



Impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique extérieur et la consommation énergétique dans les espaces publics extérieur

Cas d'étude (Ville de Sidi Okba)

Nassima Mouada

Département d'Architecture, Université Mohamed Khider - Biskra, Algérie

nissmouada@gmail.com

Résumé

Cette étude vise à ressortir les différentes stratégies d'adaptation climatique en période estivale à travers une analyse comparative de trois scénarios urbains représentant trois canyons urbains totalement différents en termes de géométrie urbaine, de nature de surface de captages solaire et de la densité végétale, pour atteindre cet objectif, une méthodologie reposant sur un couplage numérique a été utilisée. Le logiciel ENVI-met 4 pour évaluer le climat extérieur et le niveau du confort thermique extérieur, le logiciel Ecotect Analysis 2011 pour quantifier la demande énergétique des bâtiments en fonction de la nature de surface de captage solaire. Les résultats de ce travail ont montré une relation positive entre le niveau du confort thermique, la densité végétale et la réflectivité des surfaces urbaines, en revanche, une variation inversement proportionnelle a été enregistrée entre le niveau du confort thermique et le degré d'ouverture au ciel. Concernant la consommation énergétique, les résultats de la simulation numérique réalisée par Ecotect analysaient 2011 ont montré que plus la réflectivité des surfaces augmente, plus la demande énergétique pour des raisons de refroidissement d'air à l'intérieur de bâtiments devient faible.

Mots clés : géométrie urbaine – densité végétale – confort thermique – couplage numérique – consommation énergétique – rue canyon – ENVI-met 4 – Ecotect Analysis 2011.

1 INTRODUCTION

L'environnement urbain comme ensemble d'éléments physiques définis par sa forme tridimensionnelle contribue d'une façon considérable sur la transformation des microclimats et par conséquent sur la sensation thermique extérieure et la demande énergétique des bâtiments, afin de mieux comprendre l'interaction entre ces variables, des simulations numériques sont mises en œuvre pour évaluer d'un part le microclimat extérieur et d'autre part la consommation énergétique des bâtiments. Cependant, notre perception thermique qui fait appel à des paramètres physiques ou des phénomènes subjectifs est durement ressentie à une micro-échelle c'est-à-dire à l'échelle de l'espace public [1], ce qui permet d'obtenir un contexte urbain avec un environnement thermique très varié qui influence la manière avec laquelle nous utilisons ces espaces. Pour cette raison

on a choisi d'évaluer la qualité de l'environnement thermique, et d'analyser les raisons de l'inconfort thermique dans la plus simple représentation de la géométrie urbaine (canyon), à l'intérieur de ce dernier, les caractéristiques géométriques et la nature de surface de captage solaire constituent certains facteurs qui entraînent des modifications sur le microclimat des rues et participent pour une part importante à la demande énergétique des bâtiments, notamment en été. Plusieurs chercheurs prenaient ce modèle simplificateur de la forme urbaine comme objet d'étude. [SANTAMOURIS et al. 1999], on a pu constater que les températures maximales des surfaces à l'intérieur du canyon peuvent atteindre 53°C, alors que les minimales (en situation climatique équivalente) ne dépassent pas 25°C. Les deux surfaces opposées peuvent avoir une différence de température de l'ordre de 19°C. Ce qui montre

