

## Effets des toitures vertes sur le microclimat urbain à Alger

Tarik Atik\*<sup>1</sup>, Karima Mehaoued\*<sup>2</sup>, Aicha Boussoualim\*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut d'Architecture et d'Urbanisme, Université Saad Dahleb de Blida, Algérie  
Route de Soumaa, BP N°02, 0900 Blida, Algérie

\*[tak\\_atik@yahoo.fr](mailto:tak_atik@yahoo.fr)

<sup>2</sup> Département d'Architecture, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie  
Route de Hasnaoua BP N°17 Tizi-Ouzou 15000, Algérie

\*[karima\\_mehaoued@yahoo.fr](mailto:karima_mehaoued@yahoo.fr)

<sup>3</sup> Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU)  
Route de Beaulieu BP N°177 El-Harrach, 16200 Alger, Algérie

\* [a\\_boussoualim@hotmail.com](mailto:a_boussoualim@hotmail.com)

---

*RESUME. L'augmentation en surface d'espaces urbains minéralisés et le peu de place laissé à la végétation ont produit dans la ville d'Alger la surchauffe des températures en été. Ceci nous a conduits à chercher et à connaître l'impact qu'aurait la végétalisation des toitures sur l'amélioration du microclimat urbain et le confort thermique durant la saison estivale au centre ville de la capitale. Afin d'arriver à notre but, nous avons utilisé le logiciel tridimensionnel non hydrostatique ENVI-met 3.0 développé par Michael Bruse. Ce freeware nous a servi dans la simulation du site d'étude à travers deux scénarii (Toitures minérales, Toitures vertes) pour la journée d'été du 08 Août 2008. Par la suite, nous avons utilisé les résultats des deux simulations pour l'examen de l'indice de confort thermique PET (Température physiologique équivalente) en employant le programme PET\_neu de Peter Höppe. A travers cet article, nous avons également analysé et expliqué les résultats obtenus en les comparant à d'autres recherches ayant utilisé divers logiciels et programmes d'études dans différentes régions du monde.*

*MOTS-CLÉS : toiture verte, microclimat, confort thermique extérieur*

---

*ABSTRACT. The increase of mineralized urban spaces surface and the little place left to vegetation have made in Algiers city an overheating of summer temperatures. This fact led us to seek the impact that could have green roofs to improve the urban microclimate and the thermal comfort during summer in the city downtown. Therefore, we used the non-hydrostatic three-dimensional software ENVI -met 3.0 developed by Michael Bruse. we used This freeware to simulate the study site through two scenarios (mineral roofs , green roofs ) for the summer day of August 8, 2008. After that, we employed the simulations results for examining the thermal comfort index PET (physiological equivalent temperature) by using the PET\_neu program developed by Peter Höppe . Through this paper, we have also analyzed and explained the results by comparing them to other researches which have used different softwares programs in various world regions.*

*KEYWORDS: green roof, microclimate, outdoor thermal comfort.*

---

### 1. INTRODUCTION

L'évolution intensive des villes a engendré un urbanisme minéral ayant une maigre part de surfaces rafraichissantes telles que la végétation et l'eau. L'activité dans les espaces urbains (circulation automobile, chaleur dégagée des groupes de climatisation...etc.) a elle aussi participé dans l'extension de l'urbanisation et à la création d'un climat particulier à la ville. Pour les espaces à forte densité urbaine, les toitures effectuent la majeure partie de l'absorption, de la réflexion et de l'émission du rayonnement solaire, ce qui fait d'elles d'importantes sources de surchauffe et d'inconfort à l'intérieur

et à l'extérieur du bâti. Afin de remédier à ces malaises, plusieurs adaptations ont été réalisées à l'exemple des toitures réfléchissantes et des toitures vertes. Pour ces dernières, un regain d'intérêt est constaté dans plusieurs grandes villes du monde. D'ailleurs, elles sont particulièrement recommandées pour les sites densément urbanisés en raison de leurs apports pour le rafraîchissement de la température ambiante. Ainsi, différentes recherches ont étudié cet apport dans des villes ayant un climat chaud à l'exemple du Singapour où les chercheurs Wong N. H. et al (2002) ont constaté par des mesures sur site une atténuation de 4,05°C de la température de l'air à 1,0m au-dessus de la toiture.

