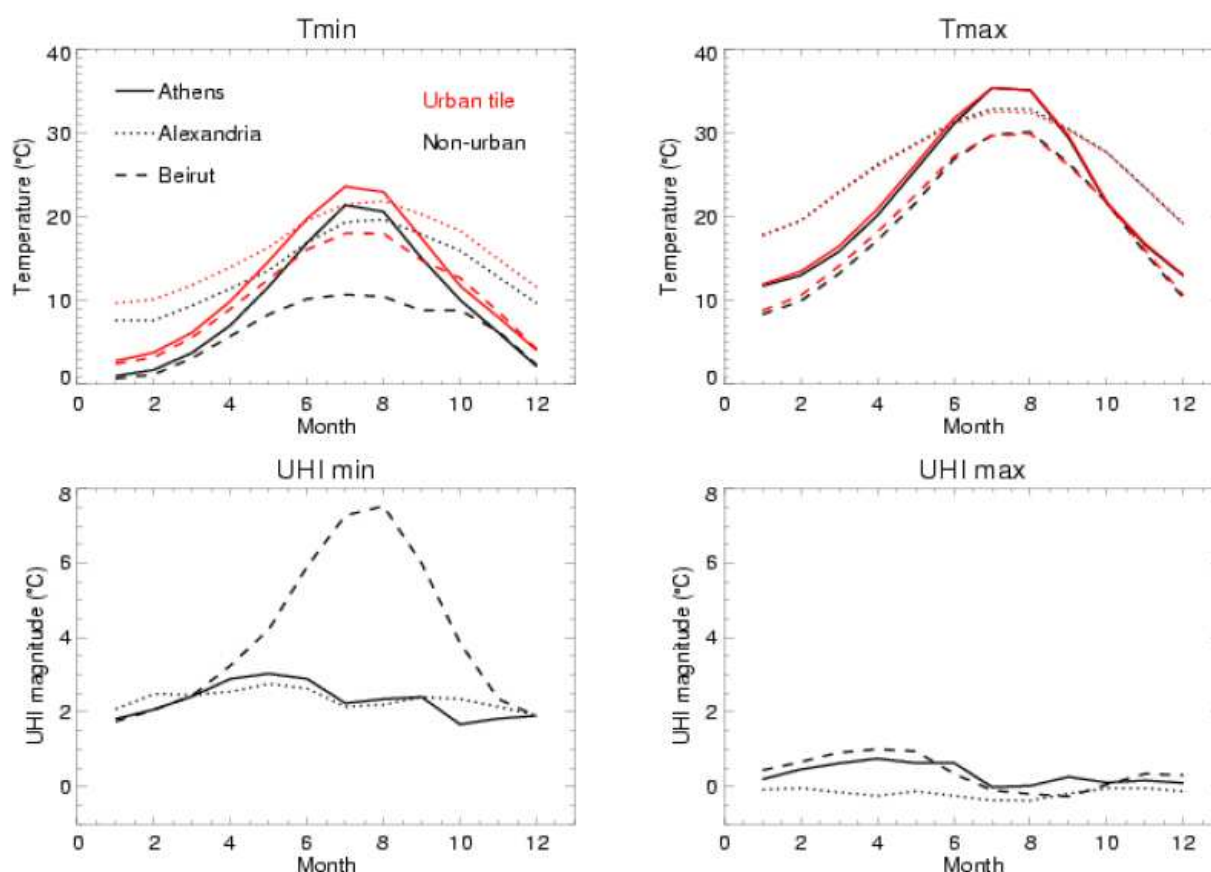


Figure 1.38: Visualisation de la température maximale, minimale et l'intensité de l'ICU d'une zone urbaine et d'une zone rurale, à Beyrouth, Athènes et Alexandrie, selon le modèle RCM, (Idso & Singer, 2009).

(Idso & Singer, 2009), ont cité des travaux de (Hasanean, 2001) qui a exposé la variation de la température de l'air dans 8 régions méditerranéennes : Malte, Athènes, Tripoli, Alexandrie, Amman, Beyrouth, Jérusalem et Latakia. Il a observé dans toutes ces régions un important réchauffement climatique en 1910 qui peut être expliqué par des théories qui se basent sur la variation de l'activité solaire d'une part, et de l'activité volcanique qui a expulsé une quantité non négligeable de gaz aérosol d'autre part. De même, un second réchauffement climatique a été observé dans les années 1970, mais ce réchauffement n'était pas uniforme dans toutes les régions. Selon Hasanean, ce second changement climatique peut être le résultat de l'îlot de chaleur urbain et de l'urbanisation qui a été accentuée dans les années 1970.

Plus récemment, l'effet de l'urbanisation sur l'îlot de chaleur urbain à Beyrouth a été étudié par (Kaloustian & Diab, 2015), en utilisant le modèle TEB (Town Energy Balance) qui a été développé par Valery Masson (Masson, 2000). Les données climatiques utilisées sont celles de la station « Fanar » pour l'année 2009.

Dans les paragraphes qui suivent, les caractéristiques des murs, toitures, routes et végétation de la capitale libanaise seront présentées selon les critères retenus par Kaloustian. Les propriétés thermiques des composants des bâtiments sont présentés dans les tableaux ci-dessous, après avoir divisé les bâtiments de la capitale libanaise en 4 catégories selon leur âge : Catégorie 1 : <1948, Catégorie 2 : 1948-1970, Catégorie 3 : 1970-1992, Catégorie 4 : >1992.

On distingue trois types de toitures : grises, blanches et toitures en tuiles de briques, tableau 1.5.

Les routes à Beyrouth sont en asphalte. Selon (Oke, 1987) L'albédo de l'asphalte est petit, de valeur 0.2 et son émissivité est grande (environ 0.97).

Tableau 1.4 : Caractéristiques des murs dans les façades des bâtiments à Beyrouth (Kaloustian & Diab, 2015)

Catégories	Composants du mur	Epaisseur (cm)	Albédo (ρ)	Emissivité (ε_f)
1) <1948	Mur de grès (Sandstone)	17.5		
	Plâtre et peinture blanche/beige	4	0.7	0.9
2) 1948-1970	Bloc creux	17.5		
	Plâtre et peinture blanche/beige	4	0.7	0.9
3) 1970-1992	Unité de béton (CMU)	20		
	Plâtre et peinture blanche/beige	4	0.7	0.9
4) >1992	Bloc creux	15		
	Plâtre	0.05		
	Bloc naturel	1.5		
	Plâtre et peinture blanche/beige	4		
	Bloc calcaire (Limestone)	3	0.275	0.9

Tableau 1.5 : Types des toitures dans les bâtiments à Beyrouth (Kaloustian & Diab, 2015)

Types des toitures	Composants	Epaisseur	Albédo (ρ)	Emissivité (ε_f)
Grises	Dalle en béton	20	0.225	0.805
Blanches	Dalle en béton	20		
	Peinture blanche (isolation)	0.15	0.7	0.9
Toitures en tuiles de briques	Dalle en béton	30		
	Polystyrène	3.5		
	Tuiles rouges	4.5	0.225	0.9

Pour la végétation, on distingue 3 types de systèmes: les grands arbres, les gazons et les terres sans végétation. La majorité des surfaces végétalisées à Beyrouth sont formées des grands arbres de « ficus nitida » et « pinus pinea ».

La plupart des surfaces de la capitale libanaise ont un faible albédo. Environ 95 % de ces surfaces ont des albédos entre 0.11 et 0.225, Figure 1.39. Cette Figure montre aussi le pourcentage des différentes surfaces qui couvrent Beyrouth.

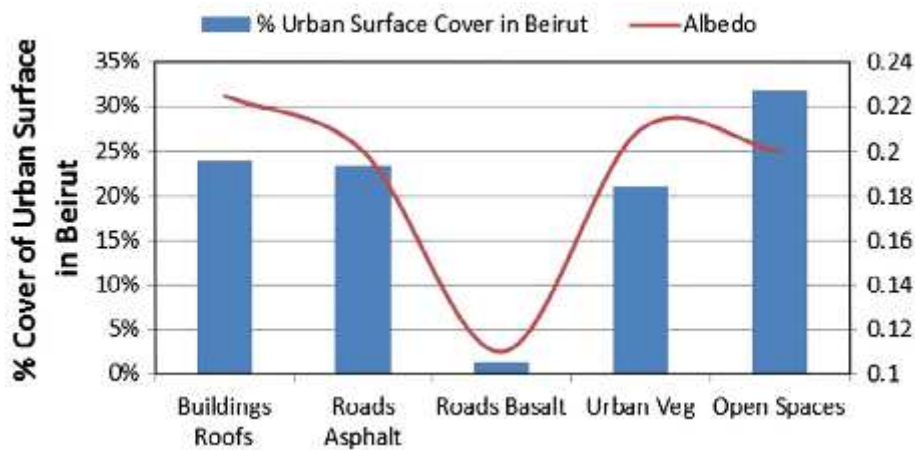


Figure 1.39: Albédo des différentes surfaces qui couvrent "Beyrouth" (Kaloustian & Diab, 2015).

Dans son étude, Kaloustian a réalisé des simulations pour 5 différentes régions de Beyrouth. : l'Université Américaine de Beyrouth AUB, le port avec les hangars, Bachoura (densité de population et d'urbanisation très élevée), Ras Beyrouth (densité moyenne) et la surface végétalisée de « Horsch Beyrouth ». Le tableau 1.6 résume la proportion des surfaces bâties et végétalisées et les routes de chaque région simulée.

Tableau 1.6 : Fraction des surfaces couvrant chaque région simulée par le TEB (Kaloustian & Diab, 2015)

Fraction	AUB	Port	Bachoura	Ras Beyrouth	Horsch Beyrouth
Bâtiment	0.28	0.23	0.32	0.12	0.02
Route	0.11	0.77	0.56	0.45	0.25
Surface végétalisée	0.61	0	0.12	0.43	0.73
Total	1	1	1	1	1

Les Figures 1.40 et 1.41 illustrent respectivement la température à 2 mètres au-dessus du sol pour un jour du mois de janvier et pour un jour du mois de juillet. En examinant les résultats des simulations, on trouve que la température d'air la plus élevée se situe dans la région « Bachoura » où le pourcentage des surfaces bâties par rapport à la surface totale de la région est 56 %. Alors que la température la moins élevée est à « Horsch Beyrouth » où 73 % de la surface totale est végétalisée et que les bâtiments représentent seulement 2 % de cette surface. Ce résultat montre que l'augmentation de la densité des bâtiments, se traduit en été par une augmentation de la température. Pour mettre en évidence l'îlot de chaleur urbain, Kaloustian présente dans les graphes des Figures 1.42 et 1.43 la différence entre la température de « Horsch Beyrouth » et celles des 4 autres régions. Une différence de 2.5 °C est observée pour le cas de « Bachoura » durant l'hiver, Figure 1.42. Cette différence augmente durant l'été pour atteindre environ 6 °C, Figure 1.43.

On remarque aussi que la différence de température entre le port et « Horsch Beyrouth » est négative pour quelques heures de l'après-midi durant l'été avec une valeur de 0.5 °C. Ce résultat peut être expliqué par la localisation du port proche de la mer.

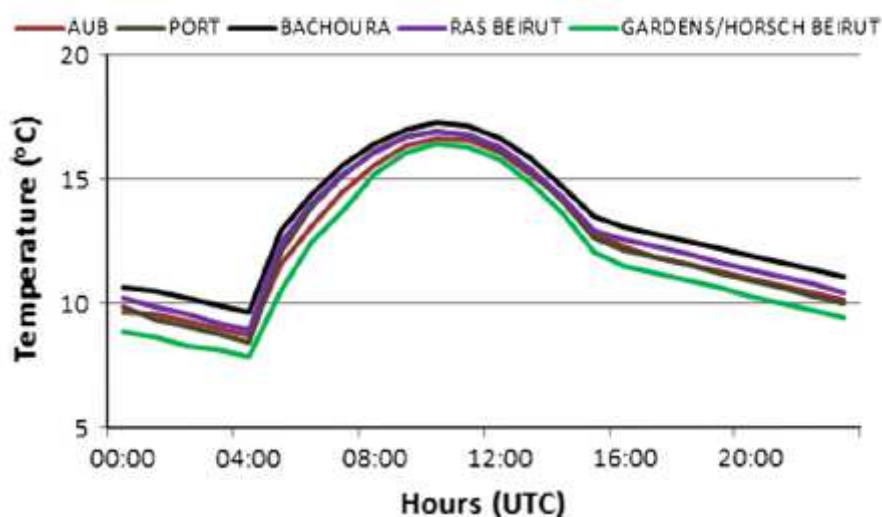


Figure 1.40: Simulation de la température à 2m au-dessus de la terre pour le jour de janvier (Kaloustian & Diab, 2015)

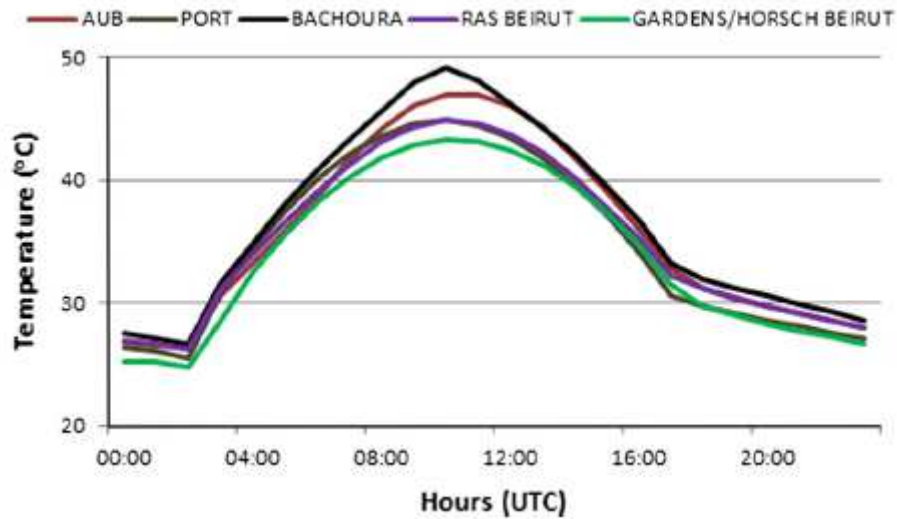


Figure 1.41: Simulation de la température à 2m au-dessus de la terre pour le jour de juillet (Kaloustian & Diab, 2015).

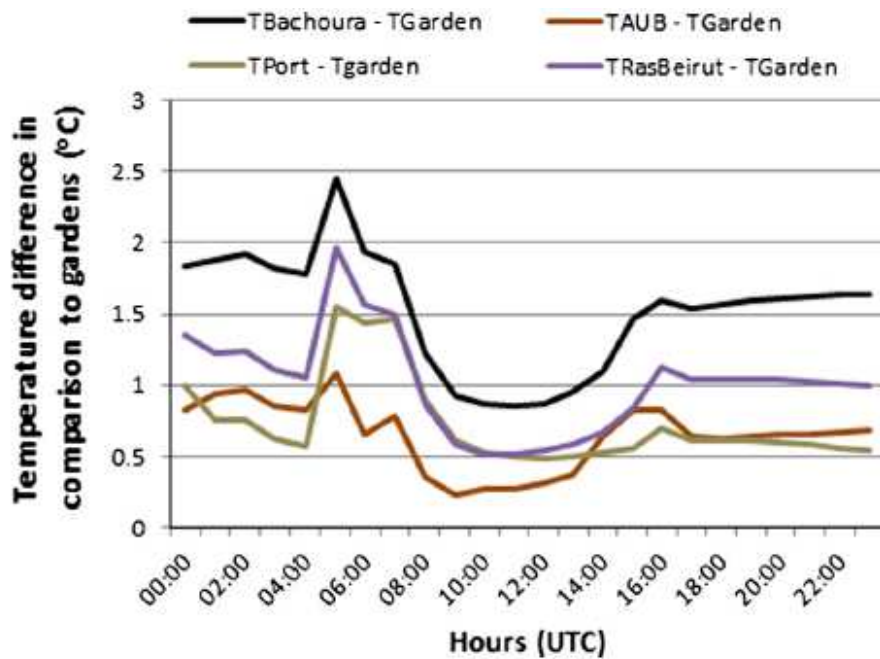


Figure 1.42: Différence de la température entre "Horsch Beyrouth" et les 4 autres régions, à 2 m au-dessus de la terre pour le jour de janvier (Kaloustian & Diab, 2015)

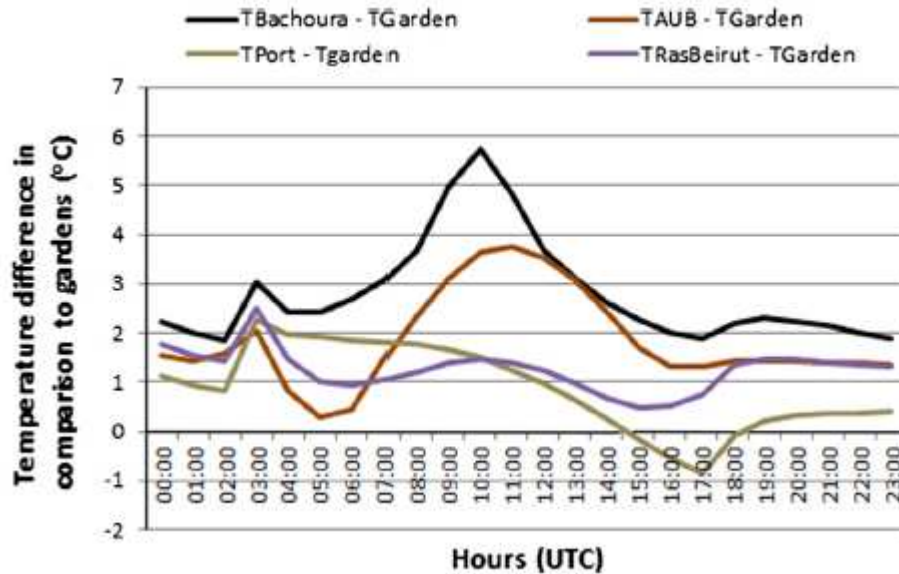


Figure 1.43: Différence de la température entre "Horsch Beyrouth" et les 4 autres régions, à 2 m au-dessus de la terre pour le jour de juillet (Kaloustian & Diab, 2015)

D'autre part, (Kaloustian, et al., 2015 b)) ont comparé Beyrouth (territoire artificialisé) à une ville « verte » d'Allemagne, Hambourg. La valeur moyenne de l'intensité d'îlot de chaleur urbain est 1.2 °C à Hambourg alors que cette valeur peut atteindre 6 °C à Beyrouth. L'îlot de chaleur demeure donc un problème dans le contexte libanais. L'absence de mesures qui protègent le climat urbain et permettraient de lutter contre l'ICU, va augmenter les effets de l'ICU. Contrairement au cas du Liban, le climat urbain et le développement durable, sont présents dans les normes allemandes relatives dans la planification urbaine aux bâtiments. Ainsi, plusieurs mesures d'adaptation sont déjà appliquées à Hambourg pour lutter contre le changement climatique.

Pour conclure, le phénomène d'ICU au Liban demeure un problème qui affecte fortement le confort thermique et la consommation énergétique. Jusqu'à maintenant, les solutions et les standards pour lutter contre les ICU sont absents dans les normes libanaises. D'où la nécessité d'analyser ce phénomène dans le contexte libanais et étudier les améliorations apportées par certains techniques d'atténuation. Dans ce qui suit, nous présentons dans un premier temps (chapitre 2) l'outil numérique utilisé pour les simulations en expliquant comment est réalisée la modélisation. Nous étudierons ensuite le cas d'un quartier très dense de la capitale Beyrouth (Chapitre 3). Puis, nous analysons dans le chapitre 4, les effets de quelques mesures d'atténuation d'ICU qui se basent sur l'implémentation des zones vertes et des sources d'eau, ainsi que la modification de l'albédo des façades et des revêtements de sol. Enfin dans le chapitre 5 les impacts de ces dispositifs de limitation d'ICU sur les charges sensibles et latentes sont présentés à l'aide d'un couplage avec le logiciel HAP. Ce dernier chapitre présente aussi comment ces dispositifs proposées affectent le confort du piéton.

Chapitre 2 Modélisation numérique du microclimat urbain

Plusieurs outils de simulation numérique sont proposés dans la littérature pour étudier la modélisation du microclimat urbain, intégrant la forme géométrique des bâtiments et les différents paramètres qui influent sur le climat. Les principaux objectifs de ces recherches sont de prévoir les ICU et les concentrations de polluants, d'étudier le confort du piéton, ainsi que d'établir une modélisation solaire et aéraulique afin d'intégrer les ressources en énergie renouvelable dans la conception urbaine.

Ces dernières années, plusieurs études ont été menées dans le but de modéliser le microclimat urbain en utilisant plusieurs approches et en tenant compte de plusieurs hypothèses. Dues aux nombreuses interactions et aux corrélations non linéaires entre les différents aspects du microclimat, une modélisation précise de ce phénomène est soumise à plusieurs contraintes. Sebastian Huttner dans sa thèse de doctorat (Huttner, 2012) présente les différentes exigences pour une modélisation précise de la physique de la couche limite d'une zone urbaine :

- La taille de la grille de discrétisation spatiale du modèle doit être relativement petite pour intégrer les bâtiments dans le calcul. Ainsi, la taille de la grille doit être inférieure ou égale à 10 m.
- L'équilibre énergétique de toutes les surfaces doit être pris en considération dans le modèle.
- La simulation des propriétés physiques et physiologiques des plantes doit être incluse.
- Le calcul des processus atmosphériques doit être pronostique et transitoire.

Parmi les nombreux modèles qui sont adoptés pour les recherches des urbanistes et des chercheurs pour modéliser le microclimat, certains ne prennent pas en considération toutes les exigences citées ci-dessus. Par exemples, certains modèles comme le modèle de Miskam (Eichhorn., 1989) et celui de Muklimo_3 (Sievers, 1995), se concentrent seulement sur le champ de vitesse du vent et de la distribution des gaz et des aérosols dans l'atmosphère en négligeant les effets thermodynamiques et le calcul des températures surfaciques des bâtiments. D'autres modèles comme Solweig (Lindberg, et al., 2008) et Rayman (A. Matzarakis, 2007), se concentrent sur la simulation des flux radiatifs échangés avec l'environnement. De même, d'autres modèles se concentrent seulement sur l'interaction entre les plantes et le microclimat (Mahrer & Avissar, 1984).

2.1 Outils numériques

Parmi les logiciels qui présentent un degré de précision élevé et qui prennent en considération un large nombre de contraintes climatiques dans la simulation, on peut citer : Solène-microclimat et ENVI-met 4. On note aussi l'utilisation fréquente deTEB (Town energy balance) qui est un autre modèle développé par MétéoFrance permettant la modélisation des échanges énergétiques et hydrauliques entre les villes et l'atmosphère, modélisant la ville comme un seul canyon, et adoptant une approche énergétique globale à l'échelle de la ville.

2.1.1 Outils Solène-microclimat :

Solène-microclimat est un logiciel de simulation du microclimat urbain développé depuis les années 1990 par des chercheurs et des ingénieurs du laboratoire CERMA (Centre de recherche méthodologique d'architecture) de Nantes. Un des points forts de ce logiciel est qu'il permet de traiter des géométries urbaines réelles et pas uniquement des formes prises dans une grille. Ce logiciel permet d'étudier l'impact des aménagements urbains à l'échelle du quartier sur le confort extérieur, sur la température de surface et sur la consommation énergétique. En plus du bilan radiatif, des échanges convectifs thermiques et aérauliques, Solène-microclimat considère aussi l'inertie thermique des parois dans la simulation.

Le flux solaire total capté par chaque facette du modèle urbain est déterminé par calcul. Ce flux étant la somme du flux incident direct et du flux diffus qui est calculé à partir d'un facteur de vue de ciel. Pour le bilan des inter-réflexions, Solène utilise la méthode de radiosité restreinte aux réflexions diffuses et isotropes. Pour des modèles complexes, Solène est couplé à un modèle CFD (code Saturne par exemple) pour la simulation des écoulements de l'air.

Ce logiciel a été utilisé dans plusieurs thèses de doctorat afin de simuler le microclimat urbain. A titre d'exemple, citons les travaux de (Robitu, 2005), (Bozonnet, 2005), (Bouyer, 2009), (Athamena, 2012).

Cependant, ce logiciel présente quelques inconvénients. Le bilan hydrique n'est pas intégré dans le bilan énergétique à l'échelle urbaine, il ne considère que l'effet énergétique de l'évapotranspiration à l'échelle du bâtiment. Un autre inconvénient est que la partie du logiciel correspondant aux calculs microclimatiques était en cours de redéfinition lors de la thèse.

2.1.2 Modèle TEB-SURFEX

Le modèle TEB (Town Energy Balance) développé par (Masson, 2000), permet d'étudier les échanges d'énergie et d'eau entre l'atmosphère et les villes. Ainsi, il est capable de réaliser la simulation de l'îlot de chaleur urbain dans une ville en se basant sur les équations physiques de conservation d'énergie et de matière (eau). De même TEB permet de simuler les consommations énergétiques pour la climatisation et le chauffage du bâtiment ainsi que l'indice du confort humain. Ce modèle est inclus dans le système de modélisation SURFEX (surface externalisée) et prend en compte dans sa modélisation plusieurs processus. On cite notamment :

- flux solaires et infra-rouge (bilan radiatif) et piégeage radiatif.
- flux convectifs sur chaque surface du modèle.
- effet d'ombrage des jardins et des végétations, ainsi que l'évapotranspiration des plantes.
- eau en surface, l'interception de l'eau de pluie, évaporation et ruissellement.
- rejets de chaleur anthropiques des voitures et des industries.
- bilan d'énergie à l'intérieur des bâtiments pour la consommation énergétique nécessaire pour la climatisation et le chauffage.

Les bâtiments dans TEB ne sont pas reproduits avec leur géométrie exacte ; il suffit d'indiquer la largeur et la hauteur des bâtiments, ainsi que la largeur des rues de la ville étudiée. L'un des avantages de TEB est qu'il permet de réaliser des simulations numériques

rapides sur des zones urbaines étendues. Un autre avantage est que ce modèle a été validé sur des différents sites du monde comme Marseille, Mexico, Montréal, Toulouse, Bâle...

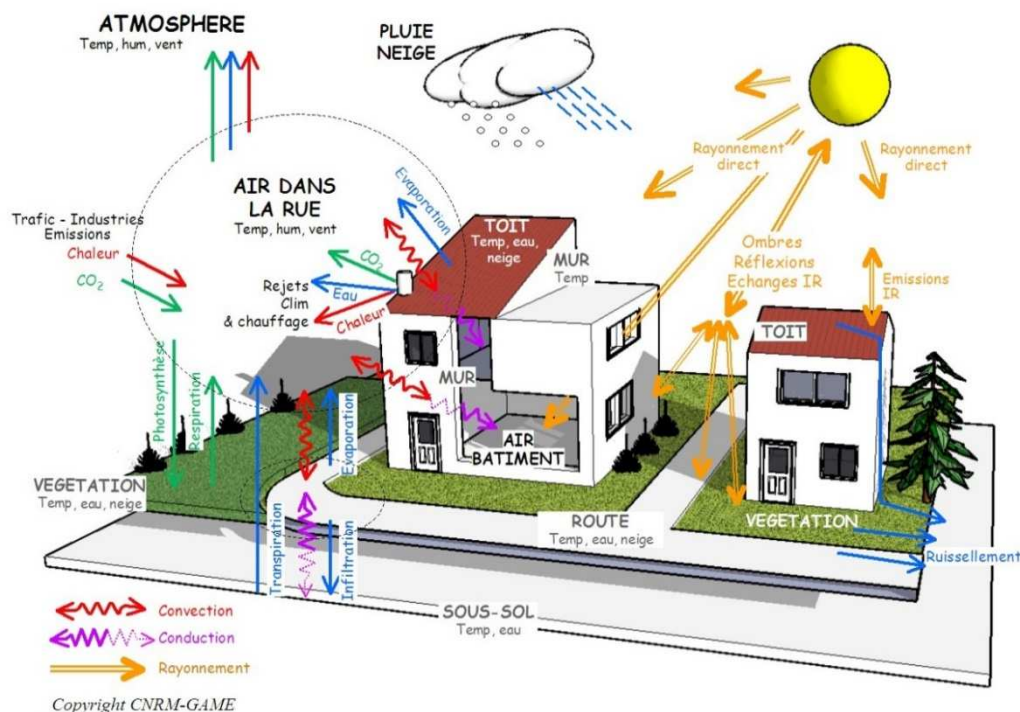


Figure 2.1 : Echange d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère dans TEB– image extraite de www.umr-cnrm.fr

2.1.3 ENVI-MET

Développé par M. Bruse dès 1995 au sein de l'Université de la Ruhr à Bochum, ENVI-met 4 demeure le seul logiciel permettant une simulation microclimatique réaliste à l'échelle du quartier grâce à sa possibilité d'intégrer un grand nombre de phénomènes physiques comme l'écoulement de l'air entre les bâtiments, l'impact de la végétation et des surfaces d'eau sur le microclimat, et les échanges entre les surfaces du sol et les murs des bâtiments. L'effet de la bioclimatologie et le dégagement des polluants est aussi intégré dans le modèle. Le modèle tridimensionnel ENVI-met est parmi les rares modèles qui prennent en considération toutes les exigences citées ci-dessus par (Huttner, 2012) et celui-ci fournit des résultats dont la précision a été confrontée à plusieurs reprises à des résultats expérimentaux. Plusieurs travaux utilisant ENVI-met sont cités dans le paragraphe 2.5.

Ce modèle tridimensionnel permet de modéliser une scène urbaine avec une résolution spatiale ajustable allant de 0.5 à 10 m et un pas de temps variant entre 1 et 10 secondes (Maleki, et al., 2014). Les principaux systèmes formant le modèle sont : le sol, la végétation, l'atmosphère et le bâtiment.

ENVI-met permet la modélisation de différents types de sols pour chaque cellule de la grille. Pour les sols minéralisés, le transfert de chaleur est seulement pris en compte alors que pour les sols naturels les transferts de chaleur et de vapeur d'eau sont pris en compte dans la modélisation. Le flux radiatif net, le flux turbulent de chaleur et de vapeur, et la conduction de chaleur dans le sol, permettent de calculer la température de surface de sol. Le modèle lui-même permet de déterminer l'albédo du sol naturel en fonction de l'angle solaire incident et de la quantité de l'eau dans la couche supérieure du sol.

Concernant la végétation, le logiciel permet de modéliser différents types d'arbres en trois dimensions tout en calculant le bilan de masse et d'énergie pour chaque cellule de la grille de végétation. De même, ENVI-met considère dans sa modélisation, l'ombre portée des arbres et le coefficient d'atténuation des rayonnements solaires qui dépend essentiellement de la densité de la surface des feuilles. Il est à noter, que le coefficient d'atténuation du rayonnement diffus n'est pas pris en compte dans le calcul.

Pour le système atmosphère, les équations de Navier-Stokes et le modèle de turbulence ($E - \epsilon$) sont utilisées pour évaluer la turbulence et le champ d'écoulement aérodynamique.

Les principaux paramètres d'entrées du modèle sont les suivants :

- les données météorologiques.
- les profils d'humidité et de température initiale du sol.
- les structures et les propriétés des surfaces de sol, de la végétation et des bâtiments.

Toutefois, ce logiciel présente tout de même deux inconvénients évidents. Tout d'abord, il ne permet pas d'effectuer de bilan énergétique des bâtiments. Le second point faible d'ENVI-met 4 est que le temps de calcul est extrêmement grand. En effet, on a besoin plus qu'une douzaine de jours pour le calcul d'une journée type à l'aide d'un ordinateur puissant. De même ENVI-met ne permet pas de prendre en considération les apports de chaleur liés aux activités humaines (chaleur des moteurs, chaleur rejetée par les splits...)

Dans la suite de notre travail, le logiciel ENVI-met 4 a été adopté, puisque ce modèle intègre un grand nombre de phénomènes physiques relatifs à l'interaction-ville atmosphère et qu'il a été validé pour la simulation du microclimat urbain dans plusieurs régions et sous différents climats. Dans un premier temps nous présentons les différents modèles physiques utilisés sous ENVI-met. Ensuite nous détaillons les méthodes numériques utilisées. Puis nous présentons les avantages de la version 4 d'ENVI-met. Enfin nous exposons un aperçu bibliographique sur quelques études numériques utilisant ENVI-met dans leurs simulations.

2.2 Modèle physique décrit par ENVI-met

Les principales variables calculées par ENVI-met sont : la vitesse et la direction du vent, la température et l'humidité de l'air, la température et l'humidité du sol, la turbulence, les flux radiatifs, la dispersion des gaz et des particules dans l'environnement.

Dans ce qui suit, nous présentons les sous-modèles utilisés pour le calcul de ces variables. La Figure 2.2 illustre les sous-modèles d'ENVI-met.

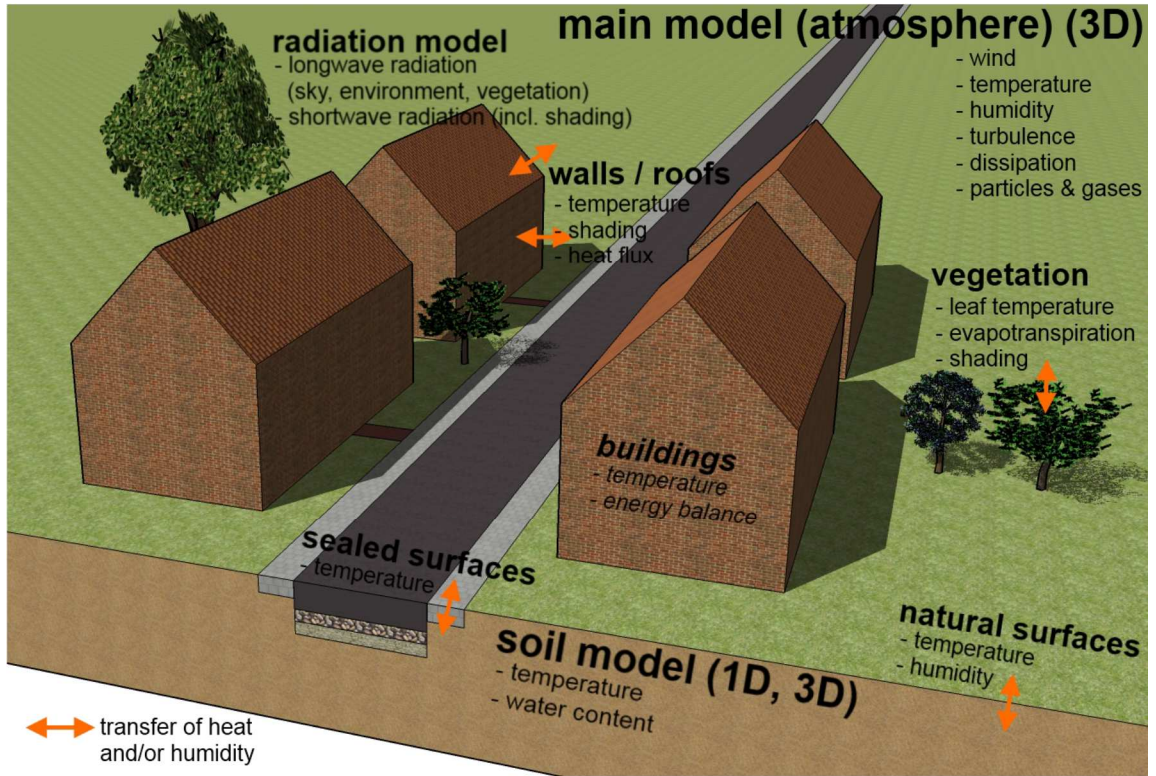


Figure 2.2: Plan montrant les sous-modèles d'ENVI-met (Huttner, 2012)

2.2.1 Flux de vent :

La modélisation de la vitesse et de la direction du vent est basée sur l'équation de continuité appliquée à un fluide incompressible et les équations de Navier-Stokes non hydrostatiques :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad [2.1]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f(v - v_g) - S_u(x, y, z) \quad [2.2a]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + f(u - u_g) - S_v(x, y, z) \quad [2.2b] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) - S_w(x, y, z) \quad [2.2c] \end{aligned}$$

Avec $\vec{u}_1(u, v, w)$ est le champ de vitesse, ρ est la densité de l'air, p est la pression (local pressure perturbation), K_m est le coefficient d'échange, f est le paramètre de Coriolis qui s'exprime par $2\Omega \sin\varphi$ où $\Omega = 7.10^{-5} s^{-1}$ est le vecteur de rotation de la terre et φ est la latitude. S_u , S_v et S_w sont les termes de frottement induit par les obstacles semi-perméables comme la végétation qui s'écrit selon (Liu, et al., 1966) et (Yamada, 1982) comme suit :

$$S_{u_i} = \frac{\partial \overline{p'}}{\partial x_i} = c_{a,f} LAD(z) \cdot W \cdot u_i \quad [2.3]$$

Où $c_{a,f}$ est le coefficient de frottement des feuilles de la végétation, $LAD(z)$ (leaf area density [m^2/m^3]) est la densité de la surface des feuilles des plantes et des arbres au niveau z , et $W = (u^2 + v^2 + z^2)^{0.5}$ est la vitesse moyenne du vent à un point (x,y,z) de la grille.

En appliquant la convention de sommation d'Einstein et l'approximation de Boussinesq, les équations de Navier-Stokes se réduisent à :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x} + K_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) + f(v - v_g) - S_u \quad [2.4a]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial y} + K_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} \right) + f(u - u_g) - S_v \quad [2.4b]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u_i \frac{\partial w}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial z} + K_m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_w \quad [2.4c]$$

$\theta(z)$ étant la température potentielle au niveau z , et $\theta_{ref}(z)$ est la température de référence qui représente la moyenne des température des cellules de la grille à un niveau z à l'exception celles des bâtiments.

2.2.2 Température et humidité

La température potentielle θ et l'humidité q sont calculées à partir de l'équation mixte d'advection-diffusion (Huttner, 2012) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = K_h \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2} \right) + \frac{1}{C_p \rho} \frac{\partial R_{lw}}{\partial z} + Q_\theta \quad [2.5]$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = K_q \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x_i^2} \right) + Q_q \quad [2.6]$$

Q_θ définit l'échange de chaleur entre l'air et la végétation, Q_q est l'échange d'humidité entre la végétation et l'air atmosphérique. K_h et K_q représentent respectivement le coefficient d'échange de chaleur et d'humidité en régime permanent. Le terme $\frac{1}{C_p \rho} \frac{\partial R_{lw}}{\partial z}$ décrit le changement de la température de l'air due à la divergence des radiations à grandes longueurs d'onde.

2.2.3 La turbulence atmosphérique

Parmi les nombreux modèles développés pour prédire la turbulence qui se basent sur des approches URANS ou hybrides (Fadai-Ghotbi, 2007) (McDonough, 2007) (Davidson, 2017), la modélisation de la turbulence dans ENVI-met se base sur le modèle de turbulence d'ordre 1.5 (1.5 order turbulence closure model) basé sur les travaux de (Mellor & Yamada, 1975). Cependant les cisaillements de l'air tout autour des obstacles comme les bâtiments et la végétation sont pris en considération dans les calculs. Ce modèle se base sur les deux variables E turbulence locale et ε taux de dissipation, introduits par (Mellor & Yamada, 1975) selon les équations :

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = K_E \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_i^2} \right) + P_r - T_h + Q_E - \varepsilon \quad [2.7]$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = K_\varepsilon \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_i^2} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{E} P_r - c_3 \frac{\varepsilon}{E} T_h - c_2 \frac{\varepsilon^2}{E} + Q_\varepsilon \quad [2.8]$$

D'après (Launder & Spalding, 1974), les valeurs des constantes empiriques c_1 , c_2 et c_3 utilisées par défaut dans ENVI-met sont :

$$c_1 = 1.44, c_2 = 1.92, c_3 = 1.44$$

Mais dans certaines situations, les valeurs de ces constantes doivent être changées pour avoir des résultats plus précis. Le terme P_r représente l'énergie dissipée et produite en régime permanent due au cisaillement du vent, T_h étant la stratification thermique :

$$P_r = K_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad [2.9]$$

$$Th = \frac{g}{\theta_{ref}(z)} K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad [2.10]$$

Les termes Q_E et Q_ε représentent respectivement les termes sources locales de production et de dissipation de turbulence causée par les végétations. Selon Wilson (Wilson, 1988) et (Liu, et al., 1966), ces termes s'écrivent comme suit :

$$Q_E = c_{d,f} LAD(z) \cdot W^3 - 4c_{d,f} LAD(z) \cdot |W| \cdot E \quad [2.11]$$

$$Q_\varepsilon = 1.5c_{d,f} LAD(z) \cdot W^3 - 6c_{d,f} LAD(z) \cdot |W| \cdot \varepsilon \quad [2.12]$$

Où W est la vitesse moyenne du vent.

En se basant sur l'hypothèse d'isotropie locale de la turbulence, les coefficients de diffusion s'expriment :

$$K_m = c_\mu \frac{E^2}{\varepsilon}, \quad K_h = K_q = 1.35K_m, \quad K_E = \frac{K_m}{\sigma_E}, \quad K_\varepsilon = \frac{K_m}{\sigma_\varepsilon}$$

Où $c_\mu = 0.09$, $\sigma_E = 1$ et $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

2.2.4 Flux radiatifs

Dans le modèle tridimensionnel étudié, les flux radiatifs initiaux à courtes longueurs d'ondes et ceux à grandes longueurs d'ondes arrivant à une cellule de la grille, sont modifiés par la présence des bâtiments et des végétations. En 1995, (Bruse, 1995) définit 5 coefficients σ appelés coefficient de réduction des flux, dont les valeurs varient entre 0 et 1. Une valeur nulle d'un coefficient indique que le flux est totalement absorbé avant d'être arrivé à la cellule étudiée, alors qu'une valeur 1 désigne que le flux initial n'a pas été influencé par la présence des bâtiments et des végétations. Ces coefficients sont définis comme suit :

$$\sigma_{cl,dir}(z) = \exp(-F \cdot LAI^*(z)) \quad [2.13a]$$

$$\sigma_{cl,dif}(z) = \exp(-F \cdot LAI(z, z_p)) \quad [2.13b]$$

$$\sigma_{\downarrow gl}(z, z_p) = \exp(-F \cdot LAI(z, z_p)) \quad [2.13c]$$

$$\sigma_{gl}^{\uparrow}(0, z) = \exp(-F \cdot LAI(0, z)) \quad [2.13d]$$

$$\sigma_{svf}(z) = 1/360 \sum_{\pi=0}^{360} \cos \omega(\pi) \quad [2.13e]$$

Les coefficients des équations [13a] et [13b] décrivent l'influence de la végétation sur les radiations à courtes longueurs d'ondes, alors que les équations [13c] et [13d] correspondent aux flux à grandes longueurs d'ondes. $\sigma_{svf}(z)$ correspond au facteur de vue de ciel où ω est l'angle solide maximal dans la direction π . σ_{cl} , σ_{gl} correspondent respectivement au coefficient de réduction relatifs aux flux radiatifs à courtes longueurs d'ondes et à grandes longueurs d'ondes. z_p est la hauteur du sommet de la plante.

L'indice vertical monodimensionnel LAI correspondant à la surface des feuilles des arbres pour une hauteur z de la plante est de la forme :

$$LAI(z, z + \Delta z) = \int_{z'}^{z' + \Delta z} LAD(z') dz'$$

L'indice tridimensionnel LAI^* est utilisé pour le calcul du coefficient $\sigma_{cl,dir}$ à la place de LAI . Le calcul de LAI^* prend en considération l'angle d'incidence des rayons solaires.

Le flux solaire total correspondant aux courtes longueurs d'ondes Q_{cl} est la somme des flux solaires directs et ceux diffus et s'écrit alors :

$$Q_{cl}(z) = \sigma_{cl,dir}(z) Q_{cl,dir}^0 + \sigma_{cl,dif}(z) \sigma_{svf}(z) Q_{cl,dif}^0 + (1 - \sigma_{svf}(z)) Q_{cl,dir}^0 \cdot \bar{a} \quad [2.14]$$

Où $Q_{cl,dir}^0$ est le flux solaire direct initial à courtes longueurs d'ondes arrivant au modèle étudié avant d'être influencé par les éléments du modèle et $Q_{cl,dif}^0$ correspond au flux solaire diffus initial. $\bar{a}$ est l'albédo moyen de tous les murs du modèle.

D'autre part, les flux solaires des rayonnements à grandes longueurs d'ondes s'expriment :

$$Q_{gl}^{\downarrow}(z) = \sigma_{gl}^{\downarrow}(z, z_p) Q_{g,l}^{\downarrow,0} + (1 - \sigma_{g,l(0,z)}^{\downarrow}) \epsilon_f \sigma \bar{T}_{f+}^4 \quad [2.15a]$$

$$Q_{gl}^{\uparrow}(z) = \sigma_{gl}^{\uparrow}(0, z) \epsilon_s \sigma T_0^4 + (1 - \sigma_{lw}^{\uparrow}(0, z)) \epsilon_f \sigma \bar{T}_{f-}^4 \quad [2.15b]$$

$$Q_{gl}^{\leftrightarrow} = (1 - \sigma_{svf}(z)) \epsilon_m \sigma \bar{T}_m^4 \quad [2.15c]$$

Avec $Q_{gl}^{\leftrightarrow}$ représente le flux radiatif horizontale émis par les murs, σ étant la constant de Stéphane-Boltzman.

ϵ_f , ϵ_s , ϵ_m : émissivité des feuilles des arbres, du sol et des murs.

T_m : Température moyenne des murs.

T_0 : Température surfacique du sol.

$\bar{T}_{f+}^4, \bar{T}_{f-}^4$: Température moyenne de la couche végétale au-dessus de z (+) et au-dessous de z (-).

Cette prise en compte est importante car nous allons étudier plusieurs paramètres physiques fortement influencés par les différents types de rayonnement, qui interviennent dans les calculs de charges de climatisation et de confort du piéton.

2.2.5 Le modèle du sol

Ce modèle permet de calculer la température et l'humidité du sol naturel ou bien artificiel. Selon (Bruse, 2004) , la hauteur du sol modélisé est de 2 m et divisé en 14 différentes couches. L'épaisseur des couches superficielles est de 1 cm, alors que l'épaisseur des couches profondes est de l'ordre de 50 cm. L'équation de conduction 1D en régime variable sans source de chaleur permet de modéliser la température du sol.

Les équations monodimensionnelles (suivant z) modélisant la température T_s et l'humidité du sol η sont :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad [2.16]$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = D_\eta \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} + \frac{\partial K_\eta}{\partial z} - S_\eta(z) \quad [2.17]$$

Où k_s est diffusivité thermique, η est l'humidité volumique du sol, D_η est la diffusivité hydraulique et K_η la conductivité hydraulique du sol. Le calcul de ces coefficients se base sur les équations de (Clapp & Hornberger, 1978).

S_η est le terme représentant une source additionnelle d'humidité provoqué par les racines des plantes.

2.2.6 Le modèle de la végétation

L'interaction de la végétation avec l'atmosphère, le sol et les flux radiatifs est aussi modélisée dans ENVI-met. Selon (Huttner, 2012), chaque plante dans ENVI-met est définie par sa hauteur z_p et sa densité de feuille LAD (Leaf Area Density) qui est divisée en 10 différentes couches. L'interaction entre la végétation et l'atmosphère s'exprime par :

$$J_{f,h} = 1.1 r_a^{-1} (T_f - T_a) \quad [2.18]$$

$$J_{f,evap} = r_a^{-1} \Delta_q \delta_c f_w + r_a^{-1} (1 - \delta_c) \Delta_q \quad [2.19]$$

$$J_{f,trans} = \delta_c (r_a + r_s)^{-1} (1 - f_w) \Delta_q \quad [2.20]$$

$J_{f,h}$ étant le flux qui correspond au chaleur sensible, $J_{f,evap}$ le flux d'évaporation, et $J_{f,trans}$ est le flux de transpiration. T_a est la température de l'air à côté des feuilles, T_f la température des feuilles des plantes et q_a l'humidité spécifique de l'air. Δ_q est la différence d'humidité entre la surface des feuilles et l'air donnée par $\Delta_q = q^*T_f - q_a$. q^* étant la valeur de saturation de q . Le paramètre δ_c dépend de l'évapotranspiration et prend la valeur 1 lorsqu'il y a évapotranspiration des plantes et la valeur 0 lorsque les plantes ne transpirent pas. f_w représente la fraction des feuilles mouillées. La résistance aérodynamique r_a est une fonction du diamètre des feuilles et la vitesse du vent W , et est exprimé selon (Braden, 1982) par :

$$r_a = A \sqrt{\frac{D}{W}} \quad [2.21]$$

Le paramètre A dépend du type des plantes: pour les conifères $A = 87s^{0.5}m^{-1}$, par contre pour les herbes et les arbres feuillus $A = 200s^{0.5}m^{-1}$.

La résistance stomatique r_s qui représente le système de régulation essentiel du transfert d'eau, ajustant le débit d'eau liquide de la plante à la transpiration sous-forme de vapeur, s'exprime en fonction de la conductance stomatique g_s :

$$r_s = \frac{1}{g_s} \cdot 1000 \quad [2.22]$$

$$g_s = 1.6 \frac{A_n}{C_s - C_i} \quad [2.23]$$

Avec C_s et C_i sont respectivement les concentrations de CO_2 à la surface et à l'intérieur des feuilles. A_n est le taux de photosynthèse.

2.2.7 Le modèle des surfaces du sol

D'après Huttner (Huttner, 2012) , La température T_0 de la surface du sol est calculée à partir du bilan énergétique au niveau du sol :

$$Q_{cl,net} + Q_{gl,net}(T_0) - G(T_0) - H(T_0) - LE(T_0, q_0) = 0 \quad [2.24]$$

$Q_{cl,net}$ est le flux radiatif à courte longueur d'onde au niveau de la surface du sol, $Q_{gl,net}(T_0)$ est le flux radiatif à grande longueur d'onde au niveau de la surface, $G(T_0)$ est le flux de chaleur du sol, $H(T_0)$ le flux turbulent de chaleur sensible et $LE(T_0, q_0)$ le flux turbulent de chaleur latente.

Le flux $Q_{cl,net}$ qui est la somme du flux direct et diffus s'écrit :

$$Q_{cl,net} = (Q_{cl,dir}(z = 0)\cos\beta + Q_{cl,diff}(z = 0)).(1 - a_s) \quad [2.25]$$

a_s étant l'albédo de la surface, et β l'angle d'incidence entre les radiations solaires et la surface.

Le flux $Q_{gl,net}$ qui dépend des couches végétalisées, des rayonnements des bâtiments et des surfaces, s'écrit d'une manière simplifiée comme étant la somme des flux cachés par les bâtiments et les végétations, et ceux non cachés :

$$Q_{gl,net}(T_0) = \sigma_{svf} Q_{gl,net}^{non\ caché}(T_0) + (1 - \sigma_{svf}) Q_{lw,net}^{caché}(T_0) \quad [2.26]$$

$$Q_{gl,net}^{non\ caché}(T_0) = \sigma_{gl}^{\downarrow}(0, z_p) (Q_{gl}^{\downarrow,0} - \varepsilon_s \sigma T_0^4) + \left(1 - \sigma_{gl}^{\downarrow}(0, z_p)\right) \frac{\varepsilon_v \varepsilon_s}{\varepsilon_w + \varepsilon_s - \varepsilon_w \varepsilon_s} (\sigma \bar{T}_v^4 - \sigma \bar{T}_0^4) \quad [2.27]$$

$$Q_{lw,net}^{caché}(T_0) = \frac{\varepsilon_w \varepsilon_s}{\varepsilon_w + \varepsilon_s - \varepsilon_w \varepsilon_s} (\max(\sigma \bar{T}_w^4, \sigma \bar{T}_0^4) - \sigma \bar{T}_0^4) \quad [2.28]$$

ε_s , ε_w et ε_v sont respectivement les émissivités des surfaces, des murs et des végétations. T_v est la température surfacique des végétations et T_w est la température surfacique des murs.

Le flux de chaleur du sol $G(T_0)$ s'exprime:

$$G(T_0) = \lambda_s(k=1) \frac{T_0 - T_{k=-1}}{0.5 \Delta z_{k=-1}} \quad [2.29]$$

Les flux $H(T_0)$ et $LE(T_0, q_0)$ sont respectivement en fonction des coefficients d'échange K_h et K_q :

$$H(T_0) = \rho c_p K_h^0 \frac{T_0 - \theta_{k=1}}{0.5 \Delta z_{k=1}} \quad [2.30]$$

$$LE(T_0, q_0) = \rho L(T_0) K_q^0 \frac{q_0 - q_{k=1}}{0.5 \Delta z_{k=1}} \quad [2.31]$$

Avec $L(T_0) = (2.501 - 0.00237(T_0 - 273.15)). 10^6$

2.2.8 La température des toits et des façades des bâtiments :

Un nouveau modèle de calcul de la température des façades et des toitures a été développé dans la version 4.0 d'ENVI-met. Contrairement à l'ancien modèle qui se base sur le bilan énergétique en régime permanent, ce modèle appelé le « modèle des 3 nœuds » permet le calcul énergétique en régime transitoire. Ce nouveau modèle se base sur les travaux de (Terjung & O'Rourke, 1980) qui ont montré que le modèle transitoire donne des résultats plus fiables que ceux du régime permanent. Le tableau de la Figure 2.3 montre la différence entre les deux versions d'ENVI-met dans le calcul de la température des façades/toitures. Les propriétés physiques qui sont prises en considération dans le calcul du nouveau modèle sont : la réflectivité, l'absorption,

la transmission, l'émissivité, le coefficient de transfert de chaleur, la capacité calorifique spécifique et l'épaisseur du mur.

	V 3.1	V 4.0
Reflectivity	✓	✓
Absorption	✓	✓
Transmission	✗	✓
Emissivity	✗	✓
Heat transfer coefficient	✓	✓
Specific heat capacity	✗	✓
Thickness of wall	✗	✓
Variable temperature inside building	✗	✓
Set properties for each façade element separately	✗	✓

Figure 2.3: Tableau montrant la différence de calcul de la température des façades entre la version 3.1 et la version 4.0 d'Envimet (Huttner, et al., 2009)

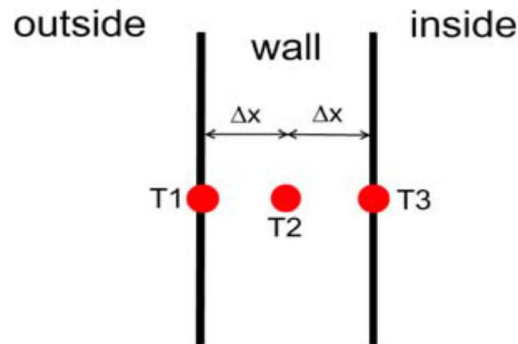


Figure 2.4: Schéma du modèle des 3 nœuds (Huttner, 2012)

Le bilan énergétique sur la surface extérieure de la façade au point T1, permet d'écrire :

$$Q_{cl,net}^{abs} + Q_{gl,net}^{abs} - \varepsilon \sigma T_1^{*4} + h_{c,o}(T_{air} - T_1^*) + \frac{\lambda}{\Delta x}(T_2^* - T_1^*) = \frac{c_w \rho_w \Delta x}{2\Delta t}(T_1^* - T_1) \quad [2.32]$$

$Q_{cl,net}^{abs}$ et $Q_{gl,net}^{abs}$ sont respectivement les flux à courtes et à grandes longueurs d'ondes absorbées par la surface. $h_{c,o}$ [W/m^2K] est le coefficient de convection du mur extérieur, λ

$[W/mK]$ est le coefficient de transfert de chaleur, $\Delta x [m]$ étant la distance qui séparent deux nœuds, $c_w [J/(KgK)]$ est la capacité calorifique du mur, T_n est la température au nœud n à un instant t et T_n^* est la température au nœud n pour le pas du temps suivant.

En appliquant la loi de Fourier :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\lambda}{c_w \rho_w} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad [2.33]$$

La somme des flux de chaleur au nœud T2 milieu du mur :

$$(P + 2)T_2^* - T_3^* = PT_2 + T_1^* \quad [2.34]$$

Avec $P = \frac{\Delta x^2 c_w \rho_w}{\lambda \Delta t}$.

Le bilan énergétique au nœud T3 :

$$-T_2^* + \left(\frac{P}{2} + \frac{h_c \Delta x}{\lambda} + 1 \right) T_3^* = \frac{P}{2} T_3 + \frac{h_{c,i} \Delta x}{\lambda} T_i \quad [2.35]$$

T_i étant la température de l'air à l'intérieur du bâtiments et $h_{c,i}$ le coefficient de convection du mur intérieur avec une valeur de $7.7 W/(m^2K)$.

En posant $R = \left(\frac{P}{2} + \frac{h_c \Delta x}{\lambda} + 1 \right)^{-1}$, T_3^* s'écrit :

$$T_3^* = \left(T_2^* + \frac{P}{2} T_3 + \frac{h_{c,i} \Delta x}{\lambda} T_i \right) R \quad [2.36]$$

En remplaçant l'équation [36] dans [34], T_2^* s'écrit :

$$T_2^* = \left(PT_2 + T_1^* + \frac{P}{2} T_3 R + \frac{h_{c,i} \Delta x}{\lambda} T_i R \right) \frac{1}{P + 2 - R} \quad [2.37]$$

En intégrant la valeur de T_2^* équation [37] dans l'équation [32], le bilan énergétique s'exprime alors :

$$\begin{aligned} \varepsilon \sigma T_1^{*4} + T_1^* \left(h_{c,o} + \frac{\lambda}{\Delta x} \left(1 - \frac{1}{P + 2 - R} \right) + \frac{c_w \rho_w \Delta x}{2 \Delta t} \right) \\ = Q_{cl,net}^{abs} + Q_{gl,net}^{abs} + h_{c,o} T_{air} + \frac{c_w \rho_w \Delta x}{2 \Delta t} T_1 \\ + \frac{\lambda}{\Delta x (P + 2 - R)} \left(PT_2 + \frac{P}{2} T_3 R + \frac{h_{c,i} \Delta x}{\lambda} T_i R \right) \end{aligned} \quad [2.38]$$

La méthode de Newton permet de résoudre l'équation [38] et par suite T_3^* et T_2^* seront déduits des équations [36] et [37]. La méthode de Newton est une approximation précise d'une racine d'une fonction réelle $f(x) = 0$. L'algorithme de cette méthode consiste à trouver la solution x_k à partir de la suite en partant d'un point x_0 proche de la racine:

$$x_{k+1} = x_k + \frac{f(x_k)}{f'(x_{k+1})}$$

La suite x_k va converger vers α racine de la solution.

2.2.9 Modèle des gaz et des particules

ENVI-met permet aussi de simuler la dispersion des gaz et des particules dans l'atmosphère. Selon (Bruse, 2007), la modélisation de la dispersion est basée sur l'équation standard d'advection-diffusion :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi}{\partial t} + u \frac{\partial \chi}{\partial x} + v \frac{\partial \chi}{\partial y} + w \frac{\partial \chi}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \chi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \chi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \chi}{\partial z} \right) + Q_\chi(x, y, z) + S_\chi(x, y, z) \end{aligned} \quad [2.39]$$

Avec χ désigne la composante de la particule étudiée et est exprimée en $(mg.kg^{-1})$, Q_χ et S_χ sont les termes sources et puits.

ENVI-met permet de modéliser différentes types de sources :

- Source ponctuelle $q_p(mgs^{-1})$: $q^* = q_p$
- Source ligne $q_l(mgs^{-1}.m^{-1})$: $q^* = q_l.\Delta x, y$
- Source surfacique $q_a(mgs^{-1}.m^{-2})$: $q^* = q_a.\Delta x \Delta y$
- Source volumique $q_v(mgs^{-1}.m^{-3})$: $q^* = q_a.\Delta x \Delta y \Delta z$

Le terme source Q_χ s'écrit alors :

$$Q_\chi = \frac{q^*}{\Delta x \Delta y \Delta z. \rho} \quad [2.40]$$

Pour le terme S_χ , Huttner (Huttner, 2012) indique qu'il dépend de trois composantes : la sédimentation par gravité et déposition sur les surfaces qui est applicable pour les particules et non pas les gaz, la déposition sur les feuilles des plantes, et les transformations chimiques.

2.2.10 Modèles des fontaines et des sprays d'eau

L'effet de refroidissement des fontaines et des brumisateurs d'eau (sprays) est créé par l'évaporation des gouttelettes d'eau injectées dans l'air. L'énergie nécessaire pour cette

évaporation est prise dans l'air environnant ces sources, provoquant une diminution locale de la température ambiante. Les gouttelettes d'eau qui ne sont pas évaporées sont transportées avec le vent et subissent un « processus de dépôt » (sedimentation process en anglais). En réalité, une gouttelette de diamètre initial D , verra son diamètre diminuer au cours de l'évaporation jusqu'à ce que la gouttelette disparaisse. Mais cette approche réaliste et précise, nécessite des énormes ressources de calculs et un temps de calcul non acceptable dans la modélisation d'un petit sous-modèle d'ENVI-met. Pour simplifier le processus de la modélisation de l'évaporation des gouttelettes, la taille des gouttelettes ne change pas dans ENVI-met, et garde un diamètre constant, mais la quantité des gouttelettes dans un volume d'air est ajustée pour prendre en compte la quantité d'eau évaporé (Bruse, 2017).

On définit N_D le nombre de gouttelettes dans un volume d'air. Ce paramètre exprime la perte d'eau par une réduction du nombre de gouttelettes et s'exprime par :

$$N_D = \frac{w_D}{0.001 \cdot m_D} \quad [2.41]$$

Où w_D [g(eau)/ m³(air)] est la variable relative aux jets d'eau qui représente la quantité d'eau liquide sous forme de gouttelettes dans un volume d'air donné. m_D est la masse d'une gouttelette d'eau en (mg) qui dépend du rayon r_D (μm) de la gouttelette :

$$m_D = \rho_{eau} \cdot V_D = \rho_{eau} \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r_D^3 \quad [2.42]$$

La distribution spatiale et temporelle de la variable w_D est gérée par les processus d'advection et de diffusion plus le changement de la pulvérisation due à l'évaporation. Nous supposons que les gouttelettes sont de petites tailles, ainsi elles suivent les lignes de flux d'air. En plus du processus du transport, des sources locales ainsi que des puits locaux sont intégrés pour mettre en œuvre le processus d'évaporation et le changement de la concentration des gouttelettes en raison du processus de dépôt. L'équation modélisant la concentration des gouttelettes d'eau s'écrit :

$$\frac{\partial w_D}{\partial t} + u_i \frac{\partial w_D}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_q \frac{\partial w_D}{\partial x_i} \right) + Q_{wD}(x, y, z) + S_{wD}(x, y, z) \quad [2.43]$$

Nous rappelons que $x_i = (x, y, z)$ et $u_i = (u, v, w)$. La concentration w_D est exprimée en (μg/kg).

En général, le calcul de la température de la gouttelette T_D se fait à l'aide de l'équation de la conservation d'énergie :

$$L(T_D) \frac{\partial w_D}{\partial t} = A \cdot K(T_D - T_A) + Q_{kw} + A \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot (T_D^4 - T_{env}^4) \quad [2.44]$$

Où A représente la surface de la gouttelette $A = 4\pi r_D^2$. K est le coefficient d'échange de la chaleur sensible entre la gouttelette d'eau et l'air. T_{env}^4 correspond aux flux radiatifs de grande longueur d'ondes de l'environnement. Dans le modèle d'ENVI-met, l'équation du bilan

énergétique n'est pas résolue pour calculer T_D du fait de la complexité du problème. Selon (Bruse, 2017), la température de la gouttelette s'approche rapidement de la température humide de l'air (wet bulb). Pour cela, la température T_D est estimée comme étant la température humide de l'air.

Le changement de la masse par seconde d'une gouttelette d'eau est donnée par :

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} = -4\pi r \cdot f_v \cdot D_v \cdot \frac{\Delta e}{\left(1 - \frac{\bar{e}}{p}\right) \cdot R_v \cdot \bar{T}} \quad [2.45]$$

Avec R_v est la constante de gaz de la vapeur d'eau et égal à $461.5 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. $\bar{T}$ est la moyenne entre la température de la gouttelette et l'air $\bar{T} = 0.5(T_D - T_a)$, et $\bar{e}$ est la moyenne de la pression de vapeur entre la gouttelette et l'air $\bar{e} = 0.5(e_{sat}(T_D) + e_a)$ Δe est la différence de la pression de vapeur entre la surface de la gouttelette et l'air environnant.

$$\Delta e = e_{sat}(T_D) - e_a \quad [2.46]$$

La diffusivité D_v de la vapeur d'eau dans l'air est donnée par :

$$D_v = 2.4995 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T_a}{292.88} \right)^{2.334} \quad [2.47]$$

f_v est le facteur de ventilation pour inclure le mouvement de l'air autour de la gouttelette. (Bruse, 2017) cite une forme simplifié de f_v :

$$f_v = \begin{cases} 0.78 + 0.308N & \text{pour } N > 1.4 \\ 1 + 0.108N^2 & \text{pour } N \leq 1.4 \end{cases}$$

(Bruse, 2017) indique que plus le diamètre des gouttelettes est faible, plus le refroidissement évaporatif est efficace. Il est préférable que le diamètre des gouttelettes soit inférieur à $100\mu\text{m}$ et supérieur ou égal à $10\mu\text{m}$.

2.2.11 Calcul de la température moyenne radiante T_{mrt}

ENVI-met permet aussi de calculer la température moyenne radiante qui est un indice important du confort thermique. La T_{mrt} est calculé pour un corps cylindrique :

$$T_{mrt} = \left(\frac{1}{\sigma} \left(Q_{gl,in} + \frac{a_K}{\varepsilon} \cdot (Q_{cl-diff,in} + Q_{cl-dir,in}) \right) \right)^{0.25} \quad [2.48]$$

Le coefficient d'émission du corps humain ε est fixé à 0.97 et a_K à 0.7 qui est le coefficient d'absorption des courtes longueurs d'ondes par le corps. Le flux des radiations à grandes longueurs d'onde est supposé venir à 50 % des surfaces du sol et 50 % venant du ciel, des bâtiments et des végétations :

$$Q_{gl,in} = 0.5. \left(v_{f_{veg}} \overline{\varepsilon_{veg}} \sigma \overline{T_{veg}}^4 + v_{f_{bldg}} \overline{\varepsilon_{bldg}} \sigma \overline{T_{bldg}}^4 + v_{f_{ciel}} Q_{gl,ciel} + v_{f_{bldg}} (1 - \overline{\sigma_{bldg}}) Q_{gl,ciel} \right) + 0.5. (\sigma \varepsilon_{ground} T_{ground}^4) \quad [2.49]$$

Le facteur v_f désigne le pourcentage du ciel / végétation / bâtiments observé du point de la grille.

Le flux diffus du rayonnement à courtes longueurs d'ondes est calculé par :

$$Q_{cl,-diff,in} = 0.5. \left(v_{f_{bldg}} \overline{rf_{bldg}} Q_{cl-dir,ciel} + v_{f_{ciel}} Q_{cl-diff,ciel} \right) + 0.5. (rf_{sol} Q_{cl,sol}) \quad [2.50]$$

rf est la réflectivité de la surface de la cellule de la grille et $Q_{cl,sol}$ est le flux total des rayonnements à courtes longueurs d'ondes sur cette cellule.