bien qu'avec les mêmes types de rues, l'orientation des études américaines [AKBARI et al.1992] ont montré qu'une augmentation de température de l'ordre de 0,5°C peut affecter une augmentation des demandes en air conditionné de 1,5 à 2%. Lors des saisons chaudes lorsque cette augmentation est de 1 à 2°C, la consommation en énergie électrique peut augmenter de 3 à 8% et encore plus en cas de brouillard [2]. Ali-Toudert [3] développe une approche méthodologique basée sur la simulation numérique pour étudier l'interaction entre le microclimat et les facteurs géométriques tels que le ratio H/L, l'orientation et d'autres facteurs liés à la nature de surfaces urbaines et le pourcentage d'ouverture des façades. Bozonnet [3] dans le cas d'une rue canyon méditerranéenne à Athènes le chercheur effectue une simulation numérique pour évaluer d'une part la demande énergétique liée aux transferts thermiques par conduction en façade pour des bâtiments climatisés et d'autre part l'impact relatif du fonctionnement de la climatisation sur les conditions de températures extérieures. [4] Rabah Djedjig effectue une étude à l'échelle d'une rue canyon pour évaluer l'effet de la typologie de parois et toitures végétalisés sur le microclimat urbain et par conséquent sur la performance énergétique des bâtiments, les simulations numériques et les données expérimentales montrent que la végétation permet d'améliorer la performance énergétique des bâtiments et de réduire les îlots de chaleur urbains. Maxime Doya [5] à travers une étude paramétrique le chercheur vise à étudier l'impact de la modification des revêtements de façades et de chaussées sur l'environnement thermique proche à l'échelle d'une rue canyon et sur la performance énergétique du bâtiment. En fonction de toutes ses recherches, notre étude vise à étudier et à évaluer l'environnement thermique à l'intérieur d'une rue canyon sous des conditions climatiques d'une région chaude et aride pour pouvoir par la suite ressortir l'effet de la géométrie urbaine définie par l'ouverture au ciel (SVF) et la réflectivité des surfaces urbaines sur l'environnement extérieur et sur l'environnement intérieur en matière de demande énergétiques des bâtiments.

1. CAS D'ETUDE

Cette recherche est appliquée au cas de la ville de Sidi-Okba, l'une des plus importantes oasis dans la région des Ziban, elle est située à une vingtaine de kilomètres au sud-est de la ville de Biskra, sa position géographique est limitée entre 34°45' au Nord, et longitude 5.54° à l'Est, son altitude est de 54 mètres au-dessus de la mer, elle s'étend sur une superficie de 254,55Km². Cette ville est considérée comme la capitale religieuse des Zibans, sa naissance est étroitement liée à la mort du conquérant martyr Okba Ibn Nafâa Al-Fihri aux

environs de l'ancienne ville romaine [Barade, 1949]. Au centre des oasis, Sidi Okba est cernée par des dizaines de milliers de palmiers, estimée en 2007 à 375 142 palmeraies. Du point de vue urbanistique, la croissance de la ville de Sidi-Okba pourrait être répartie en quatre grandes phases distinctes, la première phase est celle datant de la période précoloniale allant de sa naissance jusqu'à l'avènement des colons. La seconde phase est celle dite de la période coloniale (figure 2). La phase qui suivra est celle de la période post-indépendance. La dernière est celle qui débutera avec les années 80 jusqu'à aujourd'hui [6]. Le choix d'étude de cette ville est motivé par sa dynamique urbaine et sa transformation historique de la morphologie urbaine, qui offre une variété des indicateurs morphologiques affectant le microclimat à l'échelle urbaine et la consommation énergétique à l'échelle architecturale.



Figure 1 : Situation géographique de la ville de Sidi Okba



Figure 2 : différentes périodes d'évolution de la ville de Sidi Okba : 1) précoloniale, 2) coloniale, 3) postindépendance, et 4) contemporaine [6]

1.1 Climat de site

Le climat de Sidi-Okba est du type chaud et aride avec un indice d'aridité égale à 3,81, celle-ci est caractérisée par des étés chauds et secs et des hivers froids et secs, selon les données climatiques de la période (2005-2015) les valeurs montrent une variété de moyennes, avec une température moyenne maximale de 41,5°C enregistrée en juillet (le mois le plus chaud) et une température moyenne minimale de 6,8°C enregistré en janvier (le mois le plus froid), concernant les précipitations, la ville est remarquée par des précipitations moyennes annuelles rares, faibles et non régulières, elles n'ont pas dépassé 15 mm, la durée d'insolation est considérable pendant la période entre 2005 et 2015, le rayonnement solaire global atteint son maximum en mois de juillet avec une durée moyenne de 354,10 h. pour la vitesse d'air ; les mois de mars, d'avril et de mai sont les mois les plus ventés de la ville.