La végétalisation rafraîchit également la température à la surface des toitures tel qu'il a été démontré dans les simulations faites par Alexandri E. (2002) en utilisant le logiciel Phoenics pour le climat méditerranéen d'Athènes et en enregistrant une baisse de 19.9 °C. D'autres études ont employé le logiciel ENVI-met et ont présenté respectivement comme résultats pour Bruse M., Skinner C. J. (2000) et Osmond P. (2004) la réduction des températures à la surface des toitures arrivant à 1,4°C pour le climat océanique de Melbourne et à 0,5°C pour le climat subtropical de Sydney.

Quant à l'effet des toitures vertes sur le confort thermique extérieur, il a été traité à travers quelques recherches pour les climats chauds en utilisant différents indices et méthodes :

- Alexandri E., Jones P. (2004) ont évalué l'indice de confort thermique PET (Température physiologique équivalente) et ont constaté l'amélioration de la perception thermique pour les climats : chaud et sec d'Athènes, chaud et aride de Riad et enfin chaud et humide de Bombay.
- Uttara P., Chalfoun N.V. (2008) ont utilisé le programme OUTDOOR© pour évaluer le confort thermiques en utilisant les paramètres MRT (Température radiante moyenne) et PMV (Vote moyen prévisible) adapté pour un environnement extérieur de Gagge, Foblets, et Berglund (1986). Leur recherche a consisté à améliorer la sensation thermique au-dessus de la toiture verte dans le climat chaud et aride d'Arizona en y ajoutant tout autour des dispositifs de rafraîchissement tels que l'ombre et l'eau.

D'autres apports sont également réalisés par les toitures vertes dans les villes à l'exemple de l'atténuation de l'îlot de chaleur, la réduction de la consommation d'énergie due à la climatisation, l'amélioration de la gestion des eaux pluviales et l'amélioration du confort visuel.

## 2. SITE D'ETUDE

Nous avons conduit cette recherche dans le centre ville d'Alger au niveau de l'hôpital Mustapha Bacha dont l'importance se conjugue à l'échelle territoriale et régionale, d'où le nombre important de ses usagers. S'agissant du site étudié, nous avons retenu la partie sud-est de l'hôpital en raison de ses caractéristiques favorisant le réchauffement de l'espace urbain :

- Situation dans le centre ville connaissant la formation de l'îlot de chaleur urbain.
- Surchauffe des températures du site d'étude arrivant à un écart de 5,3°C vers 3h00 par rapport à celles de l'ONM (Office National de la Météorologie) dans la banlieue d'Alger.
- Faible ratio (6%) de la surface au sol couverte par la végétation par rapport à celle du site d'étude.
- Importance du trafic routier près du site.

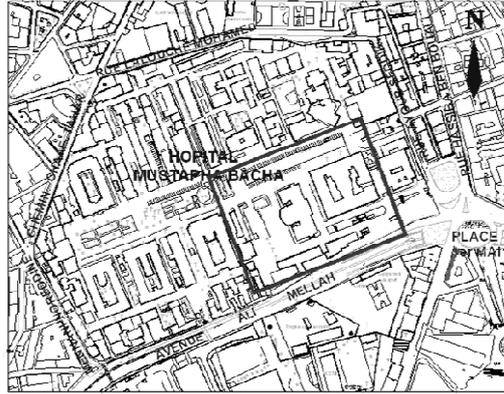


Figure 1: Plan du site étudié à l'hôpital Mustapha Bacha

Le site d'étude comporte des blocs occupant des surfaces importantes : Service des "Urgences" situé au centre et le "CPMC" (Centre Pierre et Marie Curie) à l'est. Les autres bâtiments sont situés au sud tels que la crèche, l'épidémiologie et à l'ouest à l'exemple du poste sécurité et l'incinérateur. Il est à noter que l'espace étudié comporte au nord l'axe central boisé de l'hôpital, et au sud à côté du bloc « Sécurité »; l'appareil de mesure de la qualité de l'air ST1 de l'agence Samasafia.

