

ADAPTATIO



Convention de subvention
12-MCGOT-GICC-4-CVS-043
2012 – n° 2100 897 989

Projet ADAPTATIO

**Simulations effectuées avec le logiciel ENVI-met sur le
secteur de Tolbiac Chevaleret**

Auteurs principaux

Mayam JOJO

Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP)
80, rue Rébeval – 75019 Paris
maryam.jojo@eivp-paris.fr

Hypatia NASSOPOULOS

Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP)
80, rue Rébeval – 75019 Paris
01 76 21 59 82
hypatia.nassopoulos@eivp-paris.fr

Morgane COLOMBERT

Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP)
80, rue Rébeval – 75019 Paris
01 56 02 11 61
morgane.colombert@eivp-paris.fr

Publication : Avril 2015

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent document, faite sans l'autorisation des auteurs est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1er juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

Toute citation d'extraits ou reproduction doit obligatoirement faire apparaître la référence de ce document sous la forme : JOJO, M. NASSOPOULOS, H. COLOMBERT, M. (2015) Projet ADAPTATIO : Simulations effectuées avec le logiciel ENVI-met sur le secteur de Tolbiac Chevaleret, avril 2015.

Sommaire

Introduction.....	6
Introduction générale.....	6
Introduction spécifique au rapport	7
I Modélisation numérique des phénomènes énergétiques et hydriques en espace urbain	10
L’outil ENVI-met	12
II Application du logiciel ENVI-met sur un ensemble urbain : l’approche « énergie » et « eau » suivie pour la ZAC Tolbiac Chevaleret	22
Lecture typo-morphologique du secteur Tolbiac Chevaleret de la ZAC Paris Rive Gauche.....	22
Les stratégies d’adaptation	27
L’évapotranspiration ; formulation du processus physique et évaluation des besoins hydriques de la végétation ; l’approche suivie dans le cadre du projet Adaptatio	32
Modélisation du Secteur d’étude Tolbiac Chevaleret et simulations avec le modèle ENVI-met	38
III Résultats sur la ZAC Tolbiac Chevaleret	44
Descripteurs d’entrée, sorties Envi-met et indices énergie et eau	47
Résultats	48
III.3 Lecture des résultats liés à l’eau	68
III.4 la Toolbox	76
IV Conclusion	79
V Références bibliographiques	80

Liste des figures

Figure 1 : Bilan thermo-radiatif (Musy et al. 2012) ; Bilan hydrique (Musy et al. 2012) ; Processus aérauliques (Musy et al. 2012)	10
Figure 2: Schéma des sous-modèles de ENVI-MET (source : http://www.envi-met.com/documents/onlinehelpv3/hs800.htm)	13
Figure 3 : Structure du modèle sur ENVI-met	18
Figure 4 : Représentation schématique de la grille de modélisation du logiciel ENVI-met 3.1 [Source: www.envi-met.com].	19
Figure 5 : Situation de la ZAC Tolbiac Chevaleret. Paris rive gauche [Source : http://www.parisrivegauche.com]	23
Figure 6 : Organisation urbanistique du projet Chevaleret Tolbiac (sur dalle et en pleine terre)(Source : capture d’écran réalisée par les auteurs et traiter ensuite avec le logiciel ILLUSTRATOR).	24
Figure 7 : Organisation de la trame viaire de la ZAC Tolbiac Chevaleret [Source : capture d’écran réalisée par les auteurs et traiter ensuite avec le logiciel ILLUSTRATOR ; Photos réalisées par les auteurs]	25
Figure 8 : Répartition des ilots du projet Chevaleret Tolbiac (Source : auteurs ; superposition d’une vue aérienne issue de Google Earth et du plan du Secteur Tolbiac Chevaleret communiqué par le partenaire du projet Egis)	26

Figure 9 : Diagramme schématique illustrant les interactions entre l'environnement bâti, le climat et l'individu.	27
Figure 10 : Représentation de la végétation dans ENVI-met (copies d'écran issues des tests effectués avec le logiciel)	33
Figure 11 : cycle de l'eau dans le système "sol - plante - atmosphère" Source (Nold, 2010).....	36
Figure 12 : Modélisation de la ZAC Tolbiac Chevaleret (Cas de base) sur ENVI-met 3.1	39
Figure 13 : Evolution de la température de l'air correspondant aux jours de simulation retenus pour cette étude pour les années 2010, 2050, et 2100.....	41
Figure 14 : Valeurs de rayonnement global correspondant aux jours de simulation retenus pour cette étude pour les années 2010, 2050, 2100	41
Figure 15: Fiche descriptif pour la configuration de la simulation sur ENVI-met 3.1	43
Figure 16 : Evolution journalière de la température (°C) à 2m pour la journée de 2010 (1 point toutes les 3h entre 0h et 24h) pour les différents scénarios.....	50
Figure 17: Evolution journalière de la température (°C) à 2m pour la journée de 2050 (1 point toutes les 3h entre 0h et 24h) pour les différents scénarios.....	50
Figure 18: Evolution journalière de la température (°C) à 2m pour la journée de 2100 (1 point toutes les 3h entre 0h et 24h) pour les différents scénarios.....	51
Figure 19 : Représentation graphique des effets aérodynamiques dans le milieu urbain. L'effet de Venturi (a) correspond à l'augmentation de la vitesse du vent du fait de rétrécissement du passage. L'effet Wise (b) correspond à la création de rouleau tourbillonnaire devant un bâtiment élevée lorsque celui-ci voisine avec un bâtiment plus petit. L'effet de coin (c) est un phénomène d'accélération localisée, à l'angle d'un bâtiment. L'effet de barre (d) est caractérisé par une déviation en vrille de l'écoulement au passage d'une barre et l'effet de canalisation (e) apparaît lorsqu'un ensemble construit forme un couloir [Gandemer 76].	65
Figure 20 : Variation du taux d'évapotranspiration potentielle (mm) selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1er juin au 30 septembre « cas de base ».....	69
Figure 21 : Variation du taux d'évapotranspiration potentielle (mm) selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1er juin au 30 septembre « cas de végétation maximisée ».....	69
Figure 22: Variation de la température de l'air en °C selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1er juin au 30 septembre.....	71
Figure 23: Variation rayonnement global en cal/j/cm2 selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1er juin au 30 septembre.....	71
Figure 24: Variation de l'humidité relative en % selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1 ^{er} juin au 30 septembre.....	72
Figure 25: Variation des précipitations (mm) selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1 ^{er} juin au 30 septembre.....	73
Figure 26 : Déficit hydrique (mm) selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1 ^{er} juin au 30 septembre	74

Figure 27: Déficit hydrique (mm) selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1^{er} juin au 30 septembre 74

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des scénarios retenus pour cette étude.....	29
Tableau 2 : Méthode Turc ; calcul de la variable Iga en fonction de latitude (Valérie Borrell, 2011)...	34
Tableau 3 : Récapitulatif des données générales d'entrée pour la simulation ENVI-met du Secteur Tolbiac Chevaleret.....	40
Tableau 4 : extrait du fichier Meteonorm.....	42
Tableau 5 : Récapitulatif des scénarios testés dans le cadre du projet Adaptatio	44
Tableau 6: Résultats des simulations via ENVI-met 3.0	48

Introduction

Introduction générale

Le changement climatique (CC) est aujourd'hui un fait avéré et les rapports du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts pour l'étude du climat), notamment le 5^{ème} rapport publié en avril 2014, confirment avec plus de précisions¹ le fait que des changements liés au climat ont déjà eu lieu et que ceux qui nous attendent pourraient être plus importants. D'après le dernier rapport du GIEC datant de 2007 (GIEC, 2007), la température moyenne du globe devrait augmenter d'ici la fin du siècle (2090-2099) entre 1,1 à 6,4°C (par rapport aux années 1980-1999). Les futurs changements climatiques vont en grande partie dépendre des évolutions en terme d'émission de gaz à effet de serre (GES) et donc des politiques énergétiques, plus ou moins drastiques, qui seront mises en œuvre dans les pays les plus consommateurs d'énergie fossile.

A ce sujet les villes ont un rôle majeur à jouer ; Elles sont souvent présentées comme les lieux où se concentrent la majorité des consommations énergétiques et des GES. L'Agence Internationale de l'Energie (AIE, 2008) par exemple, estime que les territoires urbains sont responsables pour plus des deux tiers de la consommation mondiale d'énergie et pour plus de 70% des émissions globales de carbone. Les villes n'en demeurent pas moins des milieux sur lesquels l'humanité dispose des plus grands leviers pour agir contre les changements climatiques et s'en prémunir, s'y préparer, s'y adapter à ses conséquences.

Ainsi, à l'heure où l'on pense la transition vers des villes post-carbone, il est impossible de dissocier cette question de l'adaptation aux changements climatiques et surtout de ne pas tenir compte de cette nécessité de s'adapter à un climat changeant. Au regard des événements récents, tels que la canicule de 2003 en Europe, les villes se sont révélées mal adaptées à de telles conditions extrêmes de chaleur. Ces conditions extrêmes s'expliquent notamment par la présence d'un îlot de chaleur urbain, conséquence sous climat actuel des paramètres X, Y, Z,dont l'intensité pourrait augmenter avec le changement climatique.

A l'heure actuelle, si les collectivités territoriales françaises ont commencé à s'organiser pour limiter les rejets de GES, la réflexion autour de l'adaptation aux impacts du changement climatique se limite souvent à améliorer la politique existante de prévention et de gestion des risques de catastrophes naturelles. Face aux incertitudes liées aux projections climatiques, les collectivités territoriales hésitent à s'engager dans des actions encore aujourd'hui peu valorisantes et valorisables auprès des citoyens et synonymes d'échec des moyens de lutte contre le changement climatique (Bertrand et Larrue, 2007). Pourtant, afin de pallier à ces incertitudes et mettre en place des actions contribuant à l'adaptation au CC, selon (Hallegatte, 2008) des dispositifs peuvent être envisagés tels que: l'institutionnalisation d'un planning sur le long terme pour anticiper les problèmes et y apporter des réponses; les stratégies « sans regret », qui réduisent la vulnérabilité à un coût négatif, nul ou négligeable; le choix de stratégies réversibles etc. Cependant, en dehors des incertitudes liées aux projections climatiques, d'autres freins existent à la réflexion autour de la question de l'adaptation comme le manque d'anticipation et d'intérêt, les forts conflits d'intérêts locaux, ou encore

¹ Les projets données dans le troisième rapport d'évaluation (TRE) allaient jusqu'à 2100, tandis que celles du quatrième rapport portent sur la période 2090-2099 (http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf)

l'incapacité à s'approprier la responsabilité du problème des impacts du changement climatique de la part des politiques (ADEME, 2007).

Les collectivités territoriales ont aujourd'hui tout intérêt à se préoccuper dès maintenant de l'évolution du climat et de l'adaptation nécessaire aux impacts de ces évolutions. En effet, de nombreux investissements faits aujourd'hui ont des durées de vie supérieures à 30 voire 50 ans et le taux de renouvellement du bâti en France reste très faible (inférieur à 1%). De plus, l'inertie du milieu urbain construit et les temps longs de la prise de décision en matière d'aménagement (il peut s'écouler presque 10 ans entre le moment où il est décidé d'aménager une zone et les premières livraisons de bâtiments comme nous le montre le projet parisien de Paris nord Est), montrent l'importance d'anticiper dès aujourd'hui les futures contraintes, notamment climatiques, auxquelles seront soumises les infrastructures, les bâtiments, les réseaux, les projets d'aménagement.

Les incertitudes autour des évolutions climatiques mentionnées précédemment, doivent également être soulignées comme étant un obstacle à la prise en compte de ces évolutions dans l'aménagement. Par ailleurs, comme le signale Hallegatte (2008), la difficulté n'est pas dans le fait de devoir concevoir des bâtiments adaptés au climat de Paris ou de Cordoue mais de concevoir des bâtiments adaptés au climat de Paris et de Cordoue. Les climatologues ne pourront par ailleurs jamais apporter des réponses précises aux évolutions climatiques qui auront lieu dans 100 ans et c'est aux aménageurs et collectivités de gérer, dès maintenant, les incertitudes autour des évolutions climatiques que leur territoire connaîtra.

Introduction spécifique au rapport

La majeure partie de la population mondiale actuelle vit en ville, attirant ainsi une part importante des activités socio-économiques (logements, transports, réseaux, etc.), avec toutes les préoccupations économiques, sociétales et environnementales qui en découlent [ONU Habitat, 2011]. En outre, les projections issues des travaux du GIEC, indiquent d'ici la fin du siècle à la fois un réchauffement climatique global (une hausse de la température de $0,89^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ a été déjà observée sur la période 1901–2012 selon (Kounkou-Arnaud & Desplat, 2011) et une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité d'événements extrêmes [Kounkou-Arnaud & Desplat, 2011].

L'urbanisation contribue d'ores et déjà à la création d'un microclimat urbain qui pourra être accentué sous l'effet de futurs changements climatiques. En effet, l'urbanisation est à l'origine d'un microclimat de par son influence sur la température, sur la circulation du vent, sur l'humidité proche de la surface et sur de la brise urbaine et la turbulence atmosphérique. Ainsi, on constate l'existence de phénomènes tels que l'îlot de chaleur urbain (ICU), spécificité majeure du climat urbain [Oke 1987, Pigeon *et al.* 2008], qui indique l'écart de la température de l'air que l'on observe régulièrement au niveau de la canopée des zones urbaines par rapport aux zones rurales environnantes. Sous CC, une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur, pourrait accentuer l'effet de l'ICU. Cet accroissement des événements extrêmes, ainsi, des effets de l'ICU, pourrait avoir des conséquences multiples et variées sur les villes [Rosenzweig and Solecki 2001] en termes de gestion des infrastructures, de gestion des ressources en eau, de pollution, de confort thermique, de santé publique, de besoins énergétiques, etc. [Vinet, 2000].

Désormais, les villes se retrouvent au cœur des problématiques liées aux changements climatiques, et pour pouvoir les repenser tout en faisant face à ces changements, il est important de s'interroger non seulement sur la contribution des villes à l'atténuation du CC mais aussi sur leur vulnérabilité aux impacts du CC et leur adaptation à ces impacts. Ainsi, plusieurs questions peuvent se poser comme :

- Quels seront les effets locaux, à l'échelle d'une ville voire à des échelles spatiales inférieures, du changement climatique global ?
- Quel sera le microclimat dans une ville, éventuellement en expansion, sous CC ?
- Comment adapter la structure urbaine au changement climatique ?
- Quelle sera l'énergie nécessaire pour assurer le confort thermique des habitants ?

Ces interrogations nous incitent à essayer de mieux comprendre comment l'espace urbain est affecté par le climat mais aussi comment il agit sur celui-ci en retour. Au cours des précédents siècles, de nombreuses solutions ont été identifiées afin de gérer au mieux les liens entre espaces urbains et climat. Ces solutions étaient principalement axées sur des approches empiriques ou pragmatiques, et correspondaient à une urbanisation raisonnée ou ajustée par rapport aux contraintes climatiques. Néanmoins, de nos jours, le changement de paramètres tels que les activités socioéconomiques ont conduit à des modifications telles que celles liées à la structure des villes ou à la multiplication des surfaces minérales ou vitrées, révélant des choix et des pratiques mises en place parfois inadaptés au bon sens afin de maintenir un équilibre entre espace urbain et climat.

Nous constatons que cela révèle la nécessité de mettre en place des mesures de compensation et/ou de régulation comme par exemple des choix architecturaux, urbanistiques ou paysagers basés sur les apports de différents champs disciplinaires (microclimatologie urbaine, arboriculture urbaine, confort thermique en extérieur, modélisation numérique, etc.). Les connaissances recueillies dans ces différents champs apportent des éléments d'information sur la manière d'influencer, voire de réguler, les problèmes notamment thermiques par le biais par exemple de systèmes passifs naturels comme la végétation. Cela doit s'effectuer en prenant en considération les interactions complexes entre le climat et ses évolutions futures possibles, l'évolution des villes et le mode de vie des habitants et les évolutions également associées, à des échelles locales pertinentes pour la construction du territoire, comme l'échelle des projets d'aménagement urbains. Ainsi, la prise en compte par exemple de l'information microclimatique au niveau du projet d'aménagement n'est intéressant que dans la mesure où son impact est quantifié, où des améliorations du cadre de vie et des conditions de confort peuvent être attendues, et où des économies d'énergie peuvent être visées.

Le projet ADAPTATIO (Intégration de l'adaptation au changement climatique dans la conception des projets d'aménagements urbains: nouveau(x) outil(s) et nouveau(x) métier(s)) a été mené conjointement par l'EIVP, EGIS concept, CDC Climat, CSTB et la Ville de Paris. Il a pour objectif de proposer une nouvelle méthodologie permettant d'aborder, lors de la conception d'un projet d'aménagement urbain, la question de l'adaptation au changement climatique. Il est en effet nécessaire de penser adaptation et mitigation de façon conjointe et en amont. Un focus sera fait sur deux ressources clés pour demain, l'eau et l'énergie. Cette méthodologie s'appuiera sur le développement d'un nouvel outil simple d'évaluation des consommations énergétiques et d'eau d'un projet d'aménagement selon différents scénarios climatiques. La méthodologie se basera également sur une nouvelle organisation de la réflexion autour des enjeux énergétiques et hydriques

lors de la conception d'un projet d'aménagement urbain, en faisant intervenir l'ensemble des parties prenantes impliquées au projet pour les associer au processus d'innovation. Cette nouvelle organisation se fera également autour d'un nouvel acteur dont le métier reste encore à clarifier, ce que se propose de faire ce projet : le designer, qui devra faciliter la collaboration autour d'un projet d'aménagement (<http://www.eivp-paris.fr/>).

Le présent document s'inscrit dans le cadre du projet ADAPTATIO et s'organise en trois parties dédiées à notre contribution en termes de modélisation en utilisant le logiciel ENVI-met et à analyse des résultats obtenus avec ENVI-met.

1. Présentation du logiciel Envi-met utilisé et de l'ensemble des modalités du fonctionnement de cet outil sont analysés. La façon dont ce logiciel est utilisé dans le cadre du projet Adaptatio est également présentée.
2. l'étude pratique du secteur Tolbiac Chevaleret implique la mise en place d'un ensemble d'indicateurs morphologiques, physiques et optiques, afin de permettre une lecture «spatiale» de la morphologie urbaine du site.
3. les propriétés géométriques du secteur Tolbiac Chevaleret se manifestent à travers les différentes composantes de la morphologie urbaine (voies et tracés, profil des îlots, etc.) par le biais d'une lecture typo-morphologique qui permet la saisie des caractéristiques du quartier ainsi sa modélisation.
4. une analyse de l'ensemble des résultats de simulation relatifs au confort thermique et aux besoins hydriques est présentée.

I Modélisation numérique des phénomènes énergétiques et hydriques en espace urbain

Dans le domaine de la recherche, le terme « modélisation » est très récurrent dans plusieurs domaines scientifiques. En effet, notamment pour le milieu urbain, la modélisation se présente aujourd'hui comme un moyen incontournable pour développer une méthodologie permettant de matérialiser la relation entre la morphologie urbaine et le climat à travers de paramètres physiques appelés indicateurs « morpho-climatique » [Ait Ameer, 2002].

Il existe de multiples programmes et logiciels qui permettent de représenter graphiquement la morphologie urbaine, qu'elle soit existante ou en projet, en tenant compte de la complexité des formes qui la composent. Certains de ces outils donnent la possibilité d'intégrer comme données d'entrée les données climatiques afin d'effectuer différents types d'analyses.

Si la représentation des phénomènes physiques urbains est relativement aisée, celle des multiples interactions entre ces phénomènes l'est moins. Cependant, les processus physiques (thermique, aérodynamique, hydrologie, rayonnement...) impliqués dans le microclimat urbain et le comportement thermique des bâtiments et des espaces publics, ne peuvent être considérés indépendamment les uns des autres.

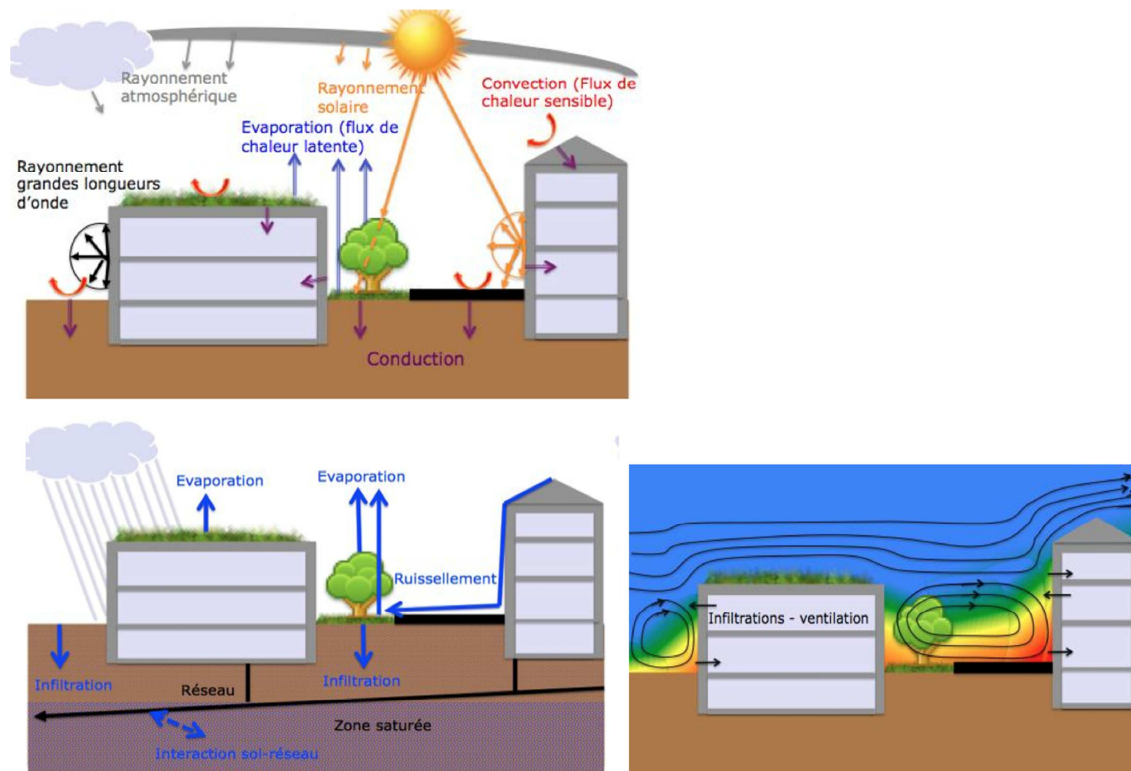


Figure 1 : Bilan thermo-radiatif (Musy et al. 2012) ; Bilan hydrique (Musy et al. 2012) ; Processus aérauliques (Musy et al. 2012)

Le **bilan hydrique** traduit les échanges d'eau entre le sol et ses réseaux enterrés, les surfaces et l'atmosphère, en période de temps de pluie ou en temps sec, et prend en compte la variabilité spatiale des caractéristiques telles que la présence de végétation, les propriétés hydrodynamiques

des sols, Au flux d'évapotranspiration entre surface et atmosphère, correspond un flux de chaleur, le flux de chaleur latente. Le **bilan énergétique**, quant à lui, exprime l'équilibre entre le rayonnement net, le flux de chaleur latente (issu du bilan hydrique), le flux de chaleur sensible (convection au niveau des surfaces) et le flux de chaleur par conduction dans les sols et au travers de l'enveloppe des bâtiments (stockage). Dans ce dernier cas, ce flux de chaleur par conduction dépend du traitement des ambiances intérieures (chauffage/climatisation). Un **bilan thermique du bâtiment** peut être fait afin d'écrire l'équilibre entre les flux de chaleur au travers les murs et les toits, les apports solaires, les charges internes (usages, équipements...) et les flux liés à la ventilation et aux infiltrations de l'air à travers l'enveloppe. Le flux de chaleur sensible au niveau des parois dépend des écoulements et de la température de l'air à proximité de la paroi. Les débits de ventilation et les infiltrations dépendent également de ces écoulements qui conditionnent les niveaux de pression sur les parois (Musy et al. 2012).

L'intervention dans l'environnement urbain par la réalisation d'un projet d'aménagement ou une simple plantation d'arbres, conduit inéluctablement à divers changements comme la modification de l'espace, du microclimat, de la dispersion des pollutions, etc. Ces modifications peuvent constituer de véritables préoccupations pour l'ensemble des acteurs impliqués dans les projets architecturaux et urbanistiques, car elles peuvent influencer les besoins des individus notamment en termes d'énergie et d'eau. Ainsi, la mise en œuvre d'un projet urbain implique, de plus en plus de nos jours, le recours à des campagnes de mesures et/ou aux techniques de simulation, afin d'évaluer les modifications et leurs impacts.

De nombreux travaux de recherche, souvent utilisés comme appuis pour l'évaluation des modifications de l'espace urbain et des conséquences induites par ces modifications, abordent ces considérations selon différentes méthodes. Certains auteurs se focalisent sur l'étude d'une modalité d'influence de l'intervention étudiée sur l'environnement urbain (ombre, température du feuillage, modification des écoulements aérauliques, évapotranspiration, etc). D'autres chercheurs tentent de croiser deux ou plusieurs aspects. Dans le cadre de certaines études, les procédés techniques mis en point pour l'évaluation des effets (maquettes, mesures in situ, simulations numériques) sont présentés. Dans le cadre du projet Adaptatio et notamment du livrable présent, notre objectif est de se focaliser sur la simulation numérique en présentant ses capacités ainsi que ses limites.

Les interactions entre les surfaces naturelles ou minéralisées, la végétation et l'atmosphère dans un environnement urbain, sont complexes à démontrer. Par conséquent, il est difficile d'avoir un rapide aperçu des effets causés par des changements dans un environnement urbain (quartier, etc.) régi par de telles interactions complexes. Nous pouvons citer à titre d'exemple les nombreux effets induits sur le climat local (échauffement, refroidissement, circulation d'air, etc.) par un changement comme l'augmentation de la surface minéralisée. De plus, l'effet causé par un ensemble de changements, ne peut pas se vérifier par une simple combinaison linéaire de conséquences connues séparément sur chaque changement. Les simulations numériques, sur lesquelles nous nous focalisons dans le cadre de ce livrable, peuvent nous permettre d'appréhender la complexité des interactions entre les éléments constituant l'environnement urbain, les conséquences d'un changement sur cet environnement, ainsi que l'effet combiné de plusieurs changements à la foi.

Pour notre recherche dans le cadre d'Adaptatio, nous avons opté pour le programme tridimensionnel ENVI-MET (www.envi-met.com) qui est l'un des rares programmes à simuler des scénarios climatiques à l'échelle de l'urbain. Ce logiciel fait par la suite l'objet d'une présentation et d'une évaluation de ses différentes fonctionnalités. Les chapitres qui suivent abordent des aspects relatifs à l'usage de l'outil ENVI-met.

L'outil ENVI-met

Le recours aux méthodes numériques pour l'étude des questions climatiques en milieu urbain confère un avantage important en comparaison avec les mesures globales in-situ. La capacité de traitement de multiples variables de l'espace urbain ainsi que de différents phénomènes climatiques, rendent leurs usages de plus en plus courants [Arnfield 2003]. Les **modèles microclimatiques** peuvent être classés selon leur **échelle spatiale**, qui peut aller de kilomètres à quelques centimètres. Souvent, les modèles développés afin d'étudier des phénomènes liés à la climatologie urbaine, comme par exemple le phénomène de l'îlot de chaleur urbain, exigent une résolution spatiale importante qui correspond à une échelle d'environ $\sim 1/500$. Cette échelle correspond à l'échelle du modèle de simulation du microclimat urbain ENVI-met qui sera présenté plus en détails par la suite [Gross 1991, Masson, 2000].

ENVI-met a la capacité de traiter **l'ensemble des aspects du microclimat urbain** d'ordre thermodynamique et aéraulique, en tenant compte des effets de la végétation. Cette capacité constitue un atout car la majorité des logiciels actuellement utilisés dans la simulation du microclimat urbain, se focalisent sur l'analyse d'un seul aspect du microclimat et ainsi ne recouvrent pas l'ensemble des aspects. A titre d'exemple, nous pouvons citer les modèles comme Miskam [Eichhorn, 1989] ou Muklimo 3 [Sievers, 1995], qui se concentrent sur le champ du vent et la distribution des gaz et aérosols dans l'atmosphère, et négligent les effets thermodynamiques et le calcul des températures des surfaces urbaines. D'autres modèles comme Solweig [Lindberg et al., 2008] ou Rayman [Matzarakis et al., 2007], s'orientent vers la simulation des flux de rayonnement dans l'environnement urbain. Enfin, des modèles comme celui proposé par [Mahrer et Avissar, 1984], analysent uniquement l'interaction de la végétation avec le microclimat urbain (évapotranspiration, ombres...).

Le logiciel Envi-Met est largement reconnu pour ses capacités à simuler des résultats précis pour des zones d'étude à grande échelle. Ceci fait sa particularité par rapport à d'autres logiciels entièrement dédiés à l'analyse du bâtiment ou de la ville à petite échelle. Le logiciel Envi-Met appréhende le champ urbain à une échelle de fragments urbains, de la rue canyon au quartier urbain.

ENVI-met jouit d'une notoriété grandissante. En 2010, le logiciel comptait plus de 1700 utilisateurs issus des quatre coins du monde. Le logiciel est, en effet, largement utilisé dans l'analyse de la qualité de l'air et du microclimat urbain dans de nombreux pays avec des profils climatiques différents comme Trèves (Allemagne) [Indésirable et al., 2003], Lisbonne (Portugal) [Andrade et Alforcado, 2008], Le Caire (Égypte) [Fahmya et al., 2010], Sao Paulo (Brésil) [Spangenberg et Shinzato, 2008], Singapour [Wong et Jusuf, 2007] et Colombo (Sri Lanka) [Emmanuel et al., 2007].

I.1.1 Principes généraux

Le logiciel de pronostic climatique en trois dimensions, ENVI-met [Bruse et al. 1998], apparaît actuellement comme le plus complet dans sa catégorie (thermoaéraulique) [Bruse et al. 1998]. Il permet l'étude et la comparaison, à une échelle microclimatique, des surfaces artificielles (bâtiments) et de la végétation dans des rues, dans des cours privées ou dans des espaces verts publics. Ce modèle tridimensionnel résout les équations classiques en fonction du temps, et simule les modifications « fortes » du vent (limites solides), comme celles dues aux murs, et les modifications plus « faibles » (barrières poreuses), comme celles dues à la végétation. Il est composé d'un **modèle atmosphérique** (équations de Navier-Stokes en condition non-hydrostatiques et incompressibles, approximation de Boussinesq, modèle de clôture de turbulence d'ordre 1.5), d'un **modèle de sol** (température, humidité, eau), d'un **modèle de surface** (bâtiments) et d'un **modèle de végétation**. Le modèle sol permet le calcul du transfert de la chaleur surfacique à l'intérieur du sol et vice-versa. La partie hydrologique permet le calcul de l'eau disponible dans le sol.

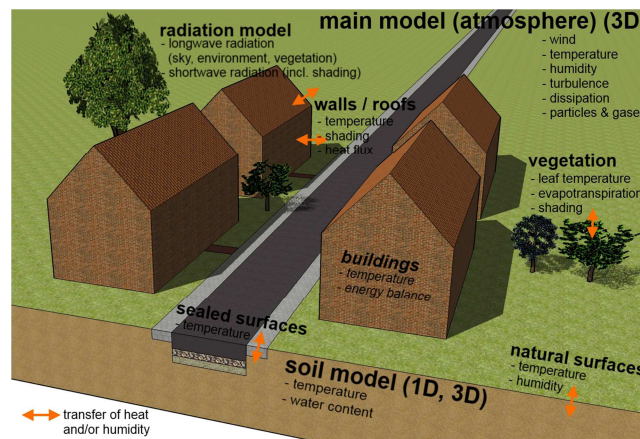


Figure 2: Schéma des sous-modèles de ENVI-MET (source : <http://www.envi-met.com/documents/onlinehelpv3/hs800.htm>)

Toutes les équations différentielles sont calculées par la méthode des différences finies et sont résolues par un schéma implicite (« forward in time »). Les équations combinées d'advection-diffusion sont résolues par une méthode implicite (« alternating direction implicit ») en combinaison avec un système d'advection amont [Vinet, 2000]. Lancé en 1995 par Michael Bruse de l'Université de Bochum en Allemagne, il a été ensuite mis en téléchargement libre. Contrairement à beaucoup d'autres programmes de simulation climatique existants, ENVI-met exige uniquement des configurations de base et peut être installé sur un ordinateur x86 standard avec un système d'exploitation Microsoft Windows. Une version qui fonctionne sur les systèmes d'exploitation Unix est récemment disponible (<http://www.envi-met.info/hg2e/doku.php?id=files:start>).