Le flux $Q_{cl-dir,in}$ sur une cellule de la grille déterminé par :

$$Q_{cl-dir,in} = p_f \cdot Q_{cl-dir} \quad [2.51]$$

p_f étant le facteur de projection qui dépend de l'angle d'azimut Φ avec :

$$p_f = 0.42. \cos\Phi + 0.043. \sin\Phi \quad [2.52]$$

2.3 Méthodes numériques

La résolution des équations différentielles des modèles ci-dessus se fait en utilisant la méthode des différences finies à un intervalle de temps Δt :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \rightarrow \frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t}$$

Pour les équations mixtes d'advection-diffusion, la méthode des directions alternées « ADI » (Alternating Direction Implicit) est adopté. Cette méthode implicite utilisée pour la résolution des équations différentielles multidirectionnelles (EDP équations aux dérivées partielles), se base sur une résolution itérative présentant une meilleure stabilité que les méthodes explicites. Cette méthode consiste à diviser l'équation différentielle originale en n équations, dont chacune

permet de calculer implicitement les processus d'échange dans l'une des n dimensions de l'espace considéré. Pour n=3, la méthode ADI s'exprime par :

$$\frac{\phi^* - \phi^n}{\Delta t} = \langle \partial \phi^* \rangle_x + \langle \partial \phi^n \rangle_y + \langle \partial \phi^n \rangle_z + f\phi^* + R_\phi \quad [2.53 \text{ a}]$$

$$\frac{\phi^{**} - \phi^*}{\Delta t} = \langle \partial \phi^{**} \rangle_y + \langle \partial \phi^n \rangle_z \quad [2.53 \text{ b}]$$

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^{**}}{\Delta t} = \langle \partial \phi^{n+1} \rangle_z - \langle \partial \phi^n \rangle_z \quad [2.53 \text{ c}]$$

Où ϕ est la variable considérée dans le calcul, n correspond au pas du temps actuel, n+1 désigne le pas du temps suivant. ϕ^* et ϕ^{**} sont les solutions provisoires (interim solutions) de la méthode ADI.

L'équation implicite de différence pour une direction i de l'espace s'écrit :

$$\langle \partial \phi^{n+1} \rangle_i = \frac{\phi_a^{n+1} - \phi_a^n}{\Delta t} = A_a^i \phi_{a-1}^{n+1} + B_a^i \phi_a^{n+1} + C_a^i \phi_{a+1}^{n+1} \quad [2.54]$$

Avec a=i pour i=x, a=j pour i=y et a=k pour i=z. (Huttner, 2012) cite dans sa thèse en détails le calcul des coefficients A_a^i , B_a^i , C_a^i . Il explique de même en détail la méthode complète d'ADI pour le calcul des variables en utilisant des écritures matricielles.

Pour résoudre les équations de Navier-Stokes, l'équation de Poisson est utilisée pour calculer le champ de pression :

$$\nabla^2 p = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla u^{aux} \quad [2.55]$$

u^{aux} est le champ préliminaire de vitesse calculé sans aucune correction de pression. La méthode « SOR » (Simultaneous Over-Relaxation), est utilisé (Patrinos & Kistler, 1977) pour calculer par itération le nouveau champ de vitesse u^* :

$$u^* = u^{aux} - \frac{\delta t}{\rho} \nabla p \quad [2.56]$$

La méthode SOR est une méthode itérative initialisée par un choix d'une valeur initiale arbitraire, et où chaque itération consiste à déterminer une variable x_{n+1} à l'aide de x_n .

Pour le calcul de la turbulence, (Huttner, 2012) indique que le maximum pas du temps dépend du champ de vitesse du vent (u, v, w) et des dimensions des cellules de la grille :

$$\Delta t_{max} = \frac{0.8}{|u/\Delta x|_{max} + |v/\Delta y|_{max} + |w/\Delta z|_{max}} \quad [2.57]$$

Mais dans certaines conditions, la valeur de Δt_{max} atteint des valeurs très grandes et conduit ainsi à une instabilité de calcul numérique. Pour cela une valeur arbitraire de Δt_{max} est définie : $\Delta t = 0.3$

2.4 Avantages identifiés de la version 4.0 d'ENVI-met

La version 4.0 d'ENVI-met présente plusieurs avantages et des améliorations par rapport aux versions précédentes.

Comme déjà évoqué dans le paragraphe (2.2.8), un nouveau modèle (modèle des 3 nœuds) a été développé pour le calcul de la température des façades et des toitures en régime transitoire. Ce modèle prend en considération toutes les propriétés physiques du matériau de construction des murs et des toits.

D'autre part, la version 4.0 présente un modèle complet 3D alors que les versions précédentes utilisent un modèle 2.5D c'est-à-dire pour chaque cellule de la grille on peut fixer seulement les valeurs des couches inférieures et supérieures d'un bâtiment ou d'une plante. Ainsi l'élément ou le bâtiment étudié sera présenté avec plus de précision ; par exemple chaque façade peut avoir ses propres matériaux de constructions et l'architecture des bâtiments sera plus proche de la réalité, en intégrant les balcons et les fenêtres. Le modèle tridimensionnel des plantes est aussi intégré à la place des simples plantes colonnes.

ENVI-met 4.0 offre aussi une nouvelle fonction appelé « Simple paroi » ou « Single Wall » en anglais. Cette fonction permet d'ajouter dans la modélisation un mur simple ou un obstacle qui ne font pas partie des bâtiments du modèle. Ces murs ont les mêmes propriétés physiques des murs ordinaires, transmettent des rayonnements et font des obstacles qui bloquent le vent. La principale différence est que ces murs sont très fins et non isolés, ils présentent ainsi une distribution homogène de température. Le bilan énergétique s'écrit :

$$Q_{cl,net}^{abs} + Q_{gl,net}^{abs} - 2\varepsilon\sigma T_w^{*4} + (4 + 4v_1)(T_{air,1} - T_w^*) + (4 + 4v_2)(T_{air,2} - T_w^*) = \frac{c_{wall}\rho_w\Delta x}{\Delta t}(T_w^* - T_w) \quad [2.58]$$

T_w^* est la température du simple mur pour le suivant pas du temps. v_1 , v_2 , $T_{air,1}$ et $T_{air,2}$ sont respectivement les vitesses du vent et les températures de part et d'autre du mur simplifié. La méthode de Newton est utilisée pour résoudre l'équation [2.58].

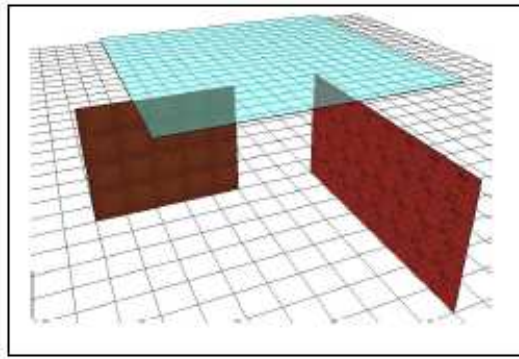


Figure 2.5 : Exemple des simples murs dans le modèle ENVI-met (Huttner, 2012)

Enfin, ENVI-met version 4.0 permet de forcer les valeurs des conditions aux limites du modèle. L'importance de ce forçage est la possibilité de comparer les résultats des simulations numériques avec des données météorologiques mesurées. (Huttner, 2012) indique que les paramètres qui peuvent être forcés sont : la vitesse horizontale du vent, la direction du vent, la température potentielle de l'air, l'humidité spécifique, les flux radiatifs à courtes longueurs d'ondes directs et diffus, les rayonnements à grandes longueurs d'ondes entrant, la couverture nuageuse et la concentration des particules et des gaz.

La Figure 2.6 montre le schéma de l'implémentation du forçage des variables climatiques dans ENVI-met.

Pour les variables atmosphériques ayant un profil vertical comme la vitesse et la direction du vent, la température et l'humidité spécifique, il suffit de préciser les valeurs au sol ($z = 0$) et au limite supérieure ($z = 2500$ m). Ensuite ENVI-met permet par extrapolation de déterminer les valeurs des variables à différents hauteurs de la grille.

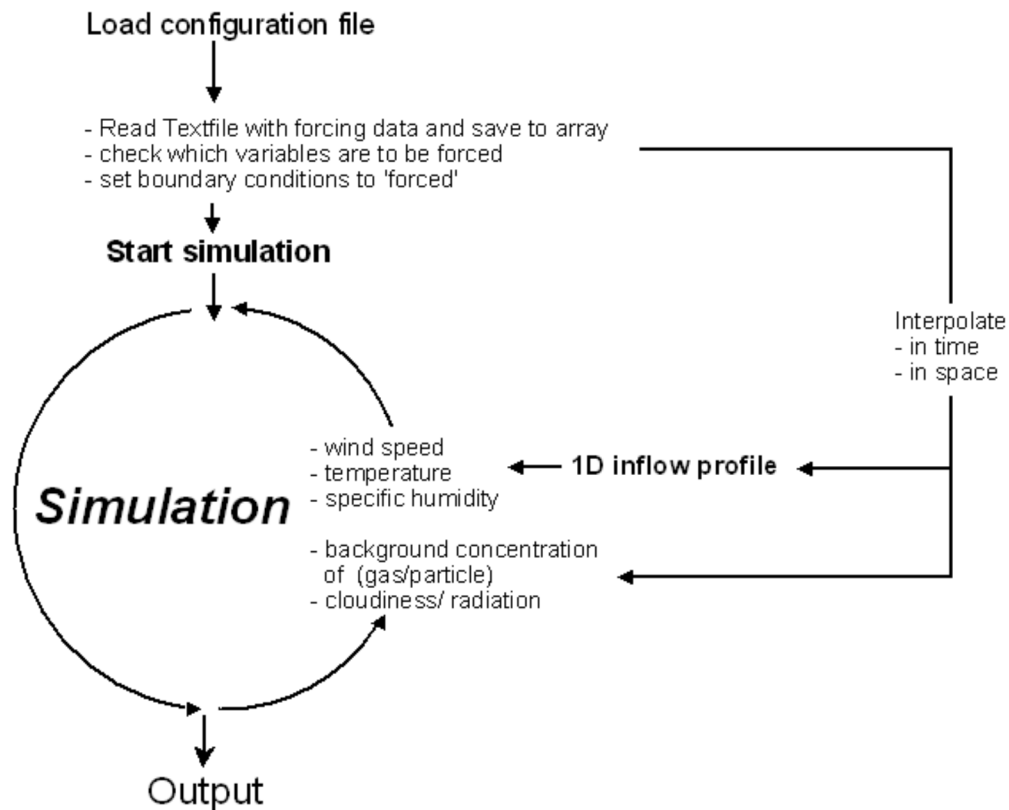


Figure 2.6 : Schéma montrant l'implémentation du forçage des variables climatiques dans ENVI-met
(Huttner, 2012)

2.5 Recherches sur le microclimat urbain utilisant ENVI-met

Le logiciel ENVI-met a été utilisé par de nombreux chercheurs pour étudier le microclimat urbain et les effets des îlots de chaleur urbains. Ce paragraphe cite les travaux des principaux utilisateurs.

En 2007, (Emmanuel, et al., 2007) ont utilisé ENVI-met pour simuler les effets de la forme urbaine sur la température surfacique, la température de l'air et le confort thermique extérieur en utilisant l'indice PET. Ils ont montré qu'une stratégie qui conduit à une meilleure température de l'air ne provoque pas nécessairement un confort thermique meilleur. D'autre part, ceux-ci ont vérifié que l'augmentation du rapport H/W de la hauteur des bâtiments sur la largeur des rues, provoque une diminution significative de la température moyenne radiante et du PET produisant une amélioration du confort thermique.

(Thapar & Yannas, 2008) ont étudié le microclimat urbain à Dubai en comparant l'effet de la forme bâtie de « l'ancienne Dubai » (Deira et Bastakia) et celle de « Nouvelle Dubai » (Dubai Marina). ENVI-met est l'outil de simulation que Thapar et al ont utilisé, et les données météorologiques utilisées sont celles de la période la plus chaude de l'année 2007, au mois de juillet. Leurs travaux de simulation ont permis d'extraire les variations de température et de

vitesse de vent et les comparer aux données mesurées en tenant compte de plusieurs variantes comme la forme bâtie, les végétations et les surface d'eau.



Figure 2.7 : Image de la région Deira (à gauche) et Bastakia (à droite) (Thapar & Yannas, 2008) : Source Google Earth



Figure 2.8: Image du Nouvelle Dubai (Marina & greens) (Thapar & Yannas, 2008)

En 2008, (Huttner, et al., 2008) ont utilisé ENVI-met pour étudier l'effet du réchauffement microclimatique sur les villes d'Europe centrale et mettre en évidence les stratégies proposées par les urbanistes pour lutter contre ce problème. Ils ont montré que les surfaces végétalisées jouent un rôle important dans l'amélioration du confort thermique; les plantes conduisent à la diminution de la température ambiante et des rayonnements réfléchies.

(Hedquist, et al., 2009) ont étudié le phénomène d'ICU nocturne à CBD (central business district) dans la ville Phoenix en Arizona, à l'aide d'ENVI-met et d'un outil CFD. Les résultats montrent l'effet de la hauteur des bâtiments et des ombrages sur les températures surfaciques du quartier étudié.

L'analyse de la performance énergétique des bâtiments dans des différentes conditions climatiques a été réalisée en 2012 par (Yang, et al., 2012) en utilisant les logiciels « Energy Plus » et « ENVI-met ». Les résultats des simulations permettent de quantifier l'effet des différents facteurs microclimatiques sur le bilan énergétique du bâtiment.

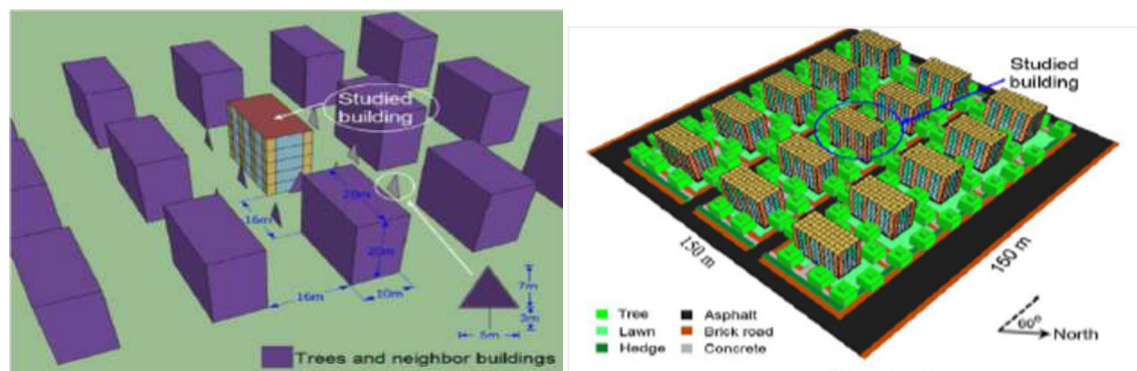


Figure 2.9: Modèle Energy Plus et Modèle ENVI-met des travaux de (Yang, et al., 2012)

ENVI-met a été aussi l'outil de simulation des travaux de (Bennet & Ewenz, 2013) en 2013 montrant l'influence de la hauteur des bâtiments sur le phénomène d'ICU. Ils ont observé que lorsque la hauteur des bâtiments atteint la largeur des rues, la température au niveau de la rue cesse d'augmenter. De même, Bennet et Ewenz ont indiqué que l'ombrage des surfaces bâties et le stockage de chaleur dans les murs affectent la température atmosphérique.

En 2014, (Taleghani, et al., 2014) ont réalisé des simulations microclimatiques d'un campus universitaire à Portland aux Etats-Unis. Les simulations extraites par ENVI-met indiquent que le modèle avec végétation contribue à une diminution de 1.6 °C de la température de l'air alors que l'intégration du bassin d'eau provoque une diminution de 1.1 °C. Le changement de l'albédo des pavements de 0.37 à 0.91 permet de diminuer la température de l'air de 1.3 °C mais contribue d'autre part à une augmentation de 2.9 °C de la température moyenne radiante.

(Dardel, 2015) a aussi utilisé ENVI-met pour étudier le phénomène des îlots de chaleur dans un climat chaud et humide. Le cas choisi est la ville Fortaleza au Brésil. D'après plusieurs recherches antérieures, le rapport H/W qui optimise la vitesse du vent dans les rues est de l'ordre 1.5. Selon Dardel, la valeur optimale du rapport H/W peut être plus grande que 1.5 si on s'intéresse à l'indice du confort thermique PMV. Ses travaux montrent que le PMV a diminué de 3.3 dans une zone sans végétation à une valeur de 2.4 dans une zone plantée d'herbes et arbres.

Une autre étude numérique à l'aide d'ENVI-met a été effectuée par (Peron, et al., 2015) pour analyser l'effet d'ICU à Venise Italie. L'objectif de ce travail était d'analyser l'effet des mesures d'atténuations d'ICU sur la température ambiante. Une diminution de la température T_a d'environ 4 °C est observé en utilisant des pavements avec grand albédo et perméabilité et les toits végétalisés à la place des pavements ordinaires (asphalte et béton) et des toits traditionnels.

Le phénomène de l'ICU ne se limite pas au climat chaud, certaines études relatives au climat froid ont été réalisées. Récemment en 2016, (Wang, et al., 2016) a étudié l'ICU à Toronto au Canada en se basant sur la modélisation par ENVI-met. L'analyse de quelques mesures d'atténuations d'ICU a été effectuée dans trois différentes zones de Toronto. En modifiant respectivement l'albédo des pavements de 0.2 à 0.4 et des toitures de 0.3 à 0.7 et en ajoutant 10 % de surfaces végétalisées, l'indice PET diminue en moyenne de 1.8 °C et atteint une diminution maximale de 4.6 °C.

Enfin, le travail de (Maleki & Mahdavi, 2016) qui ont étudié le microclimat urbain à Vienne en réalisant des simulations par ENVI-met, a montré que l'augmentation des surfaces végétalisées et des matériaux perméables conduisent dans les conditions de l'étude à une diminution de la température de l'air de 3 °C.

La fiabilité et la validation des résultats d'ENVI-met ont été vérifiées par plusieurs études numériques en comparant les résultats aux données mesurées. Citons, entre autres, les études (Lahme & Bruse, 2002), (Ozkeresteci, et al., 2003), (Yu & Hien, 2006), (Monam & Ruckert, 2013), (Ghaffarianhoseini, et al., 2015).

Chapitre 3 Simulation microclimatique de l'ICU dans un quartier de la région de Dora à Beyrouth

Le tissu urbain beyrouthin est très hétérogène et la densité de ce tissu varie suivant les quartiers. L'intérêt de notre recherche consiste à quantifier l'écart produit par les stratégies d'atténuation d'ICU sur les paramètres microclimatiques d'un quartier, et non pas des comparaisons entre les quartiers. On s'intéresse à des quartiers existants compacts qui nécessitent une réhabilitation. La région de Dora est choisie dans notre étude pour étudier la modélisation de l'ICU dans le cas libanais. Cette ville est caractérisée par une densité urbaine élevée avec un faible pourcentage de surfaces végétalisées. On note l'absence de fontaines et de plans d'eau dans les espaces publics. La construction des bâtiments continue à l'heure actuelle, d'une façon aléatoire sans aucune norme ou règlement qui prennent en considération l'effet de l'urbanisation sur l'environnement ou le microclimat urbain. En résumé, la région a actuellement besoin de dispositifs de rafraîchissement urbain pour atténuer les impacts négatifs causés par les îlots de chaleur.

3.1 Description du site :

Le site étudié est un quartier de la région « Dora » qui est une banlieue au Nord-Est de la capitale Beyrouth, Figure 3.1. « Dora » est une cité urbaine très dense et comporte des zones résidentielles commerciales et industrielles, des entreprises, des bureaux, l'hôpital «Saint Joseph des Sœurs de la Croix » et des institutions religieuses. Dans cette région, le trafic est très intense dans les rues principales ainsi que dans les rues secondaires.

Les dimensions du quartier étudié sont de 210 m x 350 m, ce quartier ayant une morphologie qui se répète dans la plupart de la région, ce qui explique le choix des dimensions du quartier étudié. Des dimensions plus grandes nécessiteraient un temps de calcul très élevé en simulation. Ce quartier comprend une station-service de hauteur 5 m, le centre médico-chirurgical de l'hôpital Saint Joseph et des bâtiments dont la hauteur varie entre 15 m (bâtiments à 5 étages) et 36 m (bâtiments à 12 étages). On retrouve seulement 3 immeubles dont la hauteur est inférieure ou égale à 10 m.



Figure 3.1 : Image du quartier étudié à Dora Beyrouth, Google earth.

Après une visite du site étudié, il est à noter une absence presque totale de surfaces végétalisées et d'arbres dans cette zone. La Figure 3.2 montre la structure et la hauteur des bâtiments qui sont très proches les uns des autres, certains étant mitoyens. L'âge de ces bâtiments dépasse les 25 ans selon les habitants du quartier. Les murs extérieurs sont constitués de blocs creux de couleur grise alors que les toitures sont formées de dalles en béton de couleur grise. L'albédo des façades et des toits des bâtiments est faible. Les routes sont toutes en asphalte. Face à certains immeubles, on trouve des trottoirs en béton.

Le quartier étudié est formé de 50 bâtiments et la répartition des surfaces de ce quartier est illustrée dans le tableau 3.1.

Pour décrire la forme urbaine et architecturale du quartier choisi, on définit la densité bâtie qui désigne un rapport sans dimension entre la surface totale des planchers et la surface au sol. Cette densité notée DB, s'exprime alors :

$$DB = \frac{\text{Emprise au sol du bâti} \times \text{nombre moyen de niveaux}}{\text{Surface du quartier}}$$

La valeur du DB correspondante au quartier choisi est de 2.6 montrant une forte densité bâtie au niveau du quartier étudié.

Tableau 3.1 : Pourcentage des surfaces couvrant le quartier étudié

Cas étudié de la région Dora	Bâtiment	Route en asphalte	Trottoirs en béton	Surface végétalisée	Total
Aire (m2)	24875	46228	2175	222	73500
Pourcentage (%)	33.84	62.9	2.96	0.3	100

La largeur des rues secondaires séparant deux bâtiments voisins n'est pas grande et ne dépasse pas les 5 mètres dans certains cas. Dans ces rues étroites observées au centre du quartier, le prospect qui est le rapport entre la hauteur moyenne des bâtiments d'une rue et sa largeur, est

de l'ordre de 4.4. Cette valeur élevée de prospect peut conduire à un piégeage radiatif permettant un réchauffement de la surface qui compose la rue et une augmentation de l'intensité d'ICU.

La morphologie du quartier choisi présente alors une importance puisqu'elle permet d'étudier le potentiel rafraichissant des dispositifs d'atténuation d'ICU sur une zone à densité bâtie élevée, sur des rues à prospect élevé, sur les routes principales et sur les espaces ouverts qu'on observe devant certains bâtiments comme les parkings et les espaces publics.



Figure 3.2: Photos du quartier à Dora montrant les bâtiments et les routes.

3.2 Simulation du microclimat du quartier Dora avec ENVI-met

Comme défini dans ENVI-met, la modélisation géométrique de cette zone est réalisée à la main par la saisie de pixels (x, y et z); la maille définie est de 105x140x30 pixels dont chaque pixel correspond à une résolution réduite 2m x 2.5m x 2.5 m ($dx=2m$, $dy=2.5m$ et $dz=2.5m$). La Figure 3.3 montre le modèle 2D créé à l'aide d'ENVI-met et les différents récepteurs (points rouges) qui sont placés dans plusieurs endroits de la zone étudiée. Le modèle 3D et les récepteurs (points oranges) sont représentés dans la Figure 3.4. Les récepteurs sont des points spécifiques pour lesquels des fichiers de données individuelles sont générés dans ENVI-met. Ces fichiers correspondent à des paramètres calculés relatifs à ces points spécifiques.

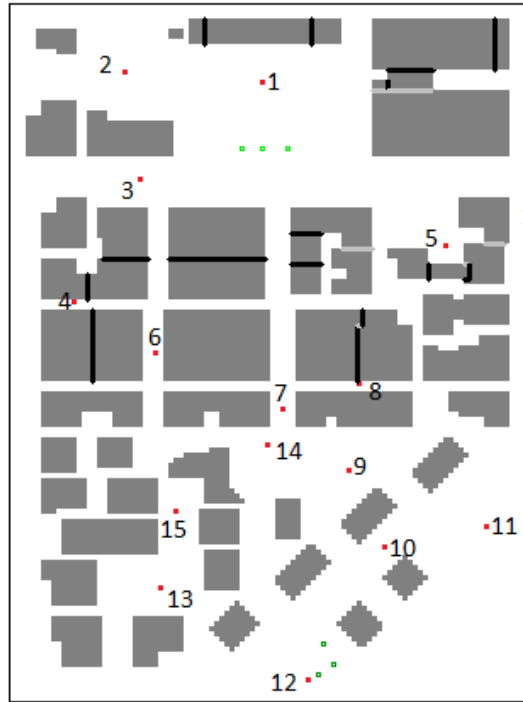


Figure 3.3: Le modèle 2D crée à l'aide d'ENVI-met. Les points rouges représentent les récepteurs installés dans le quartier étudié.

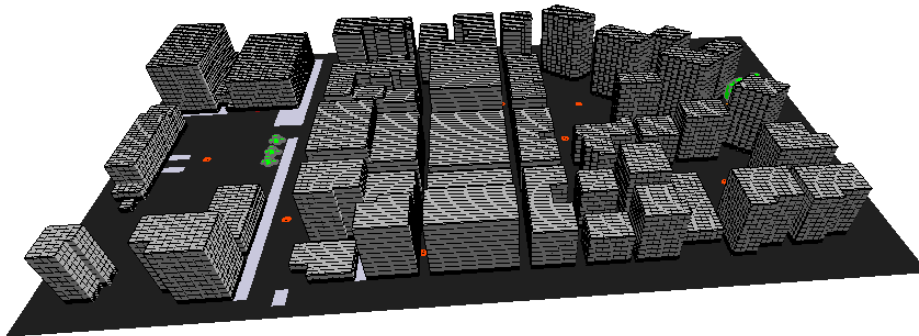


Figure 3.4: Le modèle 3D crée à l'aide d'ENVI-met; les blocs gris représentent les bâtiments, la surface noire représente les routes en asphaltes, la couleur bleu Claire indique les pavements de béton alors que les cercles oranges sont les récepteurs installés.

3.3 Données d'entrée, conditions initiales et aux limites du modèle

La modélisation et la simulation microclimatique ont été réalisées pour une journée chaude de l'été et pour une période de 24 heures. Le temps de départ choisi pour le calcul est 7 :00 am la journée 9 juillet. Comme il n'y pas des stations météorologiques dans la région Dora ou aux alentours de cette région, le choix des conditions initiales est basé sur les données disponibles de la station « Beyrouth Golf, année 2015 » et de la station « AUB, années 1996 et 1997 ». Pour la vitesse du vent, nous considérons une vitesse de 1 m/s à une hauteur de 10 m. En effet la valeur de la vitesse du vent est variable dans la saison d'été et atteint une valeur minimale de 1m/s selon les données des deux stations dans certaines journées. D'où le choix de cette valeur dans notre calcul puisque cette valeur peut être souvent détecté en été dans une morphologie

comme celle de Dora à cause de la rugosité et la densité urbaine élevée qui conduisent à des faibles vitesses de vent. On s'intéresse aussi à étudier le cas où la vitesse du vent est faible provoquant des effets d'ICU plus importants. La direction du vent est maintenue constante à tous les niveaux formant un angle de 245° avec la direction Nord. Cette valeur correspond à la direction moyenne du vent observé à 7 :00 dans les 2 stations météorologiques « AUB » et « Golf ». Une interpolation logarithmique est appliquée pour le calcul du profil vertical du vent. La fonction « forçage simple » d'ENVI-met a été adoptée pour forcer le modèle à un profil de température et d'humidité relative durant l'intervalle de simulation. Le graphe de la Figure 3.5 indique les conditions aux limites de la température et de l'humidité relative forcées pour la journée 9 Juillet. Comme nous ne disposons pas de données météo issues d'une station météorologique proche du quartier Dora, les valeurs forcées sont extraites d'un sous-modèle simulé avec ENVI-met (encadrement rouge, Figure 3.6) et dont la température initiale est 26.9°C et l'humidité relative 65 % (valeurs moyennes des deux stations Golf et AUB). En effet, la valeur moyenne de T_a et R_h aux alentours des bâtiments pour chaque heure représente les valeurs forcées dans le modèle du grand quartier. Cette méthode permet une précision plus élevée des conditions aux limites puisque la morphologie du quartier choisi est répétitive dans la région Dora. Pour la température initiale du sol, une valeur de 20°C est choisie à une profondeur de 2 m pour le calcul.

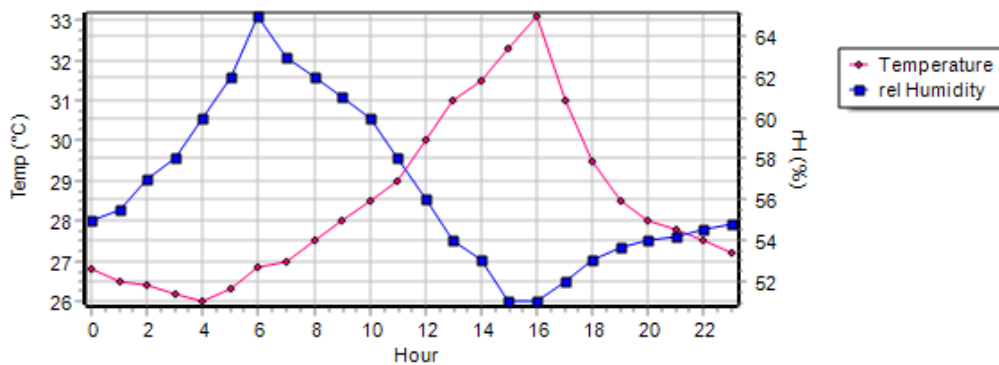


Figure 3.5: Température et humidité relative forcée dans le modèle avec ENVI-met.

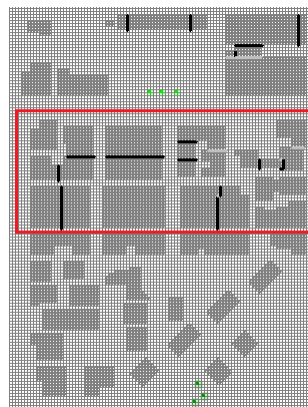


Figure 3.6: Partie du grand quartier simulé pour extraire les conditions aux limites de T_a et R_h .

Le tableau 3.2 résume l'albédo des surfaces bâties, des routes et des pavements ; ces valeurs sont déjà définies dans la base des données d'Envi-met et seront utilisées dans notre calcul. Les valeurs sont de même ordre de celles citées par (Kaloustian & Diab, 2015) sur les caractéristiques des murs et des toitures dans les bâtiments de Beyrouth qu'on a déjà présenté dans le chapitre 1. Malgré l'imprécision et l'incertitude des valeurs exactes d'albédo des surfaces du quartier étudié, notre choix paraît réaliste et compatible avec les couleurs grises des façades et des toitures observées sur le site. Le flux anthropogénique émis par les voitures et les industries n'est pas pris en considération par le logiciel ENVI-met dans la simulation. De même la chaleur émise par les systèmes de climatisation et les pompes à chaleur ne rentre pas dans le calcul.

Tableau 3.2 : Albédo des différentes surfaces du modèle simulé

Surface	Murs extérieurs	Toiture	Route en asphalte	Trottoirs en béton
Albédo	0.3	0.3	0.2	0.4

3.4 Modélisation de la végétation du quartier

La surface végétalisée totale représente 0.3 % de la surface totale du modèle, comme déjà indiqué dans le tableau 3.1. Ces surfaces sont constituées d'arbres: pins et oliviers.

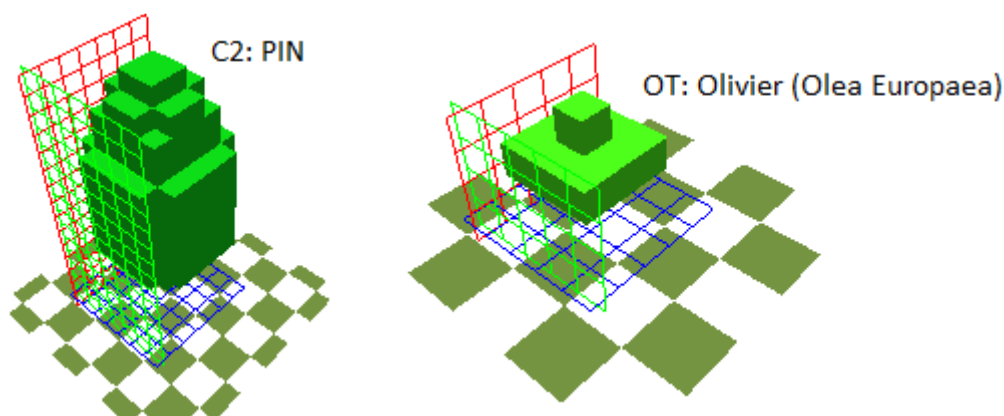


Figure 3.7: Les arbres de type « C2 » et « OT » définis dans ENVI-met.

A l'aide des modélisations 3D implémentées dans ENVI-met, les arbres de type « C2 » et « OT » sont choisis dans la simulation, Figure 3.7. Les dimensions du modèle de pin sont 7 x 7 x 15 m avec des feuilles dont l'albédo est de 0.18. L'olivier a comme dimensions 5 x 5 x 4 m avec des feuilles dont l'albédo est de 0.5.

3.5 Premiers résultats issus du modèle

Dans cette partie nous allons présenter les résultats obtenus avec des premières simulations issues d'ENVI-met. La Figure 3.9 montre la température de l'air ambiant dans trois différentes localisations du modèle étudié: récepteurs (2), (5) et (8).

Le récepteur (8) est placé sur une route étroite qui sépare deux bâtiments. La largeur de cette route ne dépasse pas les 5 m. Le récepteur (5) est installé sur une cour en béton qui se trouve devant 3 bâtiments comme indiqué sur la Figure 3.8. Alors que le récepteur (2) se trouve dans le parking du centre médical sur une surface en asphalte.

3.5.1 Température de l'air

Il apparaît clairement que la température d'air n'est pas la même pour les trois récepteurs durant au cours de la journée. Dans la zone (5) la température d'air sec est la plus faible par rapport à la température des autres zones durant le jour, alors que cette température est maximale dans la zone (2). Cette différence de température est remarquable surtout dans la période s'étalant entre 11:00 et 16:00, et atteint une valeur maximale de 1.97 °C à 14:00. A contrario, la température du récepteur (2) est plus faible que celle des récepteurs (5) et (8) durant la nuit.

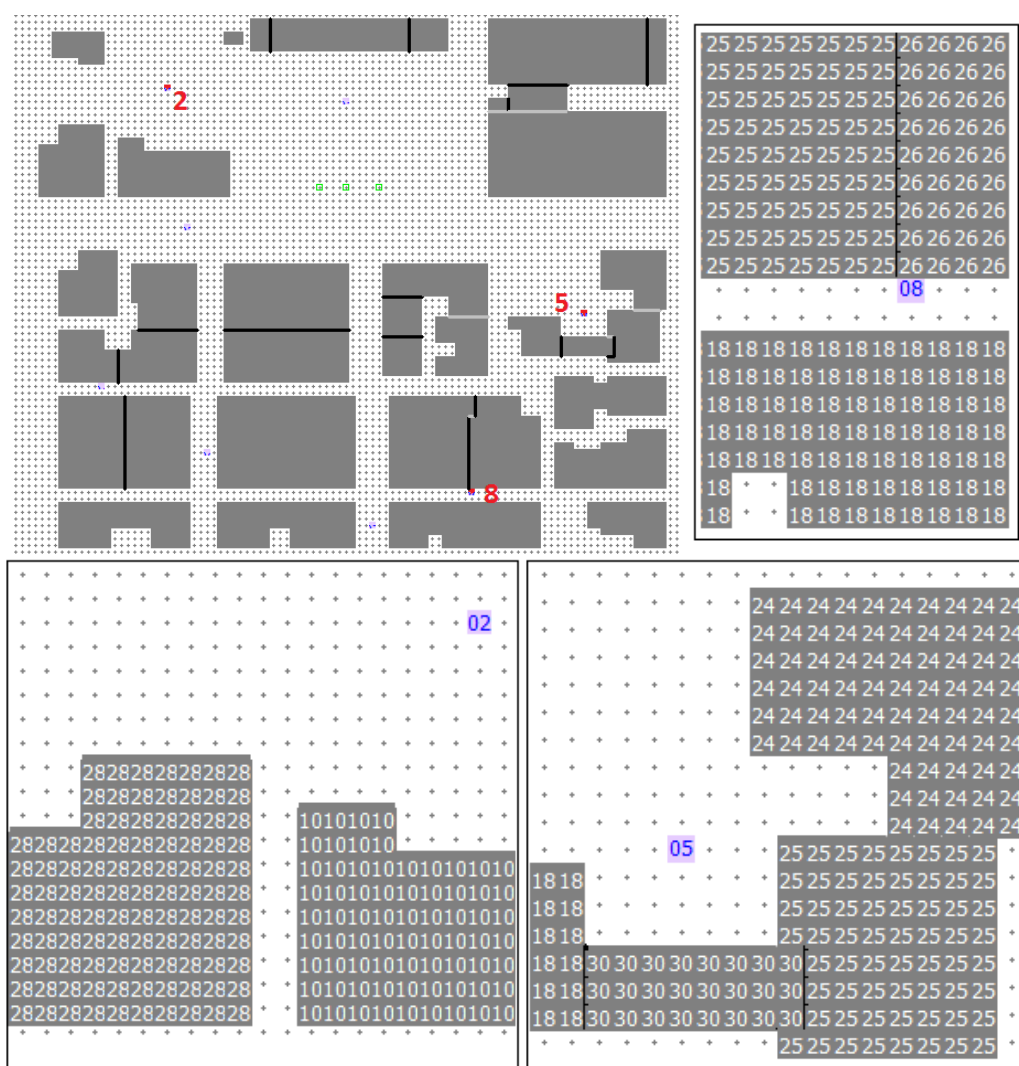


Figure 3.8: Récepteurs (2), (5) et (8) dans le modèle ENVI-met.

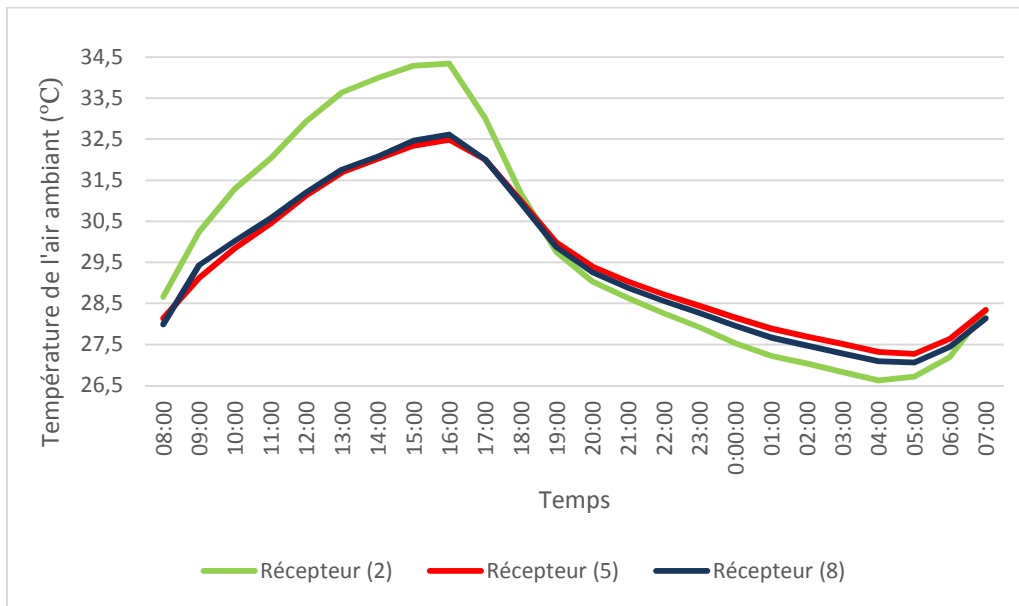


Figure 3.9 : Température de l'air ambiant à une hauteur de 1.75 m du sol pour 9 et 10 Juillet dans 3 différentes positions (2), (5) et (8).

3.5.2 Influence du facteur de vue de ciel

On définit le facteur de vue de ciel « FVC » comme étant la portion du ciel observable à partir de la surface considérée (Colombert, 2008). Ce facteur ne dépend que de la géométrie de l'espace considéré. En comparant le FVC des 3 récepteurs, Figure 3.10, on remarque que FVC de (2) est 0.736 alors que le FVC de (5) et (8) est respectivement 0.249 et 0.075.

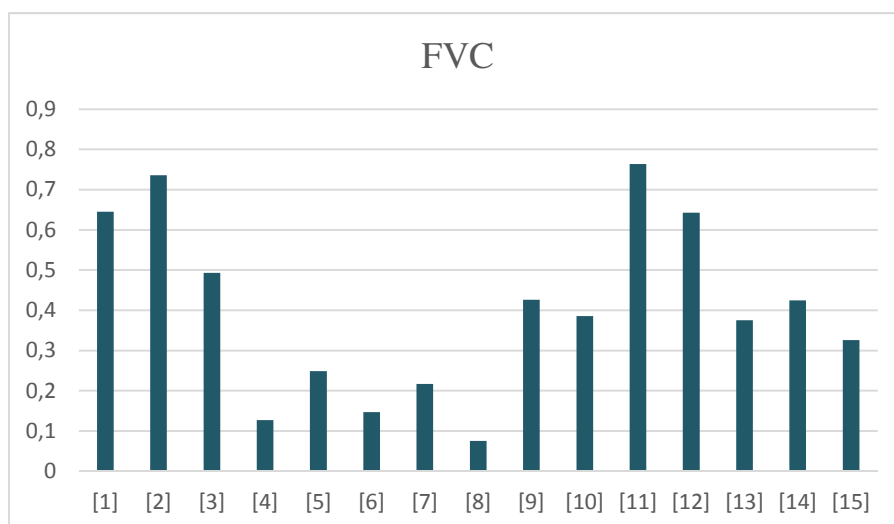


Figure 3.10 : Facteur de ciel visible pour chacun des différents récepteurs.

Le facteur de vue de ciel relatif au récepteur (2) est nettement plus grand que le FVC des deux autres récepteurs, ce qui explique clairement l'augmentation de la température dans la zone (2) durant le jour. Cette dernière est plus exposée au rayonnement solaire responsable de l'accroissement de la température d'air. D'autre part, bien que le FVC de la zone (8) soit plus petit que celui de la zone (5), il est évident que la température en (8) est légèrement plus élevée que celle de la zone (5) durant le jour. Cette différence atteint sa valeur maximale 0.31 °C à 9:00. En effet le récepteur (8) se trouve dans une route étroite limité par des hauts bâtiments ce qui empêche le dégagement de la chaleur et provoque l'augmentation de la température de l'air. En période nocturne, la chaleur au point (2) est facilement dégagée puisque le FVC est plus élevé, ce qui explique la diminution de température observée.

Les résultats obtenus par ENVI-met sur la température d'air sec montrent la cohérence du modèle qui prend en considération tous les effets physiques et thermo-aérauliques qui varient selon la position du récepteur étudié.

3.6 Comparaison des résultats obtenus par ENVI-met avec des données météo de Beyrouth

L'objectif de cette partie est de montrer l'évolution horaire de la température ambiante selon deux stations météorologiques, puis de la comparer avec des résultats obtenus par ENVI-met.

Les données utilisées sont celles des stations suivantes :

- la station « AUB » (American University of Beirut) pour deux années consécutives 1996 et 1997.
- la station de « Beyrouth golf » pour l'année 2015.

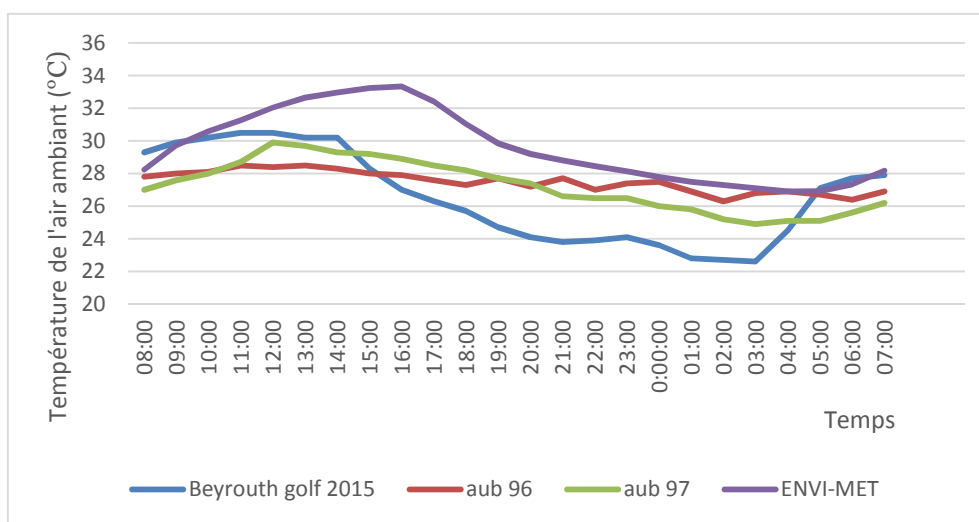


Figure 3.11 : Comparaison de la température ambiante (9 et 10 Juillet) obtenus par ENVI-met et celle des stations météorologiques « AUB » et « Beyrouth golf ».

Le but de cette comparaison est de visualiser la variation de la température ambiante d'une zone à une autre dans la ville Beyrouth ayant une morphologie urbaine différente. La Figure 3.11 montre respectivement les variations de Ta pour les 24 heures de simulations (9 et 10 Juillet) selon ENVI-met (valeur moyenne des récepteurs) et selon les deux stations météorologiques. La différence de température entre ENVI-met et la station « Beyrouth golf 2015 » atteint une valeur maximale de 6.33 °C (9 Juillet à 16:00). En comparant Ta simulée avec la température de la station AUB, on observe aussi une différence de température qui atteint respectivement 5.43 °C (9 juillet à 15:00) et 4.43 °C (9 juillet à 15:00) pour les années 1996 et 1997. Il est bien clair que des températures plus chaudes que celles des stations sont observées. Cette élévation de température par rapport aux stations météorologiques est causée principalement par le pourcentage élevé des surfaces minéralisées dans le quartier Dora.

Plusieurs raisons expliquent bien entendu aussi la différence observée :

- différences dans les conditions initiales et aux limites, les données d'entrée de la simulation comme les propriétés des matériaux de construction, les propriétés du sol et de la végétation.
- la simulation avec ENVI-met a été réalisée en considérant que le ciel est clair (pas nuages).
- le site simulé « Dora » étant un quartier très dense. A contrario la station AUB est installée dans un campus universitaire, tandis que la station « Beyrouth golf » est installée dans une zone proche de l'aéroport entouré par des végétations et des zones vertes, Figure 3.12.



Figure 3.12 : Instrumentation de la station météorologique Beyrouth Golf, (national wind atlas of Lebanon, 2011).

3.7 Cartes microclimatiques du modèle :

3.7.1 Cartes de la température ambiante :

L'objectif de cette partie est de montrer les cartes de la distribution spatiale et temporelle de la température de l'air ambiant (obtenues par ENVI-met) du quartier étudié. Le plus fort écart entre les températures minimales et maximales est observé dans les heures les plus chaudes de la journée (entre 12:00 et 18:00, Figure 3.13); cet écart atteint une valeur de 3.44 °C à 15:00. La Figure 3.14 montre aussi une hétérogénéité de la température durant la nuit avec une différence de 1.2 °C au milieu de la nuit. Cependant l'écart de la température est plus important durant la journée.

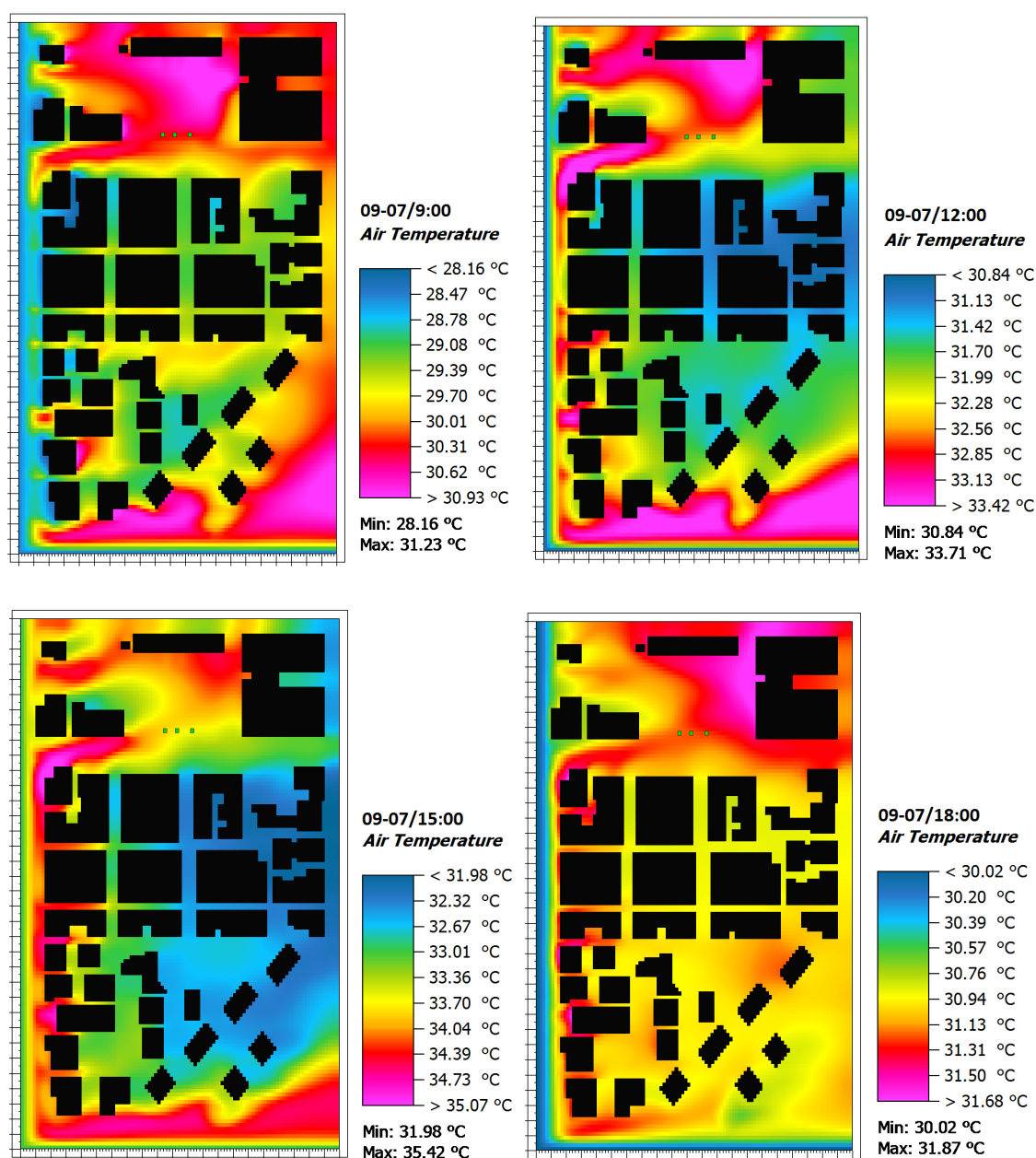


Figure 3.13 : Cartes de la température ambiante de l'air à une hauteur de 1.75 m à 9:00, 12:00, 15:00 et 18:00.

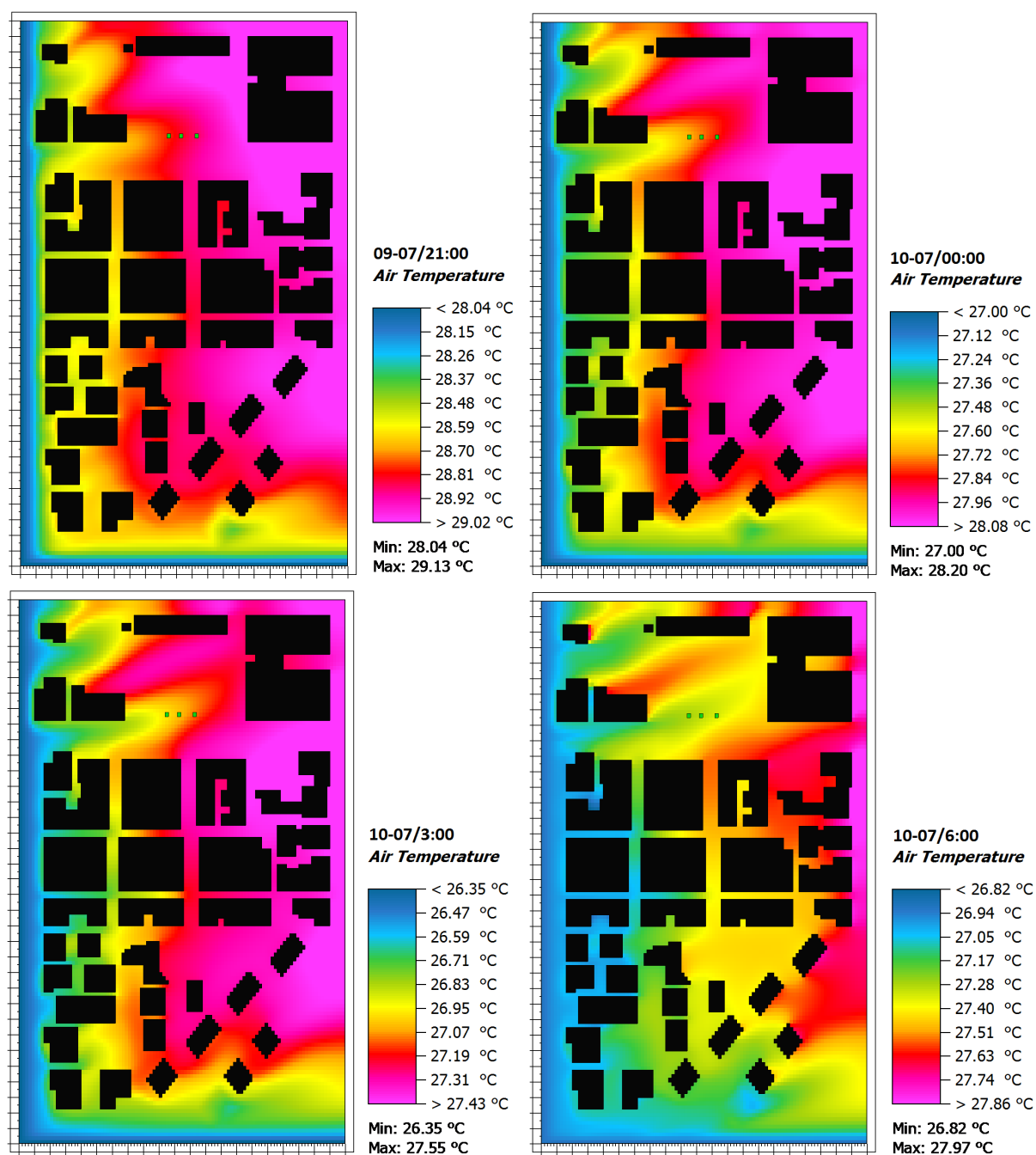


Figure 3.14 : Cartes de la température ambiante de l'air à une hauteur de 1.75 m à 21:00, 00:00, 3:00 et 6:00.

3.7.2 Cartes de l'humidité spécifique

En ce qui concerne l'humidité spécifique de l'air, nous pouvons distinguer une certaine hétérogénéité spatiale tout au long de la journée, qui est remarquable surtout autour de midi avec un écart de 1.57 g/Kg, Figure 3.15. On peut remarquer aussi une hétérogénéité temporelle

attendue de cette variable ; l'écart du taux d'humidité spécifique entre 3:00 la nuit et 15:00 atteint 3 g/Kg dans certains endroits. La Figure 3.16 montre que l'hétérogénéité spatiale est plus faible la nuit avec un écart faible à minuit qui ne dépasse pas les 0.2 g/kg.

L'hétérogénéité spatiale et temporelle observée au niveau de la température et de l'humidité spécifique va entraîner ainsi une hétérogénéité spatiale et temporelle de l'humidité relative.

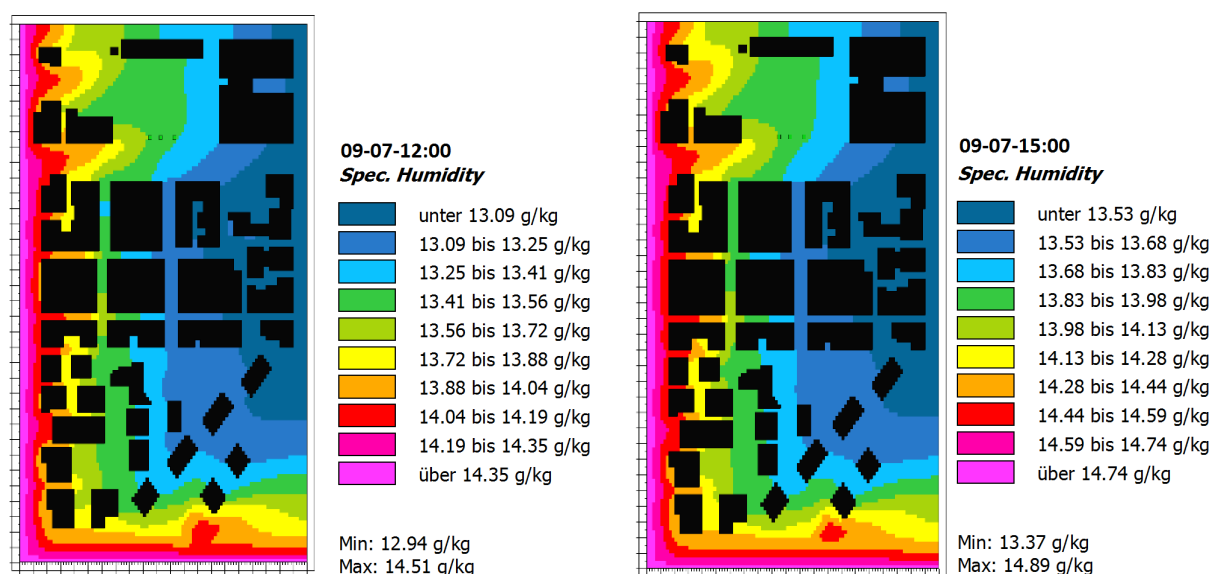


Figure 3.15 : Cartes de l'humidité spécifique de l'air à une hauteur de 1.75 m à midi et 15:00.

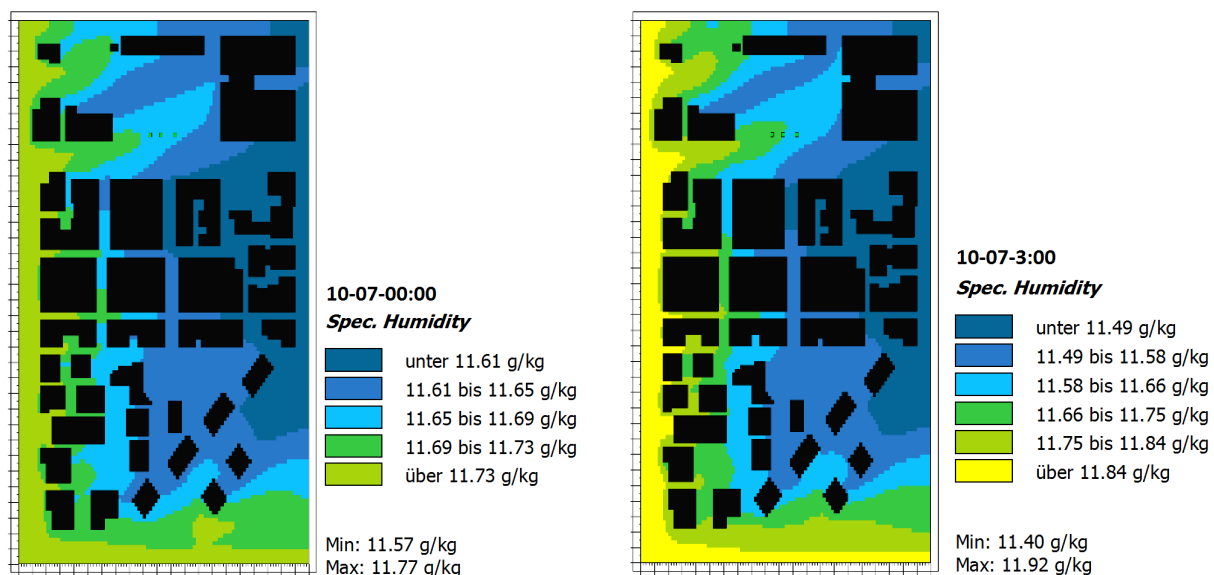


Figure 3.16 : Cartes de l'humidité spécifique de l'air à une hauteur de 1.75 m à minuit et 18:00.

3.7.3 Carte de la température moyenne radiante

La température moyenne radiante T_{mrt} est une température permettant de globaliser les échanges thermiques par rayonnement avec l'environnement. Cette température est un paramètre important pour évaluer le confort thermique du piéton en espaces extérieures. Selon (Toudert & Mayer, 2006), la T_{mrt} est le facteur clé quant au calcul d'indices de confort puisque elle a un impact important sur le bilan thermique de l'homme.

Le calcul de la T_{mrt} dans ENVI-met est bien détaillée dans l'équation [2.48] du chapitre précédent montrant que cet indice intègre des multiples flux de radiations à grandes et à courtes longueurs d'ondes absorbés par un corps humain :

- Flux direct, diffus et réfléchi du rayonnement à courtes longueurs d'onde.
- Flux à grandes longueurs d'onde venant du sol.
- Flux à grandes longueurs d'onde venant du ciel.
- Flux à grandes longueurs d'onde venant des bâtiments.
- Flux à grandes longueurs d'onde venant des végétations.

Afin d'analyser la variation spatiale et temporelle de la température moyenne radiante du site étudié, nous présentons ci-dessous les cartes de cette variable microclimatique (Figures 3.17 et 3.18). Les cartes montrent que durant la nuit, dans les routes étroites séparant les bâtiments (prospect faible) la température moyenne radiante est la plus élevée. De même, sous les pins, on trouve cette température radiante est maximale et atteint environ 23 °C à minuit (tâche rose). Par contre, durant les heures ensoleillées, la T_{mrt} dans ces zones est presque homogène et atteint des valeurs minimales. La température radiante moyenne atteint ses valeurs maximales dans les zones les plus exposées au soleil et sur les routes principales, ce qui apparaît clairement dans les cartes de la Figure 3.18. L'analyse de ces résultats indique qu'un faible FVC génère des températures radiantes faibles durant la journée en indiquant l'importance de l'effet protecteur des bâtiments et des arbres sur cette variable, alors que durant la nuit un faible FVC a un effet contraire sur la température radiante et conduit à des T_{mrt} plus élevés.

Il est remarquable aussi que la température moyenne radiante atteint des valeurs maximales (environ 71 °C) à 15 : 00 alors que la température maximale de l'air ambiant pour la même heure de la journée est de l'ordre de 36 °C (voir paragraphe précédent). Selon les résultats de (Matzarakis, et al., 1999) au cours d'un jour ensoleillé au mois de juin la valeur de la T_{mrt} peut être 20 K plus élevée que la température de l'air ambiant. Dans nos simulations, cas libanais et selon quartier étudié, cette différence peut être supérieure à 20 K et atteindre une valeur de 35 K à 15 :00.

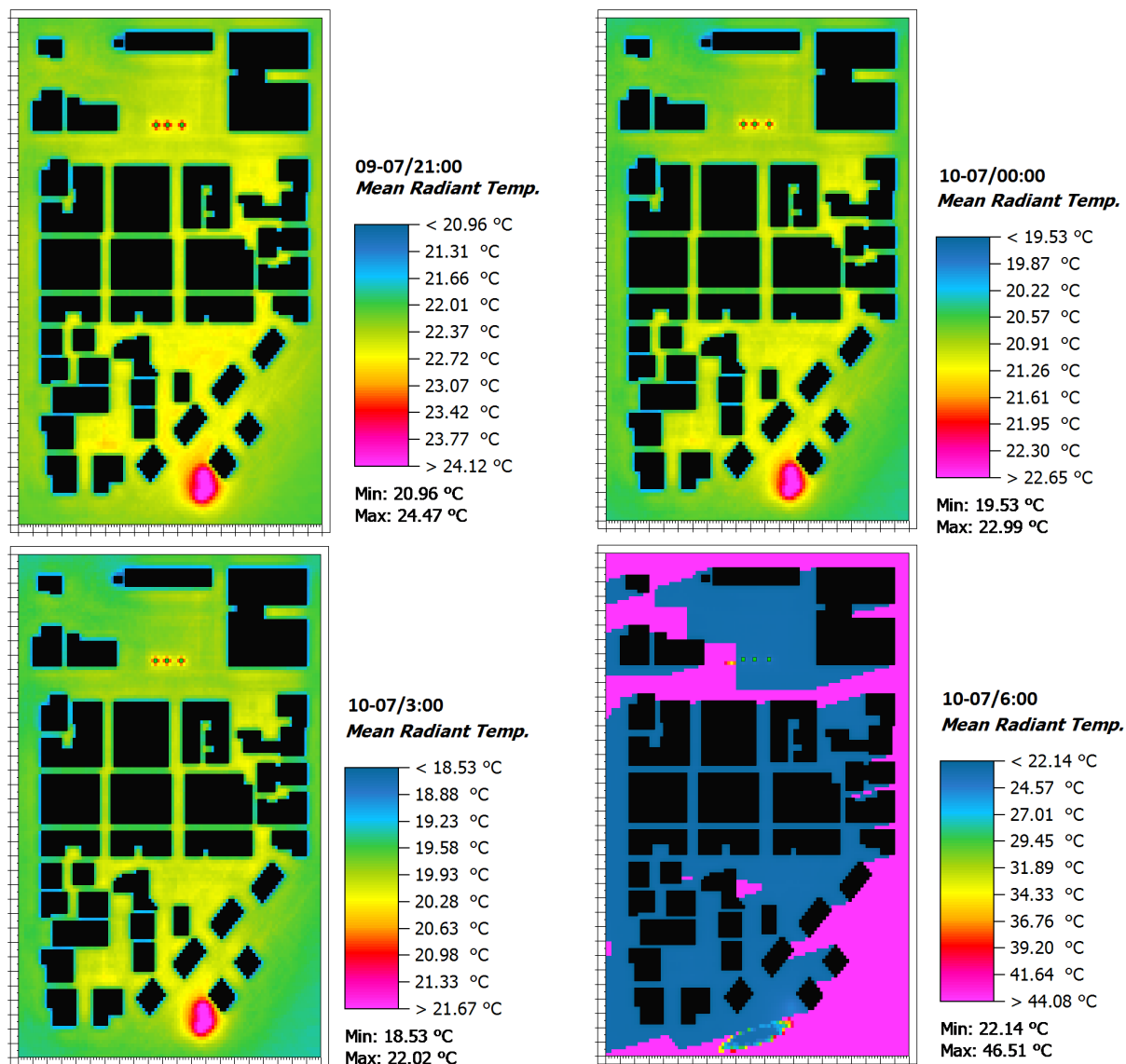


Figure 3.17 : Carte de la T_{mrt} à une hauteur de 1.75 m à 21:00, mi-nuit, 3 :00 et 6:00

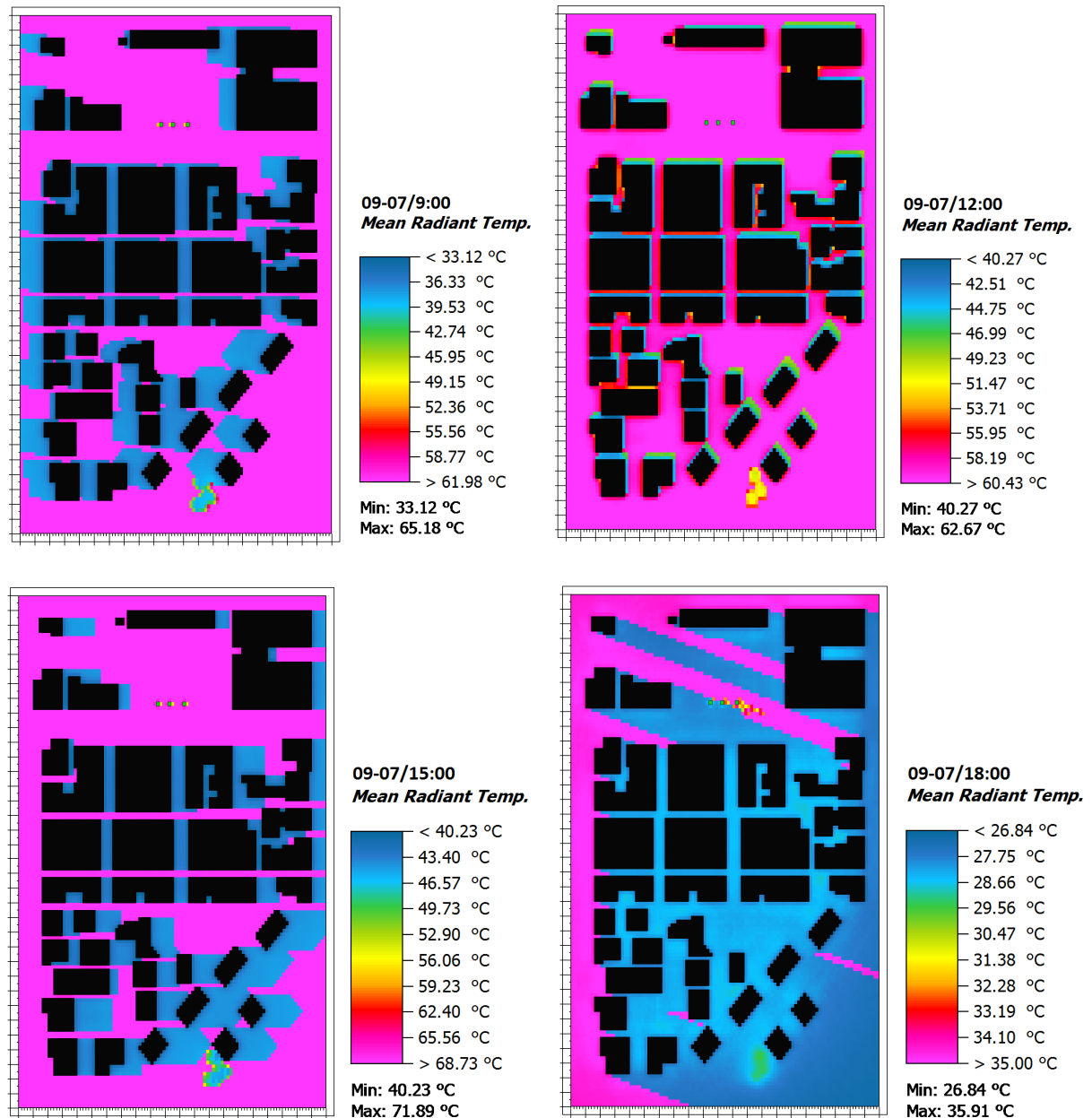


Figure 3.18 : Carte de la T_{mrt} à une hauteur de 1.75 m (le jour) à 9:00, midi, 15:00 et 18:00

3.8 Effet du FVC sur la température ambiante et la T_{mrt}

Dans ce paragraphe, nous montrons la relation entre le FVC et la température ambiante d'une part, et le FVC et la température radiante moyenne D'autre part, puis nous allons mettre en évidence l'effet du FVC sur ces deux variables microclimatiques durant les heures du jour et de la nuit.

