



Etude de l'impact des techniques de rafraîchissement passif de type « cool roof » sur la performance thermique et énergétique des bâtiments résidentiels en milieux chauds et arides – l'exemple de Biskra, Algérie.

Th3-047

Wafa ATHMANI¹ & Leila SRITI²

¹ Doctorante - Université Mohamed Khider Biskra-

² Enseignante-Chercheur - Université Mohamed Khider Biskra-

Laboratoire de Conception et de Modélisation des Formes et des Ambiances (LaCoMoFA)

Email : athmani.wafa@gmail.com

Email : sritileila@yahoo.fr

Résumé :

Dans un climat chaud et aride, le problème majeur qui cause l'inconfort thermique à l'intérieur des espaces, relève de l'exposition abusive de l'enveloppe aux radiations solaires intenses. Sachant que 50% des apports solaires reçus par le bâtiment sont transmis par la toiture, celle-ci doit être considérée comme un élément fondamental pouvant réguler les conditions de confort intérieur et, par conséquent, influencer la consommation énergétique utilisée pour la climatisation durant les périodes de surchauffe. Ce papier introduit la technique de rafraîchissement passif par le concept de « cool roof » comme une solution à la fois innovante et performante qui contribue à la réalisation des conditions de confort par l'élimination des apports de chaleur à travers la toiture. L'étude a pour objet d'examiner le potentiel du « cool roof » sur la performance thermique et énergétique des bâtiments ainsi que son rôle dans l'atténuation du phénomène de l'îlot de chaleur urbain. Le travail expérimental a été effectué à Biskra –climat chaud et aride- sous la forme d'une simulation à l'aide des programmes EnergyPlus et Envi-met. La modélisation a porté sur les types de toitures les plus utilisées dans les bâtiments résidentiels à Biskra ; une matrice fondée sur une analyse typologique des toitures et présentant les différentes alternatives des systèmes de construction des toits et leur revêtement a été élaborée. Les résultats obtenus montrent que la technique du « cool roof » est capable de réduire la température intérieure de 2°C à 3°C et la température surfacique interne et externe des toits de 3°C à 5°C. Ce travail confirme l'efficacité environnementale de la technique du « cool roof » à la fois à l'échelle urbaine et architecturale, du fait de sa contribution remarquable dans la réalisation du confort thermique par la réduction des températures ambiante et surfacique d'une part, et les économies d'énergie, d'autre part.

Mots clés : Rafraîchissement passif - Cool Roof - Efficacité énergétique - Performances thermique - Milieux chauds et arides – Bâtiments résidentiels.

1. Introduction

Le confort thermique en période estivale, a toujours constitué une préoccupation majeure dans les milieux chauds et arides. En effet, dans ce type de régions où prévalent des conditions climatiques hostiles, l'exposition excessive de l'enveloppe du bâtiment aux radiations solaires intenses est le problème majeur qui cause l'inconfort thermique ressenti par les occupants [1]. Cette situation, en l'absence d'un cadre bâti climatiquement performant, impose l'usage des appareils électriques de refroidissement pour des durées de plus en plus longues, ce qui augmente les émissions de gaz à effets de serre, qui à leur tour accentuent le phénomène d'îlot de chaleur urbain [2].

Depuis quelques décennies, nous assistons en Algérie à un étalement urbain incontrôlé et à une production de constructions énergivores indifférentes au climat. Dans les villes du sud algérien telle que Biskra, la consommation d'énergie par les bâtiments augmente en raison de la demande croissante générée par les besoins de climatisation. Aujourd'hui, le secteur résidentiel en Algérie représente 40% de la consommation totale d'électricité (fig. 1). [27].