2.1 Présentation du cas d'étude

Pour notre étude, nous avons choisi d'analyser trois critères morphologiques reflétant d'une part la géométrie urbaine, le type d'aménagement d'espace et d'autre part la nature de surface de captage solaire, pour chaque critère nous avons relevé des indicateurs influant d'une manière considérable sur le climat à une micro-échelle, ces indicateurs sont : le facteur de vue du ciel (SVF), la réflectivité des surfaces urbaines (Albédo) et la densité végétale. Notre recherche consiste à analyser l'impact de ces trois indicateurs sur la modification microclimatique et le confort thermique extérieur à l'échelle urbaine ; en focalisant par la suite l'étude sur l'impact de la réflectivité des surfaces verticales sur la demande énergétique des bâtiments à l'échelle architecturale. Pour cette raison nous choisissons d'effectuer cette étude sur un modèle urbain simplifié d'une rue canyon située dans la ville de Sidi-Okba d'une longueur de 40 m et d'une hauteur moyenne de 12 m (figure 3), à l'échelle architecturale le bâtiment situé au centre et orienté à l'Est est pris comme cas d'étude (figure 4), il est considéré comme étant une maison de trois étages. Nous choisissons la pièce la plus importante de la maison (séjour) qui se situe au premier niveau comme une zone d'étude afin d'évaluer sa demande énergétique pour des raisons de refroidissement d'air pendant le mois le plus chaud de la ville de Sidi Okba (juillet). La démarche de la simulation numérique nous a permis d'effectuer des scénarios d'optimisation (Tableau 1) afin de ressortir le modèle optimal d'un canyon urbain en terme de microclimat à l'échelle urbaine et de la consommation énergétique à l'échelle architecturale.

Tableau 1 : les paramètres d'étude

	Albédo	Densité végétale%	SVF %
Scénario 1 Cas réelle	0.40	0	48
Scénario 2	0.70	15.75	39,36
Scénario 3	0.90	47.30	38,01



Figure 3 : L'emplacement du canyon dans le tissu urbain

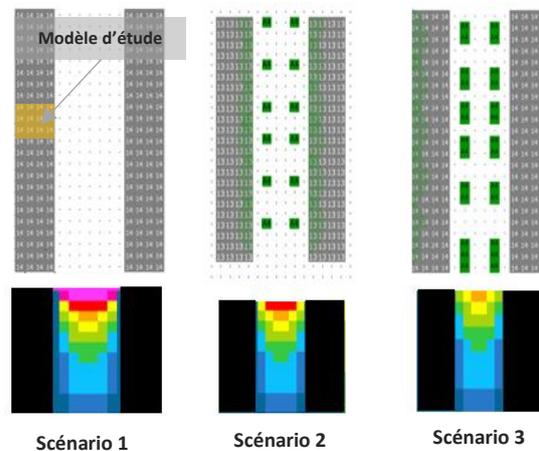


Figure 4 : Les trois canyons urbains et l'emplacement du modèle d'étude.

3 OBJECTIF DE L'ETUDE

L'objectif majeur du présent travail de recherche est d'analyser les différentes variables et indicateurs de la morphologie urbaine à l'échelle de l'espace public pour assoir une stratégie pour les développements urbains futurs, ceci sous des conditions climatiques spécifiques aux zones chaudes et arides du sud-est Algérien. Pour cette raison on a essayé de trouver la meilleure façon de concevoir un espace urbain qui s'adapte avec le

climat chaud et aride afin de minimiser le nombre d'heures d'inconfort thermique extérieur et la consommation énergétique des bâtiments.