Les graphes de la Figure 3.19 montrent la variation de la température ambiante en fonction du facteur de vue de ciel « FVC » durant la journée (9 juillet à 13 :00) et durant la nuit (10 juillet

à 1 :00). L'évolution de la T_{mrt} en fonction du FVC pour les mêmes heures (13 :00 et 1 :00) est illustrée dans les Figures 3.20 et 3.21. Les valeurs de la température correspondent aux valeurs extraites par ENVI-met en différents points du modèle à une hauteur de 1.75 m. Le coefficient de détermination R^2 a été utilisé pour mettre en évidence la relation entre le « FVC » et les deux paramètres microclimatiques. Dans ce cas, le coefficient de détermination R^2 est le carré du coefficient de corrélation, comme dans le cas d'une régression linéaire simple. Les valeurs de R^2 sont comprises entre 0 et 1. Un R^2 très faible indique l'absence d'une relation linéaire entre les variables alors qu'un coefficient de détermination proche de 1 montre une forte corrélation.

En examinant les graphes, on remarque qu'une valeur élevée du FVC est lié à une élévation de la température ambiante et de la température moyenne radiante durant le jour. Ceci qui peut être expliqué par l'exposition directe aux irradiations solaires. Il est à noter aussi que durant la journée, le FVC affecte la température moyenne radiante bien plus que la température ambiante : le coefficient R^2 de détermination entre FVC et T_{mrt} est de 0.81 alors que R^2 entre le FVC et T_a est de 0.34 (pas de corrélation).

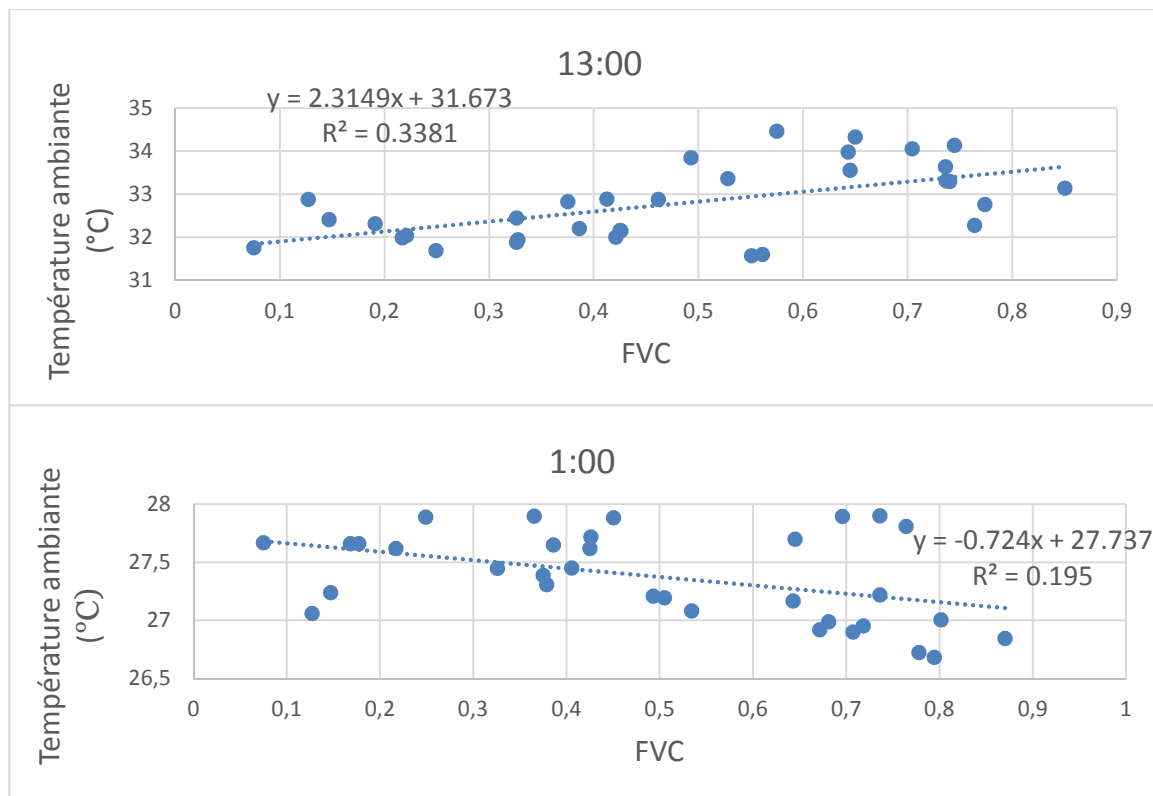


Figure 3.19: Graphes montrant la variation de la température ambiante en fonction du FVC à 13:00 le jour et la nuit à 1:00.

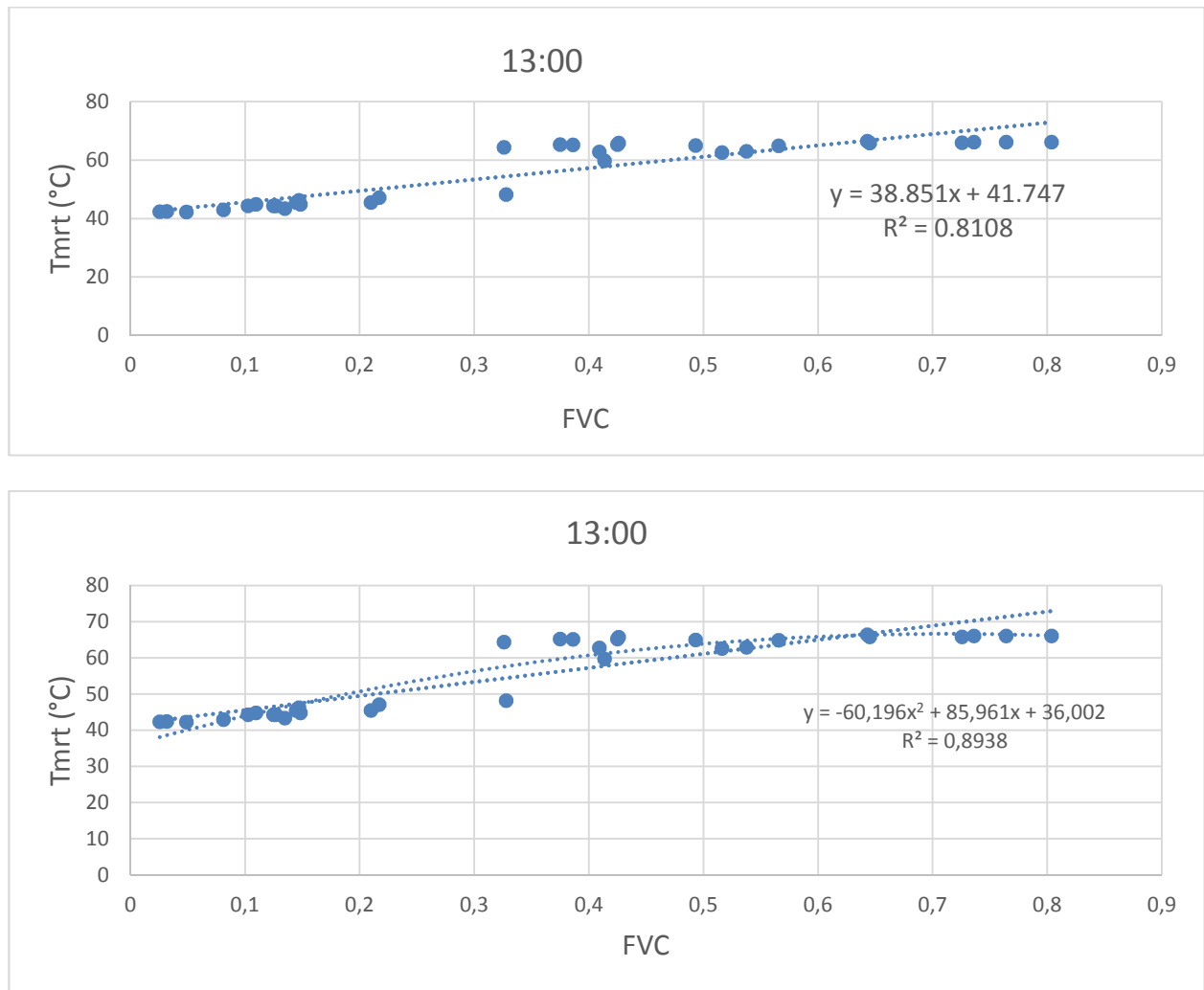


Figure 3.20 : Graphes montrant la variation de la température moyenne radiante en fonction du FVC à 13:00 le jour.

A 1 :00 la nuit, la température ambiante n'est pas fortement affectée par le FVC ; le coefficient R^2 est faible (0.195). Par contre, le coefficient R^2 reliant la Tmrt et le FVC est un peu plus grand et atteint environ une valeur de 0.57. Les graphes des Figures 3.20 et 3.21, indiquent que la relation entre Tmrt et FVC semble plutôt de type parabolique surtout durant la journée avec un R^2 élevé qui atteint une valeur de 0.89.

Ces résultats montrent qu'une zone urbaine ayant un faible FVC favorise un environnement thermique confortable durant la journée et la nuit, meilleur que dans le cas d'une zone à fort FVC. Un faible FVC implique une réduction des irradiances solaire et par suite une diminution du stockage d'énergie solaire durant la journée.

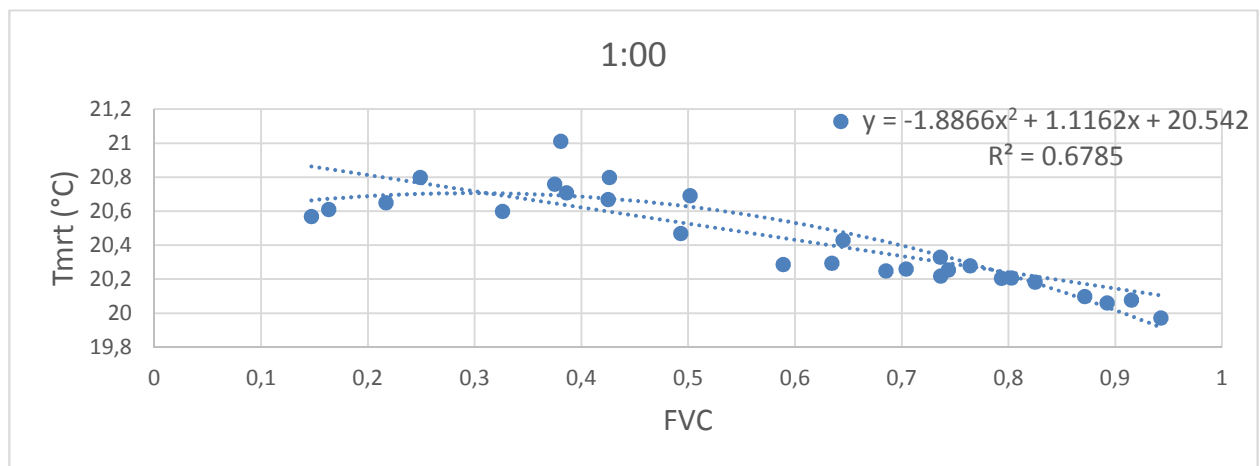
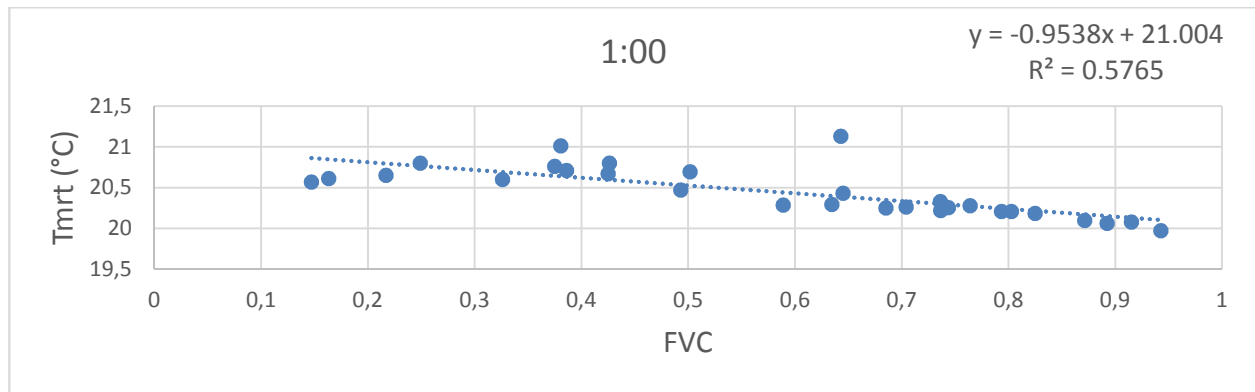


Figure 3.21: Graphes montrant la variation de la température moyenne radiante en fonction du FVC à 1:00 La nuit.

3.9 Carte de la température physiologique équivalente (PET)

L'indice PET est défini comme la température de l'air (intérieur ou extérieur) à laquelle, dans un local intérieur type, sans vent et rayonnement solaire, le bilan d'énergie du corps humain est équilibré avec les mêmes températures internes et de peau que celles obtenues dans les conditions à évaluer (Höppe, 1999). Cet indice est basé sur le modèle de bilan d'énergie MEMI (Munich Energy balance Model for Individuals).

Certaines variables (l'âge, le poids et la taille d'une personne, son sexe, son métabolisme et la résistance thermique des vêtements...), associées à la température de l'air, la température radiante moyenne, l'humidité spécifique et relative et la vitesse du vent, définissent la température physiologique équivalente PET.

Les Figures 3.22 et 3.23 montrent la distribution spatiale de la température physiologique équivalente pour des différentes heures de la journée. Pour le calcul du PET, nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- le piéton est un homme de 35 ans, sa masse est 75 kg et sa taille 175 cm.
- la tenue portée par ce piéton a une résistance de 0.5 clo. Le clo est l'unité de mesure de l'isolation thermique des vêtements avec $1 \text{ clo} = 0.155 \text{ K.m}^2/\text{W}$. Généralement une valeur de 0.5 clo est considérée pour la résistance thermique de la vêtue en été, comme indiqué sur le tableau 3.3.
- le métabolisme total du piéton est 164.49 W (taux de base 84.49 W, métabolisme de travail 80 W).

Tableau 3.3 : Résistance thermique de la vêtue en clo selon la saison
(www.lema.ulg.ac.be/urba/Cours/Climat/04-ConfortThermique)

Type de vêtue	Résistance thermique de la vêtue en Clo
Tropicale	0.3 à 0.4
Eté	0.5
Intérieure (légère)	0.7
« Normale » (intérieur hiver)	1
Hiver	1.5
Polaire	3 à 4

En examinant les Figures 3.22 et 3.23, nous pouvons remarquer une hétérogénéité de la PET dans le quartier et ce pendant toute la journée. Durant les heures ensoleillées, on remarque que la PET est plus faible dans les zones non exposées directement au soleil due à la présence des structures bâties et de leurs hauteur (surtout dans les routes étroites séparant les bâtiments), alors que la PET atteint ses valeurs maximales dans les zones les plus ensoleillées du quartier (surtout les routes principales tout autour du quartier). Ainsi l'ombre portée par les bâtiments peut causer une impression de refroidissement, effet qui est très clair à 15 :00 (taches bleus). On note aussi des taches rouges à midi à proches des bâtiments (sud-est du quartier) montrant une élévation de la PET qui peut être expliquée par la forme urbaine de ces groupes de bâtiments et de la distance qui les séparent.

D'autre part, il est remarquable que durant la nuit (surtout entre 21:00 et 3:00), la PET des zones proches des bâtiments est plus importante que la PET des alentours. En effet la chaleur stockée par les bâtiments pendant la journée, est difficilement déchargée dans un milieu urbain dense comme celui du quartier simulé. Le confort extérieur sera discuté en détails ultérieurement dans le chapitre 5 en utilisant le même indice la PET.

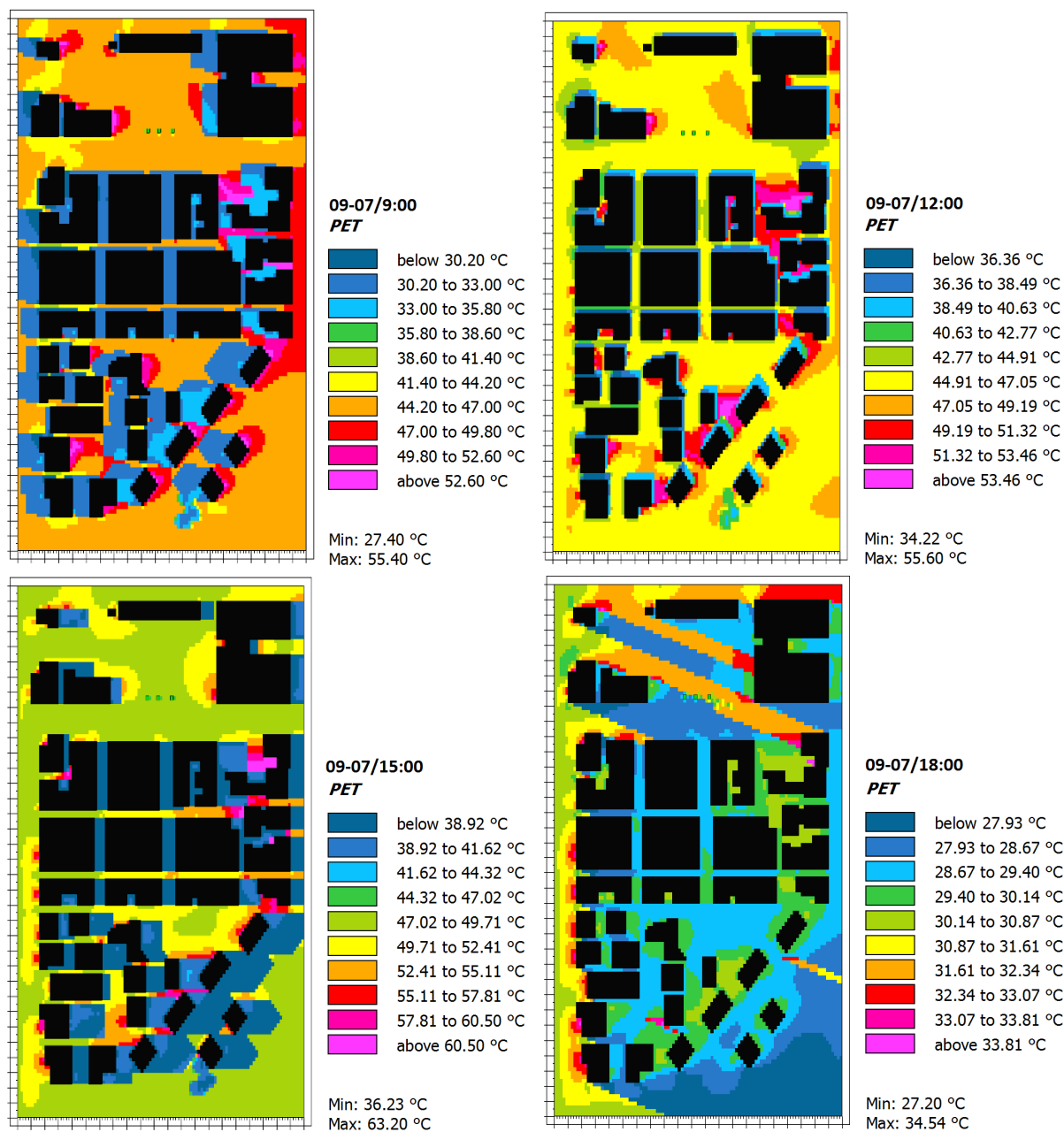


Figure 3.22 : Distribution de la température physiologique équivalente (PET) à une hauteur de 1.5m à 9:00, 12:00, 15:00 et 18:00.

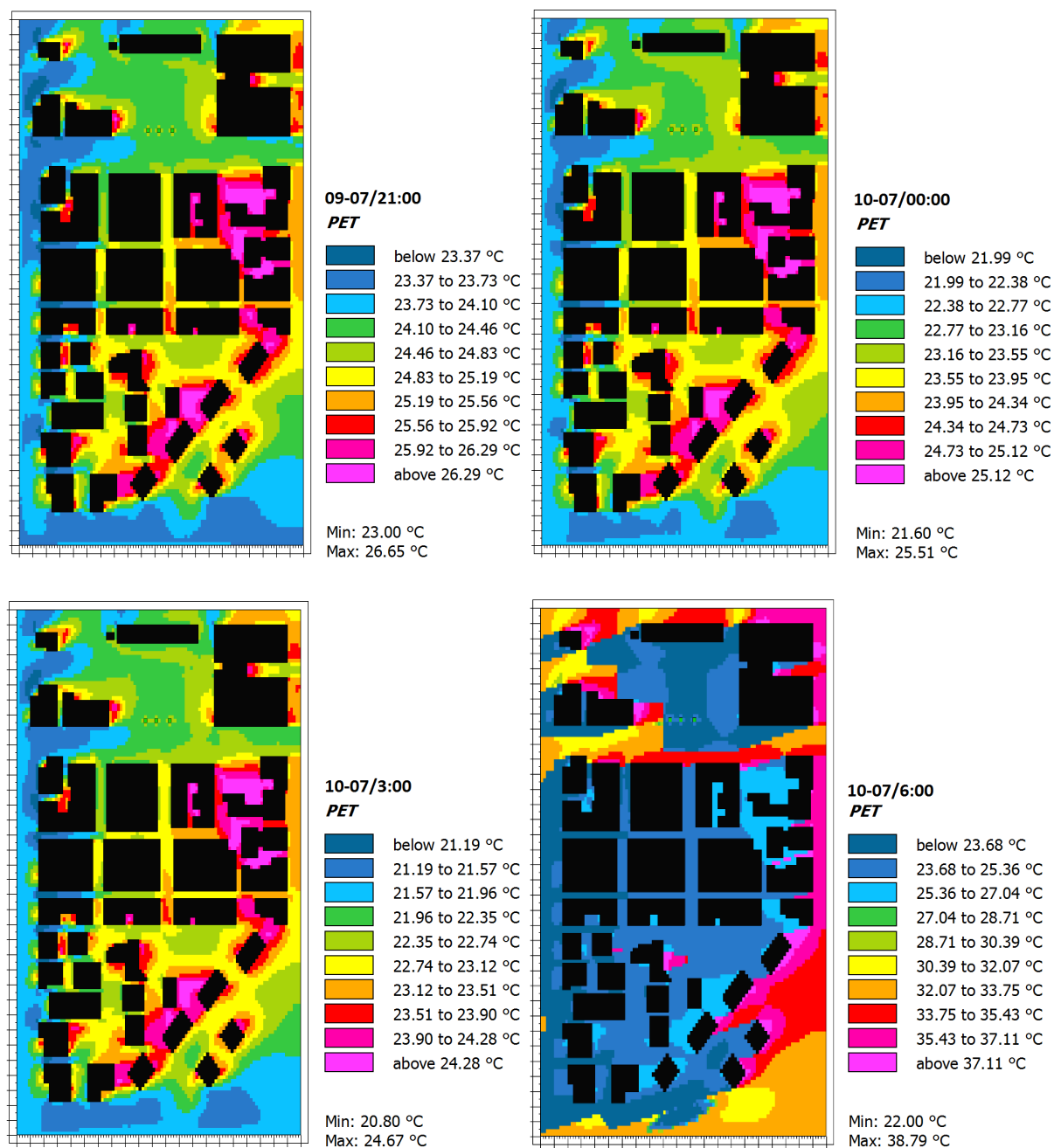


Figure 3.23: Distribution de la température physiologique équivalente (PET) à une hauteur de 1.5m à 21:00, 00:00, 3:00 et 6:00

Chapitre 4 Etude numérique du potentiel des différentes techniques de réduction d'ICU

Plusieurs interventions à l'échelle urbaine et à l'échelle bâtie sont généralement proposées pour atténuer les effets des facteurs anthropiques de l'ICU. Ces interventions consistent à augmenter les espaces verts dans les villes, à mettre en place des sources d'eau, à travailler sur l'aéraulique urbaine et la ventilation des villes, et à promouvoir l'utilisation des matériaux de construction et de revêtement du sol adéquates permettant de libérer facilement la chaleur. Dans ce chapitre, on étudie l'effet rafraichissant de la végétation, de l'utilisation d'un albédo élevé pour le sol et l'enveloppe des bâtiments, ainsi que le potentiel d'atténuation des fontaines et des brumisateurs d'eau.

4.1 Etude du potentiel de la végétalisation

Les effets de la végétation sur l'îlot de chaleur urbain et sur les paramètres microclimatiques sont étudiés dans ce chapitre. Le but est de mettre en évidence le pouvoir de rafraichissement urbain de la végétalisation sur une typologie de quartier comme Dora, quartier très peu végétalisé initialement.

4.1.1 Modèle « Vert »

Une partie du modèle initial a été végétalisée en utilisant du gazon et des arbres. La surface de la zone verte est de 5380 m² ce qui représente environ 7.4 % de la surface totale du quartier étudié. La Figure 4.1 montre la distribution de la végétation devant les bâtiments et sur les routes. On distingue 3 zones comme le montre la Figure 4.1, et dans chaque zone on retrouve de l'herbe ou gazon et des rangées d'arbres. Le tableau 4.1 montre le pourcentage surfacique de chaque type de végétation planté selon leur référencement dans ENVI-met.

Les modèles d'arbres tridimensionnels sont utilisés dans la simulation comme les pins, les oliviers, les orangers, les palmes et les arbres d'Albizia Julibrissin. On trouve souvent ces types d'arbres dans les villes libanaises, notamment les pins qui se trouvent à « Horch Beyrouth ». De même l'albizia qui reste vert été comme hiver, a été planté récemment par plusieurs municipalités libanaises. D'autre part, des arbres simples de type « T1 », « SC », « SK » et des herbes de type « XX » sont utilisés dans la modélisation et sont plantés dans les jardins des bâtiments ou pour clôturer les bâtiments. La description des plantes utilisées dans la modélisation est dans le tableau 4.2. La figure 4.6 illustre les arbres en 3D utilisés dans ENVI-met. Les récepteurs disposés dans le modèle initial sont installés au même endroit dans le modèle vert pour pouvoir extraire et comparer les paramètres microclimatiques. La simulation du quartier végétalisé a été réalisée pour les mêmes 24 heures simulées pour le quartier initial

(9 juillet, mêmes conditions solaires), en conservant les mêmes conditions aux limites et les mêmes conditions initiales.

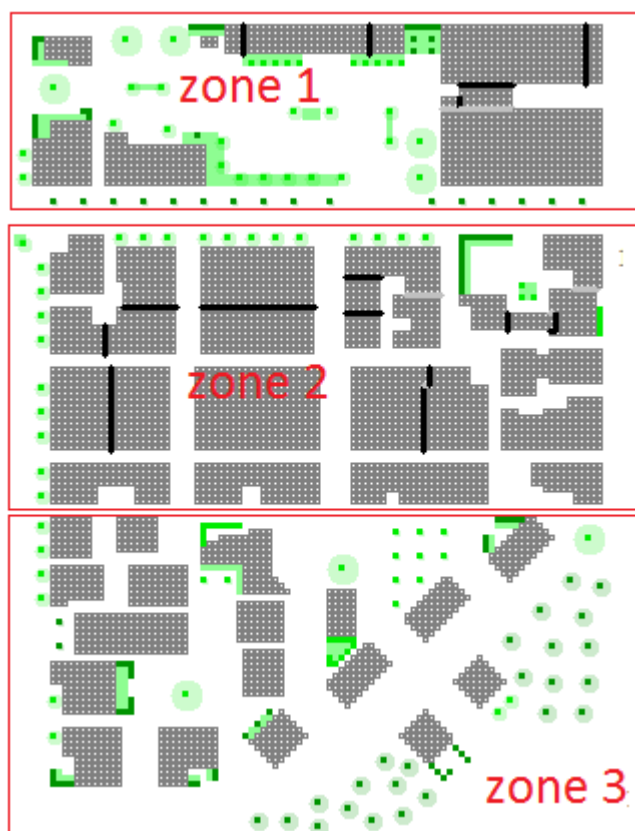


Figure 4.1 : Plan du quartier végétalisé créé dans ENVI-met montrant les 3 zones végétalisées du quartier.

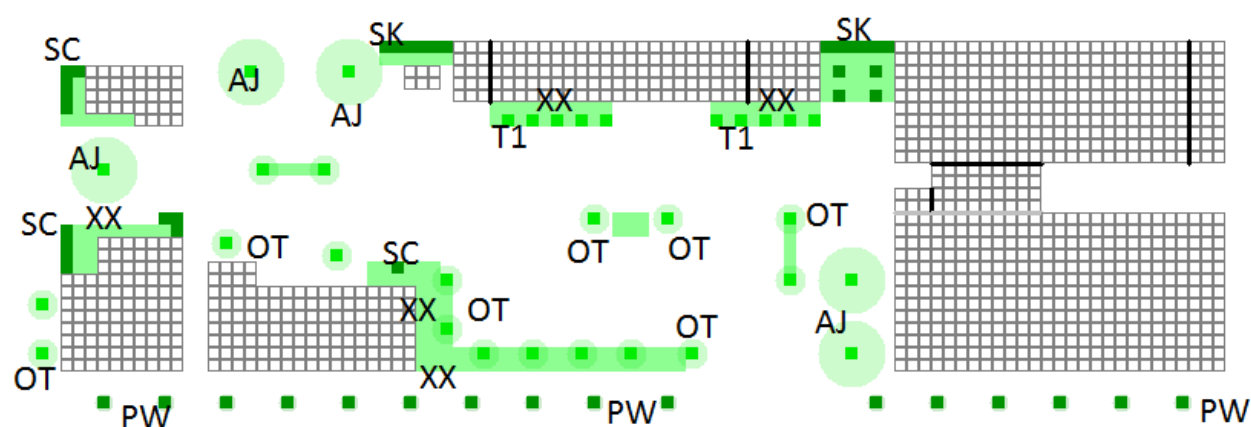


Figure 4.2: Emplacement et type des espèces végétalisées dans ENVI-met dans la zone 1.

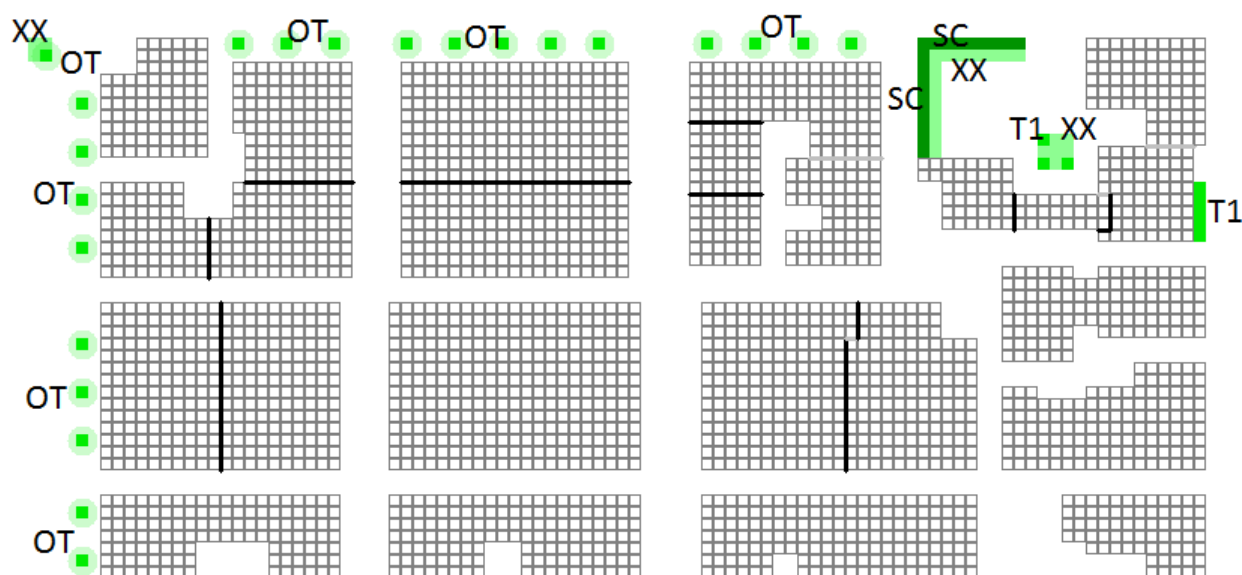


Figure 4.3: Emplacement et type des espèces végétalisées dans ENVI-met dans la zone 2.

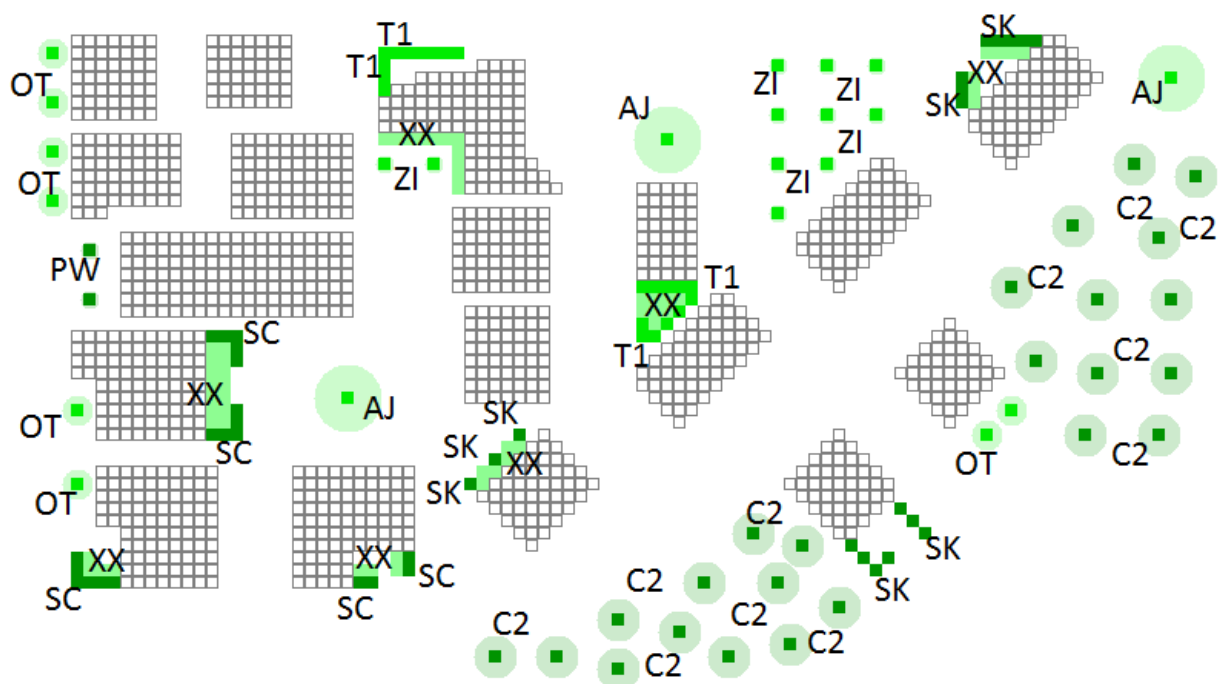


Figure 4.4: Emplacement et type des espèces végétalisées dans ENVI-met dans la zone 3.

Tableau 4.1: Pourcentage de la surface végétalisée de chaque zone selon le type des arbres et des herbes plantés

Type d'arbres	“AJ”	“OT”	“PW”	“ZI”	“C2”	“SC”	“SK”	“T1”	“XX”	Surface Totale
Surface (m ²)	968	1175	162	99	1176	255	170	195	1180	5380
Pourcentage (%)	18	21.84	3	1.84	21.86	4.74	3.16	3.62	21.94	100

Tableau 4.2: Description des plantes utilisées dans le modèle selon leur référence dans ENVI-met.

Nom des plantes selon ENVI-met	Description
AJ (arbre 3D)	« Albizia Julibrissin », Dimensions : 11x11x12m.
OT (arbre 3D)	« Olea Europaea », Olivier Dimension : 5x5x4m.
PW (arbre 3D)	« Palm Washingtonia », Palmier Dimension : 3x3x20m.
ZI (arbre 3D)	« Citrus », Orangier Dimension : 3x3x4m.
C2 (arbre 3D)	“Pine”, Arbre de pin Dimension : 7x7x15m.
SC (arbre simple)	Arbre très dense de 20 m de hauteur,"Free stem crown layer"
SK (arbre simple)	Arbre très dense de 15 m de hauteur,"distinct crown layer"
T1 (arbre simple)	Arbre très dense de 10 m de hauteur,"Leafless base"
XX (arbre simple)	Herbe (gazon) " Grass 50 cm aver, dense"

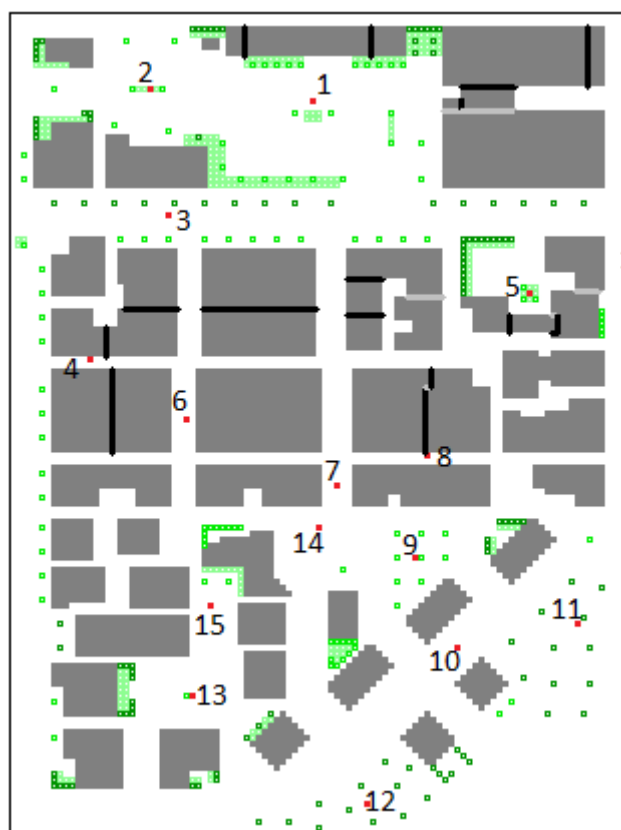


Figure 4.5: Modèle 2D du quartier végétalisé créée à l'aide d'ENVI-met montrant les récepteurs installés (points rouges) par rapport aux espèces végétalisées.

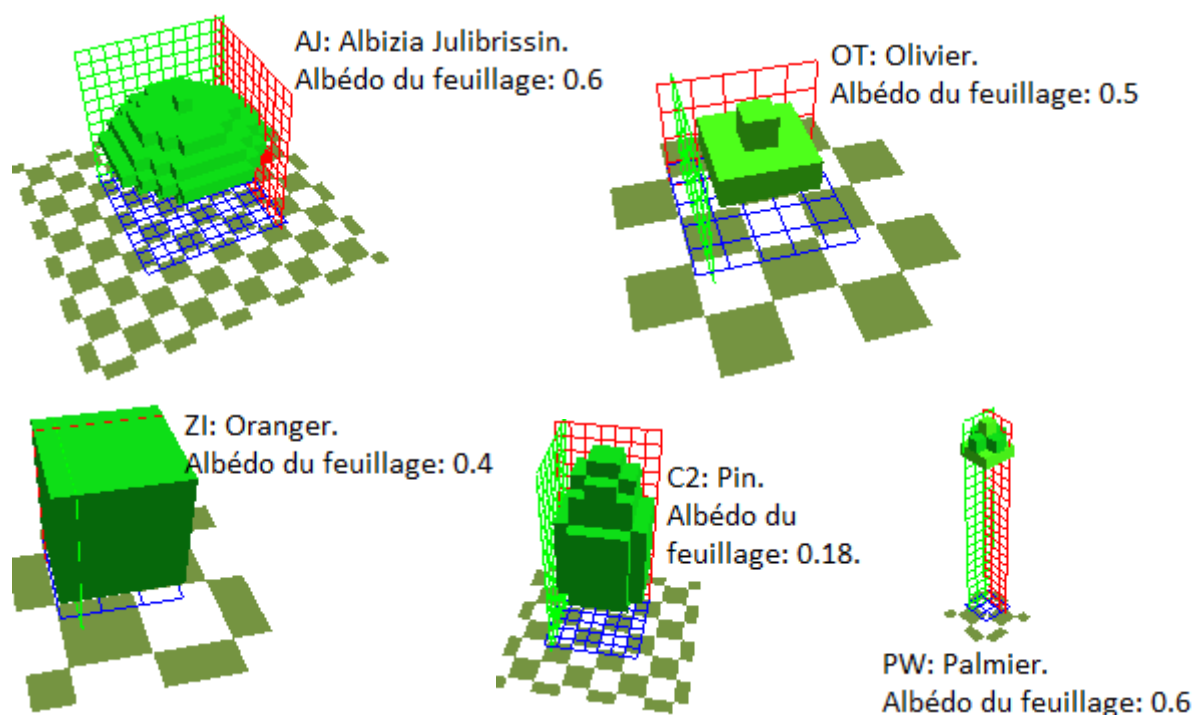


Figure 4.6: Les arbres 3D utilisées dans la simulation (source ENVI-met).

4.1.2 Etude de l'impact du modèle vert sur les paramètres microclimatiques

Dans ce paragraphe, nous présentons la comparaison des variables microclimatiques entre le modèle initial et le modèle vert pour mettre en évidence l'effet de la végétation sur le rafraîchissement urbain.

4.1.2.1 Modification de la température de l'air

Les Figures 4.7, 4.8 et 4.9 illustrent la variation de la température de l'air ambiant entre le modèle « I » (initial) et le modèle « V » (vert) pour chacun des différents récepteurs (4), (11) et (12). En examinant les graphes, on constate un effet de rafraîchissement tout au long de la journée. Cet effet est important surtout pour les récepteurs (11) et (12) qui sont installés dans les zones plantées alors que cet effet est minime pour le récepteur (4) qui n'est pas installé dans une zone verte comme l'indique la Figure 4.5. Pour le récepteur (12), l'écart le plus important de la température ambiante T_a a été observé durant la journée surtout entre 10:00 et 17:00. Cet écart atteint sa valeur maximale à 11:00, la température diminuant de 2.25 °C durant cette période de la journée. Pour le récepteur (11), l'effet de rafraîchissement a été aussi observé durant la journée, et la diminution de T_a est en moyenne d'environ 0.55 °C. L'écart maximal pour ce récepteur a été examiné à 9 :00 du matin et a atteint une valeur de 0.92 °C. Il est à noter aussi que, même durant la nuit où l'îlot de chaleur urbain est maximal, la température T_a a diminué. Par exemple, à minuit T_a a diminué de 0.53 °C pour le récepteur (12) et de 0.42 °C pour le récepteur (11).

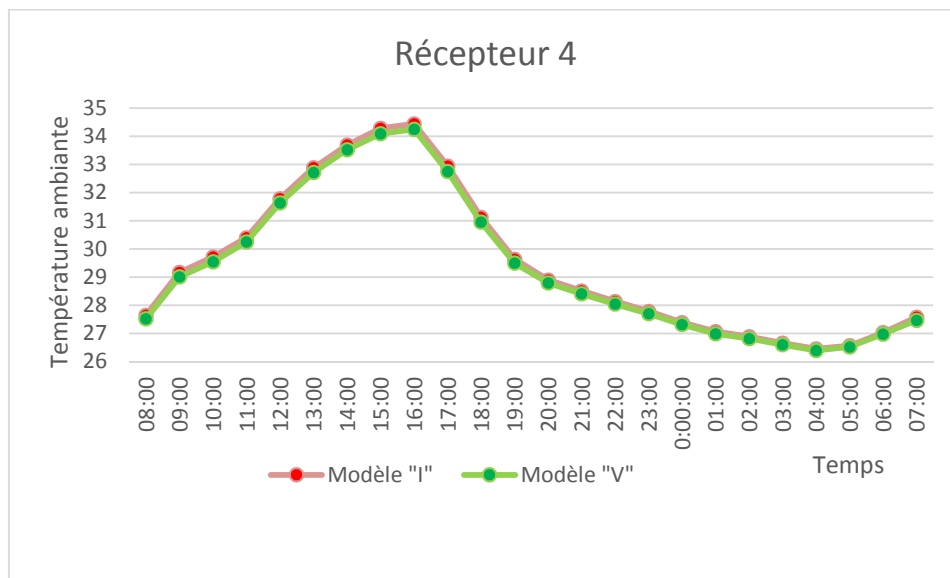


Figure 4.7: Variation de la température de l’air ambiant pour le modèle vert “V” (en vert) et le modèle initial “I” (en rouge) pour le récepteur (4).

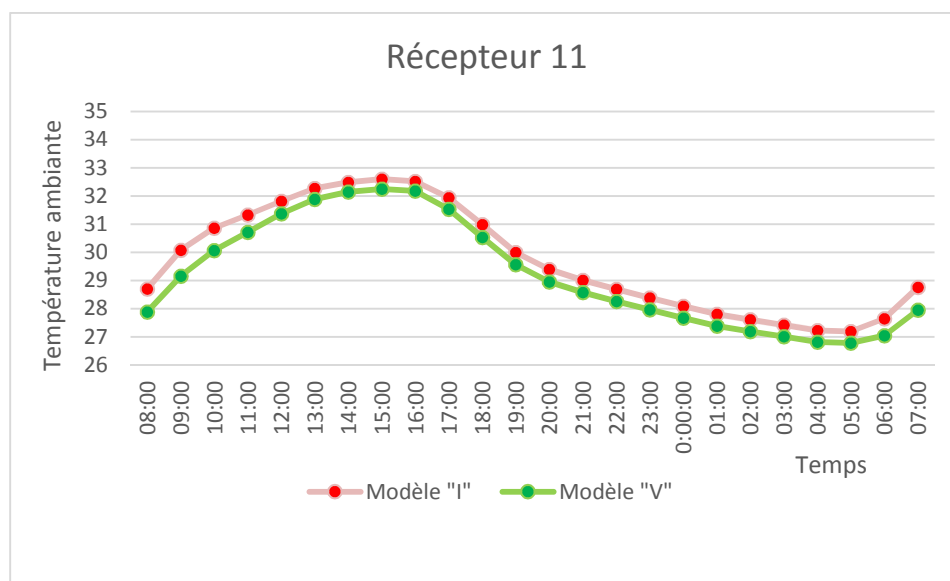


Figure 4.8: Variation de la température de l’air ambiant pour le modèle vert “V” (en vert) et le modèle initial “I” (en rouge) pour le récepteur (11).

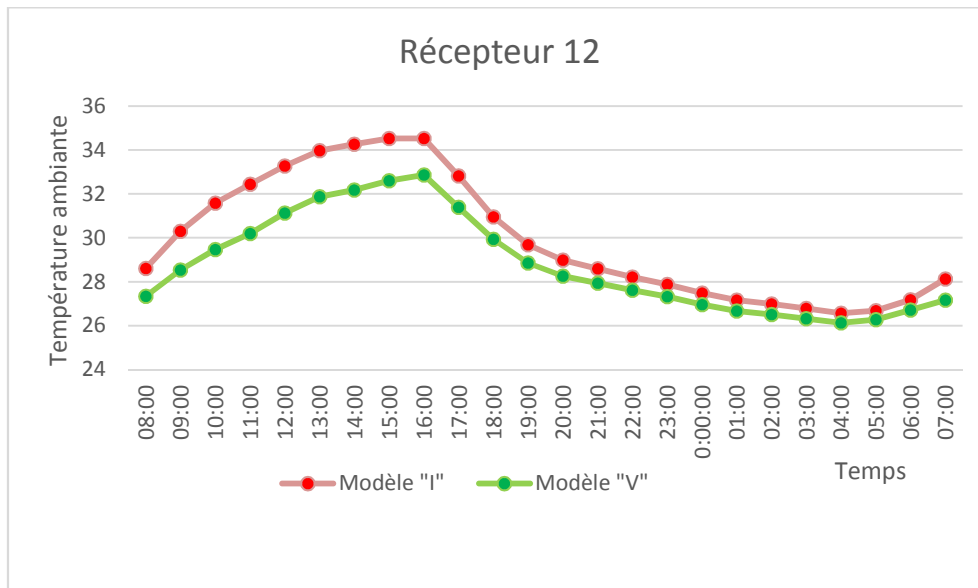


Figure 4.9 : Variation de la température de l'air ambiant pour le modèle vert "V" (en vert) et le modèle initial "I" (en rouge) pour le récepteur (12).

Les cartes de la figure 4.11 montrent l'écart de température ambiante entre le modèle « vert » et le modèle initial à 13 :00 et 15:00 le jour, et à 1:00 et 3 :00 la nuit. En observant ces cartes, on peut constater un effet de rafraîchissement dans les zones végétalisées durant la journée et la nuit. En comparant les résultats nocturnes et diurnes, on peut remarquer que les écarts de température sont plus importants durant la journée. Ces écarts peuvent atteindre une réduction d'environ 2.2 °C à 15 :00 représenté par les taches roses sur les cartes extraites d'ENVI-met. Par contre, durant la nuit cet écart plus faible, de l'ordre de 0.55 °C. Il est remarquable que la diminution de la température ne soit pas ponctuelle mais qu'une extension spatiale de l'effet de fraîcheur est aussi observée. On peut également remarquer que cette extension de l'effet de fraîcheur a été observée sur les routes séparant les bâtiments ; la température ambiante a été réduite d'environ 0.3 °C la nuit comme le jour. La figure 4.10 montre que la température de 93 % des points du maillage étudié a diminué à cause de la végétation, montrant l'extension de l'effet de fraîcheur durant la journée.

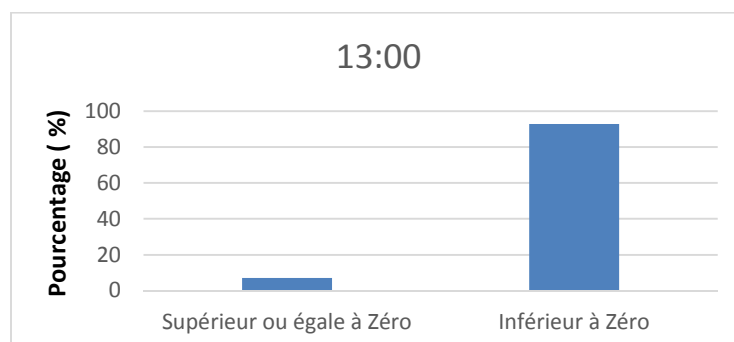


Figure 4.10: Pourcentage des points de la grille dont la température a diminué par rapport au cas de base à 13:00 .

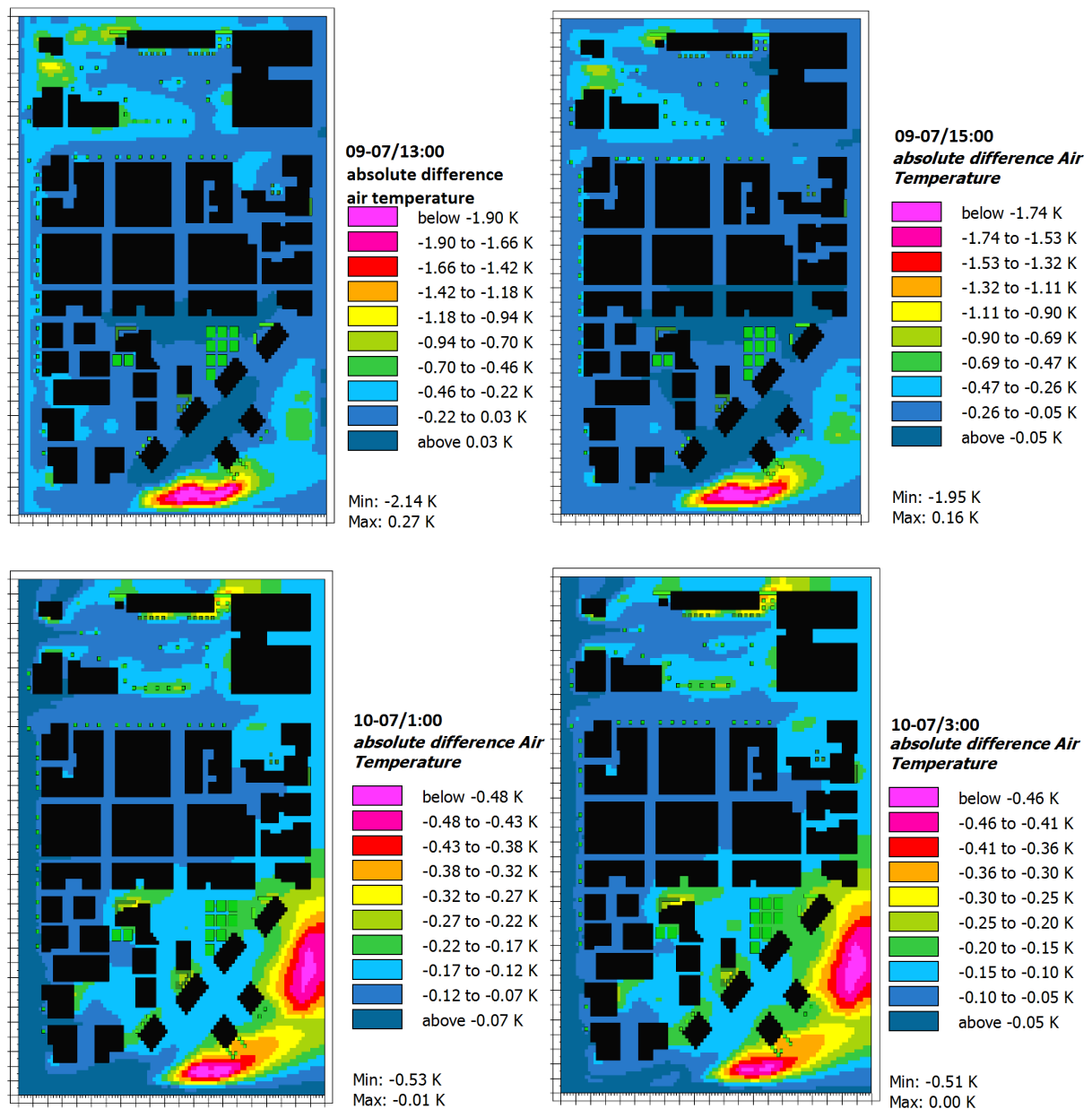


Figure 4.11: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Vert" et le modèle initial à 1 :00 et 3 :00 (la nuit) et 13:00 et 15:00 (le jour).

La présence d'une dense zone végétalisée a permis de créer un îlot de fraîcheur de jour comme de nuit en générant des températures plus fraîches. Il est à noter que l'effet de rafraîchissement créé par la végétation varie selon le type d'espèce choisi. Il est bien clair que l'effet apparaît maximum aux alentours des pins. On remarque de même un effet de fraîcheur important autour des Albizzias alors que cet effet est très minime sous les palmiers. En effet la vocation des palmiers est plutôt décorative. Pour les oliviers, l'effet de fraîcheur est aussi observé avec une diminution ponctuelle de température d'environ 0.5 °C à midi.

4.1.2.2 Effet sur l'humidité de l'air

Les cartes suivantes représentant la distribution spatiale de l'écart d'humidité spécifique (g/kg) durant la nuit et la journée sont tracées, respectivement sur les figures 4.12 et 4.13. Ces cartes présentent la quantité d'eau en g par kg d'air sec. On note que l'ajout d'une zone végétalisée au modèle initial a généré une augmentation de l'humidité spécifique de l'air durant le jour et durant la nuit. A minuit, on peut remarquer que l'augmentation de l'humidité spécifique atteint sa valeur la plus élevée dans les zones plantées et soit une augmentation de 0.2 g/kg d'eau dans l'air. Une extension spatiale de l'effet des plantes sur l'humidité a été observée. De plus, à midi, l'humidité spécifique a augmenté pour atteindre environ 0.9 g/kg comme valeur maximale. On peut également observer l'extension de l'effet d'îlot d'humidité induit par les surfaces végétalisées. Comme prévu, l'augmentation de la surface végétalisée a provoqué une augmentation de l'humidité spécifique de l'air, jour comme nuit due à l'effet d'évapotranspiration.

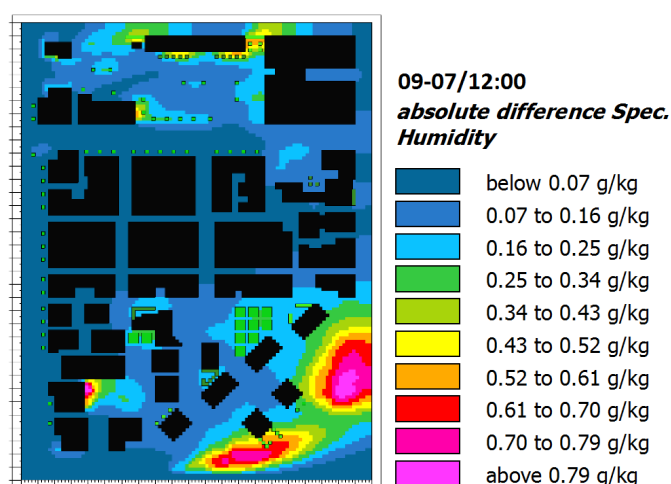


Figure 4.12: Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « vert » et le modèle initial à midi.

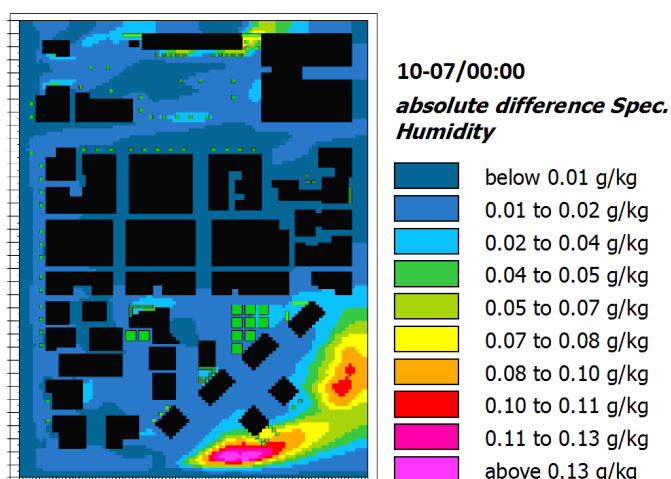


Figure 4.13: Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « vert » et le modèle initial à minuit.

4.1.2.3 Effet sur la température radiante moyenne

Dans ce paragraphe, nous présentons la variation de la température moyenne radiante T_{mrt} entre le modèle initial « I » et le modèle vert « V ». L'étude de cette variable microclimatique est nécessaire car cette variable est l'une des variables les plus importantes dans la définition du confort thermique.

Afin d'analyser l'effet de la végétation sur la T_{mrt} , nous illustrons la variation de la T_{mrt} tout au long de la journée respectivement pour les trois récepteurs (4), (11) et (12). Il est évident que la végétalisation d'une partie du quartier a conduit à la diminution de la T_{mrt} surtout dans les heures de la journée les plus ensoleillées. Le graphe de la Figure 4.16 montre que l'écart est important durant la période d'après-midi allant de 11 :00 à 16 :00 pour le récepteur (12). Ce graphe montre aussi que l'écart atteint des valeurs bien importantes dans cette période ; sa valeur maximale est de 28 °C à 16 :00. Pour le récepteur (11) un écart important est aussi observé durant la durée d'avant-midi et atteint une valeur de 17 °C à 10 :00. Pour le récepteur (4) bien qu'il ne soit pas installé dans une zone végétalisée, un écart est aussi observé mais avec des valeurs moins importantes et il atteint une diminution maximale de 2.5 °C à 13 : 00.

En effet, la T_{mrt} des récepteurs (11) et (12) est la plus affectée par la végétalisation, car le facteur de vue de ciel FVC de ces récepteurs a fortement diminué à cause de l'addition de la végétation. Le FVC du récepteur (11) devient 0.33 au lieu de 0.764, et celui du point (12) a diminué de 0.643 à 0.262. L'addition des zones végétalisée et des arbres crée un effet d'ombrage, et permet ainsi de diminuer le FVC. La diminution du FVC produit des températures radiantes moyennes plus faibles et génère ainsi un effet de confort thermique amélioré durant l'été. Il est remarquable aussi que durant la nuit (à partir de 19 :00), la T_{mrt} des récepteurs (11) et (12) qui sont placés juste près d'un arbre, a légèrement augmenté, l'écart maximal étant de l'ordre de 2 °C vers minuit.

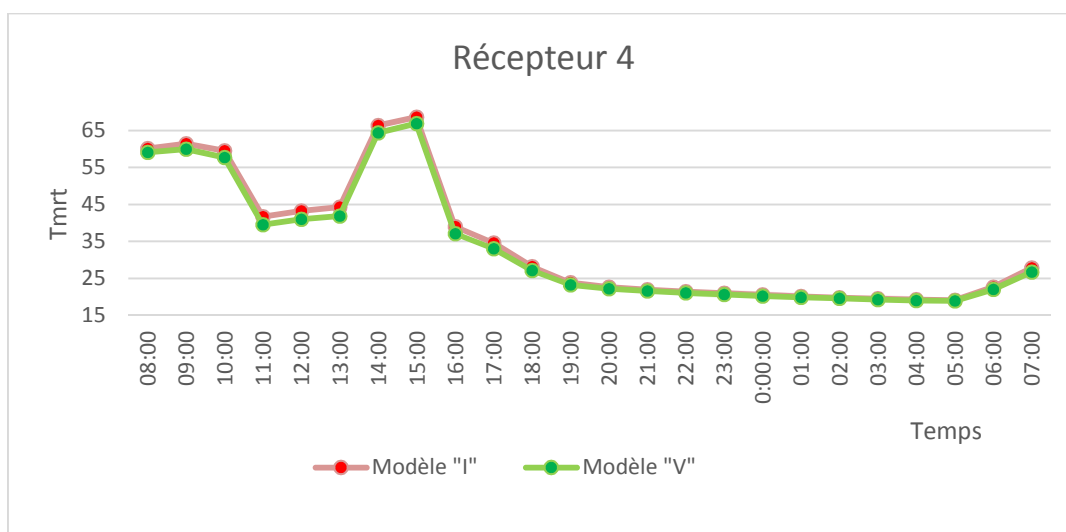


Figure 4.14 : Variation de la T_{mrt} pour le modèle vert "V" (en vert) et le modèle initial "I" (en rouge) pour le récepteur 1.

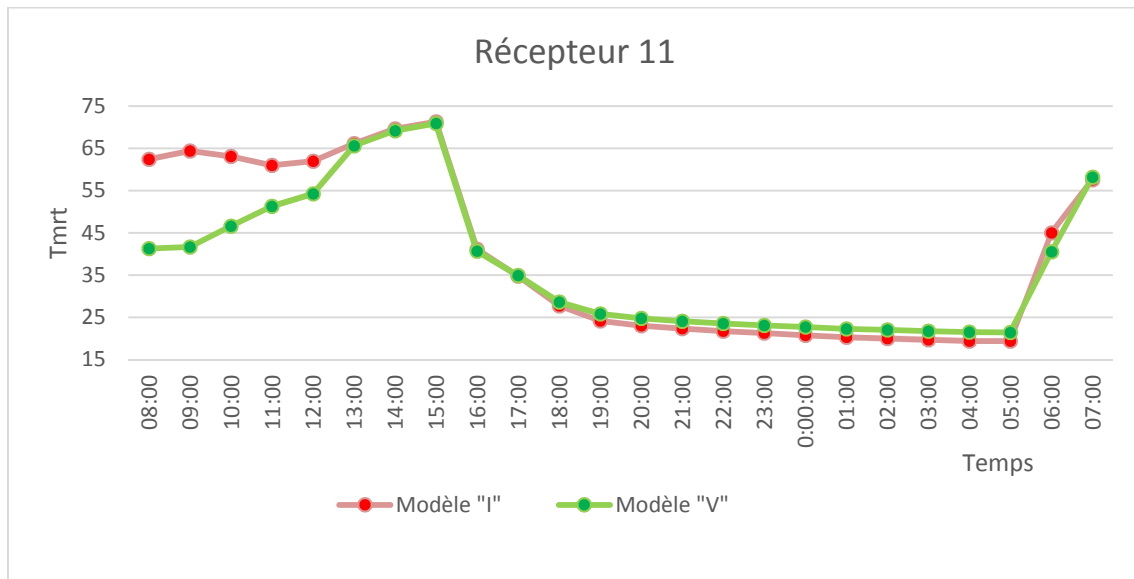


Figure 4.15 : Variation de la Tmrt pour le modèle vert “V” (en vert) et le modèle initiale “I” (en rouge) pour le récepteur 2.