### 3. METHODE DE RECHERCHE

Afin d'étudier l'impact de la végétalisation des toitures sur les paramètres microclimatiques, nous avons comparé deux scénarii de simulation du site d'étude pour la journée estivale du 08 Août 2008 de 6h00 jusqu'à 21h00. Le premier scénario Simul1 comprend des bâtiments couverts par des toitures minérales en gravillons. Quant au deuxième scénario Simul2, le bâti est couvert par des toitures vertes possédant un substrat en terre profond de 50cm et du gazon ayant une hauteur de 50cm. Toutefois, ENVI-met ne simule pas la présence d'eau dans le substrat mais uniquement l'effet d'ombre de ce dernier et la transpiration des plantes. S'agissant de la végétation simulée, elle se caractérise par la valeur de son albédo de 0,2 et le ratio de sa densité foliaire  $0,3 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

Données du site d'étude	
Coordonnées géographiques	36.41° nord, 03.13° est
Date et période de simulation	08/08/2008, 24 heures
Vitesse du vent à 10 m	1,11 m/s
Direction du vent	127°
Température de l'air initiale	302,65 K (29,5°C)
Humidité relative à 2m	67 %
Humidité spécifique à 2500 m	3,61 g/Kg
Albédo des murs	0.5
Albédo des toitures	0.08

Tableau 1: Paramètres utilisés pour le lancement de la simulation

Pour la simulation, ENVI-met ne permet d'avoir que des toitures plates ayant les mêmes caractéristiques techniques. Cependant, il est possible de simuler des toits entièrement ou partiellement végétalisés. Pour mener cette recherche, nous avons placé six récepteurs sur le fichier des entrées (.in) du logiciel ENVI-met afin d'enregistrer et de comparer les paramètres microclimatiques : Les récepteurs C1, C2 et C3 sont mis au-dessus du sol à proximité d'un bâtiment du côté de l'axe principal de l'hôpital. Quant aux récepteurs C4 et C5, ils sont posés respectivement au-dessus des blocs "CPMC" et "Urgences" et nous serviront à l'étude de l'effet des toits verts sur le microclimat et le

confort thermique. Enfin, Le récepteur de référence R est placé au même endroit de la station de mesure ST1.

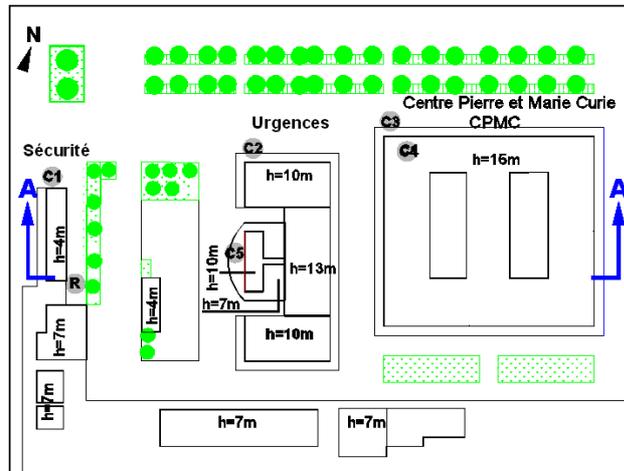


Figure 4: Plan de situation des récepteurs dans le site d'étude

#### 4. RESULTATS DES SIMULATIONS DU MICROCLIMAT

##### 4.1. EFFET DES TOITURES VERTES SUR LA TEMPERATURE DE L'AIR

Pour Simul2, la température a baissé jusqu'à 0,4°C vers 9h00 pour le récepteur C4 au niveau de la toiture, alors que pour 1m plus haut, la réduction est moins importante (0,12°C). Le premier écart enregistré est le résultat de la transpiration des plantes et aussi de l'ombre de ces dernières. D'ailleurs, la MRT y est sensiblement réduite le jour jusqu'à un écart de 7°C à 9H00. De même que pour le même moment, un léger rafraichissement de 0,2C° est noté à 1,20m du sol pour le récepteur C2 à cause de l'advection de l'air rafraichi en provenance des toitures et à l'ombre du bâtiment adjacent.