4 METHODOLOGIE

Pour traiter ce sujet de façon plus précise, une méthodologie repose essentiellement sur deux approches, la première approche théorique basée sur l'analyse bibliographique en fonction des études scientifiques effectuées, la deuxième est une approche numérique qui consiste à combiner deux logiciels ; ENVI-met 4.0 et Ecotect Analysis 2011 [7], en premier lieu nous avons intégré le modèle réel d'un canyon urbain avec ses données climatiques dans le programme ENVI-met 4.0 , pour évaluer la variation microclimatique et le niveau du confort thermique extérieur à travers le calcul de l'indice PET, ENVI-met et un modèle numérique CFD qui est capable de simuler des interactions thermiques entre les surfaces et les végétations . Il utilise la dynamique des fluides et les fondamentaux de transfert de chaleur [8], les données microclimatiques sont contenues dans les fichiers des récepteurs qui sont des points placés à l'intérieur de la zone simulée et utilisés pour donner différents paramètres [9], nous avons effectué des modifications sur les paramètres d'étude afin de ressortir le modèle d'un canyon urbain le plus adéquat au climat aride, pour compléter cette étude nous choisissons d'analyser l'impact de la réflectivité des surfaces urbaines sur la consommation énergétique de bâtiments à l'aide de logiciels Ecotect analysis 2011 , nous avons évalué l'impact de la réflectivité des surfaces urbaines sur la consommation énergétique de la zone prise comme cas d'étude. Cette méthode nous a permis d'effectuer une variation des indicateurs liés à la géométrie urbaine et la nature de surface de captage solaire pour ressortir le modèle le plus adéquat d'un canyon urbain du point de vue du confort thermique extérieur et de consommation énergétique intérieure, cette évaluation se fait sous des conditions météorologiques spécifiques d'une journée typique au mois de juillet (le 11 juillet 2016) la journée la plus chaude de la ville de Sidi- Okba.

Tableau 3 : Evaluation des facteurs morphologiques et les flux d'énergie solaire globale

	Albédo	Densité végétale %	SVF %	Flux d'énergie solaire direct (Wh/m^2)
Scénario 1	0.40	0	48	599.72
Scénario 2	0.70	15.75	39,36	569.09
Scénario 3	0.90	47.30	38,01	333.32

Tableau 2 : paramètres de simulation dans Ecotec

Description d'espace	Dimension (4m*6m*4m) Type : maison -Séjour
Tenue vestimentaire	Tenue estivale 0,5 clos
Eclairage	300lux
Gains internes	Gains latents :4personnes 70 W/ Personne Gains sensibles : 240 W
Type de système de climatisation	Mise en marche lorsque la température opérative $T_{op} \geq 26^{\circ}C$
Temps d'occupation	Tout la semaine

5 RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. Evaluation de l'accessibilité aux flux solaires

Les fonctions du logiciel Envi met 4 nous permettent d'obtenir d'une part les valeurs de facteur d'ouverture au ciel pour chaque canyon urbain (Sky View Factor-SVF), donné par l'équation (1), de telle sorte que α est l'angle vertical déterminé par un obstacle à l'angle azimut π [7].

$$SVF = \frac{1}{360} \sum_{\alpha=0}^{360} \cos \alpha (\pi), \dots \quad (1)$$

D'autre part Envi-met 4 permet de ressortir le flux d'énergie solaire direct I_{dir} incident sur les surfaces et le flux d'énergie solaire diffusé I_{dif} par les surfaces urbaines, l'addition de ces deux paramètres permettent d'obtenir le flux d'énergie solaire globale I_g qui arrive aux surfaces, il peut s'écrire avec la formule (2) [11]

$$I_g = I_{dir} + I_{dif} \dots \quad (2)$$

Le tableau 3 contient les valeurs de SVF, la densité végétale, Albédo et les flux d'énergie solaire direct incident sur les surfaces pour les trois scénarios, les résultats nous montrent que le scénario 3 enregistre la moindre valeur de flux d'énergie direct globale qui arrive aux surfaces du canyon urbain avec une diminution de 24,58 % par rapport au scénario 1 représentant le cas réel, ce résultat est dû essentiellement à l'augmentation de la densité végétale en conjonction avec la faible ouverture vers le ciel ,ce qui empêche l'énergie solaire directe d'atteindre les surfaces du canyon pendant la journée. La figure 4 montre l'évaluation de flux solaire réfléchi et globale pour les trois scénarios , les valeurs sont issues de la simulation réalisée par

Envi met 4 , la simulation a été réalisée pendant 7 heures de la journée la plus chaude (11 juillet 2016) , les résultats ont prouvé que l'augmentation de la réflectivité des surfaces urbaines en relation avec une densité végétale considérable peuvent avoir un effet positif sur le microclimat urbain ; une augmentation de 0.5 d'Albédo des surfaces en relation avec une forte densité végétale estimée à 47,30% engendrent une augmentation de 58.10 % de flux d'énergie solaire réfléchi vers le ciel, donc le canyon du scénario 3 est caractérisé par des surfaces urbaines fraîches avec le moindre stockage d'énergie solaire par rapport aux autres scénarios , ce qui empêche l'augmentation de la température des surfaces et par conséquent la température d'air.