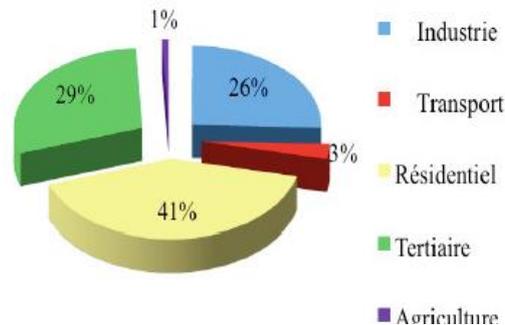


Figure 1 : La consommation d'électricité par le secteur résidentiel en Algérie par rapport aux autres secteurs ; (Source : Ministère de l'énergie et des mines, 2012)

L'enveloppe du bâtiment est à l'interface entre l'intérieur et l'extérieur et fonctionne comme une barrière thermique. Elle joue un rôle important dans la détermination de la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir un environnement intérieur confortable par rapport à l'environnement extérieur [3-4]. La toiture d'un bâtiment est l'élément le plus exposé aux rayonnements solaires, responsable de 50% du gain total de chaleur dans les bâtiments [4-5]. Par ailleurs, cet élément offre un important potentiel de rafraîchissement passif en raison de sa grande surface exposée au ciel qui peut fournir des économies d'énergies significatives et améliorer, notamment, les conditions thermiques des bâtiments non refroidis [6,7]. GIVONI, définit le refroidissement passif comme étant une stratégie basée sur une approche durable destinée à refroidir les bâtiments par des moyens naturels. Cette stratégie implique un contrôle des échanges de chaleur avec l'environnement afin d'offrir une température ambiante inférieure à celle du milieu extérieur ainsi qu'une faible consommation d'énergie.

L'objectif du présent travail est d'évaluer l'effet de la technique de rafraîchissement passif de type « cool roof » et d'examiner les possibilités de son utilisation sur les toitures de bâtiments résidentiels typiques relativement au contexte de la ville de Biskra. A cet égard, l'utilisation du refroidissement passif par la toiture a l'avantage de minimiser le stress thermique subi dans les bâtiments et son effet néfaste sur la santé et la productivité. Implicitement, ce dispositif permet de conserver l'énergie en réduisant la demande de pointe estivale en électricité tout en maintenant des conditions intérieures confortables.

2. Définition du concept de « cool roof »

Selon PARKER, le « cool roof » est une technique passive fondée sur une typologie de construction qui aide à réduire les besoins énergétique et thermique à partir de l'enveloppe du bâtiment, [14]. Généralement, la performance thermique des locaux est troublée par l'absorption solaire des toitures et selon SUEHRKE et al [15] sous un ciel clair, un taux de 20% à 95% du rayonnement solaire est absorbé par la surface de toit, d'où l'intérêt du « cool roof » (fig. 2).

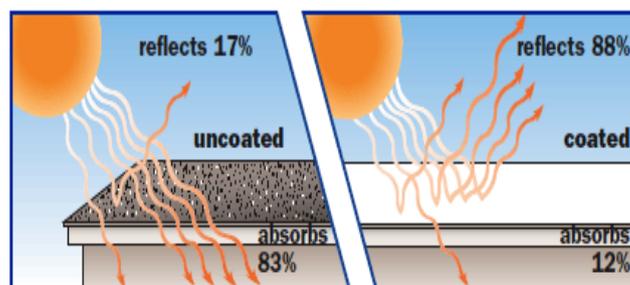


Figure 2 : concept de « cool roof » ; (Source : http://molsbeerroofing.com/Roofing_Blog/EntryId/317/What-can-a-Cool-Roof-do-for-you.aspx)

En effet, cette technique se base sur la capacité du toit à réfléchir le rayonnement solaire et d'émettre la chaleur, ce qui lui permet d'être plus frais qu'un toit conventionnel [8]. Urbaine et Roth [16] ont montré que pendant les journées chaudes, alors que la température des toits sombres typiques peut atteindre 66°C, celle d'un toit réfléchissant est aux environs de 28°C [17].

Les « cool materials » sont des matériaux qui n'augmentent pas sensiblement leur température de surface sous le rayonnement solaire [18]. Une forte réflectance solaire et émissivité thermique sont deux propriétés clés qui déterminent la température et le degré de fraîcheur d'un toit [19] :

- 1- réflectance solaire : haute capacité à réfléchir le rayonnement solaire incident sur le matériau. La réflectivité varie d'environ 0.1 (couleur noire) à 0.8 (couleur blanche).
- 2- l'émissivité thermique : haute capacité à rayonner la chaleur dans les longueurs d'onde infrarouge. Elle est comprise entre 0.8 et 0.9.