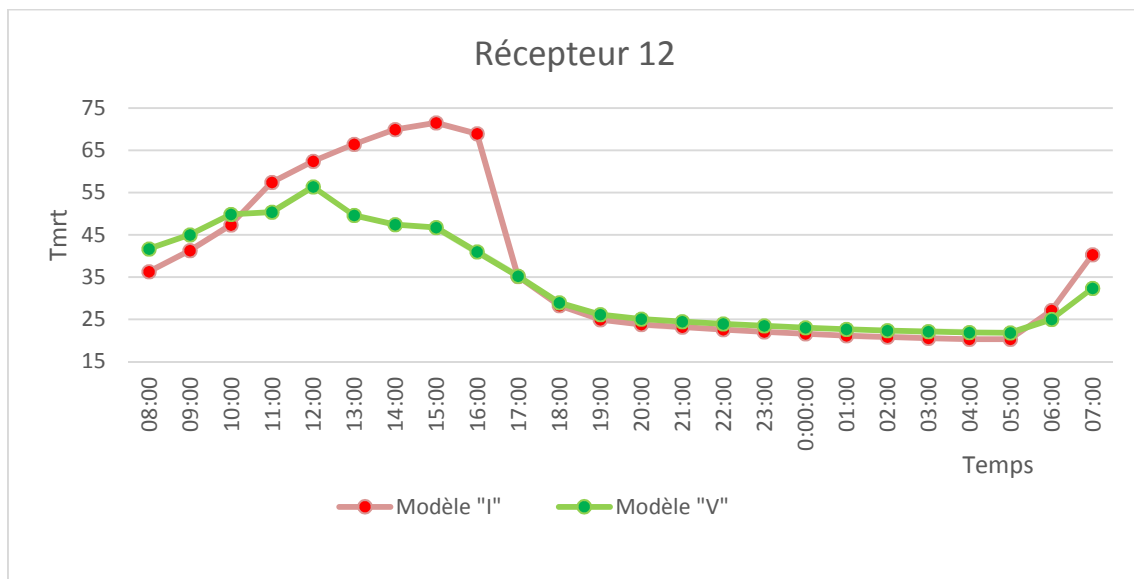


Figure 4.16 : Variation de la Tmrt pour le modèle vert “V” (en vert) et le modèle initiale “I” (en rouge) pour le récepteur 6.

Nous présentons ci-après les cartes spatiales montrant l’écart de la température radiante entre le projet initial et le modèle vert pour le jour et la nuit. Nous rappelons aussi que ces cartes sont

extraites pour une hauteur de 1.75m par rapport au sol, afin d'analyser les résultats au niveau du confort des piétons. Les cartes de la figure 4.18 montrent que les zones vertes rajoutées ont conduit à des températures radiantes plus faibles durant le jour. L'écart maximal a été observé aux alentours des pins et des Albizzias, souligné par les taches bleues des cartes de la figure 4.18. Cet écart peut atteindre ponctuellement sous les arbres, environ 30 °C à 15 :00. L'effet d'ombrage causé par les arbres conduit à une forte diminution de la température radiante. D'autre part, à 17 :00 l'après-midi, la réduction importante de la température radiante est observée sur une zone spatiale plus grande et non pas uniquement ponctuelle sous les arbres, indiquant une extension de l'effet de fraîcheur.

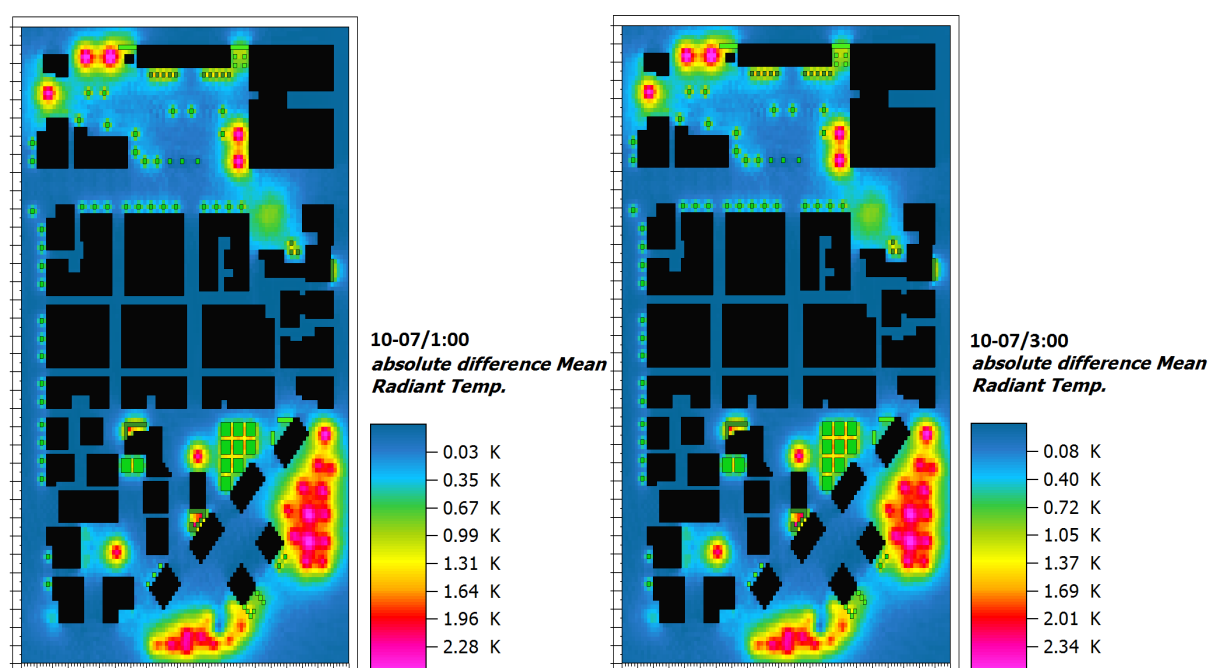


Figure 4.17 : Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Vert" et le modèle initial pour la nuit, à 1 :00 et 3 :00.

Contrairement aux résultats obtenus durant la journée, un écart positif local a été observé la nuit dans les espaces situées sous et autour des arbres. L'effet du piégeage radiatif sous la canopée des arbres contribue à cette augmentation de la température radiante. En effet les alentours des arbres absorbent une certaine quantité de chaleur durant la journée et cette chaleur reste piégée pendant la nuit.

La Figures 4.17 montre que la Tmrt relative au modèle vert, a augmenté d'environ 2 °C à 20 :00 le soir aux alentours et sous les arbres (taches rouges), et atteint un écart maximal de 3 °C à 1 :00.

L'effet de la végétation sur le confort thermique extérieure sera analysé dans le chapitre 5 en calculant la variation de l'indice « PET ».

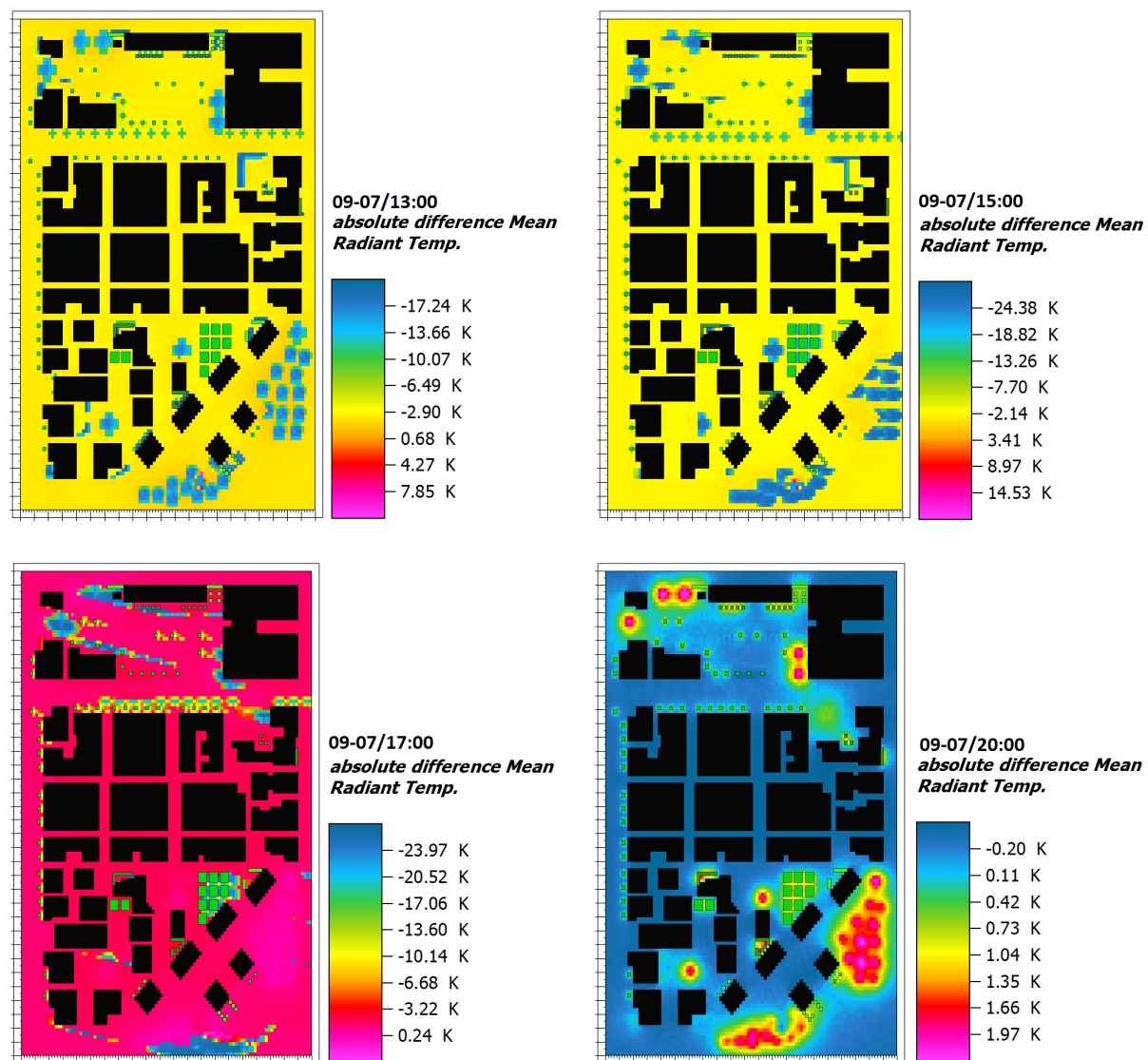


Figure 4.18 : Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Vert" et le modèle initial pour le jour, à 13 :00, 14 :00 et 15 :00.

4.2 Etude de la modification de l'albédo

Etant donné que la configuration initiale du quartier est très minéralisée, il est important de travailler sur les caractéristiques thermiques des matériaux recouvrant les bâtiments et les rues de ce quartier. Ce chapitre présente l'effet du changement de l'albédo sur les paramètres microclimatiques dans le but d'identifier son pouvoir de rafraîchissement au niveau du quartier.

4.2.1 Modèle du quartier semi-blanc

Le modèle semi-blanc est défini par le changement de l'albédo uniquement pour les routes et trottoirs du quartier ; les façades des bâtiments n'ont pas été modifiées par rapport au cas initial. Le revêtement des routes est modifié en adoptant l'asphalte à texture rouge à la place de l'asphalte ordinaire, ayant un albédo plus élevé. L'albédo de l'asphalte rouge est de 0.5 alors que celui de l'asphalte ordinaire est de 0.2. Ce type d'asphalte est souvent utilisé au Japon dans les zones de fusion des routes pour alerter le conducteur de faire attention aux intersections de ces routes. Dans notre étude, nous intéressons au potentiel réfléchissant de ce matériau et son effet sur l'ICU. De même, un revêtement plus clair est choisi pour les trottoirs en utilisant un béton plus clair ayant un albédo de 0.8 au lieu de 0.4. Le tableau 4.3 montre l'albédo et l'émissivité des routes et des trottoirs pour le modèle semi-blanc et le modèle initial.

Tableau 4.3 : Albédo des surfaces modifiées dans le modèle semi-blanc

Modèle	Surface	Albédo	Emissivité
Modèle Initial	Route en asphalte	0.2	0.9
	Trottoirs en béton (dirty concrete)	0.4	0.9
Modèle semi-blanc	Route en asphalte rouge	0.5	0.9
	Trottoirs en béton clairs	0.8	0.9

Dans le modèle initial, la surface des routes en asphalte noir représente environ 63 % de la surface totale du modèle alors que le pourcentage des trottoirs est de 3 %. Ainsi, les surfaces des routes et des pavements dont l'albédo a été changé représentent presque les 2/3 de la surface totale du modèle, les surfaces restantes du modèle sont des zones bâties. La Figure 4.19 présente le modèle « semi-blanc » créé par ENVI-met. Les parties roses du modèle indiquent les routes en asphalte rouges, alors que les parties grises sont les zones en bétons clairs. La Figure 4.20 montre clairement que les routes sont transformées en routes en asphalte à textures rouges alors que les trottoirs, les pavements et les cours devant les bâtiments sont transformés en béton clair.

Les nouvelles surfaces couvrant le quartier sont illustrées dans le tableau 4.4 en indiquant la fraction de chaque surface.

Tableau 4.4: Pourcentage des surfaces couvrant le quartier « Semi-blanc »

Cas étudié de la région Dora	Bâtiments	Route en asphalte rouge	Surfaces en béton clair	Surfaces végétalisées	Total
Surface (m2)	24875	39343	9060	222	73500
Pourcentage (%)	33.8	53.6	12.3	0.3	100

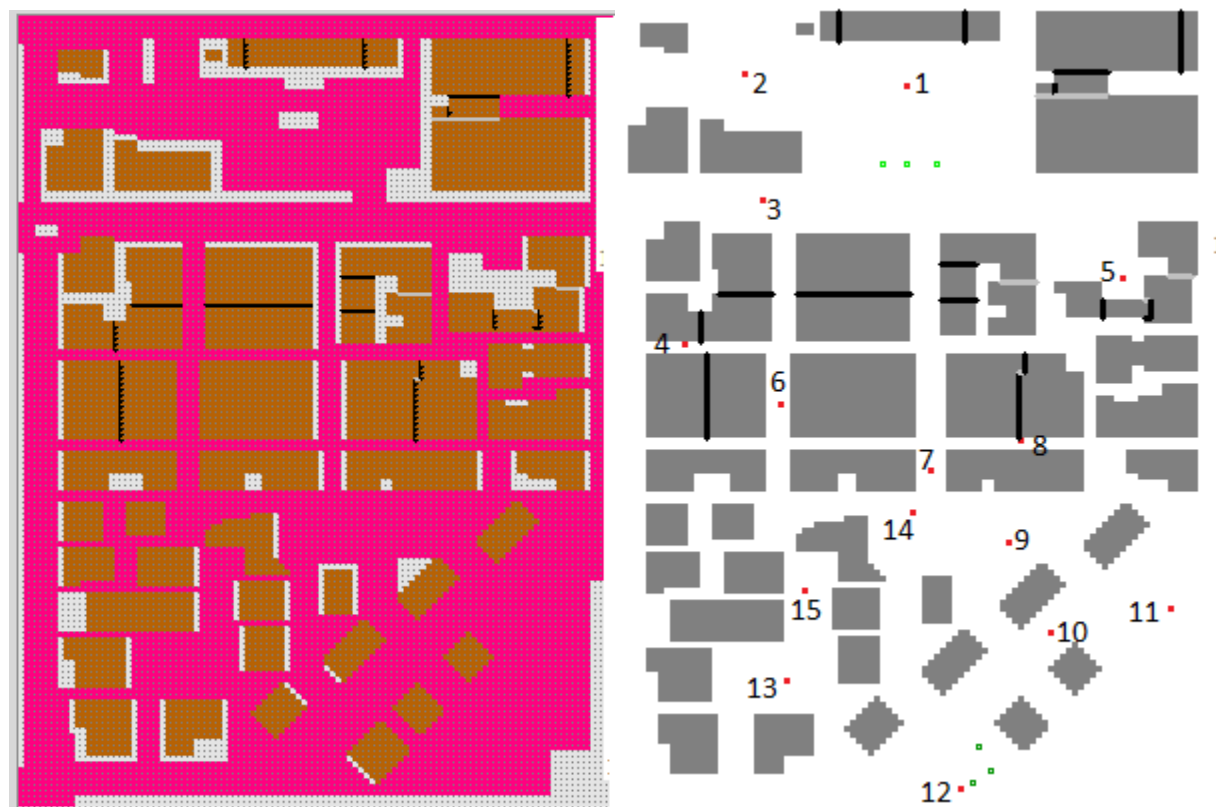


Figure 4.19: Le modèle semi-blanc créé par ENVI-met montrant les routes en asphalte rouge (parties roses), les pavements et les zones en bétons clairs (parties grises).

Dans ce qui suit, nous étudions l'effet du changement de l'albédo des routes et des pavements sur les variables microclimatiques. Le modèle 3D créé avec ENVI-met et les positions des récepteurs sont représentés sur la figure 4.20. Les conditions initiales, les conditions aux limites et la durée de la simulation du nouveau modèle sont les mêmes que celles utilisées dans le modèle initial.

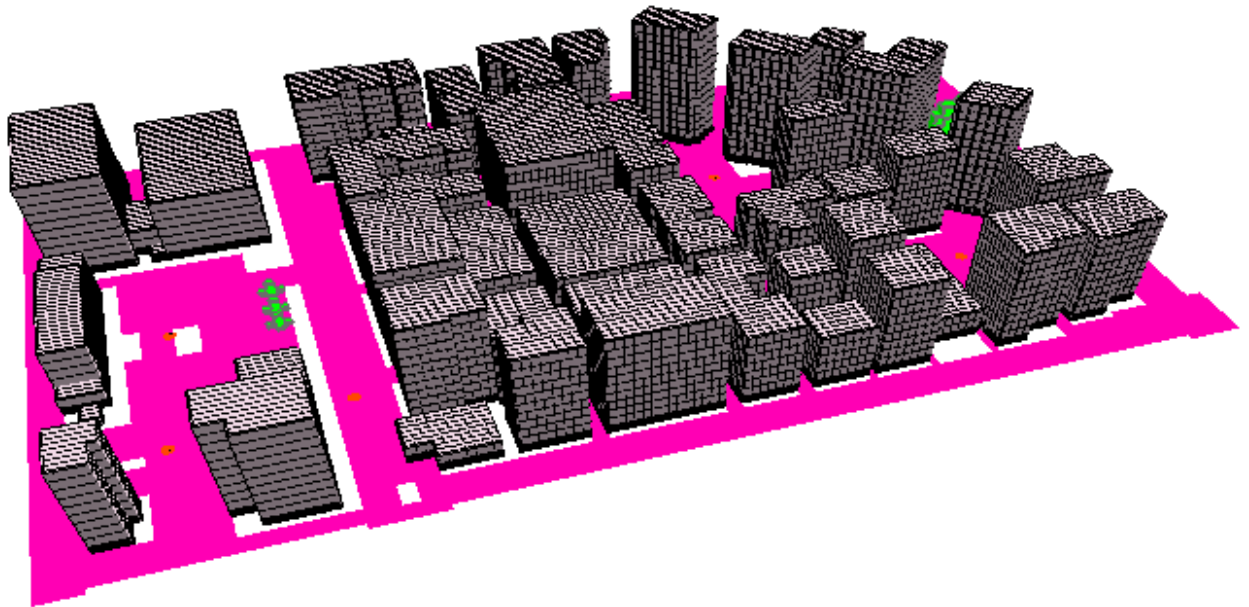


Figure 4.20: Le modèle 3D « semi-blanc » crée à l'aide d'ENVI-met; les blocs gris représentent les bâtiments, la surface rose représente les routes en asphalte rouge, la couleur blanche indique les zones en béton clair, alors que les cercles oranges sont les 15 récepteurs installés.

4.2.1.1 Effet sur la température de l'air :

La variation temporelle de la température ambiante dans le modèle « semi-blanc » à une hauteur de 1.75 m est représentée sur les Figures 4.21, 4.22 et 4.23 pour chacun des récepteurs (1), (4) et (12). En examinant les graphes, on peut constater que le modèle « semi-blanc » peut générer des nuits un peu plus fraîches que le modèle initial. Par exemple, à minuit une diminution de température a été observée pour les 3 récepteurs ; cet écart est maximal pour le récepteur (1) et atteint une valeur de 0.2 °C.

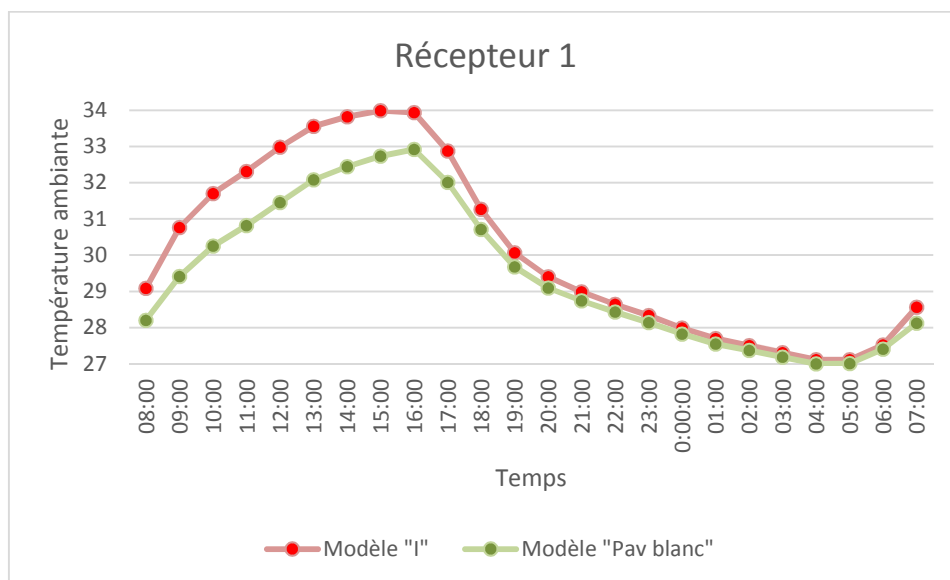


Figure 4.21: Variation de la température de l'air ambiant pour le modèle « semi-blanc » (en bleu foncé) et le modèle initial "I" (en rouge) pour le récepteur 1.

Durant la journée, l'effet de rafraîchissement a été observé respectivement pour les 3 récepteurs. L'écart maximal a été observé à midi 15 :00 pour atteindre 1.61 °C pour le récepteur (12), 1.53 °C pour le récepteur (1) et 1 °C pour le récepteur (4). L'utilisation d'un fort albédo pour les revêtements du sol a bien influencé sur la température ambiante des récepteurs et a conduit à une diminution importante de Ta durant la journée.

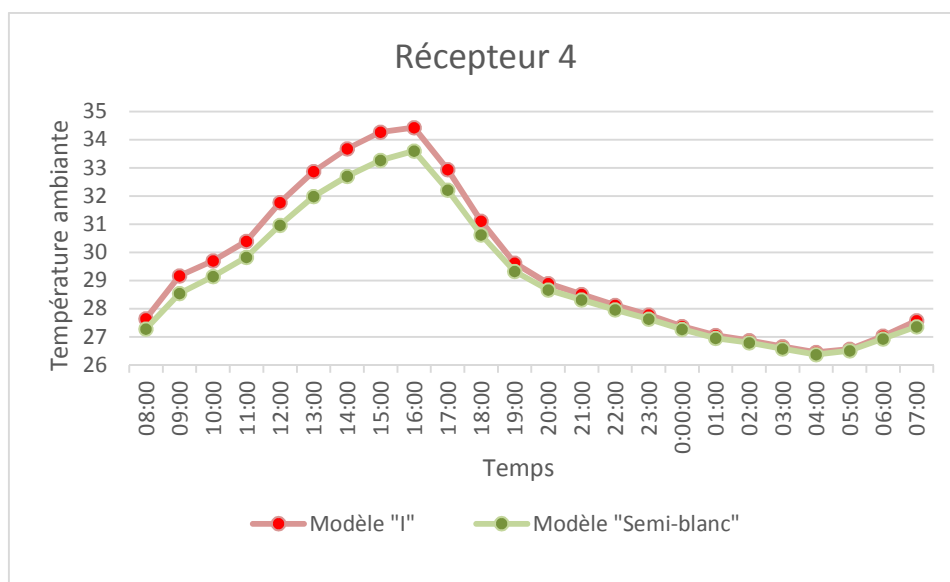


Figure 4.22: Variation de la température de l'air ambiant pour le modèle « semi-blanc » (en bleu foncé) et le modèle initial "I" (en rouge) pour le récepteur 4.

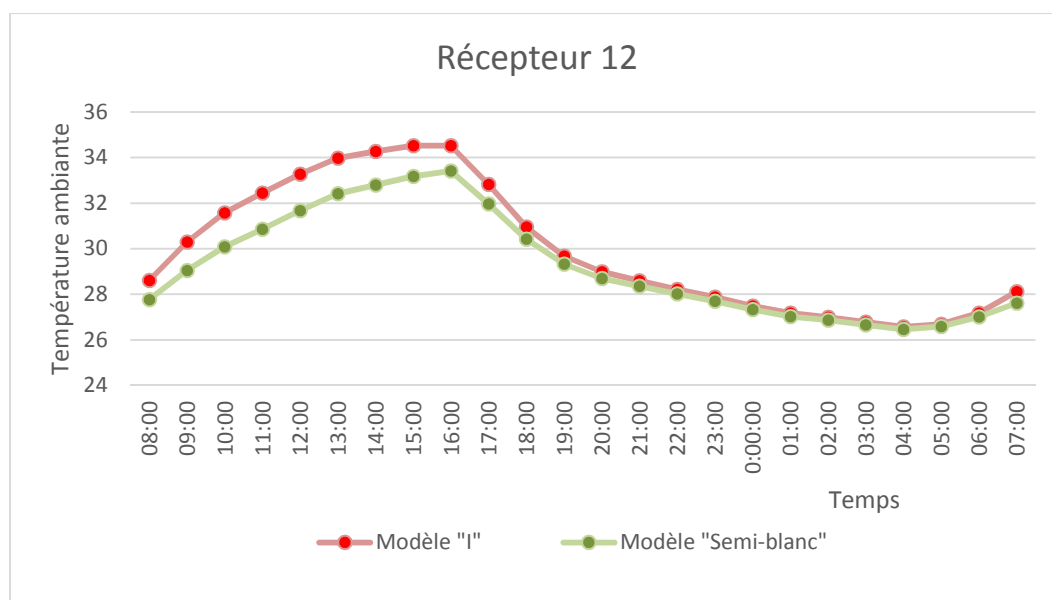


Figure 4.23: Variation de la température de l'air ambiant pour le modèle « semi-blanc » (en bleu foncé) et le modèle initial "I" (en rouge) pour le récepteur 12.

L'effet du dispositif « semi-blanc » sur la température ambiante, dépend de la configuration urbaine et varie selon la position des récepteurs installés. Son effet de rafraîchissement maximal a été observé pour les récepteurs (1) et (12) où le FVC est supérieur à celui des récepteurs (4). Pour mieux comprendre l'influence du changement de l'albédo du revêtement du sol sur la température de l'air ambiant de tout le quartier étudié, les cartes de distribution spatiale de l'écart de T_a entre les deux modèles sont extraites pour quatre différents instants de la journée : 13:00 et 15:00 le jour, 1:00 et 3 :00 la nuit (Figure 4.24). En examinant les cartes de la Figure 4.24, il est bien clair que le modèle semi-blanc peut générer des nuits un peu plus fraîches que le modèle initial dans l'ensemble du quartier. A 1 :00 la nuit, l'effet maximal est observé dans certaines zone du quartier (taches bleues) et la diminution de température peut atteindre une valeur de 0.25 °C. D'autre part, durant la journée, on peut remarquer une importante diminution de la température qui atteint un maximum de 2.35 °C à 13 :00.

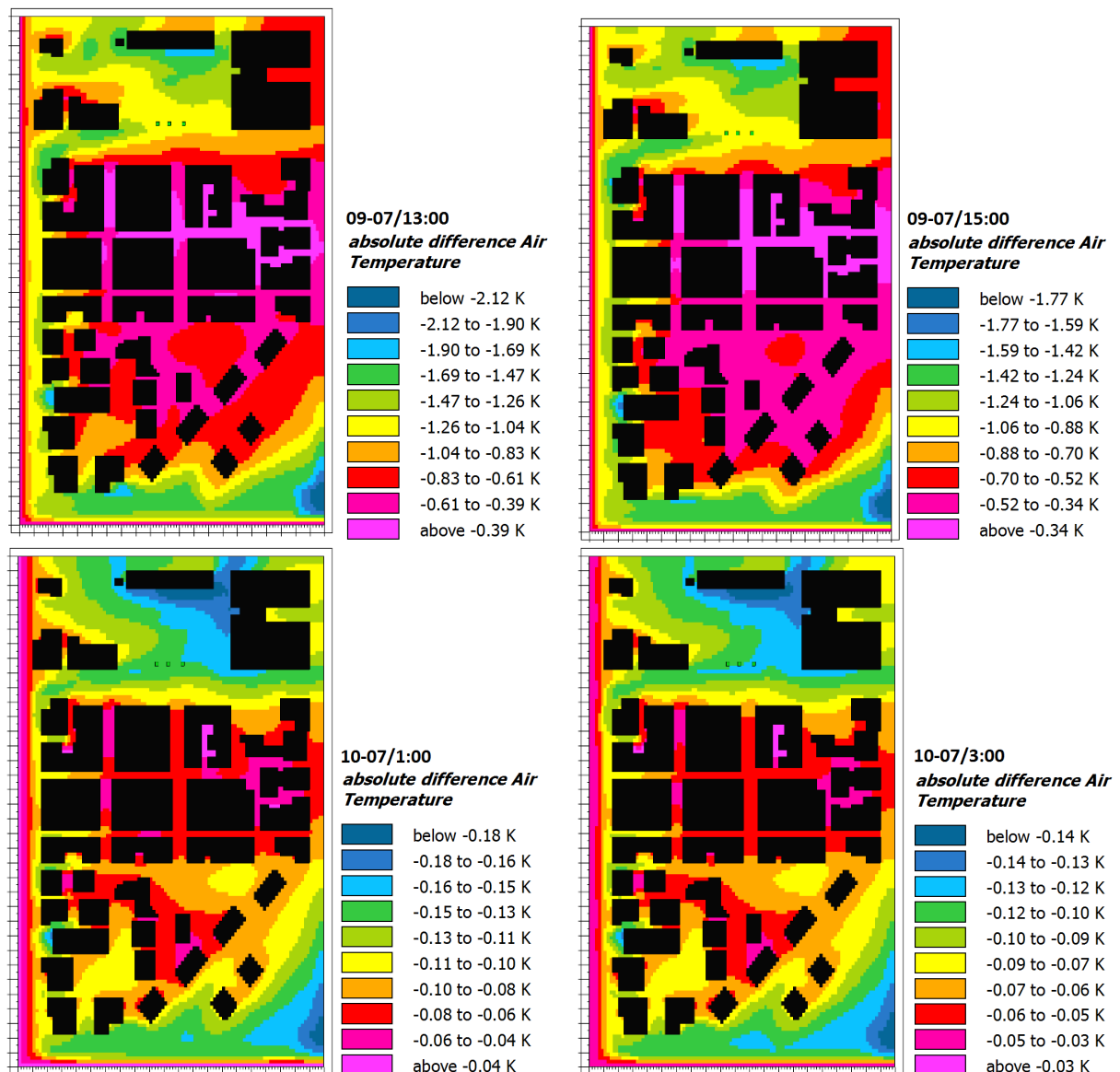


Figure 4.24: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Semi-blanc" et le modèle initial à 1 :00 et 3 :00 (la nuit), et 13:00 et 15:00 (le jour).

Il est bien clair que l'effet de fraîcheur est maximal sur les routes principales et les zones à FVC élevé, par contre l'effet du dispositif « semi-blanc » est moins efficace dans les zones compactes à faible facteur de vue de ciel (taches rouges et roses). Nous rappelons que l'albédo des bâtiments (murs et toitures) est faible ainsi que le facteur de vue de ciel, ce qui conduit au piégeage des rayonnements solaires. Les graphes de la Figure 4.25 montrent clairement que la diminution de la température est bien affectée par le facteur de vue de ciel le jour comme la nuit ; le coefficient de corrélation est d'environ 0.88 à 13 :00 le jour et 1 :00 la nuit.

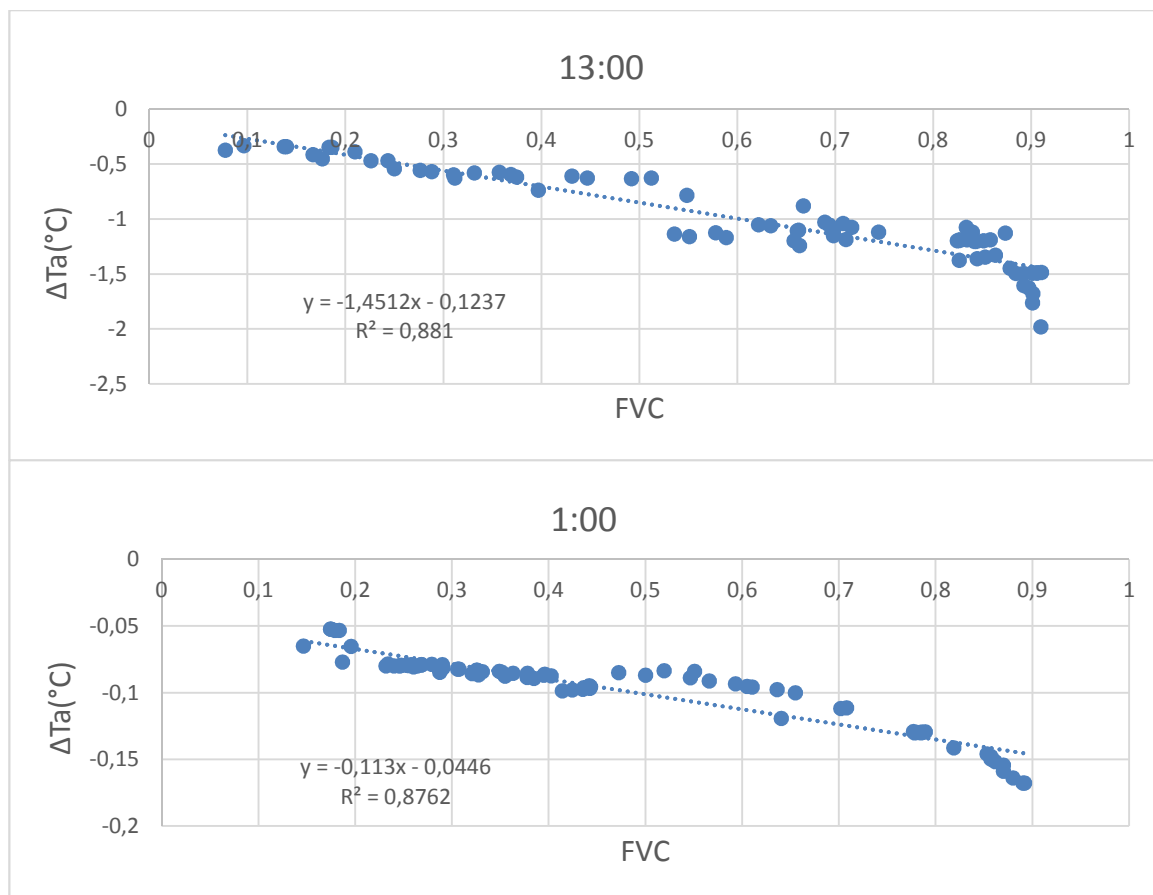


Figure 4.25: Graphes montrant la variation de l'écart de température en fonction du FVC à 13:00 le jour et 1:00 la nuit.

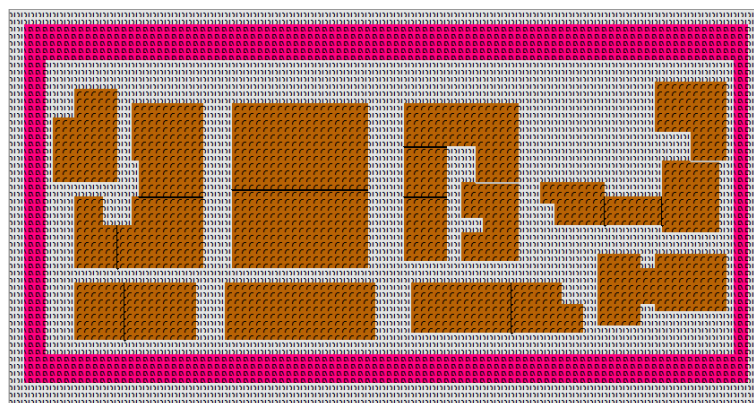


Figure 4.26: Sous-modèle semi-blanc.

Dans le cas de notre quartier « Dora », le dispositif « semi-blanc » présente une solution efficace pour lutter contre l'ICU, en conduisant à la diminution de la température ambiante surtout durant la journée.

Il est à noter que la valeur d'albédo et le pourcentage des surfaces dont la l'albédo a changé doit être optimisé pour obtenir de meilleurs résultats. En effet l'efficacité du dispositif « semi-blanc » dépend notamment de la morphologie du quartier et de l'interaction rayonnement-surface et de la valeur d'albédo adoptée. La Figure 4.26 montre un sous-modèle du quartier dont la proportion des surfaces à béton clair (albédo 0.8) sont augmentées (45.9 %), restant 19.3 % des routes en asphalte et 34.8 % de surfaces bâties. Les résultats de la simulation ont montré un effet particulier : une augmentation de la température autour des bâtiments durant le jour, par contre une diminution de T_a la nuit (Fahed, et al., 2017). Pour cela, le choix d'une élévation d'albédo des surfaces de quartier d'une façon aléatoire ne conduit pas toujours à lutter contre l'ICU, ceci étant dû à la complexité des phénomènes physiques à l'échelle du quartier et à l'interaction entre ses différents éléments.

4.2.1.2 Effet sur l'humidité spécifique

La Figure 4.27 montre les cartes de la distribution spatiale de l'écart de l'humidité spécifique (g/kg) entre le modèle « semi-blanc » et le modèle initial. En examinant les cartes, nous remarquons une homogénéité de la variation de l'humidité qui est presque négligeable durant la nuit. Durant le jour, une légère diminution de l'humidité spécifique est observée. L'écart maximal atteint une valeur de 0.18 g/kg à 13:00, alors qu'il atteint une valeur de 0.02 g/kg à 1:00 minuit. Comme attendu, le changement de l'albédo du revêtement du sol n'a presque aucun effet sur l'humidité spécifique surtout la nuit.

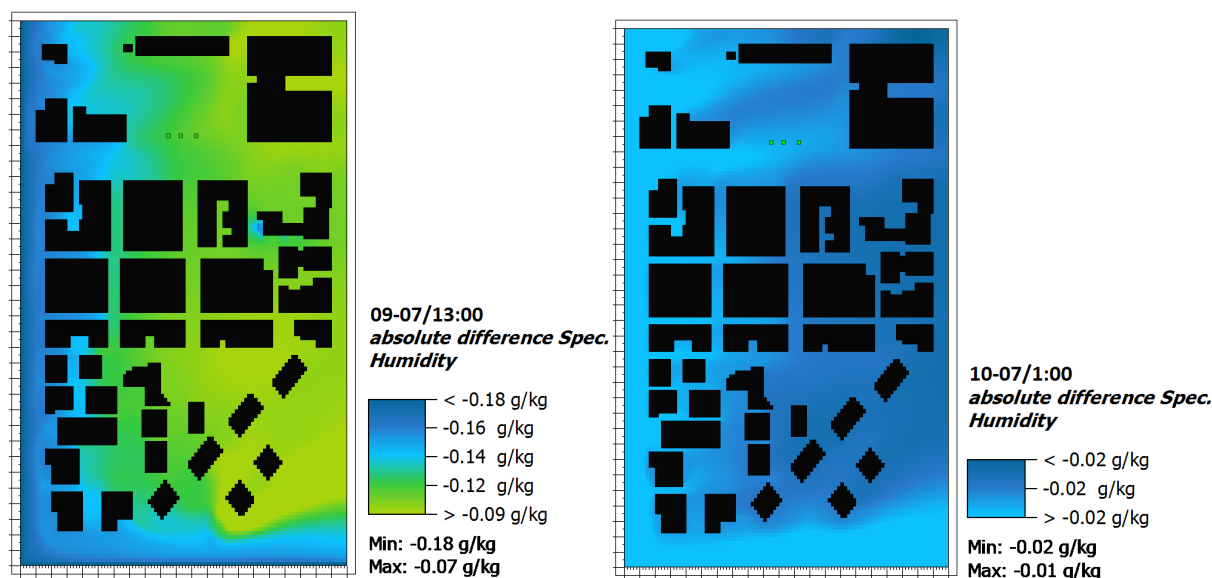


Figure 4.27: Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « semi blanc » et le modèle initial à 13 :00 le jour et à 1 :00 la nuit.

4.2.1.3 Effet sur la température moyenne radiante

Dans cette partie, nous présentons l'effet du modèle « semi blanc » sur la température moyenne radiante au travers des cartes microclimatiques montrant l'écart de la température moyenne radiante entre le modèle « semi blanc » et le modèle initial pour des différentes heures de la journée. Il est à noter que les résultats sont toujours présentés pour une hauteur de 1.75m au-dessus du sol. Durant les heures ensoleillées de la journée et surtout durant la période de l'après-midi, il est remarquable que l'utilisation des revêtements du sol à fort albédo a causé une augmentation de la température moyenne radiante sur tout le quartier.

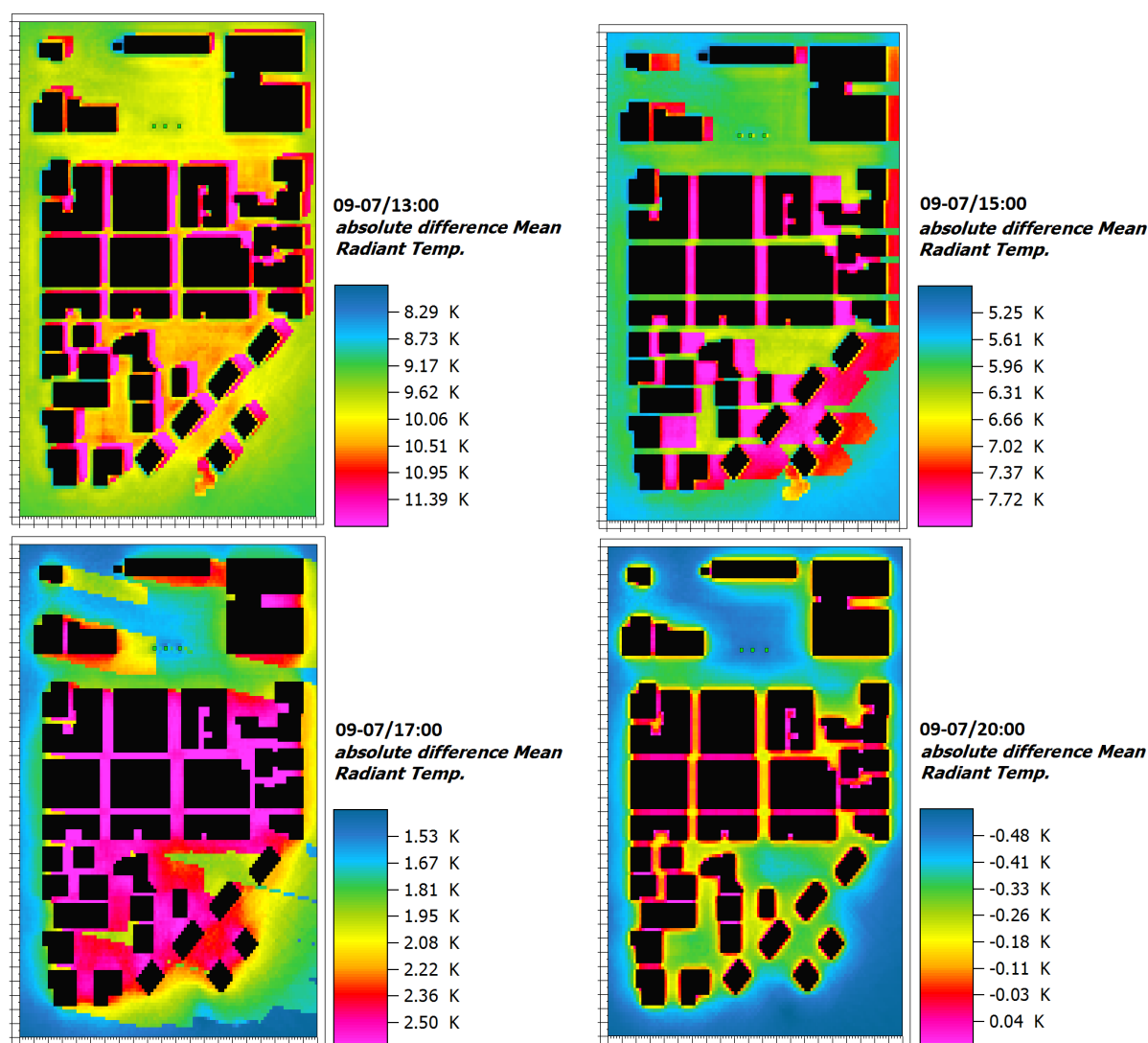


Figure 4.28: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Semi blanc" et le modèle initial, à 13:00, 15:00 et 17:00, 20:00 .

La Figure 4.28 montre les cartes indiquant l'écart de la Tmrt durant la période de l'après-midi à 13 :00 à 15 :00 et 17 :00. Durant cette période, l'augmentation de la Tmrt est plus importante dans les zones proches des bâtiments que dans les routes principales et les cours devant le centre médical. Tout autour des bâtiments, l'augmentation de la Tmrt atteint un maximum de 12 °C à

13 :00, de 8 °C à 15 :00 et de 2.5 °C à 17 :00. Cette augmentation de la Tmrt est expliquée par le fait que la partie du sol modifié constitue environ 66 % du modèle et que les matériaux de revêtement utilisés possèdent un fort albédo surtout les trottoirs en béton clairs. Comme les matériaux du sol sont plus réfléchissants, les échanges radiatifs sont amplifiés ce qui produit l'augmentation de la Tmrt. Il est à noter aussi que les résultats obtenus dépendent de la forme urbaine du modèle étudié.

A 20 :00, la Figure 4.28 montre que dans les espaces ouvertes et les routes principales il y a eu une diminution de la Tmrt qui atteint environ 0.6 °C dans les routes principales. Alors que tout autour des bâtiments, un faible écart positif est observé qui atteint dans certains endroits une valeur maximale de 0.2 °C.

Inversement, la nuit, nous trouvons des températures moyennes radiantes un peu plus faibles que pour le modèle initial. Cet écart atteint à 1 :00 le soir un maximum d'environ 0.3 °C, et est de 0.25 °C à 3 :00. La réduction des températures de surfaces et la chaleur qui est facilement dissipée, conduisent à cette diminution de la Tmrt.

Nous remarquons aussi, qu'il a un très faible écart positif (+ 0.1 °C) la nuit juste tout autour de certains bâtiments. La forme de ces bâtiments peut empêcher la dissipation de la chaleur et ce qui peut causer cette faible augmentation.

Nous rappelons enfin qu'une augmentation exagérée de l'albédo avec de grands pourcentages de zones modifiées, ne constitue pas toujours une solution efficace. En effet, dans le sous-modèle de la figure 4.26, la modification des surfaces en utilisant le béton clair (albédo 0.8) dans la plupart des routes a conduit à une augmentation très importante de la température moyenne radiante qui atteint les 40 °C à 13 :00. Et par suite cette augmentation de Tmrt provoque un grave inconfort extérieur du piéton. Cependant une stratégie de limitation d'UCI se basant sur la modification de l'albédo doit être optimisée tout en tenant en compte la valeur de l'albédo des matériaux choisis, le pourcentage des surfaces modifiées et la forme urbaine du quartier étudié.

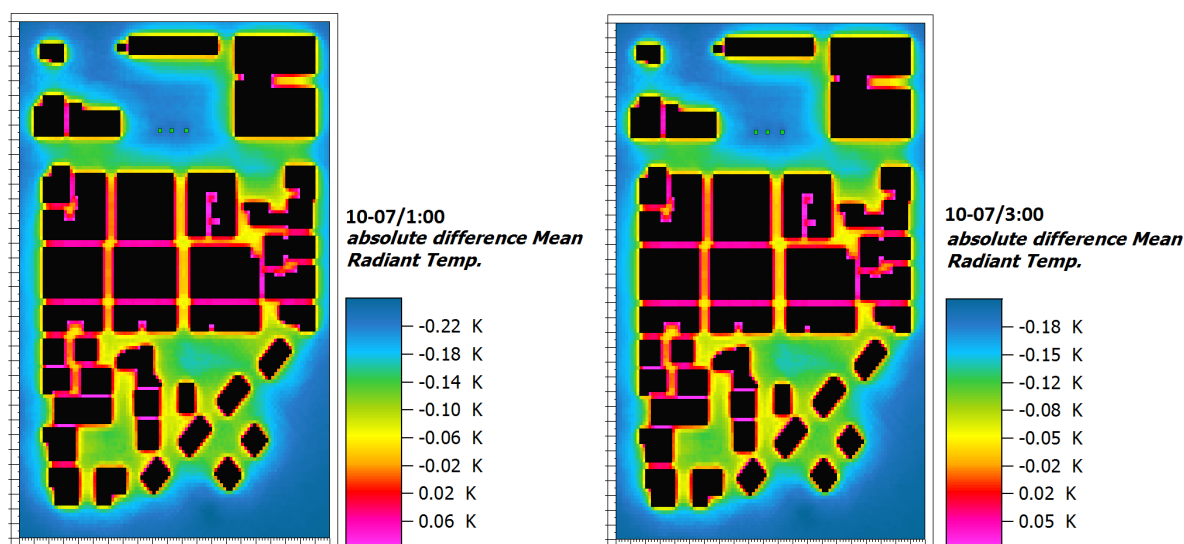


Figure 4.29: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Semi blanc" et le modèle initial la nuit à 1:00 et 3:00.

4.2.2 Modèle «Bâtiment Blanc»

Le but de ce modèle est de mettre en évidence l'effet de l'augmentation de l'albédo des façades et des toitures des bâtiments sur le microclimat urbain. Ce modèle est caractérisé par la modification de l'albédo des façades en remplaçant les murs de béton par des façades en PVC ayant un albédo de 0.7. Les toitures sont aussi modifiées en les recouvrant par des tuiles « Terracotta ». Le Tableau 4.5 montre l'albédo et l'émissivité des matériaux couvrant les bâtiments dans le modèle « Pavement blanc ». Nous rappelons que dans le modèle initial l'albédo des toitures et des façades est supposé constant et égal à 0.3. Il est à noter aussi que dans ce modèle il n'y a aucun changement au niveau des routes et des pavements. Le modèle 3D « Bâtiment blanc » est illustré dans la Figure 4.30.

Tableau 4.5: Albédo des façades et des toitures des bâtiments dans le modèle "Bâtiment blanc"

Modèle "Blanc"	Matériaux	Albédo	Emissivité
Toitures des bâtiments	Terracotta	0.5	0.9
Façades des bâtiments	PVC	0.7	0.9

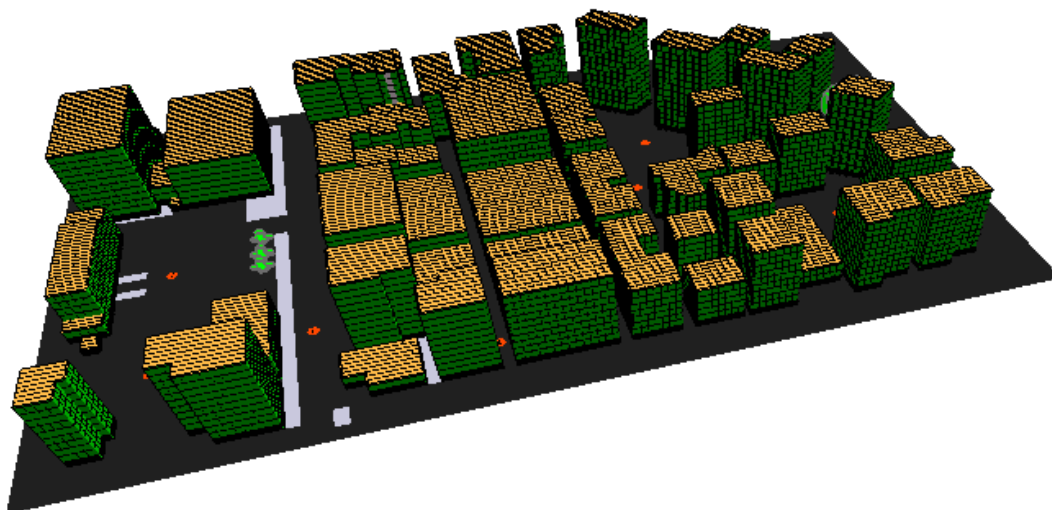


Figure 4.30: Le modèle 3D « Bâtiment Blanc » crée à l'aide d'ENVI-met montrant les nouvelles façades et toitures des bâtiments.

Dans ce qui suit, nous présentons l'influence du modèle « Bâtiment blanc » sur la température de l'air ambiant, l'humidité et la température moyenne radiante.

4.2.2.1 Effet sur la température de l'air

Nous remarquons que le modèle « bâtiment blanc » avec des surfaces de bâtiments à fort albédo, peut générer des nuits un peu plus fraîches, Figure 4.32. A 3 :00 la nuit, une diminution maximale ponctuelle d'environ 0.25 °C est observée. A contrario, durant la journée l'effet de fraîcheur de ce modèle varie selon le lieu considéré dans le quartier. Au centre du quartier une faible diminution de T_a est observée atteignant une valeur maximale de 0.15 °C à 13 :00. Par contre dans les zones ouest et sud du quartier, il est bien clair qu'une légère augmentation de la température a été générée. Contrairement à ce qu'on pourrait attendre, les résultats de la simulation montrent que l'effet de ce dispositif sont négligeables en ce qui concerne la température ambiante. L'efficacité de ce scénario dépend de plusieurs paramètres dont la forme urbaine, le climat étudié et l'albédo du sol et des routes.

Bien que l'effet du modèle «Bâtiment blanc » soit presque négligeable sur la température ambiante, son impact sur les charges de climatisation doit aussi être étudié, car il est probablement très important. Pour aller plus loin, et bien qu'ENVI-met ne puisse pas effectuer ces calculs pour le moment, la diminution des charges conduit à une diminution de l'émission de chaleur provoquée par les pompes à chaleur et par suite ce dispositif conduit d'une façon indirecte à lutter contre l'ICU.

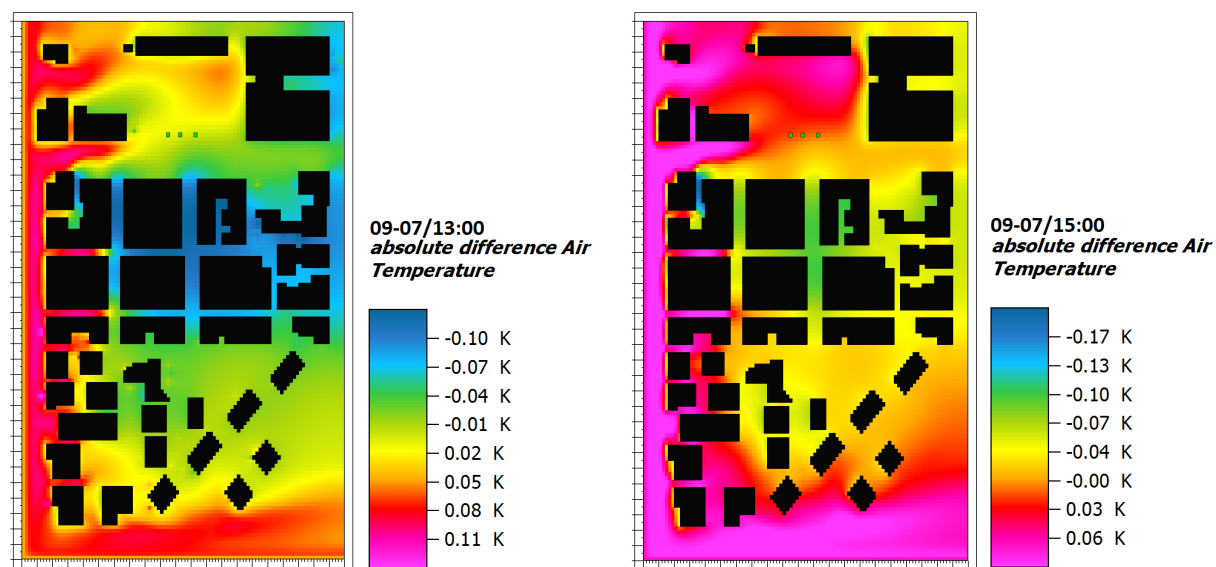


Figure 4.31: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Bâtiment blanc" et le modèle initial à 13:00 et 15:00 (le jour).

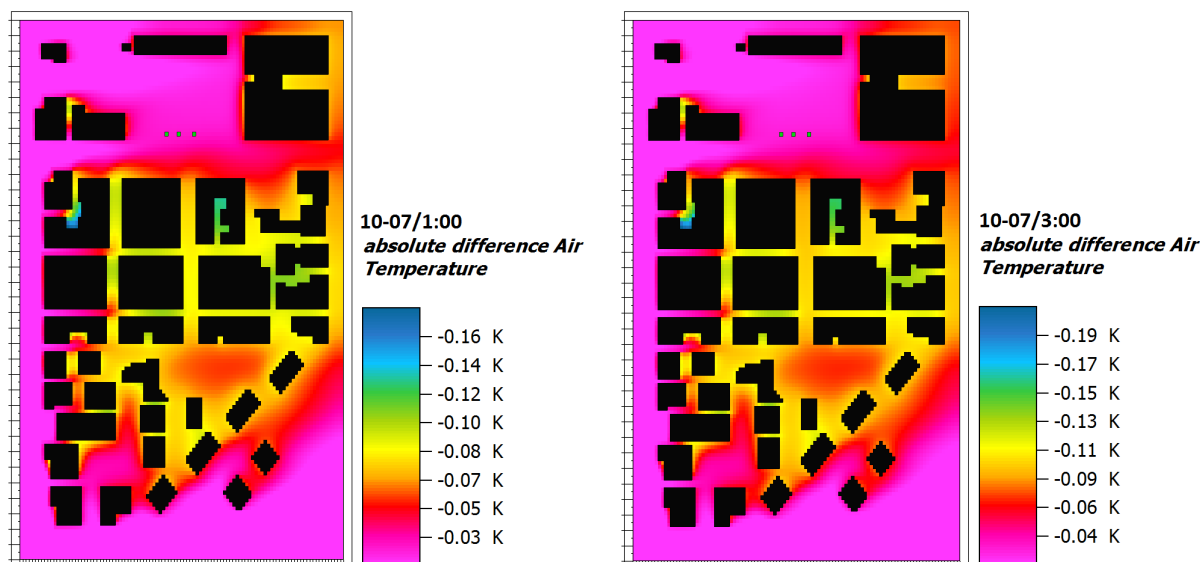


Figure 4.32: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle " Bâtiment blanc" et le modèle initial à 1 :00 et 3 :00 (la nuit).

4.2.2.2 Effet sur l'humidité de l'air

Les résultats présentés dans la Figure 4.33 représentent les cartes de la distribution spatiale de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « bâtiment blanc et le modèle initial à 13 :00 midi et à 1 :00 minuit. Cette Figure montre clairement que ce modèle n'a aucun effet sur l'humidité spécifique la journée comme la nuit dans l'ensemble du quartier.

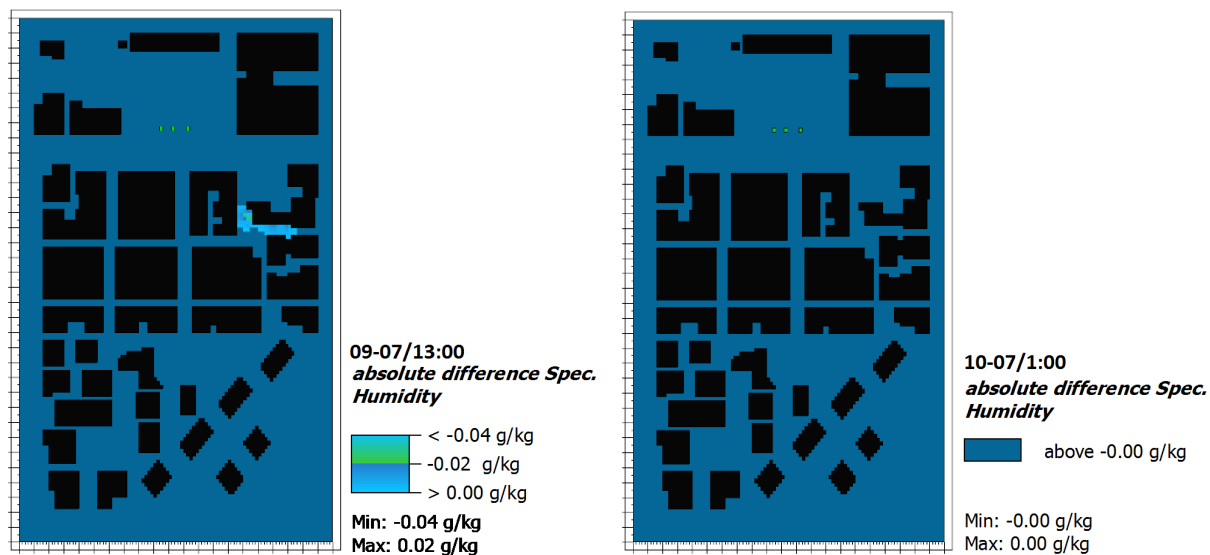


Figure 4.33 : Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « bâtiment blanc » et le modèle initial à 13 :00 le jour et à 1 :00 la nuit.

4.2.2.3 Effet sur la température moyenne radiante

Les Figures 4.34 et 4.35 montrent clairement l'effet contradictoire du modèle « bâtiment blanc » sur la température moyenne radiante entre la nuit et le jour. Contrairement à la température ambiante, l'effet sur la T_{mrt} est plus marquant. Comme prévu, des températures radiantes plus importantes que pour le cas de base sont observées durant la journée, les échanges radiatifs étant amplifiés avec les surfaces à fort albédo. La variation est hétérogène et semble maximale dans les zones à faible facteur de vue de ciel. L'écart le plus significatif est observé dans les espaces immédiats des bâtiments où la chaleur radiante est en majorité réfléchie, ce qui contribue à cette augmentation de T_{mrt} et atteint environ un écart de 6 °C dans ces zones dans l'après-midi, figure 4.34. Inversement, la nuit, les températures radiantes sont plus faibles dans tout le quartier ; la chaleur est facilement dissipée par les surfaces des bâtiments. Cette diminution de T_{mrt} est observée aussi dans les zones proches des bâtiments contrairement aux résultats obtenus durant la journée. La figure 4.35 montre qu'une diminution maximale ponctuelle d'environ 1 °C est observée à 3:00 le matin.

Les résultats présentés ci-dessus ont montré clairement que ce dispositif n'a pas présenté la solution attendue pour lutter contre l'ICU bien qu'il ait généré des températures ambiantes et radiantes un peu plus fraîches durant la nuit. Il est à noter aussi que la plupart des bâtiments du quartier possèdent des hauteurs très élevées et par suite l'emploi des toitures à fort albédo n'affecte pas les paramètres microclimatique étudiés à 1.75 m du sol.

Dans ce qui suit, une combinaison de ce dispositif avec le modèle « semi-blanc » sera étudié dans le but d'améliorer la capacité de cette solution à créer des îlots de fraîcheur.

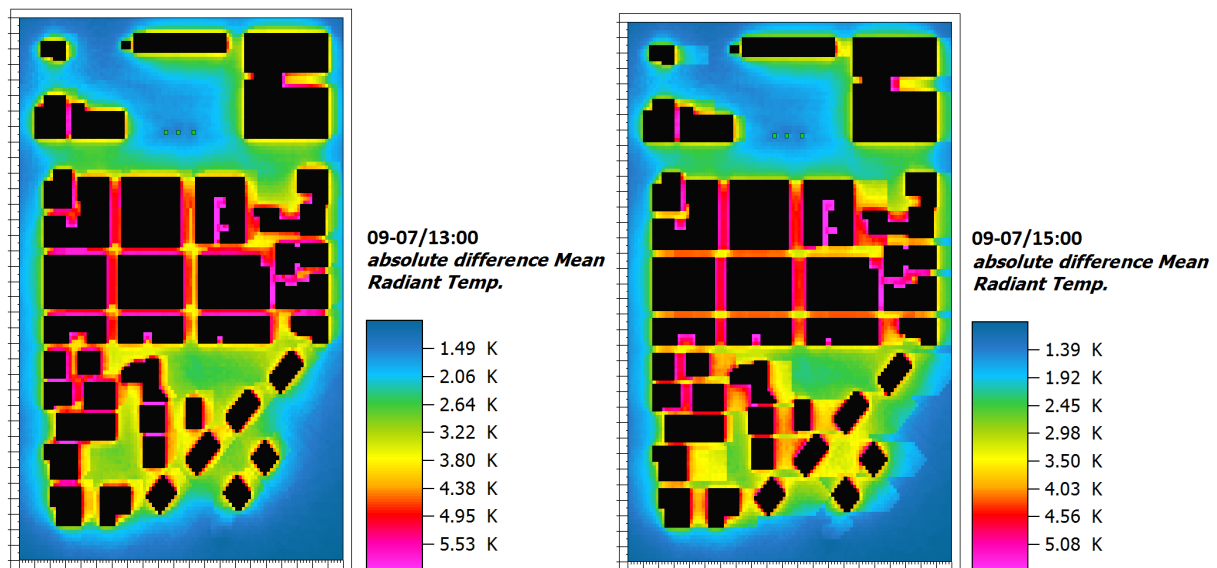


Figure 4.34: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Bâtiment blanc" et le modèle initial, à 13:00, 15:00.

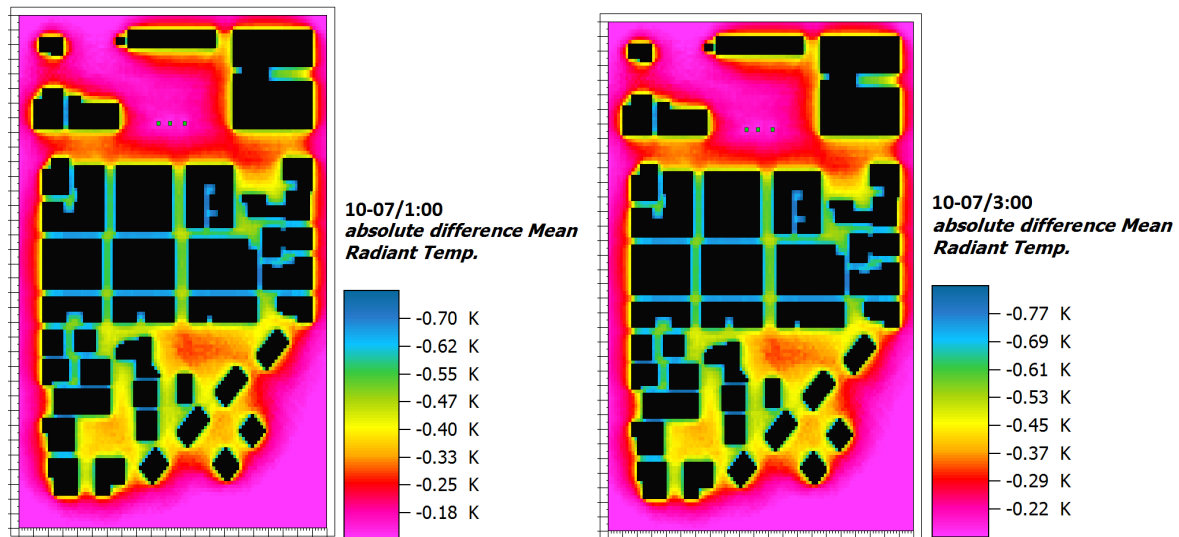


Figure 4.35 : Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Bâtiment blanc" et le modèle initial, à 1:00, 3:00 la nuit.

4.2.3 Modèle du quartier « Blanc »

La simulation d'un nouveau modèle appelé modèle « blanc » a été réalisée sur ENVI-met. Ce modèle est caractérisé par la combinaison du modèle « semi-blanc » (modification de l'albédo des revêtements du sol) et le modèle « bâtiment blanc » (modification de l'albédo des matériaux de construction des façades et des toitures des bâtiments). Les routes sont en asphalte rouge et les trottoirs sont en bétons clairs comme déjà décrit dans le modèle « semi-blanc », le matériau utilisé pour les façades des bâtiments est le « PVC », alors que les toitures sont recouvertes par des tuiles « Terracotta », Figure 4.36. Nous rappelons que les conditions aux limites et les conditions initiales sont les mêmes que celles utilisées dans le modèle initial.