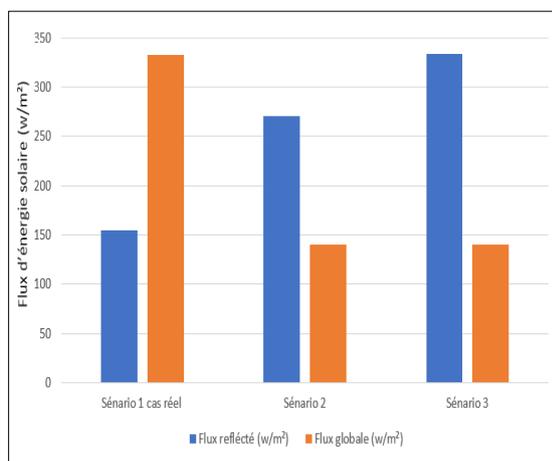


Figure 4 : l'évaluation de flux solaire réfléchi et globale pour les trois scénarios.

5. 2 Evaluation des paramètres climatiques

Le microclimat à l'intérieur d'un canyon urbain est influencé par plusieurs paramètres modificateurs à savoir: le rapport d'aspect, l'orientation, les matériaux de construction, la présence de végétation [12] la présentation des résultats de la simulation numérique effectuée par le programme Envi met 4 de façon à préciser la différence microclimatique estivale entre les trois scénarios . Les facteurs climatiques examinés sont : la température radiante TMR, la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse de l'air.

5.2.1 Température d'air et température moyenne radiante

Le graphe ci dessous montre l'évolution de la température de l'air et la température moyenne radiante au cours d'un jour d'été (11 juillet 2016) pour les trois scénarios .il s'avère que le scénario 3 est le plus favorable par rapport aux autres , car il enregistre des valeurs minimales de la température pendant la journée d'étude, ceci est dû évidemment à la faible exposition de ce dernier aux radiations

solaires à cause d'une part à la faible ouverture au ciel et d'autre part l'effet combiné de la haute réflectivité des matériaux et la végétation qui rafraîchit le microclimat à travers l'ombrage direct des surfaces, mais aussi de façon indirecte à travers de l'évapotranspiration opérée par les feuilles [13], par contre , le scénario 1 caractérisé par la grande ouverture au ciel et le manque total de la végétation représente des valeurs plus importantes de la température d'air et la température moyenne radiante , il s'avère alors que cette configuration favorise d'une façon considérable le captage de rayonnement solaire, ce qui permet d'augmenter les températures pendant la période de simulation. On pourrait alors dire que les températures sont proportionnellement variées avec l'ouverture au ciel, mais inversement variées avec la densité végétale et la réflectivité des surfaces urbaines.

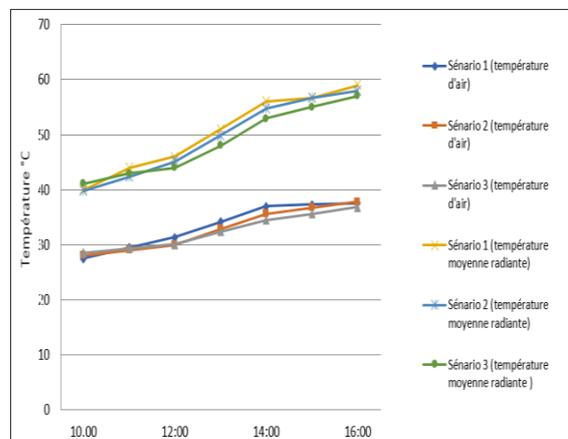


Figure 5 : Evaluation de la température d'air et la température moyenne radiante pour les trois scénarios.

5.1.3 L'humidité relative

La figure 6 montre l'évolution de l'humidité relative de trois scénarios, il est bien clair que l'abaissement de la température provoque une augmentation de l'humidité relative et vice versa. On peut constater une diminution considérable de l'humidité relative pour le scénario 1, en revanche le scénario 3 enregistre des valeurs plus importantes . Ce résultat est dû essentiellement à la contribution de la végétation à rafraîchir l'air à travers l'effet d'ombrage de feuilles des arbres et le phénomène d'évapotranspiration. Au cours du processus naturel d'évapotranspiration de la vapeur d'eau, l'air ambiant se refroidit en cédant une partie de sa chaleur pour permettre l'évaporation [11] , donc la présence de la végétation joue un rôle primordial dans la régulation de l'humidité relative .