Par conséquent, l'application de cette technique induit un profil de température basse, ce qui réduit le flux de chaleur pénétrant dans le bâtiment par la toiture, abaisse la température moyenne de l'air intérieur et diminue la consommation de l'énergie électrique pour le refroidissement (fig. 3).

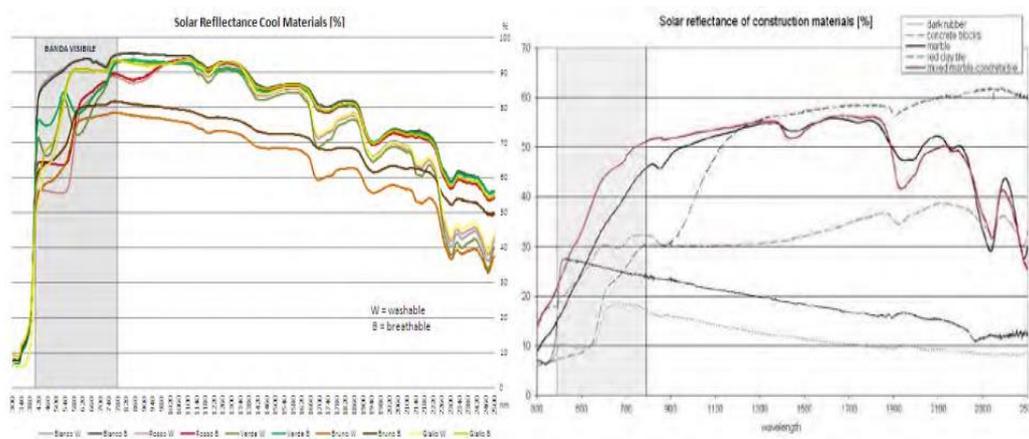


Figure 3 : Réflectance solaire [%] pour les « Cool materials » et les matériaux typiques.
(Source : E. Carnielo, A. Fanchiotti, M. Zinzi)

Élever la réflectance solaire d'un toit résidentiel typique (sombre) de 0,10 à 0,35 peut diminuer le refroidissement du bâtiment et consommation d'énergie de 7-15% [20] (fig. 4).

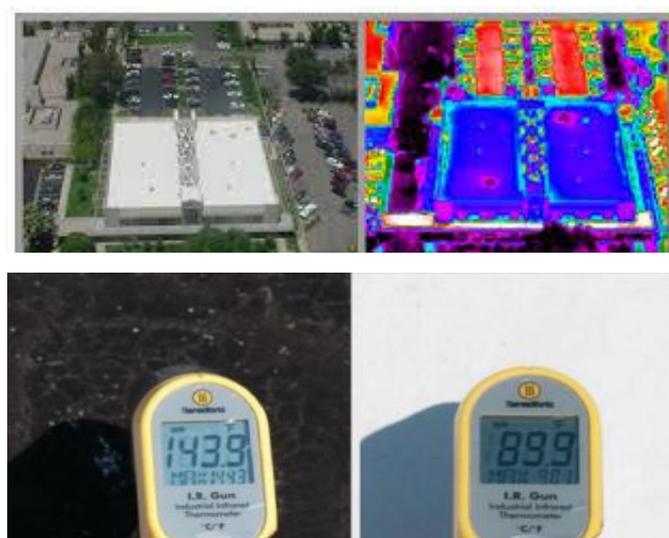


Figure 4 : Température des surfaces sombres VS la température des « cool roof » .
(Source : Urban and Roth, 2010)

Plusieurs avantages sont fournis par la technologie « cool roof » : à l'échelle urbaine, la diminution de la température de l'air extérieur du fait de la réduction de la quantité de chaleur transmise par les toits à l'environnement urbain, ce qui permet l'atténuer de phénomène de l'îlot de chaleur urbain [21-22]. A l'échelle du bâtiment, le « cool roof » améliore le confort thermique des espaces, limite l'utilisation des climatiseurs et réduit la consommation de l'électricité [23-24]. De plus, il aide à prolonger la durée de vie des toitures.