La principale différence entre ENVI-MET et les grands modèles atmosphériques utilisés pour la prédiction de la météo actuelle et future, est la résolution du modèle **temporelle et spatiale**. Avec une résolution spatiale entre 0,5 m et 10 m et un pas de temps de 10s, ENVI-MET simule à une échelle microscopique, les interactions entre l'atmosphère, les sols, la végétation et les bâtiments. Chaque structure urbaine et chaque élément végétal peuvent être explicitement simulés avec ENVI-met, ce qui fait du logiciel « l'outil parfait » pour les urbanistes, les architectes et les climatologues urbains qui veulent simuler les composants météorologiques de l'environnement urbain [Bruse ,

2004]. ENVI-met calcule la dynamique du microclimat durant un **cycle journalier** (24 ou 48 heures) en utilisant les lois fondamentales de la dynamique des fluides et la thermodynamique précédemment citées. Le logiciel simule également les conditions autour et entre les bâtiments (interactions entre les surfaces extérieures d'un espace urbain ouvert) et les interactions entre les surfaces, l'air et la végétation. Le processus d'échange de la chaleur et de la vapeur au niveau du sol et des surfaces verticales, les turbulences, les échanges aux niveaux de la végétation, la bioclimatologie et la dispersion des parcelles, sont également simulés. Ces simulations sont effectuées à travers une grille d'analyse tridimensionnelle avec des coordonnées variables sur les axes x, y et z.

Envi-Met est le seul logiciel où l'ensemble des facteurs influencent le confort thermique comme, la vitesse du vent, la direction et la température moyenne radiante (TMRT) sont intégralement simulés afin de calculer les indices du confort thermique. [Lenzholer, S 2010]. ENVI-met détient également la capacité d'analyser des situations extrêmes comme le cas d'un climat aride qui se caractérise par une large durée d'ensoleillement la journée et de faibles précipitations.

Les développeurs du logiciel cherchent **constamment à le développer**. La version actuellement disponible en ligne, «ENVI-met 3.1 Béta», ne peut pas prendre en charge l'importation de modèles 3D (formats tels que dxf, dwg, 3ds...). Afin de pallier à cette contrainte, un outil a été créé permettant d'importer des modèles de polygones 3D dans les formats de fichiers « COLLADA » (Collaborative Design Activity) et « DXF » (Drawing exchange Format) et de les transformer dans le format de base d'ENVI-MET (envi-met .IN). Le format COLLADA s'appuie sur XML qui est utilisé dans Google Earth. Le format propriétaire mais bien documenté DXF, quant à lui, a été introduit par Autodesk en 1982 en association avec le logiciel de conception assistée par ordinateur AutoCAD, logiciel de conception bien connu. Les deux formats sont pris en charge par une grande variété de logiciels de modélisation en 3D, de telle sorte que pratiquement n'importe quel polygone s'appuyant sur un modèle 3D peut être transféré dans l'un de ces formats. ENVI-met transforme les modèles de polygones s'appuyant sur le modèle de bloc utilisée par le logiciel. Actuellement, seule l'information géométrique des modèles de polygones est extraite, d'autres informations comme des textures ou des matériaux sont complètement négligées. Ces changements sont inclus dans la version «d'ENVI-met 4.0 version Beta » qui sera disponible prochainement [Bruse, 2009]. La version 4.0 de ENVI-met promet aux usagers d'autres performances, pour pallier aux aléas de rendu et d'affichage mais aussi pour l'amélioration de la vitesse de calcul [Bruse, 2012].

Enfin, [Bruse, 1999] résume les avantages attribués à ENVI-met:

- ENVI-met simule la dynamique du microclimat au sein d'un cycle journalier. Le modèle est en stationnaire et non - hydrostatique et simule tous les processus de changement, notamment l'écoulement du vent, les turbulences, les flux de rayonnement, la température et l'humidité.
- Une représentation détaillée des structures urbaines complexes est possible, c'est à dire qu'avec Envi-met il est possible de représenter les bâtiments avec différentes formes et hauteurs. Avec ENVI-met il est également possible de représenter des détails de conception tels que des galeries et des formes géométriques irrégulières.
- La végétation est traitée comme un obstacle poreux au vent et au rayonnement solaire. De plus, les processus physiologiques de l'évapotranspiration et de la photosynthèse sont

considérés et différents types de végétation avec des propriétés spécifiques peuvent être utilisés. Le sol est également considéré comme un volume composé de plusieurs couches et peut être de différents types.

- La résolution spatiale élevée (jusqu'à 0,5 m horizontalement) et la résolution temporelle (jusqu'à 10 s), permettent une lecture fine des changements microclimatiques, surtout sensibles à la géométrie urbaine, ce qui constitue un élément pertinent pour les questions de confort.
- Le modèle nécessite un nombre limité de données d'entrée et fournit un grand nombre de données de sortie. La variable clé pour le confort en plein air qui est la température moyenne radiante (TMRT), est également calculée.

I.1.2 Champs d'utilisation

Pléthore sont les thématiques traitées dans les articles identifiés dans le cadre de notre recherche bibliographique. Généralement, récentes et d'actualité, notre recherche bibliographique nous a permis de constater qu'elles concernent essentiellement l'étude de l'impact de la forme urbaine sur les comportements climatiques (thermiques, solaires, aérauliques, ...). En effet, actuellement, la problématique qui semble dominer, questionne la manière suivant laquelle il est possible d'assurer le confort thermique dans les espaces urbains extérieurs. Cette problématique souligne l'importance de comprendre les interactions entre le climat et la forme urbaine.

Les études basées sur l'utilisation d'ENVI-met partent globalement du constat actuel de l'état du contexte urbain, un milieu en perpétuelle mutation : étalement urbain, prolongation des réseaux de transports, densification des noyaux, dilution des espaces périphériques, variation des formes du bâti et des maillages qui structurent la ville, raréfaction du foncier, etc. Le climat ne fait pas exception. Ces dernières années, le monde est devenu un manifeste de différents changements climatiques avec des phénomènes observés tels que le réchauffement moyen de la planète et l'accentuation des événements extrêmes. Ces phénomènes urbanistiques croisés aux phénomènes climatiques ont inéluctablement un impact sur le confort thermique des usagers, notamment dans les espaces urbains ouverts. Selon les projections, ces impacts pourraient accroître sous l'effet du changement climatique. Cet accroissement possible des impacts sur le confort thermique des usagers souligne la nécessité de s'inscrire dans la durabilité en mettant en place des mesures d'adaptation aux changements climatiques. Cette mise en place des mesures d'adaptation fait l'objet du présent livrable du projet Adaptatio. En effet, dans le cadre de notre projet de recherche, comme ça sera développé par la suite, nous définissons des scénarios d'adaptation notamment liés à la végétation, les matériaux constructifs et la morphologie des bâtiments, l'impact desquels sur le confort est évalué en utilisant le logiciel ENVI-met.

A titre d'exemple, nous pouvons citer l'étude menée sur deux parties urbaines différentes se situant dans Al-Muizz Alley (restaurée et en cours de restauration), patrimoine mondial protégé de l'UNESCO, dans le centre du Caire pour un jour d'été chaud [Elnabawi M. H et al, 2013]. En effet, le 4e rapport d'évaluation du GIEC indique que l'Afrique se réchauffe plus vite que la moyenne mondiale, ce qui est susceptible de continuer dans les années à venir. Ce réchauffement est plus important à l'intérieur de régions semi-arides du Sahara et en Afrique australe centrale (GIEC, 2007).

Les températures plus chaudes d'été devraient avoir un impact important sur la qualité de vie dans les quartiers urbains, impact notamment justifié par les phénomènes d'îlots de chaleur urbains et leur intensification sous CC. L'étude sur cette zone géographique caractérisée par un climat chaud et aride, compare le microclimat pour chaque partie en utilisant la simulation numérique avec Envi-met version 3.1 (Bruce et Fler, 1998). Dans cette étude, l'application de l'outil de calcul ENVI-met a été validée en comparant les sorties du logiciel avec des mesures in situ. L'étude conclue en soulignant qu'ENVI-met s'avère être un outil fiable pour simuler les différents scénarios urbains, ainsi il peut être utilisé dans le cadre des processus de planification ou d'intervention architecturale et contribuer à l'élaboration des directives et des normes pour le réaménagement des espaces publics ouverts, sous climat présent et futur, notamment si la modélisation est complétée par des mesures in situ.

Globalement, les thématiques suivantes peuvent être traitées avec ENVI-Met, comme nous pouvons lire sur le site officiel du logiciel (<http://www.envi-met.com>) :

1) Morphologie urbaine :

- Tissus urbains / Architecture urbaine
- Urbanisme / Développement urbain

2) Physique urbaine :

- Climatologie urbaine
- Aéraulique / Pollution de l'air
- Thermique et énergétique urbaine
- Eclairage naturel et artificiel
- Végétation

3) Economie et gestion urbaine :

- Gestion urbaine
- Localisations des activités

4) Géographie et dynamique spatiale :

- Dynamique spatiale intra-urbaine
- Mobilité quotidienne
- Choix résidentiels
- Dynamique des systèmes de villes

Une évaluation des fonctionnalités et de l'interface d'ENVI-met est proposée en annexe.

I.1.3 Structure de la simulation

Comme présenté précédemment, le logiciel ENVI-met permet la simulation de toutes les dynamiques du microclimat avec un nombre limité de données d'entrée et de nombreuses données de sortie [Ali-Toudert 2005]. En effet, grâce à une grande résolution spatiale et temporelle, ENVI-met peut traiter des données liées à plusieurs types de structures urbaines composées de constructions de plusieurs tailles, de différentes formes, et avec différents détails (galeries, auvents). La végétation dans Envi-met est considérée comme un obstacle poreux aux vents et aux radiations solaires. De plus, des processus tels que l'évaporation la photosynthèse sont modélisés. Plusieurs types de végétation peuvent être représentés et le sol est considéré comme un volume composé de plusieurs couches de

plusieurs types également. Le logiciel ENVI-met structure la simulation autour de quatre principales étapes (Figure 3).

Dans le cadre de l'étape 1, afin de pouvoir lancer les simulations, nous devons renseigner le fichier **Géométrie (fichier.IN)** avec les propriétés morphologiques et la localisation des éléments à représenter (bâti, végétation, sol).

Comme présenté dans la figure 2, la modélisation sur ENVI-met se fait en 3D (2 dimensions horizontales (x) et (y) et une verticale (z)). Dans ce modèle, deux éléments de base constituant l'environnement urbain sont représentés les **constructions** et la **végétation**. Ces éléments sont représentés sous forme d'un ensemble de **cellules** d'une **grille** régulière. Les cellules de modélisation et la grille d'analyse sont dimensionnées. Comme il est composé d'un modèle ID², il est possible d'étendre la limite d'un élément jusqu'à 2500 cellules sans avoir besoin d'étaler le modèle complet. La hauteur z est déterminée en fonction de la hauteur maximale de l'élément à représenter. La grille « nesting » est la surface qui entoure le corps du modèle. Elle permet le déplacement de la limite du modèle au-delà du corps simulé.

² La classification *LAD* info est principalement utilisée à des fins de visualisation. La banque LAD est regroupée en 5 classes avec une identification individuelle (ID) : Classe 1: LAD 0 à <0,5 m² / m³ ID: 11, Classe 2: LAD 0,5 à <1,0 m² / m³ ID: 12, Classe 3: LAD 1,0 à <1,5 m² / m³ ID: 13, Classe 4: LAD 1,5 à <2,0 m² / m³ ID: 14, Classe 5: CONT-dessus de 2,0 m² / m³ ID: 15. Lorsque pour la visualisation nous utilisons LEONARDO, ces classes sont automatiquement créés sur le calque "spécial" en appuyant sur le bouton "par défaut Utilisation ENVI-met" dans les Réglages 2D de dialogue pour la couche "Spécial".

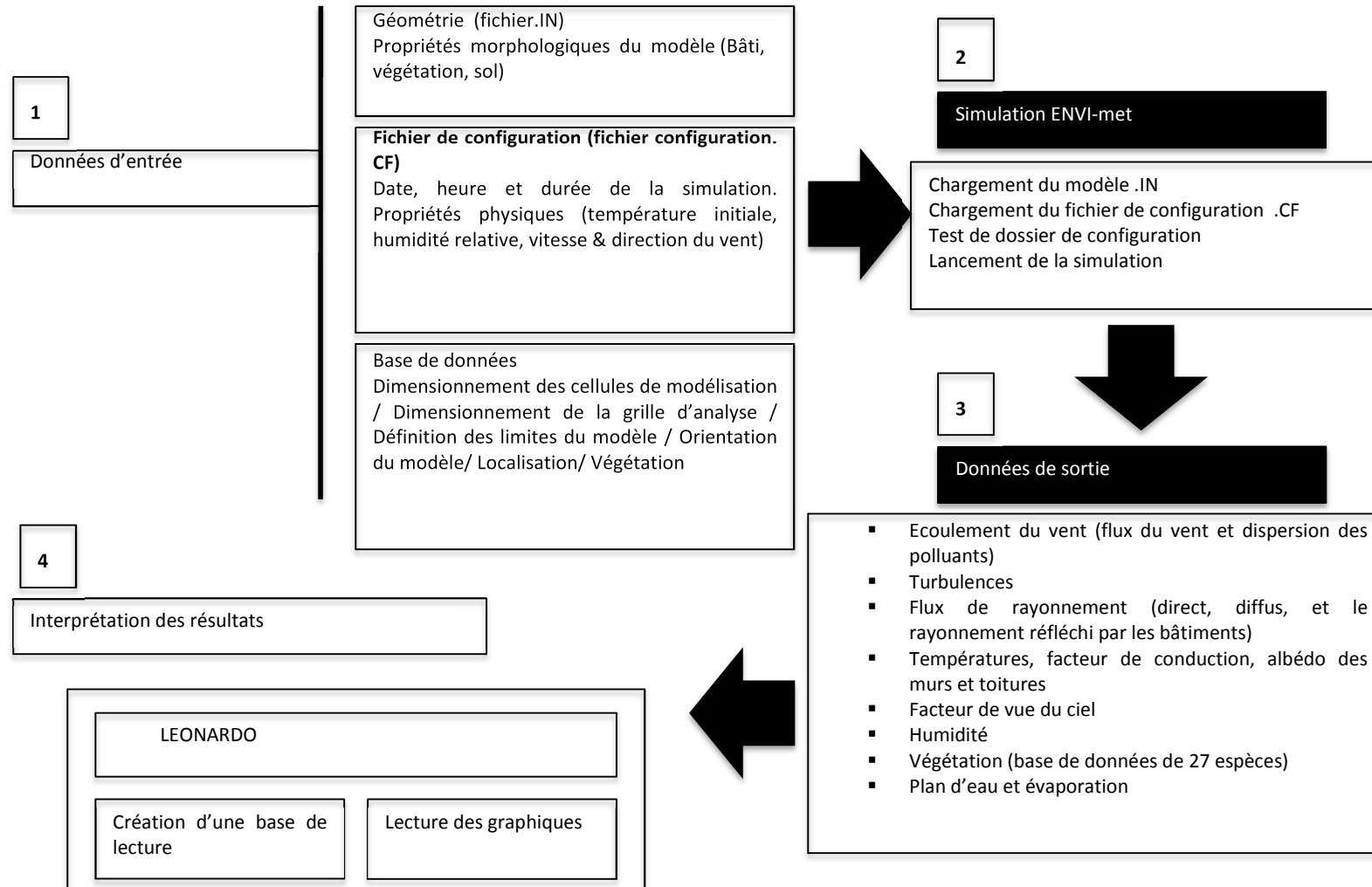


Figure 3 : Structure du modèle sur ENVI-met

Comme présenté précédemment et illustré dans la Figure 2, ENVI-MET se compose de plusieurs sous-modèles qui interagissent entre eux, un **modèle de frontière 1D**, un **modèle atmosphérique en 3D**, un **modèle de sol 3D/1D³**. Le modèle de la limite a une dimension qui est principalement utilisé pour l'initialisation du modèle et pour les conditions aux limites du modèle atmosphérique tridimensionnel. Il commence à partir du sol ($z = 0$) jusqu'à une hauteur de $z = 2500\text{m}$ au-dessus du niveau du sol. Ainsi, nous définissons également les limites du modèle et son orientation.

Base de données

- Dimensionnement des cellules de modélisation
- Dimensionnement de la grille d'analyse
- Définition des limites du modèle
- Orientation du modèle
- Localisation

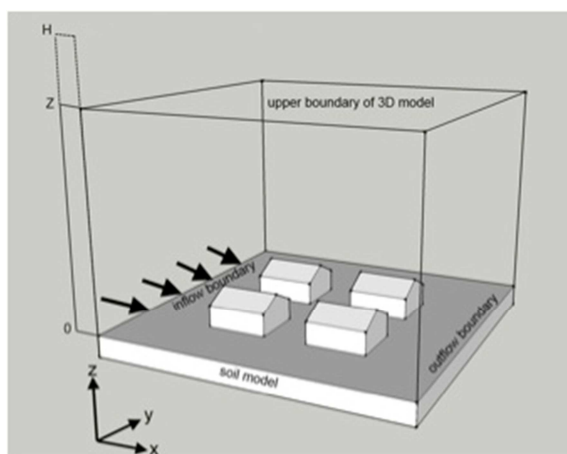


Figure 4 : Représentation schématique de la grille de modélisation du logiciel ENVI-met 3.1 [Source: www.envi-met.com]

Dans le cadre de l'étape 1, nous devons également renseigner le fichier **de configuration (fichier .CF)** afin de pouvoir lancer les simulations. Dans ce fichier nous devons inclure des informations sur la date, l'heure et la durée de la simulation que l'on souhaite lancer. En outre, nous devons renseigner les conditions initiales des propriétés physiques notamment pour la température initiale (**TA**: Air dry bulb temperature), l'humidité relative (**RH**: relative humidity), la vitesse et direction du vent (**V** : wind speed), le coefficient de transmission thermique U pour les murs, le paramètre U pour les toitures, l'albédo des murs, et l'albédo des toitures. Une valeur par défaut est également attribuée à la température du sol.

Une fois les données d'entrée renseignées, nous pouvons dans le cadre de l'étape 2, lancer des simulations. Comme mentionné précédemment, plusieurs paramètres peuvent être analysés via Envi-Met. Ces paramètres peuvent concerner le **système atmosphérique** (champ de vent,

³ Le modèle 1D s'étend de la surface du sol jusqu'à 2500 m de hauteur. Il fournit les valeurs de la partie supérieure du modèle 3D et, si une condition limite latérale forcée est sélectionnée, le modèle 1D fournit le profil d'entrée pour le modèle 3D

température et vapeur, turbulence et l'énergie cinétique), le système de sol (température, débit d'eau). Nous pouvons également analyser les paramètres liés à la végétation (échange de chaleur avec de l'air dans la canopée, échange de vapeur / eau avec de l'air dans la canopée, interception de l'eau), aux transports (chaleur anthropique, phénomènes liés à la présence de transports), au système de surface (flux de surface au sol, flux de murs, échanges intérieur/extérieur) et enfin le système de construction (transfert de chaleur à travers les murs).

Dans le cadre de l'étape 3 des données de sortie, ENVI-met peut générer une multitude de paramètres sous plusieurs types de répertoires. Parmi ces répertoires le « **Fichier de sortie en 3D** » contient les fichiers atmosphère, surface et sol. Les résultats sont stockés sous un format binaire. Dans le cadre du projet de recherche Adaptatio, ces résultats sont visualisés grâce à un autre logiciel, LEONARDO 3.5 qui est couplé à ENVI-met (étape 4 interprétation des résultats). Nous avons également le « **Fichier des récepteurs** » qui permet de définir des récepteurs à l'intérieur du modèle et de les voir de plus en plus en détail. Se sont de simples fichiers qui peuvent être visualisés avec un simple programme tel qu'Excel, Bloc-notes et Wordpad. Enfin, nous avons le « 1D fichier model ». Ce type de fichiers contient les données du profil vertical du model unidimensionnel d'Envi-met dans un format ASCII. Ces fichiers sont généralement utilisés pour la vérification et la résolution des problèmes qui peuvent figurer pendant la simulation [Bruse 2004].

Parmi les données de sortie, la vitesse du vent, la radiation solaire et la température de l'air sont les paramètres les plus importants pour évaluer le confort thermiques pour les hautes latitudes [Zrudlo 1988 in Lindberg 2003]. Les indices thermo physiologiques sont largement utilisés pour évaluer l'impact du climat sur le confort intérieur et extérieur. Ces indices combinent les différents paramètres microclimatiques avec le bilan d'énergie thermique. Parmi les plus souvent utilisés nous trouvons l'écoulement du vent (les flux du vent et la dispersion des polluants), les turbulences, les flux de rayonnement (direct, diffus et le rayonnement réfléchi par les bâtiments), la température, facteur de conduction, le facteur de vue du ciel, l'humidité, le Vote Moyen Prévisible-PMV [Lindberg 2003], et la Température Effective Physiologique (PET). La question de l'évaluation du confort à travers des indices thermo physiologiques, comme ça sera développée dans la partie suivante, fait également partie des sujets traités dans le cadre du projet Adaptatio. En effet, comme nous verrons par la suite, le confort sur le secteur parisien choisi est évalué sous climat présent et futur pour différents scénarios liés à la végétation et la morphologie.

I.1.4. Conclusion du chapitre

La modélisation des interactions entre l'individu, les bâtiments et l'environnement est une tâche complexe et fastidieuse. Cependant, elle demeure prépondérante dans l'analyse du microclimat urbain et les besoins notamment énergétiques et hydriques dans les espaces extérieurs. En effet, cette analyse met en lumière le rôle de l'eau et de la végétation dans le microclimat urbain. Les principes et les phénomènes ayant été décrits, il est maintenant temps d'essayer de quantifier les différents impacts de choix liés à la végétation et à l'environnement bâti pour notre secteur urbain étudié. Pour ce faire, il est important d'identifier un logiciel qui sera un outil approprié à cette étude afin d'obtenir l'ensemble des informations microclimatiques désirées. Il est à signaler que la démarche présentée ici tente, dans un premier temps, de faire une présentation non exhaustive

générale de l'intérêt de la simulation numérique, des familles de modèles de simulations 3D physiques, et des modèles microclimatiques pour l'étude des fragments urbains. Ces présentations sont suivies par une présentation du logiciel ENVI-met 3.1, outil de simulation microclimatique stationnaire, hydrostatique, 3D, utilisé dans le cadre du projet Adaptatio. Notre analyse bibliographique nous a permis d'identifier des éléments d'évaluation d'ENVI-Met. En effet, la simulation des conditions thermiques extérieurs avec ENVI-met, compléter avec des mesures in situ, peuvent être utilisées comme des outils de planification urbaine sous climat présent et actuel. ENVI-met s'avère être un outil fiable pour simuler les différents scénarios urbains, ainsi, il peut être utilisé dans le cadre des processus de planification urbaine ou architectural et contribuer au développement de lignes directrices qui serviront d'outil d'aide à la conception et à la décision. Dans la partie suivante, nous utilisons le logiciel ENVI-met pour un secteur parisien sélectionné, la ZAC Tolbiac Chevaleret, afin d'évaluer cette zone dans les conditions climatiques actuelles et sous changement climatique, pour différents scénarios d'intervention liés à la végétation et la morphologie, afin d'atteindre des niveaux acceptables de confort extérieur.

II Application du logiciel ENVI-met sur un ensemble urbain : l'approche « énergie » et « eau » suivie pour la ZAC Tolbiac Chevaleret

Il est communément admis que tout projet urbain a tendance à modifier le paysage urbain d'un quartier ou d'une ville. Les transformations relatives à un nouvel ordonnancement spatial des bâtiments ou à l'aménagement d'un espace vert, sont tributaires d'une volonté d'un ensemble d'acteurs du projet urbain (urbanistes, architectes, paysagistes, ingénieurs, maîtres d'ouvrage, ...) afin de répondre à différents types des contraintes (environnementales, sociales, économiques,...). Dans ce contexte, la composante microclimatique peut fédérer plusieurs de ces acteurs, en préconisant un intérêt pour les économies d'énergie, l'ajustement des conditions de confort de l'espace et l'amélioration du cadre vie. Ces trois composantes ont largement été mises en avant lorsque nous avons abordé les relations entretenues entre la végétation et la ville. Dans l'étude de cas présentée dans ce chapitre, le secteur Tolbiac Chevaleret, la préoccupation liée à l'impact de la végétation sur le microclimat urbain et les conditions de confort, ne correspond pas directement à un objectif défini dans le cadre de la formulation du projet initial (sujet traité dans le cadre du livrable 1.3). Néanmoins, comme nous allons essayer de le démontrer, l'évolution à travers le temps (présent, 2050, 2100) de la présence végétale dans ce site ou d'une modification de la morphologie de la ZAC et des matériaux de façades, amène à considérer cet angle d'analyse. Cette évolution, permet aussi d'illustrer les avantages associés à ces solutions d'adaptation à l'éventuel changement climatique.

Dans le cadre de cette partie, nous présentons dans un premier temps notre zone d'étude, le secteur Tolbiac Chevaleret, situé dans le 13^{ème} arrondissement de Paris au sein de la ZAC Paris Rive Gauche. Ensuite, nous présentons les scénarios d'adaptation au changement climatique (végétation, matériaux, élévation etc.) que nous avons défini dans le cadre du projet Adaptatio afin d'évaluer les impacts sur le secteur en termes d'énergie et d'eau. Les impacts en termes d'énergie sont quantifiés à travers des indicateurs spatiotemporels définis dans ce chapitre. Les données microclimatiques nécessaires à l'utilisation des indicateurs sont définies à l'aide de données simulées avec ENVI-met. Les impacts en termes d'eau sur le secteur sont évalués à l'aide d'une méthode simplifiée, présentée dans ce chapitre, que nous avons définie, dans le cadre du projet Adaptatio, à l'aide de la méthode MIR (Méthode d'Irrigation Raisonnée) de la Ville de Paris.

Lecture typo-morphologique du secteur Tolbiac Chevaleret de la ZAC Paris Rive Gauche

La **typo-morphologie** est la combinaison de la morphologie urbaine et de la typologie architecturale. Selon Panerai et al., (1999), elle consiste à analyser les formes urbaines et à comprendre leur composition, en pointant leurs relations, leurs limites et leur contenus. Panerai et al., (1999) décomposent une étude typo-morphologique en cinq points: l'analyse du réseau viaire, du réseau parcellaire, du contexte urbain du quartier, du rapport entre les espaces construits et non construits, et enfin l'analyse du bâti, lui-même qualifié par trois paramètres, la dimension, la forme et le style des bâtiments.

Dans le cadre du projet de recherche Adaptatio, quatre critères ont été retenus pour l'analyser le secteur Tolbiac Chevaleret (13^{ème} arrondissement de Paris) : le contexte urbain, le tracé des voiries,

le profil d'îlot ou du bâti, l'espace libre et ses rapports avec l'espace bâti ([Panerai et al., 1999], [Merlin, 1998]). Le premier rappelle le contexte historique et la situation géographique de la forme urbaine actuelle étudiée et permet de la situer dans la ville et notamment par rapport au centre-ville. La voirie est le système de liaisons dans l'espace, constitué par l'ensemble des circulations. Le tracé sert de support structurel du tissu urbain. Un îlot urbain est un ensemble de bâtiments constituant une unité dans une ville. C'est un élément déterminant du tissu urbain. Il est aussi défini comme un ensemble de parcelles délimité par des voies. De taille variable, un îlot peut être la base de la constitution du quartier ou bien le résultat du tracé des voies. Enfin, avec le critère 'rapport entre espace libre et espace bâti', nous souhaitons plus précisément étudier le rapport entre espace public et privé.

Contexte urbain

Le projet Tolbiac Chevaleret (Figure 5) se situe dans la ZAC de Paris rive gauche (13ème arrondissement), et s'organise le long de l'avenue de France au nord du secteur, entre le boulevard Vincent Auriol à l'ouest, la rue de Tolbiac à l'est et la rue du Chevaleret au sud du secteur.

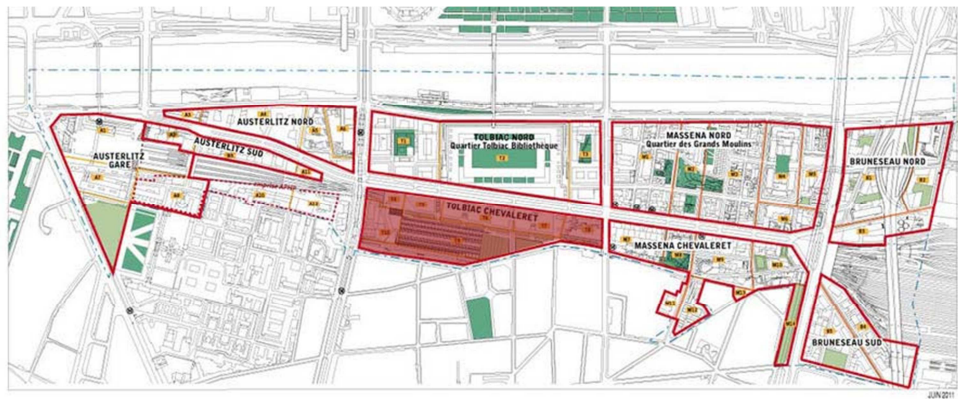


Figure 5 : Situation de la ZAC Tolbiac Chevaleret. Paris rive gauche [Source : <http://www.parisrivegauche.com>]

Le projet qui s'étale sur 10 hectares environ, vise à recouvrir les voies ferrées pour établir une continuité entre anciens et nouveaux quartiers. Les éléments d'aménagement sont prévus sur deux niveaux comme présente la figure 5, sur dalle (nouveau sol relevé de 8 à 10 mètres) et en pleine terre. Pour la réalisation sur dalle, une promenade plantée, des voies longitudinales et transversales, et la construction d'îlots de bâtiments, sont prévues. Pour la réalisation en pleine terre, la création d'un espace public, l'aménagement de la Halle Freyssinet, la construction de logements et équipements sportifs, et la construction d'un parking souterrain, sont prévus.



Figure 6 : Organisation urbanistique du projet Chevaleret Tolbiac (sur dalle et en pleine terre)(Source : capture d'écran réalisée par les auteurs et traitée ensuite avec le logiciel ILLUSTRATOR)

Voies et tracés

Actuellement, l'accès au site se fait principalement grâce à trois axes importants, l'Avenue de France, le Boulevard Vincent Auriol, la rue de Tolbiac et la rue du Chevaleret.

Cependant, sur le site s'affiche déjà des prémices d'un manque d'une capacité suffisante à desservir le projet, notamment en termes de stationnement. En effet, à l'exception des parkings souterrains existants entre l'avenue de France et la Seine, aucun arrêt ou stationnement, notamment sur l'avenue de France, est possible.

De prime abord le réseau viaire de Tolbiac Chevaleret semble prendre une forme en « résille » (quadrillée), avec une géométrie orthogonale qui confirme le rôle de chaque rue (Figure 6). Cependant, nous pouvons noter un retournement qui forme une forme « axé » (voiries quadrillées) ou « curviligne » (voiries curvilignes) à la voirie. Il s'agit donc d'une « fausse résille » qui résulte de deux systèmes simples linéaires (voiries droites et linéaires sans retournements sinueux) et en boucle. La superposition de ces deux systèmes, traduit l'importance des rues de desserte et du quartier. En effet, la juxtaposition des permet de bien connecter les rues aux grandes voiries. Ce réseau permet aussi une hiérarchisation du rôle des rues, selon leur dimensionnement et capacité, dans l'ensemble du système, permettant une meilleure gestion des flux et facilitant l'accès au site. L'intersection entre les différentes voies est globalement orthogonale.

La largeur des voies notamment, est un facteur éminent de hiérarchisation d'un système. La longueur est également importante car, plus une rue est longue, plus sa fonction de desserte s'accroît et plus elle a un rôle structurant dans la perception de la ville. Dans le cas du secteur Tolbiac Chevaleret, certaines voies (Avenue de France, Boulevard Vincent Auriol) se distinguent uniquement par leur largeur. Cette caractérisation est décroissante du côté de la rue de Tolbiac et de la rue du Chevaleret à partir des voies principales (Avenue de France, Boulevard Vincent Auriol).

Enfin, le projet accorde une grande importance aux espaces publics. Ainsi, un axe longitudinal planté est en cours d'aménagement et sera un espace partagé entre les piétons et cyclistes.