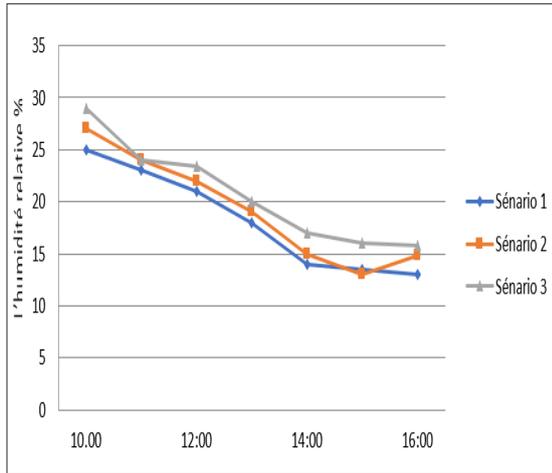


Figure 6 : Evaluation de l'humidité relative pour les trois scénarios

5.1.4 La vitesse de l'air

La figure suivante montre la variation de la vitesse d'air entre les trois scénarios, il s'avère que la vitesse de l'air et les turbulences sont plus importantes dans le scénario 1, elle atteint les 1.4 m/s, ce résultat est dû essentiellement à la grande ouverture au ciel et le manque de la végétation, ce qui facilite la circulation d'air à l'intérieur du canyon, en revanche, des valeurs minimales ont été enregistrées pour les deux autres scénarios, pour ces derniers la vitesse d'air ne dépasse pas les 0.96 m/s, cet affaiblissement est dû à la faible ouverture au ciel et la présence des arbres jouant le rôle d'obstacle au vent, ce qui permet de diminuer le potentiel de la ventilation naturelle.

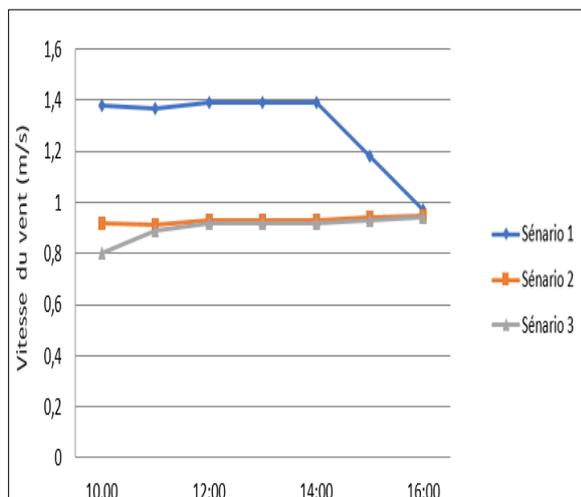


Figure 7 : Evaluation de la vitesse d'air pour les trois scénarios

6. Le niveau du confort thermique extérieur

La figure (8) montre l'évolution de l'indice de confort thermique PET d'une personne au milieu de trois rues canyon caractérisées par des conditions totalement différentes du point de vue de la géométrie urbaine, de la densité végétale et de la nature de surface de captage solaire, d'après les expériences des thermo-physiologues, des valeurs de 29 °C du PET peuvent être considérées comme valeurs confortables en milieux extérieurs. Ces valeurs ne sont cependant pas définies pour un climat chaud et sec. Aucune zone de confort pour des conditions extérieures en climat chaud et sec n'est en fait définie pour cet indice. Cependant, en se basant sur l'étude de terrain conduite par Ahmed (2003) à Dhaka durant les mois chauds et humides de l'été, Johansson (2006) fixe la valeur de PET à 33 °C comme limite d'inconfort supérieure dans son étude sur le confort thermique dans la ville de Fez (Maroc) en climat chaud et sec [14]. La lecture de graphe fait ressortir que durant la période entre 10h00 et 13h00 le scénario 3 présente un climat totalement compris dans la zone de confort supposée de 33°C (Ahmed,2003) avec des valeurs de l'indice PET variant entre 29,89 et 33 où les personnes ont des sensations confortables, pendant cette période les valeurs de l'indice PET pour le scénario 2 touchent le seuil d'inconfort thermique, en revanche les valeurs de PET pour le scénario 1 excèdent la limite supérieure d'inconfort thermique et atteignent des valeurs maximales variées entre 44 et 47°C, en effet durant cette période de la journée (10h00-13h00) des différences sensibles apparaissent d'une rue canyon à l'autre.