3. Le concept de « cool roof » : état de l'art

Le concept de « cool roof » est documenté par de nombreuses recherches et études scientifiques basées sur des analyses expérimentales et numériques pour des bâtiments résidentiels et non résidentiels. Ainsi, Synnefa et al. ont démontré que les surfaces brillantes des « cool roof » restent plus froides que les matériaux traditionnels pendant les conditions estivales [10]. Cette caractéristique fait que ces toits sont efficaces pour améliorer les performances thermiques des bâtiments, réduire la consommation d'énergie et fournir des avantages environnementaux supérieurs aux toits standards très isolés [11]. Pour sa part, Akbari dans ses recherches dans les climats chauds, a prouvé que l'augmentation de la réflectance solaire d'un toit de 0,2% à 0,6% peut réduire l'énergie de refroidissement d'un bâtiment de 20% [26].

Les résultats sont, également, intéressants pour les climats humides, comme le montre une étude expérimentale menée par Radhi et al sur les toits de Madras en Inde, où ils sont arrivés à démontrer qu'il était possible de maintenir la température ambiante de 2°C à 6°C inférieure à la température extérieure en utilisant des « cool roof » [12]. Plus généralement, le concept de revêtements « cool », appliqué dans diverses conditions climatiques, a prouvé que l'augmentation de la réflectance du toit réduit la charge de refroidissement de 18 à 93% et la demande de refroidissement de pointe dans les bâtiments climatisés de 11 à 27% [13].

Bien avant toutes ces recherches, Givoni [14,15] a étudié l'effet de la couleur des toits depuis 1968 au Technion à Haïfa. Sa première étude a révélé que les toits légers en béton peint en gris avec une température de l'air extérieur maximale d'environ 31°C, génère une température maximale de la surface externe moyenne d'environ 69°C. Lorsque le toit est peint en blanc avec une température maximale de l'air d'environ de 27 °C, la température moyenne de surface maximale extérieure était d'environ 27,5°C. Pour sa part, la température maximale du plafond était d'environ 25,5 °C pour tous les toits. Givoni a également montré que dans le désert, la différence de la température de la surface externe maximale entre un toit noir et un toit blanc peut être comprise entre 30°C - 40 °C, une différence qui peut être considérée comme très importante. Tous ces résultats prouvent qu'à l'échelle du bâtiment, les intensités d'incidence du rayonnement solaire sur le toit varient en fonction des propriétés thermo-physiques de ce dernier.

A l'échelle urbaine, une étude consacrée par Rossi et al. à l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain (UHI) a montré que dans les climats chauds, les « cool roof » de haute réflectance présentent un potentiel d'atténuation des îlots de chaleur urbains beaucoup plus élevés que les toits verts pendant la période estivale [25]. Dans le même contexte, une étude a révélé que la diminution du phénomène des îlots de chaleur urbains peut être principalement réalisée par la réduction des températures de surface, grâce à la modification des caractéristiques thermiques et radiatives des matériaux des surfaces urbaines [9].

En Algérie, la réglementation des bâtiments n'obligent pas le traitement des toits avec des « cool materials » bien qu'une telle technique soit la solution la moins coûteuse pour atteindre les performances énergétique et thermique requises. La présente recherche vise à évaluer la capacité des toits « cool roof » à apporter des solutions efficaces au problème de surchauffe dans les régions du sud algérien en prenant comme exemple la ville de Biskra.

4- Méthodologie

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'influence de la technique passive « cool roof » sur le confort thermique intérieur d'une maison individuelle typique soumise aux conditions climatiques chaudes et arides de Biskra.

Afin d'atteindre cet objectif une méthodologie rigoureuse a été mise en place, fondée sur :

- Les données climatiques de la ville de Biskra et, notamment, le mois le plus chaud qui a été déterminé à partir la méthode de « design month ».
- Une matrice a été élaborée regroupant les différentes typologies de toitures utilisées dans les constructions résidentielles privées à Biskra.
- Une simulation numérique réalisée à partir de deux logiciels : Envi-met et EnergyPlus.