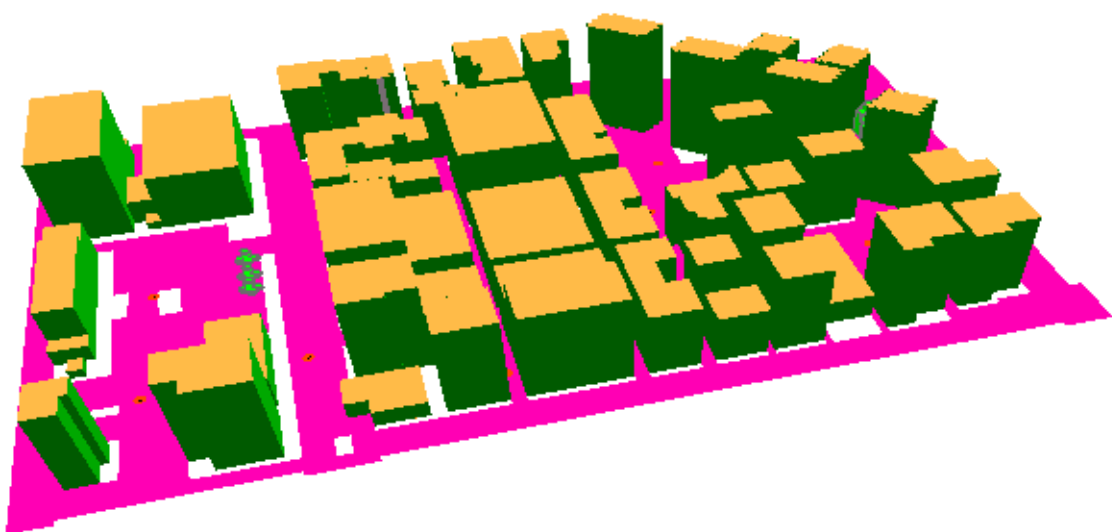


Figure 4.36: Le modèle 3D « Blanc » crée à l'aide d'ENVI-met montrant les nouvelles façades et toitures des bâtiments.

Dans les paragraphes suivants, nous analysons les cartes de la température ambiante et radiante du modèle « blanc ».

4.2.3.1 Effet sur la température de l'air

Dans le but de comparer le modèle « blanc » aux modèles « semi-blanc » et « initial », les Figures 4.37 et 4.38 présentent les cartes de distribution spatiale de l'écart de température ambiante entre ces deux modèles pour la nuit et le jour à une hauteur de 1.75 m du sol. En observant ces Figures, nous remarquons un effet de rafraîchissement durant la journée sur toute la surface du quartier avec une diminution maximale d'environ 2.5 °C entre le modèle « blanc » et le modèle initial. Il est bien clair que la diminution est plus importante dans les zones à fort albédo. D'autre part, l'adoption du modèle « blanc » au lieu du « semi blanc » conduit à une faible diminution de la température d'air durant la journée, surtout au centre du quartier où le FVC est faible et atteint environ un écart de 0.3 °C. Nous rappelons que l'utilisation des façades à surfaces claires n'affecte pas fortement la température ambiante mais contribue toujours à la réduction des charges thermiques.

Durant la nuit, le modèle « blanc » contribue à une faible réduction de la température ambiante par rapport au cas de base. Cet écart est visible autour des bâtiments et atteint 0.35 °C à 1 :00. De même, une réduction de Ta est observée la nuit, en comparant les deux modèles « blanc » et « semi blanc » notamment dans l'environnement proche des bâtiments ; celui-ci atteint un écart négatif ponctuel de 0.3 °C à 1 :00.

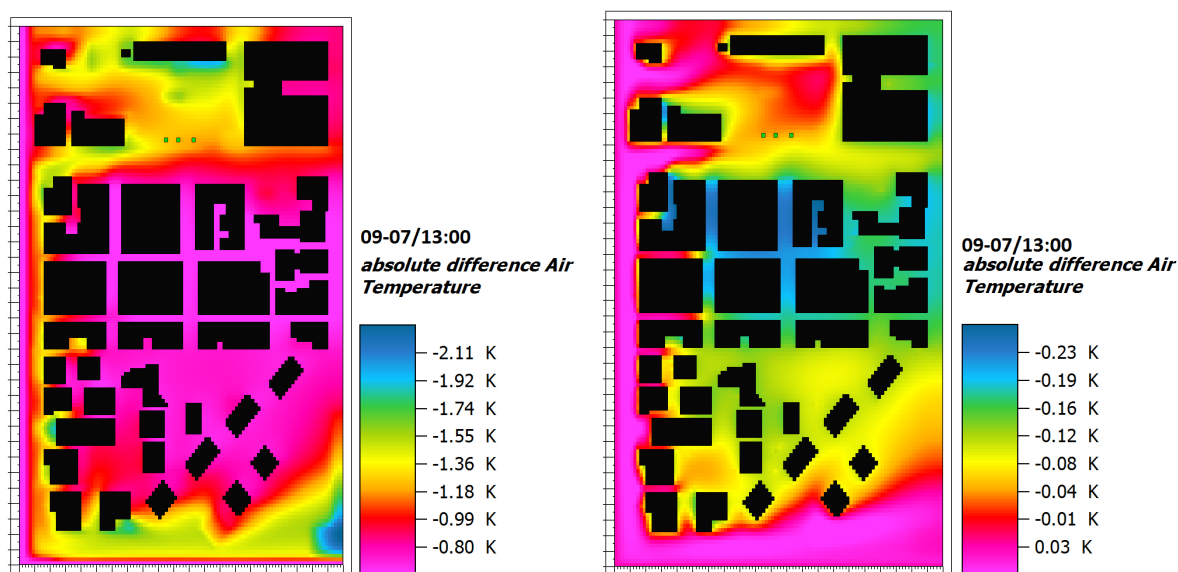


Figure 4.37: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Blanc" et les deux modèles « initiale » (à gauche) et « semi blanc » (à droite) à 13:00 (le jour).

La stratégie du modèle « blanc » qui est basée sur le changement de l'albédo des bâtiments et des revêtements des sols extérieurs, représente une solution efficace pour lutter contre l'îlot de chaleur en termes de température ambiante. L'impact de cette stratégie sur les consommations énergétiques nécessaire pour la climatisation des bâtiments du quartier en été sera étudié en détail dans le chapitre suivant.

En termes d'humidité spécifique, le modèle blanc n'a presque aucun effet sur l'humidité spécifique durant la nuit. Une légère diminution de l'humidité spécifique est observée durant le jour ; à midi l'écart maximal atteint une valeur de 0.17 g/kg entre le modèle « blanc » et le cas de base.

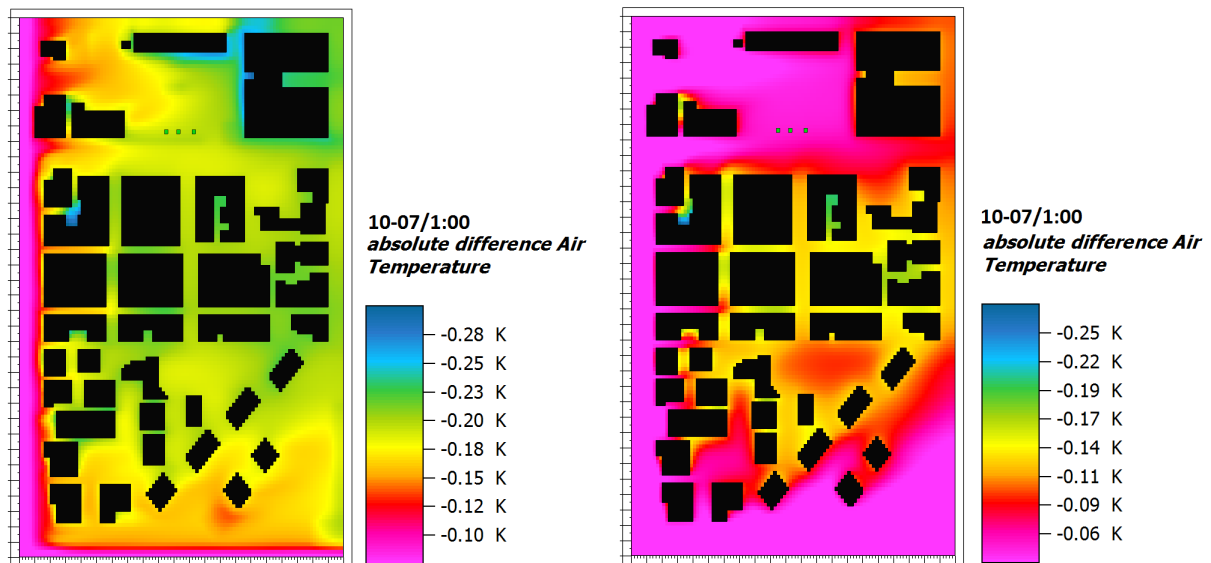


Figure 4.38: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Blanc" et les deux modèles initiale (à gauche) et « semi blanc » (à droite) à 1:00 (la nuit).

Du point de vue de la température ambiante, le modèle a permis de réduire la température surtout durant la journée, mais ce modèle affecte négativement le confort thermique extérieur en augmentant la température radiante, comme nous allons le voir.

4.2.3.2 Comparaison de la température moyenne radiante :

La distribution spatiale de l'écart de T_{mrt} entre le modèle blanc et les modèles « initial » et « semi blanc » pour le jour et la nuit est présentée dans les Figures 4.39 et 4.40. Comme le modèle « semi blanc », le modèle « blanc » présente aussi des effets contradictoires entre les heures de la journée et celles de la nuit. Durant la journée, nous constatons une augmentation de la T_{mrt} qui atteint environ à 21 °C par rapport au modèle initial. Cet écart maximal est observé dans les zones proches des bâtiments où la chaleur radiante est en majorité réfléchi, ce qui contribue au réchauffement de l'air dans ces zones.

A contrario, la nuit, une réduction de la T_{mrt} est observée. A 1 :00, la T_{mrt} diminue dans tout le quartier et atteint une réduction ponctuelle de 1 °C.

Les cartes ci-dessous permettent aussi de comparer la T_{mrt} du modèle « blanc » au modèle « semi blanc ». L'augmentation de l'albédo des bâtiments a causé une augmentation de la T_{mrt} qui atteint environ 10 °C dans certains endroits proches des bâtiments. Comme déjà prévu, durant la nuit, les températures radiantes sont plus faibles par rapport au modèle « semi blanc », cet écart pouvant aller jusqu'à 1.1 °C.

Pour en conclure, l'effet contradictoire du changement d'albédo sur la température radiante a été vérifié dans les deux modèles « blanc » et « semi-blanc ». Ce dispositif a conduit à une

augmentation de la Tmrt et par suite affecte très négativement le confort thermique des piétons durant la journée.

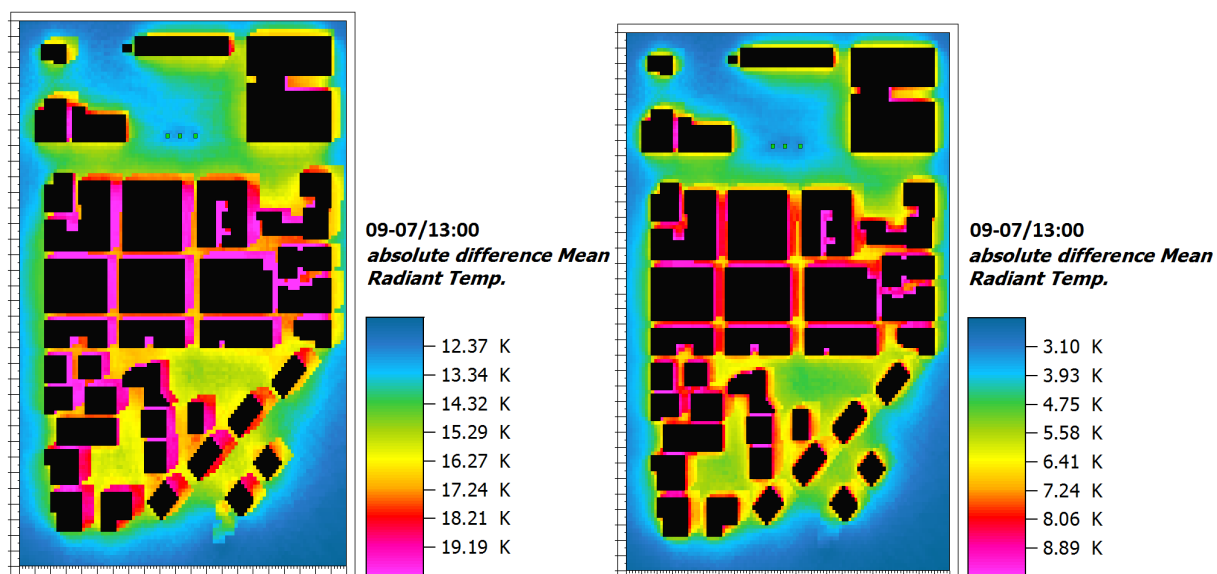


Figure 4.39: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Blanc" et les deux modèles « initiale » (à gauche) et « semi blanc » (à droite) à 13:00 (le jour).

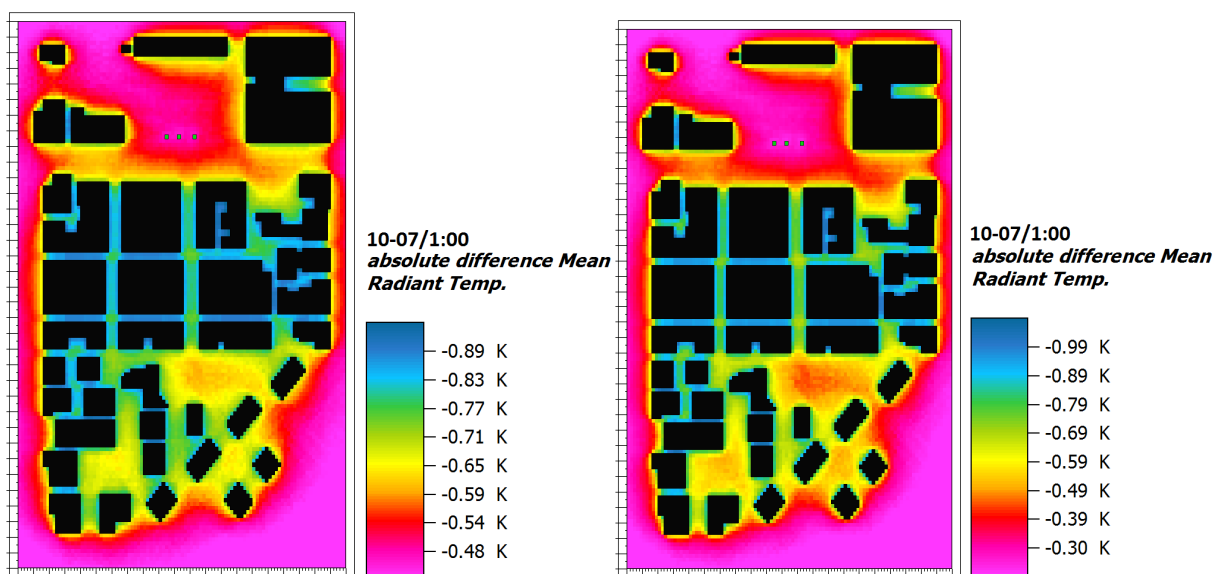


Figure 4.40: Cartes de distribution spatiale de l'écart de la température moyenne radiante entre le modèle "Blanc" et les deux modèles initial (à gauche) et « semi blanc » (à droite) à 1:00 (la nuit).

Pour tenter d'atténuer l'inconvénient de l'effet du modèle blanc sur la température radiante, nous présentons dans ce qui suit, un nouveau modèle qui contribue à limiter cette forte augmentation de Tmrt.

4.2.4 Modèle « Blanc modifié »

Nous proposons dans ce paragraphe des modifications sur le modèle « blanc » dans le but de réduire l'augmentation de la température radiante causée par les surfaces à fort albédo, ce qui constitue l'inconvénient principal des modèles blancs. Ce modèle appelé « Blanc modifié » est illustré en 3D dans la Figure 4.41. Il est bien clair qu'il n'y a pas eu de changement au niveau des revêtements du sol et des toitures des bâtiments qui restent similaires à ceux du modèle « blanc ».

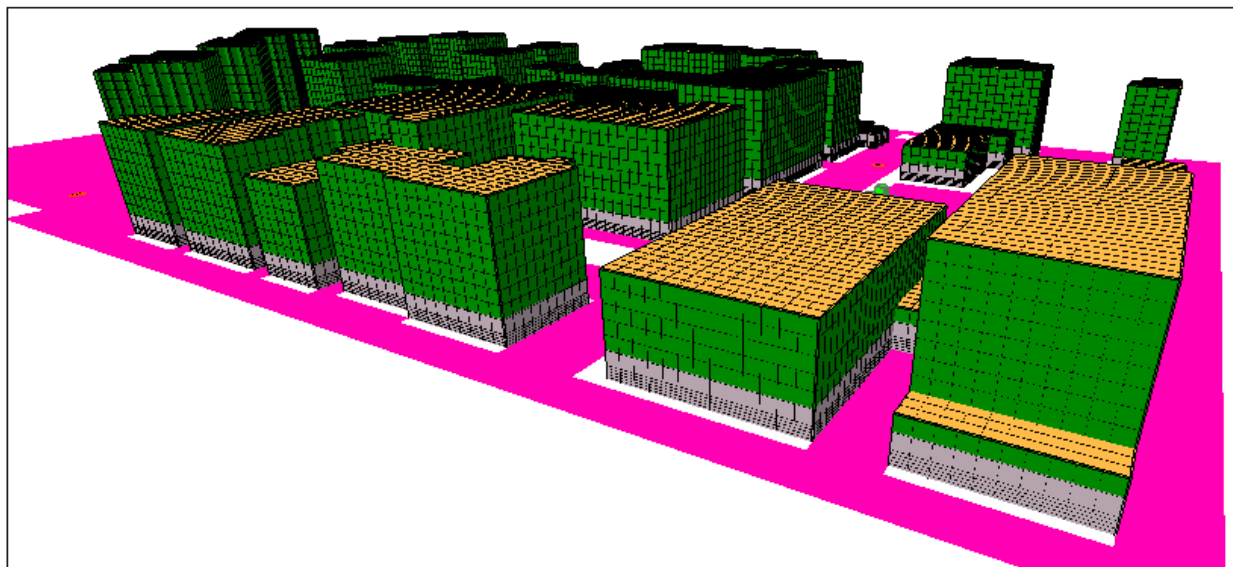


Figure 4.41: Le modèle 3D « Blanc modifié » crée à l'aide d'ENVI-met montrant les nouvelles façades des bâtiments.

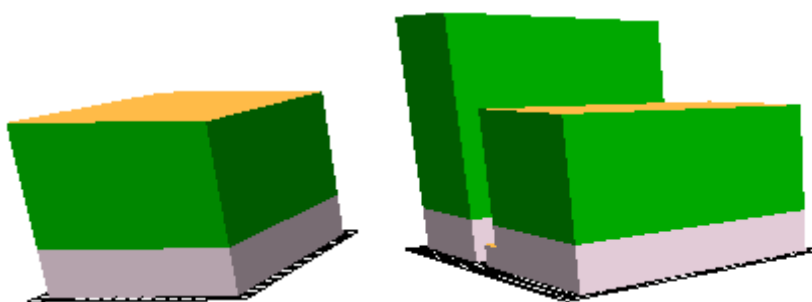


Figure 4.42: Façades des bâtiments type (gris pour le béton et vert pour le PVC) du modèle « blanc modifié »

La modification est réalisée sur les façades des bâtiments ; les cinq premiers mètres des murs extérieurs sont en béton ayant un albédo de 0.3, alors que les autres murs restants sont en PVC. La modification a été faite sur la hauteur qui peut affecter le confort extérieur. La hauteur de 5 m est choisie de façon à avoir la plus grande surface possible des façades à fort albédo d'une

part, et à favoriser le confort thermique extérieur d'autre part. La figure 4.42 montre quelques bâtiments modélisés de type « blanc modifié ».

La Figure 4.43 montre clairement que l'écart de température ambiante entre le modèle « blanc modifié » et modèle « blanc » est presque négligeable dans les plupart zones du quartier le jour comme la nuit. Le choix du modèle modifié conduit à une légère augmentation de T_a dans quelques endroits qui atteint ponctuellement un maximum de 0.15 °C à 13:00 et 0.11 °C à 1:00. Il est évident que ce modèle est presque semblable au modèle blanc en termes de température ambiante.

Par contre, ce nouveau modèle a provoqué une réduction de la T_{mrt} dans tout le quartier durant la journée et provoque des températures radiantes plus fraîches que celle du modèle blanc d'environ 6 °C dans l'environnement proches des bâtiments. A contrario, durant la nuit une faible augmentation de la T_{mrt} est provoquée mais ne dépasse les 0.35 °C .

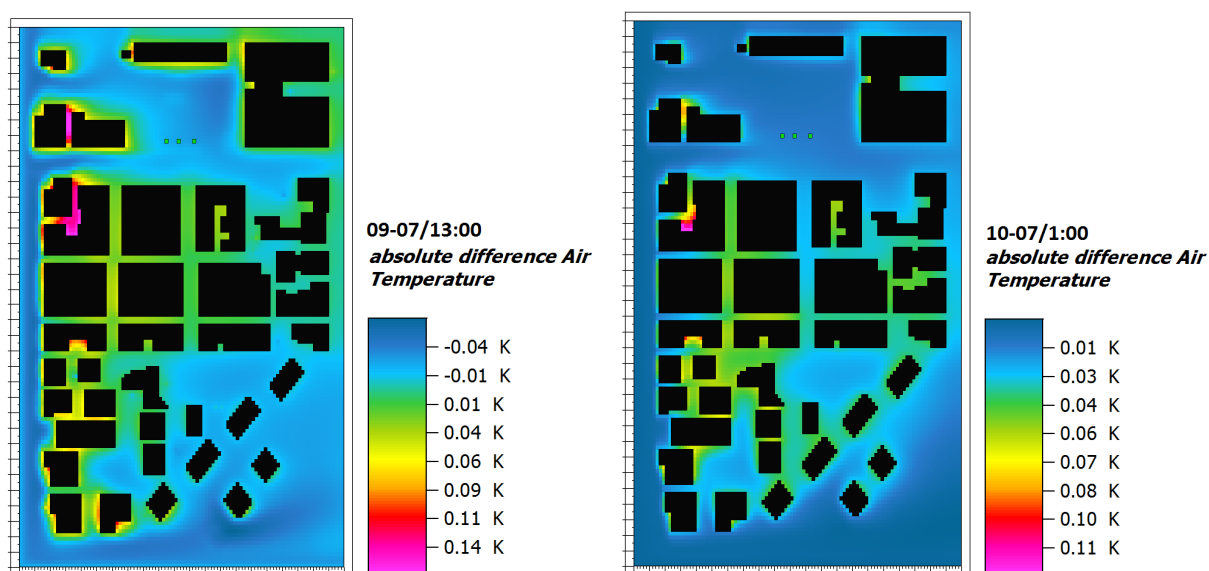


Figure 4.43: Cartes de distribution spatiale de l'écart de la température ambiante entre le modèle "Blanc modifié" et le modèle « blanc » (à gauche) à 13:00 (le jour) et 1:00 la nuit montrant que l'écart est faible.

Pour en conclure, parmi les modèles qui se basent sur le changement de l'albédo des surfaces du quartier, le modèle « blanc modifié » demeure le modèle le plus efficace :

- Diminution de la température ambiante jour comme nuit.
- Diminution de la charge climatique en été due aux façades claires.
- Augmentation la plus faible possible de la température radiante.

Finalement, il apparaît donc nécessaire d'envisager des solutions complémentaires pour améliorer le confort du piéton en journée (végétalisation, sources d'eau, etc.), si l'on souhaite agir sur l'albédo des matériaux comme nous venons de le voir.

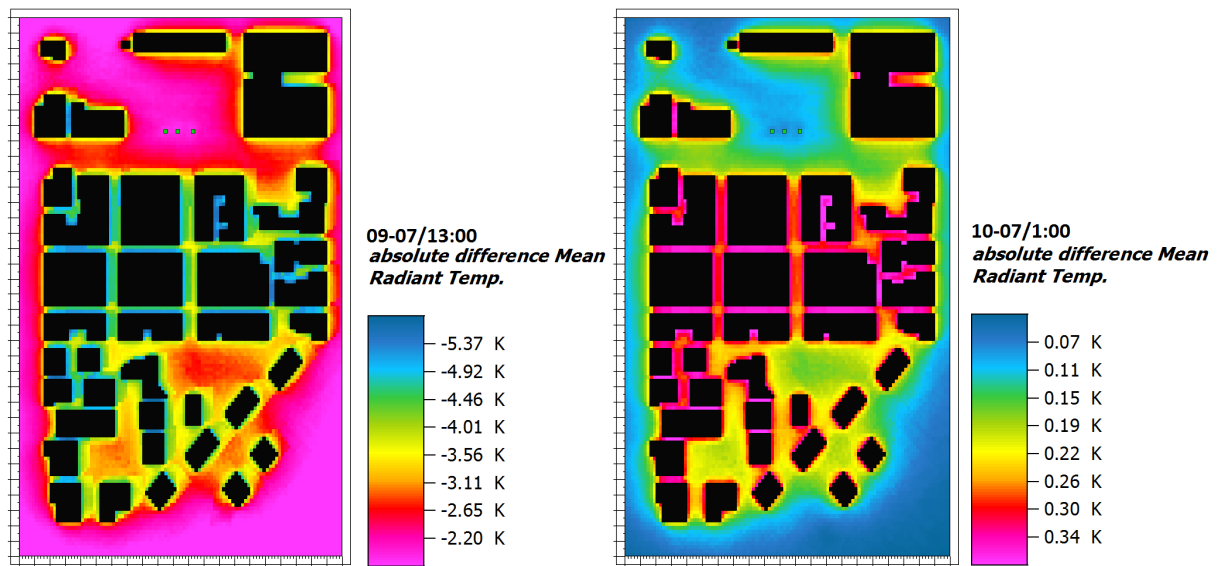


Figure 4.44: Cartes de distribution spatiale de l'écart de la température ambiante entre le modèle "Blanc modifié" et le modèle « blanc» (à gauche) à 13:00 (le jour) et 1:00 la nuit montrant que l'écart est faible.

4.3 Etude du potentiel de rafraîchissement des fontaines et des brumisateurs d'eau

Les dispositifs urbains comme les fontaines, les bassins et les brumisateurs d'eau produisent un effet de fraîcheur due à l'évaporation de l'eau. En effet le changement de phase par évaporation nécessite une absorption de chaleur provoquant une diminution de la température sèche et un effet de fraîcheur. Pour passer de l'état liquide à l'état de vapeur, les gouttelettes d'eau nécessitent une chaleur appelée « chaleur latente de vaporisation ». A noter que la chaleur latente de vaporisation varie avec la température de l'eau qui s'évapore : à 0 °C cette chaleur est de 2501 kJ/kg, de 2454 kJ/kg à 20 °C et de 2257 kJ/kg à 100 °C. Le principe utilisé par les dispositifs basés sur l'utilisation de l'eau consiste à absorber cette chaleur de l'air ambiant provoquant une diminution de la température ambiante.

Historiquement, on retrouve fréquemment l'emploi des fontaines dans les espaces publics des villes, permettant localement une amélioration du confort thermique des piétons. Ainsi, une méthode traditionnelle appelé « Uchimizu » est utilisé au Japon pour le rafraîchissement. Cette technique se base sur les brumisateurs (spray d'eau) et sur l'évaporation de l'eau pour créer un refroidissement. (Ishii, et al., 2009) montrent qu'un choix adéquat du diamètre des gouttelettes d'eau éjectées par le système « Dry-mist Uchimizu » (Figure 4.47), permet de réduire l'îlot de chaleur urbain (dans les conditions climatiques du Japon) en diminuant la température ambiante de 2 °C. D'autre part, cette étude montre que les brumisateurs d'eau sont aussi utilisés pour améliorer le coefficient de performance des pompes à chaleur en diminuant la température ambiante entourant les condenseurs à air.

Le problème majeur de l'utilisation de ces techniques est la disponibilité de l'eau dans les villes et notamment l'approvisionnement en quantité d'eau nécessaire. Plusieurs solutions peuvent résoudre cet inconvénient comme la collecte des eaux pluviales, le traitement des eaux usées du quartier et même le traitement des eaux de mer dans le cas où les villes sont proches de la plage, comme au Liban.



Figure 4.45 : Les fontaines du parc André-Citroen à Paris (Figure gauche), quartier au Portugal utilisant des sprays d'eau dans les rues pour le rafraîchissement (Figure droite).

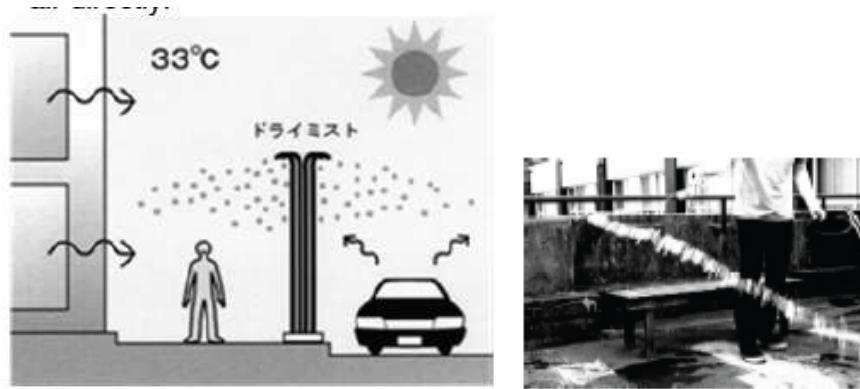


Figure 4.46: Le système traditionnel “Dry-mist Uchimizu” au Japon (Ishii, et al., 2009).

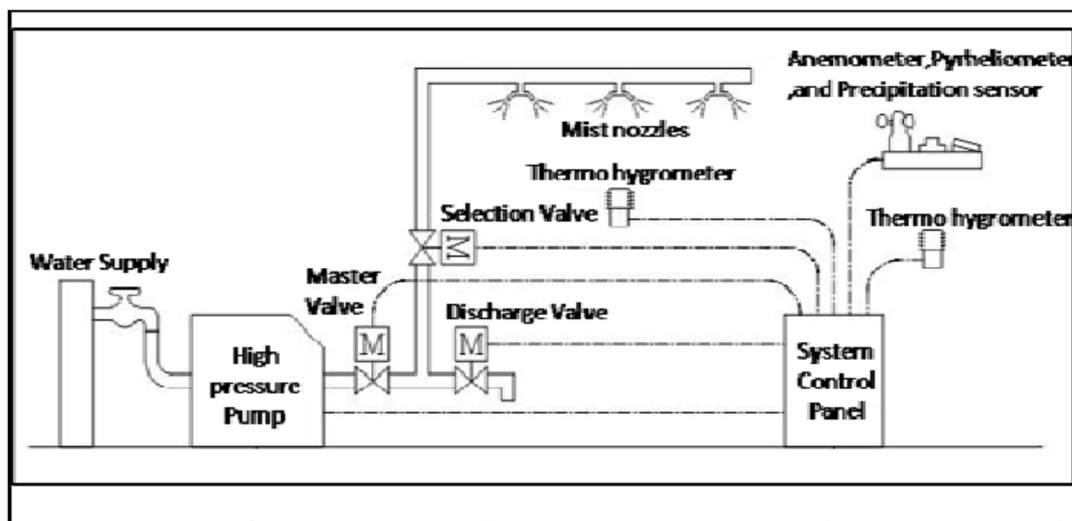


Figure 4.47: Le système Dry-mist développé par (Ishii, et al., 2009).

Dans ce qui suit, nous présentons une étude du potentiel des sources d’eau comme les fontaines et les brumisateurs (spray) d’eau sur la réduction des ICU dans le quartier « Dora ».

4.3.1 Modèle « Eau-fontaine »

Ce modèle est caractérisé par la mise en place de 5 fontaines dans le quartier étudié. Le profil d’émission et la hauteur des fontaines sont définis par défaut dans ENVI-met « version pro ». Dans notre étude nous avons choisi une hauteur des fontaines est de 4 mètres et un profil d’émission de $5 \mu g/s$ tout au long de la journée. Le diamètre de la particule est de $10 \mu m$. Le principe technique des fontaines et des brumisateurs consiste à vaporiser des microgouttelettes d’eau de faible diamètre. Le diamètre peut être de l’ordre de $5 \mu m$. Plus le diamètre de la gouttelette est petit, plus le processus d’évaporation est rapide. A contrario, si la gouttelette est plus lourde avec un diamètre plus grand, l’évaporation est lente et il y a risque de création de « l’effet rosée ». Les systèmes de rafraîchissement par évaporation d’eau nécessitent donc des

faibles diamètres de gouttelettes d'eau pour un meilleur fonctionnement, ce qui explique notre choix de $10\ \mu m$, choix qui est adopté dans les nouvelles technologies de fontaines. L'emplacement des fontaines est choisi suffisamment loin des bâtiments pour empêcher la condensation sur les parois, et de manière à ce qu'il soit réalisable sur le site. Les différentes fontaines n'ont pas la même surface, et ce afin de voir l'effet de la surface d'eau sur le rafraîchissement.

Le modèle « Eau-fontaine » créée par ENVI-met est illustré dans la Figure 4.48 et les caractéristiques de chaque fontaine sont montrées dans le tableau 1. Il est à noter que les fontaines F1 et F2 sont entourées par un mur de 1 m de haut.

Tableau 4.6 : Caractéristiques des fontaines créées dans le modèle « ENVI-met ».

Fontaine	Surface (m ²)	Emission (μg/s)	Hauteur (m)	Diamètre de la particule (μm)	Densité (g/cm ³)
F1	60	5	4	10	1
F2	30	5	4	10	1
F3	20	5	4	10	1
F4	60	5	4	10	1
F5	120	5	4	10	1

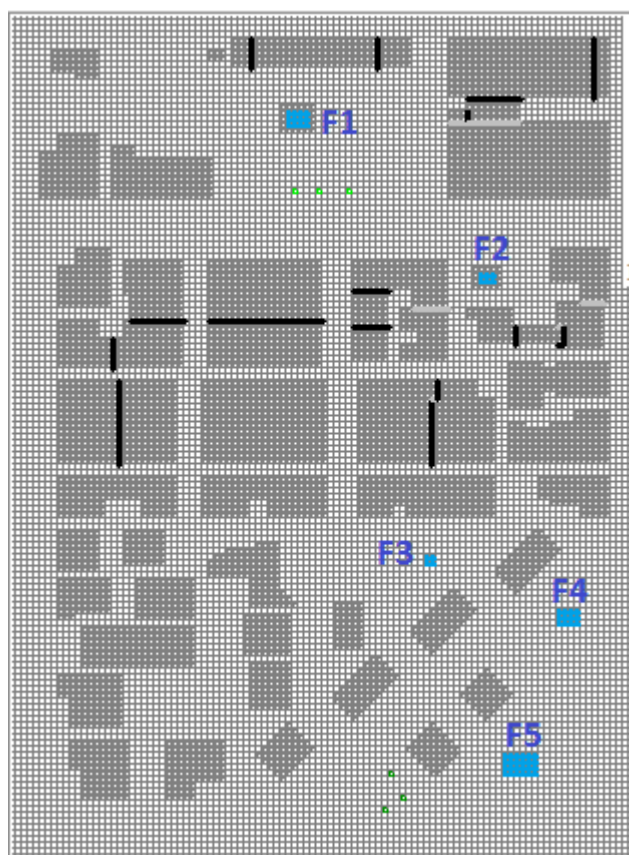


Figure 4.48: Le modèle « Fontaine » créée par ENVI-met montrant les 5 fontaines ajoutées.

Dans cette partie nous étudions l'effet des fontaines sur les variables microclimatiques. Nous rappelons que les conditions initiales, les conditions aux limites et la durée de la simulation du nouveau modèle sont les mêmes que celles utilisées dans le modèle initial.

4.3.1.1 Effet sur la température de l'air :

Les cartes de distribution spatiale de l'écart de T_a entre le modèle « Eau - Fontaine » et le modèle « initial » sont illustrées dans les Figures 4.49 et 4.50, montrant l'effet des fontaines sur la température ambiante durant le jour et la nuit à une hauteur de 1.75 m. Les cartes montrent que la mise en place de ces fontaines dans le quartier « Dora » a conduit à une diminution de T_a qui atteint ponctuellement un écart de 7 °C. Cette réduction est due à la diminution de chaleur de l'air ambiant engendrée par l'évaporation des gouttelettes éjectées par le système. L'îlot de fraîcheur créée par les fontaines est observé de jour comme de nuit, notamment en aval du vent (figure 4.52) et sur une distance importante qui peut atteindre une centaine de mètres (dimensions du quartier $(x, y) = (210 \text{ m}, 350 \text{ m})$). Il est bien clair que l'effet de ce dispositif dépend notamment de la direction du vent ; ainsi les zones sud-ouest n'ont été pas influencées par ce dispositif. La réduction moyenne de la température ambiante durant la journée est de l'ordre de 2 °C dans les zones en aval du vent et atteint une valeur d'environ 5 °C juste à côté des fontaines. Durant la nuit, la diminution de la température ambiante est plus importante pour atteindre un écart d'environ 5 °C dans les zones environnantes des grandes fontaines. L'effet des fontaines F2 et F3 est plus faible par rapport aux autres fontaines du fait de leurs petites surfaces et de la position des bâtiments aux alentours qui provoquent une réduction de la vitesse du vent.

L'analyse de ces cartes montre que l'emploi des fontaines dans des cours ou des zones ouvertes aux vents dominants, permet de créer un îlot de fraîcheur notable qui peut s'étendre à une distance importante allant parfois jusqu'aux espaces où la chaleur reste piégée tout au long de la journée.

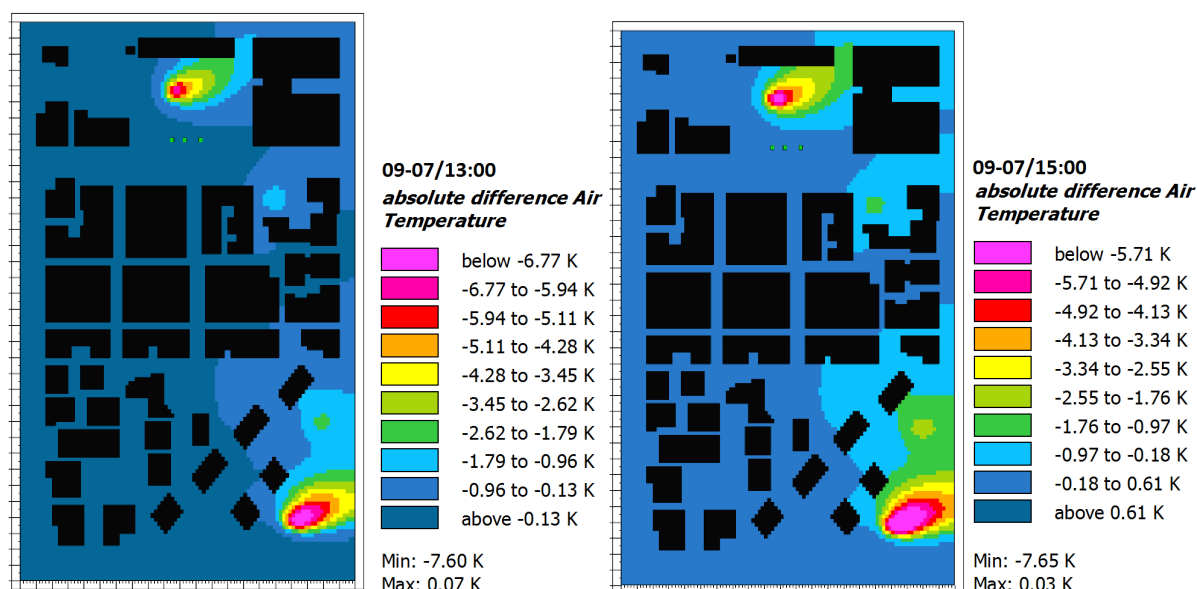


Figure 4.49: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Fontaine" et le modèle initial à 13:00 et 15:00 (le jour).

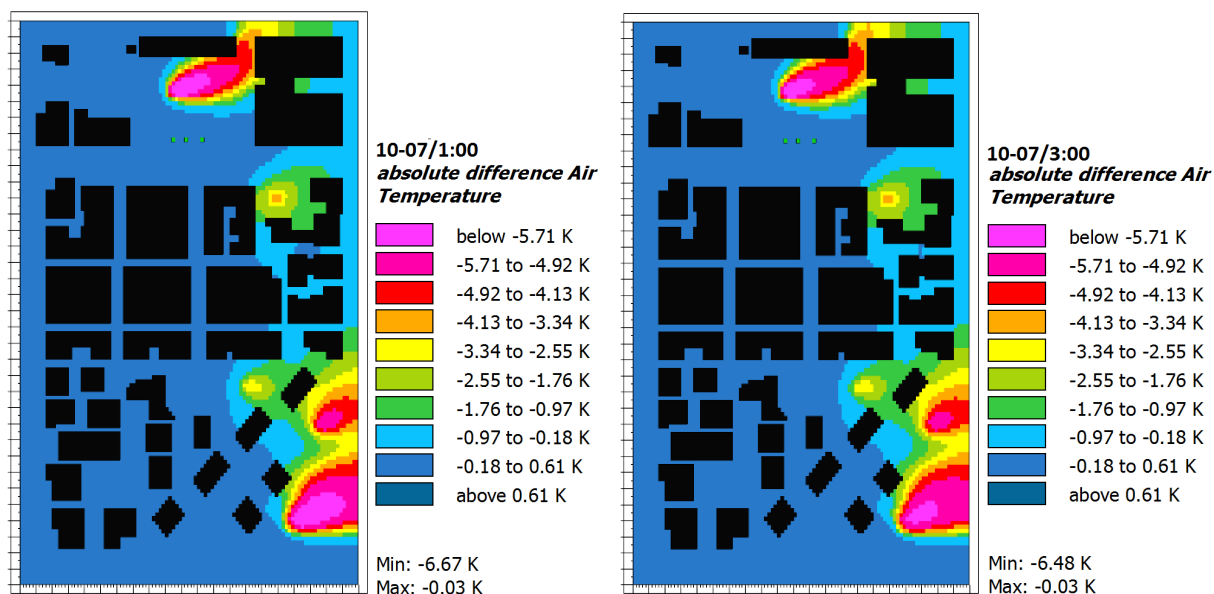


Figure 4.50: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Fontaine" et le modèle initial à 1 :00 et 3 :00 (la nuit).

4.3.1.2 Effet sur l'humidité spécifique

C'est sur ce paramètre que doivent se produire les plus grandes variations par rapport aux autres scénarios, du fait de la quantité d'eau évaporé dans l'air. Les résultats présentés dans la Figure 4.51 représentent la distribution spatiale de l'écart de l'humidité spécifique (g/kg) entre le scénario « fontaine » et le modèle initial. Comme prévu, la présence des fontaines conduit à une augmentation de l'humidité spécifique de l'air le jour et la nuit. Cette augmentation atteint une valeur locale maximale de 3.47 g/kg à 13 :00 le jour, et de 3.12 g/kg à 1:00 la nuit, qui est bien plus élevée par rapport au modèle « vert » (maximum d'environ 1 g/kg) et au modèle « blanc ».

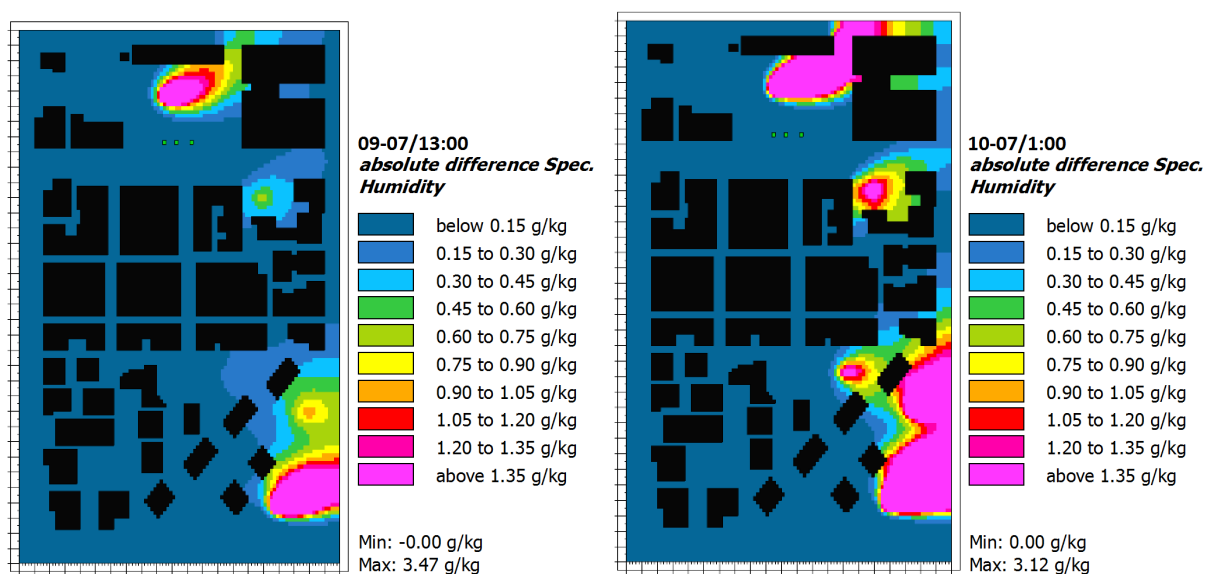


Figure 4.51: Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « Fontaine » et le modèle initial à 13 :00 le jour et à 1 :00 la nuit.

On peut également observer l'extension de l'effet des fontaines sur l'humidité spécifique en aval du vent. Les taches roses de la Figure 4.51 montrent clairement que cette extension est plus importante la nuit

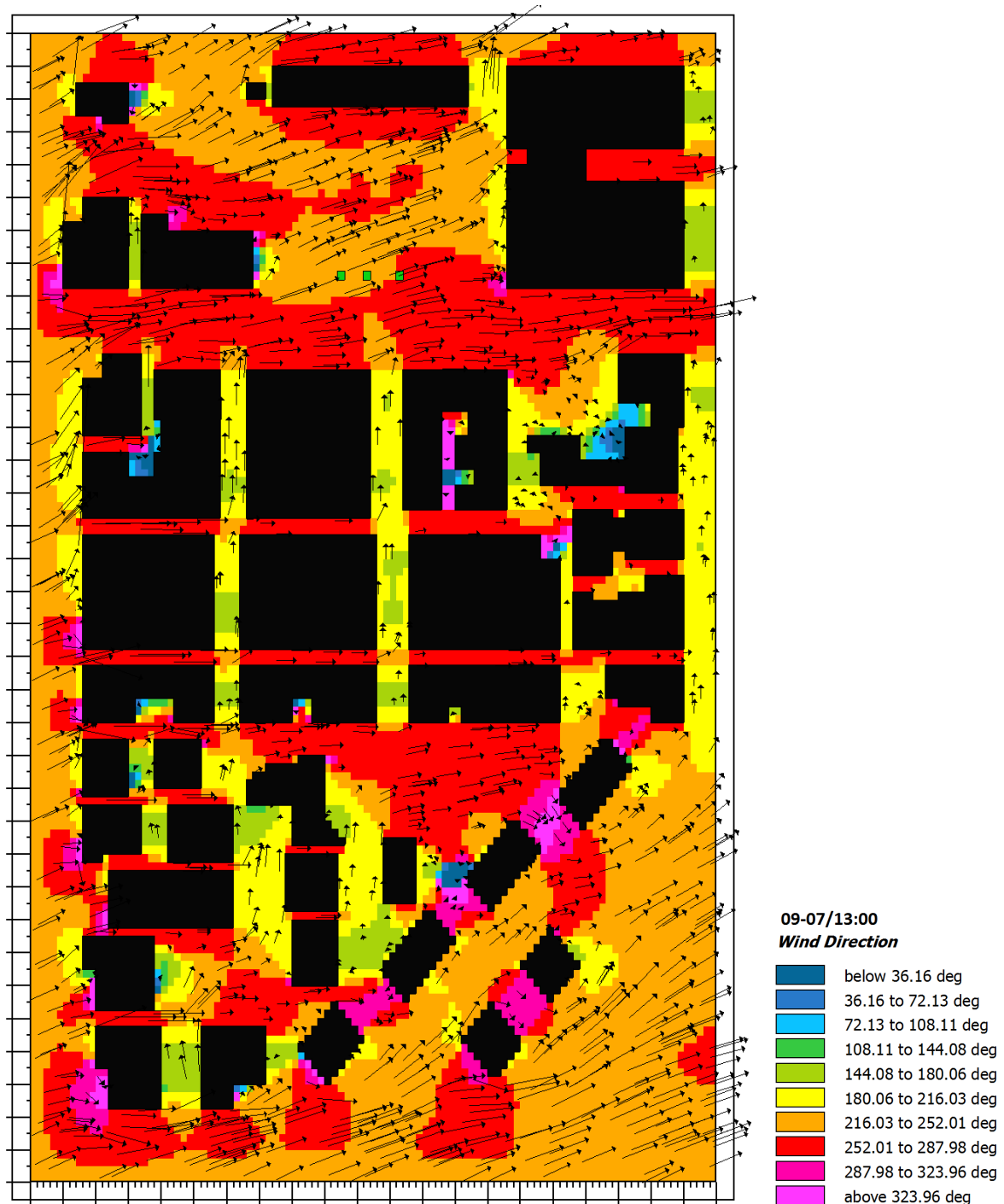


Figure 4.52: La direction du vent à 13:00 le jour

4.3.1.3 Effet sur la température moyenne radiante

Contrairement aux modèles « blanc » et « vert », l'effet des fontaines sur la température moyenne radiante est presque négligeable de jour comme de nuit. La Figure 4.53 montre l'homogénéité de l'écart de la T_{mrt} dans le quartier entre le modèle « fontaine » et le modèle initial. Les cartes montrent aussi qu'il y a une diminution ponctuelle de la T_{mrt} juste à l'endroit où les fontaines « F1 » et « F2 » sont placées. Par contre, à l'endroit où les autres fontaines sont installées, cette diminution n'est pas observée. Nous rappelons que les fontaines « F1 » et « F2 » sont clôturées par un mur de hauteur 1m alors que ce mur n'existe pas pour les autres fontaines, qui peut en partie expliquer cette diminution.

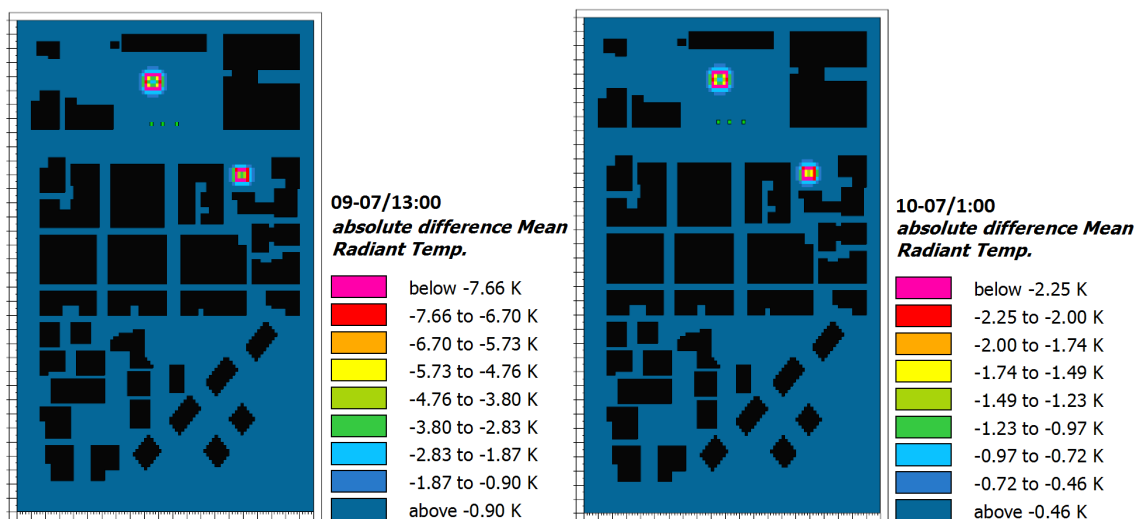


Figure 4.53: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Fontaine" et le modèle initial, à 13:00 et 1:00 .

4.3.2 Modèle «Brumisateurs»

Le principe de ce système est de vaporiser sous haute pression des gouttelettes d'eau à l'aide des buses de diamètre très fin. Ce dispositif est notamment utilisé au Japon dans le but de créer des îlots de fraîcheur (Ishii, et al., 2009), (bigorgne, 2012), (Farnham, et al., 2011).



Figure 4.54: Brumisateurs installés dans une gare routière japonaise (bigorgne, 2012)

Le scénario « brumisateur » étudié ici propose de placer des sprays d'eau, essentiellement dans des rues étroites séparant les bâtiments où il est difficile d'ajouter de la végétation ou des fontaines. Dans le modèle créé sous ENVI-met, ces brumisateurs sont aussi installés sur les bords de la route principale à l'ouest du quartier. Le jet d'eau se fait à une hauteur de 3.75 m au-dessus du sol. Le diamètre de la particule est de $10\ \mu\text{m}$ avec une émission horaire de $5\ \mu\text{g/s}$ tout au long de la journée. Cette source est créée manuellement dans « ENVI-met » dans la base des données « source d'utilisateurs ». Le type de la source choisi est ponctuel et le jet de l'eau se fait seulement à la hauteur 3.75 m et non pas uniformément tout au long de la hauteur comme le cas de la fontaine. Les sprays sont disposés selon 3 différentes positions :

- P1 : Lignes continues de jet d'eau.
- P2 : Distance entre une source et l'autre correspond à un pixel dx ou bien dy ; nous rappelons que $dx=2\ \text{m}$ et $dy=2.5\ \text{m}$.
- P3 : Distance entre une source et l'autre correspond à deux pixels dx ou bien dy .

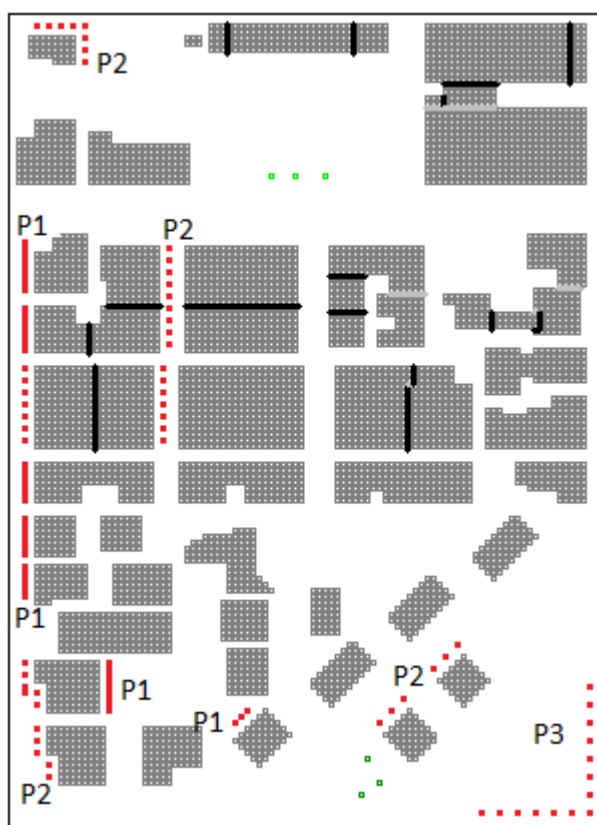


Figure 4.55: Le modèle 2D « Brumisateur » créé par ENVI-met montrant les sprays d'eau ajouté au quartier.

Le jet de petites gouttelettes sous une pression bien déterminée provoque l'apparition de gouttelettes dont l'évaporation retire de la chaleur de l'air lors de son passage à l'état vapeur. Il est à noter que les points sources sont éloignés des façades d'au moins un pas de grille de discrétisation ($dx=2\text{m}$, $dy=2.5\ \text{m}$) pour empêcher la condensation sur les façades. Des essais numériques en amont ont en effet montré un effet de condensation sur les façades lorsque la

source est installée juste à côté d'une paroi. Les conditions initiales, les propriétés des bâtiments et des routes sont semblables à celles du modèle initial.

Dans la partie qui suit, l'influence des « spray d'eau » sur les paramètres microclimatiques est présentée pour mettre en évidence l'effet de rafraîchissement de ce dispositif.

4.3.2.1 Effet sur la température de l'air

On constate sur les cartes de la Figure 4.56 ci-dessous, que les sprays d'eau émis à une hauteur de 3.75 m génèrent des jours et des nuits plus fraîches. Il est bien clair que l'effet de ce dispositif sur la température ambiante est important ; ponctuellement une réduction de T_a d'environ $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ est observée de jour comme de nuit. L'extension de l'effet de l'îlot de fraîcheur généré par les brumisateurs atteint des distances importantes. Les cartes de la Figure 4.56 montrent clairement que l'extension est plus importante durant la nuit : une réduction moyenne de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ est observée en aval du vent à une distance d'environ 150 mètres à 1:00 la nuit. Comme dans le cas des fontaines, cette extension est guidée par la direction du vent. A 13:00 le jour, en moyenne l'écart de la température ambiante entre le modèle « Brumisateur » et celui « Initial » varie entre 2 et $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans les zones proches des sprays. Durant la nuit, cet écart est plus grand et varie en moyenne entre 2.5 et $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à 1:00 le soir.

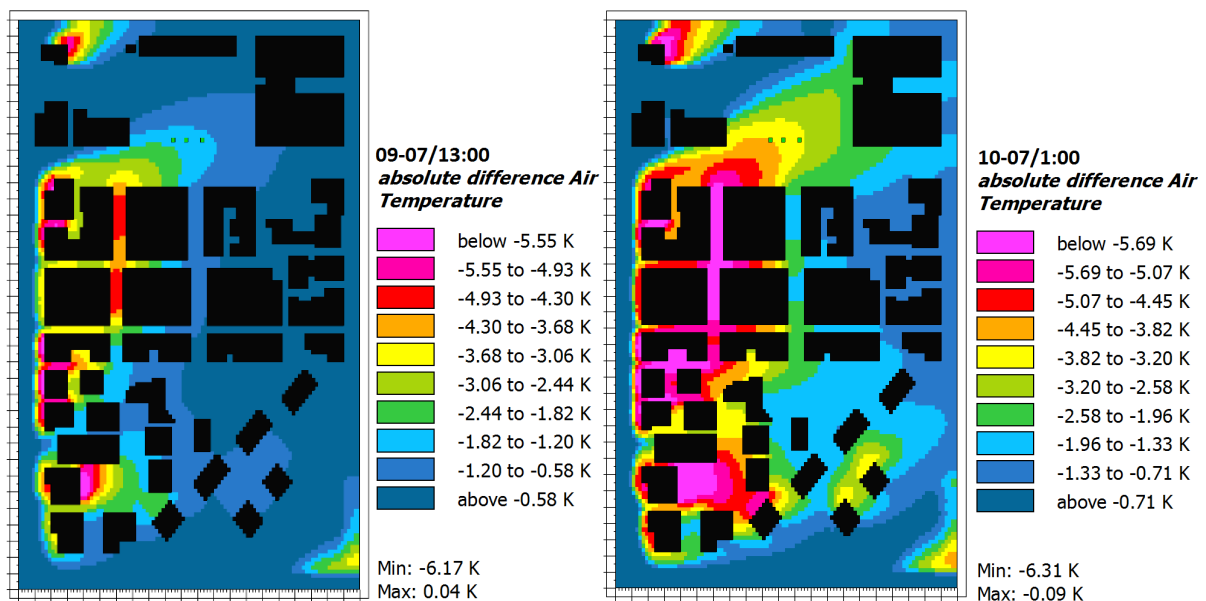


Figure 4.56: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Brumisateur" et le modèle initial à 13:00 le jour et 1:00 la nuit.

Nos résultats ont montré que le modèle « brumisateur » a permis de lutter contre l'ICU en diminuant la température ambiante tout au long de la journée. Cette réduction de T_a couvre la plupart du quartier surtout durant la nuit. De même, ce dispositif permet de réduire la température dans des zones où il est difficile d'utiliser d'autres techniques de réduction d'ICU : par exemple dans les rues étroites au milieu du quartier où l'implémentation des fontaines et des végétations est presque impossible.

4.3.2.2 Effet sur l'humidité de l'air

La Figure 4.57 représente les cartes de la distribution spatiale de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « Brumisateur » et le modèle initial le jour à 13 :00 et 1 :00 la nuit. Les résultats montrent que ce scénario produit une augmentation de l'humidité toute la journée en générant des valeurs importantes qui atteignent ponctuellement une valeur maximale de 3.09 g/kg à 13 :00 et 3.33 g/kg à 1 :00 la nuit.

Comme pour la température ambiante, l'extension de l'effet de fraîcheur créée par ce dispositif est aussi observée dans le cas de l'humidité spécifique sur une partie bien importante du quartier et toujours en aval du vent. Cette extension est toujours plus importante durant la nuit avec des valeurs locales plus élevées dans les zones proches des brumisateurs. L'effet de cette augmentation d'humidité sur les charges climatiques sera étudié dans le chapitre suivant.

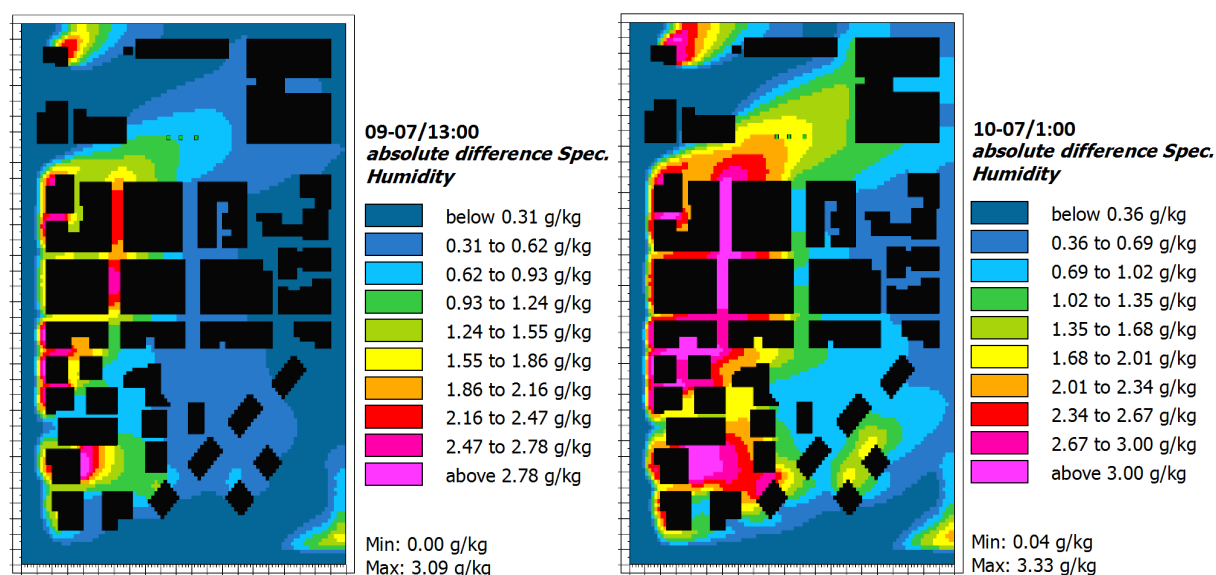


Figure 4.57: Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « Brumisateur » et le modèle initial à 13 :00 le jour et à 1 :00 la nuit.

4.3.2.3 Effet sur la température moyenne radiante

Les variations de la température moyenne radiante entre le modèle « brumisateur » et le modèle « initial » à 13 :00 et 1 :00 sont représentées sur la Figure 4.58.

Les cartes montrent que la Tmrt est faiblement influencée par les sprays d'eau : à 13 :00, la température radiante diminue dans toutes les zones du quartier pour atteindre un écart de 0.6 °C observé aux alentours des bâtiments dans les rues étroites. De même, une réduction de la Tmrt est observée à 1 :00 le soir et atteint ponctuellement une valeur maximale de 1.25 °C dans les zones environnantes des bâtiments.

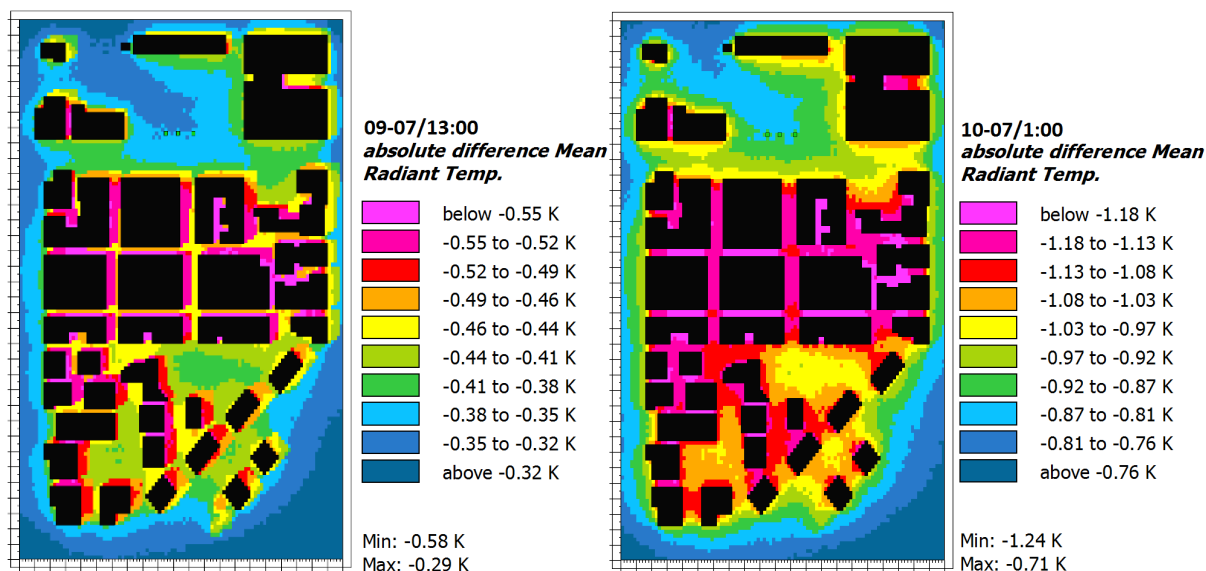


Figure 4.58: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température moyenne radiante entre le modèle "Brumisateur" et le modèle initial, à 13:00 et 1:00.

Dans ce qui suit, une étude du modèle « bleu » est réalisée qui est basée sur la mise en place des fontaines ET des brumisateurs dans le quartier.

4.3.3 Modèle « Bleu »

Le modèle « bleu » consiste à placer des fontaines et des brumisateurs en même temps dans le quartier étudié. La Figure 4.59 montre la disposition retenue des fontaines et des sprays dans le quartier. Le jet d'eau se fait à 3.75 mètres du sol et les fontaines sont les mêmes que celles installées dans le modèle « Fontaine ». Quelques sprays d'eau sont ajoutés de façon de couvrir des zones non influencées par ce dispositif comme indiqué sur la Figure 4.59. Les caractéristiques de l'émission d'eau, les propriétés de l'eau et le diamètre des gouttelettes sont similaires à celle du modèle « Brumisateur ». Les conditions aux limites et les conditions initiales sont toujours les mêmes que celles utilisées dans le modèle initial.

Nous étudions à présent, l'effet de la combinaison de ces sources d'eau sur l'humidité spécifique et sur les températures ambiantes et radiantes.