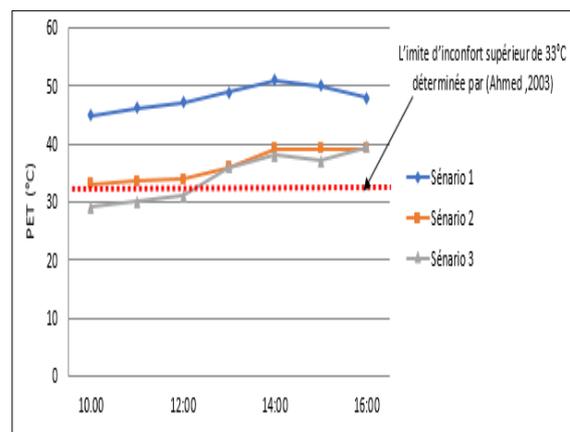


Figure 8 : Evaluation du niveau de confort thermique extérieur pour les trois scénarios

7. Impact de la réflectivité des matériaux sur la consommation énergétique

En milieu urbain, la formation et la transformation des microclimats sont affectées par la structure physique de la ville, mais aussi par l'énergie consommée par les bâtiments qui est ensuite transférée sous forme de chaleur vers l'extérieur. Cette chaleur amplifie la température extérieure déterminant les conditions du confort thermique pour les usagers des espaces publics [1], à l'échelle architecturale la consommation énergétique est influencée indirectement par la capacité des surfaces à réfléchir le rayonnement solaire incident, pour cette raison nous choisissons d'analyser les effets d'une modification de l'albédo des surfaces (toitures, façades) sur la performance énergétique de bâtiment. L'utilisation du logiciel Ecotect Analysis 2011 a permis d'évaluer la consommation énergétique pour des raisons de refroidissement d'air d'un bâtiment, pour notre cas nous choisissons un modèle d'une maison individuelle existant dans un canyon urbain (Scenario 1), ce modèle est composé de trois niveaux (R+2) et à orientation Est (figure 10), en considérant la pièce la plus importante dans la maison (séjour) comme une zone thermique pour estimer sa consommation énergétique pendant le mois de juillet. Le Tableau 02 ci-dessous récapitule les données utilisées pour les simulations des consommations d'énergie dans Ecotect [7]. La Fig.9 montre la consommation énergétique de la climatisation d'air pour les trois niveaux d'Albédo (0,4, 0,7, 0,9), on constate que la consommation énergétique est inversement proportionnelle avec l'augmentation de la réflectivité des surfaces, plus la valeur d'Albédo augmente plus la consommation énergétique diminue et vice versa.

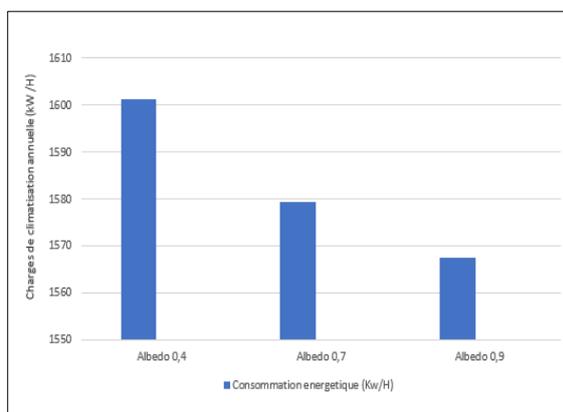


Fig.9 : la consommation énergétique annuelle de la climatisation d'air pour les trois canyons urbains.