1- ENVI-met version 3.0 est un modèle climatique à micro-échelle développé par Michael. Il tient compte de l'équilibre énergétique, de la circulation du vent et de tous les éléments météorologiques, comme la température de l'air, le rayonnement solaire et l'humidité de l'air.

2- EnergyPlus version 8.4.0 est un programme complet de simulation d'énergie que les ingénieurs, les architectes et les chercheurs utilisent pour modéliser à la fois la consommation d'énergie pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, l'éclairage et les températures des surfaces, opérative [29]. Le logiciel de simulation de construction Open Studio 1.9.0 qui travaille avec EnergyPlus a également été utilisé comme moteur de simulation. Cet outil a été développé par le Département américain de l'Énergie [28].

4.1. Analyse climatique de la ville de Biskra

La ville de Biskra est située au Sud-est de l'Algérie. Elle se trouve dans la partie nord du désert à une latitude de 34.8°, longitude 5.73° Est, et une l'altitude de 87m. Biskra appartient à une région classée aride où prédomine un climat chaud et sec avec des hivers froids et des étés chauds. La température maximale atteint 45°C durant le mois de Juillet, et la température minimale descend à 13°C en hiver durant le mois de Janvier. La température moyenne annuelle est de 37.3°C alors que l'humidité moyenne annuelle est de 40 %. Des précipitations très faibles sont enregistrées avec un maximum de 20mm/an, et une moyenne annuelle d'environ de 8.8mm /an. La forte intensité de rayonnement solaire est en juillet avec une insolation de 350kwh/m². Les directions des vents dominants sont Nord-ouest en hiver, Sud-est en été à une vitesse de 4 à 10 m/s (Fig. 5).

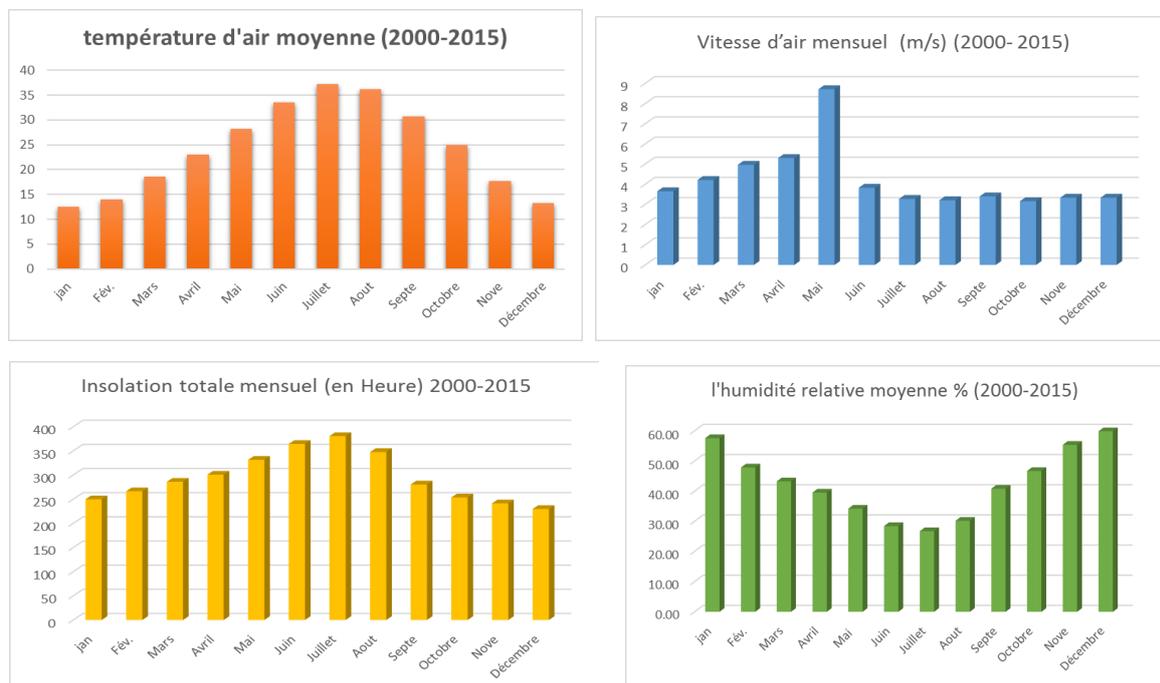


Figure 5 : Données météorologiques de Biskra ; Source : (Station Métrologique Biskra,2017)