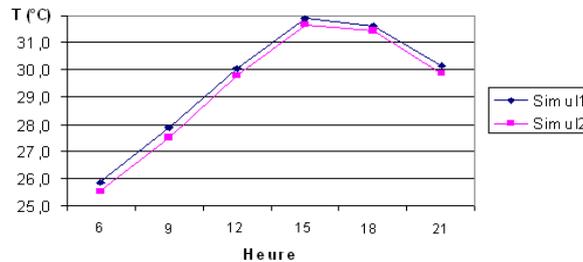


Figure 2 : Température de l'air des scénarios simulés / Récepteur C4

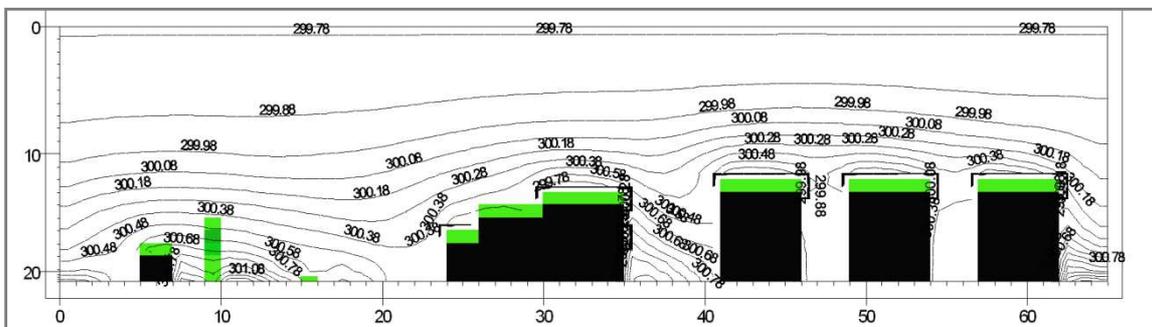


Figure 6: Température de l'air du scénario Simul2 (Toiture verte) pour l'axe A-A à 9:00  
Intervalle entre Isoligne 0.1k (1°C = 274.15 K)

#### 4.2. EFFET DES TOITURES VERTES SUR L'HUMIDITE RELATIVE

La transpiration des plantes a engendré une légère augmentation de l'humidité relative (1.9%) à 9h00 pour le récepteur C4 au-dessus du bloc CPMC. Cet écart diminue à partir de la mi-journée à cause de l'augmentation du rayonnement solaire et de la température favorisant la dilatation de la vapeur, ce qui est à l'origine d'un apport négligeable de 0.5 % à 18h00. L'humidité relative dépend aussi de la distance par rapport à la végétation et de l'importance du rayonnement solaire, d'où l'écart enregistré de 0.3% à 9h00 et 0.1 % à 18h00 à 1m au-dessus de la toiture. Ce constat est aussi effectif pour les emplacements ombragés le matin au-dessus du bloc Urgences où une légère augmentation en humidité arrive à 1 % pour le récepteur C5 vers 9h00. La végétalisation dans le deuxième scénario a aussi participé à humidifier légèrement l'air au-dessus du sol suite à l'advection de l'air en provenance des toitures, ce qui a donné un écart maximal de 0,7 % pour le récepteur C2 vers 9h00.

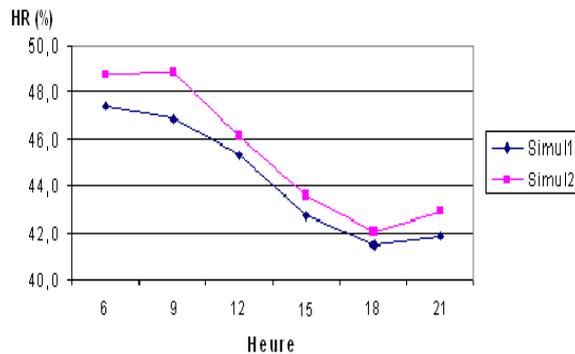


Figure 3 : Humidité relative des scénarios simulés / Récepteur C4

#### 4.3. EFFET DES TOITURES VERTES SUR LA VITESSE DE L'AIR

La densité foliaire et la hauteur du gazon des toitures vertes nous confèrent la possibilité d'observer pour le récepteur C4 la réduction de la vitesse du vent arrivant à 0,7m/s à 6h00. Il est à noter que l'effet du gazon sur la vitesse du vent se limite au niveau de la toiture et à son entourage immédiat.