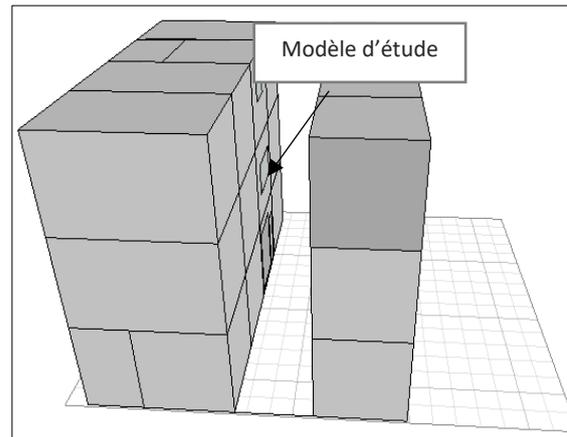


Fig.10 : Le modelé d'étude

CONCLUSION

Cette recherche a eu lieu pour étudier d'une part, l'évaluation de l'impact des paramètres morphologiques sur l'environnement thermique à l'échelle de la rue canyon. D'autre part, l'impact de la réflectivité des surfaces urbaines sur la demande énergétique de bâtiments, nous avons utilisé la technique de couplage numérique entre deux logiciels (Envie met 4 et Ecotect Analysis 2011) pour faire une étude comparative entre trois canyons urbains totalement différents du point de vue de la géométrie urbaine, de la densité végétale et la réflectivité des surfaces urbaines, cette étude a fait ressortir que le canyon urbain caractérisé par une faible ouverture au ciel et une densité végétale considérable en corrélation avec une forte réflectivité des surfaces (scénario 3) est le plus avantageux en matière de confort thermique extérieur, car sous ces conditions les valeurs de l'indice PET sont dans la zone de confort supposée de 33.0°C. D'autre part les résultats de la simulation effectuée par Ecotect permettent de ressortir la corrélation négative entre la réflectivité des surfaces urbaines et le recours aux climatisations actives, la simulation a pu aussi montrer qu'une augmentation de 30 % de l'albédo de surfaces engendre une diminution de 12 KW/H de la consommation énergétique pour la climatisation d'air.

REFERENCES

- [1] AHMED O, Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics. Étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec. Thèse pour l'obtention du grade de Maître des Sciences (M.Se.) Aménagement, architecture et des arts visuels. QUÉBEC Université Laval, 2007.162 p.

[2] MOHAMAD B. Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique. Mécanique, Thermique et Génie Civil. L'Ecole d'Architecture de Nantes, 2004, 344p.

[3] Bozonnet E, Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments : Cas de la rue canyon, Thèse de Doctorat, France : Université de la Rochelle, 2005, 177 p

[4] DJEDJIG Ra, Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain ; Sciences de l'ingénieur [physiques] / civil France : Université de la Rochelle, 2003, 174p.

[5] MAXIME D, Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense. Sciences de l'ingénieur [physiques]. France : Université de La Rochelle, 2010,264 p

[6] FARHI A et BELAKEHAL A., les opérations de revalorisation de l'ancien noyau de Sidi Okba : quels enseignements ? 2003.

[7] KARIMA M & al. Impact du microclimat sur la consommation énergétique cas d'immeubles de verre réfléchissant dans une rue canyon. Courrier du Savoir, N°21, pp.157-164, Novembre 2016.

[8] Tasneem Tariq, M. Arch, An ENVI-met Simulation Study on Urban Open Spaces of Dhaka, Bangladesh, Department of Architecture, Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET), Dhaka, Bangladesh.

[9] Huttner, S. (2012). Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met, Ph.D Thesis, University of Mainz, Germany.

[10] Gezer, N-A. (2003). The effects of construction materials on thermal comfort in residential buildings; analysis using Ecotect 5.0, Master of Science in the department of architecture, Turkey.

[11] Khaled At, Modelisation et simulation des microclimats urbains : Etude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des eco-quartiers. Thèse de DOCTORAT. Architecture, aménagement de l'espace. Ecole Centrale de Nantes, 2012 ; 318p.

[12] OKE.T.R, « *Boundary layer climates* », ed. Methuen & co. LTD, 1987.

[13] Rôles des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain : revue de littérature et tentative d'extrapolation au contexte montréalais