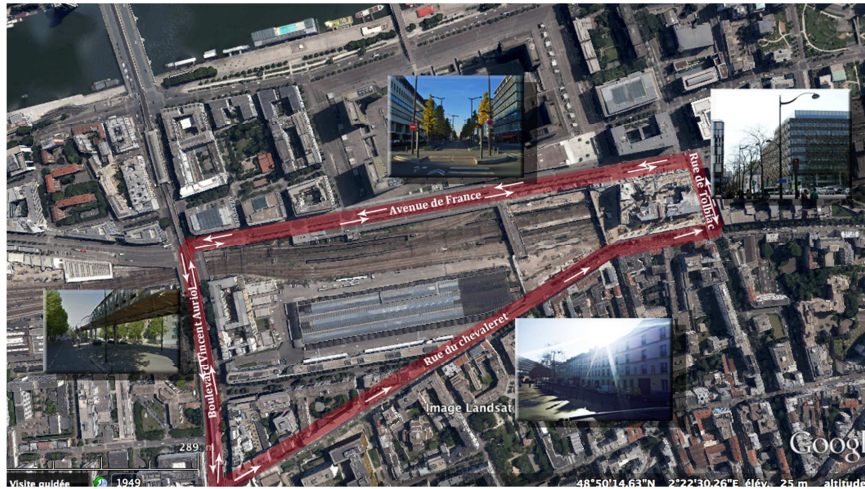


Figure 7 : Organisation de la trame viaire de la ZAC Tolbiac Chevaleret [Source : capture d'écran réalisée par les auteurs et traitée ensuite avec le logiciel ILLUSTRATOR ; Photos réalisées par les auteurs]

Profil de l'îlot

Le découpage parcellaire affecte particulièrement le choix des formes de construction et d'aménagement. La surface des parcelles du projet permet de déterminer son envergure, alors que leurs proportions permettent de déterminer le rapport entre leur dimension en façade sur rue et leur profondeur [Allain, 2004].

Comme présenté ci-dessus, le projet de Tolbiac Chevaleret est réalisé sur deux niveaux, une réalisation sur dalle (construction d'îlots de bâtiments, promenade et voies plantées partagées entre les piétons et les cyclistes), et réalisation en pleine terre (grand jardin, Halle Freyssinet, logements, équipements). Ces deux niveaux définissent deux géométries de parcelle distinctes, un simple rectangle du côté de l'Avenue de France et une forme biseautée du côté rue du Chevaleret. La première partie de la parcelle Tolbiac Chevaleret « sur dalle » est à créer en couvrant les voies ferrées, alors que la deuxième « en pleine terre » existe déjà. Globalement, nous considérons que la forme de ces deux parties est régulière, offrant ainsi aux bâtiments qui y seront disposés de manière à générer quatre façades pour chaque îlot.

Le projet, en cours de réalisation, a prévu une organisation en îlots isolés. Les bâtiments sont assez éloignés les uns des autres, marquant ainsi une discontinuité. Cette dernière est recherchée et n'altère pas l'aspect homogène du bâti qui est assurée par la disposition linéaire des bâtiments selon un axe géométrique. Cette discontinuité exprime également une volonté architecturale de créer des perspectives visuelles. Comme présente dans la figure 18, « sur dalle » nous trouvons les îlots T7A, T7B, T6B, T5, T6A, T6C, T4, T6B et T7B, qui seront utilisés afin de mettre en place des logements, des bureaux, des commerces et des équipements. Enfin, en « pleine terre » nous trouvons les îlots T9, et T10, qui seront aussi utilisés pour des logements et des équipements mais également pour la réalisation d'un parking souterrain, d'un jardin public et l'aménagement de la Halle Freyssinet (informations issues du livrable 1.3 sur la présentation de l'étude de cas ; les données ont été initialement communiquées par la SEMAPA).

Actuellement, le chantier est toujours en cours. À l'angle de la rue de Tolbiac et de l'avenue de France la construction de l'îlot T8 est achevée, néanmoins, cet îlot ne fait pas partie de l'étude. À

partir de l'îlot T8 et en se dirigeant vers le Boulevard Vincent Auriol, les travaux sont en cours, notamment les travaux de couverture des voies afin d'accueillir les autres îlots.

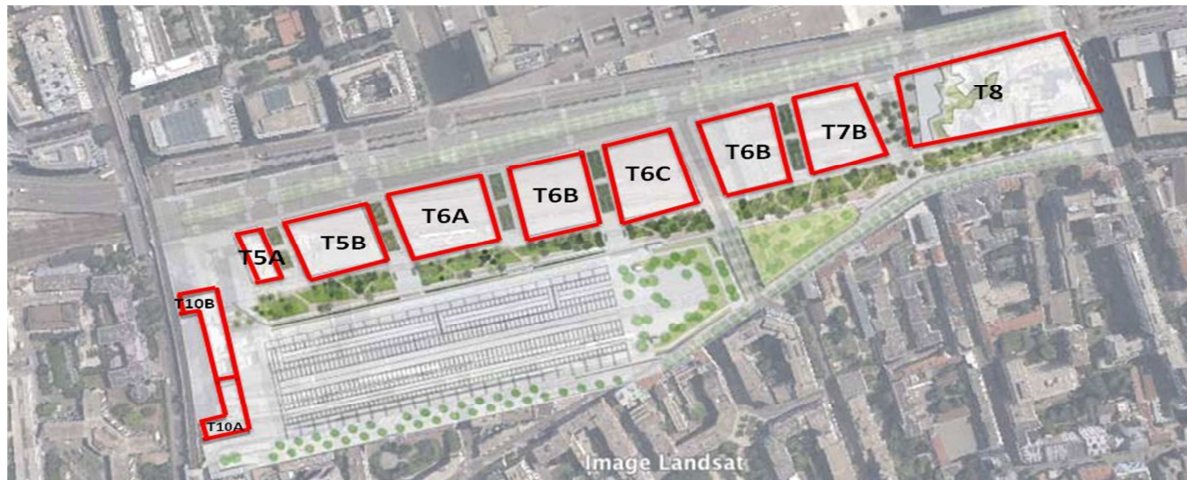


Figure 8 : Répartition des îlots du projet Chevaleret Tolbiac (Source : auteurs ; superposition d'une vue aérienne issue de Google Earth et du plan du Secteur Tolbiac Chevaleret communiqué par le partenaire du projet Egis)

Rapport entre espaces publics et privés

La typologie des espaces libres est tributaire du système bâti. En milieu urbain, un espace libre n'est considéré comme tel que lorsqu'il est bordé d'éléments construits. Le « vide urbain » ne subsiste donc qu'en référence au cadre bâti qui correspond au « plein ». Les caractéristiques respectives du bâti et des espaces libres entretiennent des rapports d'interdépendance, de croissance ou de décroissance. Selon des critères topologiques, la disposition des espaces libres dans le quartier de Tolbiac Chevaleret dépend de la continuité du bâti. Plus les bâtiments sont discontinus, plus les espaces libres autour forment une continuité.

Comme présenté auparavant, l'intégration de l'élément végétal dans le secteur Tolbiac Chevaleret, constitue un défi important pour le secteur. Ainsi, en effet, un jardin public, une promenade plantée et des voies longitudinales et transversales sont prévus comme espaces verts partagés entre les citoyens et les modes doux de transport.

Plus de précisions sur le secteur Tolbiac Chevaleret sont données dans le livrable 1.3.

Suite à la présentation du secteur Tolbiac étudié dans le cadre du projet Adaptatio, nous allons présenter les choix « techniques »/ options d'adaptation que nous avons sélectionnés afin d'évaluer la capacité pour notre secteur de s'adapter sous changement climatique. Une fois ces scénarios choisis présentés, par la suite nous développons les méthodologies définies dans le cadre d'Adaptatio afin d'évaluer, à l'aide du logiciel ENVI-Met, les impacts du CC sur le secteur en termes d'énergie et d'eau et la capacité des scénarios à atténuer ces impacts.

Les stratégies d'adaptation

II.2.1 Généralités

Il existe différentes **formes** et **échelles** de mise en œuvre de stratégies d'adaptation pour faire face aux changements climatiques dans les villes, car entre l'environnement bâti, le climat et le végétal nous pouvons avoir plusieurs types d'interactions possibles (Figure 19):

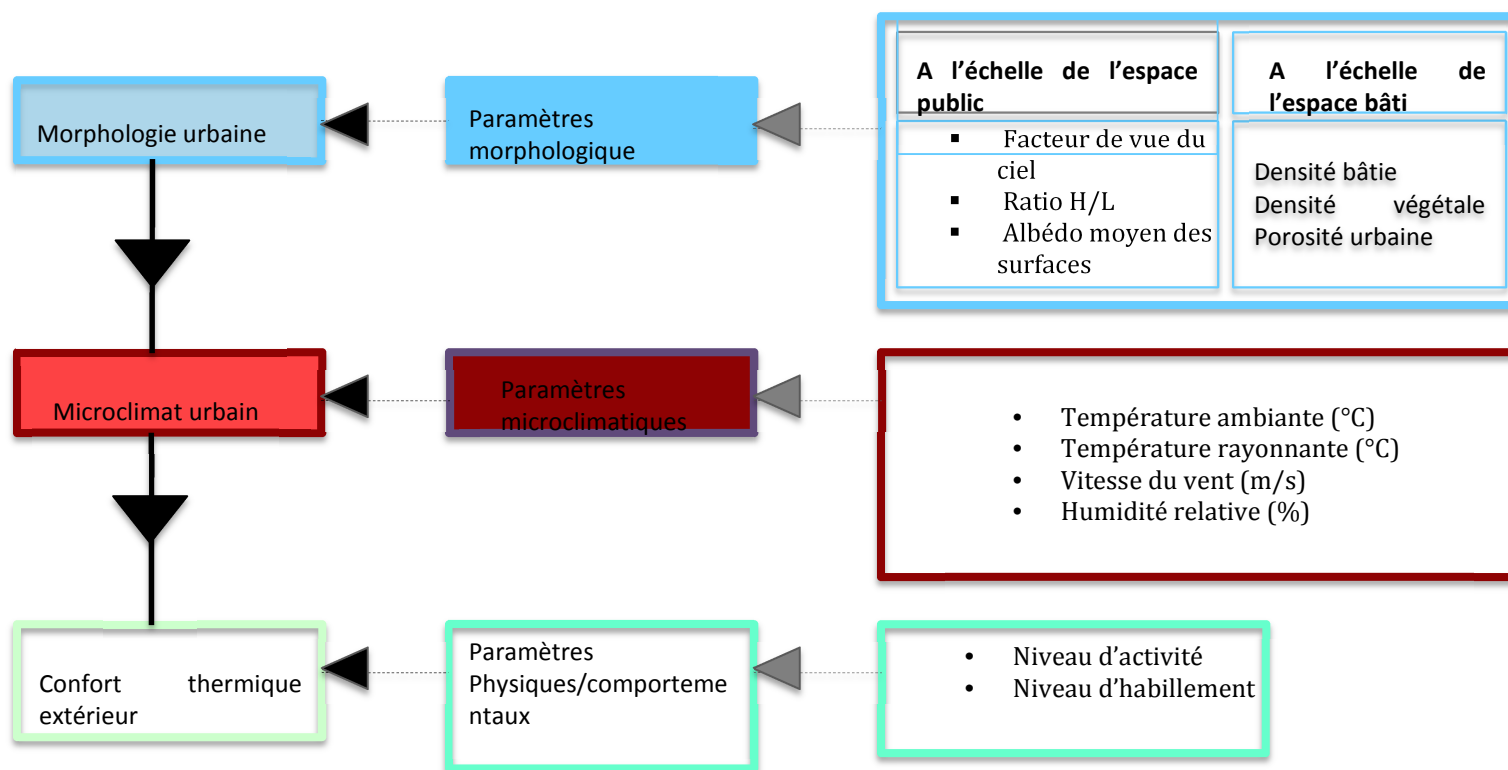


Figure 9 : Diagramme schématique illustrant les interactions entre l'environnement bâti, le climat et l'individu.

Comme la figure 9 le montre, la notion de confort thermique implique la prise en compte de différentes composantes comme les composantes spatiales, morphologiques, climatiques et comportementales.

- L'aménagement urbain : à cette échelle l'adaptation aux CCs se matérialise à travers la requalification des surfaces urbaines. Nous pouvons citer l'exemple de l'augmentation des espaces verts.
- le bâti : l'adaptation aux CCs à l'échelle du bâti passe par la modification des formes urbaines et de l'enveloppe interne et externe des bâtiments. A titre d'exemple, nous pouvons opter pour des matériaux de construction/ rénovation plus isolants et/ou réfléchissants.
- l'individu : en effet, c'est les êtres-humains qui peuvent mettre en place, de manière spontanée ou planifiée, des actions de protection, comme le démontrent différents projets de recherche effectués dans le cadre du programme PIRVE (Programme Interdisciplinaire de Recherche Ville et Environnement): baisse de l'activité aux heures les plus chaudes de la journée, recours aux protections solaires (volets à l'intérieur, situations ombragées à l'extérieur), et/ou recours à la climatisation, etc. [Bonhomme 2014].

Dans le cadre de la présente étude effectuée dans le cadre du projet Adaptatio, des stratégies d'adaptation sont à sélectionner et à tester, en lien avec les deux ressources clé étudiées dans le cadre d'Adaptatio, l'eau et l'énergie, et concernent particulièrement l'organisation spatiale, les formes/dimensions des bâtiments, les matériaux de l'enveloppe, et la végétation. Ces composantes du projet d'aménagement formulées sous forme de scénarios et présentées dans la section ci-dessous, sont évaluées et changées en conséquence dans le cadre du projet Adaptatio, afin d'améliorer des paramètres tels que le confort thermique, les demandes énergétiques (interactions avec le logiciel Clim'Elioth d'Egis à l'échelle du bâtiment), les demandes hydriques, sous climat actuel et sous climat futur modifié.

II.2.2 Scénarios testés dans le cadre d'Adaptatio

La perspective d'un nouveau contexte climatique caractérisé notamment par des épisodes caniculaires plus fréquents, incite à identifier quels paramètres peuvent avoir une influence sur les caractéristiques des îlots de chaleur urbains et ainsi les intensifier. L'étude de Colombert [Colombert, 2008] a permis d'identifier ces paramètres (propriétés radiatives des surfaces, zones vertes-végétales, ou bleues-aquatiques etc.), appelés « **leviers urbains** ». Différents tests de sensibilité ont été menés dans le cadre de la recherche menée par [Colombert, 2008] en modifiant ces leviers pour Paris intramuros, afin de quantifier leur impact sur le climat urbain en hiver et en été. Nous nous sommes appuyés sur cette étude pour élaborer nos scénarios d'études à l'échelle du secteur Tolbiac Chevaleret. Nous faisons l'hypothèse que ces scénarios explorent des possibilités dont la faisabilité technique semble réalisable au vu des développements en cours. Néanmoins, nous indiquons les réserves qui nous paraissent utiles à présenter, afin de ne pas tirer trop rapidement des conclusions sur la base des résultats de simulations qui seront présentés par la suite.

Agir sur les « leviers urbains » modifie l'aspect de la ville; plus « blanche », plus « verte », plus haute, etc. [Colombert, 2008]. Il est à noter que la mise en œuvre de telles mesures visant à réduire l'ampleur de l'îlot de chaleur urbain, nécessite de prendre en compte des paramètres tels que les

performances escomptées, les coûts associés (investissement, entretien), la faisabilité technique, l'acceptabilité par les autorités et les usagers, ainsi que les incidences de ces mesures d'adaptation au CC sur d'autres performances attendues (circulation, consommation d'énergie de chauffage/refroidissement, etc.).

Dans le cadre du projet Adaptatio dans lequel nous utilisons le logiciel Envi-met, comme présenté dans le tableau 1, quatre scénarios sont envisagés pour ces tests de sensibilité:

- un scénario de verdissement où les surfaces végétalisées sont augmentées et arrosées d'une manière optimale (scénario S2),
- un scénario réfléchissant où les propriétés physiques des toits sont modifiées sans toucher aux murs (scénario S3),
- un scénario réfléchissant où les propriétés physiques des surfaces des parois opaques des murs et des toits sont modifiées (scénario S3 bis),
- et enfin, un scénario de surélévation des bâtiments de la ZAC de Tolbiac Chevaleret (scénario S4).

Tableau 1 : Récapitulatif des scénarios retenus pour cette étude

Cas de base (S1)		Eau	Énergie
Végétation (S2)	Végétation maximisée		
Enveloppe (S3 et S3 bis)	Toitures Blanches (réfléchissant)		
	Toitures blanches + murs blancs (réfléchissant)		
Morphologie (S4)	Surélévation de deux étages		

Comme présenté dans le tableau 1, tous les scénarios sont testés afin d'évaluer leur impacts en termes d'énergie. Seul le scénario S2 « végétation maximisée » est testé afin d'évaluer les impacts en termes de besoins hydriques à l'échelle du secteur Tolbiac Chevaleret.

En effet, les scénarios envisagés en lien avec les aspects énergétiques, en référence au cas de base, concernent des solutions d'adaptation en relation avec :

- la morphologie du bâti : une surélévation de deux étages de l'ensemble des îlots
- l'enveloppe du bâti : un changement de la couleur des matériaux de l'enveloppe bâtie avec des toitures blanches et des murs blancs
- la végétation du secteur Tolbiac Chevaleret: une végétation maximale du secteur avec entre autres la mise en place de toitures végétalisées.

En ce qui concerne les besoins hydriques pour l'arrosage des espaces verts, ils sont calculés pour le cas de base (S1) et le cas de « végétation maximisée » (S2). Pour le calcul de ces besoins nous avons défini dans le cadre du projet Adaptatio une méthode simplifiée en se basant sur la « Méthode d'Irrigation Raisonnée » (MIR) mise en place par la Ville de Paris. Notre approche simplifiée est présentée par la suite.

Pour les scénarios d'adaptation au CC définis dans le cadre du projet d'Adaptatio, des précisions sont apportées par la suite.

Cas de base S1

Le cas de base correspond à un cas de référence qui maintient la programmation initiale du secteur Tolbiac Chevaleret. Dans ce cas, nous maintenons notamment la conception architecturale et urbaine et la configuration paysagère de la végétation (promenade plantée, square, arbres d'alignement, etc...). La conception initiale est présentée brièvement ci-dessus et plus en détails dans le livrable 1.3.

Scénario S2 « végétation maximisée »

La variété des solutions végétales pour le milieu urbain est vaste, comme le montre Anquetil (2011) dans l'inventaire qu'elle a dressé dans le cadre du projet VegDUD financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Dans le cadre du même projet, [Bonhomme 2014] répertorie les typologies de végétation les plus fréquemment rencontrées à savoir, les arbres d'alignement, les bois, les parcs, les squares, les terrains de jeux et de sport, les friches, les jardins familiaux, et plus récemment les enveloppes végétales des bâtiments (façades et toitures végétalisées) et les noues végétalisées.

Dans le cadre du projet Adaptatio et notamment du scénario S2, l'objectif est de recouvrir les surfaces concernées de végétation. Les surfaces candidates à un verdissement sont les surfaces de terre, les chaussées et les toitures. On se propose donc ici de verdir toutes les surfaces nues disponibles et de renforcer la végétation existante et répartie entre les promenades plantées, les squares et les espaces verts privés. Comme ça sera présenté par la suite dans la partie dédiée à notre approche simplifiée du calcul des besoins hydriques, dans le cas du projet Adaptatio nous faisons l'hypothèse que le végétal qui est implémenté afin de végétaliser au maximum le secteur, correspond à une culture de référence (gazon). Le verdissement total des surfaces disponibles conduit à une hausse de 71 % de la végétation basse. Ce verdissement inclue une augmentation de 25 % des espaces verts privés, de 23 % de végétation supplémentaire dans les squares et de 23% de végétation supplémentaire dans la promenade plantée. A ce total s'ajoute une 36024 m² ce qui entraîne une hausse supplémentaire de 36% de la surface végétale initiale.

Il s'agit ainsi d'une modification de la végétation de base du secteur Tolbiac Chevaleret, en maintenant la conception architecturale et urbaine initiale, par la mise en place de toitures végétalisées, par le renforcement de la végétation des parcs et de sa densité, par le renforcement des arbres d'alignement et par la création d'espaces verts à l'intérieur des îlots.

Pour résumer, pour le scénario « cas de base », la végétation dans le Secteur Tolbiac Chevaleret est répartie de la manière suivante, pour un total de 26378 m² de végétation:

- square: 6746 m²
- espaces verts privés: 6468 m²
- promenade plantée: 13164 m²

Pour le scénario de « végétation maximisée », la végétation dans le Secteur Tolbiac Chevaleret est répartie de la manière suivante, pour un total de 68996 m² de végétation :

- square: 8432 m²

- espaces verts privés: 8085 m²
- promenade plantée: 16 455 m²
- toitures végétalisées : 36 024 m²

Scénarios S3 et S3 bis « réfléchissants »

Ces scénarios envisagent une modification des propriétés radiatives des matériaux de façades (toits et murs). La valeur de l'albédo est augmentée à des valeurs équivalentes de celles d'un marbre très « blanc ». Les matériaux avec une valeur d'albédo élevée réfléchissent fortement le rayonnement solaire (albédo proche de 1) et ont une émissivité également élevée. Les valeurs élevées d'albédo et d'émissivité modifient le bilan énergétique entre les surfaces modifiées et l'atmosphère. Par conséquent, les surfaces se réchauffent moins et le flux de chaleur, par conduction de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment, est fortement réduit, ce qui limite l'apport d'énergie vers les espaces intérieurs.

L'exécution de ce scénario se fait en deux phases. La première concerne uniquement les murs (S3), alors que la deuxième concerne une modification des toits et des murs (S3 bis). Plus précisément, avec le scénario S3 « Toitures blanches », la conception architecturale et urbaine du secteur Tolbiac Chevaleret ainsi que la configuration paysagère de la végétation, sont maintenues. Seule la couleur des toitures est modifiée en optant pour une couleur blanche avec une valeur d'albédo égale à 0.9. Pour le scénario S3 bis « Toitures blanches et murs blancs », comme pour le scénario S3, la conception architecturale et urbaine du secteur ainsi que la configuration paysagère de la végétation, sont maintenues. Dans ce cas, nous modifions la couleur non seulement des toitures mais des murs également en optant pour une couleur blanche avec une valeur d'albédo égale à 0.9.

Scénario S4 de « surélévation »

Surélever un bâtiment d'un ou de plusieurs niveaux permet d'augmenter la surface habitable sans modifier l'emprise au sol. Elle s'avère souvent l'unique solution en milieu urbain dense, compte tenu de la petite taille, et de l'étroitesse des terrains, du prix du foncier, et de la valeur intrinsèque du bâtiment existant. La surélévation peut être totale ou partielle. La surélévation du bâti induit un changement dans la morphologie urbaine du site ce qui conduit à des modifications des comportements thermiques et solaires. Dans le cas du projet Adaptatio, nous optons pour une surélévation générale de deux étages des bâtiments du secteur Tolbiac Chevaleret. Ainsi, nous modifions le bâti du secteur avec une surélévation et nous maintenons la configuration paysagère de la végétation.

Par la suite, nous présentons les indicateurs définis et considérés dans le cadre du projet Adaptatio afin de quantifier les impacts énergétiques des scénarios définis sur le secteur Tolbiac Chevaleret sous climat présent et sous changement climatique futur.

L'évapotranspiration ; formulation du processus physique et évaluation des besoins hydriques de la végétation ; l'approche suivie dans le cadre du projet Adaptatio

L'évapotranspiration dépend de différents facteurs et notamment des conditions climatiques, des conditions liées au sol et de la végétation.

Dans le cadre de cette partie, nous nous focalisons sur la présentation de la méthode définie dans le cadre du projet Adaptatio pour le calcul de l'évapotranspiration et des besoins hydriques réels de la végétation du secteur Tolbiac Chevaleret sous climat présent et sous changements climatiques futurs, pour les scénarios 'cas de base' (S1) et 'végétation maximisée' (S2).

II.3.1 Calcul de l'évapotranspiration potentielle

Le calcul du taux d'évapotranspiration potentielle dans le cas du projet Adaptatio à l'échelle du secteur Tolbiac Chevaleret, repose principalement sur deux étapes, le recueil des données hydro-climatiques et le choix d'une méthode adéquate de calcul de l'évapotranspiration.

La première étape consiste à recueillir l'ensemble des données de sortie hydro-climatiques issues des simulations numériques effectuées avec le logiciel Envi-Met sur le secteur Tolbiac Chevaleret. Ces simulations nous permettent d'avoir la valeur des facteurs hydro-climatiques ayant une influence sur le phénomène d'évapotranspiration comme présenté auparavant dans le livrable, comme:

- l'ensoleillement (le rayonnement global ; fraction photosynthétique du rayonnement)
- la température des surfaces et de l'air
- l'humidité de l'air (différence de pression de vapeur entre l'environnement et l'intérieur de la plante)
- la force du vent
- la disponibilité en eau du sol.

ENVI-met permet de simuler l'ensemble de ces données climatiques qui contrôlent l'évapotranspiration. Cependant, la version 3.1 d'ENVI-met qu'on dispose actuellement, ne nous permet pas de simuler directement les valeurs d'évapotranspiration.

En effet, ENVI-met fait la distinction entre évaporation et transpiration (<http://pandora.meng.auth.gr/mds/showlong.php?id=184>). La température moyenne des feuilles est calculée en référence au bilan énergétique de la surface des feuilles, par rapport aux conditions physiologiques et météorologiques réelles et les caractéristiques de l'élément végétal. Ce calcul prend en compte la turbulence (chaleur et vapeur) à partir du champ de vent donné et de la géométrie. Le calcul des flux radiatifs prend en considération l'ombrage généré par chaque plante mais aussi les ombres dues à la présence d'autres végétaux. L'échange de chaleur et de gaz entre la végétation et l'atmosphère est contrôlé par l'équilibre énergétique de direction locale de la température de la feuille et par la conductance créée par l'échange de gaz (vapeur et CO₂). Cette conductance est une fonction complexe qui dépend des conditions météorologiques externes ainsi que des plantes et de leur processus physiologiques. ENVI-met utilise un modèle sophistiqué pour simuler le comportement des stomates de la végétation. Pour définir la hauteur et la forme d'une plante, le modèle utilise les fonctions standards normalisées (surface foliaire-profil de densité LAD, zone racinaire- densité profil RAD). 27 types de végétaux sont fournis à l'installation du logiciel avec

des descriptions détaillées sur par exemple la résistance des stomates, la densité du feuillage, etc. (Figure 10).

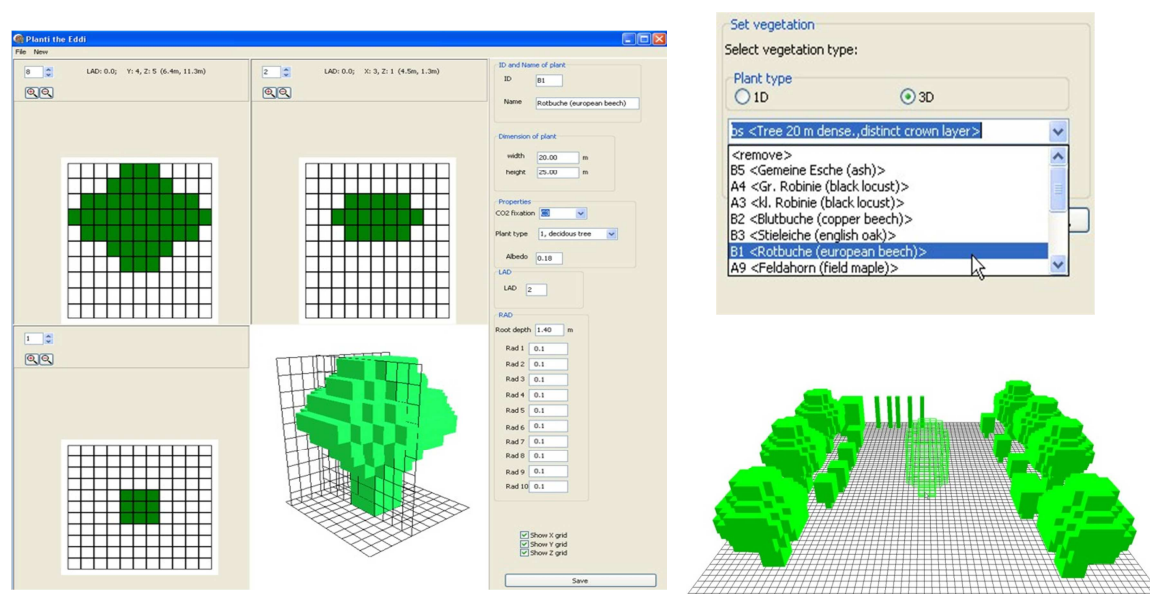


Figure 10 : Représentation de la végétation dans ENVI-met (copies d'écran issues des tests effectués avec le logiciel)

Les plans d'eau sont représentés comme un type particulier de sol. Les procédés calculés pour les plans d'eau comprennent la transmission et l'absorption de rayonnement à ondes courtes à l'intérieur de l'eau. En outre, aucun mélange de turbulents n'est inclus dans le modèle de sorte que l'utilisation est limitée aux eaux statiques (par exemple lacs). Le calcul directement des valeurs d'évapotranspiration sera possible avec la nouvelle version 4.0 du logiciel ENVI-met, actuellement en cours de développement.

Ainsi, nous avons effectué l'analyse bibliographique présentée dans la première partie du livrable afin d'identifier la formule mathématique de calcul de l'évapotranspiration la plus adéquate pour notre projet de recherche en fonction des données de sortie d'ENVI-met disponibles.

Parmi la liste non exhaustive des méthodes présentées, notre choix s'est porté sur la méthode Turc (1961) de calcul empirique de l'évapotranspiration. Ce choix est notamment justifié par la facilité du calcul et la disponibilité des données.

La formule (Turc 1961) est une formule semi-empirique déterminée à partir d'une série de mesures par lysimétrie sur de nombreux bassins versants et de bilans hydrologiques en climat tempéré. La formule est simple d'emploi. En revanche, elle ne permet de prendre en compte l'effet du vent et elle ne peut pas être appliquée à des échelles de temps très réduites (horaire, journalier) (ASCE, 1990)(Brutsaert, W., 1991). Dans le cas de notre étude nous avons sélectionné la formule décadaire car dans le cas de notre méthodologie de calcul des besoins hydriques de la végétation avec la méthode MIR, nous avons procédé par moyenne décadaire pour les simulations durant la période d'arrosage. La formule décadaire est la suivante :

Si l'humidité relative (hr) > 50 % (en moyenne sur la période) :

$$ETP = 0.013 * J * (Rg + 50) * \left(\frac{T}{T + 15}\right)$$

Si l'humidité relative (Hr) < 50 % (en moyenne sur la période) :

$$ETP = 0.013 * J * (Rg + 50) * \left(\frac{T}{T + 15}\right) * \left(1 + \frac{50 - hr}{70}\right)$$

Où :

$$Rg = Iga * (0.18 + 0.62 * h/H)$$

Avec :

- ETP = évapotranspiration potentielle en mm/période
- J = nombre de jours (J>7)
- T = température moyenne sur la période en °C
- hr = Humidité relative de l'air moyenne sur la période en %
- Rg = radiation solaire globale moyenne en cal/cm²/jour (1W/m² = 2.065 cal/cm²/jour)(valeur donnée, dans le cadre de notre étude par le partenaire Egis parmi les données climatiques Météonorm)
- Iga = radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère (cal/cm2/jour)
- h/H = durée réelle d'insolation maximale possible (varie entre 0.1 et 1)

Les valeurs de la variable Iga peuvent être prises du tableau 2.

Tableau 2 : Méthode Turc ; calcul de la variable Iga en fonction de latitude (Valérie Borrell, 2011)

Valeurs d'Iga		
latitude nord	40°	50°
janvier	364	222
février	495	360
mars	673	562
avril	833	764
mai	944	920
juin	985	983
juillet	958	938
août	858	800
septembre	710	607
octobre	536	404
novembre	390	246
décembre	323	180

Une fois le choix de la méthode de calcul de l'évapotranspiration effectué, par la suite nous nous focalisons sur la présentation de l'approche définie dans le cadre du projet Adaptatio pour le calcul de l'évapotranspiration réelle et du déficit hydrique qui correspond aux besoins hydriques de la végétation du secteur Tolbiac Chevaleret.

II.3.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle et des besoins hydriques

Dans la première partie de ce livrable nous avons définis les notions d'**évapotranspiration potentielle et réelle**. La première correspond plus à la perte en eau, par évaporation directe de l'eau du sol et par transpiration d'un couvert végétal dense (gazon de hauteur uniforme), bien développé, en pleine croissance, couvrant totalement le terrain et le sol et surtout bien alimenté en eau. La deuxième correspond plus aux conditions «réelles» avec le sol à son humidité spécifique actuelle/réelle et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire réel. Ainsi, afin de calculer la perte réelle en eau due aux deux processus d'évaporation et de transpiration, nous devons calculer l'évapotranspiration réelle.