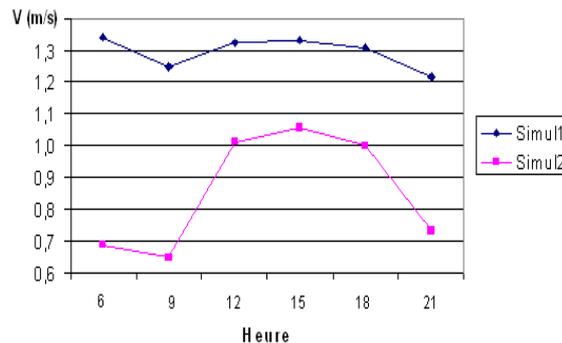


Figure 4 : Vitesse du vent des scénarios simulés / Récepteur C4

#### 4.4. ANALYSE DES RESULTATS

Afin d'expliquer les résultats, nous les avons comparé avec deux recherches proches de notre thème ayant utilisé le logiciel ENVI-met. Les travaux de Osmond P. (2004) à Melbourne et Bruse M., Skinner C. J (2000) à Sydney ont connu la réduction des températures au niveau des toitures arrivant respectivement à 1,4°C et 0.5°C, alors que pour notre recherche, l'écart maximum enregistré est de 0.4°C. Nous avons constaté plusieurs différences des paramètres entre les trois recherches à

commencer par les spécificités des microclimats et des sites. Ainsi, la simulation de Melbourne bénéficie d'un certain nombre d'éléments favorisant l'obtention de meilleurs résultats tels que:

- Le rapport de la surface des toitures vertes par rapport au site étudié est de 45%, alors que pour notre recherche, ce ratio est de 23 %. D'ailleurs, Izard J.L et Guyot A. (1979) citent que la végétation doit couvrir un minimum de 30% de la surface urbanisée en ville pour obtenir un effet sur le plan thermique et hygrothermique du microclimat.
- La configuration urbaine du bâti à Melbourne comprend des surfaces minérales peu importantes et des bâtiments étroitement espacés ayant une hauteur de 11 à 13m. Tandis que pour notre recherche et celle d'Osmond (2004), les surfaces imperméables au sol sont plus importantes et les constructions sont bien distantes.
- La ville de Melbourne à un climat sec, ce qui favorise d'après Kanellopoulou K. (2008) plus de rafraîchissement pour la toiture végétalisée. Alors que pour les deux autres sites, il fait plus humide en raison de l'influence de la mer pour Alger et du climat subtropical à Sydney.

Enfin, Il est aussi utile de noter qu'ENVI-met 3.0 ne simule pas l'inertie, ce qui fausse la lecture des résultats en fin de journée lorsqu'il n'y a plus de soleil.

## 5. EFFET DES TOITURES VEGETALISEES SUR LE CONFORT THERMIQUE

Nous avons aussi étudié l'effet qu'aurait la végétalisation des toitures sur l'indice de confort thermo-physiologique PET au-dessus des toitures et du sol en utilisant le programme PET\_neu.

### 5.1. IMPACT DES TOITURES VEGETALISEES SUR LA MRT

La MRT est incluse dans la majeure partie des indices de confort des espaces extérieurs, cette valeur est considérée comme le paramètre d'entrée le plus important du bilan énergétique pour le temps ensoleillé. Son intérêt pour notre recherche figure dans l'évaluation du PET.

Dans les résultats, les toits verts n'ont pas eu d'effet notable sur la MRT à l'exception de l'emplacement ombragé le matin du récepteur C5 où une réduction de 12,22°C est enregistrée à 9h00. Nous pouvons expliquer ce résultat par le fait que la végétation réduit les rayonnements d'ondes longues en diminuant la température à la surface de la toiture et aussi à l'effet de l'ombre du mur adjacent qui atténue les rayonnements (directes, réfléchis et diffus) émis par le soleil.