4.2. Typologie des toitures

Dans cette recherche, l'étude sera effectuée sur les toits d'habitations individuelles. Pour sélectionner un échantillon représentatif des toits à étudier, on a réalisé une analyse typo-morphologique portant sur l'habitat individuel contemporain à Biskra. Une collection d'habitations individuelles a été réunie. Les maisons ont été choisies en fonction des caractéristiques matérielles, notamment, les matériaux de construction et les revêtements extérieurs des toitures les plus récurrents. La forme de la toiture n'a pas été prise comme variable puisque la

typologie de la maison individuelle à terrasse est la plus répandue à Biskra. On a donc restreint notre étude aux toits de forme plate. Six (6) toits standards ont été examinés pour évaluer l'effet du système de toiture sur la performance thermique de l'environnement bâti à Biskra. Une matrice, présentant les différentes alternatives de construction des toitures et de leur revêtement, a été élaborée.

Le Tableau 1(a) montre les matériaux des toitures et leur composition. Pour les revêtements, il s'agit de chape de ciment et de carrelage de couleur claire. Le Tableau 1(b) présente la matrice des différentes typologies des toitures et le système de codification élaboré pour les besoins de l'étude.

Typologie des dalles des toitures relevées à Biskra			
	Dalle pleine (Td)	Dalle en parpaing creux (Tp)	Dalle en entrevous en terre cuite (brique) (Tb)
Chape (ciment) Rc	<p>chape en ciment 7 cm Dalle pleine 20 cm Enduit en ciment 1.5cm</p>	<p>Dalle de compression 4cm Chape de ciment 7cm parpaings creux 16cm Enduit en ciment 1.5cm Poutrelles</p>	<p>Dalle de compression 4cm Chape de ciment 7cm Entrevous en terre cuite 16 cm Enduit en ciment 1.5cm Poutrelles</p>
Carrelage Rt	<p>carrelage 2 cm Dalle pleine 20 cm Enduit en ciment 1.5cm</p>	<p>Dalle de compression 4cm carrelage 2 cm parpaings creux 16cm Enduit en ciment 1.5cm Poutrelles</p>	<p>Dalle de compression 4cm carrelage 2cm Entrevous en terre cuite 16 cm Enduit en ciment 1.5cm</p>

Tableau 1(a) : Matrice présentant les différents traitements et matériaux de construction Utilisés au niveau des toits ; (Source : Auteur, 2017)

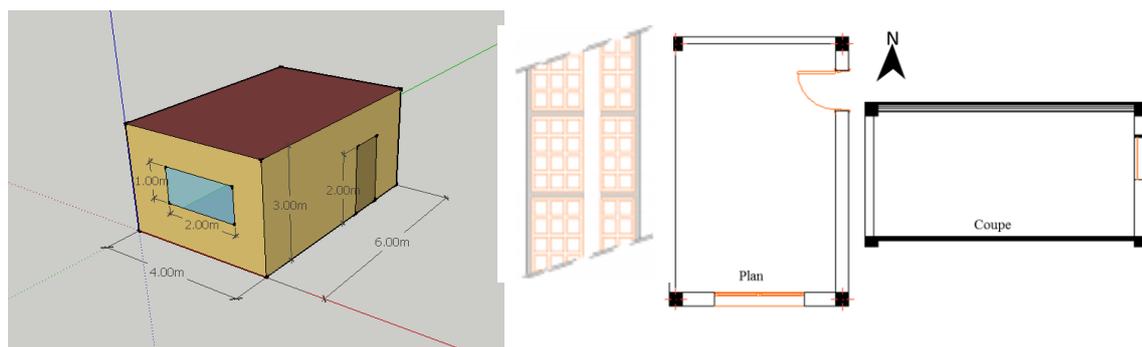
Traitements des toitures relevées à Biskra	Typologie des dalles de toitures			
		Dalle pleine (Td)	Dalle en parpaing creux (Tp)	Dalle à entrevous en terre cuite (brique) (Tb)
	Chape (ciment) Rc	TdRc	TpRc	TbRc
Carrelage Rt	TdRt	TpRt	TbRt	