Pour cela, comme présenté auparavant, afin de passer de l'évapotranspiration potentielle à l'évapotranspiration réelle, selon [FAO, 1998], nous pouvons utiliser la fonction suivante (Méthode FAO : « Dual Step/ Single Coefficient »):

$$ETR = K_c ETP$$

K_c correspond au coefficient cultural, sa valeur dépend de la nature de la culture, de sa hauteur, de sa durée de cycle, et de son taux de croissance, mais aussi de la fréquence des pluies ou de l'irrigation au début du cycle

Dans le cadre du projet Adaptatio et de notre étude du Secteur Tolbiac Chevaleret, comme présenté dans le livrable 1.3, nous n'avons pas pu obtenir des précisions sur les types de végétation intégrés et/ou planifiés pour intégration. Ainsi, vu également l'absence de possibilité de calculer directement les valeurs de l'évapotranspiration avec ENVI-met, nous avons fait l'hypothèse de la présence d'une « culture de référence » qui correspond à une culture de gazon. Pour cette culture, la valeur du coefficient cultural est égale à 1. Ainsi, nous faisons l'hypothèse que l'évapotranspiration potentielle est égale à la réelle.

Comme présenté dans les sections précédentes, afin de combler ce besoin naturel de la végétation de « perdre » de l'eau pour combler les processus physiologiques d'évaporation et de transpiration, la végétation reçoit des apports naturels en eau comme la précipitation, l'humidité des sols etc. Ces apports peuvent ne pas suffire. Dans ce cas, le manque d'eau correspond à un déficit hydrique, autrement dit un besoin hydrique de la végétation qui peut être satisfait par l'irrigation (Figure 21).

Dans le cas du projet Adaptatio, nous avons défini une approche simplifiée en se basant sur la « Méthode d'Irrigation Raisonnée (MIR) ».

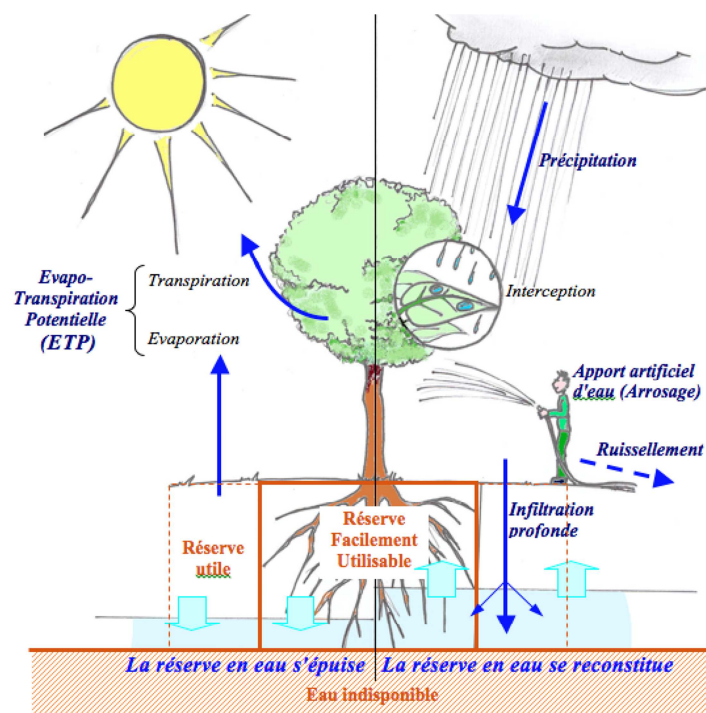


Figure 11 : cycle de l'eau dans le système "sol - plante - atmosphère" Source (Nold, 2010)

Comme présenté dans le manuel de présentation de la méthode MIR [F. Bourdeau et al 2007] que M. Lafont, Chef d'exploitation de la Direction des Espaces Verts et de l'Environnement, nous a communiqué, le végétal n'utilise que l'eau à proximité de ses racines, qui correspond à la Réserve Facilement Utilisable (RFU). Ainsi, le rôle de l'arrosage est de reconstituer cette réserve. Plusieurs facteurs peuvent modifier cette réserve. En effet, en termes d'entrées d'eau, nous avons la précipitation et l'arrosage, et en termes de sorties d'eau, nous avons l'évapotranspiration de la végétation, l'infiltration profonde et le ruissellement. Ainsi, l'arrosage permet d'augmenter les entrées d'eau et de compensant le déficit hydrique.

Comme présenté dans [F. Bourdeau et al 2007], l'arrosage intégré a permis une simplification de la tâche des jardiniers. Cependant, les programmeurs coûteux (technologie "golf"), considérés souvent trop compliqués et mal adaptés, sont souvent délaissés. Afin d'apporter une solution pratique et peu coûteuse, la Direction des Parcs, des Jardins et des Espaces Verts a développé en 1997 un outil de pilotage basé sur les statistiques trentenaires des déficits hydriques des végétaux ainsi que sur une connaissance précise du cycle de l'eau dans le sol et le végétal. Dans le cadre de la méthode MIR les valeurs statistiques de l'évapotranspiration et de la précipitation sont utilisées. Le croisement des courbes de ces deux variables indiquent le début de la période de l'arrosage. Pour les jardins de Paris, la période d'arrosage commence en mai et dure six mois. Plus précisément au sujet des paramètres hydroclimatiques, Météo France (station du Bourget) fourni des valeurs mensuelles mesurées d'évapotranspiration potentielle et de précipitation. Ces valeurs sont intégrées dans le logiciel MIR avec des informations sur les types des sols, les profils racinaires des plantes etc. Le logiciel calcule ainsi les moyennes mobiles des de ces deux paramètres hydroclimatiques sur 30 ans pour chaque mois et ensuite la différence entre les valeurs d'évapotranspiration et de précipitation. Sur la base de ces 'Delta', les variables PVC (Périodicité variable et dose constante) et PCV

(Périodicité Constante et dose variable) sont calculées et utilisées sur le terrain en tant que consignes.

Cet outil a été testé et généralisé sur plusieurs jardins de la Ville de Paris. En 2001, une certaine de jardins de la Ville de Paris suivaient la méthode MIR, répondant aussi à plusieurs enjeux écologiques (résistance des végétaux, économie de la ressource en eau etc.), économiques (réduction de la qualité de déchets verts, réduction de la quantité de carburants utilisés etc.) et organisationnels (programmation prévisionnelle et non plus en temps réel, etc.). La Ville de Paris en appliquant cette méthode sur 48 jardins initialement équipés d'arrosages automatiques, a pu économiser 40543m³ entre 1997 à 2001. Ainsi, à l'inverse des arrosages automatique ou manuel, la méthode MIR permet de suivre une démarche globale dans le cadre de laquelle les besoins réels des végétaux sont analysés, la réserve en eau du sol est suivie, les compétences des hommes sur le terrain mobilisées et les audits des réseaux fréquemment effectués.

Comme présenté ci-dessus, la valeur du déficit hydrique permet de déterminer la quantité d'eau à apporter dans le sol pour la plante. Elle regroupe les entrées et les sorties d'eau naturelles liées au végétale. Selon [F. Bourdeau et al 2007],, pour avoir une valeur la plus réaliste possible, le déficit doit se calculer sur plusieurs jours, d'où la division suivante:

$$\text{Déficit} = \text{ETP} - \text{Précipitation} / \text{nombre de jours}$$

Au sujet des précipitations, nous avons besoins du profil de l'évolution des précipitations sur notre secteur d'étude Tolbiac Chevaleret ainsi que des scénarios de modification des précipitations sous changement climatique futur. Afin d'avoir le profil d'évolution, nous nous basons sur les données mesurées par la station météorologique de Montsouris pour l'année 2010. Au sujet de la projection des modifications des précipitations sous changement climatique, comme il mentionné dans les rapports du Groupement Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), des incertitudes persistent encore sur la magnitude et le signe du changement des valeurs moyennes et sur la fréquence et l'intensité des événements extrêmes liés (inondations etc.), notamment à des échelles spatiales très fines.

Dans le cadre du projet Adaptatio, nous nous basons sur l'étude effectuée par l'Agence Parisienne du Climat (APC), et nous partons sur une baisse de 10% des précipitations entre 2010 et 2050 et une baisse de 10% entre 2050 et 2100. En effet, comme présenté dans l'étude de l'APC, sur la période 1901-2000, on observe une tendance à la hausse des précipitations annuelles avec +11% et une hausse plus marquée en hivers avec +15% qu'en été avec +5%. Cette tendance s'est inversée durant la première décennie du 21^{ème} siècle (2001-2010) qui a été particulièrement sèche avec un déficit de 10% par rapport aux normes climatiques. Pour calculer l'évapotranspiration de référence (ET_o) nous utilisons la formule de Turc. Afin de calculer l'évapotranspiration réelle (ET_R), l'ET_o est corrigée en utilisant le coefficient cultural K_c qui reflète pour la zone à irriguer des paramètres tels que la nature des végétaux, leur rythme de croissance, leur aptitude à couvrir le sol etc. Nous considérons une valeur égale à 1.1.

- <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/1583>
- http://www.meteociel.fr/temps-reel/obs_villes.php?code2=2&jour2=2&mois2=5&annee2=2010&envoyer=OK

- Agence parisienne du climat sur "le changement climatique" <http://www.apc-paris.com/points-de-reperes/le-changement-climatique-a-paris.html> brochure sur le changement climatique pour la consultation de cette information (page 6)

Comme présenté auparavant, le calcul des valeurs d'évapotranspiration potentielle et réelle et des valeurs de déficit hydrique, se fait dans le cadre du projet Adaptatio, pour les scénarios « cas de base » et « végétation maximisée ». Le scénario « cas de base » est considéré comme un cas de référence qui comporte l'ensemble de la programmation architecturale, urbanistique et paysagère actuelle du quartier Tolbiac Chevaleret, avec la végétation présente sur la promenade plantée (13164 m²), le square (6746m²) et les espaces verts privés (6468 m²). Dans le cas du scénario « végétation maximisée », la présence de l'élément végétal est maximisée avec la présence de la végétation sur la promenade plantée (16455m²), le square (8432m²), les espaces verts privés (8085m²) et les toitures végétalisées (36.024m²). Nous considérons que des arbres d'alignement à densité feuillage importante, des pelouses vertes et des toitures végétalisées sont plantés. Les calculs se font pour la période d'arrosage s'étalant du 1^{er} juin au 30 septembre, en suivant la période d'arrosage donnée par la méthode MIR [F. Bourdeau et al 2007].

Enfin, afin de calculer l'évapotranspiration selon la formule de calcul mathématique Turc (1960), il a fallu recueillir l'ensemble des données climatiques d'entrée. Ainsi nous avons eu recours à la simulation via le logiciel ENVI-met pour obtenir des données importantes telles, la température des surfaces, et les valeurs de rayonnement global et d'humidité.

Pour se faire, le logiciel nécessite quelques données d'entrée telles que : la température de l'air, l'humidité relative, ainsi que des données relatives aux jours de simulation, afin de calculer les données climatiques pour la période d'arrosage qui se situe entre le mois de juin et le mois de septembre selon la méthode MIR, période durant laquelle la baisse des précipitations doit être compensée par l'arrosage. Le logiciel ENVI-met ne pouvant pas effectuer des simulations sur quatre mois, il a fallu procéder par des moyennes décennales en subdivisant le mois en quatre semaines, d'autant plus que la formule Turc est favorable au calcul de l'évapotranspiration sur des épisodes décennales.

Modélisation du Secteur d'étude Tolbiac Chevaleret et simulations avec le modèle ENVI-met

II.4.1 Conditions initiales

Comme nous avons pu le constater lors de la lecture des aspects typo-morphologiques du Secteur Tolbiac Chevaleret, ces aspects émanent principalement d'une volonté architecturale et urbanistique des concepteurs, en réponse à des différentes contraintes comme les contraintes physiques, économiques, sociales et environnementales. Néanmoins, comme présenté dans le livrable 1.3 sur le Secteur, le CC et notamment l'adaptation à ces impacts, ne fait pas partie de cet ensemble de contraintes considérées. Dans le cadre du présent livrable sur Envi-met, nous procédons à l'analyse des aspects notamment dimensionnels du Secteur à travers le choix d'indicateurs présentés ci-

dessus, afin de pouvoir effectuer la configuration des simulations avec Envi-met ainsi que l'organisation des données de sortie issues des simulations.

L'évaluation du **confort thermique extérieur** du quartier de Tolbiac Chevaleret est faite par le biais de la simulation numérique. En effet, les outils numériques de simulation sont aujourd'hui suffisamment matures et la souplesse de leur utilisation est bien adaptée pour permettre l'étude des performances thermo-aérauliques de différentes configurations urbaines.

Le modèle ENVI-met 3.1 permet de mener des simulations à l'échelle d'un fragment urbain, voire d'un quartier dans son ensemble. Il propose divers modes de visualisation en 2D qui permettent d'observer dans l'espace et dans le temps, les comportements thermo-aérauliques de la géométrie simulée. L'échelle de temps correspond à des cycles journaliers. Le logiciel permet de simuler plusieurs variables, notamment celles nécessaires aux calculs des indicateurs et de l'évapotranspiration, présentés ci-dessus. Parmi ces variables nous trouvons: la potentialité solaire des enveloppes des bâtiments et leur intensité lumineuse, le facteur de vue du ciel, l'ensoleillement (tracé d'ombre, durée), les différentes composantes du rayonnement solaire (flux direct et diffus incidents, flux infrarouge, inter réflexion), la température de surface,

La géométrie de la zone d'étude simulée doit obligatoirement être modélisée directement avec l'interface graphique du logiciel. Aucune importation de géométries issues de logiciels de dessin D.A.O (Autocad, Gambit, SketchUp...) n'est possible. Avec le logiciel ENVI-met il est possible d'utiliser différentes fonctions qui sont applicables aux géométries modélisés. Parmi ces fonctions nous trouvons les transformations géométriques (translation, rotation, ..), la visualisation des géométries (contexte d'affichage, descripteurs,...), et la simulation des phénomènes physiques liés aux géométries (ensoleillement, rayonnement et température de surface, etc.)

Ainsi, le **modèle 3D maillé** de la géométrie simulée du Secteur Tolbiac Chevaleret, est le suivant:

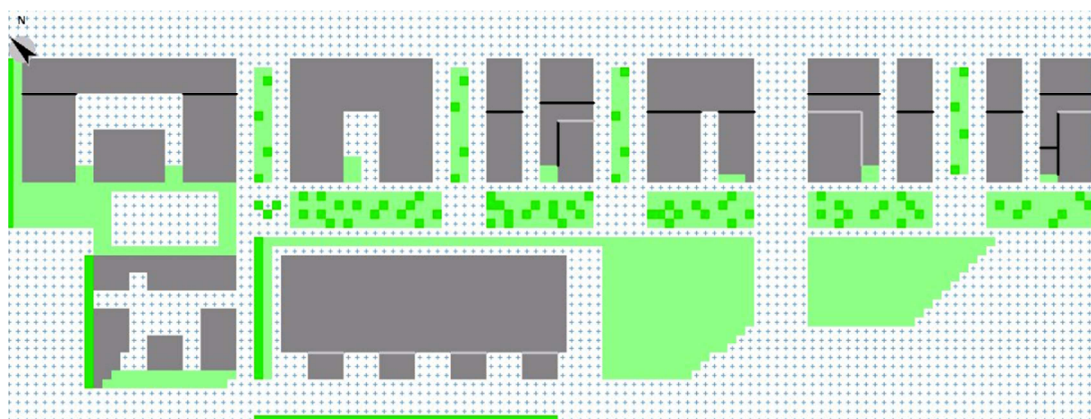


Figure 12 : Modélisation de la ZAC Tolbiac Chevaleret (Cas de base) sur ENVI-met 3.1

Les **informations spatiales et temporelles** renseignés en entrée d'ENVI-met pour le secteur Tolbiac Chevaleret sont les suivantes:

- La localisation du lieu qui est déterminée en précisant la latitude, qui est pour Tolbiac Chevaleret de 48,52 (deg, N+, -S), et la longitude, qui est pour Tolbiac Chevaleret de 2,20 (deg, - O, +E), ainsi que l'orientation du site par rapport au Nord (Figure 22). A noter que

pour intégrer les données concernant le territoire étudié, nous pouvons sélectionner la ville de « Paris », le logiciel détenant les coordonnées géographiques.

- Les caractéristiques solaires (réflexion, émissivité) et physiques des matériaux (capacité thermique, conductance et masse volumique) exprimés à travers les valeurs que nous avons attribué à l'albédo
- Le jour, le mois, l'heure TU (temps universel) du début et de la fin des simulations (de 00h00 à 00h00) qu'on souhaite lancer et le pas de temps auquel ses simulations vont s'effectuées (Tableau 8). Comme présenté dans le tableau 8, les simulations sont lancées pour les années 2010, 2050 et 2100.

Enfin, pour calculer la température de surface en régime transitoire, les conditions météorologiques initiales sont nécessaires. Ces paramètres sont soit des valeurs constantes soit des fichiers transitoires.

Dans le tableau 8 sont présentés les paramètres nécessaires ainsi que les valeurs attribuées pour les simulations lancées avec Envi-Met sur Tolbiac Chevaleret dans le cadre du projet Adaptatio. Les dates correspondent aux deux jours les plus chauds que nous avons choisis pour chaque année respectivement (températures les plus élevées enregistrées) dans le fichier climatique et qu'on a étalé sur une période de 48h (les jours les plus chaud varient pour chaque année). Les jours les plus chauds ont été déterminés en calculant les moyennes journalières. Les valeurs de température, d'humidité relative et de rayonnement global, représentent des moyennes journalières. Durant les 48h de simulations, des enregistrements sont effectués avec un pas de temps de 3h de 00h-24h pour chaque journée. De la même manière, comme ça sera présenté par la suite, les résultats sont présentés toutes les 3hrs:

Tableau 3 : Récapitulatif des données générales d'entrée pour la simulation ENVI-met du Secteur Tolbiac Chevaleret

	2010	2050 (2a)	2100 (2a)
Jour de la simulation	10/07/2010 11/07/2010	21/07/2050 22/07/2050	19/08/2100 20/08/2100
Durée de la simulation	48h	48h	48h
Pas de temps	3h	3h	3h
Température (°C)	28°	30°	33°
Humidité relative (%)	56	59	71
Rayonnement global (W/m2)	282	291	282

Par la suite, vu que nous avons sélectionné les journées les plus chaudes, nous présentons la température de départ et les conditions d'ensoleillement, en nous basant sur les informations communiquées pour la station Montsouris dans les fichiers climatiques. Sur la base de ces informations, les courbes sont tracés en 2010, 2050 et 2100 avec un pas de temps horaire.

La température de départ

Dans le graphique suivant, nous avons tracé l'évolution de la température de l'air mesurée au niveau de la station météorologique Montsouris. Les courbes sont tracées pour les journées du 10/07/2010,

du 21/07/2050 et du 19/08/2100. Ces journées sélectionnées correspondent à des journées d'épisodes caniculaires (températures les plus élevées enregistrées).

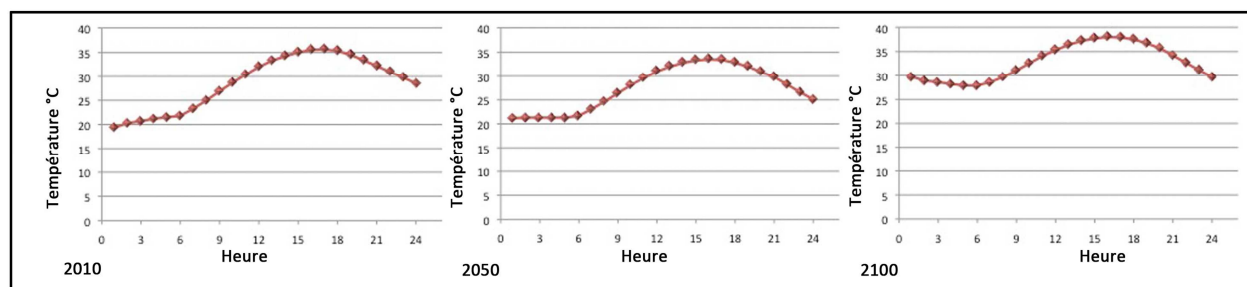


Figure 13 : Evolution de la température de l'air correspondant aux jours de simulation retenus pour cette étude pour les années 2010, 2050, et 2100

Pour les trois années de simulation (figure 13), nous observons les valeurs de températures de l'air suivantes:

- Pour l'année 2010, la température maximale est de 33.3 °C à 15h00 et la température minimale est de 21.2 °C à 00h00. La température moyenne sur l'ensemble de la journée est de 28 °C.
- Pour l'année 2050, la température maximale est de 35.6 °C à 17h00 et la température minimale est de 19.4 °C à 00h00. La température moyenne sur l'ensemble de la journée est de 30 °C.
- Pour l'année 2100, la température maximale est de 38 °C à 16h00 et la température minimale est de 27.9 °C à 05h00. La température moyenne sur l'ensemble de la journée est de 33 °C.

Les conditions d'ensoleillement

Les dates retenues pour les années 2010, 2050, 2100 sont caractérisées par une condition de ciel clair et un très fort niveau d'ensoleillement, comme peut l'attester l'évolution du rayonnement global au niveau de la station météorologique Montsouris:

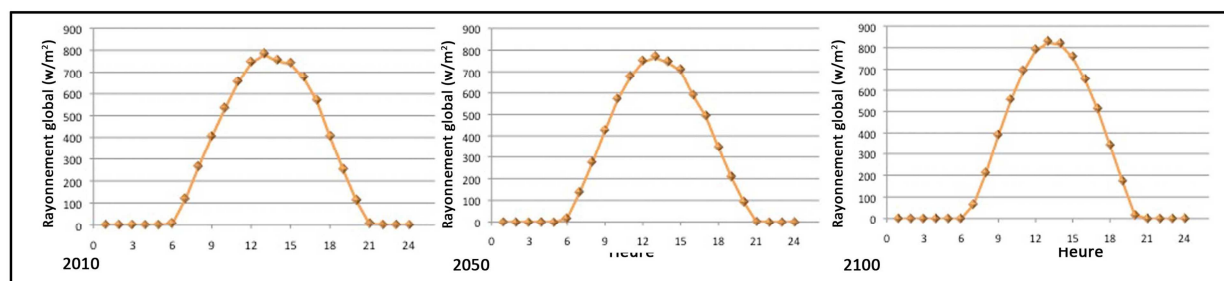


Figure 14 : Valeurs de rayonnement global correspondant aux jours de simulation retenus pour cette étude pour les années 2010, 2050, 2100

Pour les trois années de simulation, nous observons les valeurs de rayonnement global suivantes:

- Pour l'année 2010, le rayonnement global maximum est de 800 W/m² à 13hr
- Pour l'année 2050, le rayonnement global maximum est de 780 W/m² à 12hr30

- Pour l'année 2100, le rayonnement global maximum est de 810 W/m² à 12h30

II.4.2 Donnée d'entrées climatiques

Dans le cadre de notre collaboration avec Egis-Elioth pour le projet Adaptatio, des échanges ont été effectués afin de faciliter le déroulement des simulations avec le logiciel Clim'Eloth (à l'échelle du bâtiment, simulations réalisées par Egis) et avec le logiciel ENVI-met (à l'échelle du quartier, simulations réalisées par l'EIVP). Le logiciel de simulation Envi-met ne comporte pas des données météo et ne prend également pas en charge un fichier météo. Ainsi, Egis-Elioth a contribué en nous fournissant des données Météo sur le site en question –Tolbiac Chevaleret –.

La source de ces données est Meteonorm. Meteonorm donne accès à un catalogue de données météorologiques du monde, utiles pour diverses applications, grâce à un réseau de plus de 8325 stations météorologiques à travers le monde (Source : <http://meteonorm.com>).

Le fichier fourni par Egis-Elioth comporte des données pour les paramètres climatiques suivants :

- rayonnement global (Rg)
- température de l'air ambiant (Ta)
- humidité relative (RH)

Le fichier affiche les données sous forme de tableau sur une année, jour par jour et heure par heure. Le tableau 4 présente un extrait (données de température, d'humidité relative, de rayonnement global d'une année, jour par jour et heure par heure) pour la station météorologique de Paris-Montsouris⁴.

Tableau 4 : extrait du fichier Meteonorm

Paris/Montsouris					
48,817	2,333	75	1		
dy	h	hy	Ta	G_Gh	RH
1	1	1	11,3	0	84
1	2	2	11,5	0	72
1	3	3	11,3	0	71
1	4	4	11,1	0	71
1	5	5	11	0	70
1	6	6	10,9	0	72
1	7	7	10,8	0	71
1	8	8	10,7	0	70
1	9	9	10,7	0	71

Enfin, nous pouvons noter que le logiciel Envimet ne comporte pas une base de données météorologiques ainsi le seul moyen pour les intégrer est de les saisir manuellement.

⁴ Les coordonnées de la station météorologique de Paris-Montsouris sont les suivantes (source : <http://www.infoclimat.fr>) : Indicatifs : 07156, LFPW ; Département : 75 Paris ; Altitude : 75 mètres ; Coordonnées : 48,82°N | 2,34°E ; Début des archives : 9 décembre 1983 ; Fuseau horaire : Europe/Paris ; Type de station : METAR/SYNOP.

II.4.3 Configuration de la simulation

La configuration de la simulation sur ENVI-met est une étape prépondérante de l'analyse. Le fichier de configuration doit contenir l'ensemble des caractéristiques du modèle, aussi bien en données d'entrée qu'en résultats escomptés en données de sortie. Ainsi, l'onglet configuration se présente comme une fiche sur laquelle sera prescrit l'ensemble des consignes relatives à la simulation, et fera l'objet d'un référentiel au lancement de la simulation et aussi dans la gestion et l'organisation des fichiers de sortie. Le fichier de configuration (un fichier par scénario et par date de simulation) contient les informations suivantes :

1. Gestion du fichier d'enregistrement : dans cette partie, il est indispensable de mentionner le fichier source du modèle fichier.IN et son emplacement, ainsi que les liens vers le dossier qui accueillera les données de sortie
2. Gestion de la simulation: définition de la durée, le pas de temps, le(s) jour(s), la température de l'air, l'humidité relative, ...Les valeur de ces paramètres sont présentées ci-dessus.
3. Propriétés des bâtiments : définition de l'albédo des murs et des toitures, et de la température intérieur (valeur par défaut).
4. Configuration du sol : définition de la nature du sol (pelouse pour les espaces végétalisées, un sol par défaut pour le restant des surfaces).
5. Les limites du modèle: prise en considération des phénomènes limitrophes par effet de symétrie.

<pre>! ----- MAIN-DATA Block ----- Name for Simulation (Text): = cas de base 2100 Input File Model Area = C:\Users\Calcul\Desktop\model_tolbiac_base.in Database name for Output (Text): = Cas de base Output Directory: = C:\Users\Calcul\Desktop\2100\output_simulations\Cas de base Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY): = 19.08.2100 Start Simulation at Time (HH:MM:SS): = 00:00:00 Total Simulation Time in Hours: = 48.00 Data Model State each ? min: = 100 Wind Speed in 10 m ab. Ground (m/s): = 9 Wind Direction (0°N, 90°E, 180°S, 270°W.): = 58 Roughness Length 20 m at Reference Point = 0.1 Initial Temperature Atmosphere (K) = 306.150 Specific Humidity in 2500 m (g Water/kg air) = 7 Relative Humidity in 2a (h) = 72 Database Plants = (input)\Plants.dat (... End of Basic Data ...) (-- Following: Optional data. The order of sections is free. --) (-- Missing Sections will keep default data. --) (Use "Add Section" in ConfigEditor to add more sections) (Only use "+" in front of the final value, not in the description) (This file is created for ENVI-met V9.0 or better) [SOILDATA] Settings for Soil Initial Temperature Upper Layer (0-20 cm) (K)=300 Initial Temperature Middle Layer (20-50 cm) (K)=300 Initial Temperature Deep Layer (below 50 cm) (K)=300 Relative Humidity Upper Layer (0-50 cm) = 60 Relative Humidity Middle Layer (20-50 cm) = 70 Relative Humidity Deep Layer (below 50 cm) = 70 [SETTINGS] Update & Save Intervals Update Surface Data each ? sec = 30.0 Update Wind field each ? sec = 900 Update Radiation and Shadows each ? sec = 600 Update Plant Data each ? sec = 600 [TURBULENCE] Options Turbulence Model Turbulence Closure ABL (0:diagm.,1:promos.) = 1 Turbulence Closure 3D Model (0:diag.,1:prop) = 2 Upper Boundary for a-epsilon (0:clad.,1:op.) = 0 [BUILDING] Building properties Inside Temperature (K) = 298 Heat Transmission Walls (W/m²K) = 1.94 Heat Transmission Roofs (W/m²K) = 0.279 Albedo Walls = 0.2 Albedo Roofs = 0.2 [PLANTMODEL] Settings for plant model Pecanata res. approach (1=Deardorff, 2=A-gs) = 2 Background C3F concentration (ppm) = 250 [NESTINGAREA] Settings for nesting Use aver. solar input in nesting area (0:n,1:y) = 1 Include Nesting Grids in Output (0:n,1:y) = 0 [NESTING] Settings for nesting Number of Nesting Grids = 8 Soil profile "A" for mesoscale Nesting = "s" Soil profile "A" for mesoscale Nesting = "p" Include Nesting Grids in output (0:n,1,y) = 1</pre>	Informations générales sur le modèle Les dates, la température de départ, l'humidité et l'emplacement du fichier source et le fichier de réception des données varient selon le scénario considéré. La durée de la simulation le pas de temps, l'orientation est commune à toutes les simulations Propriétés du sol (Informations communes entre les scénarios) Propriétés des bâtiments Température intérieure commune à l'ensemble des scénarios Propriétés radiatives des murs et des toits communes à tous les scénarios sauf le cas réfléchissant des murs blancs et toits blancs dont l'albédo atteint la valeur 0.8 Limites du modèle Définition des effets climatiques dans les zones environnantes du bloc modélisé
---	--

Figure 15: Fiche descriptif pour la configuration de la simulation sur ENVI-met 3.1

III Résultats sur la ZAC Tolbiac Chevaleret

Comme présenté ci-dessus, les 5 scénarios suivants ont été définis et testés pour le secteur Tolbiac Chevaleret, aux horizons temporels 2010, 2050 et 2100 :

- Cas de base (CB)
- Cas de végétation maximisée (VM)
- Cas de surélévation/morphologie (densité) (SE)
- Cas des toitures blanches et murs blancs/enveloppe - façades (TBMB)
- Cas des toitures blanches/ enveloppe - toitures (TB)

Les calculs sont effectués pour le jour caniculaire sélectionné respectivement pour 2010, 2050, 2100.

Pour la Ta et la Hr (données d'entrée issues de Meteonorm), des moyennes par semaine ont été réalisées et ont été rentrées comme données d'entrée dans le logiciel ENVI-met.

Tableau 5 : Récapitulatif des scénarios testés dans le cadre du projet Adaptatio

Scénarios	Eléments	Paramètres d'entrée		Données de sortie			
		Géométriques	Climatiques	Energie		Eau	
				Sortie envi-met	Indice	Sortie envi-met	Indice
I. Cas de base (CB, S1)	Programmation de base	- maintien de la conception architecturale et urbaine - maintien de la programmation paysagère de la végétation •	• Ta • HR	• Ta • HR • Ws • FVC bâtiment + végétal • Rg •	Confort	• HR • Ts • Rg	Evapotranspiration
		Descripteurs d'entrée : -Ds (valeur identique pour scénarios CB, VM, TBMB, TB) -C (valeur identique pour scénarios CB, SE, VM, TBMB, TB) -FVC (valeur identique pour scénarios CB,					

		TBMB, TB) -Ds de base -C de base -M modifié -FVC modifié					
II. Végétation maximisée (VM, S2)	Végétation maximale	- Maintien de la conception architecturale et urbaine - Renforcement de la végétation	• Ta • HR	• Ta. • HR • Ws • FVC bâtiment + végétal	Confort	• HR • Ts • Rg	Evapotranspiration
		Descripteurs d'entrée : -Ds (valeur identique pour scénarios CB, VM, TBMB, TB) -C (valeur identique pour scénarios CB, SE, VM, TBMB, TB) -FVC -M -Ds de base -C de base -M modifié FVC modifié					
III. Morphologie (SE, S4)	Densité (surélévation)	- Maintien de la conception architecturale et urbaine de la ZAC - Surélévation de la hauteur du bâti de deux étages - Maintien de la programmation paysagère de la végétation	• Ta • HR	• Ta • HR • Ws • FVC bâtiment + végétal	Confort		
		Descripteurs d'entrée : - Ds - -C (valeur identique pour scénarios CB, SE, VM, TBMB, TB) - FVC - Ds modifié - C modifié - M modifié - FVC modifié -					

IV. Enveloppe (TBMB, S3 bis)	IV.1. Toitures et Façades	- Maintien de la conception architecturale et urbaine - Modification de la couleur des façades (couleur blanche-albédo 0.7) Modification de la couleur des toitures (couleur blanches-albédo 0.9) Maintien de la programmation paysagère de la végétation	• Ta • HR	• Ta • HR • Ws • Rg • FVC bâtiment	Confort		
		Descripteurs d'entrée : -Ds (valeur identique pour scénarios CB, VM, TBMB, TB) -C (valeur identique pour scénarios CB, SE, VM, TBMB, TB) -FVC (valeur identique pour scénarios CB, TBMB, TB) -Ds de base -C de base -M de base FVC de base					

IV. Enveloppe (TB, S3)	IV.1. Toitures	- Maintien de la conception architecturale et urbaine - Modification de la couleur des toitures uniquement (couleur blanches-albédo 0.9) - Maintien de la programmation paysagère de la végétation	• Ta • HR	• Ta • HR • Ws • FVC bâtiment • Ts	Confort		
		Descripteurs d'entrée : -Ds (valeur identique pour scénarios CB, VM, TBMB, TB) -C (valeur identique pour scénarios CB, SE, VM, TBMB, TB) -FVC (valeur identique pour scénarios CB, TBMB, TB)					
		-					

A titre d'exemple, pour le scénario «végétation maximisée», nous retenons parmi les sorties des simulations avec Envimet la température de l'air, la température des surfaces, le rayonnement global, l'humidité et la vitesse du vent, qui constituent des données climatiques utiles notamment pour le calcul de l'évapotranspiration. Dans le cas de ce scénario, le facteur de vue du ciel n'est pas modifié, les valeurs de la densité et la compacité également ne changent pas, alors que la minéralisation est modifiée et, comme mentionné précédemment, le taux d'évapotranspiration est calculé.