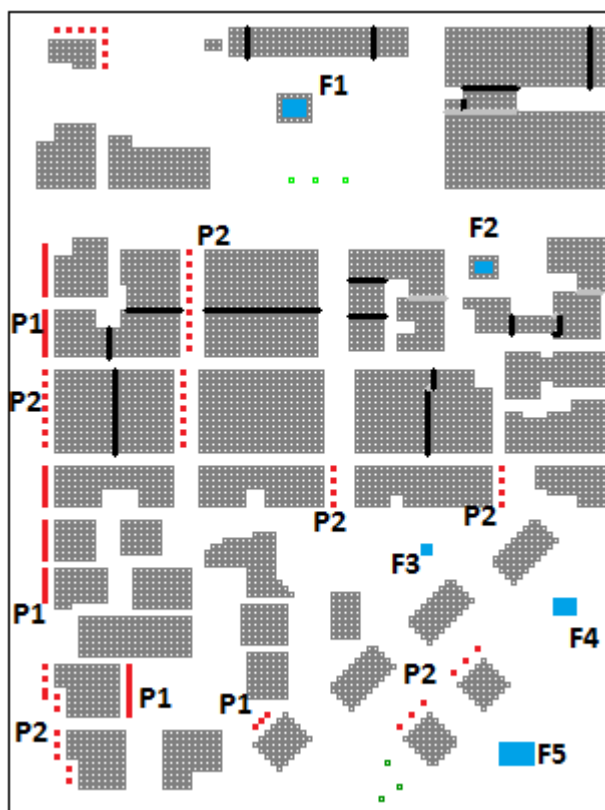


Figure 4.59: Le modèle 2D « Bleu » créé par ENVI-met montrant les sprays d'eau (point rouges) et les fontaines (taches bleues).

4.3.3.1 Effet du modèle «Bleu» sur les paramètres microclimatiques

Il est bien clair que la combinaison des fontaines et des brumisateurs va contribuer à la réduction de la température dans la plupart des zones du quartier. De plus, dans les zones du quartier où les brumisateurs sont proches des fontaines, un effet additionnel de fraîcheur est observé. A 13 :00, une réduction supplémentaire par rapport au modèle « Fontaine » est observée et atteint environ 0.6 °C. A 1 :00 le soir, cette réduction supplémentaire est plus importante pour atteindre environ 1.5 °C. Comme dit précédemment, l'extension de l'îlot de fraîcheur créée par ce modèle est plus importante dans la période nocturne.

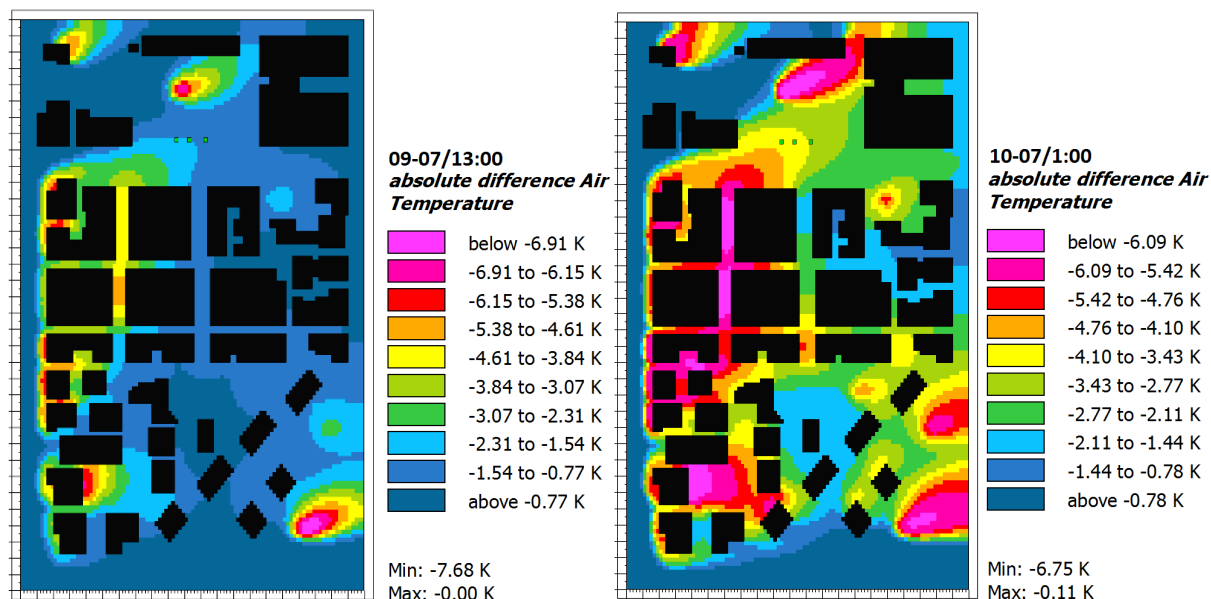


Figure 4.60: Cartes de distribution spatiale de l'écart de température entre le modèle "Bleu" et le modèle initial à 13:00 le jour et 1:00 la nuit.

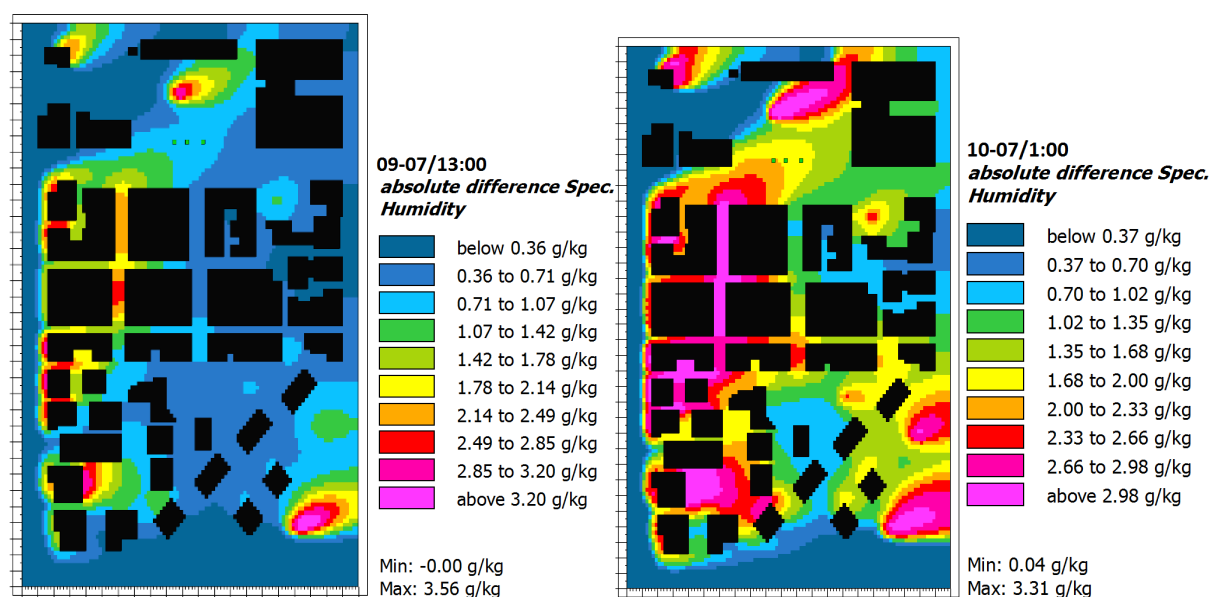


Figure 4.61: Carte de l'écart de l'humidité spécifique entre le modèle « Bleu » et le modèle initial à 13 :00 le jour et à 1 :00 la nuit.

Pour l'humidité spécifique, les cartes de l'écart entre le modèle bleu et le modèle initial présentées dans la Figure 4.61, semblent analogues aux cartes de la température ambiante. L'effet additionnel est aussi observé dans les zones où les fontaines sont proches des brumisateurs : à 13 :00, l'humidité spécifique augmente en moyenne d'environ 0.5 g/kg par rapport au modèle « fontaine », et cette augmentation atteint environ 1g/kg à 1 :00 la nuit.

Pour la température moyenne radiante, le comportement du modèle « bleu » est presque semblable au modèle « brumisateur », puisque l'effet des fontaines est presque négligeable sur la T_{mrt} .

Pour conclure, nos résultats ont montré que les sources d'eau permettent de lutter contre l'ICU en diminuant les températures ambiantes diurnes et nocturnes. Ces dispositifs n'ont quasiment aucun effet sur la température radiante. D'autre part, ces sources conduisent à une forte augmentation de l'humidité de l'air dont nous allons discuter l'effet sur les charges climatiques dans le chapitre suivant. Nous analyserons aussi l'effet de ces sources sur le confort extérieur.

Chapitre 5 Impact des potentiels de réduction d'ICU sur les charges climatiques et sur le confort extérieur.

Ayant étudié l'effet des potentiels des techniques de réduction d'ICU sur les paramètres microclimatiques, nous nous intéressons à présent dans ce chapitre à l'impact de ces techniques sur les charges de climatisation des bâtiments, et leur influence sur la température surfacique des façades et des toitures. Comme le logiciel « ENVI-met » ne permet pas d'évaluer directement les besoins énergétiques de climatisation, les résultats extraits doivent être couplés à un autre logiciel permettant le calcul des charges de climatisation, comme par exemple: TRNSYS, HAP, ou Energyplus. Dans notre travail, nous avons retenu HAP 4.9 pour nos calculs. Ce logiciel est utilisé par les chercheurs, les ingénieurs, et les bureaux d'études pour le calcul des charges thermiques et des consommations énergétiques des bâtiments. Les données météorologiques d'entrée de température et d'humidité et même le profil du flux solaire, peuvent être modifiables ce qui facilite le couplage avec ENVI-met. La méthode de couplage est développée dans le paragraphe 5.4. HAP 4.9 utilise la méthode des facteurs de réponses et des fonctions de transfert pour le calcul des charges de climatisation. Le principe de ces méthodes est exposé dans l'annexe C.

L'approche méthodologique s'appuiera sur le choix de deux types de bâtiment dont les paramètres microclimatiques (T_a , R_h ...) qui l'entourent sont influencés par les scénarios d'aménagement urbain proposés dans les chapitres précédents. L'évaluation de la variation des charges sensibles et latentes sera réalisée pour chaque modèle. Dans un second temps, nous évaluons l'effet des techniques de réduction d'ICU sur le confort thermique extérieur, afin de quantifier celui-ci, et de voir comment se classent les scénarios en termes d'amélioration du confort.

5.1 Principe du calcul des charges thermiques dans HAP

Hap version 4.9 est un logiciel fonctionnant sous Windows de « Carrier » (Carrier, 2015) qui permet de calculer les charges de climatisation et de chauffage ainsi que les consommations énergétiques des bâtiments. Ce logiciel utilise la méthode de la fonction de transfert TFM (transfer function method) validée par l'ASHRAE (Ashrae, 1997).

La méthode TFM donne une estimation précise du calcul de charges tout en tenant compte de l'évolution transitoire des échanges de chaleur dans le bâtiment (Carrier, 2015). La méthode consiste à prendre en considération :

- Les 3 modes de transfert de chaleur : Conduction, convection et rayonnement. Cependant les gains de chaleur sont la somme des gains de chaque mode de transfert de chaleur.

- De nombreuses sources de chaleur dont les apports thermiques varient avec le temps et ne sont généralement pas en phase les uns avec les autres
- Le stockage et l'évacuation de la chaleur des éléments de construction massifs tels que les murs, les toits et les planchers. Cela entraîne des processus de transfert de chaleur transitoires plutôt que permanents.
- Les processus de transfert de chaleur qui sont interdépendants.

La méthode TFM a évolué à partir de la méthode d'équilibre thermique qui se base sur les lois fondamentales de la thermodynamique et des transferts de chaleurs. Les équations de la méthode d'équilibre thermique appliquées à un nœud représentant une surface ou un élément massique s'écrivent comme suit :

$$\phi_{entrant} - \phi_{sortant} = \phi_{stocké} \quad [5.1] \text{ pour un élément de masse}$$

$$\phi_{entrant} - \phi_{sortant} = 0 \quad [5.2] \text{ pour une surface sans masse}$$

Avec $\phi_{entrant}$ est le flux de chaleur entrant, $\phi_{sortant}$ est le flux de chaleur sortant et $\phi_{stocké}$ est le flux de chaleur stocké.

Pour simplifier la méthode d'équilibre thermique, la méthode TFM est basée sur le principe du « facteur de réponse ». Ce principe énonce que dans une pièce spécifique, les modèles de réponse thermique pour chaque type spécifique de gain de chaleur sera toujours le même (Carrier, 2015), en se basant sur les trois principes supplémentaires :

- Principe de superposition : la charge totale de la pièce est égale à la somme des charges calculées séparément de chaque composant de gain de chaleur. Par exemple, les charges dues à un gain de chaleur d'éclairage et à un gain de chaleur d'un mur extérieur peuvent être calculés séparément, puis additionnés pour déterminer la charge totale de la pièce. En revanche, la méthode du bilan thermique exige que tous les gains de chaleur dans une pièce doivent être considérés simultanément.
- Principe de linéarité : l'amplitude de la réponse thermique à un gain de chaleur varie linéairement avec la grandeur du gain de chaleur.
- Principe de l'invariabilité : deux gains de chaleur de même grandeur se produisant à deux moments différents produisent la même réponse thermique dans une pièce.

L'équation de la fonction de transfert d'une pièce permettant de calculer la charge causée par un gain de chaleur spécifique pour chaque heure, s'exprime alors :

$$Q_0 = v_0 q_0 + v_1 q_1 + v_2 q_2 - w_1 Q_1 - w_2 Q_2 \quad [5.3]$$

Où Q_0 est la charge pour l'heure étudié, Q_1 est la charge de l'heure précédente et Q_2 est la charge avant deux heures.

q_0 est le gain de chaleur pour l'heure actuelle, q_1 est le gain de chaleur pour l'heure précédente et q_2 est le gain de chaleur avant deux heures.

v_0, v_1, v_2, w_1 et w_2 sont les coefficients de fonctions de transfert. La valeur de ces coefficients varie selon le type de gain de chaleur, la pièce et l'inertie de construction (Ashrae, 1997).

L'équation [5.3] montre clairement que la charge actuelle Q_0 dépend des charges et des gains de chaleurs de deux heures précédentes. Les composantes des gains de chaleur sont calculées pour une série des heures et par suite seront intégrées dans l'équation de la fonction de transfert pour calculer les charges.

Pour les composantes de charges thermiques des bâtiments, le calcul prend en compte les apports des éléments suivants :

5.1.1 Apports par transmission des murs extérieurs et des toits :

Le calcul des apports par transmission des parois opaques extérieurs consiste à trouver la température sol-air T_e selon la formule [5.4] tout en tenant compte du profil des flux solaires du ciel clair :

$$T_e = T_{oa} + \frac{\alpha \cdot I_t}{h_0} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_0} \quad [5.4]$$

Avec T_{oa} température air ambiant ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$), α est l'absorptivité de la surface extérieure, I_t est flux solaire total tombant sur la surface étudiée (W/m^2), h_0 est le coefficient de convection de la surface ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), ε est l'émissance hémisphérique de la surface extérieure (valeur 1 est utilisée), ΔR est la différence entre le rayonnement incident à grandes longueurs d'ondes sur une surface extérieure et le rayonnement d'un corps noir à une température T_{oa} ($\Delta R = 0$ pour les surfaces verticales et $\Delta R = 63 \text{ W}/\text{m}^2$ pour les surfaces horizontales).

La température sol-air apparait dans l'équation de la fonction de transfert de conduction permettant de calculer les gains de chaleur par transmission d'une surface opaque :

$$q_0 = A \left[b_0 T_{e0} + b_1 T_{e1} + b_2 T_{e2} + b_3 T_{e3} + b_4 T_{e4} + b_5 T_{e5} + b_6 T_{e6} - d_1 q_1 - d_2 q_2 - d_3 q_3 - d_4 q_4 - d_5 q_5 - d_6 q_6 - T_{rc} \sum c_n \right] \quad [5.5]$$

Avec A est la surface de la paroi extérieure, T_{rc} est la température intérieure constante de la pièce, et b_n, c_n et d_n sont les coefficients de la fonction de transfert de conduction. Les indices 0 à 6 indiquent toujours le rang des heures précédentes.

L'intégration des gains solaires dans l'équation [5.3] de la fonction de transfert permet alors de déterminer la charge due à la transmission de chaleur par les murs extérieurs ou les toits.

5.1.2 Apports par transmission des vitrages

Les apports des gains de chaleur par transmission des vitrages sont dus à la différence entre la température extérieure et celle intérieure, et s'exprime selon l'équation suivante :

$$q = U \cdot A(T_{oa} - T_{int}) \quad [5.6]$$

Avec A la surface du vitrage (m^2), U le coefficient de transmission thermique de la vitre ($W/m^2 \cdot K$), et T_{int} la température intérieure de la pièce.

5.1.3 Apports par rayonnement solaire traversant les vitrages

L'équation [5.7] permet de déterminer les gains solaires totaux q_{st} qui sont la somme des gains solaires absorbés GS_a et transmis GS_t à travers les fenêtres d'après l'approche de l'ASHRAE:

$$q_{st} = GS_t + GS_a \quad [5.7]$$

Les gains solaires transmis $GS_t(W)$ et les gains solaires absorbés $GS_a(W)$ sont donnés par :

$$GS_t = [GS_{t,direct}(1 - F_s) + GS_{t,d}].SC.A \quad [5.8]$$

$$GS_a = [GS_{a,direct}(1 - F_s) + GS_{a,d}].N_i.SC.A \quad [5.9]$$

Où F_s représente la fraction de la surface vitrée qui n'est pas soumis aux flux solaire direct, N_i est la fraction du rayonnement solaire absorbée par une surface vitrée de référence. Une valeur standard de N_i de 0.267 est utilisé. SC est le coefficient global d'ombre (shading coefficient) et A est la surface de la fenêtre en m^2 .

$GS_{t,direct}$ et $GS_{t,d}$ représentent respectivement les composantes directes et diffus des gains solaires transmis. $GS_{a,direct}$ et $GS_{a,d}$ sont les composantes directes et diffus des gains solaires absorbés. Ces coefficients sont exprimés par (Ashrae, 1997) :

$$GS_{t,direct} = I_{direct}[\sum t_j \cos j(\theta)] \quad [5.10]$$

$$GS_{a,direct} = I_{direct}[\sum a_j \cos j(\theta)] \quad [5.11]$$

$$GS_{t,d} = 2(I_d) \left[\sum \frac{t_j}{j+2} \right] \quad [5.12]$$

$$GS_{a,d} = 2(I_d) \left[\sum \frac{a_j}{j+2} \right] \quad [5.13]$$

Où I_{direct} est le flux solaire direct (W/m^2) tombant sur la surface vitrée, I_d est flux solaire diffus total avec le flux réfléchi du sol arrivant sur la surface vitrée (W/m^2), θ (degré) est l'angle d'incidence du flux solaire direct. t_j sont les coefficients de transmission d'une surface

vitrée de référence et a_j sont les coefficients d'absorption d'une surface vitrée de référence, avec j allant de 0 à 5. Les coefficients t_j et a_j sont montrées dans l'annexe D (Carrier, 2015).

5.1.4 Apports par les portes

Dans le cas d'une surface opaque, les apports de chaleur sont calculés par l'équation de conduction $q = U \cdot A(T_{oa} - T_{int})$.

5.1.5 Calcul de charges de partition

Les charges de partition résultent des flux de chaleur à travers des zones adjacentes à la pièce étudiée et qui ne sont pas conditionnées, sont données comme suit :

$$q = U \cdot A(T_{adj} - T_{int}) \quad [5.14]$$

Avec U ($W/m^2 \cdot K$) le coefficient de transmission thermique de la surface de partition séparant la pièce de la zone adjacente, A (m^2) la surface de partition et T_{adj} étant la température de la zone adjacente.

5.1.6 Apports par éclairage

Les gains de chaleur q (W) résultant de l'éclairage dépendent de la puissance de l'éclairage, du multiplicateur de ballast (BM) et l'horaire du fonctionnement de l'éclairage :

$$q = \frac{P_{ecl}(BM)F_s}{100} \quad [5.15]$$

Où P_{ecl} est la puissance de l'appareil d'éclairage (W), F_s est le pourcentage de la valeur maximale de la puissance d'éclairage pour l'heure étudiée. Le coefficient BM varie entre 0.1 et 2 et prend la valeur 1 pour les lampes à incandescents.

Les gains de chaleur calculés dans l'équation [5.15] seront intégrés dans l'équation de la fonction de transfert pour calculer les charges de l'éclairage. Les coefficients de la fonction de transfert varient selon le type des appareils d'éclairage.

5.1.7 Apports des équipements électriques

Les gains de chaleur des équipements électriques dans le bâtiment comme les ordinateurs, les photocopieuses, les équipements de cuisines sont exprimés par :

$$q = \frac{P_{eq}F_s}{100} \quad [5.16]$$

Où P_{eq} est la puissance maximale de l'équipement électrique (W), F_s est le pourcentage de la puissance maximale utilisé.

HAP suppose que 75 % des gains des équipements électriques sont des gains convectifs et seront considérés directement des charges. Les 25 % constituent la portion radiative et seront intégrés dans l'équation de la fonction de transfert pour déterminer la charge relative à cette portion.

5.1.8 Apports des occupants

Les chaleurs sensibles et latentes apportées par les occupants sont exprimées par :

$$q = \frac{(GC) \cdot N_o \cdot F_s}{100} \quad [5.17]$$

Avec GC est la chaleur produite par personne ($W/personne$), N_o est le nombre des occupants, et F_s est le pourcentage d'occupation maximale de l'heure étudiée.

La chaleur latente apportée par les occupants est directement convertie à une charge thermique. Alors que pour les gains sensibles, HAP suppose que 30 % sont de type convectif et seront directement convertis à une charge, alors que le 70 % sont de type radiatif et l'équation de la fonction de transfert est utilisée pour calculer les charges.

5.1.9 Apports par infiltration

Les apports thermiques sensibles et latents provenant de l'infiltration de l'air ou du renouvellement de l'air s'écrivent :

$$Q_{s,i} = \rho_a C_{pa} V_i (T_{oa} - T_{int}) \quad [5.18]$$

$$Q_{l,i} = \rho_a h_{fg} V_i (\omega_{oa} - \omega_{int}) \quad [5.19]$$

$$V_i = ACH \cdot A_e \cdot H \cdot K \quad [5.20]$$

Où $Q_{s,i}$ et $Q_{l,i}$ sont respectivement les charges sensibles et latentes en (W). ρ_a masse volumique de l'air (Kg/m^3), C_{pa} capacité calorifique de l'air (1004.8 J/kg.K), V_i débit du renouvellement d'air (L/s), h_{fg} chaleur de vaporisation de l'eau ($2.4535 \times 10^6 \text{ J/Kg}$), ω_{oa} et ω_{int} sont respectivement l'humidité spécifique de l'air extérieur et de la pièce (Kg/Kg), A_e est la surface de la pièce étudiée (m^2), H la hauteur de l'étage (m) et K est le coefficient de conversion.

5.2 Choix d'un bâtiment sensible aux techniques de réduction d'ICU

Comme déjà vu dans le chapitre précédent, l'influence des aménagements de réduction de l'îlot de chaleur n'est pas homogène dans tout le quartier et varie selon la disposition du bâtiment dans le quartier d'une part et l'emplacement des dispositifs d'atténuations comme les végétations et les sources d'eau. D'autre part. Cependant l'impact des stratégies de refroidissement urbain sur les charges de climatisation varie d'un bâtiment à un autre notamment car le calcul des charges dépend de plusieurs paramètres qui varient selon les mesures d'atténuation choisies comme la température ambiante, l'humidité, les flux solaires...

Face à la complexité du problème, et comme certains bâtiments ne sont pas fortement affectés par les modèles d'atténuation, le choix du bâtiment de référence repose sur le critère suivant : le bâtiment de référence sera celui pour lequel les paramètres microclimatiques (T_a , RH...) entourant ce bâtiment seront les plus influencés en même temps par les modèles vert, bleu et blanc.

La Figure 5.1 illustre la position du bâtiment le plus sensible, qui sera choisi pour le calcul des charges de climatisation. Les calculs réalisés avec ENVI-met ont en effet montré que l'effet des modèles vert, bleu et blanc sur les conditions aux limites de ce bâtiment est bien important pour les 3 modèles proposés. Alors que pour d'autres bâtiments, on peut remarquer que l'influence d'un scénario donné d'atténuation est bien visible, alors que l'effet d'un autre scénario est faible ou presque négligeable. Ceci justifie le choix du bâtiment de référence qui se situe proche des ensembles d'arbres implantés dans le modèle vert et des sources d'eau du modèle bleu, comme décrits dans le chapitre précédent.



Figure 5.1: Modèle 3D d'ENVI-met montrant le bâtiment le plus sensible.

5.2.1 Description du bâtiment étudié

La hauteur du bâtiment de référence est de 28 m constitué de 8 étages chacun de 3.5 m. La surface de chaque étage est de $225m^2$. Les surfaces vitrées constituent 30 % de chaque façade. Les fenêtres sont à simple vitrage (bâtiment ancien) dont le coefficient de transmission thermique « U » est de $5 W/m^2.K$ et le coefficient global d'ombre « SC » de 0.78. Les caractéristiques des vitres sont extraites d'ASHRAE qui donne U et SC selon le type de vitrage (Ashrae, 2005).

Pour le renouvellement d'air ou infiltration, un débit d'air d'1 ACH a été choisi. Les murs extérieurs et les planchers sont conformes aux données utilisées dans ENVI-met en termes de constitutions et de propriétés thermiques. Nous rappelons que l'albédo des façades et toits a été modifiés dans le modèle blanc.

Pour les gains internes, nous supposons :

- un éclairage de puissance 25 W/m^2 avec un multiplicateur de ballast égale à 1.
- un nombre d'occupants par étage de 20 personnes ayant un dégagement de chaleur sensible de 71.8 W/personne et de chaleur latente de 60.1 W/personne (voir annexe E, activité bureau).
- une puissance totale des équipements électriques de 900W .

L'orientation du bâtiment est illustrée dans la Figure 5.2 notamment les 4 façades : f1 (sud-est), f2 (sud-ouest), f3 (nord-ouest) et f4 (nord-est).

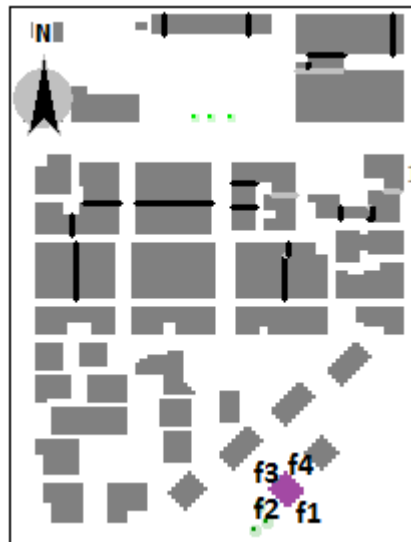


Figure 5.2: Modèle 2D montrant l'orientation du bâtiment le plus sensible.

Après avoir étudié l'effet des potentiels de réduction d'ICU sur les paramètres microclimatiques de l'environnement, nous nous intéressons dans cette partie à la variation de la température surfacique des façades et du toit du bâtiment de référence selon chaque scénario. Le but est d'analyser le profil de la température des parois extérieures tout au long de la journée. Le modèle 3D d'ENVI-met permet d'extraire les températures des nœuds constituant le mur extérieur ou bien le toit. Le nœud 1 correspond à la température extérieure de la paroi qui sera étudié dans cette partie.

5.2.2 Température des façades

La Figure 5.3 visualise la carte 3D de la distribution de la température surfacique de parois extérieures des bâtiments du quartier pour le modèle initial, à 13 :00 de la journée 9 Juillet

simulé avec ENVI-met. La Figure montre l'hétérogénéité de la température des parois qui varie d'un bâtiment à un autre, d'une façade à une autre et qui varie avec la hauteur pour le même bâtiment. Les données peuvent être extraites pour chaque surface élémentaire du maillage volumique pour chaque heure de la journée.

Dans ce qui suit, on s'intéresse aux calculs relatifs aux façades f1, f2, f3 et f4 du bâtiment de référence.

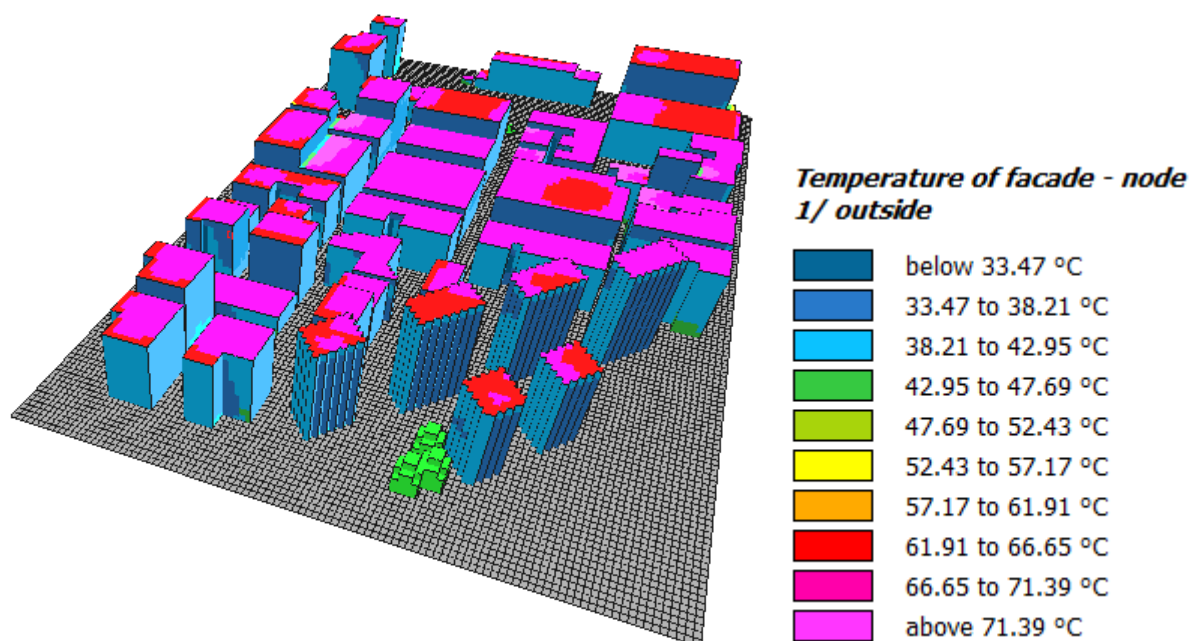


Figure 5.3: Modèle 3D montrant la température surfacique élémentaire des parois extérieures à 13 :00.

La température surfacique de la façade f1 orientée sud-est est visualisée dans la Figure 5.4 pour les 4 modèles : initial, vert, blanc et bleu. Il est évident que pour le cas initial, la température surfacique augmente le matin pour atteindre un maximum d'environ 42 °C à 10 :00, ce qui s'explique par la position du soleil par rapport à la paroi f1. Cette température commence à diminuer dans l'après-midi et atteint sa valeur minimale de 24.6 °C à 5 :00. Comme nous le voyons sur l'histogramme de la Figure 5.4, le dispositif « vert » présente des effets contradictoires entre les heures du jour et celles de la nuit. La variante verte présente des températures surfaciques plus fraîches le matin (12.15 °C à 9 :00 dû à l'ombre créée par les arbres de type « SK » installées devant cette façade). A contrario, cette variante conduit à une légère augmentation de la température surfacique dans la nuit entre 1 :00 à 5 :00 pour atteindre une valeur maximale de 0.7 °C. Cette augmentation peut être expliquée par l'effet de d'évapotranspiration et de la chaleur piégée sous les arbres.

Pour la variante blanche, le fort albédo de la façade et du sol devant cette façade conduit à des températures surfaciques plus fraîches surtout durant la nuit et le matin. Un écart par rapport au cas initial de 7 °C est observé à 9 :00 et de 4.5 °C à 6:00. En revanche, durant l'après-midi la température de la façade « f1 » est presque semblable au cas initial, du fait de la réflexion des rayonnements dans la zone entourant cette façade.

Pour la variante bleue, la mise en place des sources d'eau qui a conduit à une diminution de la température de l'air ambiant, a permis une diminution très légère de la température de la façade tout au long de la journée.

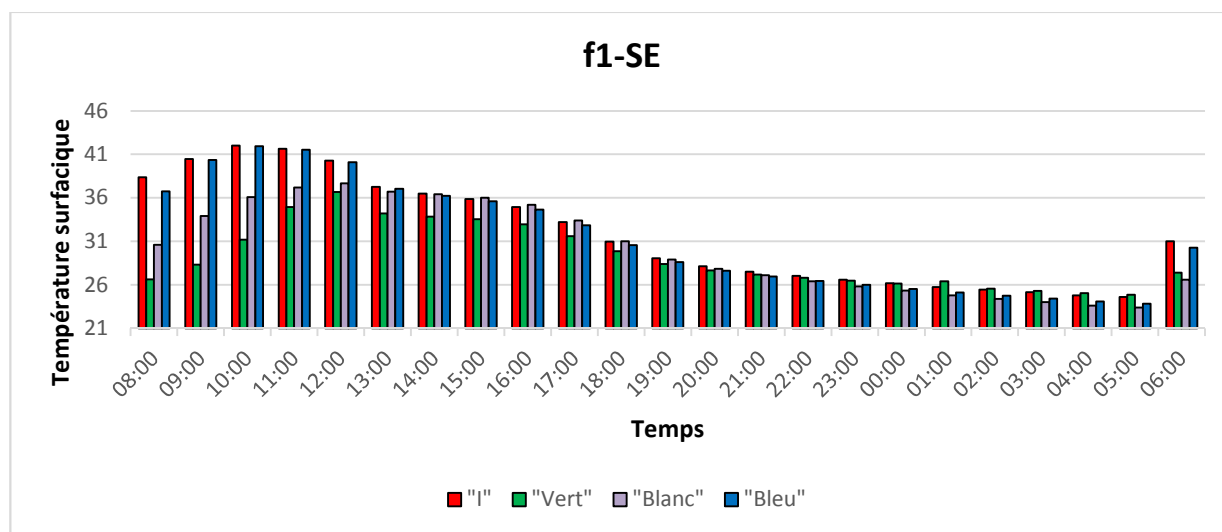


Figure 5.4: Température surfacique moyenne de la façade f1 (sud-est) du bâtiment de référence à 1.75 m du sol.

Pour la façade f2 orientée vers le sud-ouest, l'effet des variantes « verte » et « bleu » est presque semblable à celui remarqué sur la façade f1. Nous rappelons qu'une série des arbres est installée devant cette façade conduisant à une diminution de la température de surface de f2 d'environ 5 °C à 12 :00. Pour le modèle blanc, on remarque une augmentation de la température de f2 dans certaines heures ensoleillées de la journée; cette augmentation atteint un maximum d'environ 1.5 °C à 11 :00 toujours expliqué par les réflexions des rayonnements causé par les surfaces à grand albédo aux alentours de f2.

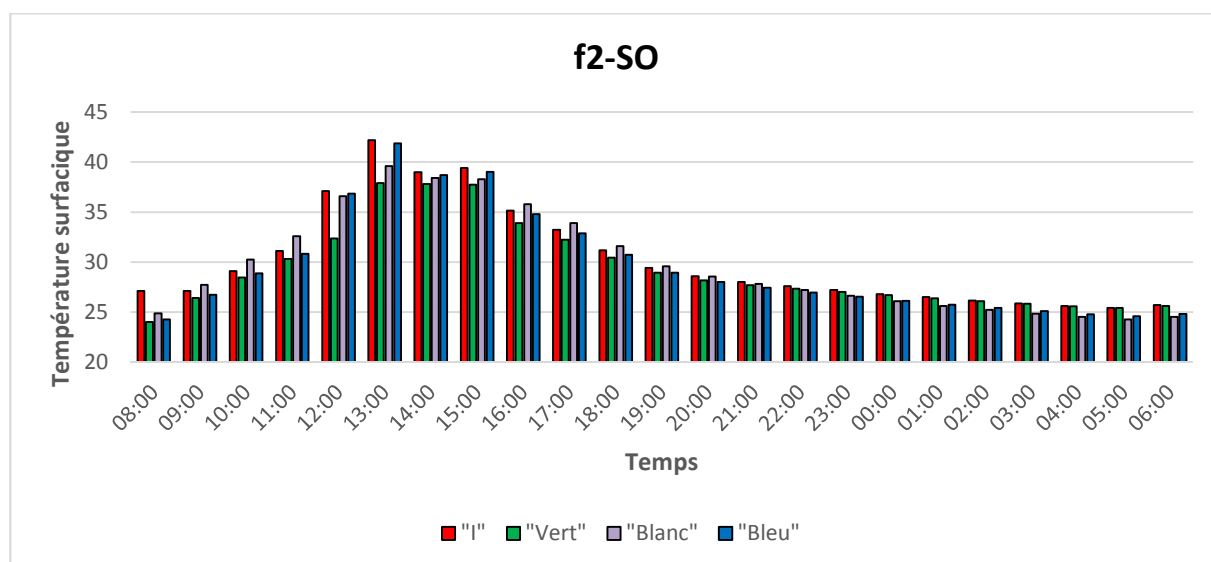


Figure 5.5: Température surfacique moyenne de la façade f2 (sud-ouest) du bâtiment de référence à 1.75 m du sol.

Pour les façades f3 et f4, on peut remarquer que l'effet des sources d'eau est plus important, notamment car les brumisateurs de type « B2 » sont installés devant et aux alentours de la façade f3. L'évaporation des gouttelettes d'eau permet une diminution de la température de ces façades le jour comme la nuit. La réduction peut atteindre 1.6 °C aux alentours de minuit. D'autre part, l'effet de la végétation sur ces façades est toujours observable mais avec une intensité moins importante due à la position des arbres qui sont un peu plus éloignés des façades f3 et f4 créant un effet d'ombre moins important que celui des façades f1 et f2. Finalement, la variante blanche conduit toujours à des températures surfaciques plus fraîches durant la nuit. Mais la position d'autres bâtiments devant les façades f3 et f4 qui conduit aux piégeages des rayonnements, explique bien l'augmentation des températures des façades dans certaines heures ensoleillées de la journée comme l'indique respectivement les Figures 5.6 et 5.7. Cette augmentation atteint un maximum de 2.5 °C pour f3 et de 1.5 °C pour f4.

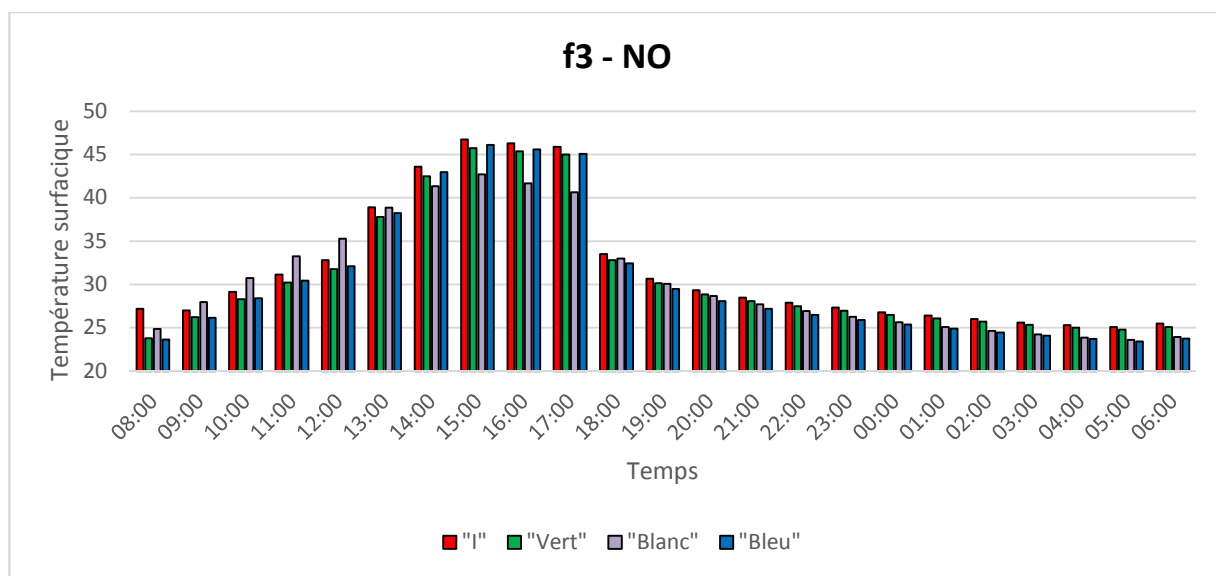


Figure 5.6: Température surfacique moyenne de la façade f3 (nord-ouest) du bâtiment de référence à 1.75 m du sol.

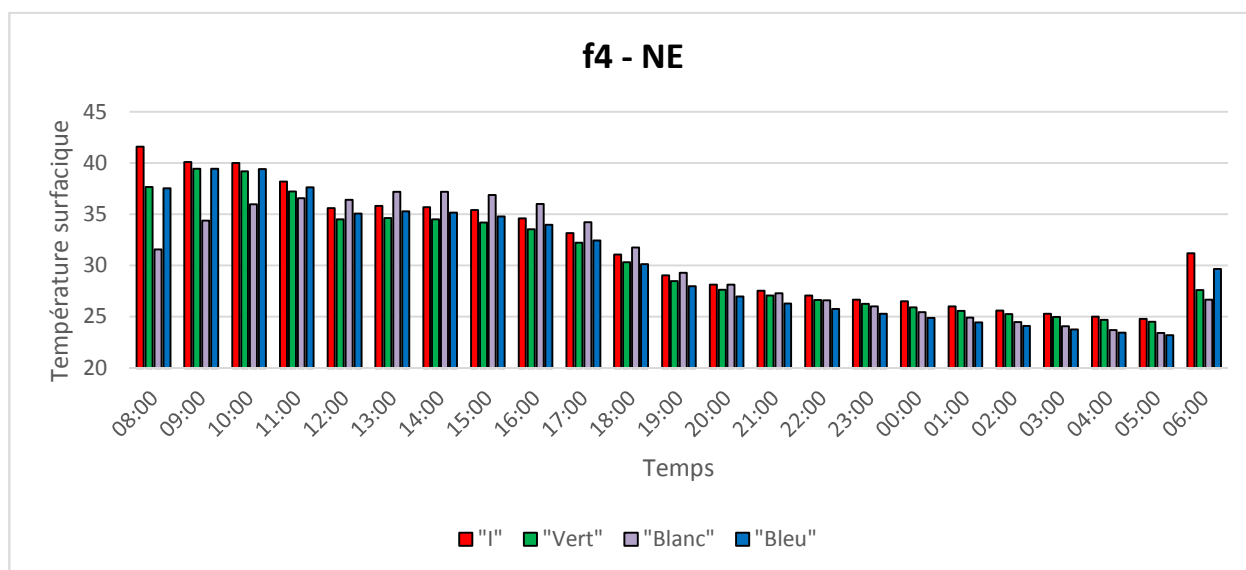


Figure 5.7: Température surfacique moyenne de la façade f4 (nord-est) du bâtiment de référence à 1.75 m du sol.

5.2.3 Température des toits

Les résultats des simulations montrent que l'effet des modèles « vert » et « bleu » sur la température surfacique du toit est très faible et presque négligeable. Ce comportement est attendu notamment car la hauteur du bâtiment de référence est élevée, de l'ordre de 28 m, alors que les sources d'eau sont installées à une hauteur maximale de 4 m et la hauteur maximale des arbres (type « C2 » et « SK ») voisins du bâtiment de référence ne dépasse pas les 15 m.

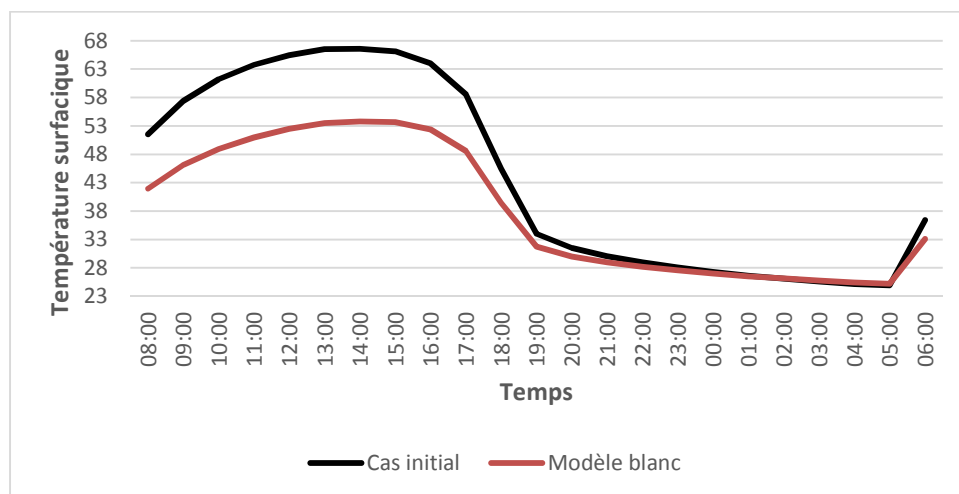


Figure 5.8: Température du toit du bâtiment de référence pour le modèle initial et le modèle blanc.

Contrairement aux modèles « vert » et « bleu », l'effet sur la toiture est bien remarquable pour la variante blanche. La Figure 5.8 montre la variation horaire de la température surfacique du toit du bâtiment de référence pour le modèle initial et le modèle blanc. Le graphe montre qu'il y a une diminution importante de cette température durant le jour du fait du pouvoir réfléchissant du matériau à fort albédo utilisé. La réflexion d'une portion importante des rayonnements solaires arrivant sur le toit permet la diminution de la température surfacique. Un écart maximal d'environ 13 °C est observé à 13 :00. Par contre durant la nuit, à partir de 22 :00, les températures des toits sont presque semblables à celles du modèle initial. Ceci est dû au fait qu'une surface à fort albédo fournit une réflexion élevée seulement dans un environnement radiatif solaire.

Enfin, nous présentons dans la Figure 5.9 une comparaison de la température du toit de référence entre le modèle « blanc » et le modèle « bâtiment blanc » dans le but de mettre en évidence l'effet de l'albédo élevé du revêtement du sol et des routes sur la toiture. Il est bien clair que l'effet est presque négligeable, le sol à fort albédo n'a aucun effet sur la toiture des bâtiments à grande hauteur.

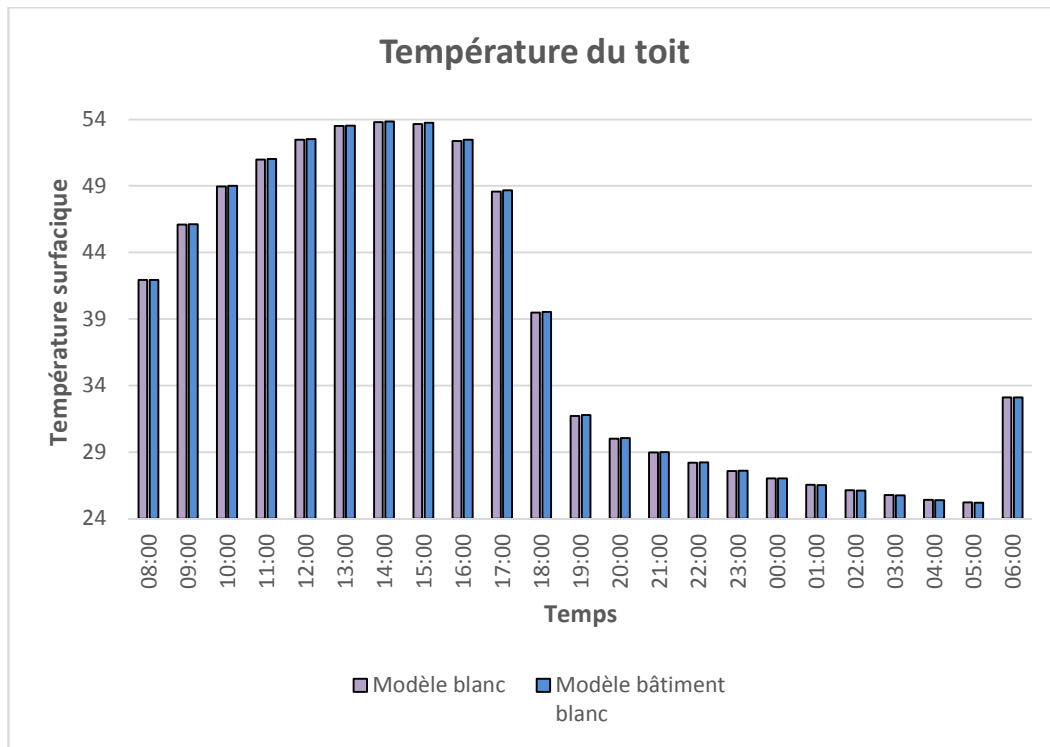


Figure 5.9: Température du toit du bâtiment de référence pour le modèle « blanc » et le modèle « bâtiment blanc »

D'après ce que nous venons de voir, il est bien clair qu'il y a une interaction « thermodynamique » entre les dispositifs de réduction d'ICU et les bâtiments car ces dispositifs affectent les paramètres microclimatiques entourant les bâtiments et les températures surfaciques de l'enveloppe de ces bâtiments. Il apparaît donc très intéressant d'étudier l'impact de ces dispositifs sur les charges de climatisation.

5.3 Couplage entre ENVI-met et HAP - Données météorologiques d'entrée

Les données météorologiques de température et d'humidité extraites des simulations réalisées avec ENVI-met, définissent les entrées météorologiques de HAP. Initialement, un profil horaire pour Beyrouth de température sèche et de température humide est déjà défini dans HAP pour les 12 mois de l'année. Ce profil peut être modifié selon les conditions désirées. D'après les fichiers extraits d'ENVI-met, les valeurs moyennes de température et d'humidité relative entourant chaque étage du bâtiment étudié sont déduits pour chaque heure de la journée. Ces valeurs définissent les entrées météorologiques de chaque simulation de HAP au lieu d'utiliser les valeurs du profil horaire initialement intégré dans HAP. La température humide relative à chaque température sèche et l'humidité relative, sont déduites d'après les équations de l'air humide (psychrometric chart). La Figure 5.10 indique le profil horaire de température humide et sèche pour le mois de Juillet réglé manuellement en utilisant les valeurs moyennes entourant l'étage du bâtiment étudié, obtenus des simulations d'ENVI-met relatives aux modèles étudiés.

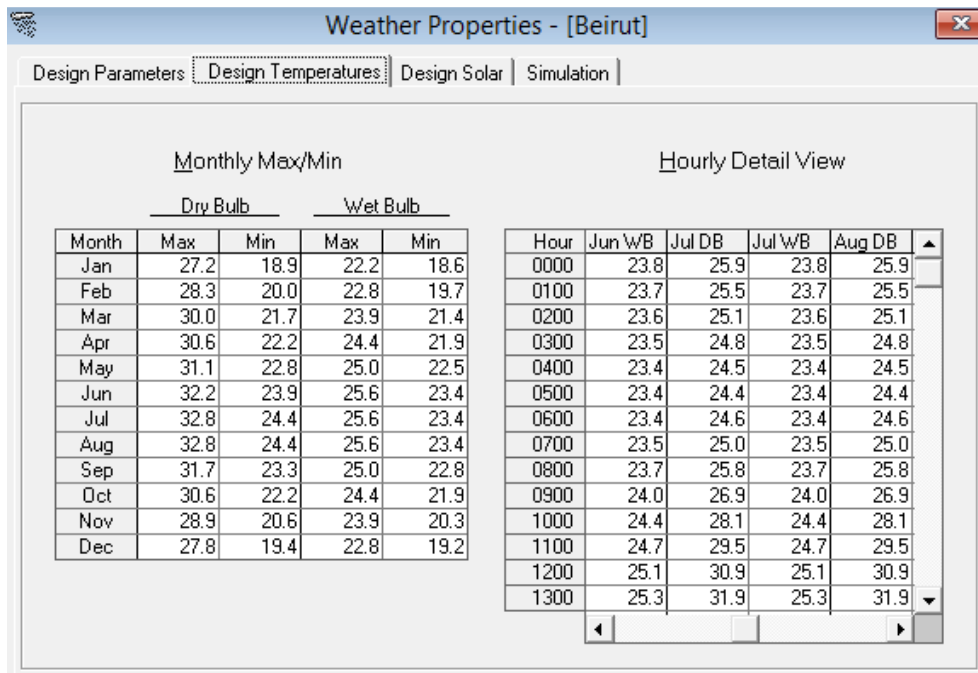


Figure 5.10 : Profil de température humide et sèche dans HAP

De même, HAP permet de modifier le profil du flux solaire déjà défini dans HAP, en utilisant un paramètre nommé « facteur multiplicateur ». Ce terme permet de prendre en considération la diminution du flux solaire arrivant sur le bâtiment causée par l'ombre créée par des obstacles comme les arbres qui sont positionnés devant le bâtiment. Le principe consiste à multiplier le flux total du modèle initial par un facteur dans le but d'obtenir une entrée des flux solaires semblable à celles extraites par ENVI-met. Nous notons que le logiciel ENVI-met permet d'extraire les flux solaires tombant sur chaque façade du bâtiment étudié. Si le flux tombant sur les parois du bâtiment a diminué par rapport au cas initial, le facteur multiplicateur sera inférieur à 1. Par exemple, si les cartes d'ENVI-met montrent une diminution de 15 % du flux solaire maximale à cause d'un obstacle créant une ombre, alors le facteur multiplicateur sera de 0.85. L'utilisation de ce facteur est très importante dans le cas du modèle vert, pour prendre en considération l'effet masquant des arbres sur les façades des bâtiments.

L'albédo du sol est aussi réglable dans HAP, permettant ainsi d'utiliser le même albédo que celui retenu dans les simulations d'ENVI-met. Alors, comme l'albédo du sol a été modifié dans les modèles blancs, la même valeur adoptée dans ENVI-MET sera utilisée dans les données d'entrées de HAP.

Ainsi, les charges de climatisations sensibles, latentes et totales qui constituent les sorties de HAP, varient selon les modèles d'atténuations comme les valeurs d'entrées (Température, humidité, flux solaire et albédo) ne sont pas identiques.

5.4 Calcul des charges de climatisation

Les résultats du paragraphe 5.2, ont clairement montré qu'une interaction directe existe entre l'îlot de chaleur urbain et le bâtiment. Dans ce qui suit, l'effet des dispositifs de limitation d'ICU sur les charges de climatisations du bâtiment étudié, est présenté. La variation horaire des

charges sensibles du premier étage du bâtiment étudié, est illustrée dans la Figure 5.11. Les graphes montrent clairement que les variantes « verte » et « bleue » provoquent une diminution de la charge sensible tout au long de la journée, alors que le modèle blanc a conduit à une augmentation de cette charge. Pour le modèle « bâtiment blanc » où l'augmentation de l'albédo se fait seulement au niveau des parois extérieures du bâtiment, la réduction des charges sensibles est observée surtout dans les heures ensoleillées.

A 16 :00, lors de la charge sensible maximale, le modèle vert produit une diminution de 2.9 kW (environ 8 %) par rapport au cas initial. Cette réduction est due principalement à l'effet d'ombrage créée par les arbres qui réduit les flux solaires totaux tombant sur l'enveloppe au niveau de l'étage. Nous rappelons que cette variante a réduit la température moyenne de l'air entourant le bâtiment d'environ 0.6 °C dans l'après-midi.

D'autre part, on constate que la variante bleue permet de diminuer la charge sensible à 16 :00 de 4 %. En effet les sources d'eau à travers l'évaporation des gouttelettes d'eau éjectées dans l'air nécessitant une absorption importante de la chaleur, ont provoqué une diminution de la température ambiante d'environ 1.2 °C permettant la réduction de la charge sensible.

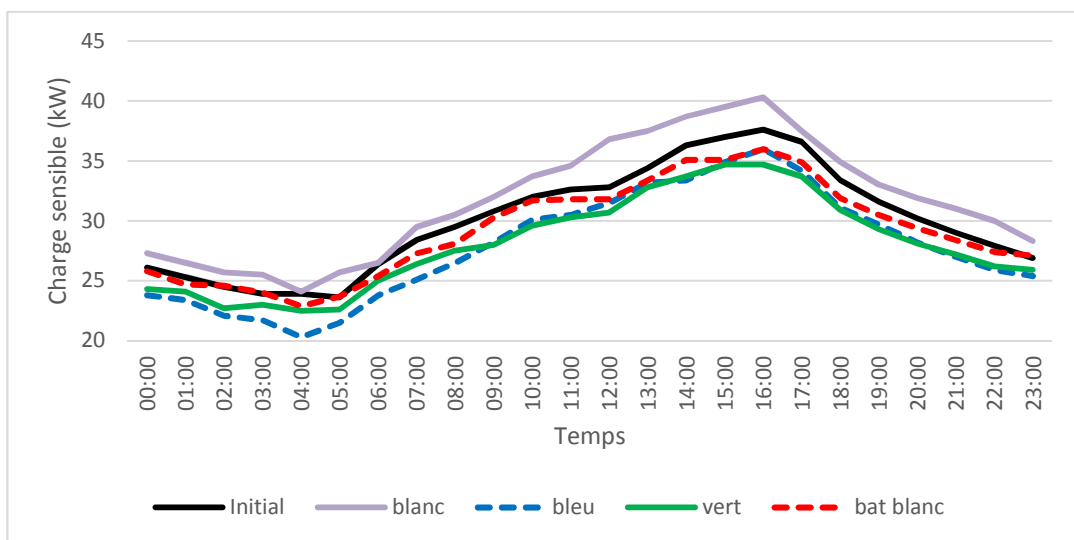


Figure 5.11: Variation horaire des charges sensibles pour les 5 modèles.

A contrario, le modèle blanc a conduit à une augmentation de la charge sensible qui est de l'ordre de 7 % à 16 :00 au moment où la charge est maximale. Nous notons que la valeur élevée de l'albédo du sol utilisée dans les simulations du modèle blanc dans ENVI-met, est la même utilisée dans les calculs réalisées par HAP. La valeur maximale de cette augmentation est observée à midi et atteint les 4 kW. L'albédo élevé du sol ainsi que celui des façades des bâtiments, provoquent des multi-réflexions des rayons solaires qui sont responsables de cette augmentation de la charge sensible. En analysant les composantes de ces charges, on remarque que les apports par transmission des vitrages sont essentiellement responsables de cette augmentation des charges ; les rayonnements réfléchis par les surfaces claires du modèle traversent les vitres du bâtiment et provoquent l'élévation des charges sensibles. Cependant

l'adoption d'un albédo élevé pour toutes les surfaces du quartier n'est pas efficace sur la consommation énergétique, bien que ce modèle ait provoqué une diminution de la température ambiante d'environ 1 °C à midi. Toutefois, si l'albédo élevé est utilisé seulement pour l'enveloppe du bâtiment en laissant les routes à faible albédo comme le cas du scénario « bâtiment blanc », les charges sensibles de climatisation diminuent, ceci étant dû principalement au pouvoir réfléchissant des surfaces claires du bâtiment. A 16 :00, cette variante contribue à une réduction de 4 % des charges sensibles par rapport au cas initial. La réduction maximale est observée à 15 :00 avec une valeur de 1.9 kW.

Pour la charge latente, comme prévu le modèle bleu provoque un accroissement de cette charge durant les 24 heures de simulation due à l'augmentation de l'humidité relative causée par l'évaporation de l'eau. L'augmentation de l'humidité relative atteint les 13 % pour certaines heures. A 16 :00, la charge latente a augmenté d'environ 17 % ; à contrario les modèles « vert », « blanc » et « bâtiment blanc » affectent faiblement la charge latente en la diminuant de 100W, soit un pourcentage de 2 %. L'écart maximal causé par le modèle bleu, est observé à 10 :00 le matin, avec une valeur d'environ 1 kW. La Figure 5.12, montre que le modèle vert provoque une légère augmentation de la charge latente dans certaine heures de la journée, liée notamment à l'effet d'humidification des végétaux

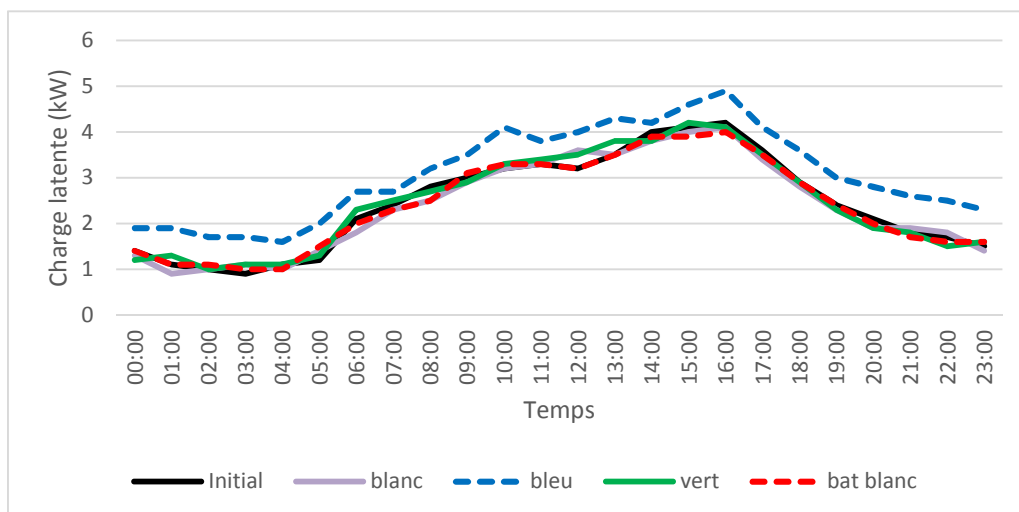


Figure 5.12: Variation horaire des charges latentes pour les 4 modèles.

Si l'on s'intéresse à la charge totale de climatisation, le modèle vert semble le plus efficace avec une diminution de 7 % à 16 :00. Bien qu'il ait conduit à une augmentation importante de la charge latente, le modèle bleu permet tout de même une diminution de 2 % de la charge totale à 16 :00. Pour le modèle « Bâtiment blanc », les charges totales de pointe diminuent de 4 %. Pour le modèle « blanc », les simulations ont montré que ce modèle provoque une augmentation des charges de climatisation qui atteint les 6 % à 16 :00.

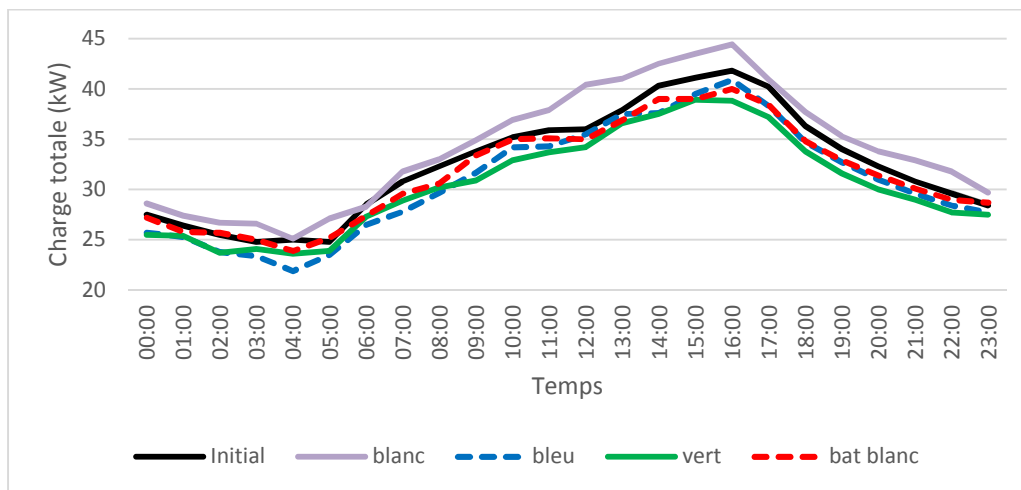


Figure 5.13: Variation horaire des charges totales pour les 4 modèles.

Le tableau 5.1 montre les charges en kWh intégrées sur toute la journée. Les résultats montrent que le scénario vert est le plus favorable pour la réduction des charges totales de climatisation avec un écart de 46.2 kWh, provoquant une diminution d'environ 6 %.

Pour la variante bleue, l'augmentation de la charge latente est observée tout au long de la journée provoquant une augmentation importante de 15.2 kWh, soit environ 26 % par rapport au modèle initial. Mais cette variante a montré son efficacité dans la réduction des charges sensibles, produisant la réduction maximale parmi les scénarios de limitation d'ICU avec un pourcentage d'environ 8 %. Enfin, bien que l'utilisation de sources d'eau conduise à une augmentation des charges sensibles, celles-ci permettent de diminuer la charge totale de 5 % par rapport au cas initial.

Tableau 5.1 : Consommations énergétiques en kWh intégrées sur la journée étudiée.

Charges	Modèle initial	Modèle blanc	Modèle bat blanc	Modèle bleu	Modèle vert
Sensible (kWh)	720.7	761	701.3	667.5	673.9
Latente (kWh)	58.5	57.2	57.8	73.7	59
Totale (kWh)	779.2	818.2	759.1	741.2	732.9

D'autre part, le modèle « Bâtiment blanc » affecte principalement les charges sensibles permettant de diminuer les charges totales de 20 kWh, soit un pourcentage de 3 %. Par contre, l'utilisation d'un albédo élevé des surfaces du quartier et de l'enveloppe des bâtiments dans le modèle blanc, permet une augmentation de la charge totale de 6 %. Cette augmentation est due aux charges sensibles plus élevées causées par les phénomènes de réflexions produites par les surfaces claires du modèle blanc, entraînant un grand nombre de rayonnement réfléchi à travers les surfaces vitrées du bâtiment.

Les techniques de réduction d'ICU n'affectent pas seulement les charges climatiques du premier étage mais aussi celles des autres étages. Le degré d'influence varie d'un étage à un autre et dépend aussi de la technique utilisée. La Figure 5.14 présente les consommations énergétiques sensibles de climatisation du bâtiment entier sur les 24 heures de la journée d'été. L'histogramme de la Figure 5.14 montre que le scénario bleu est le plus favorable à la réduction des consommations énergétiques avec une diminution de 297.7 kWh. L'utilisation des

brumisateurs et des fontaines dans le modèle bleu a permis une diminution de 5 % des consommations énergétiques sensibles par rapport au cas initial. En effet le jet d'eau qui se fait à une hauteur de 4 mètres, a réduit la température moyenne tout au long de la hauteur du bâtiment. Une diminution de température est observée au milieu de bâtiment pour certaines heures de la journée, mais surtout durant la nuit ; cette diminution atteint une valeur de 1.4 °C. Une réduction de température d'une valeur maximale de 0.9 °C est aussi détectée autour du dernier étage. Cette diminution de température autour de chaque étage du bâtiment, a causé la réduction des charges sensibles. Pour les charges latentes, il est bien clair dans la Figure 5.15 que la variante bleue provoque une augmentation des charges latentes du bâtiment entier. L'écart par rapport au cas initial est d'environ 13 %. Cette augmentation de charge est plus importante dans les 3 premiers étages notamment car la variante bleue a augmenté l'humidité relative moyenne entourant ces étages d'une valeur de 12 % pour certaines heures la nuit et de 9 % le matin. L'effet du scénario bleu sur les charges latentes des 2 derniers étages est presque négligeable. Pour les autres scénarios, la Figure 5.15 montre que l'effet sur les charges latentes est faible. L'écart par rapport au cas initial est de – 1.5 % pour le modèle blanc, de -0.5 % pour le modèle vert et de +1.7 % pour le modèle « bâtiment blanc ». Mais bien que la variante bleue ait produit une augmentation des charges latentes, cette variante a diminué l'énergie de consommation totale d'environ 3.7 %, de l'ordre de 237.1 kWh comme indique la Figure 5.16.

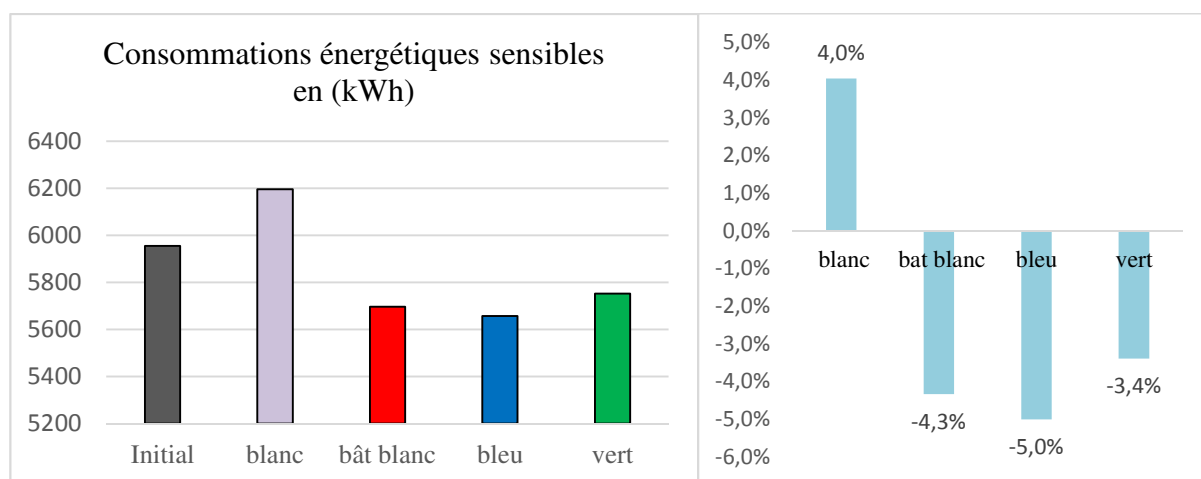


Figure 5.14: Consommations énergétiques sensibles de climatisation du bâtiment entier sur toute la journée pour chaque modèle.