### 5.2. IMPACT DES TOITURES VEGETALISEES SUR LA PET

Pour étudier l'indice de confort thermique PET, nous avons utilisé le programme PET\_neu élaboré par Höpfe P. en 1996. Ce programme a aussi été employé par Alexandri E., Jones P. (2008) pour évaluer le confort thermique au-dessus des toits verts. Afin d'évaluer cet indice au-dessus des toitures, nous avons choisi l'emplacement des récepteurs C4 et C5. Pour le premier, les résultats sont presque semblables pour les deux scénarios où l'écart arrive au maximum à 0,12°C vers 9h00. Pour le récepteur C5, la végétalisation a permis une réduction notable du PET (-5,64°C) à 9h00 et l'amélioration de la sensation thermique de "Chaud" vers "Doux", ce qui est dû à la réduction de la MRT. Tandis que pour le reste de la journée, l'évolution des deux courbes de PET est presque similaire. S'agissant du confort thermique au-dessus du sol, l'évolution de l'indice PET est semblable pour les deux scénarios au niveau du récepteur C2 et l'écart entre les deux valeurs reste minime sauf à 12h00 où nous avons enregistré une différence de 2,07°C.

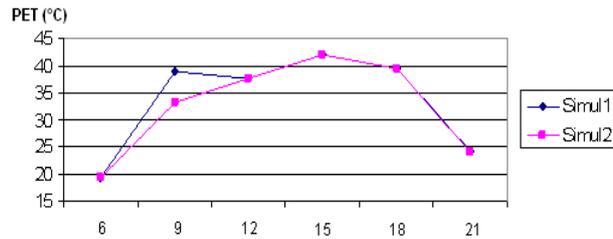


Figure 5 : PET des scénarios simulés / Récepteur C5

Bien que l'amélioration du confort thermique soit peu importante, nous avons enregistré pour les emplacements C5 et C2 des réductions notables du PET respectivement à 9h00 et à 12H00. Ceci nous a démontré que la toiture verte peut participer dans l'amélioration du microclimat tout en étant dépendante de ses propres caractéristiques, du microclimat et de la configuration urbaine. D'ailleurs, Uttara P., Chalfoun N.V. (2008) ont utilisé l'ombre comme dispositif contribuant dans l'amélioration du confort au dessus des toits verts. De même qu'Alexandri E., Jones P. (2008) ont associé les toitures vertes aux murs végétalisés pour obtenir un meilleur indice de la PET au-dessus du sol

### 5.3. ANALYSE DES RESULTATS

Nous avons comparé nos résultats de l'indice PET avec ceux d'Alexandri E., Jones P. (2008). Ces derniers ont simulé le microclimat au-dessus d'un toit vert à Athènes par un modèle bidimensionnel et ont aussi étudié le confort thermique moyennant le logiciel PET\_neu. Leur recherche a montré une importante amélioration de l'indice PET en passant de la sensation "Très chaud" à celle de "Doux" durant l'après-midi. Nous pouvons expliquer les dissemblances des deux résultats par ce qui suit:

- Différence des modèles utilisés : ENVI-met est un modèle tridimensionnel alors que le modèle employé par Alexandri E., Jones P. (2008) est bidimensionnel. De plus, plusieurs autres paramètres pris en considération pour les deux simulations font la différence telle que l'évaporation du substrat des toitures végétalisées prise en considération dans les calculs du modèle bidimensionnel, alors que pour ENVI-met, ce paramètre n'est pas simulé. De plus, l'albédo du gazon est de 0.2 pour ENVI-met, ce qui est moins important par rapport à celui du modèle bidimensionnel ayant une valeur de 0.3.
- Conditions climatiques: A Athènes, il fait plus sec par rapport Alger ce qui favorise un meilleur effet de la transpiration des plantes sur l'amélioration du confort.

## 6. CONCLUSION

Pour notre recherche, les toitures vertes ont exercé un léger impact sur le microclimat. Les résultats obtenus mettent en évidence l'implication de quelques raisons relatives au site et au microclimat : La surface peu importante des toitures vertes par rapport à celle du site, la configuration espacée du bâti et le climat humide de la ville d'Alger. Parmi les motifs que nous avons cités, celui du ratio des toitures vertes par rapport au site est le plus marquant, ce qui a été également constaté par Osmond P. (2004).