Descripteurs d'entrée, sorties Envi-met et indices énergie et eau

Comme présenté ci-dessus dans le tableau récapitulatif, les descripteurs d'entrée permettent de déterminer les propriétés géométriques du quartier de Tolbiac-Chevaleret :

- La Densité Ds exprime le rapport entre les surfaces bâties par une hauteur moyenne rapportée à la surface totale de l'îlot
- La Compacité (C) traduit les surfaces exposées de l'enveloppe rapportées au volume bâti.
- La minéralisation (M) calcule les surfaces non-destinées au minéral et au végétal par rapport à la surface totale du quartier.

- Le Facteur de Vue du Ciel (FVC) rapporte la part de ciel visible.

Concernant les sorties du logiciel ENVI-met nous avons :

- La température ambiante de l'air T_a (°C)
- La température des surfaces T_s (°C)
- La vitesse du vent W_s (m/s)
- L'humidité relative H_r (%)

Enfin, concernant les indices, pour l'énergie nous avons le confort thermique estimé sur la base de :

- La température ambiante de l'air T_A (°C)
- L'humidité relative H_R (%)
- La Vitesse du vent W_s (m/s)

Pour l'eau nous avons l'évapotranspiration calculée avec la méthode Turc en utilisant :

- La température des surfaces T_s (°C)
- L'humidité relative H_R (%)
- Le rayonnement global R_g (W/m²)

Les données de sortie sont organisées sous forme d'un tableau de synthèse permettant une vision globale de l'ensemble des résultats des indicateurs sélectionnés et des besoins hydriques correspondant à chaque scénario testé. En effet, il comporte d'une part les résultats de calculs empiriques des descripteurs de l'espace urbain à caractèrespatio-temporel, morphologique et optique (matériaux) et d'autre part, les résultats recueillis par le biais des simulations effectuées avec ENVI-met 3.0 et traités par le programme LEONARDO.

Tableau 6: Résultats des simulations via ENVI-met 3.0

		Temp. De l'air T_a (°C)	Rayonnement global R_g (w/m ²)	Humidité relative H_R (%)	Vitesse du vent W_s (m/s)	Facteur de vue du ciel FVC (%)	Compacité C (sans unité)	Densité D (sans unité)	Minéralisation M (%)
2010	CB	28,9	296	63	1,8	53%	10,23	0,37	69%
	VM	28,7	291	64	1,3	32%	10,23	0,37	53%
	TBMB	28,9	287	60	1,4	53%	10,23	0,37	53%
	TB	28,9	289	62	1,4	53%	10,23	0,37	53%
	SE	28,8	274	61	1,4	38%	10,23	0,41	53%
2050	CB	30,4	301	63	1,5	53%	10,23	0,37	69%
	VM	29,7	289	62	1,5	32%	10,23	0,37	53%
	TBMB	29,4	297	58	1,5	53%	10,23	0,37	53%
	TB	29,6	299	63	1,4	53%	10,23	0,37	53%
	SE	29,9	303	63	1,6	38%	10,23	0,41	53%
2100	CB	31,9	270	68	1,6	53%	10,23	0,37	69%
	VM	31,3	298	66	1,6	32%	10,23	0,37	53%
	TBMB	31,2	301	66	1,6	53%	10,23	0,37	53%
	TB	31,5	296	66	1,5	53%	10,23	0,37	53%
	SE	31,6	289	67	1,4	38%	10,23	0,41	53%

Résultats

Les données de sorties ENVI-met sont sauvegardées dans un fichier dont le nom et l'emplacement sont déterminés au moment de la création du fichier de configuration (.cf). Une fois la simulation achevée, ENVI-met mentionne à la fin de la feuille de calcul que la simulation est terminée. Nous pouvons ainsi parcourir le fichier et extraire les données souhaitées en passant par Leonardo.

Pour chaque scénario, nous avons des résultats correspondant à la journée de simulation choisie et le pas de temps préétabli. Les résultats extraits sont principalement graphiques, avec une vue en plan sur le modèle, à partir duquel on peut effectuer une coupe horizontale ou transversale en se référant à l'axe (o,x,y,z) pour déterminer le niveau souhaité par rapport au niveau du sol 0.

La lecture de l'affichage est assez simple et se fait de la même façon que la lecture d'une carte géographique ; nous avons d'une part le plan (coupe horizontale) à gauche de l'affichage et la légende qui lui correspond à droite. La mise en liaison de ces deux éléments se fait par le biais d'un code chromatique présent sur le plan et sur la légende avec un gradient de couleur qui représente les valeurs de la plus basse à la plus élevée pour la température, l'humidité relative et la direction du vent. Ce qui est important à noter est le fait d'avoir une représentation graphique de la répartition du paramètre analysé ce qui permet d'analyser les points de concentration ou de dissipation d'un phénomène climatique dans la géométrie du site. Les graphes sont présentés en annexe. Par la suite, les données chiffrées sont représentées sous formes de graphiques pour mettre en exergue les différents écarts. Pour cette étude, nous avons retenus principalement trois paramètres climatiques à simuler pour le confort thermique : température de l'air, vitesse du vent et humidité relative.

III.2.1 Température à 2m

Cette section est dédiée à l'analyse des températures à 2m, paramètre climatique qui désigne la température de l'air à 2m du sol. Cette définition permet de constituer une idée sur la variation de la température de l'air à une échelle appropriée pour l'évaluation du confort thermique des individus. D'autres paramètres climatiques ont également été mesurés à la même hauteur, l'humidité relative et la vitesse du vent, pour mieux appréhender la notion de confort thermique en croisant ces trois paramètres. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la température, un paramètre avec des valeurs très variables et significatives. Quand on fait référence au changement climatique, souvent on utilise la température comme principal indice car il s'agit du paramètre le plus perceptible par l'individu qui exprime son ressenti par rapport au changement climatique.

Par la suite, nous présentons les résultats obtenus avec ENVI-met pour chaque scénario, pour ensuite croiser ces résultats obtenus pour les différents scénarios et déceler les écarts qui peuvent subsister entre scénarios. Ensuite, afin de comprendre ces variations, nous présentons également les valeurs de l'humidité relative et de la vitesse du vent, afin de tenter de démontrer les interactions entre ces trois paramètres climatiques.

Températures journalières

En 2010, 2050 et 2100 la température de l'air évolue de la façon suivante pour les cinq scénarios : (CB, S1) (VM, S2) (TB, S3) (TBMB, S3bis) (SE, S4)

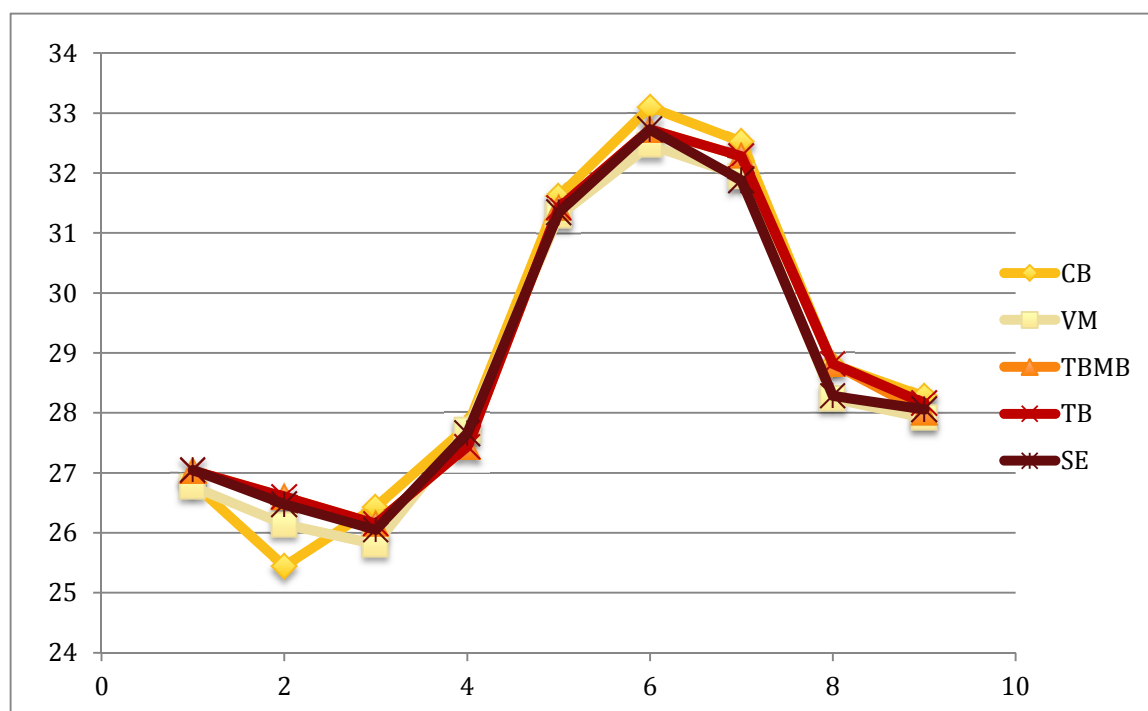


Figure 16 : Evolution journalière de la température (°C) à 2m pour la journée de 2010 (1 point toutes les 3h entre 0h et 24h) pour les différents scénarios

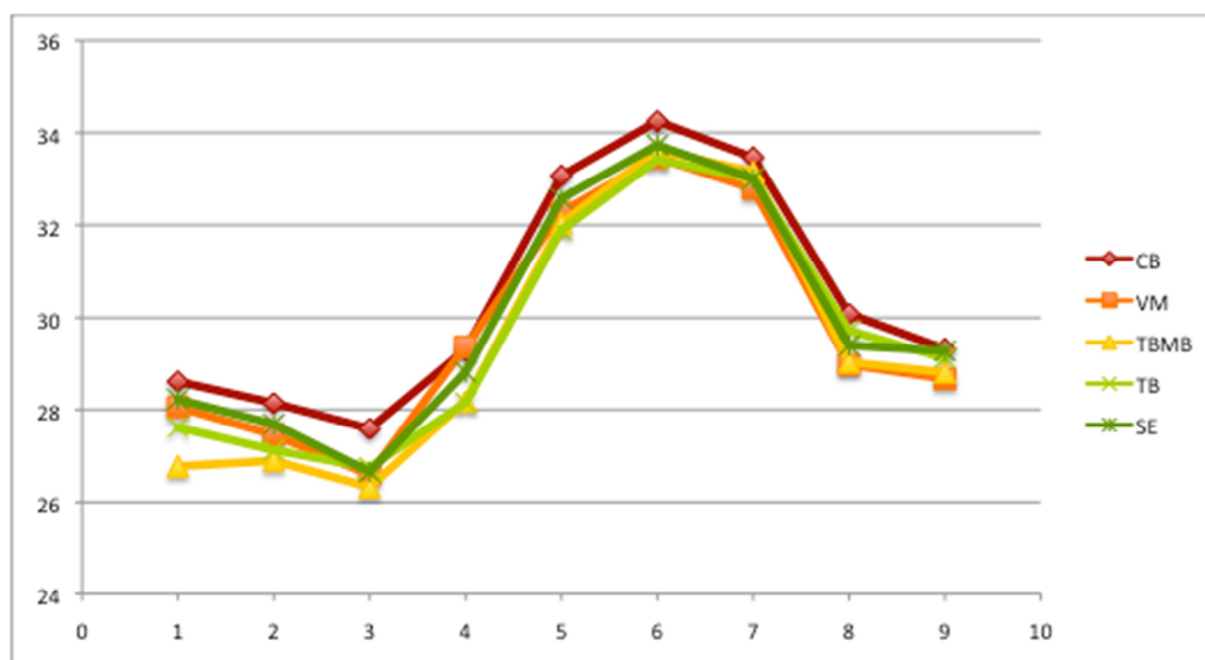


Figure 17: Evolution journalière de la température (°C) à 2m pour la journée de 2050 (1 point toutes les 3h entre 0h et 24h) pour les différents scénarios

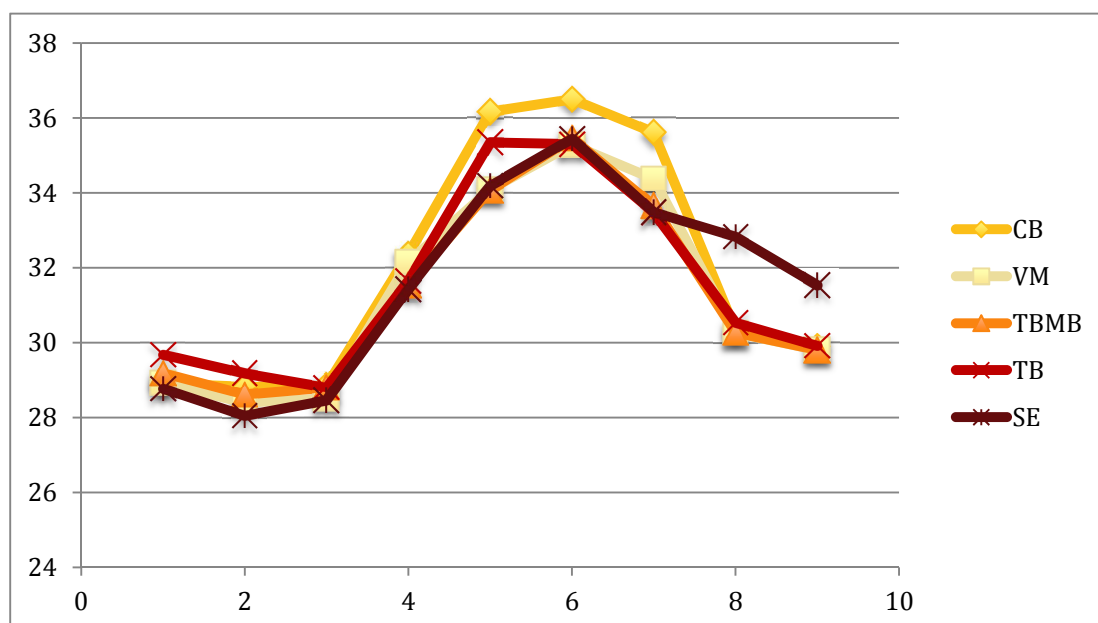


Figure 18: Evolution journalière de la température (°C) à 2m pour la journée de 2100 (1 point toutes les 3h entre 0h et 24h) pour les différents scénarios

Une coupe générale sur la ZAC Tolbiac Chevaleret à 2m démontre le cycle quotidien de température à l'échelle du quartier. Nous pouvons noter les premières conclusions. L'impact des scénarios 'toitures blanches' (TB, S3) et 'toitures blanches et murs blancs' (TBMB, S3Bis) est légèrement inférieur au degré en journée. L'impact de ces scénarios (TB, S3) et (TBMB, S3Bis) est important la nuit, grâce à la modification de l'émissivité des matériaux. L'impact du scénario 'végétation maximisée' (VM, S2) est maximal en journée (de 2 à 2,5 °C) à cause du rôle évaporatif de la végétation. L'impact du scénario « surélévation » est nul le soir.

Températures verticales

Dans le cadre de nos échanges avec Egis et le modèle Clim'Elioth (échelle du bâtiment), avec le logiciel Envi-met, nous avons réalisé des simulations de la température de l'air Ta pour les différents niveaux des bâtiments du Secteur Tolbiac Chevaleret (du RDC à R8 pour tous les scénarios et à R10 pour le scénario de surélévation), pour les 4 orientations, est, ouest, sud, nord. A titre d'exemple, nous présentons les résultats obtenus en 2050 pour les cinq scénarios.

Températures verticales par orientation et par niveau					Cas de base				
Données d'entrée ENVI-met									
Année : 2050									
Température moyenne: 30°									
Rayonnement global: 291 w/m²									
Humidité relative: 59 %									
Jour de simulation :21/07/2050 - 22/07/2050									
ENVI-met 3.0									
Cas de végétation maximisée					Cas toits blancs				
	EST	OUEST	SUD	NORD		EST	OUEST	SUD	NORD
RDC	30,72	30,67	29,52	28,12	RDC	31,84	31,79	30,64	30,44
R+1	30,93	30,88	29,73	28,33	R+1	31,96	31,91	30,76	30,56
R+2	31,38	31,33	30,18	28,78	R+2	32,14	32,09	30,94	30,74
R+3	31,83	31,78	30,63	29,23	R+3	32,32	32,27	31,12	30,92
R+4	32,24	32,19	31,04	29,64	R+4	32,49	32,44	31,29	31,09
R+5	32,68	32,63	31,48	30,08	R+5	32,67	32,62	31,47	31,27
R+6	33,13	33,08	31,93	30,53	R+6	32,84	32,79	31,64	31,44
R+7	33,48	33,43	32,28	30,88	R+7	33,02	32,97	31,82	31,62
R+8	33,73	33,68	32,53	31,13	R+8	33,28	33,23	32,08	31,88
Cas de surélévation					Cas de Toits blancs et murs blancs				
	EST	OUEST	SUD	NORD		EST	OUEST	SUD	NORD
RDC	31,83	31,78	30,63	30,43					
R+1	31,95	31,9	30,75	30,55					
R+2	32,13	32,08	30,93	30,73	RDC	31,95	31,9	30,75	30,55
R+3	32,31	32,26	31,11	30,91	R+1	32,07	32,02	30,87	30,67
R+4	32,48	32,43	31,28	31,08	R+2	32,25	32,2	31,05	30,85
R+5	32,66	32,61	31,46	31,26	R+3	32,43	32,38	31,23	31,03
R+6	32,83	32,78	31,63	31,43	R+4	32,6	32,55	31,4	31,2
R+7	33,01	32,96	31,81	31,61	R+5	32,78	32,73	31,58	31,38
R+8	33,27	33,22	32,07	31,87	R+6	32,95	32,9	31,75	31,55
R+9	33,46	33,38	32,26	32,05	R+7	33,13	33,08	31,93	31,73
R+10	33,53	33,38	32,28	32,07	R+8	33,39	33,34	32,19	31,99

Nous pouvons constater que l'impact des scénarios est différent:

- le scénario toitures blanches (TB, S3) et toitures blanches et murs blancs (TBMB, S3 bis) a un impact jour et nuit puisqu'on joue sur le rayonnement, à la fois dans le domaine visible et dans le domaine infrarouge. Notamment, le scénario (TBMB, S3bis) a un impact sensible le long de la verticale étant donné que ce scénario implique des modifications au niveau des murs et des toits donc sur toute la hauteur de la canopée urbaine.
- le scénario végétation maximisée (VM, S2) a un impact principalement le jour avec l'activité de la végétation arrosée, mais qui diminue avec l'altitude (puisque la végétation est principalement basse ou de moyenne hauteur).
- le scénario surélévation (SE, S4) a un impact important principalement le jour avec la hauteur importante du bâti. Cette efficacité diminue en soirée voir s'annule à cause de l'énergie emmagasinée la journée et qui est restituée le soir.

La variation des propriétés radiatives des parois opaques du bâti du Secteur Tolbiac Chevaleret (murs et toitures), dans l'objectif d'avoir un quartier plus «réfléchissant» a un impact relativement important : 1 °C de moins en moyenne avec 2 °C au maximum dans les parties densément construits.

Le verdissement du quartier n'a un impact que si la végétation est maintenue dans un état permettant l'évapotranspiration (en l'absence de stress hydrique). Avec l'arrosage nécessaire, on obtient ainsi un impact très important en journée (1 à 3 °C sur toute la durée de l'épisode).

La surélévation du bâti du Secteur Tolbiac Chevaleret procure une réduction de 1°C en moyenne sur la durée de l'épisode caniculaire, notamment en journée. Cette réduction est due à la hauteur du

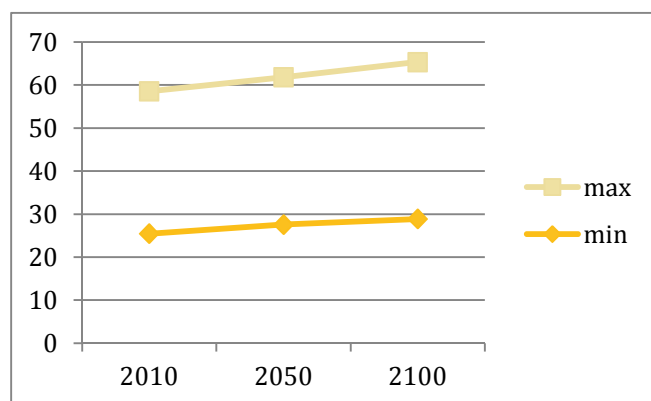
bâti qui agit sur le Facteur de Vue du Ciel (FVC) et ainsi sur la réception des rayonnements solaires dans les niveaux bas des bâtiments. Cependant le scénario n'a aucune efficacité en soirée, voire même le scénario a un impact négatif à cause du ralentissement du processus de restitution de l'énergie emmagasinée provoqué par la hauteur.

Les sorties Envi-Met sur les températures verticales ont été demandées par Egis afin d'établir une comparaison entre les températures à l'intérieur des bâtiments modélisés par leur logiciel Clim'Elioth (logiciel à l'échelle du bâtiment) et les températures à l'extérieur des bâtiments qui correspondent aux températures verticales modélisées avec Envi-met (logiciel à l'échelle du quartier). Cette variation de température permet, selon les différents scénarios, de déterminer les échanges entre le bâtiment et son environnement. Ainsi, cela permet de vérifier l'impact des solutions telles que la surélévation du bâti ou le choix d'un matériau réfléchissant sur les températures à l'intérieur des bâtiments.

Températures minimales et maximales

Cas de base (CB, S1)

	2010	2050	2100
min	25,44	27,58	28,85
max	33,1	34,25	36,5

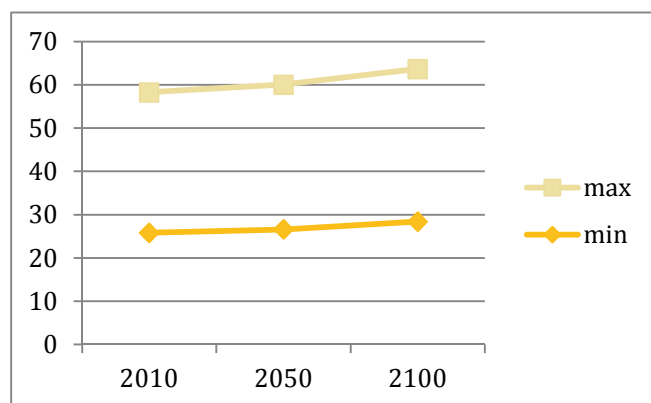


Les températures calculées pour le cas de base qui représente le cas de référence, permettent de constituer une base pour établir une comparaison avec les autres scénarios. La température la plus basse est de 25,44°C à 6h du matin en 2010, et elle augmente progressivement pour atteindre 27,58°C à 6h en 2050, marquant un écart de 2,14°C entre 2010 et 2050. L'augmentation se poursuit et atteint 28,85°C à 6h du matin en 2100, marquant ainsi un écart de 1,27°C entre 2050 et 2100, soit un écart total entre 2010 et 2100 de 3,41°.

Les températures maximum sont constatées à 15h pour les trois années retenues pour cette étude (2010, 2050 et 2100). Cette hausse s'est effectuée progressivement ; 33,1°C en 2010, 34,5°C en 2050 et 36,5°C en 2100, soit un écart de 1,15°C entre 2010 et 2050, de 2,25°C entre 2050 et 2100, ainsi un écart total entre 2010 et 2100 de 3,4°.

Cas de végétation maximisée (VM, S2)

	2010	2050	2100
min	25,81	26,59	28,4
max	32,47	33,46	35,28

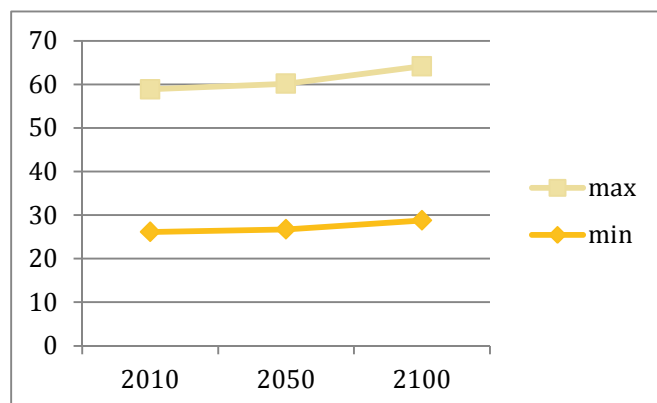


Pour le scénario de végétation maximisée, la température la plus basse est de 25,81°C à 6h du matin en 2010, et elle augmente progressivement pour atteindre 26,59°C à 6h en 2050, marquant ainsi un écart de 0,78°C entre 2010 et 2050. L'augmentation se poursuit et atteint 28,4°C à 6h du matin en 2100, avec un écart de 1,81°C entre 2050 et 2100. Ainsi, l'écart total entre 2010 et 2100 est de 2,59°.

La température maximum est constatée à 15h pour les trois années retenues pour cette étude (2010, 2050 et 2100). Cette hausse s'est effectuée progressivement avec 32,47°C en 2010, 33,46°C en 2050 et 35,28°C en 2100. Ainsi, les écarts sont de 0,99°C entre 2010 et 2050, et de 1,82°C entre 2050 et 2100, pour un écart total entre 2010 et 2100 de 2,81°.

Cas de toitures blanches (TB, S3)

	2010	2050	2100
min	26,15	26,74	28,8
max	32,73	33,41	35,34

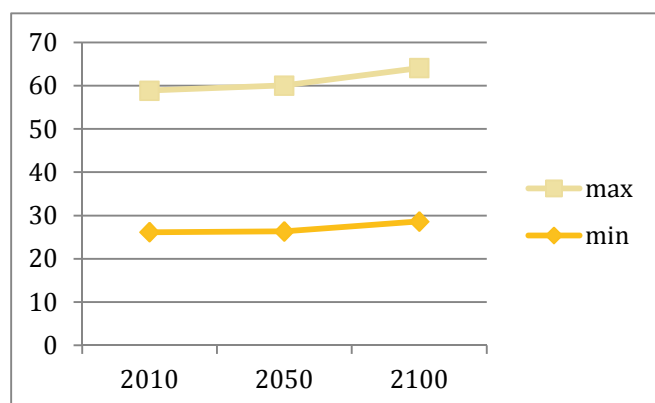


Pour le cas des toitures blanches, la température la plus basse est de 26,15°C à 6h du matin en 2010, et elle augmente progressivement pour l'année 2050 pour atteindre 26,74°C à 6h (soit 0,59°C d'écart entre 2010 et 2050). L'augmentation se poursuit et atteint 28,8°C à 6h du matin en 2100 (soit 2,06°C d'écart entre 2050 et 2100). L'écart total entre 2010 et 2100 est de 2,65°.

Les valeurs hautes des températures sont constatées à 15h pour les trois années retenues (2010, 2050 et 2100). Cette hausse s'est effectuée progressivement avec 32,73°C en 2010, 33,41°C en 2050 (soit un écart de 0,68°C entre 2010 et 2050) et 35,34°C en 2100 (soit un écart de 1,93°C entre 2050 et 2100). Ainsi, entre 2010 et 2100 l'écart est de 2,61°.

Cas de toitures blanches et murs blancs (TBMB, S3bis)

	2010	2050	2100
min	26,15	26,32	28,61
max	32,73	33,72	35,46

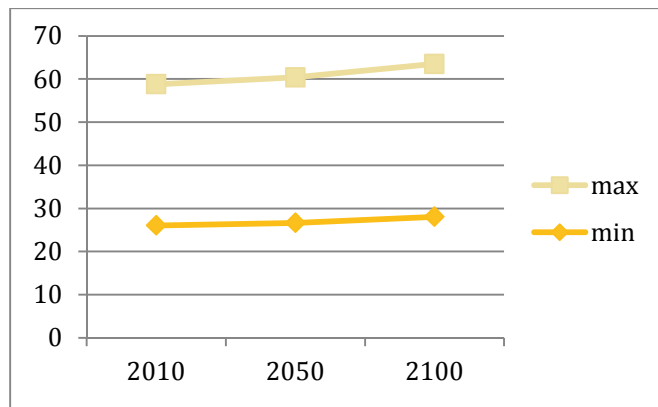


Pour le cas des toitures blanches et des murs blancs, la température la plus basse est de 26,15°C à 6h du matin en 2010, elle augmente progressivement pour atteindre 26,32°C à 6h en 2050 (soit 0,17°C d'écart). L'augmentation se poursuit et atteint 28,61°C à 6h du matin en 2100 (soit 2,29°C d'écart entre 2050 et 2100). Ainsi l'écart est de 2,81° entre 2010 et 2100.

Les températures maximum sont constatées à 15h pour les trois années (2010, 2050 et 2100). La température maximum passe de 32,73°C en 2010, à 33,72°C en 2050 et à 35,46°C en 2100. Ainsi, les écarts sont de 0,99°C entre 2010 et 2050, de 1,74°C entre 2050 et 2100 avec un écart total entre 2010 et 2100 de 2,73°.

Cas de surélévation (SE, S4)

	2010	2050	2100
min	26,05	26,65	28,05
max	32,73	33,73	35,45



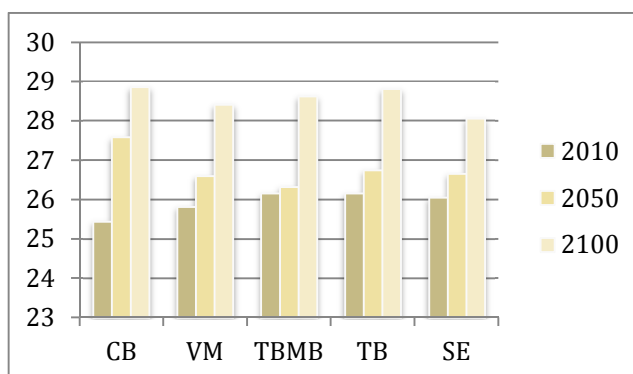
Pour le scénario de surélévation, la température la plus basse est de 26,05°C à 6h du matin en 2010, pour atteindre 26,65°C à 6h en 2050, marquant un écart de 0,6°C. L'augmentation se poursuit et atteint 28,05°C à 6h du matin en 2100, soit un écart de 1,4°C entre 2050 et 2100. Entre 2010 et 2100 l'écart est de 2°C.

Les températures présentent un pic (maximum) à 15h pour les trois années (2010, 2050 et 2100). De 32,73°C en 2010, la température maximum passe à 33,73°C en 2050 et à 35,45°C en 2100. Ainsi, l'écart passe de 1°C entre 2010 et 2050, à 1,72°C entre 2050 et 2100, soit un écart total entre 2010 et 2100 de 2,72°C.

Ci-dessous, deux tableaux récapitulatifs avec les températures minimales et maximales respectivement.