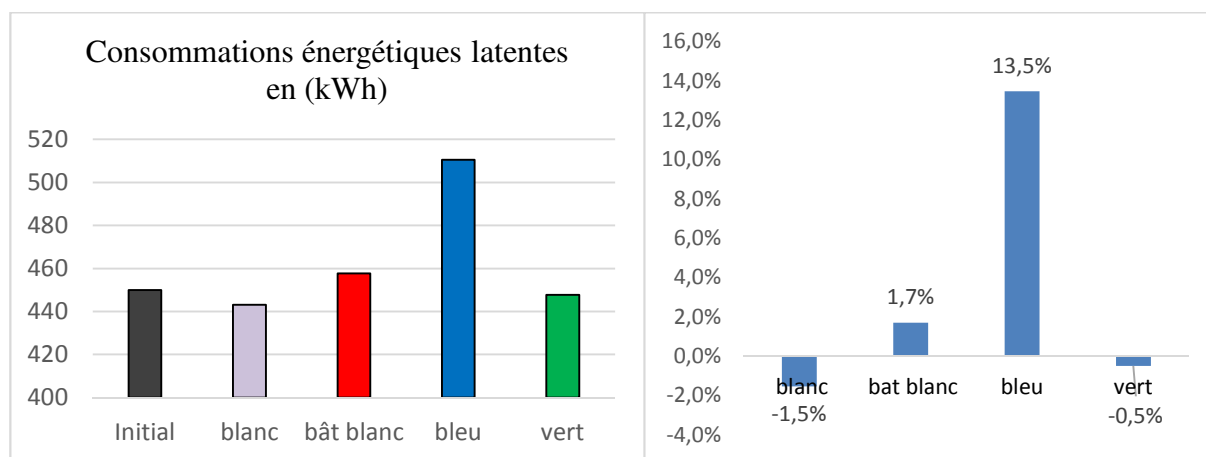


Figure 5.15: Consommations énergétiques latentes de climatisation du bâtiment entier sur toute la journée pour chaque modèle.

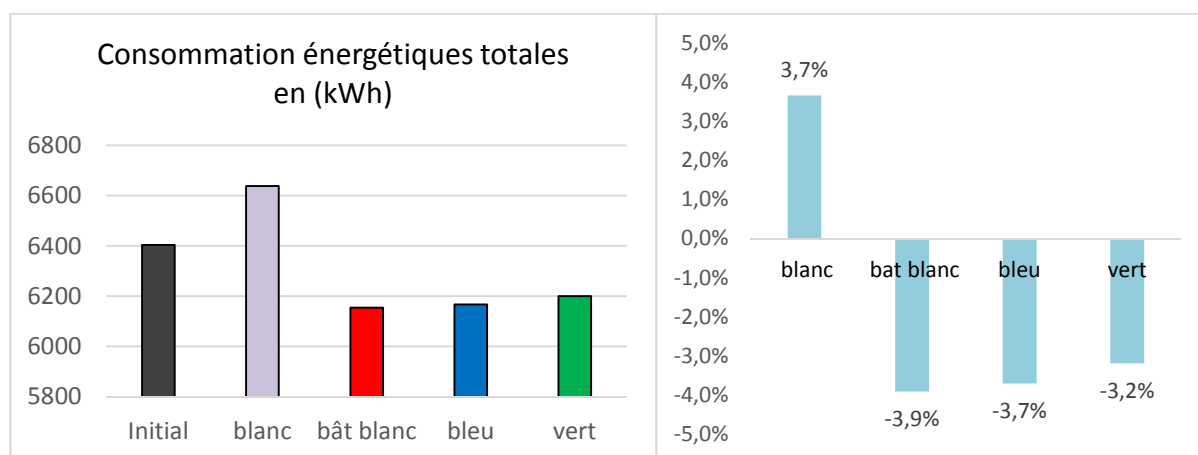


Figure 5.16: Consommations énergétiques totales de climatisation du bâtiment entier sur toute la journée pour chaque modèle.

Pour le modèle vert, les Figures 5.14 et 5.16 montrent respectivement le potentiel de ce dispositif dans la diminution des charges sensibles et totales, qui atteint respectivement 201.9 kWh et 204.1 kWh, soit un pourcentage d'environ 4 %. Nous rappelons que cette réduction des charges est due à la diminution de la température ambiante et de l'effet d'ombre créée par les arbres sur les façades des bâtiments. Mais cette réduction des charges est observée essentiellement pour les 4 premiers étages car la hauteur des arbres ne dépasse pas les 15 mètres. C'est ainsi que pour les étages dont la hauteur dépasse les 15 mètres, une faible réduction des charges de climatisation est observée, puisque les flux solaires tombant sur les façades ne sont pas masqués par le feuillage des arbres. L'écart des charges totales par rapport au modèle initial était de 6 % pour le premier étage, il devient 1 % pour le dernier étage.

Pour le modèle blanc, nous constatons que ce dispositif contribue à l'augmentation des charges de climatisations sensibles et totales du bâtiment. Les résultats montrent que ce scénario n'est pas du tout efficace dans la réduction des consommations énergétiques de climatisation. La Figure

5.14 montre que ce modèle augmente les charges sensibles de 241 kWh, soit un pourcentage de 4 %. De même, les charges totales augmentent aussi d'une valeur de 3.7 %. En effet l'albédo élevé du revêtement du sol et de l'enveloppe des bâtiments a contribué à augmenter les charges sensibles. D'où la nécessité d'optimiser cette variante puisque l'utilisation de sols à surface claire de façon aléatoire ne présente pas une solution pour limiter les charges, surtout sous climat libanais et pour une morphologie urbaine comme celle de Dora. Cette variante a prouvé son efficacité uniquement pour le dernier étage, car l'albédo des toitures est plus élevé (terracota 0.5) que celui du modèle initial. Nous observons une diminution importante au niveau de cet étage d'environ 7.4 % pour la composante sensible et de 6.7 % pour la composante totale, comme indiqué sur les Figures 5.18 et 5.19.

Enfin, pour le modèle « Bâtiment blanc », la Figure 5.16 montre que ce modèle est le plus efficace dans la réduction des charges totales si l'on considère le bâtiment entier parmi toutes les techniques de réduction d'ICU, avec une diminution de 250 kWh, soit un pourcentage de 4 %. Les Figures 5.17 et 5.18 montrent clairement que ce modèle a fortement contribué à atténuer les charges sensibles et totales au niveau du dernier étage, avec un écart de 134 kWh pour les charges sensibles (14 %) et de 128 kWh pour les charges totales (12 %). Par conséquent, la diminution importante des charges au niveau du dernier étage, a conduit ce scénario à être le plus efficace globalement (au niveau du bâtiment entier), grâce au fort albédo des toitures des bâtiments dans ce modèle.

Les Figures 5.19 et 5.20 montrent respectivement les variations horaires des charges sensibles et totales au niveau du dernier étage. Les graphes montrent clairement le pouvoir de l'albédo élevé au niveau des toitures dans la réduction des charges de climatisation surtout pour le cas du modèle « Bâtiment blanc », dont la diminution des charges totales atteint une valeur maximale à 14 :00 avec un écart de 16 kW (diminution de 27 %).

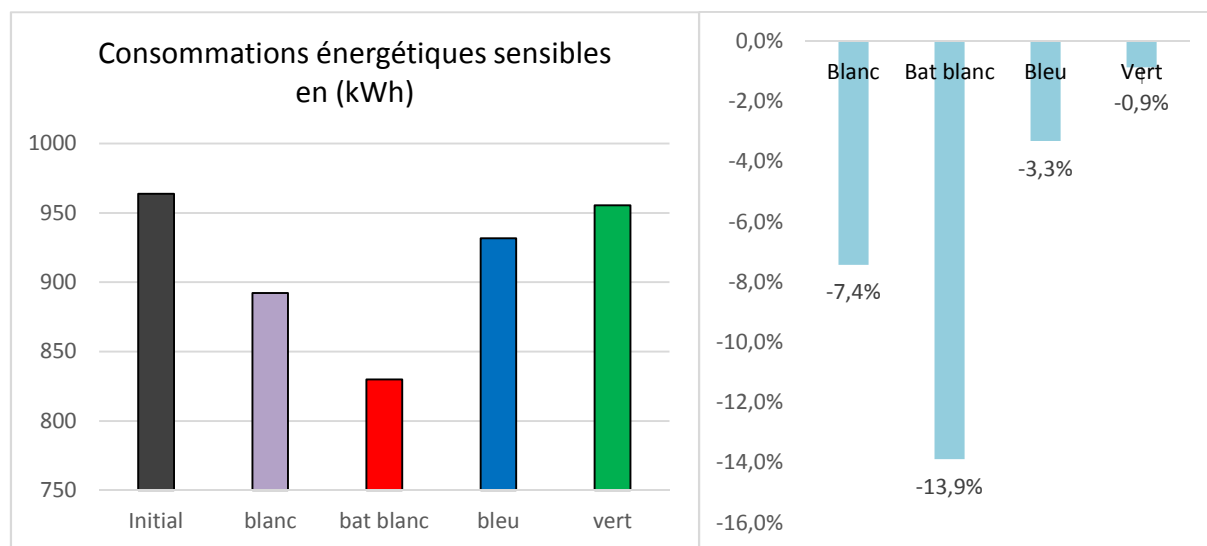


Figure 5.17: Consommations énergétiques sensibles de climatisation du dernier étage (roof) sur toute la journée pour chaque modèle.

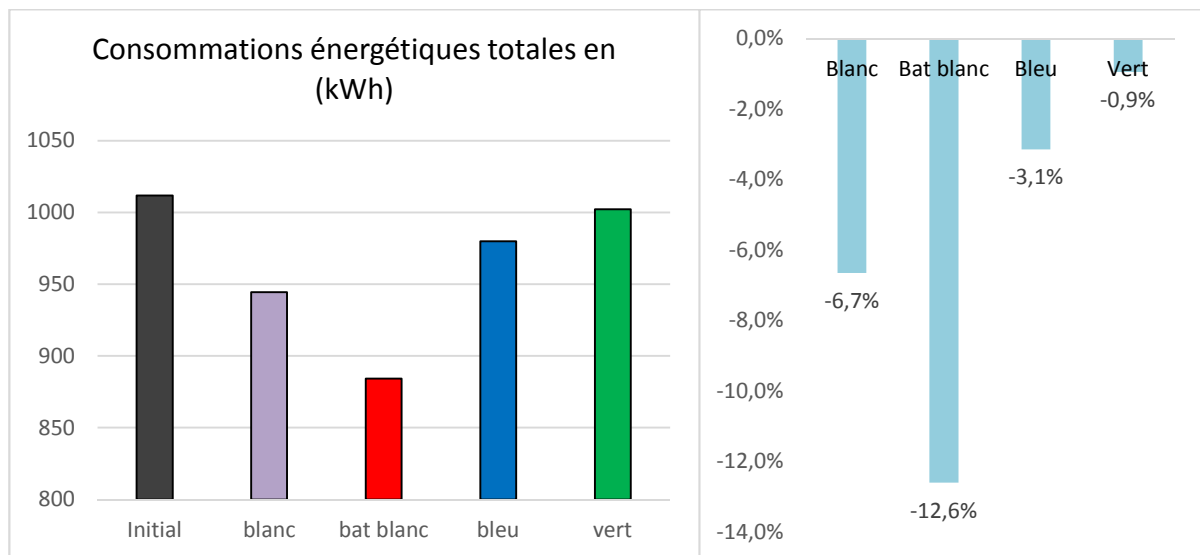


Figure 5.18: Consommations énergétiques totales de climatisation du dernier étage (roof) sur toute la journée pour chaque modèle.

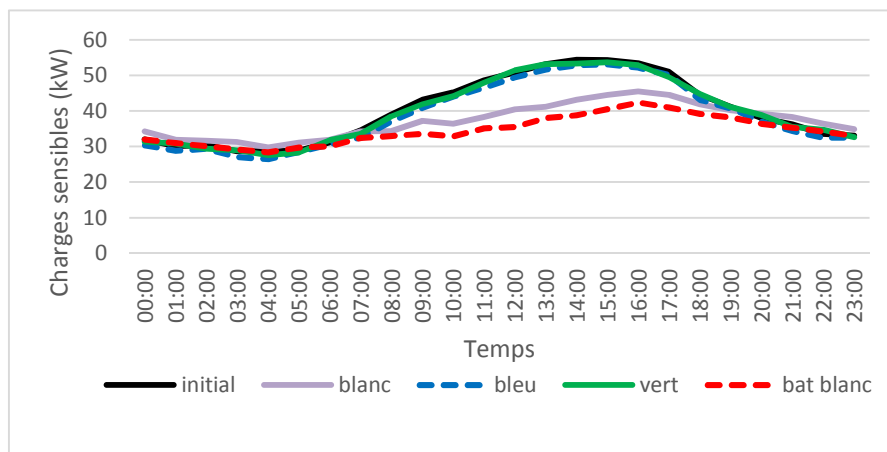


Figure 5.19: Variation horaire des charges sensibles pour les 5 modèles au niveau du dernier étage.

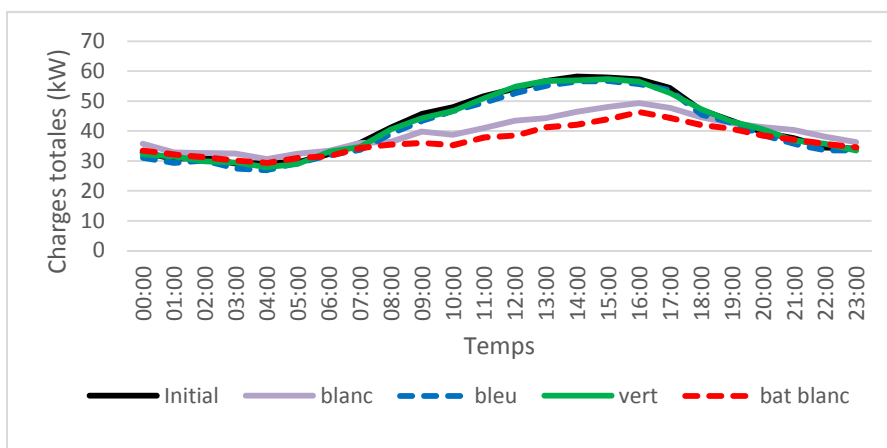


Figure 5.20: Variation horaire des charges totales pour les 5 modèles au niveau du dernier étage.

5.5 Bâtiment de référence

Dans ce paragraphe, nous discutons l'effet des dispositifs d'atténuation d'ICU sur les charges de climatisation d'un autre bâtiment, qui se trouve plus au centre du quartier. Le but est de mettre en évidence comment l'impact de ces dispositifs varie d'un bâtiment à un autre.

5.5.1 Description du bâtiment de référence et conditions d'entrée

La Figure 5.21 indique la position du bâtiment de référence dans le quartier et son orientation. La surface de chaque étage est de $1180m^2$, ce qui est largement plus important que le bâtiment sensible décrit dans la partie précédente. Les surfaces vitrées constituent toujours 30 % de chaque façade. Pour les propriétés thermiques des fenêtres, des planchers et parois extérieures, nous considérons les mêmes conditions utilisées que pour le bâtiment sensible. Le débit d'air pour le renouvellement d'air est toujours de 1 ACH. Pour cet étage, nous supposons un nombre d'occupants de 85 personnes dégageant une chaleur sensible de 71.8 W/personne et une chaleur latente de 60.1 W/personne. La puissance totale des équipements électriques est de 4500W et la puissance d'éclairage est toujours de 25W/m². Le bâtiment de référence dans les modèles vert et bleu est montré dans la Figure 5.23.

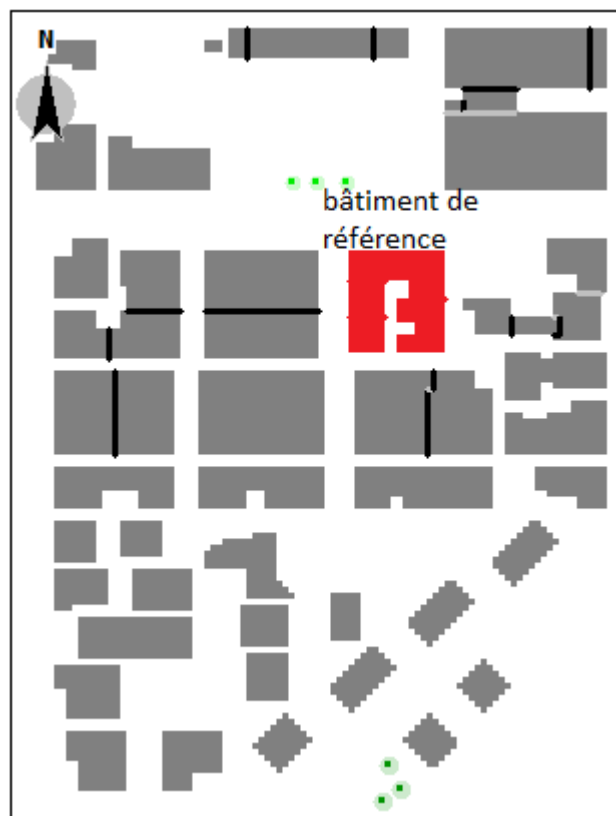


Figure 5.21: Bâtiment de référence dans le modèle initial.

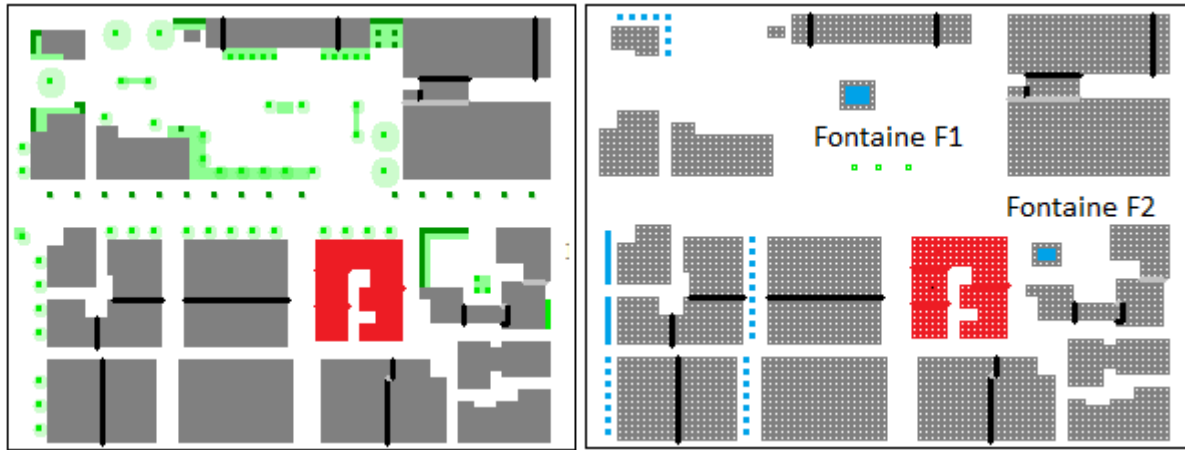


Figure 5.22: Modèle 2D du bâtiment de référence dans le modèle vert (à gauche) et dans le modèle bleu (à droite).

5.5.2 Calcul des charges de climatisation du bâtiment de référence

Nous présentons dans ce paragraphe l'effet des dispositifs de limitation d'ICU sur les charges sensibles, latentes et totales du bâtiment de référence. La Figure 5.24 montre la variation horaire des charges sensibles du premier étage de ce bâtiment pour les mêmes heures de simulations des parties précédentes. Pour ce cas, les résultats montrent que la variante « bleue » est la plus efficace parmi les autres variantes dans la diminution des charges sensibles tout au long de la journée. Les scénarios « vert » et « bâtiment blanc » provoquent la réduction des charges sensibles mais d'une façon plus faible. Pour le modèle blanc, comme c'est attendu ce modèle a conduit à une augmentation de cette charge tout au long de la journée et qui s'accroît durant les heures les plus ensoleillées dues aux réflexions des rayons solaires qui traversent les parois transparentes du bâtiment.

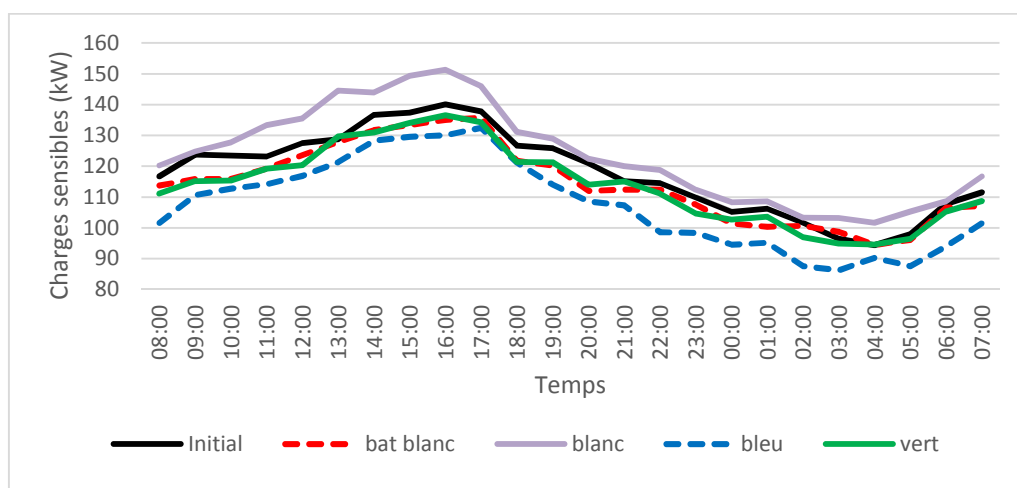


Figure 5.23: Variation horaire des charges sensibles pour le bâtiment de référence.

Lors de la charge sensible maximale qui est observé à 16 :00, le modèle bleu produit la diminution la plus élevée de l'ordre de 10 kW. Pour le bâtiment sensible, l'écart était 4 %, alors que pour le bâtiment de référence cet écart devient 7.1 % ; cette augmentation est expliquée par le fait que la réduction de la température ambiante autour du bâtiment de référence est plus grande que celle observée autour du bâtiment sensible avec une différence maximale qui atteint 0.8 °C.

Contrairement au bâtiment sensible, le modèle vert n'est pas le plus favorable dans le cas du bâtiment de référence et provoque une diminution des charges sensibles qui ne dépasse pas les 2.5 % à 16 :00. Nous rappelons que cet écart était plus élevé dans le cas du bâtiment sensible avec une valeur de 8 % ; les arbres créent un ombre sur environ la moitié des surfaces extérieures. Alors que dans le cas du bâtiment de référence l'effet d'ombre est observé sur environ 25 % des parois extérieures ce qui explique la différence de l'impact de la végétation sur les charges sensibles entre les deux bâtiments étudiés. De plus l'effet du modèle vert sur la température ambiante entourant le bâtiment de référence est faible en provoquant une réduction de Ta de 0.25 °C.

Le modèle blanc a encore conduit à une augmentation de la charge sensible qui est de l'ordre de 8 % à 16 :00, presque similaire au cas du bâtiment sensible. Les multi-réflexions des rayons solaires causés par l'albédo élevé des routes en asphaltes et des pavements de bétons clairs, ainsi que celui des façades des bâtiments, provoquent cette augmentation de la charge sensible. Les rayonnements traversent les surfaces transparentes du bâtiment et contribuent à cette augmentation des charges. Pour le cas du scénario « bâtiment blanc », une réduction des charges sensibles d'environ 3.6 % est observée à 16 :00. L'effet réfléchissant des surfaces claires du bâtiment est responsable de cette diminution.

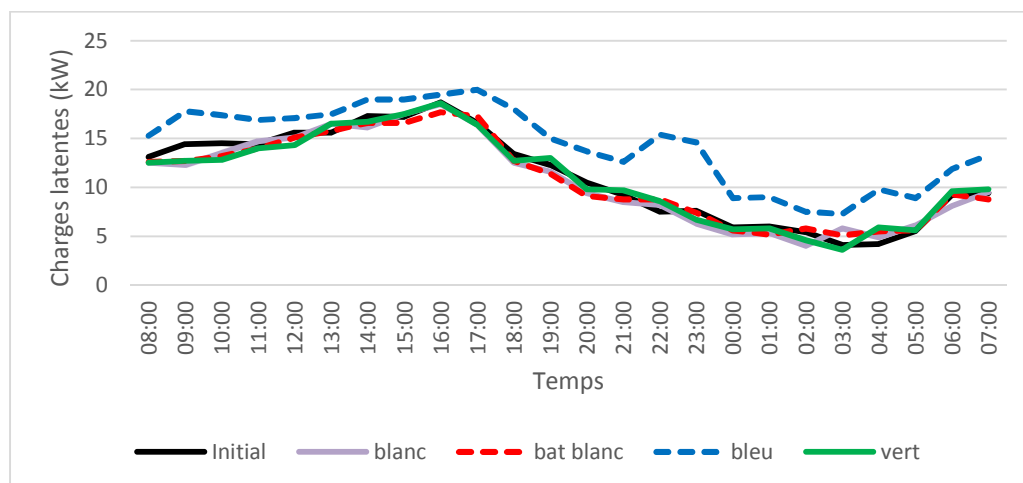


Figure 5.24: Variation horaire des charges latentes pour le bâtiment de référence.

La Figure 5.24 montre la variation horaire des charges latentes pour le bâtiment de référence. L'évaporation de l'eau éjectée par les fontaines et les brumisateurs augmente l'humidité relative et provoque ainsi une augmentation des charges latentes tout au long de la journée. L'écart de l'humidité relative atteint les 16 % pour certaines heures. L'écart maximal causé par le modèle bleu, est observé à 22:00 le soir, avec une valeur de 7.9 kW. A 16 :00, la charge latente a augmenté d'environ 5 % dans le cas du scénario bleu, alors que pour les modèles « vert », « blanc » et « bâtiment blanc », l'effet est presque négligeable avec une réduction qui ne dépasse pas les 1 %.

La variation des charges totales de climatisation du bâtiment de référence sont tracées sur la Figure 5.25. Le modèle bleu est le plus favorable provoquant une diminution de 6.2 % à 16 :00 au moment où la charge est maximale. Une réduction de 3.8 % est observée dans le cas du modèle « bâtiment blanc ». Pour le modèle vert, la réduction est plus faible avec un pourcentage de 2.3 %, due à la limitation de l'implémentation de grande surface de végétation autour de ce bâtiment, étant entouré par des bâtiments très proches. L'augmentation des charges totales causées par le modèle blanc atteint les 6.9 % à 16 :00.

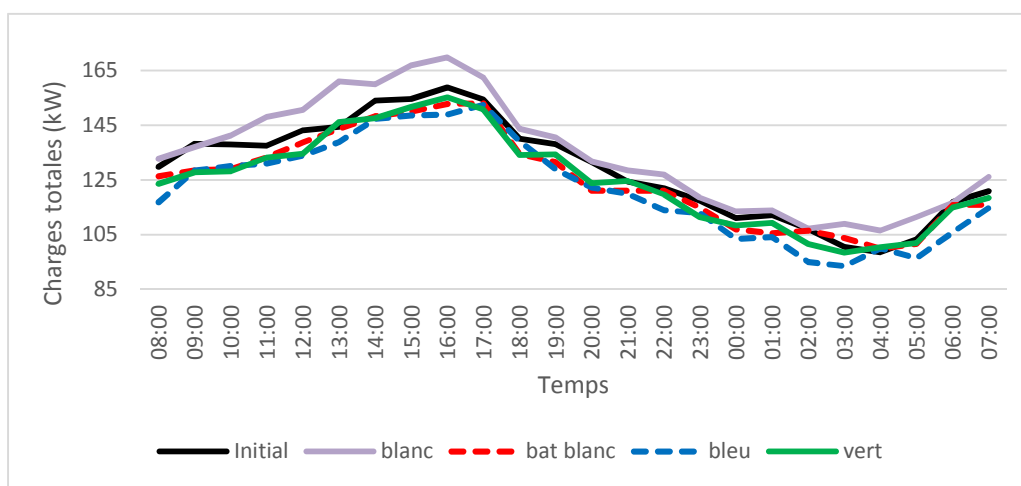


Figure 5.25: Variation horaire des charges totales pour le bâtiment de référence.

Le tableau 5.2 montre les consommations énergétiques du premier étage du bâtiment de référence en kWh, intégrées sur toute la journée. Les résultats montrent que le modèle bleu est le plus favorable dans la réduction des charges sensibles et totales de climatisation avec un écart respectivement de 246 kWh (8.7 %) et de 168.8 kWh (5.5 %). Pour les consommations relatives aux charges latentes, la variante bleu conduit à une augmentation importante de 77.2 kWh, d'environ 29 % par rapport au modèle initial. Nous rappelons que cette augmentation est la cause de l'humidité relative élevée produite par ce modèle. Pour le modèle vert, les Figures 5.26 et 5.27 montrent que le pourcentage de réduction des charges sensibles et totales est de l'ordre de 3 %. Ce pourcentage est presque semblable au cas du modèle « bâtiment blanc » comme l'indique les Figures 5.26 et 5.27. A contrario, le modèle blanc, entraîne une augmentation de la consommation énergétique totale de 4.1 %, ainsi que des charges sensibles de 4.8 %. Cette augmentation est due à la part des charges sensibles élevées causées par les rayonnements traversant les surfaces vitrées du bâtiment.

Tableau 5.2: Consommation énergétiques en kWh intégrées sur la journée étudiée (de 9 Juillet 7:00 à 10 Juillet 7 :00)

Charges	Modèle initial	Modèle blanc	Modèle bat blanc	Modèle bleu	Modèle vert
Sensible (kWh)	2829.5	2965.8	2744.6	2583.5	2737.4
Latente (kWh)	267.6	258.5	260.7	344.8	263.1
Totale (kWh)	3097.1	3224.3	3005.3	2928.3	3000.5

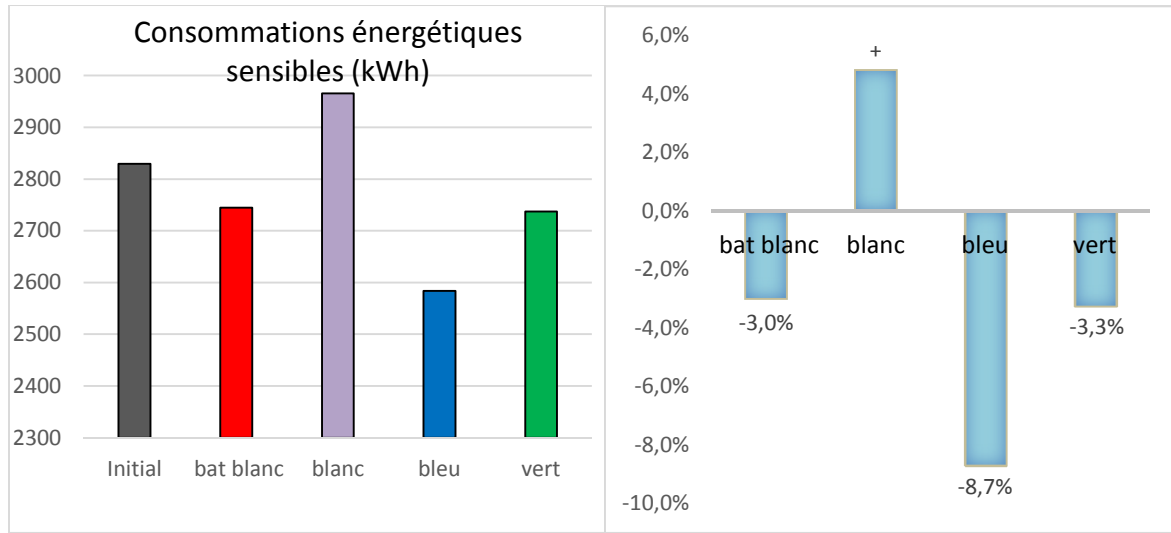


Figure 5.26: Consommations énergétiques sensibles de climatisation du premier étage du bâtiment de référence sur toute la journée pour chaque modèle (à gauche) et le pourcentage de variation par rapport au modèle initial (à droite).

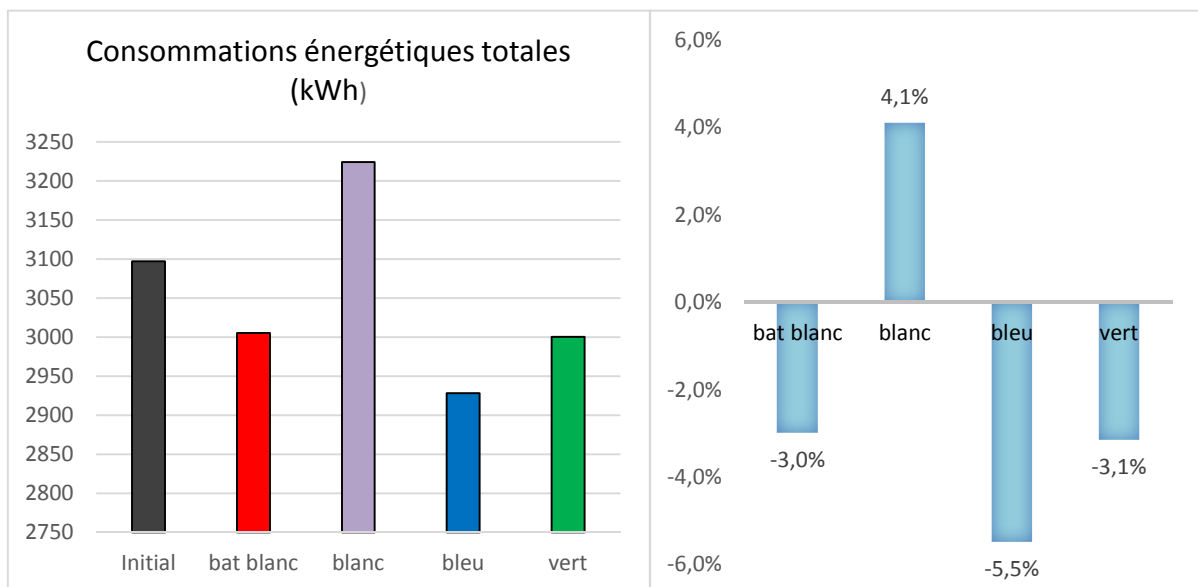


Figure 5.27: Consommations énergétiques totales de climatisation du premier étage du bâtiment de référence sur toute la journée pour chaque modèle (à gauche) et le pourcentage de variation par rapport au modèle initial (à droite).

5.6 Confort du piéton

Pour créer de villes qualifiées de « durables », la conception de l'environnement extérieur demeure un élément essentiel pour l'activité urbaine. En effet, un environnement assurant un confort thermique encourage l'activité des piétons, des touristes et des personnes qui font du vélo et des activités en plein air. En d'autres termes, un confort thermique extérieur permet d'améliorer la qualité de la vie urbaine et permet d'encourager la population à fréquenter les rues et les espaces extérieurs qui seront bénéfiques pour les villes au niveau économique, social, touristique, et environnemental (Hakim, et al., 1998) (Hass-Klau, 1993) (Jacobs, 1972) (Whyte, 1988). La conception du confort thermique extérieur est essentiellement affectée par le microclimat puisque le piéton est directement exposé aux variables microclimatiques comme la vitesse du vent, l'ensoleillement, l'ombre etc...

Dans cette partie, le confort thermique est analysé à partir de la température physiologique équivalente PET définie auparavant. Un itinéraire à l'intérieur du quartier est choisi dans le but de mettre en évidence l'effet des dispositifs d'atténuation d'ICU sur le confort extérieur.

5.6.1 Cartes de la distribution spatiale du PET

Les cartes de la distribution spatiale de l'écart de la température physiologique équivalente entre le modèle initial et les modèles de limitation d'ICU (vert, bleu, blanc et bâtiment blanc) à midi et minuit sont montrées respectivement dans les Figures 5.28 et 5.29. Les hypothèses de calcul du PET sont similaires à celles décrites dans le chapitre 3 : homme de 35 ans, taille de 1.75 m, masse de 75 kg, vitesse de marche de 1.21 m/s, métabolisme total 164.49 W, et 0.5 Clo pour sa résistance vestimentaire. Nous rappelons, que les résultats du chapitre 3 ont montré que la PET du piéton à midi varie entre 34 °C et 55 °C indiquant que le piéton est soumis à une condition de stress thermique. Ceci souligne l'importance d'étudier l'effet des dispositifs d'atténuation d'ICU sur le confort thermique.

Dans le cas de la variante verte, l'influence de la végétation et des arbres sur la PET est visible. Une diminution de la PET est observée surtout au-dessous des arbres avec un écart ponctuel qui atteint une valeur maximale de 14 °C. Cet écart est considérable en termes de confort extérieur. Cette diminution est expliquée principalement par l'effet d'ombre causé par les arbres empêchant le piéton d'être exposé directement au rayonnement solaire. Par contre la nuit, un effet contraire est observé sous les arbres avec une augmentation de la PET qui atteint 1.2 °C. Ceci est dû au phénomène d'évapotranspiration de la végétation et à la chaleur radiante absorbée par les arbres durant la journée et réémise en partie le soir.

Au niveau de la variante bleue, les fontaines et les brumisateurs implémentés dans le quartier conduisent à des températures physiologiques équivalentes plus faibles durant le jour, proche des sources d'eau. Contrairement à la variante verte, la diminution de la PET n'est pas seulement ponctuelle mais une extension au voisinage des sources d'eau en aval du vent est encore observée. L'écart maximal atteint ponctuellement 9 °C à midi, observé juste aux bords des fontaines. Les taches vertes et jaunes montrent qu'une diminution moyenne entre 4 et 5 °C est observée en aval du vent à distance importante des fontaines.

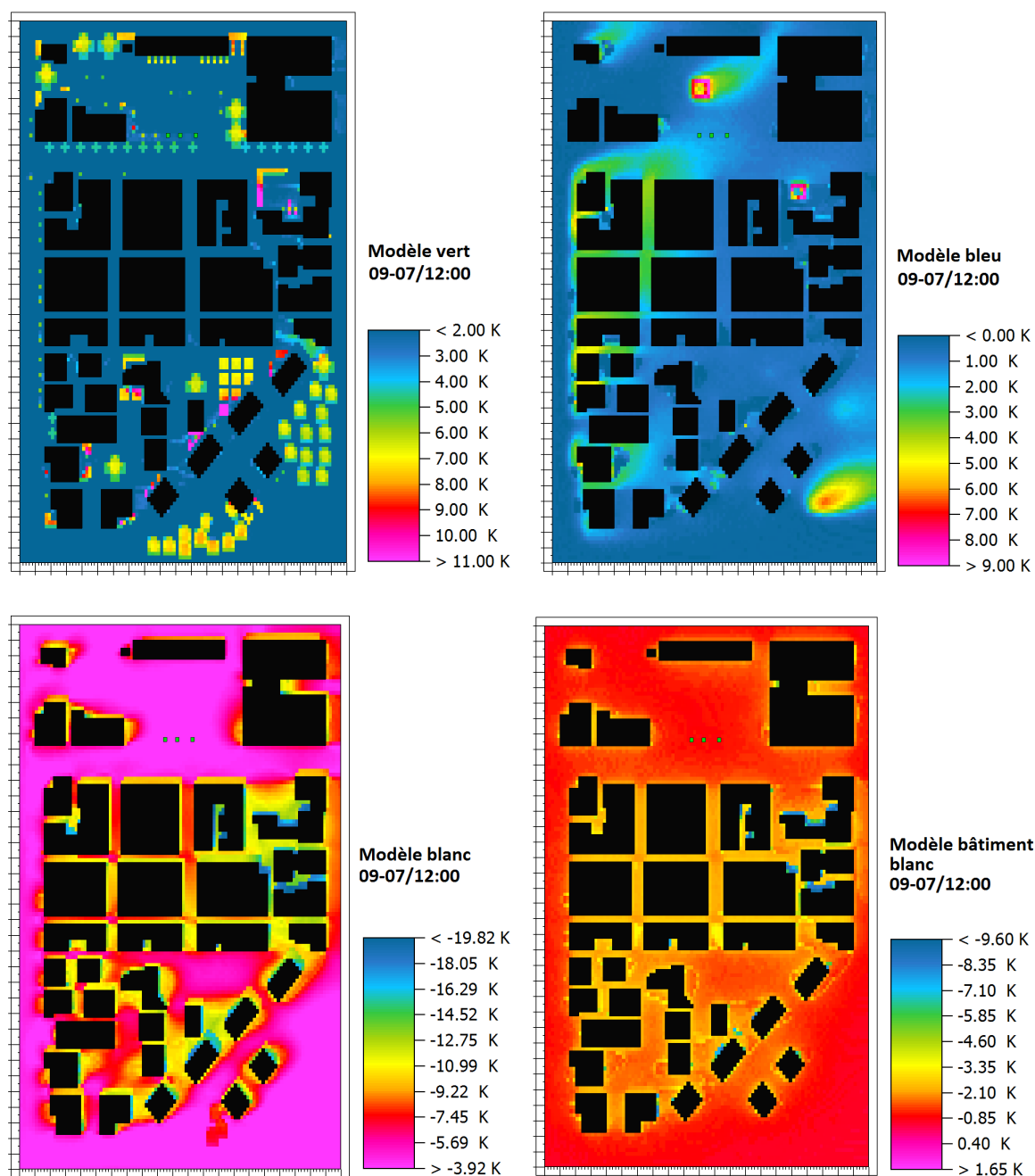


Figure 5.28: Cartes de distribution spatiale de l'écart température physiologique équivalente PET entre le modèle "initial" et les modèles vert, bleu, blanc et bâtiment blanc à 12 :00 (le jour).

La diminution de la température ambiante et l'augmentation de l'humidité provoquée par les sources d'eau, explique cette réduction de la PET. A minuit, la diminution de la PET par rapport au modèle initial est toujours observée avec un écart maximal d'environ 5 °C provoquant une sensation de fraîcheur pour le piéton. L'extension de cette réduction est plus importante que pour midi, comme l'indique la Figure 5.29.

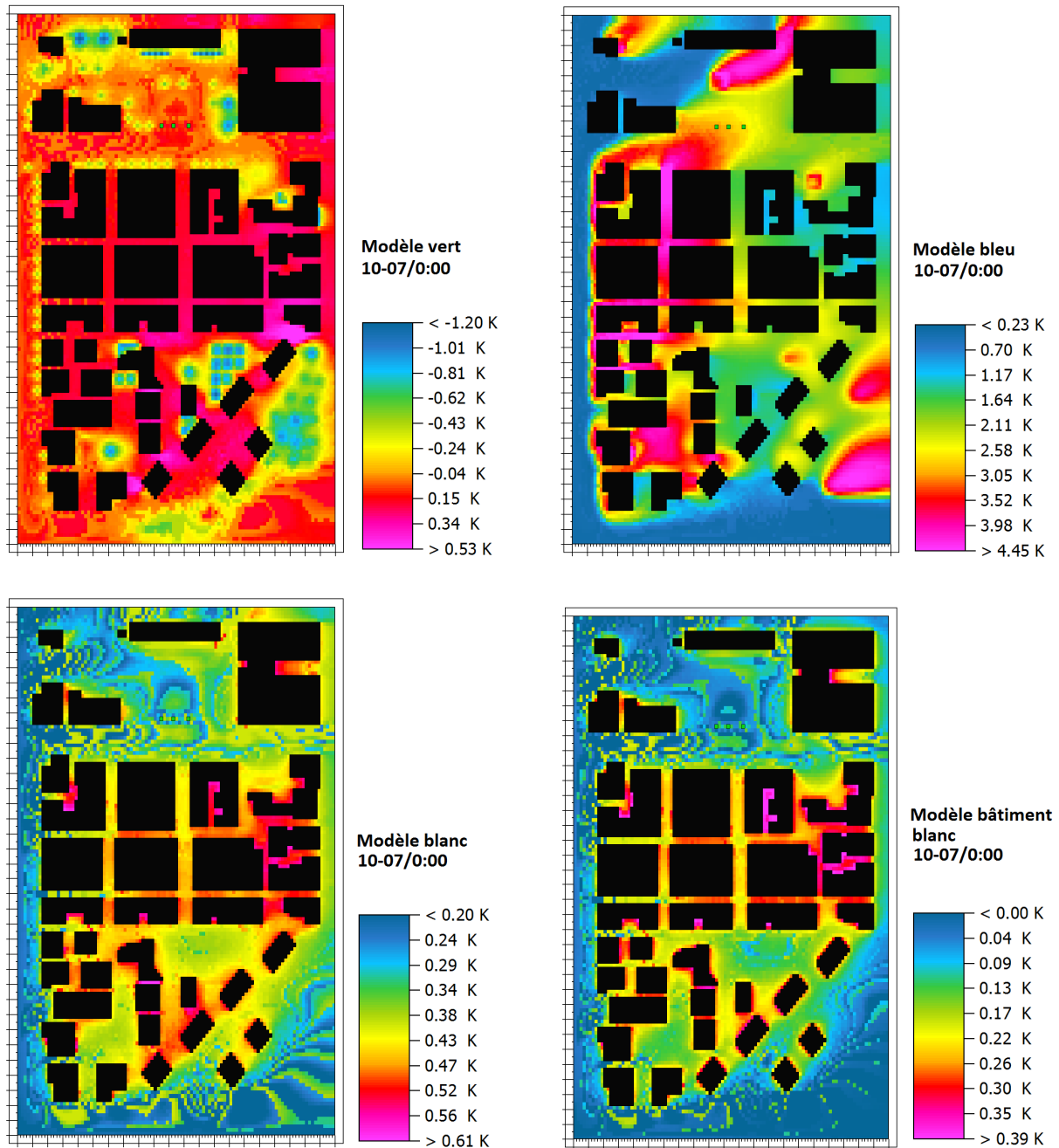


Figure 5.29: Cartes de distribution spatiale de l'écart température physiologique équivalente PET entre le modèle "initial" et les modèles vert, bleu, blanc et bâtiment blanc à minuit.

Pour les modèles « blanc » et « bâtiment blanc », il est bien clair d'après la Figure 5.28 qu'il y a une augmentation de la PET à midi par rapport au cas initial. Cette élévation est plus importante dans le modèle « blanc » où l'albédo de toutes les surfaces du quartier (revêtement du sol et bâtiments) a été augmenté. En effet une grande partie de l'énergie radiante tombant sur le quartier est réfléchiée par les surfaces à fort albédo ; ces réflexions sont ressenties par les piétons et les usagers de l'espace d'où la sensation d'un inconfort additionnel. L'élévation de la PET est étudiée dans tout le quartier pour les deux modèles, avec un écart maximal dans les rues étroites séparant les bâtiments, du aux piégeages des rayonnements solaires. En moyenne, cet écart est de l'ordre de 10 °C pour la variante blanche et de 3 °C pour le scénario « bâtiment blanc ». Ponctuellement, l'écart de l'augmentation de la PET atteint un maximum de 19 °C dans certaines zones du quartier. A contrario, l'effet de l'albédo élevé des modèles « blanc » et « bâtiment blanc » sur la PET par rapport au cas initial est presque négligeable à minuit. Une légère réduction est même observée pour les modèles « blanc » et « bâtiment blanc » dont la valeur maximale ne dépasse pas le 1 °C.

Pour conclure, comme attendu, le scénario vert est favorable à la réduction de la PET pour les heures ensoleillées dans les zones d'ombre créées par les arbres et les végétations. Il en est de même pour la variante bleue qui permet de créer des températures physiologiques équivalentes plus fraîches le jour comme la nuit. Les résultats de ce modèle ont montré que la réduction de la PET est aussi observée à une distance importante des sources d'eau en aval du vent. Alors que les modèles « blanc » et « bâtiment blanc » ont favorisé un inconfort extérieur additionnel. Dans le cas de la variante blanche, cet inconfort est intensifié et atteint des valeurs importantes.

5.6.2 Itinéraire du piéton

Pour mieux comprendre le confort thermique extérieur et l'influence des mesures d'atténuation d'ICU sur le stress thermique du piéton, un itinéraire est choisi permettant de parcourir le quartier diagonalement, comme l'indique la Figure 5.31. On s'intéresse dans cette partie au calcul ponctuel de la PET tout au long du chemin choisi « A-G » à 16 :00 à ce moment critique où ce parcours peut être très fréquenté par les piétons et les vélos. Il est à noter qu'à ce moment de la journée la PET possède des valeurs élevées d'où l'importance d'analyser l'effet des scénarios proposés auparavant, sur le confort extérieur afin d'en tirer des propositions pour les aménageurs. De même, cet itinéraire est plus utilisé durant la journée que durant la nuit ; nous rappelons que le quartier étudié est plein de centres commerciaux et industriels, des entreprises, et comporte aussi un hôpital. A contrario, le quartier ne comporte pas des sites touristiques provoquant une activité faible du piéton la nuit.

Pour parcourir l'itinéraire A-G, la Figure 5.31 montre que le piéton doit passer par des différentes sous itinéraires : A-B, B-C, C-D, D-E, E-F et F-G. En traversant ces itinéraires, le piéton passe par des espaces ouverts, des rues étroites séparant les bâtiments, des rues principales ainsi que sous les arbres dans le modèle vert et au voisinage des fontaines et sous les brumisateurs dans le modèle bleu. Nous rappelons que la PET est calculé à une hauteur de 1.75 m du sol.

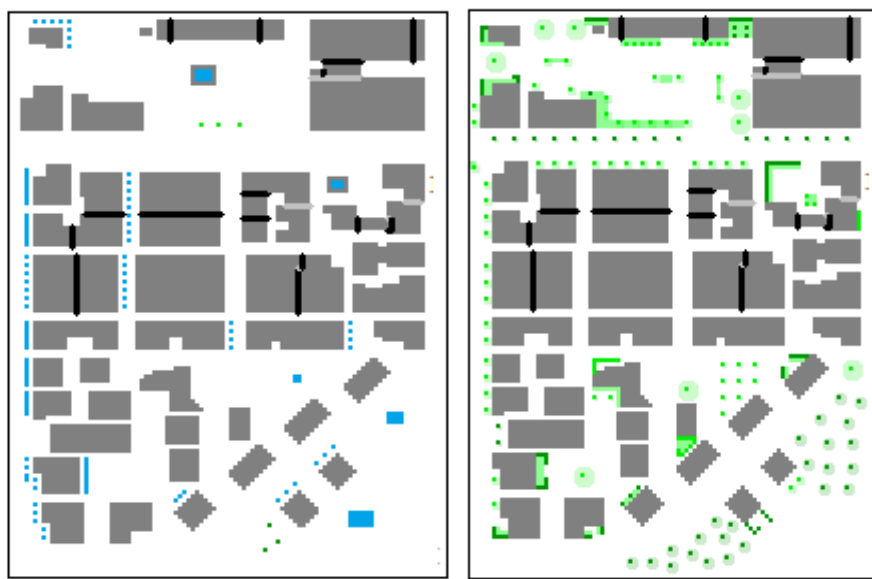


Figure 5.30: Modèle bleu (à gauche) montrant les fontaines et les brumisateurs. Modèle vert (à droite) montrant les espaces verts.



Figure 5.31: L'itinéraire A-G choisi dans le quartier pour le calcul de la PET

5.6.3 Itinéraire A-G : Cas initial

Dans un premier temps, nous nous intéressons au modèle initial du quartier Dora. Le graphique de la Figure 5.32 montre la variation de la PET relative à un piéton parcourant l'itinéraire A-G à 16 :00. Les résultats montrent clairement que la température physiologique équivalente tout au long du chemin A-G possède des valeurs supérieures à un seuil de 35 °C indiquant que le piéton est toujours soumis à un stress thermique fort. En examinant les résultats, on peut constater des valeurs très élevées de PET qui dépassent les 50 °C surtout dans les espaces ouverts pour atteindre une valeur maximale de 57.4 °C. Dans ces zones le piéton est soumis directement aux rayonnements solaires, et l'absence de l'ombre qui peut être créée par les éléments du quartier comme les arbres et les bâtiments sont responsables de cet inconfort. Dans les zones ombrées surtout dans les rues étroites séparant deux bâtiments de hauteur élevée, on observe les valeurs les plus faibles de la PET. Ces faibles valeurs de PET sont observées surtout sur l'itinéraire D-F. En moyenne la PET du piéton dans ces zones ombrées est de l'ordre de 36 °C. La valeur la plus faible est de 35.7 °C.

Sur le cheminement A-G, la sensation d'inconfort et un fort stress thermique sont toujours observés, d'où l'importance d'analyser l'effet des dispositifs de limitation d'ICU sur le confort extérieur et de prévoir le potentiel de rafraîchissement de chaque scénario.

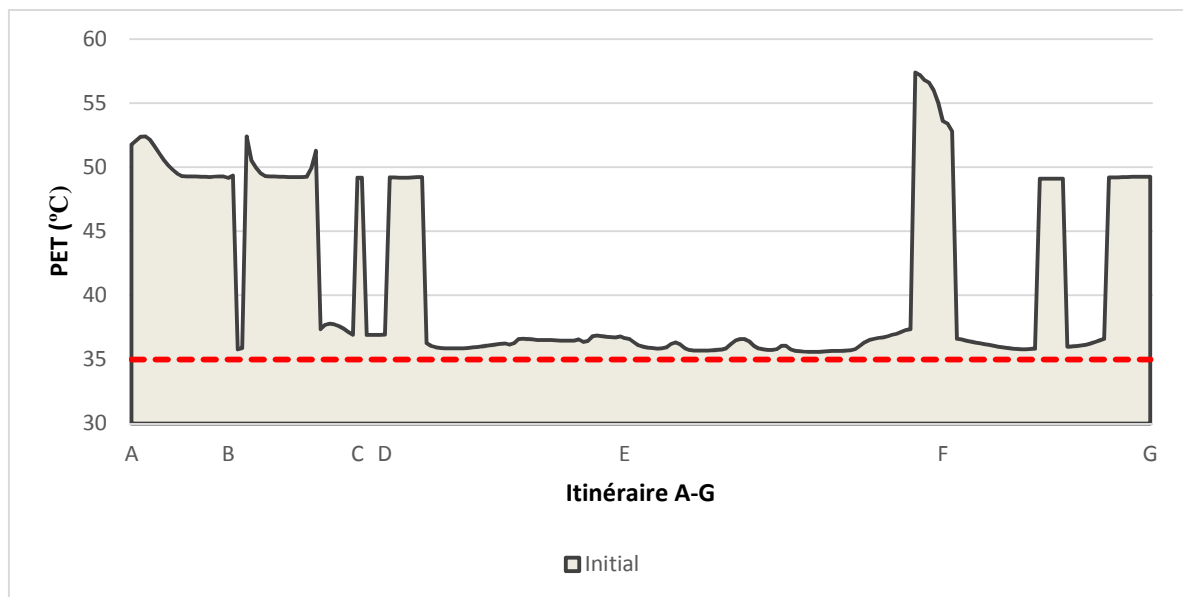


Figure 5.32: graphique de la Température Physiologique Equivalente sur l'itinéraire A-G dans le cas du modèle initial.

5.6.4 Itinéraire A-G : modèle vert

La Figure 5.33 illustre la variation de la PET pour le scénario vert. Les résultats montrent que le profil des températures physiologiques sur le trajet A-G est plus faible par rapport au cas initial. Il est à noter que l'écart n'est pas constant : une diminution importante est observée sous les arbres alors qu'une faible réduction de la PET est notée là où les végétations sont absentes. Ponctuellement, une réduction maximale d'environ 14.3 °C est observée sur l'itinéraire A-B quand le piéton passe au-dessous des arbres; la température physiologique chute de 49.1 °C à 34.8 °C. Cette chute affecte fortement le confort du piéton qui passe d'un état de stress thermique extrême avec une sensation thermique « très chaude » à un état de stress modéré ayant une sensation « tiède-chaude ». Ces résultats prouvent l'influence de la température radiante sur la PET et le fait que l'ombre des arbres joue un rôle essentiel dans la création d'un îlot de fraîcheur en termes de confort thermique extérieur. Sur l'itinéraire D-F où il y a absence totale d'espaces verts, une faible réduction de PET est observée et atteint des valeurs légèrement plus faibles que 35 °C. Cette diminution est expliquée par le fait que le modèle vert a créé des températures ambiantes légèrement plus faibles dans ces endroits.

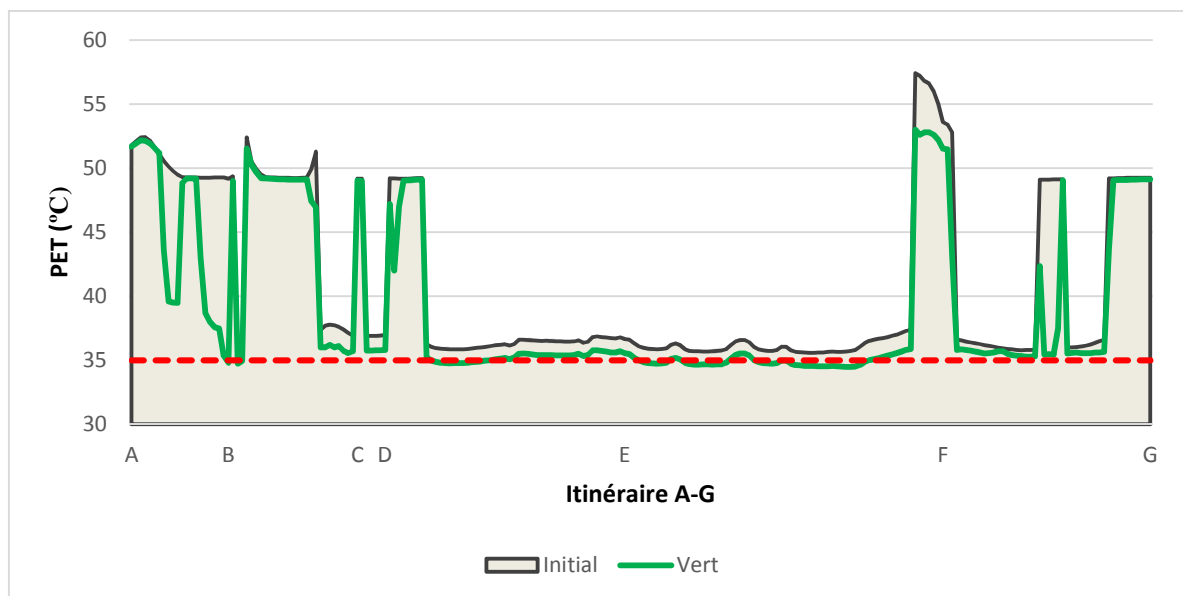


Figure 5.33: graphique de la Température Physiologique Equivalente sur l'itinéraire A-G dans le cas du modèle vert.

5.6.5 Itinéraire A-G : modèle bleu

Pour le modèle bleu, l'influence des fontaines et des brumisateurs sur la PET est indiqué dans le graphique de la Figure 5.34. Les résultats montrent que la PET tout au long du chemin A-G est presque toujours plus faible que celle du modèle initial. Sur le parcours A-C, l'influence de ce modèle n'est pas significative. Alors que pour l'itinéraire C-G, la PET a été réduite du fait

des brumisateurs installés sur le cheminement D-E où le piéton passe directement au-dessous de ces sources, et aux fontaines implémentées aux voisinages du chemin E-G. La réduction maximale obtenue dans ce scénario est de 4.3 °C provoquant une diminution de la PET de 36.6 °C à 32.3 °C. L'importance de ces valeurs montre que les brumisateurs sont efficaces dans la réduction de la PET dans les rues étroites séparant les bâtiments où l'implémentation des arbres est impossible. L'extension de l'effet des fontaines est aussi remarquable sur l'itinéraire F-G ; une réduction allant jusqu'à 4 °C peut être obtenue. D'autre part, dans les endroits où la température physiologique du piéton est élevée et dépasse les 50 °C, l'impact de ce modèle n'est pas très important.

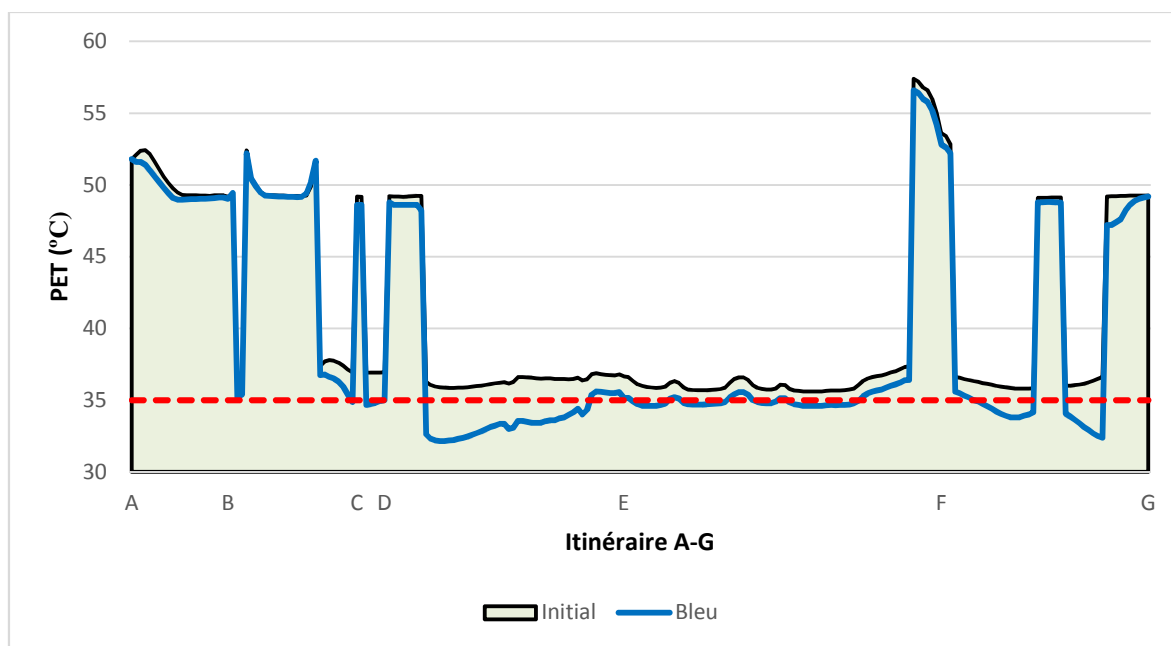


Figure 5.34: graphique de la Température Physiologique Equivalente sur l'itinéraire A-G dans le cas du modèle bleu.

5.6.6 Itinéraire A-G : modèle blanc

Dans ce scénario, l'utilisateur parcourt le même chemin mais il est entouré par des surfaces à albédo élevé : l'albédo des routes est de 0.5, celui des façades des bâtiments est de 0.7, alors que l'albédo des pavements est de 0.8. Les résultats obtenus pour ce scénario sont indiqués dans la Figure 5.35. Il est remarquable sur ce graphique que les valeurs de la PET du chemin A-G sont plus élevées que celles du modèle initial. La moyenne de la PET sur l'itinéraire est de 3.9 °C plus importante que dans le cas du modèle initial. L'écart maximal atteint 6.1 °C et il est observé sur l'itinéraire D-E. Pour ce scénario, la valeur minimale de la PET est de 39 °C, sa valeur maximale est de 61.8 °C, montrant que le piéton est quasiment exposé à une condition de stress extrême tout au long du trajet. Cette variante a provoqué un inconfort additionnel même sur le parcours D-F où les valeurs de la PET du modèle initial sont les plus faibles et proches de la

valeur seuil. En effet le rayonnement solaire arrivant sur le quartier est réfléchi par les matériaux ce qui se traduit par une élévation de la température radiante ressentie par le piéton et de sa température physiologique.

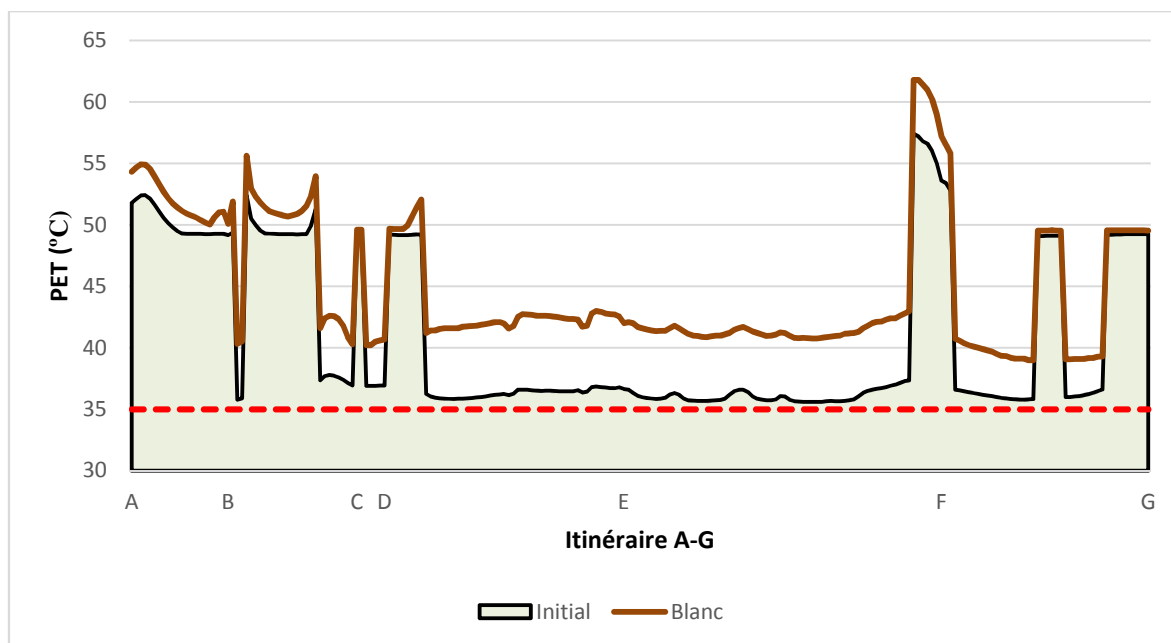


Figure 5.35: graphique de la Température Physiologique Equivalente sur l'itinéraire A-G dans le cas du modèle blanc.

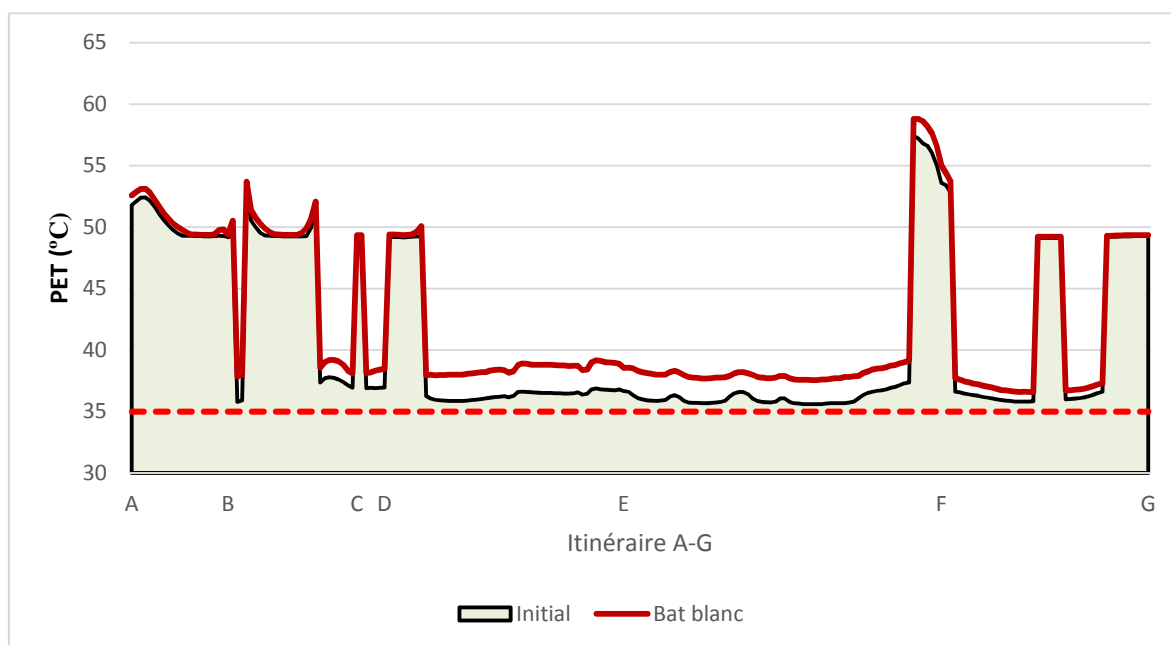


Figure 5.36: graphique de la Température Physiologique Equivalente sur l'itinéraire A-G dans le cas du modèle bâtiment blanc.