Toutefois, les toitures vertes sont appréciables par rapport aux toitures minérales, vu que ces dernières favorisent la surchauffe des espaces au-dessus des bâtiments à cause de leur imperméabilité et faible albédo. De plus, les toitures minérales diffusent durant la nuit de l'énergie stockée le jour. Nous pouvons également citer quelques éléments satisfaisants dans notre recherche tels que l'association de la toiture verte à l'ombre pour favoriser une meilleure amélioration du microclimat et

du confort thermique; ce qui peut être bénéfique pour une toiture accessible. De même que la température à la surface d'une toiture verte est réduite, ce qui participe à la diminution de la surchauffe, les coûts de la climatisation et l'atténuation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain pour le cas de secteurs urbains ayant d'importantes surfaces en toitures végétalisées.

De ce fait, nous pensons que les toits verts ne peuvent pas constituer une alternative aux espaces verts, mais plutôt une solution palpable qui contribuerait au développement durable d'un microclimat urbain ayant peu d'espaces verts. Ainsi, l'adaptation du site aux différents paramètres tels que la configuration urbaine, les paramètres du microclimat, la végétation existante, le type de sol, la circulation des voitures et des piétons doivent être compris dans une combinaison de stratégies pour l'amélioration du microclimat et du confort thermique.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- Achour-Bouakkaz, Nawel. 2006. «La relation entre l'îlot de chaleur urbain, phénomène du changement climatique et la densité du plan bâti - Cas de la ville d'Alger ». Mémoire de magistère, Département d'architecture et d'urbanisme, Université de Constantine.
- Alexandri, Eleftheria. 2002. « The Effect of Green Roofs on the Urban Climate, A Quantitative Approach ». *PLEA 2001, 19e Conference*: 311-316.
- Alexandri, Eleftheria. Jones, Phil. 2004. « The Thermal Effects of Green Roofs and Green Façades on an Urban Canyon », *PLEA 2004 – 21e Conference*: 6p.
- Alexandri, Eleftheria. Jones, Phil. 2006. « Ponds, Green Roofs, Pergolas and High Albedo Materials; Which Cooling Technique for Urban Spaces? ». *PLEA 2006, 23eme Conference* : 512-517.
- Alexandri, Eleftheria. Jones, Phil. 2008. « Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates». *Building and Environment* 43: 480-493.
- Atik, Tarik. 2011 « Les toitures végétalisées à Alger, pour une contribution à l'amélioration du microclimat urbain méditerranéen ». Mémoire de magistère, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger.
- Bruse, Michael. Skinner, Carol J. 2000 «Rooftop greening and local climate: a case study in Melbourne. *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium, WMO/TD No. 1026*, World Meteorological Organisation: 6p.
- Izard, Jean-Louis, Guyot, Alain. 1979. *Archi bio*. Roquevaire: Parentheses.
- Kanellopoulou, Kleanthi. 2008. « Cooling performance of green roofs » *PLEA 2008, 25e conférence*, 7p.
- Osmond, Paul. 2004. « Rooftop “Greening” as an option for microclimatic amelioration in a high-density building complex», *Fifth Conference on Urban Environment*, 4p.  
[https://ams.confex.com/ams/AFAPURBBIO/techprogram/paper\\_79532.htm](https://ams.confex.com/ams/AFAPURBBIO/techprogram/paper_79532.htm)
- Rosenzweig Cynthia. et al. 2006. « Mitigating New York city's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces». 86th American Meteorological Society Annual Meeting.  
<http://www.giss.nasa.gov/research/news/20060130/103341.pdf>
- Uttara, Patil. Chalfoun, Nader.V. 2008. «Thermal Comfort Assessment of a Proposed Green Roof Design on Top of the College of Architecture and Landscape Architecture in Tucson, Arizona». *IBPSA-USA SimBuild*, The University of California at Berkeley, 8p.
- Wang, Nyuk Hien. et al. 2003. « Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment ». *Building and Environment* 38: 261 – 270.  
<http://www.giss.nasa.gov/research/news/20060130/103341.pdf>