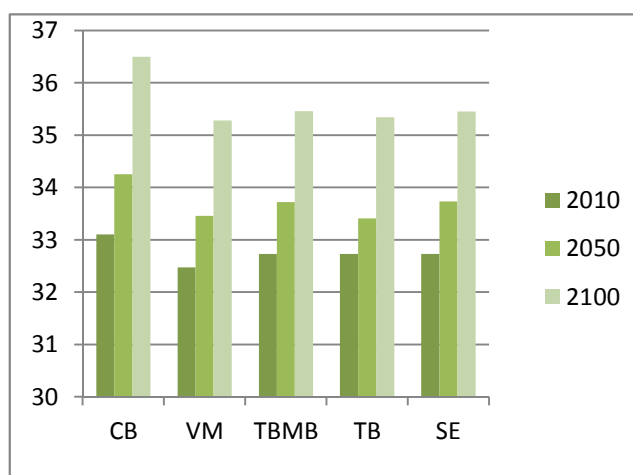
Températures minimales

	2010	2050	2100
CB	25,44	27,58	28,85
VM	25,81	26,59	28,4
TBMB	26,15	26,32	28,61
TB	26,15	26,74	28,8
SE	26,05	26,65	28,05



Températures maximales

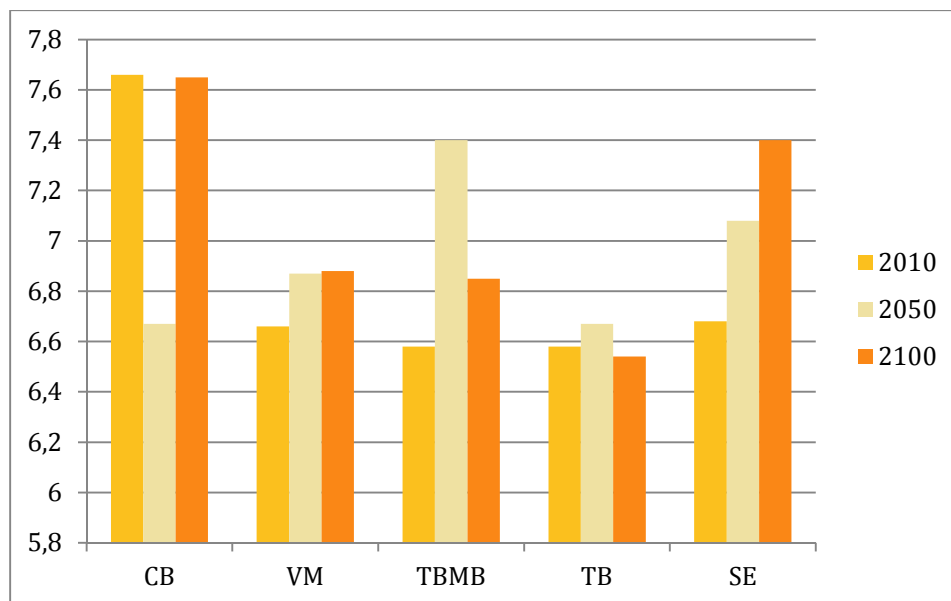
	2010	2050	2100
CB	33,1	34,25	36,5
VM	32,47	33,46	35,28
TBMB	32,73	33,72	35,46
TB	32,73	33,41	35,34
SE	32,73	33,73	35,45



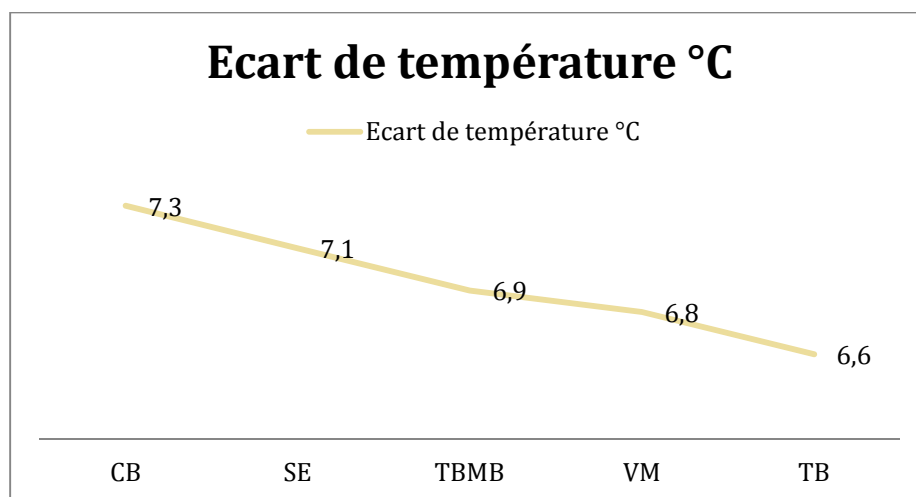
Écarts de températures

Les écarts des températures entre 06h et 15h pour les années 2010, 2050 et 2100 sont les suivants :

	2010	2050	2100
CB	7,66	6,67	7,65
VM	6,66	6,87	6,88
TBMB	6,58	7,4	6,85
TB	6,58	6,67	6,54
SE	6,68	7,08	7,4



La moyenne des écarts des températures pour les trois années 2010, 2050 et 2100 quant à elle, est :



Pour le cas de base (CB, S1)

- La température la plus basse : 25,44°C à 6h en 2010
- La température la plus haute : 36,5°C à 15 h en 2100

Les écarts entre les températures à 6h et à 15h, représentent les écarts entre les périodes de la journée avec respectivement la température la plus basse et la température la plus haute. Cet écart passe de 7,66°C en 2010, à 6,67°C en 2050 et à 7,65 en 2100. Ces différences paraissent importantes dans la mesure où dans la même journée, la température augmente considérablement et rapidement.

Pour le cas de la végétation maximisée (VM, S2)

- La température la plus basse : 25,81°C à 6h en 2010
- La température la plus haute : 35,28°C à 15 h en 2100

L'écart entre la température minimale de la journée à 6h00 et la température maximale de la journée à 15h00 passe de 6,66°C en 2010, à 6,87°C en 2050 et à 6,88°C en 2100. Ces différences paraissent constantes dans la mesure où les différences sont très faibles, et les valeurs ne bougent pas de manière significative entre les années 2050 et 2100.

Pour le cas des toitures blanches (TB, S3)

- La température la plus basse : 26,15°C à 6h en 2010
- La température la plus haute : 35,34°C à 15 h en 2100

Les écarts de température entre 6h et 15hr passent de 6,58°C en 2010, à 6,67°C en 2050 et à 6,54°C en 2100. Ces différences paraissent moins importantes que pour le cas de base, et reflètent également une baisse entre les années 2050 et 2100.

Pour le cas des toitures blanches et murs blancs (TBMB, S3 bis)

- La température la plus basse : 26,15°C à 6h en 2010
- La température la plus haute : 35,46°C à 15 h en 2100

Les écarts entre la température minimum à 6h00 et la température maximum à 15h00, se présentent comme suit : 6,58°C en 2010, 7,4 en 2050 et 6,85 en 2100. Ces différences paraissent importantes entre 2010 et 2050, pour baisser entre 2050 et 2100.

Pour le cas de surélévation (SE, S4)

- La température la plus basse : 26,05°C à 6h en 2010
- La température la plus haute : 35,45°C à 15 h en 2100

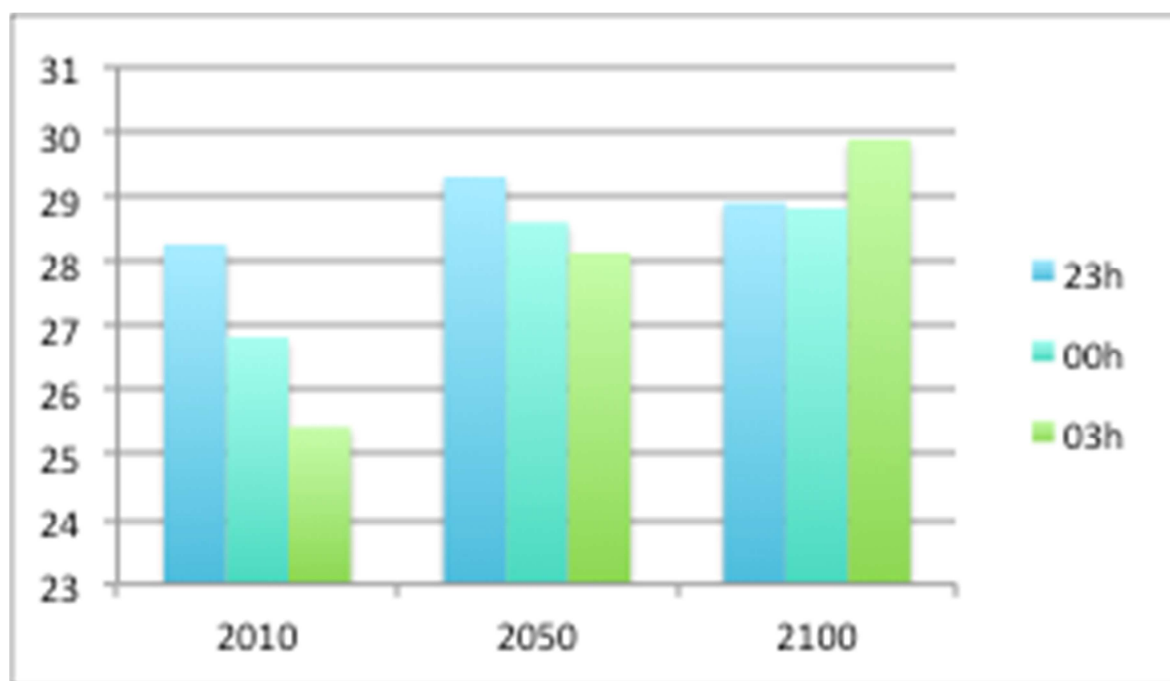
Les écarts de températures entre 6h (température minimum) et 15h (température maximum), se présentent comme suit : 6,68°C en 2010, 7,08 en 2050 et 7,4 en 2100. Ces différences paraissent importantes dans la mesure où dans la même journée, la température augmente considérablement et rapidement entre 2010 et 2050, et ensuite d'une manière moins importante entre 2050 et 2100.

Ainsi, nous pouvons constater que le scénario de verdissement (VM, S2) et le scénario réfléchissant avec les toitures blanches (S3 bis), représentent le moins de variabilité et le moins d'écarts entre les températures durant les années 2010, 2050 et 2100. Les résultats peuvent être justifiés par les effets de rafraîchissement de la végétation pour le scénario de verdissement (VM, S2) ainsi que les propriétés radiatives du scénario réfléchissant avec les en toitures blanches uniquement, qui n'impacte pas les façades des bâtiments. Ces effets sont importants mais il est important également de les analyser dans un créneau horaire différent, hors la période entre 06h et 15h. Dans la partie qui suit, nous allons en effet présenter les températures nocturnes.

Températures nocturnes

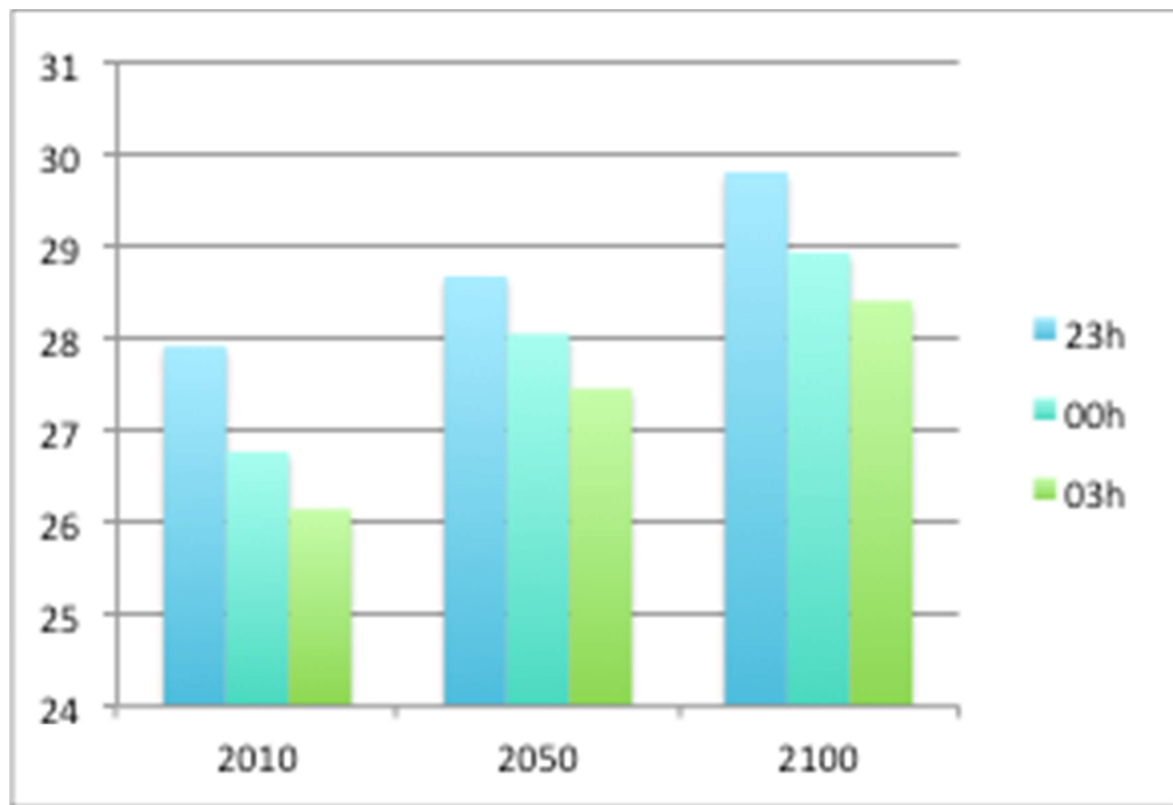
Cas de base (CB, S1)

	2010	2050	2100
23h	28,27	29,32	28,91
00h	26,83	28,61	28,82
03h	25,44	28,14	29,89



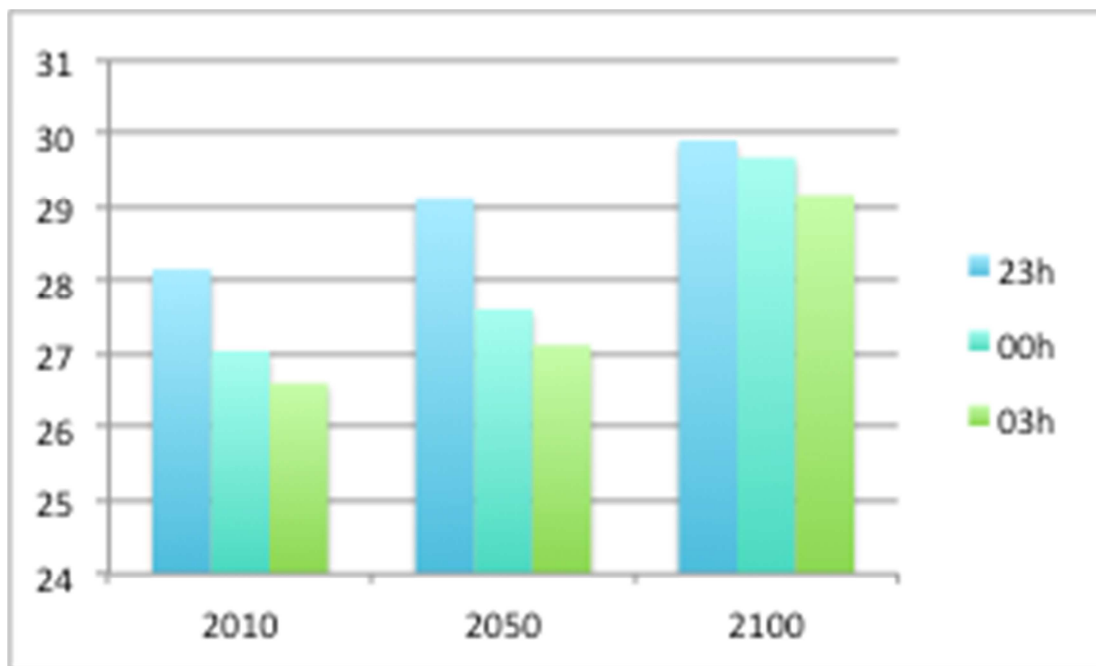
Cas de végétation maximisée (VM, S2)

	2010	2050	2100
23h	27,92	28,67	29,81
00h	26,77	28,05	28,93
03h	26,14	27,45	28,4



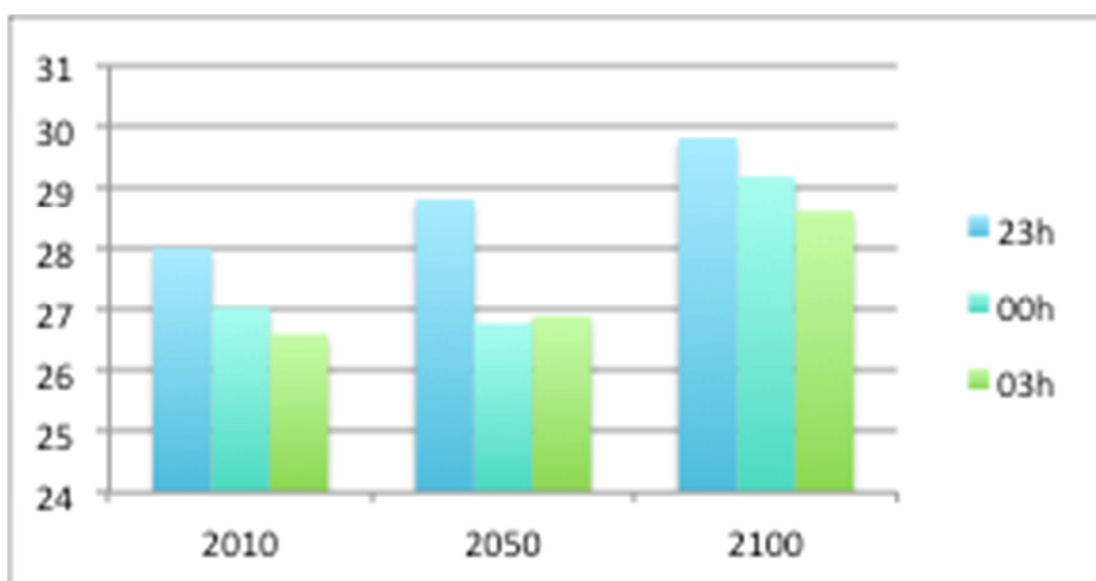
Cas des toitures blanches (S3)

23h	28,16	29,12	29,91
00h	27,04	27,61	29,68
03h	26,6	27,12	29,17



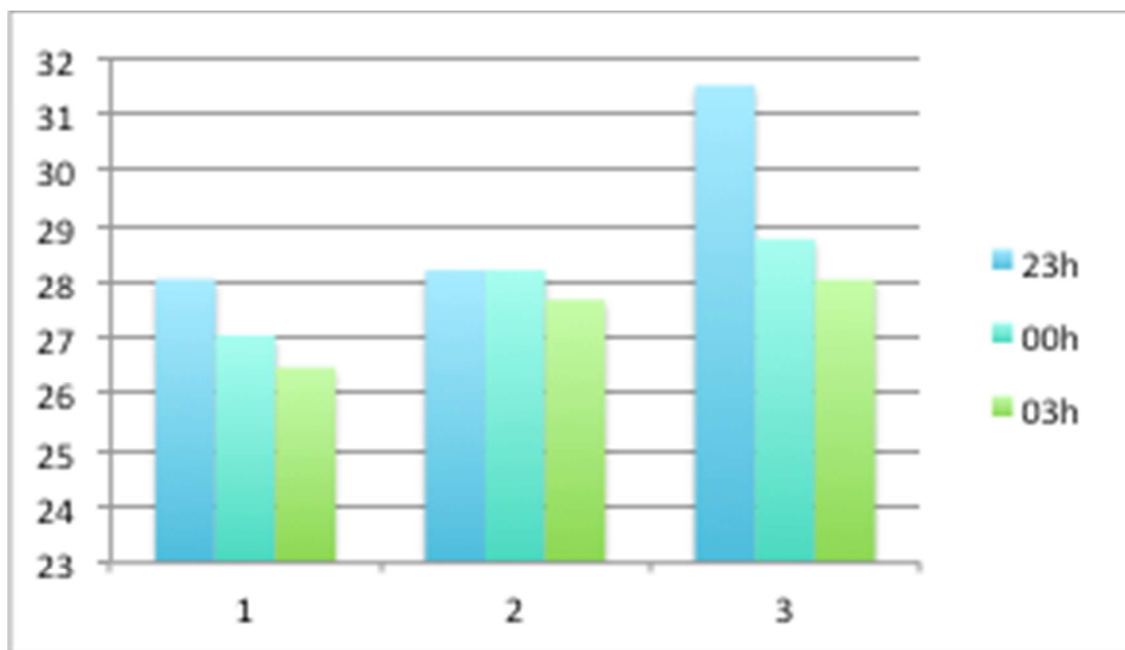
Cas des toitures blanches et murs blancs (S3 bis)

	2010	2050	2100
23h	28,01	28,81	29,81
00h	27,04	26,77	29,18
03h	26,6	26,89	28,61



Cas de surélévation (SE, S4)

	2010	2050	2100
23h	28,06	28,22	31,53
00h	27,05	28,22	28,77
03h	26,48	27,68	28,05



L'observation des températures durant la période journalière se situant entre 23h et 00h permet de conférer une idée sur les effets de la chaleur urbaine emmagasinée durant la journée. Ces effets on les constate principalement en soirée du fait d'un phénomène de restitution de la chaleur emmagasinée dans le sol et le bâti suivant les propriétés radiatives des matériaux, ainsi que de présence de la végétation et du phénomène associé d'évapotranspiration.

Pour les cinq scénarios retenus pour cette étude, le cas de base (CB, S1) qui est une référence pour établir une comparaison avec les autres scénarios, affiche des températures nocturnes élevées vers 23h (exemple, 28,27°C à 23h en 2010). Cette température va baisser progressivement pour atteindre des températures basses en début de matinée (exemple 25,44°C à 3h en 2010). La tendance est la même pour les années 2050 et 2100 ainsi que pour les quatre autre scénarios où l'on retrouve le même processus (températures assez élevées en fin de soirée (23h) et une baisse progressive pour atteindre des températures plus basses en début de matinée (3h)).

Cependant, il est important de souligner qu'une variation est à signaler. En effet, pour les scénarios (CB, S1) et (TB, S3), les températures ne sont pas très élevées (valeur moyenne de 28°C). Une légère augmentation par rapport à cette valeur est à noter pour le scénario (TBMB, S3 bis) avec des températures moyennant les 29°C. Quant aux scénarios (VM, S2) et (SE, S4), les températures sont plus importantes en comparaison avec les trois autres scénarios et avoisinent, pour les plus hautes, les 32°C.

Dans le cas du scénario de surélévation (SE, S4), les caractéristiques géométriques du site font que la chaleur à 2m peut mettre plus de temps à se dissiper en soirée en vue de la hauteur du bâti. Pour le scénario de verdissement (VM, S2), la présence de la végétation fait que le processus d'évapotranspiration est ralenti et la chaleur contenue est libérée. Enfin, dans le cas du scénario (TBMB, S3, bis), les propriétés radiatives des murs et des toitures avec un fort albédo, font que les éléments de l'enveloppe ont tendance à réfléchir les rayonnements reçus. Ainsi, la légère augmentation des températures justifie la restitution nocturne de la chaleur emmagasinée.

III.2.2 Vitesse du vent

Dans le contexte urbain, l'écoulement du vent est un paramètre très important car il est fortement influencé par les formes urbaines. Les principes d'écoulement d'air en milieu urbain sont assez bien étudiés pour certaines configurations géométriques notamment l'écoulement du vent autour du bâtiment [Bozonnet, 2005 et Gandemer 1976], ou au niveau de la rue [Oke, 1988]. Les effets aérauliques les plus courants dans les espaces urbains [Athamena, 2012] sont l'effet Wise, l'effet de coin, l'effet de barre, l'effet de canalisation et l'effet Venturi.

L'effet Wise correspond à la création d'un rouleau tourbillonnaire devant un bâtiment lorsque celui-ci voisine avec un bâtiment plus petit implanté parallèlement. L'effet Wise est très gênant pour les piétons du fait de la forte composante verticale de la vitesse du vent dans la zone critique. L'effet de coin, représente un phénomène d'accélération localisée à l'angle d'un bâtiment. L'augmentation de la vitesse du vent est entraînée par le gradient très élevé de la pression entre la façade exposée et celle qui se situe en dépression. L'effet de double coin, phénomène induit de l'effet de coin, se crée à partir de 2 bâtiments placés longitudinalement et séparés par un passage. Cette zone d'espacement est très critique du point de vue de l'inconfort.

L'effet de barre est caractérisé par une déviation en vrille de l'écoulement au passage d'une barre pour une incidence voisine de 45°. Le phénomène existe si la hauteur moyenne de la barre est inférieure à 25 m et la longueur minimum de la barre est supérieur 8 fois la hauteur. L'effet de canalisation apparait lorsqu'un ensemble construit forme un couloir. Une canalisation n'est pas une cause de gêne en soi. Elle n'agit que si elle est associée à une anomalie aérodynamique qu'elle transmet sur toute sa longueur. L'association de phénomènes de canalisation et de Venturi peut être une source de gêne importante. Enfin, l'effet Venturi est lié au rétrécissement du passage qui amène à l'augmentation de la vitesse du vent, pour un débit identique. La zone critique du confort se situe à l'étranglement.

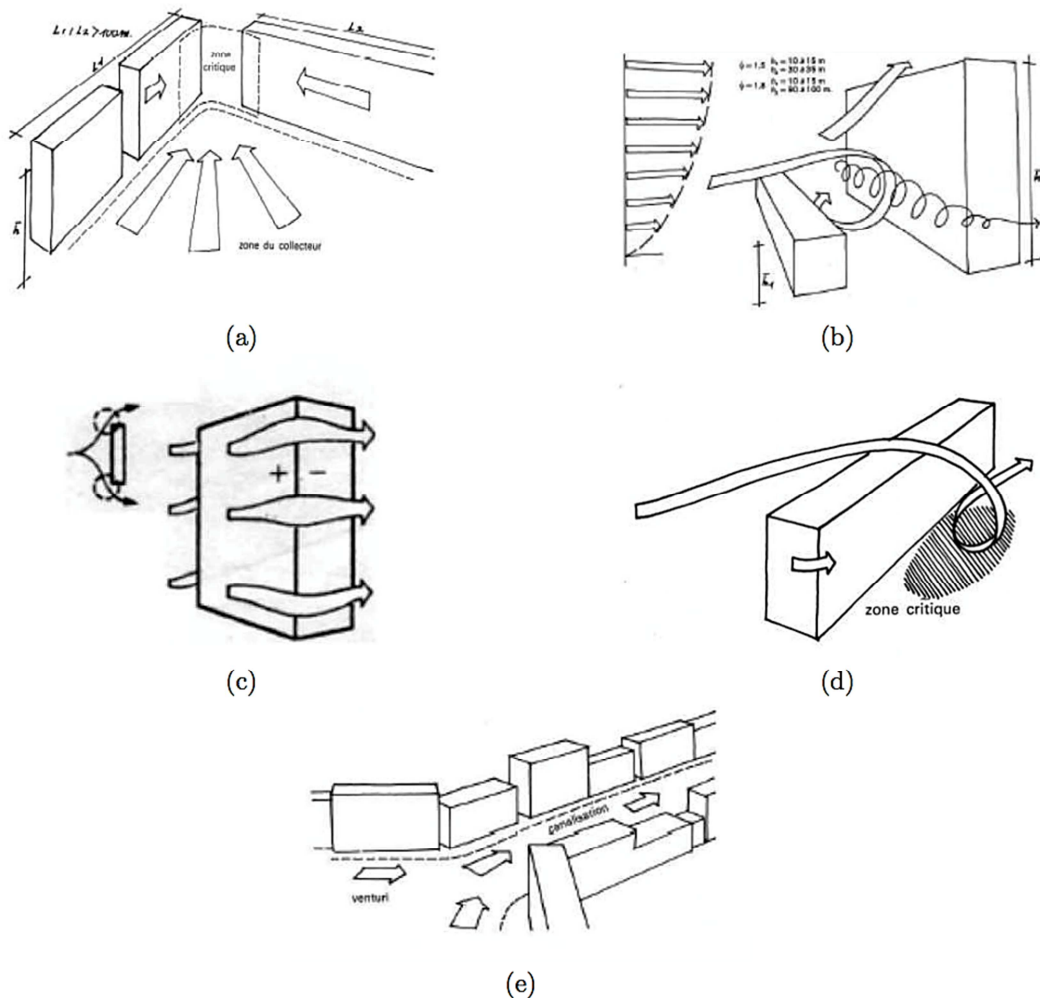


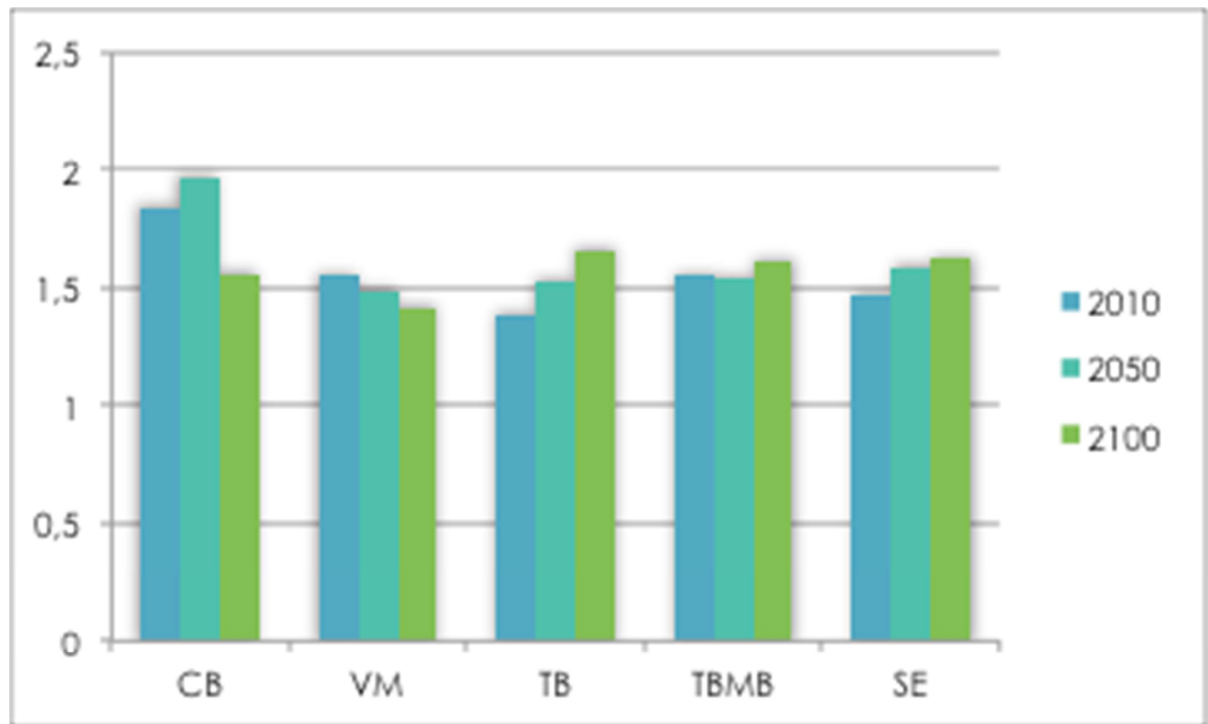
Figure 19 : Représentation graphique des effets aérodynamiques dans le milieu urbain. L'effet de Venturi (a) correspond à l'augmentation de la vitesse du vent du fait de rétrécissement du passage. L'effet Wise (b) correspond à la création de rouleau tourbillonnaire devant un bâtiment élevée lorsque celui-ci voisine avec un bâtiment plus petit. L'effet de coin (c) est un phénomène d'accélération localisée, à l'angle d'un bâtiment. L'effet de barre (d) est caractérisé par une déviation en vrille de l'écoulement au passage d'une barre et l'effet de canalisation (e) apparaît lorsqu'un ensemble construit forme un couloir [Gandemer 76].

Le vent est un paramètre important dans cette étude. Le vent représente un flux d'air ; l'air chaud et léger monte, l'air froid et lourd descend. Le mouvement de l'air est donc circulaire avec l'air qui se réchauffe et qui monte et qui se refroidit et descend. Près du sol, le vent a une légère tendance à être dévié vers les basses pressions.

Le graphique qui suit présente les moyennes journalières de la vitesse du vent en m/s calculées avec le logiciel ENVI-met pour les années 2010, 2050 et 2100 et pour les cinq scénarios de l'étude, cas de base, cas de végétation maximisée, cas de toitures blanches, cas de toitures blanches et murs blancs, et cas de surélévation.

	2010	2050	2100
CB	1,84	1,96	1,56

VM	1,55	1,49	1,42
TB	1,39	1,53	1,66
TBMB	1,55	1,54	1,61
SE	1,47	1,59	1,62



Pour le cas de base (CB, S1), nous obtenons les valeurs les plus élevées des cinq scénarios soit 1,84 m/s pour l'année 2010 et 1,96 m/s pour l'année 2050. Les quatre autres scénarios affichent des vitesses de vent (m/s) avec une valeur moyenne de 1,5m/s. Par ailleurs, le scénario de verdissement (VM, S2) affiche les valeurs les plus faibles et les plus constantes à travers les trois années considérées dans notre étude: 1, 55 m/s en 2010, 1,49 m/s en 2050 et 1,42 m/s en 2100. Ce phénomène peut être dû à l'aspect volumétrique de la végétation qui agit comme un brise-vent et qui atténue ainsi la vitesse du vent.