5.6.7 Itinéraire A-G : modèle bâtiment blanc

La Figure 5.36 illustre la variation de la PET sur le trajet A-G du modèle « bâtiment blanc » par rapport au modèle initial. A l'exception du trajet D-F, les résultats ont montrés que le profil de la température physiologique équivalente est presque similaire à celui du modèle initial avec une légère augmentation dans le cas du scénario « bâtiment blanc ». En moyenne, la PET augmente de 1.3 °C sur le trajet total. Sur l'itinéraire D-E, l'écart maximal est observé avec une valeur de 2.3 °C. Sur ce trajet, le piéton passe entre deux rangées de bâtiments à hauteur élevées dont l'albédo des façades est de 0.7 favorisant des réflexions du rayonnement solaire. Ce modèle qui a montré son efficacité dans la réduction des charges de climatisation, n'est pas favorable à l'amélioration du confort thermique extérieur du piéton.

5.6.8 Itinéraire A-G : modèle « blanc modifié »

Comme évoqué ci-dessus, le modèle blanc a conduit à des températures physiologiques plus importantes par rapport au scénario initial. Le but de cette partie est de comprendre le comportement du profil de la PET dans le cas du modèle « blanc modifié ». Nous rappelons que dans ce scénario, déjà décrit dans le chapitre 4, est une version modifiée du modèle blanc ; les 5 premier mètres de chaque façade des bâtiments restent en béton d'albédo 0.3, alors que le reste des façades sont en PVC d'albédo 0.7. Le graphique de la Figure 5.37 montre que la PET reste toujours supérieure à celle du cas de base. Dans le scénario « blanc », les résultats exposés ci-dessus ont montrés que la PET a augmenté en moyenne de 3.9 °C. Cet écart diminue dans le scénario « blanc modifié » de 3.9 °C à 2.8 °C. L'écart maximal qui était 6.1 °C dans le cas blanc, a aussi été réduit pour devenir 4.3 °C. Ce modèle a amélioré le confort du piéton par rapport au cas blanc, mais provoque toujours des augmentations de PET par rapport au cas initial.

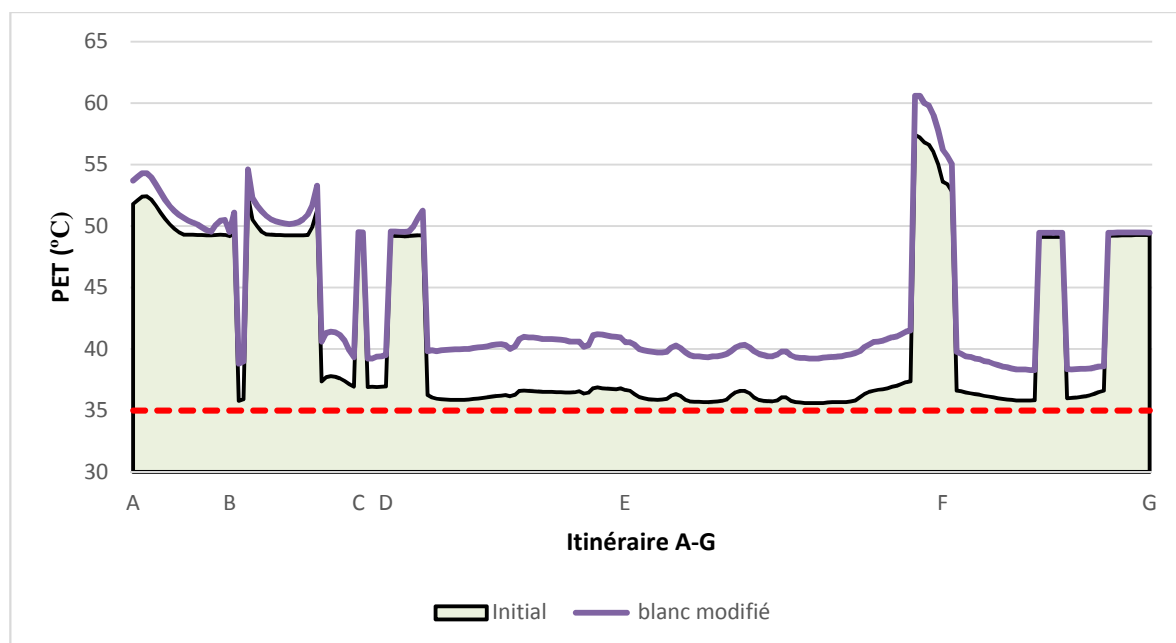


Figure 5.37: graphique de la Température Physiologique Equivalente sur l'itinéraire A-G dans le cas du modèle « blanc modifié ».

Les simulations du confort extérieur présentées dans ce chapitre ont permis d'évaluer l'effet de chaque scénario sur le confort du piéton. Les fontaines et les brumisateurs d'eau ont conduit à une amélioration du confort tout au long des 24 heures de simulation. A son tour, le modèle vert a provoqué une réduction de la température physiologique équivalente durant le jour grâce aux zones d'ombrage. Une combinaison de ces deux scénarios « vert » et « bleu » permettrait de créer un confort additionnel où les effets s'ajoutent, et de couvrir une plus grande surface du quartier avec un PET proche ou au-dessous de la valeur seuil. En effet, dans les zones où il est difficile d'ajouter des surfaces vertes comme les rues étroites séparant les bâtiments, les urbanistes pourraient intégrer des brumisateurs dans leur conception dans le but d'améliorer le confort.

D'autre part, les résultats des simulations ont clairement montré que les variantes blanches n'améliorent pas le confort, mais qu'au contraire ces scénarios favorisent un inconfort extérieur additionnel. Le modèle « blanc modifié » est plus favorable que le modèle « blanc » en termes de confort, mais reste toujours défavorable par rapport au cas initial. Le modèle blanc qui conduit à des températures ambiantes plus fraîches, entraîne d'autre part des températures radiantes élevées et par suite à un inconfort du piéton. D'où l'importance de combiner cette variante avec d'autres scénarios comme le bleu et surtout le vert pour obtenir une solution convenable. En effet le modèle vert provoque une réduction de la température moyenne radiante qui pourrait contrebalancer les effets radiants du modèle blanc.

Conclusion et Perspectives

Ce travail de thèse a permis de contribuer, au travers de simulations numériques du microclimat urbain, à évaluer le potentiel de rafraîchissement de différentes techniques de réduction d'ICU dans le contexte d'un climat méditerranéen. Cette évaluation est réalisée à l'aide d'un outil numérique puissant, ENVI-met, qui prend en considération les différents phénomènes physiques impactant les paramètres microclimatiques ainsi que l'interaction entre les composantes de la ville et son environnement. L'étude s'est concentrée sur un quartier dense de Beyrouth, la capitale du Liban en évaluant l'impact du microclimat urbain sur les charges de climatisation du bâti en période estivale. Ce travail a aussi permis d'évaluer l'impact des techniques de réduction d'ICU sur le confort du piéton.

En premier lieu, une description détaillée du phénomène d'ICU a été réalisée au chapitre 1 montrant qu'une interaction existe entre ce phénomène et la structure bâtie de la ville. L'étude bibliographique réalisée dans ce chapitre nous a permis d'identifier les paramètres caractérisant ce phénomène, ainsi que de poser le bilan énergétique à l'échelle urbaine qui fait notamment intervenir plusieurs flux échangés avec l'environnement. Il a notamment été mis en avant les flux radiatifs, incluant le flux solaire, et les flux à grandes longueurs d'ondes émis par les surfaces de la zone urbaine. L'effet de ces flux sur le microclimat urbain dépend de la morphologie urbaine ; par exemple une zone urbaine compacte et dense, peut conduire à un piégeage radiatif qui va intensifier les îlots de chaleur. Les effets aérauliques en milieu urbain sont aussi présentés dans cette partie, montrant l'interaction vent-bâtiment. A la fin de ce chapitre, quelques études numériques et expérimentales des ICU dans le contexte méditerranéen ont été détaillées, montrant que ce phénomène se révèle critique pour ce type de climat. Ceci montre l'importance de notre étude dans une ville méditerranéenne très dense comme Beyrouth où l'intensité de l'îlot de chaleur peut se révéler élevé et pour laquelle on note une absence de politiques publiques visant à l'atténuation de ce phénomène.

Dans le chapitre 2, la modélisation du microclimat à l'échelle urbaine décrit par ENVI-met, l'outil de simulation microclimatique utilisé dans cette thèse, a été présentée. Ce chapitre a détaillé les sous-modèles physiques qui permettent de calculer les principales variables microclimatiques. Nous avons aussi présenté les avantages de la version 4.0 d'ENVI-met, notamment le forçage des conditions aux limites d'un modèle complet tridimensionnel. Ce chapitre montre aussi l'approche de calcul de l'effet évaporatif des sources d'eau développé par Michel Bruse, créateur d'ENVI-met.

Un quartier dense d'une zone urbaine Libanaise a été modélisé avec ENVI-met représentant un cas de base appelé modèle initial. La fonction « forçage simple » a été utilisée pour forcer le modèle à un profil horaire de température et d'humidité relative. Du fait de l'absence de données météorologiques dans le quartier choisi, un sous-modèle a été simulé et les résultats de cette simulation sont utilisés dans la fonction forçage dans le but d'obtenir des résultats plus réalistes. Une hétérogénéité spatiale et temporelle a été observée dans les cartes représentant la

température ambiante et l'humidité relative. Ainsi, une analyse microclimatique demeure essentielle avant de déterminer les conditions aux limites entourant un bâtiment. Les résultats extraits ont montré que le facteur de vue de ciel affecte la température moyenne radiante plus que la température ambiante. Une valeur élevée de ce facteur conduit à une élévation de la température radiante surtout durant les heures ensoleillées. L'étude statistique effectuée a aussi montré que la relation entre SVF et la température moyenne radiante est plutôt de type parabolique.

Du fait des conséquences néfastes liées à l'augmentation des températures dans le cadre de l'apparition d'ICU, notre étude a ensuite eu comme objectif d'évaluer les impacts de différentes techniques de réduction d'ICU sur les paramètres microclimatiques afin de créer des îlots de fraîcheur urbains. Les simulations ont montré que la couverture végétale conduit à un effet de fraîcheur le jour comme la nuit. La température ambiante a été réduite et cette diminution est plus importante durant les heures ensoleillées, d'une valeur qui peut atteindre 2 °C. Les résultats ont aussi montré que l'effet rafraichissant varie selon l'espèce végétale choisie. L'effet de certaines espèces peut être seulement visuel et leur effet sur l'environnement presque négligeable. D'autre part, l'impact de la variation de l'albédo sur les effets d'ICU a aussi été étudié en proposant des dispositifs se basant sur l'utilisation des matériaux à haute réflectivité. Actuellement, des peintures à fort albédo (cool paints) sont développées pour limiter les ICU ; il s'agit d'un revêtement isolant et réfléchissant qui minimise la chaleur solaire qui pourrait traverser l'enveloppe des bâtiments. Le scénario « bâtiment blanc » qui s'appuie sur l'utilisation d'un albédo élevé pour les façades et les toits des bâtiments, ne présente pas une solution efficace pour l'atténuation de l'intensité d'ICU ; l'impact de ce dispositif est insignifiant en termes de température ambiante dans le cas de la morphologie étudiée. A contrario, le modèle « blanc » qui intègre un albédo élevé pour les revêtements du sol et l'enveloppe des bâtiments, a permis de réduire la température ambiante par rapport au cas initial pour atteindre localement une valeur maximale de 2.5 °C vers midi. Une faible réduction de la température est aussi observée la nuit. L'inconvénient des modèles « blanc » et « bâtiment blanc » est qu'ils conduisent à une augmentation importante de la température moyenne radiante. L'intégration des sources d'eau et leur effet sur l'ICU a aussi été étudiée. L'originalité de nos travaux réside dans l'utilisation du modèle brumisateur dans la base des données « sources utilisateurs » dans ENVI-met. Les résultats ont montré que le modèle bleu qui consiste à implémenter des fontaines et des brumisateurs dans le quartier, a permis de créer un effet de fraîcheur important durant la nuit et le jour. Un écart ponctuel maximal d'environ 7 °C de température ambiante est détecté avec une extension de l'effet de fraîcheur dans le sens du vent dominant, montrant que, dans ces conditions, le dispositif bleu est le plus efficace pour la réduction de la température ambiante.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié l'impact des potentiels de réduction d'ICU sur les charges de climatisation en été, en utilisant un couplage entre ENVI-met et HAP. Les dispositifs « bleu », « vert » et « bâtiment blanc » ont conduit à une réduction de la charge sensible des bâtiments. Le potentiel de chaque dispositif varie selon le choix du bâtiment. La variante « bleue » possède le potentiel le plus élevé de réduction des charges sensibles. Mais parallèlement, ce scénario contribue à une augmentation des charges latentes causée par l'augmentation de l'humidité due à l'évaporation de l'eau dans l'air. Aussi, pour les types de bâtiments qui nécessitent un grand débit de renouvellement d'air, le scénario bleu va conduire à une augmentation de la consommation énergétique latente. Contrairement aux autres dispositifs, le scénario « blanc » contribue à une élévation de la consommation énergétique de climatisation. Malgré le fait que ce dispositif permette d'obtenir des températures surfaciques

des façades plus fraîches, l'augmentation des charges de climatisation est due principalement au phénomène de multi-réflexion des rayonnements qui va intensifier la quantité du rayonnement traversant les surfaces vitrées du bâtiment.

A la fin de cette étude, l'analyse de l'impact des stratégies d'atténuation d'ICU sur le confort extérieur a été effectuée en analysant la variation temporelle et spatiale de l'indice PET. L'intégration des sources d'eau a conduit à une amélioration du confort du piéton durant les heures diurnes et nocturnes. Le modèle vert a contribué à une réduction importante de la PET durant les heures diurnes. A contrario, les stratégies se basant sur l'utilisation d'un albédo élevé pour les matériaux constituant le quartier, contribuent à une élévation de la température moyenne radiante tout en provoquant un inconfort additionnel du piéton.

Le potentiel de chaque stratégie de réduction d'ICU proposée se résume dans le tableau suivant :

Modèle	Charge sensible	Charge latente	Confort du piéton	Intensité IFU	Bilan
Vert	✓	—	✓	✓	Bonne solution
Bâtiment blanc	✓	—	✗	—	Bonne solution pour réduire les charges de climatisation dans un quartier où la présence extérieure de piétons est faible. Nécessité d'une combinaison avec d'autres stratégies.
Blanc	✗	—	✗✗	✓	Nécessité d'une combinaison avec d'autres stratégies pour améliorer le confort et diminuer la consommation énergétique de climatisation. Bonne solution pour les espaces ouverts comme les parkings, les autoroutes et les espaces entourant les piscines.
Bleu	✓✓	✗	✓✓	✓✓	Excellente solution pour un quartier où la quantité de renouvellement d'air dans les bâtiments est limitée.

Les résultats de ce travail de recherche, peuvent constituer une étape importante dans le lancement des directives et des règles pour l'aménagement des villes existantes au Liban surtout Beyrouth et ses banlieues, et pour la conception urbaine et énergétique des nouveaux quartiers. Comme il y a absence de réglementation ou des politiques urbaines liées à l'adaptation des villes libanaises au réchauffement climatique et aux ICU, des mesures doivent être mises en

œuvre et adoptées par les urbanismes, l'ordre des ingénieurs et des architectes au Liban, les municipalités, le ministère de l'environnement, le ministère de l'énergie et l'eau, et celui des affaires municipales et de l'occupation du territoire. En effet, les ministères en charges doivent imposer des règles obligeant les municipalités d'utiliser une partie de la somme d'argent transférée à ces municipalités pour la végétation des espaces publics des quartiers existants de la ville. Le type des arbres doit être respecté en utilisant les arbres qui nécessitent une consommation d'eau minimale et provoquent un effet rafraichissant important comme les pins et les Albizzias. Les résultats de nos simulations ont montré l'efficacité de ce type d'arbres en termes de confort extérieur, limitation d'ICU et réduction des charges climatiques. Les actions ne doivent pas se limiter seulement sur la végétation, mais sur l'intégration des sources d'eau dans les villes. Les eaux pluviales et même usées doivent être collectées par les municipalités pour les utiliser en été comme sources rafraichissantes surtout dans les rues à prospect élevé ; les résultats de la thèse ont montré l'efficacité des brumisateurs dans ce type des rues. Ainsi, les ministères doivent être en mesure de supporter les municipalités des grandes villes pour réaliser tel type de projet. Des mesures à l'échelle du bâtiment doivent être prises en considération et ici est le rôle de l'ordre des ingénieurs et des architectes au Liban. Pour les nouveaux bâtiments de la ville, l'application des toits froids ayant un albédo supérieur ou égale à 0.5 doit être obligatoire comme cette mesure a un effet significatif dans la réduction des charges climatiques en été. Notre recherche a montré que l'utilisation d'un albédo de 0.5 aux niveaux des toits conduit à une diminution importante des charges sensibles de climatisation. De plus, pour les nouveaux permis de construction, des rangées d'arbres tout autour du périmètre des bâtiments doivent être assurées dans le but d'augmenter la fraction de la végétation urbaine dans la ville. Pour les actions sur l'albédo élevé des revêtements du sol et des façades, des rapports détaillés doivent être préparés par les planificateurs en se basant du logiciel ENVI-met, montrant l'effet de ce type de matériaux sur les paramètres microclimatiques, sur le confort et les charges de climatisations. Les résultats de la thèse ont montré que l'albédo élevé des matériaux provoque des effets contradictoires : un effet de fraîcheur permettant de réduire la température ambiante, mais un effet négatif sur le confort du piéton. Pour cela l'adoption aléatoire des albédos élevés au niveau des matériaux de la ville n'est pas acceptable surtout dans les villes chaudes comme Beyrouth; une optimisation de la valeur de l'albédo utilisé et de son endroit d'emplacement doit être réalisée selon la cible visée. Nos simulations ont permis aussi de tirer des conclusions sur des solutions provoquant une amélioration du confort extérieur qui joue un rôle important dans l'activité de la ville. Pour cela, des parcours de fraîcheurs doivent être créés à l'échelle urbaine en se basant sur la mise en place des fontaines, des brumisateurs et des arbres pour améliorer le confort extérieurs des villes. Ainsi, ces propositions de fraîcheur doivent être aussi intégrées dans la conception des nouveaux quartiers en obligeant les planificateurs et les concepteurs de mettre en place des itinéraires de fraîcheur. Pareillement à plusieurs villes méditerranéennes, Beyrouth devient de plus en plus chaude, et notre action à l'échelle urbaine demeure essentielle pour créer un environnement encourageant l'activité urbaine des citoyens et des touristes.

Pour aller plus loin dans l'exploitation et l'amélioration de nos travaux, les nombreuses simulations de cette étude pourront constituer une étape importante vers l'identification d'un cas optimisé qui se repose sur l'agrégation des stratégies. Les scénarios classiques sont connus ; la nouveauté ici est le test de nouveaux scénarios bleus qui ont prouvé leur potentiel important de création d'îlots de fraîcheur, et qui peuvent constituer le corps de nouvelles combinaisons de stratégies. Les résultats obtenus pour les variantes blanches pourront être vues comme un outil pour optimiser la valeur de l'albédo des revêtements du sol ainsi que l'emplacement de cet albédo élevé dans le but d'améliorer le potentiel de ces stratégies en termes de confort et de consommation énergétiques. L'optimisation de l'albédo se fait alors selon la morphologie et la

cible visée (T_{mrt} ou T_a). Pour le confort extérieur, des parcours de piétons doivent être identifiés et protégés en adoptant des solutions qui varient le jour et la nuit, l'été et l'hiver. Il sera aussi intéressant d'étudier l'effet des pergolas sur le confort du piéton.

Au niveau expérimentation in-situ, des stations météorologiques doivent être installées sur site (quartiers denses) pour pouvoir faire une comparaison avec mesures in situ, et obtenir des conditions aux limites plus précises pour alimenter les calculs d'ENVI-met.

Pour ce qui est de la simulation numérique, il sera utile, de programmer les propriétés physiques de nouveaux matériaux comme le béton humide et le béton photoactif (qui sont en phase de développement dans ENVI-met) pour quantifier leur effet sur le microclimat urbain. D'autre part, la démarche réalisée pour le calcul de charges climatiques au niveau d'un bâtiment doit être accomplie à l'échelle du quartier entier sur toute la saison estivale. Le couplage avec HAP était rudimentaire, il faudrait l'automatiser et systématiser le traitement des données. Comme le calcul des charges avec ENVI-met n'est pas, à l'heure actuelle, fonctionnel, des tests avec TRNSYS et Energyplus pourraient être effectués pour comparer les résultats avec ceux données par HAP.

Enfin, notre recherche a renforcé le fait que la conception thermique des bâtiments, notamment dans les bureaux d'études, doit être menée en prenant plus finement en compte les paramètres microclimatiques et la morphologie urbaine.

Annexe A Rayonnement à grandes longueurs d'ondes

Les principaux modes de transferts de chaleur sont : la conduction, la convection et le rayonnement. Dans ce paragraphe, on s'intéresse à présenter l'échange radiatif entre les surfaces.

Un flux incident Q_i tombant sur une surface S s'exprime par :

$$Q_i = Q_a + Q_r + Q_t \quad [A.1]$$

Avec Q_a le flux absorbé, Q_r le flux réfléchi et Q_t le flux transmis.

La fraction du flux absorbé par S définit l'absorptivité α de la surface, celle réfléchie est ρ (réflectivité) et celle transmis est τ (transitivité), et l'on aura :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad [A.2]$$

Généralement dans un bâtiment, les surfaces sont considérées comme grises, donc leur absorptivité est égale à leur émissivité ε .

Soit deux surfaces S_i et S_j et se trouvant aux températures T_i et T_j respectivement. On définit le facteur de forme F_{ij} par la fraction du flux émis par S_i et reçue par S_j :

$$F_{ij} = \frac{Q_{ij}}{Q_{ie}} \quad [A.3]$$

Où Q_{ij} : le flux émis par S_i et reçue par S_j .

Q_{ie} : le flux émis par S_i dans toutes les directions.

Ce facteur ne dépend que de la géométrie des deux surfaces, et il est à la base de la modélisation des échanges radiatifs. Pour un corps noir, la densité surfacique du flux net perdu par une surface S_i est donnée par :

$$q_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} (\sigma T_i^4 - \sigma T_j^4) \quad [A.4]$$

Avec σ ($5.67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$) est la constante de Stefan-Boltzman.

En considérant que le rayonnement émis est isotrope, le flux échangé entre 2 surfaces est donné par :

$$Q_{12} = -Q_{21} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [A.5]$$

Avec ε est une fonction de ε_1 , ε_2 , S_1 et S_2 .

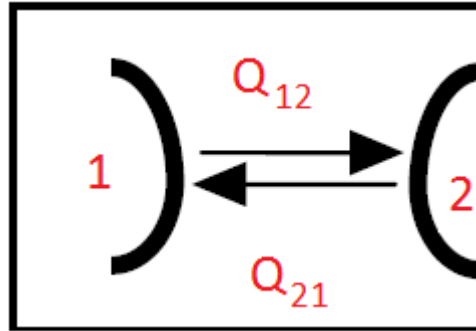


Figure A.1 : Echange radiatifs entre 2 surfaces

Annexe B Aperçu historique de la typologie des bâtiments au Liban

Nous présentons dans cet annexe, un aperçu historique sur le type des demeures traditionnelles au Liban. Dans ce cadre, les habitations caractérisant les paysages libanais ruraux et urbains se divisent en deux grandes familles (Husseini, et al., 2004) :

1. **Les unités à habitation qui intègrent des espaces extérieurs** ; elles sont constituées d'un ou de plusieurs corps de logis associés à des espaces à ciel ouvert. Parmi les principaux types caractérisant cette famille, on cite : la maison à Iwan, la maison à Riwaq, la maison à cour et la maison aux trois arcs.

La maison à Iwan : elle est constituée des deux pièces d'habitation qui flanquent une pièce centrale ouverte sur l'extérieur par une grande arcade appelée Iwan. Ce type se trouve principalement dans le monde rural.

La maison à Riwaq : cette maison est constituée de plusieurs pièces alignées ou décalées qui sont associées à un groupe d'arcades appelés aussi Riwaq. Ce type est observé dans les zones libanaises rurales et urbaines.

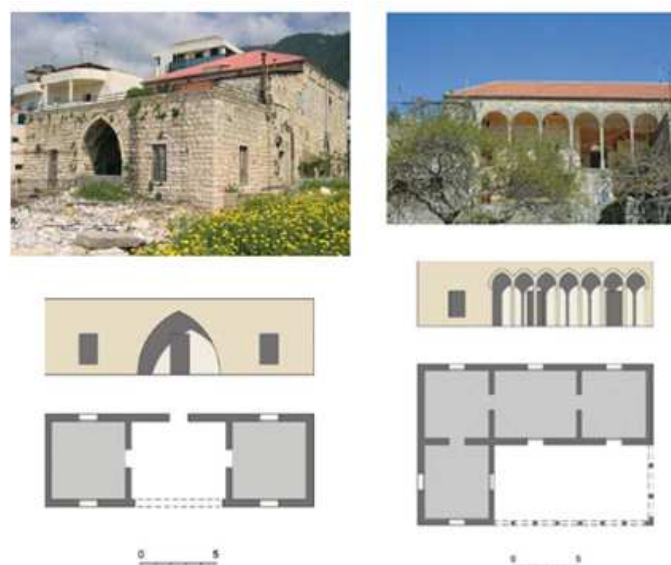


Figure B.1 : Maison à Iwan (à gauche) et maison à Riwaq (à droite), (Husseini, et al., 2004)

La maison à cour : cette maison est composée de plusieurs pièces adjacentes bordant les côtés d'une cour aménagée comprenant généralement un bassin. Ce genre d'habitation comprend un corps de logis principal qui est habituellement un Iwan ou un Riwaq qui donne sur la cour. Il est flanqué d'une pièce arrière et de deux pièces symétriques latérales, appelées *mourabbat*. Plusieurs corps de logis peuvent entourer la même cour et habités par des familles parentes ou de même origine géographique. Alors ce type d'habitat peut être en forme I, L, U ou bien O selon le nombre de corps entourant la cour. La maison à cour appelée aussi Dar se trouve surtout dans les villes côtières et les bourgs de la montagne. Ce type se développe aussi en Harat ou Hawch.

La maison aux trois arcs : cette habitation qui a une forme généralement cubique est constituée d'un ou deux étages et portant un toit de tuile de Marseille. Ce type est installé souvent dans un jardin privatif. L'archétype est composé de plusieurs pièces arrangées symétriquement sur les trois côtés d'une grande salle centrale (le salon). Cette grande salle porte une triple arcade vitrée donnant sur un étroit balcon. Durant la fin du XIXe et le début des XXe siècles, ce type de maison était l'habitat type des familles bourgeoises des villes et des bourgs de la montagne.

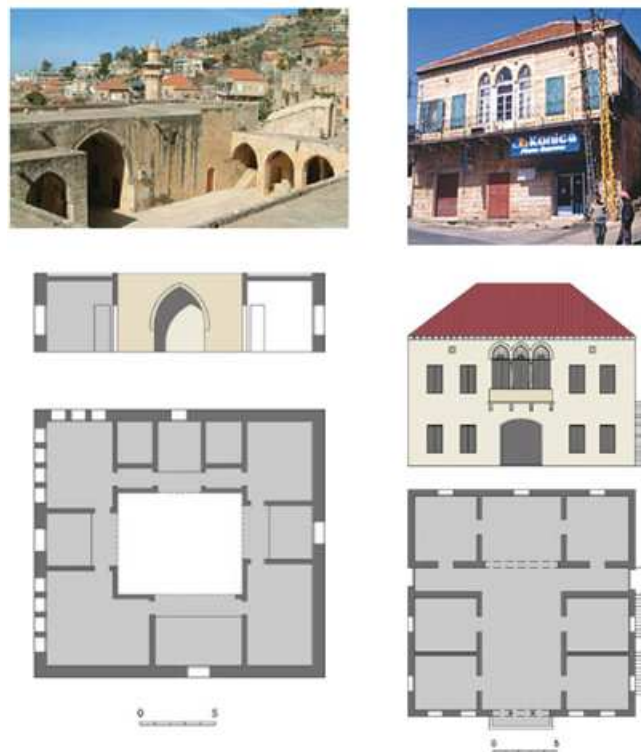


Figure B.2 : Maison à cour (à gauche) et maison à trois arc (à droite), (Husseini, et al., 2004)

2. **Les unités résidentielles compactes** où l'espace habité est entièrement construit, l'activité domestique s'effectuant à l'intérieur. Le type le plus caractéristique de cette famille est la maison à Hall central.

Jusqu'à la moitié du XIXe siècle, les types de la première famille d'habitat étaient les plus fréquentes, alors que la deuxième famille a pris corps durant la moitié du XIXe siècle et surtout dans le mandat français.

Annexe C : Méthode des facteurs de réponses et des fonctions de transfert

Les méthodes des « facteurs de réponses » et des « fonctions de transfert » sont des méthodes analytiques utilisées pour résoudre les calculs de transfert de chaleur dans les bâtiments (Munaretto, 2014). Ces méthodes s'appuient sur une résolution particulière de l'équation de chaleur [C.1] en utilisant une transformée de Laplace qui transpose le domaine temporel (variable t) vers un domaine imaginaire (variable p) :

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad [C.1]$$

Où $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ (m²/s) est la diffusivité thermique. Le système s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 T(x, p)}{\partial x^2} = \frac{p}{a} T(x, p) - \frac{1}{a} T(x, 0) \\ \frac{\partial q(x, p)}{\partial x} = -p \rho c T(x, p) + \rho c T(x, 0) \end{array} \right\} \quad [C.2]$$

Pour un élément homogène et isotrope, la solution analytique de l'équation [C.2] s'écrit comme suit (Carslaw & Jaeger, 1986) :

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x, p) = \cosh \left[\left(\frac{p}{a} \right)^{\frac{1}{2}} x \right] T(0, p) - \frac{\sinh \left[\left(\frac{p}{a} \right)^{\frac{1}{2}} x \right]}{\lambda \left(\frac{p}{a} \right)^{\frac{1}{2}}} q(0, p) \\ q(x, p) = \lambda \left(\frac{p}{a} \right)^{\frac{1}{2}} \sinh \left[\left(\frac{p}{a} \right)^{\frac{1}{2}} x \right] T(0, p) + \cosh \left[\left(\frac{p}{a} \right)^{\frac{1}{2}} x \right] q(0, p) \end{array} \right\} \quad [C.3]$$

Considérons un élément i d'épaisseur l d'un élément composite d'épaisseur L , la solution [C.3] s'écrit sous forme matricielle (Pipes, 1957) :

$$\begin{pmatrix} T(l, p) \\ q(l, p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11}(p) & m_{12}(p) \\ m_{21}(p) & m_{22}(p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T(0, p) \\ q(0, p) \end{pmatrix} = M_i \begin{pmatrix} T(0, p) \\ q(0, p) \end{pmatrix} \quad [C.4]$$

Pour l'élément composite formé de N_{co} couches de matériaux élémentaire i , la solution devient :

$$\begin{pmatrix} T(L, p) \\ q(L, p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(p) & B(p) \\ C(p) & D(p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T(0, p) \\ q(0, p) \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} T(0, p) \\ q(0, p) \end{pmatrix} \quad [C.5]$$

Avec M est le produit des matrices M_i des N_{co} couches formant le matériau composite étudié.

Dans le domaine temporel, la recherche de la solution du problème par les méthodes des « Facteurs de réponses » et des « fonctions de transfert » consiste :

- Modéliser les sollicitations par des fonctions continues en superposant des impulsions triangulaires sur des intervalles de temps Δ , Figure C.1. Nous rappelons que la transformée de Laplace d'une rampe $f(t)$ est $1/p^2$.
- Evaluer les fonctions de réponses unitaires de chaque type de sollicitations. Une fonction de réponse qui représente la réponse du bâtiment (Figure C.1) à une sollicitation unitaire $U(t)$, s'exprime en fonction des coefficients de réponse unitaire $r_u(t)$:

$$R(t) = \sum_{m=0}^{\infty} r_u(m\Delta) \cdot U(t - m\Delta) \quad [C.6]$$

(Clarke, 2001) présente une description détaillée de l'évaluation des fonctions de réponses unitaires.

- Appliquer le principe de superposition afin d'obtenir une somme des réponses des sollicitations isolées.

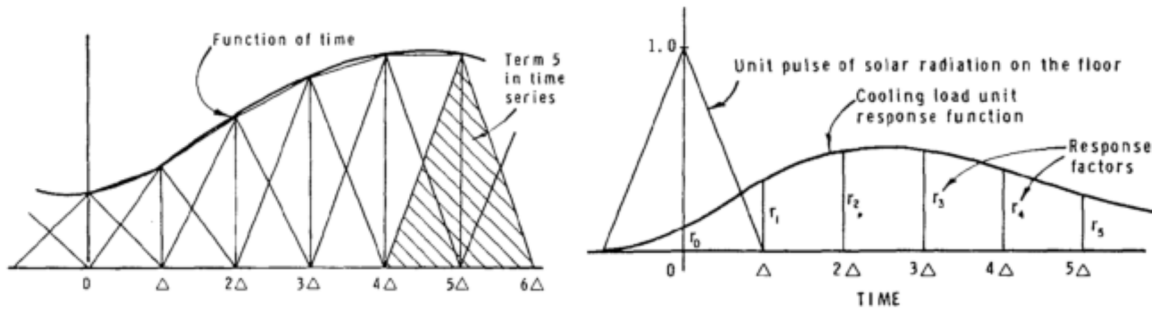


Figure C.1 : Sollicitations par des impulsions triangulaires (à gauche), et réponse indicielle du système à ces impulsions (Stephenson & Mitalas, 1967)

La méthode des facteurs de réponses permet d'exprimer la densité du flux de chaleur échangé par conduction de $x=0$ à $x=L$ et qui est considérée comme une sortie, en fonction des températures actuelles et passées :

$$q''(x = L, t) = \sum_{j=0}^{\infty} [Y_j T(x = 0, t - j\delta) - Z_j T(x = L, t - j\delta)] \quad [C.7]$$

Pour la méthode des « fonctions de transfert », l'introduction de la transformée en Z permet de relier les sorties aux sorties passées ainsi qu'aux températures actuelles et passées :

$$q''(x = L, t) = \sum_{j=0}^{\infty} E_j T(x = 0, t - j\delta) - \sum_{j=1}^{\infty} H_j q''(x = L, t - j\delta) \quad [C.8]$$

Dans le domaine fréquentiel, la méthode des facteurs de réponses ou méthode des admittances (Loudon, 1968), s'appuie sur la description des sollicitations en séries de Fourier. Chaque sollicitation est traitée à part et ensuite la sortie est reconstruit par principe de superposition. En utilisant l'équation fondamentale [C.4] et en introduisant les résistances superficielles des transferts convectifs et radiatifs des couches superficielles, l'équation matricielle de transmission globale devient:

$$\begin{pmatrix} T(L, p) \\ q(L, p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & R_{g,L} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot M \cdot \begin{pmatrix} 1 & R_{g,0} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T(0, p) \\ q(0, p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E(p) & F(p) \\ G(p) & H(p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T(0, p) \\ q(0, p) \end{pmatrix} \quad [C.9]$$

Si $p = j\omega$, avec ω la pulsation de la variation sinusoïdale de la température, les éléments de la matrice de transmission M_i s'écrivent comme suit :

$$m_{11} = m_{22} = \cosh \left[l \sqrt{\frac{j\omega}{a}} \right] \quad [C.10]$$

$$m_{12} = -\frac{1}{b\sqrt{j\omega}} \sinh \left[l \sqrt{\frac{j\omega}{a}} \right] \quad [C.11]$$

$$m_{21} = -b\sqrt{j\omega} \sinh \left[l \sqrt{\frac{j\omega}{a}} \right] \quad [C.12]$$

La matrice M est déduite du produit des matrices M_i de chaque élément de la paroi étudiée.

Si la variation de la température est périodique $\hat{T}(l, t) = \sin(\omega t)$, une transformée inverse permet d'exprimer les flux thermiques complexes par $q(t) = \bar{q} + \hat{q} \sin(\omega t + \arg(\hat{q}))$. Plusieurs facteurs de réponses seront identifiés : l'admittance thermique Y_{mm} , le coefficient de transmission thermique périodique Y_{mn} , et le facteur d'amortissement f . m et n représentent respectivement l'ambiance thermique de part et d'autre de l'élément composite.

L'admittance thermique est définie par le rapport entre l'amplitude complexe de la densité du flux sur la face adjacent à m, et la température de cette face lorsque les conditions de température sur la face opposée n ne varient pas :

$$Y_{mm} = \frac{R_{g,n}C(j\omega) + D(j\omega)}{[R_{g,n}A(j\omega) + R_{g,n}R_{g,m}C(j\omega) + B(j\omega) + R_{g,m}D(j\omega)]} \quad [C.13]$$

Le coefficient de transmission thermique Y_{mn} est défini comme Y_{mm} , mais avec des conditions constantes sur la face m et périodiques sur n :

$$Y_{mn} = \frac{1}{[R_{g,m}A(j\omega) + R_{g,m}R_{g,n}C(j\omega) + B(j\omega) + R_{g,n}D(j\omega)]} \quad [C.14]$$

Le facteur d'amortissement est adimensionnel et représente le rapport entre le coefficient de transmission thermique périodique Y_{mn} et le coefficient de transmission en régime permanent :

$$f = \frac{|Y_{mn}|}{U} \quad [C.15]$$

Annexe D

Table D.1: Coefficients d'absorption et de transmission pour une surface vitrée de référence

j	aj	tj
0	0.01154	-0.00885
1	0.77674	2.71235
2	-3.94657	-0.62062
3	8.57881	-7.07329
4	-8.38135	9.75995
5	3.01188	-3.89922

Annexe E

Table E.1: Gains de chaleur par personne selon le type d'activité (Carrier, 2015).

Activity Level	Sensible Heat Gain (BTU/h person)	Latent Heat Gain (BTU/h person)	Sensible Heat Gain (W person)	Latent Heat Gain (W/person)
Seated At Rest	230	120	67.4	35.2
Office Work	245	205	71.8	60.1
Sedentary Work	280	270	82.1	79.1
Medium Work	295	455	86.5	133.4
Heavy Work	525	925	153.9	271.1
Dancing	305	545	89.4	159.7
Athletics	710	1090	208.1	319.4

Références

- A. Matzarakis, F. R. a. H. M., 2007. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the rayman model. *International Journal of Biometeorology*, Volume 51, pp. 323-334.
- Adnot, J., Dominguez, S. A. & Santamouris, M., 2004. *Cooling the cities : rafraîchir les villes*. s.l.:Presse des Mines, pp.280.
- Adolphe, L., 2011. *Conception Thermique du Bâtiment dans son environnement- ISUPFERE*.
- Adolphe, L. et al., 2002. *SAGACités Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines - RAPPORT FINAL (MENRT- Direction de la Technologie.)*.
- Adolphe, L. et al., 2015. *Projet IFU, fiche synthèse*.
- Akbari, H., S. Davis, S., S. Dorsano, J. H. & al, e., 1992. *Cooling our communities : A guide book on tree planting and light-colored surfacing*. United States Environmental Protection Agency EPA, Berkeley (CA) Usa.
- Anquez, P. & Herlem, A., 2011. *Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions*, s.l.: Chair de responsabilité sociale et de développement durable ESG UQAM.
- Arnfield, A. J., 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*, Volume 23, pp. 1-26.
- Asaeda, T., Ca, V. & Wake, A., 1996. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere.. *Atmospheric Environment*, Volume 30(3), pp. 413-427.
- Ashrae, 1997. *Ashrae fundamentals. Chap 28 NONRESIDENTIAL COOLING AND HEATING LOAD CALCULATIONS*.
- Ashrae, 1997. *ASHRAE Handbook 1997, Fundamentals*.
- Ashrae, 1997. *ASHRAE Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., page 29.37*.
- Ashrae, 2005. *Ashrae Fundamentals. Chap 31: Fenestration*.
- ASHRAE, 2009. *American society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE handbook fundamentals, ISBN 978-1-933742-54-0*.
- Athamena, K., 2012. *MODELISATION ET SIMULATION DES MICROCLIMATS URBAINS : ÉTUDE DE L'IMPACT DE LA MORPHOLOGIE URBAINE SUR LE CONFORT DANS LES ESPACES EXTERIEURS. CAS DES ECO-QUARTIERS*., Ecole centrale de Nantes: Thèse de doctorat.

Bagal, N., Pardyjak, E. & Brown, M. J., 2003. *Improved upwind cavity parameterization for a fast response urban wind model*. AMS Conf. on Urban Zone, Seattle, WA.

Bennet, M. & Ewenz, C., 2013. *Increased Urban Heat Island Effect due to Building Height Increase*. 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1–6 December 2013.

Berdahl, P. & Bretz, S. E., 1997. Preliminary Survey of the Solar Reflectance of Cool Roofing Materials. *Energy & BUilding* 25, pp. 149-158.

Bertocchi, I., Fini, G., Rubolino, M. C. & Tondelli, S., 2011. Sustainability achievements in building regulations. The example of Bologna.. *Procedia Engineering*, Volume 21, p. 957–967.

bigorgne, J., 2012. *Les ilots de chaleur urbains à Paris, cahier #1*.

Bonacquisti, V., Casale, G., Palmieri, S. & Siani, A., 2005. A canopy layer model and its application to Rome.. *Science of the Total Environment*, Volume 364 (1–3), p. 1–13.

Bonhomme, M. et al., 2015. *Ilot de fraîcheur urbain IFU Toulouse. Rapport final. France*.

Bouyer, J., 2009. *Modélisation et simulation des microclimats urbains - Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*. Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

Bozonnet, E., 2005. *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon*. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle.

Bozonnet, E. A. F. M. M. C. M. e. G. G., 2006. *URBAT: Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions*. Plan Urbanisme Construction Architecture..

Bozonnet, E., Musy, M., Calmet, I. & Rodriguez, F., 2013. Modeling methods to assess urban fluxes and heat island mitigation measures from street to city scale. *International Journal of Low Carbon Technologies*, 10(1), p. 62–77.

Braden, H., 1982. *Simulationsmodell für den wasser- energie- und stoffhaushalt in pflanzenbeständen*. Rep. Inst. Meteorol. Uni. Hannover, 23.

Bras, J. L., 2015. *Le microclimat urbain à haute résolution : mesures et modélisation*. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse.

Bröde, P., Jendritzky, G., Fiala, D. & Havenith, G., 2010. *The Universal Thermal Climate Index UTCI in Operational Use*. Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9-11 April 2010. London.

Brophy, V. et al., 2000. *Sustainable urban design*. Energy Research Group, with the support of the European Commission, Directorate-General Energy and Transport.

Bruse, M., 1995. *Development of a microscale model for the calculation of surface temperatures in structured terrain*, MSc, Thesis, Inst. for Geography, Univ. Bochum.

Bruse, M., 2004. *ENVI-met 3.0: Updated model overview*. Research gate.

Bruse, M., 2007. *Particle filtering capacity of urban vegetation: A microscale numerical approach*. In W. Endlicher, editor, pages 61-70, 2007.

Bruse, M., 2017. *Modelling blue infrastructure: Technical description of water related elements and tools in ENVI-met V4*.

Canorel, F., 2009. *Géographie sociale et politiques territoriales de développement durable*.

Carrier, 2015. *Hourly analysis program v4.9. Hap help system*.

Carrier, 2015. *HOURLY ANALYSIS PROGRAM. QUICK REFERENCE GUIDE. HAP v4.91*. 9th Edition.

Carslaw, H. S. & Jaeger, J. C., 1986. *Conduction of Heat in Solids*. 2ème ed:Oxford science publications.

CAS, 2007. *The National Survey of Households Living conditions*. Central Administration for Statistics.

Chandler, T., 1970. Selected bibliography on urban climate.. *Tech. Note No. 155, WMO No. 276, World Met. Organiz., Geneva.*, p. 383.

Chandler, T. J., 1976. *The climate of towns, Ch. 14 in the 'The Climate of the British Isles', Longman, pp. 307-329*. London.

Chatzidimitriou, A. & Yannas, S., 2004. *Microclimatic Studies of Urban Open Spaces in Northern Greece*, In: *Proc. PLEA 2004, Eindhoven, vol. 1, pp. 83–88*, p. 2004.

Chwieduk, D. A., 2009. Recommendation on modelling of solar energy incident on a building envelope. *Renewable Energy*, 34(3), pp. 736-741.

Clapp, R. B. & Hornberger, G., 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research AN AGU journal* , 14(4), p. 601–604.

Clarke, J., 2001. *Energy simulation in building design*.. 2ème ed: Butterworth-Heinemann..

Colombert, M., 2008. *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Thèse de doctorat de l'université Paris-Est.

Counihan, J., 1973. Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel.. *Atmospheric Environment (1967)*, Volume 7(7), pp. 673-689.

Dardel, S., 2015. *Climate Smart Fortaleza. Thesis for a diploma in Environmental Engineering*, Departement of Engineering, Faculty of Engineering, Lund University.

- DAR-IAURIF, 2005. *National Physical Master Plan of the Lebanese Territory (NPMPLT)*.
- DAR-IAURIF, 2005. *National Physical Master Plan of the Lebanese Territory (NPMPLT) (Final)*. Prepared for: Council for Development and Reconstruction (CDR).
- Davidson, L., 2017. *An Introduction to Turbulence Models*. Department of Thermo and Fluid Dynamics. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden.
- Delaunay, D., 1995. "Simulation numérique de l'écoulement du vent en milieu urbain". Université de Nantes, ENSA Nantes.
- Desjarlais, C., blondot, A. & al, e., 2010. *S'avoir s'adapter aux changements climatiques, Montréal. Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques*. Ouranus.
- Doulos, L., Santamouris, M. & Livada, a. I., 2004. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar energy*, Volume 77(2), p. 231–249.
- Dubois, C., 2014. *Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique ; Une feuille de route pour accompagner les architectes et les designers urbains québécois*. Université Laval, Québec.
- Duffie, J. & Beckman, W., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley, Hoboken.
- Dupont, E. et al., 1999. Comparison between the atmospheric boundary layer in Paris and its rural suburbs during the ECLAP experiment. *Atmospheric Environment*, Volume 33, p. 979–994.
- Eichhorn., J., 1989. Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen. Stadtklima-Modells. PhD thesis, Univ. Mainz.
- Eliasson, B., Riemer, P. & Wokaun, A., 1999. *Greenhouse Gas Control Technologies*. Pergamon, Amsterdam.
- Elnabawi, M. H., Hamza, N. & Dudek, S., 2016. Thermal perception of outdoor urban spaces in the hot aridregion of Cairo, Egypt. *Sustainable Cities and Society*, Volume 22, p. 136–145.
- Emmanuel, R., Rosenlund, H. & Johansson, E., 2007. Urban Shading – a Design Option for the Tropics? A Study in Colombo, Sri Lanka.. *International Journal of Climatology*, 27(14), p. 1995–2004.
- Escourrou, G., 1980. "Climat et environnement". Paris, Masson.
- Escourrou, G., 1991. *Le climat et la ville*. Presses universitaires., Paris: Nathan.
- Euroméditerranée, 2010. *Developper une architecture bioclimatique mediterraneenne, Inertie thermique*. Veille documentaire - Fiches « Qualité Environnementale ».

Eva Wong et al, 2008. *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, Urban Heat Island Basics*.

Fadai-Ghotbi, A., 2007. *MODÉLISATION DE LA TURBULENCE EN SITUATION INSTATIONNAIRE PAR APPROCHES URANS ET HYBRIDE RANS-LES PRISE EN COMPTE DES EFFETS DE PAROI PAR PONDÉRATION ELLIPTIQUE*. Thèse de doctorat de l'université de poitiers.

Fahed, J., Ginestet, S., Kinab, E. & Adophe, L., 2017. *Simulation and comparison of urban heat island mitigation strategies under Mediterranean climate: The case of Dora district, Beirut, Lebanon..* Edinburgh, PLEA conference.

Fanger, P., 1972. *Thermal Comfort*. New York, USA : McGraw Hill place City Book.

Fanger, P., 1982. *Thermal comfort*. Malabar, FL, USA: Robert E. Krieger Publishing Company.

Farnham, C. et al., 2011. Study of mist-cooling for semi-enclosed spaces in Osaka, Japan.. *Procedia Environmenatal Sciences*, Volume 4, p. 228–238.

Fernandez, H. & Deshaies, M.-È., 2013. *Nature et fraîcheur pour des villes en santé*.

FFEM, 2005. *"Efficacité énergétique dans la construction au Liban", plaquette de présentation du projet, Fonds français de l'Environnement mondial*.

Fiala, D., Lomas, K. & Stohrer, M., 1999. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions : The passive system. *Journal of Applied Physiology*, Volume 87, pp. 1957-1972.

Fouillet, A. et al., 2006. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France.. *Int Arch Occup Environ Health.*, Volume 80, p. 16–24.

Gagge, A., Stolwijk, J. & Nishi, Y., 1971. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, Volume 77, p. 247–257.

Gandemer, J., 1975. *Wind environment around buildings : aerodynamic concepts*. Proceedings of the 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow, p. 423-432.

Gandemer, J., 1981. The aerodynamic characteristics of windbreaks, resulting in empirical design rules. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 7(1), pp. 15-36..

Ghaffarianhoseini, A., Berardi, U. & Ghaffarianhoseini, A., 2015. Thermal Performance Characteristics of Unshaded Courtyards in Hot and humid Climates. *Building and environmental*, Volume 87, pp. 154-168.

Giguère, M., 2009. *Mesure de lutte aux îlots de chaleur urbain Institut National de Santé Publique du Québec*.

Giguere, M., 2009. *Urban Heat Island Mitigation Strategies*, The Institut national de santé publique du Québec (INSPQ).

Givoni, B., 1978. *L'homme, l'architecture et le climat*, Paris.

Goldman, R., 1999. *Extrapolating ASHRAE's comfort model*. *HVAC&R Research*, 5(3).

Grimmond, C., Cleugh, H. & Oke, T., 1991. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25(3), pp. 311-326.

Grimmond, C. S. B. & Oke, T. R., 1999. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Volume 38, p. 1262–1292.

Gros, A., 2013. *MODELISATION DE LA DEMANDE ENERGETIQUE DES BATIMENTS A L'ECHELLE D'UN QUARTIER*. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle.

Hakim, A. et al., 1998. Effects of walking on mortality among nonsmoking retired men.. *New England Journal of Medicine*, Volume 338, pp. 94-99.

Hasanean, H., 2001. Fluctuations of surface air temperature in the Eastern Mediterranean. *Theoretical and Applied Climatology*, 68(1-2), pp. 75-87.

Hass-Klau, C., 1993. Impact of pedestrianisation and traffic calming on retailing: A review of the evidence from Germany.. *Transport Policy*, Volume 1, pp. 21-31.

Hedquist, B. et al., 2009. *Results from the Phoenix Arizona Urban Heat Island Experiment*. *The Seventh International conference on Urban climate*, 29 June- 3 July 2009, Yokohama, Japan.

Honjo, T., 2009. Thermal comfort in outdoor environment. *Global Environmental Research*, Volume 13, pp. 43-47.

Höppe, P., 1993. Heat balance modelling. *Experientia*, Volume 49, p. 741–746.

Höppe, P., 1999. The physiological equivalent temperature—A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), pp. 71-75.

Hottel, H. & Woertz, B., 1942. Performance of Flat Plate Solar Heat Collectors.. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, Volume 64, pp. 91-104.

Howard, L., 1833. *The Climate of London*, Vols. I- III. London.

Husseini, F., Nourissier, G., Bouassaf, Y. M. & al, e., 2004. *Architecture Traditionnelle Libanaise, Corps levant*.

Huttner, S., 2012. *Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met*. Thèse de doctorat de l'université Johannes Gutenberg, Mainz.

Huttner, S., Bruse, M. & Dostal, P., 2008. *Using ENVI-met to Simulate the Impact of Global Warming on the Microclimate in Central European Cities. 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, October (2008)* 307-312.

Huttner, S., Bruse, M. & Dostal, P., 2009. *Numerical Modelling of the Urban Climate – A Preview on Envi-met 4.0.. Environmental Modelling Group EMG, Johannes-Gutenberg University Mainz Johann-Joachim-Becher-Weg 21, D-55099 Mainz, Germany.*

Huynen, M. M. et al., 2001. The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. *Environ Health Perspect*, Volume 109 (5), pp. 463-470.

Idso, C. & Singer, S., 2009. *Climate Change Reconsidered: Report of the Nongovernmental Panel on Climate Change (NIPCC). The Heartland Institute.*

Inard, C., 1988. *Contribution à l'étude du couplage thermique entre un émetteur de chauffage et un local. Etudes expérimentales en chambre climatique. Génie civil et sciences de l'habitat, INSA de Lyon..*

Ishii, T., Tsujimoto, M., Yoon, G. & Okumiya, M., 2009. *Cooling System with Water Mist Sprayers for Mitigation of Heat-island.. Yokohama, Japan, The seventh International Conference on Urban Climate.*

J.Bouyer, 2009. *Modélisation et simulation des microclimats urbains-Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.

Jacobs, J., 1972. *The death and life of great American cities. Harmondsworth: Penguin.. Harmondsworth: Penguin.*

Jendritzky, G., Maarouf, A., Fiala, D. & Staiger, H., 2002. *An update on the development of a Universal Thermal Climate Index. 15th Conference on Biometeorology and Aerobiology.*

Jendritzky, G. & Nübler, W., 1981. A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Volume 29, p. 313–326.

Johansson, E., 2006. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco.. *Building and Environment*, Volume 41(10), p. 1326–1338.

Kaloustian, N. & Diab, Y., 2015. Effects of urbanization on the urban heat island in Beirut.. *Urban Climate*, Volume 14, pp. 154-165.

Kaloustian, N., Diab, Y., Bechtel, B. & Ossenbrügge, J., 2015 b). *Urban planning and climate issues of Beirut and Hamburg: Comparison approaches, tools and decision-making tools.*

Khaikine, M. N., Kuznetsova, I. N., Kadygrov, E. N. & al, e., 2006. Investigation of temporal-spatial parameters of an urban heat island on the basis of passive microwave remote sensing. *Theoretical and applied climatology*, Volume 84, pp. 161-169.

- Klinenberg, E., 2003. Heat Wave: A Social Autopsy of Disaster in Chicago. *University of Chicago Press*.
- Lahme, E. & Bruse, M., 2002. *Microclimatic effects of a small urban park in densely built-up areas: Measurements and model simulations. The European Commission in the 5th Framework Program under the contract EVK4-CT-2000-00041 (BUGS)*.
- Launder, B. & Spalding, D. B., 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), p. 269–289.
- LIBNOR, 1999. *Lebanese standard NL68, Guide to the thermal insulation and summer comfort for buildings in Lebanon*.
- Liébard, A. & Herde, & A. D., 2005. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable. Moniteur*.
- Lindberg, F., Holmer, B. & Thorsson, S., 2008. Solweig 1.0 - modelling spatial variations of 3d radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*, Volume 52 (7), pp. 697-713.
- Lin, T., 2009. Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions. *Journal of Building and Environment*, Volume 44, p. 2017–2026.
- Liu, J., Chen, J. M., Black, T. A. & Novak, M. D., 1966. E- ϵ modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge. *Boundary-Layer Meteorology*, 77(1), p. 21–44.
- Loudon, A. G., 1968. *Summertime Temperatures in Buildings Without Air-Conditioning. ERIC Clearinghouse, Washington, D.C.*
- Loutzenhiser, P. et al., 2007. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. *Solar Energy*, 81(2), pp. 254-267.
- Macdonald, R. W., 2000. Modelling The Mean Velocity Profile In The Urban Canopy Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 97(1), p. 25–45.
- Mahmoud, A., 2011 a). Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions. *Journal of Building and Environment*, Volume 46, p. 2641–2656.
- Mahmoud, A., 2011 b). An analysis of bioclimatic zones and implications for design of outdoor built environments in Egypt. *Journal of Building and Environment*, Volume 46, p. 605–620.
- Mahrer, Y. & Avissar, R., 1984. A numerical simulation of the greenhouse microclimate. *Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 26(3), pp. 218 - 228.
- Maleki, A., Kiesel, K., Vuckovic, M. & Mahdavi, A., 2014. *Empirical and Computational Issues of Microclimate Simulation, ICT-EurAsia 2014*, ICT-EurAsia 2014: Information and Communication Technology pp 78-85.

Maleki, A. & Mahdavi, A., 2016. Evaluation of Urban Heat Islands Mitigation Strategies Using 3-Dimensional urban Micro-Climate Model ENVI-met.. *Asian Journals of civil Engineering (BHRC)* , Volume 17, pp. 357-371.

Marthins, P., 2007. Cité par Cavayas et Beaudoin 2008. *Étude des biotopes urbains et périurbains de la CMM. Volets 1 et 2 : Évolution des occupations du sol, du couvert végétal et des îlots de chaleur sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal (1984-2005).*

Martins, T. et al., 2016. Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France. *Sustainable Cities and Society*, Volume 26, p. 9–26.

Masson, V., 2000. A Physically-based scheme for the Urban Energy Budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94(3), pp. 357-397.

Matzarakis, A. & Mayer, H., 1996. Another kind of environmental stress: Thermal stresses, WHO collaborating centre for air quality management and air pollution control. *Newsletters*, Volume 18, p. 7–10.

Matzarakis, A., Mayer, H. & Iziomon, G., 1999. Application of a universal thermal index : Physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, Volume 43, pp. 76-84.

Mayer, H. & Höppe, P., 1987. Thermal comfort of man in different urban environments.. *Theoretical and Applied Climatology*, Volume 38(1), p. 43–49.

McCarthy, M., 2009. *CIRCE (Climate Change and impact research: The Mediterranean environment).*

McDonough, J. M., 2007. *INTRODUCTORY LECTURES on TURBULENCE Physics, Mathematics and Modeling. Departments of Mechanical Engineering and Mathematics University of Kentucky.*

Mellor, G. L. & Yamada, T., 1975. A simulation of the Wangara atmospheric boundary layer data.. *Journal of the atmospheric sciences*, Volume 32 (12), pp. 2309-2329.

Mestayer, P. & Anquetin, S., 1994. *Climatology of cities. In Diffusion and transport of pollutants in atmospheric mesoscale flow fields, volume 1 de ERCOFTAC series, pages 165–189. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.*

MOE/LEDO/ECODIT, 2001. *Lebanon State of the Environment Report.*

Monam, A. & Ruckert, K., 2013. *The Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Urban Layouts. German-Iranian Research Project, Young Cities. www.univerlag.tu-berlin.de.*

Moreno-Garcia, M. C., 1993. Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology*, Volume 14, pp. 705-710.

Mourtada, A., 2010. *Energie, changement climatique et bâtiment en Méditerranée: Etude nationale Liban. Plan bleu.*

M'Raoui, A., Mouhous, S., Malek, A. & Benyoucef, B., 2011. Etude statistique du rayonnement solaire à Alger. *Revue des Energies Renouvelables*, Volume 14, p. 637 – 648.

Munaretto, F., 2014. *Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments. Thèse de Doctorat, l'École nationale supérieure des mines de Paris.*

Munck, D. et al., 2010. *Projet CLIM2 Climat urbain et climatisation.*

Munk, C. D., 2013. *MODELISATION DE LA VEGETATION URBAINE ET STRATEGIES D'ADAPTATION POUR L'AMELIORATION DU CONFORT CLIMATIQUE ET DE LA DEMANDE ENERGETIQUE EN VILLE. Thèse de doctorat, université de Toulouse , INP.*

Musy, A., 2005. *Cours Hydrologie générale - Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (HYDRAM) - Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement (ISTE) - Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL).*

Nicholson, S. E., 1975. A pollution model for street-level air. *Atmospheric Environment* (1967), Volume 9 (1), pp. 19-31.

Nikolopoulou, M., 2004. *Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain : une approche bioclimatique. résultats du projet RUROS (Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces), Centre for Renewable Energy Sources (C.R.E.S).*

OKE, T., 1973. CITY SIZE AND THE URBAN HEAT ISLAND. *Atmospheric Environment*, Vol. 7(8), pp. 769-779.

Oke, T., 1976. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. *ATMOSPHERE*, Volume 14, pp. 268-277.

Oke, T., 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations.. *International Journal of Climatology*, 1(3), pp. 237-254.

OKE, T., 1982, b. *Overview of interactions between settlements and their environments» WMO experts meeting on Urban and Building climatology, WPC-37, WMO, Genève.*

Oke, T., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *QUARTERLY JOURNAL OF THE ROYAL METEOROLOGICAL SOCIETY*, Volume 108, pp. 1-24.

Oke, T., 1987. *Boundary layer climates..* Londres: 2 édition.

Oke, T., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and building*, Volume 11(1), pp. 103-113.

Oke, T., Bailey, W. G. & R, R. W., 1997. Urban environments. The surface climates of Canada McGill. *Queens University Press, Montreal* 303–27.

Oke, T. & Nakamura, Y., 1988. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment* 22, pp. 2691-2700.

Oke, T. R., 1974. *Review of urban climatology, 1968-1973, Tech. Note NO. 134, WMO No. 383, World Met. Organiz., Geneva, 132 pp.*

Oke, T. R., 1979. *Review of urban climatology, 1973-1976, Tech. Note No. 169, WMO No. 539, World Met. Organiz., Geneva, 100 PP.*

Oke, T. R., 1987. *Boundary Layer Climates. Psychology Press.*

ONERC, 2009. *Changement climatique. Coût des impacts et pistes d'adaptation. Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. La documentation française.*

Ozkeresteci, I., Crewe, K. & Bruse, M., 2003. *Use and Evaluation of the Envi-met Model for Environmental Design and Planning : an Experiment on Linear Parks. The 21st International Conference (ICC). Durban, South Africa, 10-16 August.*

Patrinos, A. & Kistler, A., 1977. A numerical study of the chicago lake breeze. *Boundary layer meteorology*, 12(1), pp. 93-123.

Penney, J., 2008. *Climate Change Adaptation in the City of Toronto. Lessons for Great Lakes Communities. Clean Air Partnership.*

Peron, F., Maria, M. D., Spinazzè, F. & Mazzali, U., 2015. An analysis of the urban heat island of Venice mainland. *Sustainable Cities and Society*, Volume 19, p. 300–309.

Pichierri, M., Bonafoni, S. & Biondi, R., 2012. Satellite air temperature estimation for monitoring the canopy layer heat island of Milan. *Remote Sensing of Environment*, Volume 127, p. 130–138.

Pigeon, G., Legain, D., Durand, P. & Masson, V., 2007. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*, Volume 27, pp. 1969-1981.

Pigeon, G., Lemonsu, A., Masson, V. & Hidalgo, J., 2008. De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville. *La Météorologie - n°62*, pp. 39-47.

Pipes, L. A., 1957. Matrix analysis of heat transfer problems. *Journal of the Franklin Institute*, Volume 263 (3), p. 195–206.

Plate, E. & Kiefer, H., 2001. Wind loads in urban areas.. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 89 (14-15), p. 1233–1256..

Prado, R. & Ferreira, F. L., 2005. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials.. *Energy and Buildings*, Volume 37(4), p. 295–300.

Ridha, S., 2017. *Urban Heat Island mitigation strategies in an arid climate. Is outdoor thermal comfort reachable ?*, s.l.: DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE.

Ringenbach, N., 2004. *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : Mesures, modélisation et validation sur Strasbourg*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I.

Rinner, C., Briggs, S., Moldofsky, B. & Beaudry, M., 2011. *Implementation of a Map-Based Heat Vulnerability Assessment and Decision Support System*. Toronto Public Health.

Rizwan, A., Denis, L. Y. & Liu, C., 2008. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island.. *Journal of Environmental Sciences.*, 20(1), pp. 120-128.

Robitu, M., 2005. *Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes..

Robitu, M., Musy, M., Inard, C. & Groleau, D., 2006. Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy*, Volume 80, p. 435–447.

Rockle, R., 1990. *Bestimmung der Stomungsverhältnisse im Bereich komplexer Bauungsstrukturen der Technischen Hochschule Darmstadt Germany*.

Sacre, C., 1983. *Le confort dans les espaces extérieurs : analyse microclimatique (Comfort in outdoor spaces: microclimatic analysis)*. CSTB de Nantes.

Santamouris, M. et al., 2001. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy*, 70(3), pp. 201-216.

Sidler, O., 2003. *L'inertie thermique des bâtiments. Consommation et confort d'été en climat méditerranéen*, ENERTECH.

Sievers, U., 1995. Verallgemeinerung der stromfunktionsmethode auf drei dimensionen. Meteorologische. Zeitschrift. Volume 4, pp. 3-15.

Stephenson, D. G. & Mitalas, G., 1967. *Cooling load calculations by thermal response factor method.* s.l.:ASHRAE Transactions, volume 73.

Taha, H., 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat.. *Energy and buildings*, Volume 25(2), p. 99–103.

Taleghani, M., Sailor, D. & M.Tenpierik, 2014. Thermal assessment of heat mitigation strategies: The case of Portland State University, Oregon, USA.. *Building and Environment*, Volume 73, pp. 138-150.

Terjung, W. & O'Rourke, P., 1980. Simulating the casual elements of urban heat islands. *Boundary-Layer Meteorology.*, Volume 19(1), pp. 93-118.

Thapar, H. & Yannas, S., 2008. *Microclimate and Urban Form in Dubai. PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin.*

Toudert, F. & Mayer, H., 2006. Numerical effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate.. *Building and Environment*, 41(2), p. 94–108.

UNDP, GEF, MPWT & DGU, 2005. *Thermal Standard for Buildings in Lebanon ”, Project GEF LEB/99/G35 and MPWT/DGU*, s.l.: s.n.

Ung, A., 2000. *Cartographie de la pollution atmosphérique en milieu urbain à l'aide de données multisources. Thèse de doctorat, Université Paris 7-Denis Diderot.*

UNH, 2011. *UN Habitat, Global Report on Human Settlements: Cities and Climate Change.*

Vardoulakis, E., Karamanis, D., Fotiadi, A. & Mihalakakou, G., 2013. The urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and cooling energy demands. *Solar Energy*, Volume 94, p. 128–144.

VDI, 1998. *Methods for the human-biometeorological assessment of climate and air hygiene for urban and regional planning. Part I: Climate. VDI guideline 3787. Part 2. Beuth, Berlin.*

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

Vooght, J. & Oke, T., 2003. Thermal Remote Sensing of Urban Climates. *Remote Sensing of Environment*, Volume 86, Issue 3, pp. Pages 370-384.

Wanga, Y., Berardi, U. & Akbari, H., 2016. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada.. *Energy and Buildings*, Volume 14, p. 2–19.

Wang, Y., Berardi, U. & Akbari, H., 2016. Comparing the Effects of Urban Heat Island Mitigation Strategies for Toronto, Canada.. *Energy and Building*, Volume 114, pp. 2-19.

Whyte, W., 1988. *City: Rediscovering the center.* New York: Doubleday.

Wilson, J. D., 1988. A second order closure model for flow through vegetation. *Boundary-Layer Meteorology*, 42(4), p. 371–392.

Yamada, T., 1982. A numerical model study of turbulent airflow in and above a forest canopy. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 60(1), pp. 439-454.

Yang, X., Zhao, L., Bruse, M. & Meng, Q., 2012. An integrated Simulation Method for Building Energy Performance Assessment in Urban Environments. *Energy and Buildings*, Volume 54, p. 243–251.

Yu, C. & Hien, W., 2006. Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, Volume 38, pp. 105-120.