Des valeurs assez proches sont également constatées pour le scénario (TBMB, S3bis) avec les toitures blanches et les murs blancs, notamment pour 2010 (1,55 m/s) et pour 2050 (1,54 m/s). En effet, les propriétés radiatives, notamment des murs (en comparaison avec le scénario TB, S3), agissent sur la température qui a une influence sur le mouvement du vent ainsi sur sa vitesse. Des valeurs légèrement élevées sont constatées pour le cas de la surélévation (SE, S4), qui modifie bien évidemment la hauteur du bâti ce qui affecte la température de l'air et par conséquent la vitesse du vent (1.47 m/s en 2010, 1.59 m/s en 2050, 1.62 m/s en 2100).

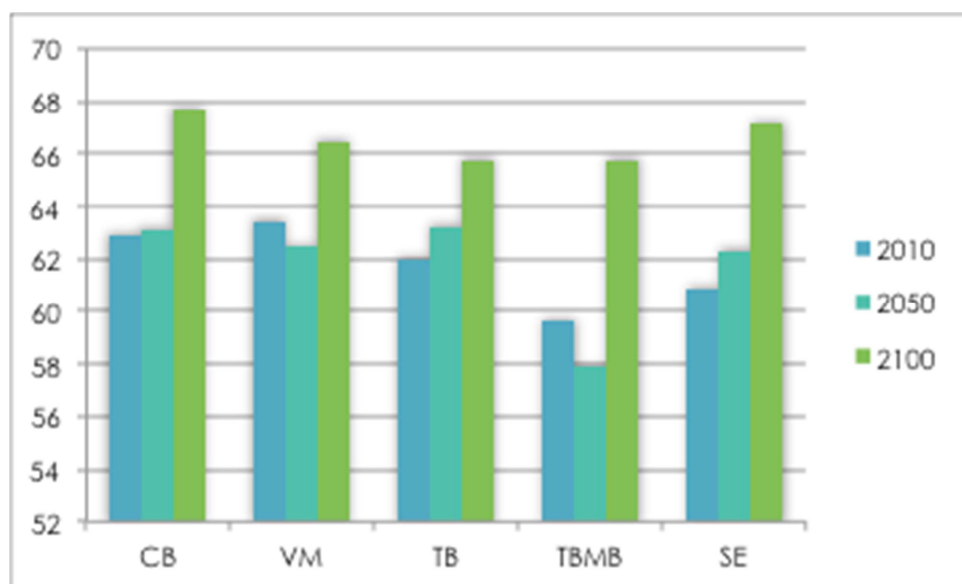
Toujours concernant la vitesse du vent, Envi-met fourni des résultats graphiques qui permettent de localiser les phénomènes de venturés et de constater les mouvements suivants. Tout d'abord nous pouvons constater l'effet Wise qui correspond à la création d'un « rouleau tourbillonnaire » devant un bâtiment (présence élevée lorsque celui-ci est proche du bâtiment), et au niveau des allées créées volontairement par le concepteur entre les îlots. Nous constatons également l'effet de coin qui correspond à un phénomène d'accélération localisée, à l'angle d'un bâtiment. Dans le cas du Secteur Tolbiac Chevaleret nous pouvons noter ce phénomène notamment aux abords des bâtiments et d'avantage du côté sud (dalle de la couverture des voies ferrées). Enfin, nous pouvons constater aussi l'effet de barre qui est caractérisé par une déviation en vrille de l'écoulement au passage d'une barre, dans le cas du Secteur Tolbiac Chevaleret constaté au niveau des dégagements côté sud en face des bâtiments (dalle de la couverture des voies ferrées)

III.2.3 l'humidité relative (HR)

En météorologie, il est important de connaître le taux d'humidité présent dans l'air (quantité de vapeur d'eau). Ce paramètre permet, entre autres, de se renseigner sur la possibilité de formation de nuages et de précipitations et sur le taux d'humidité présente dans l'air. L'Humidité Relative (HR) de l'air est la quantité de vapeur que l'air contient relativement à la quantité qu'il contiendrait s'il était saturé (100% de HR) à une température donnée. Par exemple, si l'humidité relative est de 50 %, cela signifie que l'air contient la moitié de la quantité maximale de vapeur d'eau qu'il peut contenir. L'air est saturé lorsque l'humidité relative atteint 100 %. Dans ce cas, le nombre de molécules d'eau qui retournent à l'état liquide devient égal au nombre de molécules qui s'évaporent d'une surface d'eau (voir le principe de pression de vapeur d'eau) Plus la température de l'eau est élevée, plus il doit y avoir de molécules d'eau dans l'air pour que la saturation soit atteinte, ainsi pour une même quantité de vapeur d'eau dans l'air, l'humidité relative sera plus grande si la température est basse.

Le tableau qui suit présente les valeurs moyennes d'humidité relative (%) pour les trois années 2010, 2050 et 2100 et les cinq scénarios, cas de base, cas de végétation maximisée, cas de toitures blanches, cas de toitures blanches et murs blancs, et cas de surélévation.

	2010	2050	2100
CB	63	63	68
VM	63	62	66
TB	62	63	66
TBMB	60	58	66
SE	61	62	67



Les valeurs d'humidité relative formulées en moyenne pour chaque scénario et chaque année, amènent à constater que les valeurs les plus élevées sont calculées pour le cas de base (63% en 2010, 63% en 2050, 68% en 2100). Pour l'ensemble des scénarios, on observe une valeur de départ en 2010 qui baisse en 2050 pour ensuite augmenter considérablement en 2100. A titre d'exemple, pour le cas de toitures blanches et murs blancs (TBMB, S3bis), en 2010 la valeur d'humidité relative est de 60%, en 2050 elle passe à 58% pour atteindre en 2100 66%.

Nous ne remarquons aucune augmentation particulière pour le scénario de verdissement (VM, S2) avec le phénomène d'évapotranspiration, ce qu'on pourrait justifier par les phénomènes de venturi qui contribue à la dissipation du phénomène. En revanche, on constate que la géométrie du site n'affecte pas particulièrement le taux d'humidité directement, alors qu'elle contribue à la variation de la température, elle-même associée à l'humidité relative. En effet, la quantité de vapeur d'eau que l'air peut contenir à saturation augmente avec sa température.

III.3 Lecture des résultats liés à l'eau

V.3.1 Calcul de l'évapotranspiration

Comme présenté ci-dessus, pour la ZAC Tolbiac Chevaleret, le taux d'évapotranspiration potentielle a été calculé aux horizons 2010, 2050, 2100, pour les scénarios « cas de base (CB, S1) » et « végétation maximisée (VM, S2) » avec la méthode de calcul Turc, pour la période d'arrosage s'étalant du 1^{er} juin au 30 septembre suivant la méthode MIR (pour les mois de juin, juillet, août, nous avons recours à des valeurs moyennes mensuelles). Nous avons considéré que la végétation plantée est au stade de maturation et que les conditions d'arrosage sont optimales.

Comme présenté précédemment, pour une culture donnée, l'évapotranspiration correspond à l'eau perdue dans l'air à partir à la fois, de la surface du sol et de celle de la couverture végétale. Le niveau d'évapotranspiration varie selon divers facteurs liés au climat et à aux propriétés physiques des plantes et du sol. Parmi les caractéristiques météorologiques, nous pouvons noter la température de l'air, l'intensité lumineuse, le vent et le degré d'humidité. Les caractéristiques de la surface

déterminants comprennent les caractéristiques du sol, des espèces plantées comme leur densité, leur stade de croissance etc.

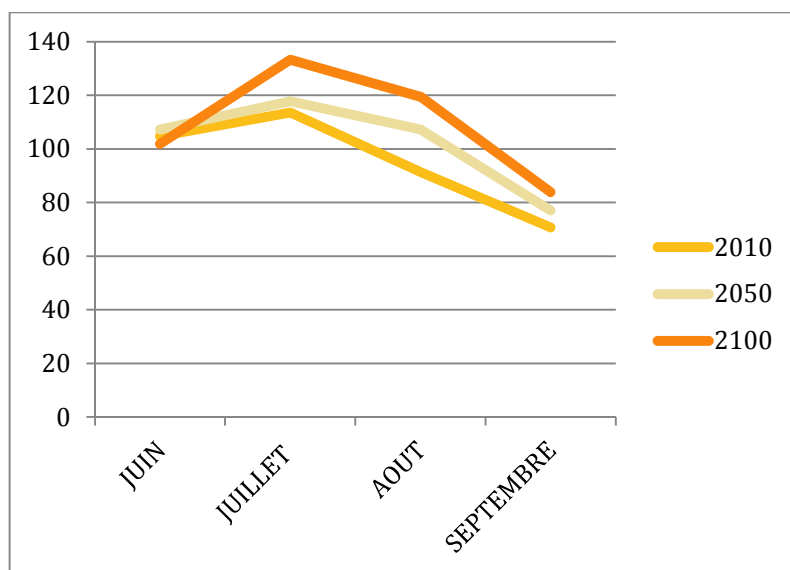


Figure 20 : Variation du taux d'évapotranspiration potentielle (mm) selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1er juin au 30 septembre « cas de base »

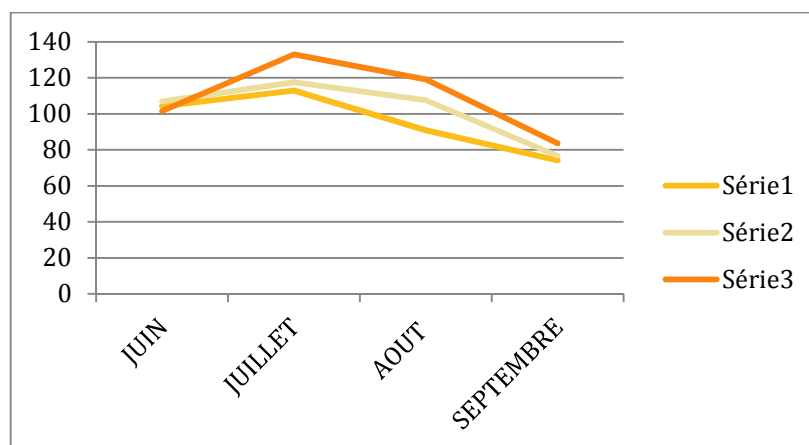


Figure 21 : Variation du taux d'évapotranspiration potentielle (mm) selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1er juin au 30 septembre « cas de végétation maximisée »

	2010	2050	2100
JUIN	104,8	107,2	101,9
JUILLET	113,6	117,8	133,3
AOUT	91,4	107,2	119,4
SEPTEMBRE	70,7	77	83,9

	2010	2050	2100
JUIN	104,2	106,8	101,6
JUILLET	113	117,5	133
AOUT	90,8	107,6	119,1
SEPTEMBRE	74,1	76,6	83,6

Cas de Base

Cas de végétation maximisée

Les tableaux ci-dessus indiquent les valeurs de l'évapotranspiration potentielle respectivement pour le cas de base (à gauche) et le cas de végétation maximisée (à droite).

Les résultats démontrent une hausse du taux d'évapotranspiration pour les années 2050 et 2100 avec des valeurs maximales pour le mois de juillet et des valeurs minimales pour le mois de septembre. Cette augmentation est justifiée par les variations climatiques considérées pour 2050 et 2100. Nous pouvons notamment noter comme facteurs déterminants la hausse de la température de l'air et du rayonnement solaire, deux facteurs considérés dans la formule de Turc et relatifs à l'énergie solaire, facteur qui agissent directement sur les phénomènes physiques de photosynthèse et d'évapotranspiration. Dans le tableau ci-dessous, nous pouvons voir les valeurs moyennes journalières, moyennées sur les semaines d'arrosage pour les mois de juin, de juillet, d'août et de septembre, pour la température de surface, le rayonnements et l'humidité relative. Par la suite, nous développerons les facteurs déterminants qui jouent sur la modification des valeurs d'évapotranspiration et leur changement sous CC.

		Cas de base			Cas de Végétation Maximisée		
		Ts (°C)	Rg (cal/j/cm2)	HR(%)	Ts (°C)	Rg (cal/j/cm2)	HR(%)
2010	JUIN	18.8	433.1	65.5	18.7	431.9	66.6
	JUILLET	20.1	442.4	64.4	20.0	441.0	65.9
	AOUT	19.9	360.9	65.7	19.7	360.1	67.2
	SEPTEMBRE	16.7	282.9	70.0	16.6	300.5	71.2
2050	JUIN	18.1	452.8	74.0	18.0	452.6	75.1
	JUILLET	21.2	449.1	71.5	21.1	449.0	72.6
	AOUT	22.1	411.5	71.0	22.3	411.3	72.1
	SEPTEMBRE	18.4	296.8	76.7	18.2	296.7	77.9
2100	JUIN	22.9	382.5	73.0	22.8	382.4	74.1
	JUILLET	24.1	486.8	72.0	24.0	486.7	73.1
	AOUT	24.8	441.4	71.7	24.7	441.3	72.8
	SEPTEMBRE	21.0	306.7	77.7	20.9	306.6	78.8

La température et le rayonnement global

Il faut de l'énergie pour que l'eau passe de l'état liquide à l'état vapeur et la plus grande partie de cette énergie provient directement du soleil. En effet, le rayonnement solaire direct et la température ambiante de l'air fournissent l'énergie nécessaire à l'évapotranspiration. Selon [Musy 2014], 80 % des variations de l'évapotranspiration sont liées à la quantité d'énergie reçue du soleil.

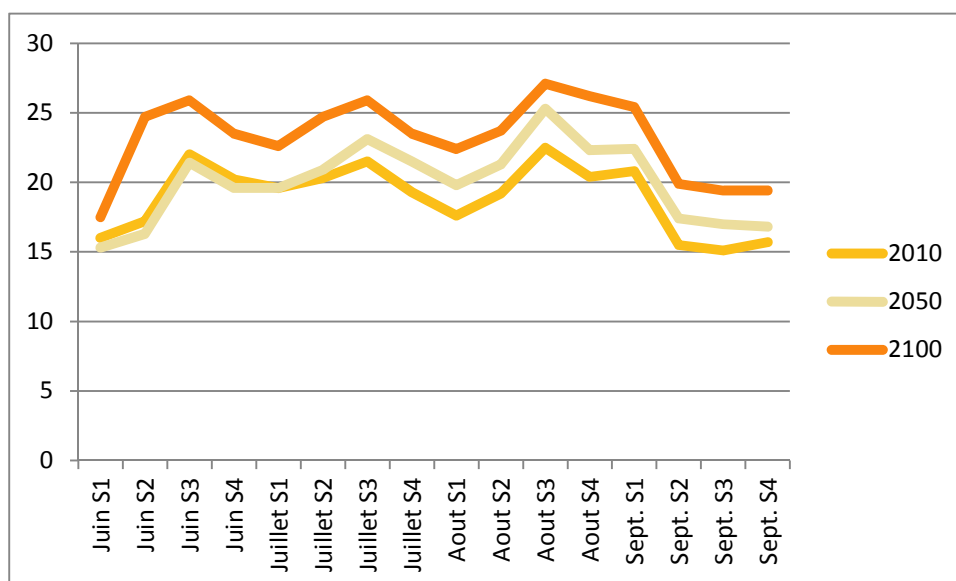


Figure 22: Variation de la température de l'air en °C selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1er juin au 30 septembre

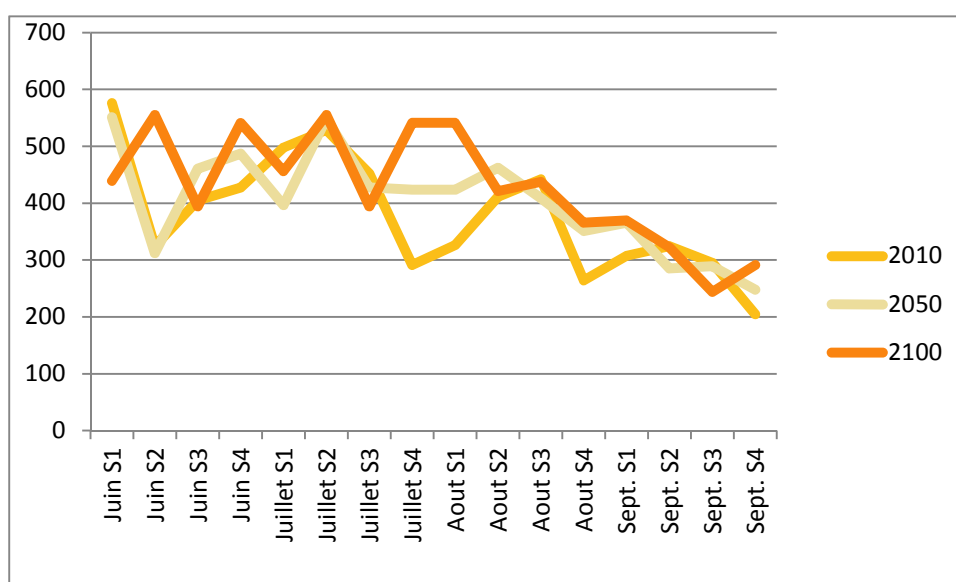


Figure 23: Variation rayonnement global en cal/j/cm2 selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1er juin au 30 septembre

Le graphique expose la variation de la température de l'air pendant la période du 1^{er} juin au 30 septembre pour les trois années 2010, 2050 et 2100. Cette représentation met en évidence une hausse considérable de la température qui peut marquer des écarts avoisinant les 5°. En effet, il s'agit d'une augmentation des températures moyennes quotidiennes (+2 à 4°C). Une augmentation du nombre de jours chauds, très chauds et extrêmement chauds dans cette période estivale. Cette variation de température stimule le processus d'évapotranspiration notamment lorsque le rayonnement solaire est très important et le ciel clair sur une même période. En effet, la présence de nuages altère le processus d'évapotranspiration en limitant le rayonnement solaire reçu.

L'humidité relative

L'humidité relative exprime le rapport entre la quantité d'eau contenue dans une masse d'air et la quantité maximale d'eau que peut contenir cette masse d'air. Ainsi, lorsqu'une masse d'air se refroidit, elle garde la même quantité d'eau. Par contre, la valeur de sa quantité maximale diminue avec la température. Cette diminution implique qu'à un certain moment, l'air devient saturé car $H_r = 100\%$. On nomme la température pour laquelle la pression de vapeur saturante est égale à la pression de vapeur actuelle la température du point de rosée. On exprime parfois l'humidité de l'air en kg d'eau par kg d'air humide (humidité spécifique) ou encore en gramme d'eau par m³ d'air humide (humidité absolue). La figure 4.5 ci-après donne une illustration des relations entre pression de vapeur, température et humidité relative. L'humidité de l'air est un élément capital car elle conditionne largement les échanges hydriques entre le sol, les plantes et l'atmosphère. Le pouvoir évaporant de l'air, c'est-à-dire sa capacité à accepter de la vapeur d'eau, est directement fonction du déficit de saturation que l'on retrouve plus ou moins directement dans les formules physiques exprimant l'évapotranspiration d'un couvert végétal.

La figure ci-après, illustre l'évolution de l'humidité relative calculée avec le logiciel envimet pour les années 2010, 2050, et 2100.

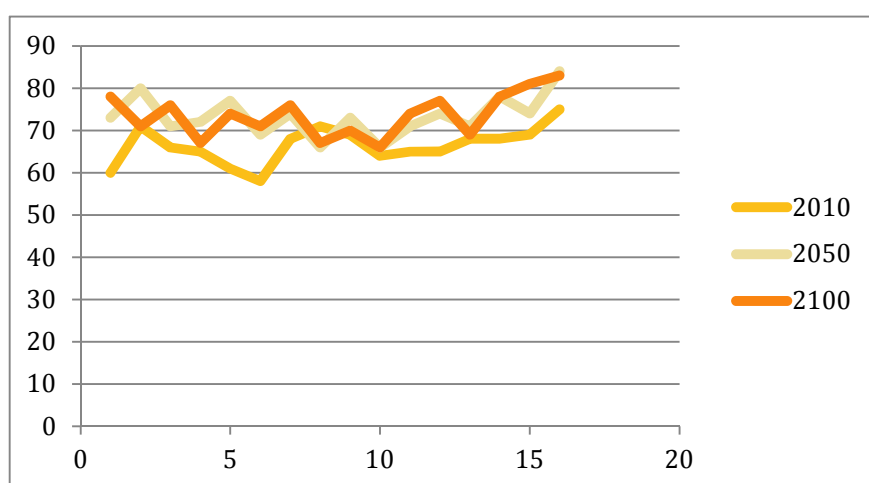


Figure 24: Variation de l'humidité relative en % selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1^{er} juin au 30 septembre.

III.3.2 L'évolution des précipitations

Sur la période 1901-2000, on observe une tendance à la hausse (+11%) des précipitations annuelles, plus marquée pendant l'hiver (+15%) que durant l'été (+5%). Cependant, comme mentionné précédemment dans la présentation de la méthodologie mise en place pour Adaptatio, selon le guide du changement climatique de l'APC, cette évolution constatée au siècle dernier a tendance à s'inverser dans la mesure où la première décennie du 21^{ème} siècle (de 2001 à 2010) a été particulièrement sèche, avec un déficit de 10% par rapport aux normales climatiques. Selon cette étude, d'autres tendances avérées pour le siècle annoncent :

- Une légère diminution des précipitations sur l'année, avec un contraste hiver/été plus marqué qu'actuellement.
- Une forte diminution des précipitations en période estivale s'accompagnant d'étiages de la Seine plus accentués (étiage : période de l'année où le débit du fleuve atteint son point le plus bas).
- Une augmentation en intensité et en fréquence des épisodes de sécheresse météorologique (au sens pluviométrique) et agricole (au sens de l'humidité des sols).

Face aux incertitudes concernant notamment les précipitations et leurs extrêmes dans les années à venir mentionnées par le GIEC, nous nous appuyons dans le cadre du projet Adaptatio sur ces données publiées par l'APC. Ainsi, nous considérons un déficit de 10% entre les années 2010 et 2050 et un déficit supplémentaire de 10% entre les années 2050 et 2100.

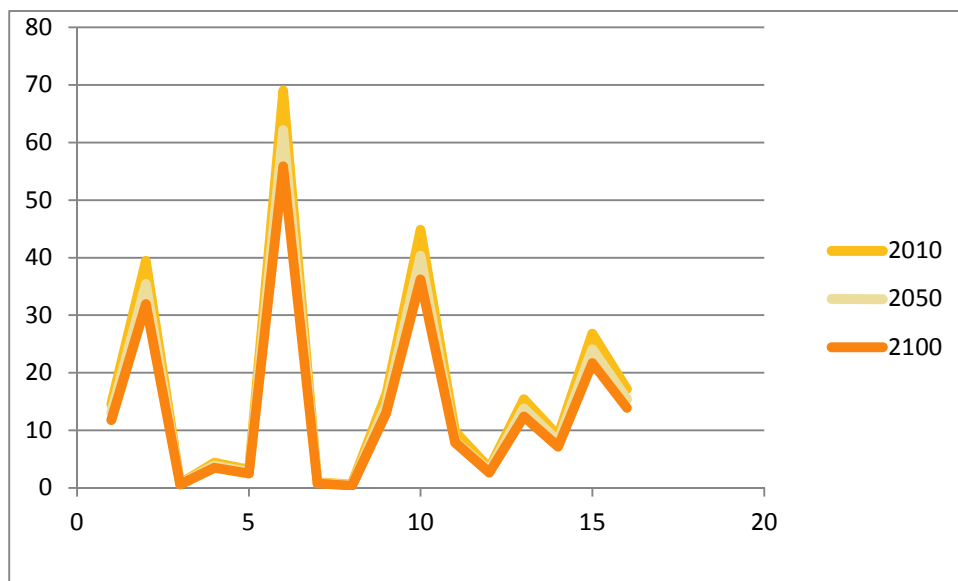


Figure 25: Variation des précipitations (mm) selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1^{er} juin au 30 septembre

Le graphique démontre une irrégularité de la pluviométrie avec des périodes marquant une absence totale de précipitations. Ces périodes sont contrastées par des périodes de pluie avec des pics importants qui avoisinent les 70mm.

III.3.3 Estimation du déficit hydrique

Avec la contribution de la pluie et de l'irrigation, le sol agit comme un réservoir où chaque plante puise l'eau dont elle a besoin. Lorsque la quantité d'eau transpirée excède ce qui est disponible, la plante subit un stress hydrique. Si le manque d'eau persiste, les symptômes pourront être plus importants comme le jaunissement, le roussissement, la déformation.

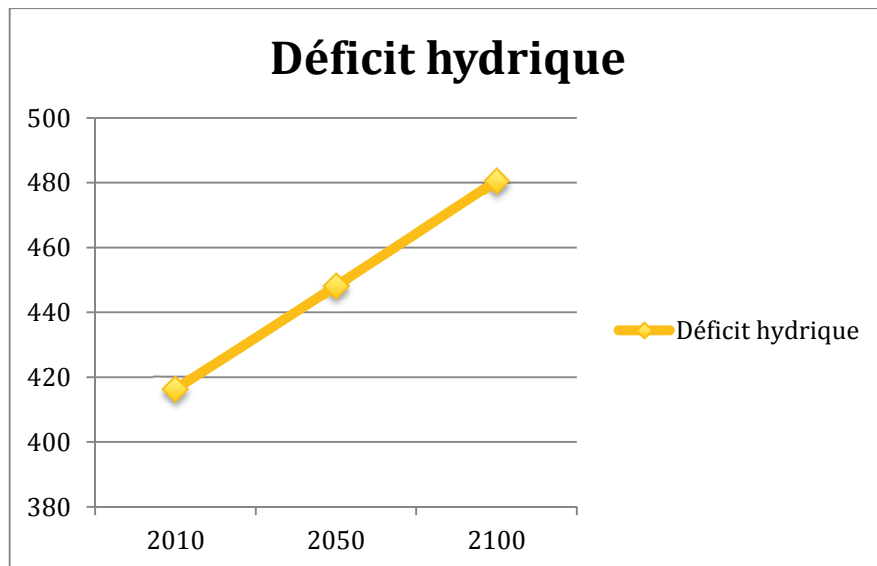


Figure 26 : Déficit hydrique (mm) selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1^{er} juin au 30 septembre

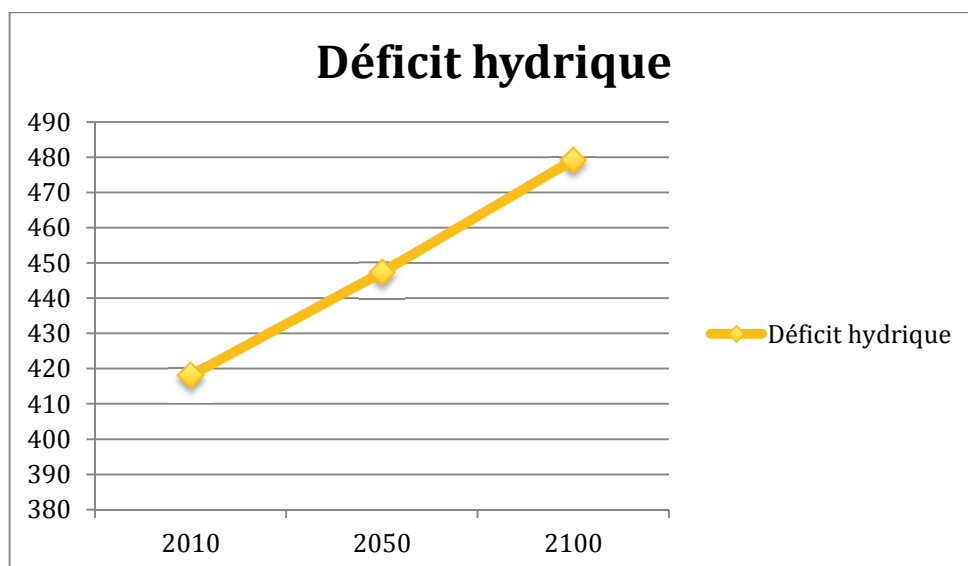


Figure 27: Déficit hydrique (mm) selon les trois années 2010, 2050 et 2100 pour la période du 1^{er} juin au 30 septembre

	2010	2050	2100
Déficit hydrique	416,3	448,1	480,6

Cas de base

	2010	2050	2100
Déficit hydrique	418,1	447,3	479,2

Cas de végétation maximisée

Pour le (CB, S1) nous avons 26378m² de végétation et pour scénario (VM, S2) 68996m². Ainsi, les valeurs de déficit hydrique pour les 2 scénarios sont les suivants :

	2010	2050	2100
Déficit	10981.16	11819.98	12677.27
hydrique	m3	m3	m3

Cas de base

	2010	2050	2100
Déficit	28847.23	30861.91	33062.88
hydrique	m3	m3	m3

Cas de végétation maximisée

III.3.4 Limites de la méthode Turc/ conclusion

L'évaporation augmente à mesure que la température se réchauffe, aussi longtemps qu'il y a de l'eau qui peut s'évaporer. Les plantes limitent leur transpiration à mesure que la température monte. La plus grande partie de l'eau que les plantes soutirent est perdue par la transpiration. La capacité de la plante à mieux retenir l'eau dépend des caractéristiques de ses racines et de ses feuilles. Les plantes perdent de l'eau par de petites ouvertures ou pores sur les surfaces de leurs feuilles, appelées stomates. À des températures élevées les plantes tentent de retenir le plus d'eau possible en tentant de conserver leur eau en refermant les stomates pour diminuer la transpiration.

Les facteurs qui touchent le rayonnement solaire direct, affectent aussi le niveau d'évapotranspiration. La couverture nuageuse influe sur l'évapotranspiration en limitant la quantité de rayonnement solaire atteignant les cultures ou les sols. Cependant, même par une journée sans nuages, il y a encore des fluctuations quotidiennes de l'évapotranspiration. Les jours où le temps est dégagé, le niveau d'évapotranspiration augmente rapidement le matin et atteint généralement son maximum en début ou au milieu de l'après-midi. La latitude et la saison influent aussi sur le rayonnement solaire direct ainsi sur l'évapotranspiration.

La formule Turc que nous avons utilisée dans le cadre du projet Adaptatio pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle, est très simple d'emploi mais ne permet pas de prendre en compte les effets du vent qui tendent à augmenter la valeur d'ETP. De plus, elle n'est pas applicable à des échelles de temps réduites (pas de temps horaire ou journalier), qui sont justement les échelles les plus pertinentes lors des projets d'irrigation. En outre, la formule Turc a également été déterminée à partir de mesures effectuées en région tempérée, ce qui limite son application sur d'autres régions climatiques.

Les limites de la formule Turc sont à souligner notamment le fait que la formule ne prend pas en compte le vent. En effet, les vents affectent l'évapotranspiration car ils peuvent transporter l'énergie thermique dans une zone et en retirent l'humidité vaporisée. Un vent de 8 kilomètres à l'heure (5 m/h) peut augmenter l'évapotranspiration de 20 % dans l'air calme. Un vent de 24 kilomètres à l'heure (15 m/h) peut augmenter l'évapotranspiration de 50 % dans l'air calme [selon Chow, Handbook of Applied Hydrology, 1964, tel que cité par le Geological Survey américain [USGS].

III.4 la Toolbox

		Temp. De l'air	Rayonnement global	Humidité relative	Vitesse du vent	Facteur de vue du ciel	Compacité	Densité	Minéralisation	Evapotranspiration		
		Ta (°C)	RG (w/m ²)	HR (%)	WS (m/s)	FVC (%)	C (sans unité)	D (sans unité)	M (%)	ETP (mm)		
2010	CB	28,9	296	63	1,8	53%	10,23	0,37	69%		Energie	Eau
	VM	28,7	291	64	1,3	32%	10,23	0,37	53%			
	TBMB	28,9	287	60	1,4	53%	10,23	0,37	53%			
	TB	28,9	289	62	1,4	53%	10,23	0,37	53%			
	SE	28,8	274	61	1,4	38%	10,23	0,41	53%			
2050	CB	30,4	301	63	1,5	53%	10,23	0,37	69%			Eau
	VM	29,7	289	62	1,5	32%	10,23	0,37	53%			
	TBMB	29,4	297	58	1,5	53%	10,23	0,37	53%			
	TB	29,6	299	63	1,4	53%	10,23	0,37	53%			
	SE	29,9	303	63	1,6	38%	10,23	0,41	53%			
2100	CB	31,9	270	68	1,6	53%	10,23	0,37	69%			Eau
	VM	31,3	298	66	1,6	32%	10,23	0,37	53%			
	TBMB	31,2	301	66	1,6	53%	10,23	0,37	53%			
	TB	31,5	296	66	1,5	53%	10,23	0,37	53%			
	SE	31,6	289	67	1,4	38%	10,23	0,41	53%			

Dans le cadre du projet Adaptatio, un des objectifs était de synthétiser tous les calculs des consommations énergétiques et hydriques ainsi que des coûts d'adaptation et de non adaptation, et de les présenter de manière didactique aux parties prenantes, praticiens etc. des projets d'aménagement urbains concernés par la prise en compte de l'adaptation au CC dans le processus de conception des projets. Nous avons contribué à cet outil de synthèse à travers les simulations effectuées avec le logiciel envi-met du confort urbain notamment de différents paramètres liés à l'énergie et le climat à l'échelle du quartier.

Dans le tableau ci-dessus, nous pouvons voir les sorties du logiciel Envi-met (température de l'air, rayonnement global, humidité relative, facteur vue du ciel), ainsi que les indicateurs géométriques calculés de façon empirique (compacité, densité, minéralisation).

Concernant la température de l'air, pour le scénario CB en 2010 elle est de 28.9°C. Pour les scénarios TB et TBMB la valeur reste la même (28.9°C) alors qu'elle diminue pour les scénarios VM (28.7°C) et SE (28.8°C). En 2050 pour le scénario CB, la température augmente par rapport à l'année 2010 (30.4°C). Pour la même année, pour tous les autres scénarios la température diminue. En effet, sa valeur passe de 29.9°C pour le scénario SE, à 29.7°C pour le scénario VM, à 29.6°C pour le scénario TB puis à 29.4°C pour le scénario TBMB. Enfin en 2100 pour le scénario CB, la température augmente à nouveau et passe à 31.9°C, et diminue pour tous les autres scénarios. Plus précisément, elle est de 31.6°C pour le scénario SE, 31.5°C pour le scénario TB, 31.3°C pour le scénario VM, et de 31.2°C pour le scénario TBMB.

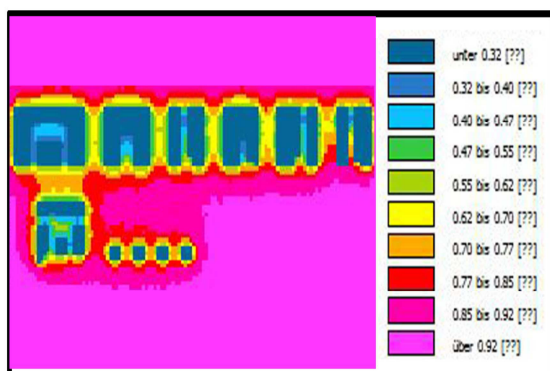
En 2010, pour l'année 2010, la valeur du rayonnement est de 296 (W/m²) pour le scénario CB et diminue pour tous les autres scénarios ; sa valeur est de 291 pour le scénario VM, de 289 pour le scénario TB, 287 pour le scénario TBMB, et 274 pour le scénario SE. En 2050, pour le scénario CB la valeur du rayonnement augmente par rapport à l'année 2010 et passe à 301 (W/M²). Pour tous les autres scénarios sa valeur diminue par rapport au scénario CB (TB: 299, TBMB : 297, VM : 289), sauf pour le scénario SE pour lequel nous observons une légère hausse (303). Enfin, pour 2100, pour le scénario CB, la valeur du rayonnement diminue par rapport à 2050 à 270 W/m². Pour tous les autres scénarios, la valeur du rayonnement augmente ; elle passe de 289 pour le scénario SE, à 296 pour le scénario TB, à 298 pour le scénario VM, à 301 pour le scénario TBMB.

Pour le scénario CB pour l'année 2010, la valeur de l'humidité relative est de 63%. Pour le scénario VM, la valeur augmente légèrement (64%) et diminue pour les autres résultats. En effet, la valeur de l'humidité relative passe de 64 pour le scénario VM, à 62 pour le scénario TB, à 61 pour le scénario SE et à 60 pour le scénario TBMB. Pour l'année 2050, pour le scénario CB, la valeur de l'humidité

relative reste la même par rapport à l'année 2010 égale à 63%, valeur qu'on observe aussi pour les scénarios TB et SE. Pour les deux scénarios restant la valeur de l'humidité relative diminue ; elle passe de 62% pour le scénario VM à 58% pour le scénario TBMB. Enfin, pour l'année 2100, la valeur de l'humidité relative est de 68% pour le scénario CB, puis elle réduit pour le scénario SE (67%) et les scénarios VM, TB, TBMB (66%).

Enfin, dans la liste des sorties Envi-met nous trouvons aussi la vitesse du vent. Sa valeur est de 1.8 m/s pour le scénario CB en 2010. Pour les autres scénarios la valeur diminue. Pour les scénarios TBMB, TB et SE la valeur de la vitesse du vent est de 1.4 et pour le scénario VM de 1.3. Pour l'année 2050 et le scénario CB, la valeur de la vitesse du vent diminue par rapport à 2010, elle passe à 1.5. Nous pouvons noter la même valeur pour les scénarios VM et TBMB, alors que pour le scénario SE une valeur légèrement supérieure (1.6 m/s) est notée et pour le scénario TB une valeur légèrement inférieure (1.4 m/s) est notée. Enfin, pour 2050, la valeur de la vitesse du vent augmente légèrement par rapport à 2010 avec une valeur de 1.6 m/s. Pour les scénarios VM et TBMB, la valeur est la même, alors que pour le scénario TB la valeur est de 1.5 m/s et pour le scénario SE de 1.4 m/s.

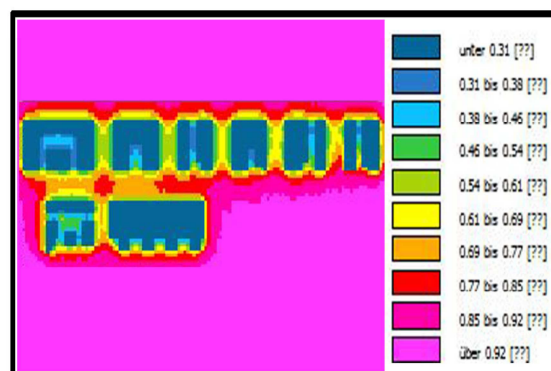
Dans la catégorie des paramètres géométriques, nous trouvons le FVC. Cet indicateur est indépendant du climat. Sa valeur est égale à 53% pour les scénarios CB, TBMB, TB. Sa valeur se réduit à 32% pour le scénario de VM et à 38% pour le scénario SE. La valeur de la compacité, indicateur également indépendant du climat, reste la même pour tous les scénarios, même pour le scénario de SE, égale à 10.23. La densité, indépendante du climat, a une valeur qui reste la même pour les scénarios CB, VM, TBMB, TB. Sa valeur augmente uniquement pour le scénario SE à 0.41. Enfin, la minéralisation, est égale à 69% pour le CB et passe à 53 % pour les autres scénarios.



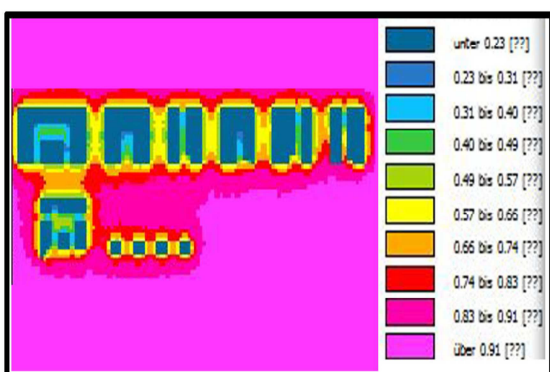
Scénario 1 : cas de base

Scénario 3 : réfléchissant, toits blancs

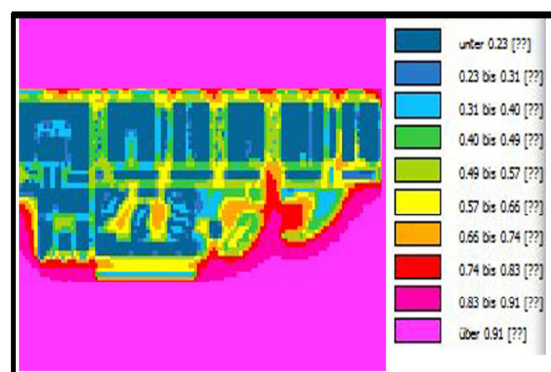
Scénario 3bis : réfléchissant, toits blancs et murs blancs



Scénario 4 : surélévation du bâti



Scénario 2 : végétation maximisée
FVC bâtiments



Scénario 2 : végétation maximisée
FVC bâtiments + végétation

IV Conclusion

Face aux projections climatiques qui s'accordent sur une augmentation significative de 2 à 4°C de la température moyenne sur Paris à la fin du 21ème siècle, avec des hausses de températures plus marquées en été qu'en hiver, et plus marquées en journée que durant la nuit. Cette hausse des températures sera également accompagnée par des épisodes caniculaires fréquents qui conduiront à une hausse du nombre des vigilances canicule de 10 à 25 par an à Paris au lieu d'une seule par an en moyenne aujourd'hui, et de 5 à 15 dans les zones rurales alentour.

L'expérience de la canicule de 2003 a permis de lever le voile sur certains aspects climatiques importants, qui continuent de servir de base aux différentes études menées actuellement dans les recherches sur les îlots de chaleur urbains. En effet, le constat décrit qu'un îlot de chaleur urbain apparaît en fin de nuit entre le centre de Paris et les zones rurales alentour, de l'ordre de 4 à 7 °C, et dans Paris intra-muros même, de 2 à 4°C.

Le besoin d'adaptation au changement climatique est aujourd'hui au cœur de toutes les préoccupations. Le projet Adaptatio inscrit ses objectifs dans cette visée et s'attache à présenter des solutions d'adaptation au changement climatique par des actions sur les leviers urbains testés pour permettre de réduire l'intensité de l'ICU en période caniculaire. Parmi les leviers d'action testés dans le cadre d'Adaptatio on trouve la modification des propriétés radiatives des toits et murs, l'augmentation de la présence de végétation arrosée et la surélévation du bâti.

Dans ce sens, dans le cadre d'Adaptatio le développement d'une méthodologie novatrice qui intègre une représentation effectuée à l'aide d'un modèle numérique comme Envi-met, a permis d'axer notre analyse sur l'impact du changement climatique à l'échelle du quartier parisien sélectionné et sur actions à mettre en place afin de s'adapter à ces impacts. En utilisant ainsi les projections climatiques disponibles au niveau d'un territoire délimité et à divers horizons temporels (2050, 2100,...) et en formulant une problématique précise (dans notre cas le maintien du niveau de confort sous CC et des actions à mettre en place pour l'atteindre), des tendances peuvent être identifiées. Ces tendances peuvent concerner divers changements tels que le degré d'exposition à un risque, les conséquences de cette exposition etc. et peuvent éclairer les stratégies, politiques et mesures de gestion des risques liés au CC et d'adaptation à ceux-ci.

Ce travail contribue à donner des repères, sur un plan théorique. Il permet aussi d'évaluer l'ampleur des modifications de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain et des autres spécificités du climat urbain sous CC et également l'atténuation de ces modifications une fois les actions sur les leviers urbains mises en place (ACC). Des considérations relatives à la faisabilité technique et aux conditions de mise en œuvre et d'exploitation liées aux scénarios étudiés dans le projet, n'ont pas été prises en compte dans le cas d'Adaptatio. Néanmoins, les résultats obtenus peuvent apporter des éléments de réflexion à un processus de décision éminemment complexe lié au CC et à la gestion de ses impacts.

V Références bibliographiques

AIT-AMEUR, K. (2002). Vers une méthode multicritère de caractérisation du micro climat dans les espaces publics : validation d'un système d'indicateurs « morpho-climatiques » et d'un indicateur de confort , thèse de doctorat, sciences pur l'ingénieur, université de Nantes, Nantes, p.288

Andrade H., Alforcado M. (2008). Microclimatic variation of thermal comfort in a district of lisbon (telheiras) at night. Theoretical and Applied Climatology, p92-225

Calculs des déperditions et charges thermiques d'hiver - Collection des guides de l'AICVF - Editions PYC - 1989

Calculs des charges de climatisation - Collection des guides de l'AICVF - Editions PYC – 1992

M. Armstrong and P. Densham. Domain decomposition for parallel processing of spatial problems. Computers, Environment and Urban Systems, 16(6):497 { 513, 1992.

H. Andrade and M. Alforcado. Microclimatic variation of thermal comfort in a district of lisbon (telheiras) at night. Theoretical and Applied Climatology, 92:225{237, 2008.

L. Adolphe. A simplified model of urban morphology : application to an analysis of the environmental performance of cities. Planning and Design, vol. 28, pages 183–200, 2001.

Principes de l'aéraulique appliqués au génie climatique - Collection des guides de l'AICVF - Editions PYC - 1991

Conception et calcul des installations de ventilation des bâtiments et ouvrages - Collection des guides de l'AICVF - Editions PYC - 1992

Bâtiments à hautes performances énergétiques, guides sectoriels ADEME - Santé (1993) - Bureaux (1993) - Sports (1995) - Enseignement (1993)

ALVAREZ D. S., CEJUDO L. J.M., GUERRA M. J.J. et al. (1992). Control climatico en espacios abiertos, El Proyecto Expo'92. Sevilla: Ciemat, pp.4-49.

ASHRAE (1993b). Physiological principles and thermal comfort. ASHRAE handbook of fundamental. Atlanta : ASHRAE, 8.1-8.29.

Auliciems, A. (1983): Psycho-physiological criteria for global thermal zones of building design. Int J Biometeorol. 26 (Suppl.): 69-86.

AKBARI H., DAVIS S., DORSANO S. et al. (1992). Cooling our communities – a guidebook on tree planting and light colored surfacing. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Policy Analysis, Climate Change Division. Berkeley : Lawrence Berkeley Laboratory, 217 p

ADEME (à paraître) Guide de recommandations pour la conception de logements à hautes performances énergétiques en Ile-de-France – ADEME, ARENE, GDF – Nov 1999 Guide de présentation de la RT2000 (CD-Rom) – DGUHC, ADEME, CSTB

BERGER, X. (1998). Human thermal comfort at Nîmes in Summer heat. In proceedings of EPIC'98, 2nd european conference on energy performance and indoor climate in buildings and 3rd international conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings, November 19-21 Lyon : ENTPE, pp. 201-206.

BOTTEMA, M. (1992). Wind climate and urban geometry. Eindhoven: University of Technology, 212 p.

M Bruse (1999). Modelling and strategies for improved urban climates. Proceedings International Conference on Urban Climatology + International Congress of Biometeorology, Sydney, 8-12. Nov, Australia An overview paper prepared for the Urban Climate Conference in Sydney, p6.

M. Bruse. (2009). Anwendung von mikroskaligen simulationsmodellen in der stadtplanung in: Bernhard, L. und Kger T. (Hrsg.): Simulation raumbezogener Prozesse: Methoden und Anwendung, IfGIprints, Inst. f. Geoinformatik, Univ. Mnster, Mnster, ISBN 3-927889-84-9, p9-21

Amar Bensalma, Marjorie Musy, Nathalie Simonnot. Caractérisation des ambiances dans les grands ensembles : entre modélisation architecturale, sensible et physique, p. 254

Valérie Borrell Estupina FLST403 - Montpellier 2011

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

André Cailleu, « Annales de Géographie », 1974, Volume 83, Numéro 459, pp. 569-585 : notes et contre rendu-Mesure simple de l'albédo en géographie, Persée

Cordeau E. et Valette E. (2010). Les îlots de chaleur urbains. Répertoire de fiches de connaissance. IAU Ile-de-France. 53p.

CSTB (1995). Climatologie générale. Nantes : CSTB, 50 p.

CSTB (1995). Climatologie urbaine. Nantes : CSTB, 40 p.

COOMBES A. J. (1993). Les arbres. Paris : Bordas, 1993. Collection L'œil Nature. Traduction Isabelle Delvallée, 320 p.

Guide de la thermique dans l'habitat neuf - Charbonnier, Parant, Pouget - Editions du Moniteur - 1992

Cheng, V., Ng, E., Chan, C., & Givoni, B. (2010). Outdoor thermal comfort study in sub-tropical climate: A longitudinal study based in Hong Kong. International Journal of Biometeorology. doi:10.1007/s00484-010-0396-z.

DEPECKER, P *et al.* (1989). Qualité thermique des ambiances. Paris : AFME, 67 p. Collection cahiers pédagogiques Thermique et Architecture.

J. Douglas. On the numerical integration of $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$ by implicit methods. J. Society of indust. Applied Mathematics, 3(1):42{56, 1955.

J. Douglas. A note on the alternating direction implicit method for the numerical solution of heat ow problems. Proceedings of the American Mathematical Society, 8:409{412, 1957.

J. Douglas. Alternating direction methods for three space variables. Numerische Mathematik, 4:41{63, 1962.

J. Douglas and H. Roachford. On the numerical solution of heat conduction problems in two and three space variables. Transaction of the American Mathematical Society, 82:421{439, 1956.

DE MARSILY G. (1981) - Hydrogéologie quantitative. Masson p. 34-40.

ESCOURROU, G. (1991). Le climat et la ville. Paris : Nathan, pp. 63-65.

Numerical Simulation of Effects of Roof Shape on Microscale Flow:Extension of the Numerical Model MISCAM. 4th International Conference on Urban Air Quality, Prague/Czech Republic).

Thermique appliquée aux bâtiments - Hernot - Editions EPIDA – 1994

J. Eichhorn. Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklima-Modells. PhD thesis, Univ. Mainz, 1989. URL http://www.staff.uni-mainz.de/eichhorn/docs/diss_eichhorn_1989. PDF Retrieved 20.02.2011.

R. Emmanuel, H. Rosenlund, and E. Johansson. Urban shading - a design option for the tropics? a study in colombo, sri lanka. International Journal of Climatology, 27 (14):1859 {1873, 2007}.

[Emmanuel 2007] Emmanuel R. , Rosenlund H. , and Johansson E. (2007). Urban shading - a design option for the tropics? a study in colombo, sri lanka. International Journal of Climatology, p 27

[Fahmya et al ., 2010] Fahmya M. , Sharplesa S. , and Yahiya.M. (2009) Lai based trees selection for mid latitude urban developments: A microclimatic study in cairo, egypt. Building and Environment, 45 (2):p 345.

[Fanger, 1967] FANGER, P. O. (1970). Thermal Comfort. New York : Mc Graw Hill.

[Fernandes 1998] FERNANDES E. O., ALMEIDA F. and CARDOSO P. (1998). Energy and environment at EXPO'98 Lisbon. In : Proceedings of PLEA 98. Environmentally Friendly Cities, Proceedings of PLEA 98, Lisbon, Portugal, June 1998. London : James & James, pp. 7 – 12.

M. Fahmya, S. Sharplesa, and M. Yahiya. Lai based trees selection for mid latitude urban developments: A microclimatic study in cairo, egypt. Building and Environment, 45 (2):345{357, 2010.

M. Fischer. Gra_kchip-markt: Nvidias anteil rutscht drastisch ab, 2011. URL <http://heise.de/-1237548>. Retrieved 09. June 2011.

[Galeou et al. 1989] GALEOU, M., GRIVEL, F. et CANDAS, V. (1989). Le confort thermique : aspects physiologiques et psychosensoriels. Etude bibliographique. Strasbourg: CNRS, 113 p.

[Gandemer 1981] GANDEMER, J et GUYOT, A. (1981). La protection contre le vent. Paris : CSTB, 132 p.

[Givoni 1991] GIVONI, B (1991). Impact of planted areas on urban environmental quality : a review. Atmospheric environment Vol n°3, pp. 289-299.

- [Groupe ABC 1997] GROUPE ABC (1997). Morphologie, végétal et microclimats urbains. Cas d'Aix-en-Provence et de Nîmes. Tome 2, les mesures. Plan urbain, Ministère de l'Équipement, pp. 131 - 133.
- [Groupe ARTOPOS 1997] EQUIPE ARTOPOS (1997). Morphologie, végétal et microclimats urbains. Cas d'Aix-en-Provence et de Nîmes. Tome 1, le contexte, analyse urbaine. Plan urbain, Ministère de l'Équipement, 52 p (+ fiches).
- [Guillerme 1994] GUILLERME, A. (1994). La disparition des saisons dans la ville, les années 1830-1860. Les annales de la recherche urbaine n°61, 7 p. Les saisons dans la ville.
- [Guyot 1996] GUYOT, G. (1996). Climatologie de l'environnement - De la plante aux écosystèmes. Paris : Masson, 505 p.
- [Gross 1991] GROSS, G. (1987). A numerical study of the air flow within and around a single tree. Boundary-Layer Meteorology, p 40
- [Gandemer, 1976] : J. Gandemer & A. Guyot. Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti. Ministère de l'Équipement, Direction de l'Aménagement foncier et de l'Urbanisme, Paris, 1976.
- [Haddad 1997] HADDAD, Y. (1997). Les arbres d'alignement urbains, un enjeu pour les partenaires multiples. Les Annales de la Recherche Urbaine, n°74, pp. 113-118. Titre du numéro : Natures en Villes.
- [Heisler 1989] HEISLER, G. M (1989). Mean windspeed below building height in residential neighborhoods. In : Proceedings of the workshop on saving energy and reducing atmospheric pollution by controlling Summer heat islands. Berkeley: Applied Science Division LBL, pp. 256 – 272.
- [Houghton 1923] Houghton FC, Yaglou CP (1923) Determining equal comfort lines. J Am Soc Heat Vent Engrs 29, 165–76.
- [Humphreys 1998] HUMPHREYS, M.A and NICOL J. F. (1998) . Understanding the adaptative approach to thermal comfort. To be published in ASHRAE Transactions.
- J. Hakes and B. Evans, 2008. URL <http://www.apple.com/pr/library/2008/06/09snowleopard.html>. Retrieved 25. February 2011.
- [Hallegatte et al. 2007] Hallegatte S. et Viguié V. (2007). Les territoires français face au défi climatique : atténuation et adaptation. Rapport vers l'égalité des territoires. 254-273p.
- [Izard 1979] IZARD, J. L. et GUYOT, A. (1979). Archi Bio. Paris : Parenthèse, 135 p

[Jung, 2009] Jung O., (2009) Approche multicritère numérique et expérimentale de la ventilation et du rafraîchissement passif d'un bâtiment multizone par contrôle de composants de façade, INSA de Lyon, p. 34-35

[Junk 2003] Junk J., Helbig A., and L uers J. . Urban climate and air quality in trier/germany. International Journal of Biometeorology, p.238

J. Junk, A. Helbig, and J. L uers. Urban climate and air quality in trier/germany. International Journal of Biometeorology, 47:230{238, 2003.

[Kjelgren et al. 1998] KJELGREN, R. and MONTAGUE, T. (1998). Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. Atmospheric Environment , Vol 12, n°1, pp. 35-41.

[Koenigsberger 1980] Koenigsberger O.H, Ingersol, T.G, Mayhew, Alain and Szokolay, (2009). S.V. Housing and building. London. Longman group.p47-49

[Katzschner 2004] Katzschner, L. 2004. Open space design strategies based on thermal comfort analysis. Proceedings PLEA

Group Khronos, 2010. URL <http://www.khronos.org/members/promoters>. OpenCL Working Group Khronos. Khronos opengl working group: The opengl specification, version 1.0, revision 29, 2008. URL <http://www.khronos.org/registry/cl/specs/opengl-1.0.29.pdf>.

[Lindberg et al. 2008] Lindberg, B. Holmer, and S. Thorsson. Solweig 1.0 - modelling spatial variations of 3d radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. International Journal of Biometeorology, 52:697{713, 2008. ISSN 0020-7128.

[Lin Tp et al 2009] TP Lin, RL Hwang, , CP Chen, NJ Kuo (2009). Investigating the adaptive model of thermal comfort for naturally ventilated school buildings in Taiwan International journal of biometeorology 53 (2), p189-200

[Larue 1996] LARUE, D. (1996). L'arbre dans la ville. Edition Sang de la terre et Foncier Conseil, Paris, 168 p. Collection écologie urbaine.

A. Lake, J. Sugerman, R. Cavin, R. Espasa, E. Grochowski, T. Juan, and P. Hanrahn. Larrabee: A many-core x86 architecture for visual computing. ACM Transactions on Graphics, 27(3):1{15, 2008.

F. Lindberg, B. Holmer, and S. Thorsson. Solweig 1.0 - modelling spatial variations of 3d radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. International Journal of Biometeorology, 52:697{713, 2008. ISSN 0020-7128.

Lazarus. URL <http://www.lazarus.freepascal.org/index.php/page,7.html>. NVIDIA. Opencl programming for the cuda architecture, version 2.3., 2009. URL http://www.nvidia.com/content/cudazone/download/OpenCL/NVIDIA_OpenCL_ProgrammingOverview.pdf. Retrieved 24. February 2011.

- [Maillet et al. 1993] MAILLET, L. et BOURGERY, C (1993). L'arboriculture urbaine. Paris :édition I.D.F., 320 p. Collection Mission du Paysage.
- [Monteith et al. 1991] MONTEITH J.L. and UNSWORTH M.H. (1991). Principles of environmental physics. New York : Edward Arnold, 291 p.
- [Muret 1987] MURET, J. P. *et al.* (1987). Les espaces urbains – concevoir, réaliser, gérer. Paris : édition du Moniteur, 364 p.
- [Musy et al. 1991] MUSY, A. et SOUTTER, M (1991). La physique du sol. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 335 p. Collection Gérer l'environnement.
- [Mestayer et al. 1994] MESTAYER, P. G. and ANQUETIN, S. (1994). Climatology of cities. In : Diffusion and Transport of Polluants in Atmosphéric Mesoscale Flow Fields. Atmospheric Sciences Library, Kluwer Academic Publishers, 165 – 189 p.
- [Musy 2014] Musy Marjorie (2014). Une ville verte, le rôle du végétal dans la ville. Ed. Quae. Col. Synthèses, 200 p.
- [Mayer 1985] MAYER, E. (1985). Untersuchungen von Zeigerscheinungen mit Hilfe physikatischer Messmethoden. Gesundh., n°2, pp. 65-112
- [Mayer 1997] MAYER, H. and MATZARAKIS, A (1997). The urban heat island seen from the angle of human-biometeorology. In : Proceedings of International symposium on monitoring and management of urban heat island. Fujisawa, pp. 84 – 95.
- [Mc Intyre 1980] MC INTYRE, D. A. (1980). Indoor Climate. London : Applied Science Publishers.
- [Musy, 2014] Musy M. (2014). *Une ville verte*, collection synthèse, Ed. Quae, p 98 – 100
- [Mahrer et Avissar, 1984] Mahrer and R. Avissar. (1984). A numerical simulation of the greenhouse microclimate. Mathematics and Computers in Simulation, 26(3). p.218-228
- [Matzarakis 2002] Matzarakis, Mayer, and Rutz] A. Matzarakis, H. Mayer, and F. Rutz. Radiation and thermal comfort. In 6th hellenic conference in meteorology, climatology and atmospheric physics; p 25 - 28.
- [Matzarakis et al 2007] Matzarakis A. , F. Rutz, and H. Mayer (2007). Modelling radiation uxes in simple and complex environments - application of the rayman model. International Journal of Biometeorology, p51-323

A. Matzarakis, F. Rutz, and H. Mayer. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the rayman model. *International Journal of Biometeorology*, 51:323-334, 2007.

Y. Mahrer and R. Avissar. A numerical simulation of the greenhouse microclimate. *Mathematics and Computers in Simulation*, 26(3):218-228, 1984).

Musy, 2014, Une ville verte : les rôles du végétal en ville

Modélisation des interactions ville-climat-énergie, Marjorie Musy, Isabelle Calmet, Emmanuel Bozonnet, Fabrice Rodriguez

[Nicol et al, 1996] Nicol, F and Roaf, S (1996): Pioneering new indoor temperature standards: the Pakistan project. *Energy and Buildings*, 23:169-174

[Nikolopoulou 2001] Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers, K. (2001). Thermal comfort in outdoor urban spaces: Understanding the human parameter. *Solar Energy*, 70, p227-235.

[Oke 1987] OKE, T.R. (1987). *Boundary layer climates*. London and New York : Methuen, Second edition (first edition 1978), 435p.

[Oke 1988] OKE, T.R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Building*, 11, pp. 103-111., vol. 11,

[Oke 1987] OKE, T.R. (1987). *Boundary layer climates*. London and New York : Methuen, Second edition (first edition 1978), 435 p.

T. Oke. The energetic basis of the urban heat island. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 108:1-34, 1982).

-
L'isolation écologique – Jean Pierre OLIVA – Edition Terre Vivante - 2001
Qualité environnementale des bâtiments – Manuel à l'usage de la maîtrise d'ouvrage

[Péneau 1991] PENEAU, J.P. (1991). Some problems relating to the numerical simulation of urban ambient environments. *Environment and Planning B: Planning and design*, 1991, volume 18, pp. 107-117. Second edition (first edition 1978), 435 p.

[Penwarden 1974] Penwarden A. D., (1974). Acceptable wind speeds in towns, *building science*, vol. 8, No. 3

W. Press, B. Flannery, S. Teukolsky, and W. Vetterling. *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, New York, 1990.

D. Peacemen and H. Roachford. The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations. J. Society of indust. Applied Mathematics, 3(1):28{41, 1955.

[Robinette 1972] ROBINETTE, G. (1972). Plants / people / and environmental quality. Washington, D. C., Department of the Interior, 140 p.

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

Le Recknagel - Manuel pratique du génie climatique - Recknagel, Sprenger, Hönnmann, Schramek - Editions PYC - 1995 – 1996

[Séguin 1975] SEGUIN, B (1975). Etude comparée des méthodes d'estimation D'ETP en climat méditerranéen du sud de la France (région d'Avignon). Annales Agronomiques, INRA, pp. 671-691.

U. Sievers. Verallgemeinerung der stromfunktionsmethode auf drei dimensionen. Meteorologische Zeitschrift, 4:3{15, 1995.

[Stefulesco 1993] STEFULESCO, C. (1993). L'urbanisme végétal. Paris : I.D.F, 323 p.

[Sievers 1995] Sievers U. (1995) Verallgemeinerung der stromfunktionsmethode auf drei dimensionen. Meteorologische Zeitschrift, 4:3 p15

[Spangenberg et al 2008] Spangenberg J. and Shinzato P.(2008) . Simulation of the inuence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of sao paulo. Revista da Sociedade Brasileira de Arborizacao Urbana, p 19

J. Spangenberg and P. Shinzato. Simulation of the inuence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of sao paulo. Revista da Sociedade Brasileira de Arborizacao Urbana, 3(2):1{19, 2008.

[Sacré 1983] SACRE C. (1983). Le confort dans les espaces extérieurs : analyse microclimatique. Nantes : CSTB, 138 p.

[Sacré et al. 1994] SACRE, C. et GANDEMER, J. (1994). Caractérisation microclimatique des espaces extérieurs, du point de vue du vent et de la température. Paris : Les Annales de la Recherche Urbaine, n° 61. Les saisons dans la ville

[Stolwijk et al. 1966] Stolwijk, J.A.J., Hardy, J.D., 1966. Partitional calorimetric studies of man during exposures to thermal transients. Journal of Applied Physiology 21

- [Thorson et al 2004] Thorsson, S., Lindqvist, M., & Lindqvist, S. (2004). Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Goteborg. *International Journal of Biometeorology*, 48, 149–156.
- [Vinet 2000] Vinet Jérôme (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. 233p.
- [Vian et al. 1983] VIAN, C *et al.* (1983). L'Alhambra de Grenade. Paris : Atlas, 80 p.
- [Vilain 1993] VILAIN, M (1993). La production végétale. Deuxième édition, vol 1. Paris : édition Lavoisier, 438 p. Collection Agriculture d'aujourd'hui.
- [Vinet et al 2000] VINET, J. et GROLEAU, D. (2000c). La modélisation des transferts radiatifs dans le logiciel Solene. Applications au microclimat urbain et au confort thermique en espace ouvert. In : 2ème Conférence IBPSA France 2000, Sophia Antipolis, 26 et 27 octobre 2000, pp. 29-35.
- [Vinet et al. 1999] VINET J., ANTOINE M. J., RAYMOND, F. and INARD, C. (1999). Modelling the impact of urban vegetation to analyse urban microclimate and outdoor thermal comfort. In : Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, November 8-12. Sydney, Australia : Macquarie University, 6 p. [CD-ROM].
- [Vinet *et al.* 2000a] VINET J., RAYMOND F. and INARD C. (2000a). A simulation tool to assess the impact of vegetation on the urban microclimate. In : Proceedings of International Building Physics Conference Tools for design and engeneering of buildings. September 18-21, Eindhoven, pp. 637-644.
- [Vinet *et al.* 2000b] VINET J., RAYMOND F. and INARD C. (2000b). Simulated impacts of trees on heat and wind flows in an urban open space. In : Proceedings of Third Symposium on the urban environment, Davis, California, 14-18 August 2000, American Meteorology Society : pp. 137-138.
- [Winslow et al 1937] WINSLOW, C.-E. A, HERRINGTON, L. P. and GAGGE, A. P. (1937). Relation between atmospheric conditions, physiological reactions and sensations of pleasantness. *Am. J. Hygiene* 26, pp. 103-115.
- [Wong et Jusuf 2007] Wong N. and S. Jusuf. (2007). Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics. *Building and Environment*, p 49-294

N. Wong and S. Jusuf. Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics. *Building and Environment*, 42:2949{2970, 2007.

ENVI-met, On line manual V.3.1 by Bruse M. and team. Available on <http://www.envi-met.com/>.