Tableau 1(b) : Système de codage utilisé pour identifier les toitures ; (Source : Auteur, 2017)

4.3. Description du modèle de simulation

Un modèle virtuel a été développé pour servir de cas de référence à la simulation. Il s'agit d'un espace mono-zone d'une superficie de 24m² est de forme rectangulaire de 4m X 6m avec une hauteur de 3.00m. Le modèle est orienté Sud et s'ouvre sur l'extérieur avec 2 façades. IL est menu d'une fenêtre unique à vitrage simple de 1.00m x 2.00m avec un encadrement en bois léger. Les surfaces en contact direct avec l'extérieur sont la toiture et les deux façades. Le bâtiment étudié est supposé être en béton avec des doubles parois extérieures en brique de 30cm d'épaisseur et une toiture de différents revêtements et matériaux de construction choisis en fonction des paramètres de l'étude. Les tableaux 2 et 3 présentent les propriétés thermo-physiques et les paramètres d'input du modèle virtuel utilisé dans la simulation.

Géométrie et dimensions du modèle



Revêtement des toitures des maisons individuelles typiques



Revêtement en carrelage simple



Revêtement en chape de ciment

Tableau 2 : Paramètres conceptuels du cas de référence; (Source : Auteur, 2017)

Matériaux	Épaisseur (cm)	Conductivité thermique (W/m.k)	Densité (Kg/m3)	Chaleur spécifique (J/Kg.K)
Enduit de ciment	0.02	0.72	1860	840
Brique creuse	15	0.39	650	1000
	10			
Lame d'air	0.05	15 m ² .K/W		
Enduit de plâtre	0.02	0.57	1150	1000
Chape de ciment	0.05	1.4	2100	800
Carrelage	0.02	1.2	2000	800
Béton	0.10	1.34	2240	836.80
Parpaing creux	0.16	1.2	2400	947
Mortier de ciment	0.04	1	1900	1080
Cool Paint (0.1 absorption visible)	0.04	0.071	2100	800
Vitrage de la fenêtre	0.03	1.046	2300	836.8

Tableau 3 : Propriétés thermiques des matériaux utilisés dans le modèle de référence ; (Source : Auteur, 2017)

5. L'étude paramétrique

Rappelons que cette étude se focalise sur l'analyse thermique des maisons individuelles construites à Biskra, et tente d'évaluer le comportement de l'enveloppe de ce type de bâtiments sous l'effet des sollicitations climatiques particulièrement chaudes et arides. Plus précisément, l'analyse s'intéresse aux gains de chaleur pénétrant par le toit. L'analyse des données climatologiques de la ville de Biskra a permis de déterminer la période de surchauffe qui survient durant le mois de Juillet. Les simulations effectuées visent à tester des solutions de protection du toit contre les radiations solaires particulièrement intenses pendant la période estivale.

Les solutions préconisées relèvent des techniques de rafraîchissement de type « cool roof » afin de minimiser les gains de chaleurs au niveau du bâtiment et le phénomène de l'îlot de chaleur au niveau urbain.

5.1. Résultats au niveau urbain

La simulation a été effectuée en supposant que notre bâtiment était situé dans un tissu urbain dense. Le modèle a été créé avec l'éditeur de fichier d'entrée de zone du programme Envi-met. Pour évaluer l'impact des revêtements sur le microclimat urbain, deux configurations différentes ont été envisagées : la première avec un toit ordinaire (cas de base) et la deuxième avec un toit à propriétés radiatives élevées (cas cool roof).

- Cas de base : le modèle est défini avec des valeurs standards (béton). Les propriétés radiatives du bâtiment sont : albédo des toits = 0.3 ; albédo des murs = 0.2.
- Cas cool roof : tous les toits ont été recouverts de « Cool Paint » de haute réflectance solaire. Ce qui donne : albédos des toits = 0.9 ; albédo des murs = 0.2.

Les paramètres calculés, notamment : la température ambiante et la température moyenne radiante (TMR) sont présentés dans les tableaux 4 et 5.

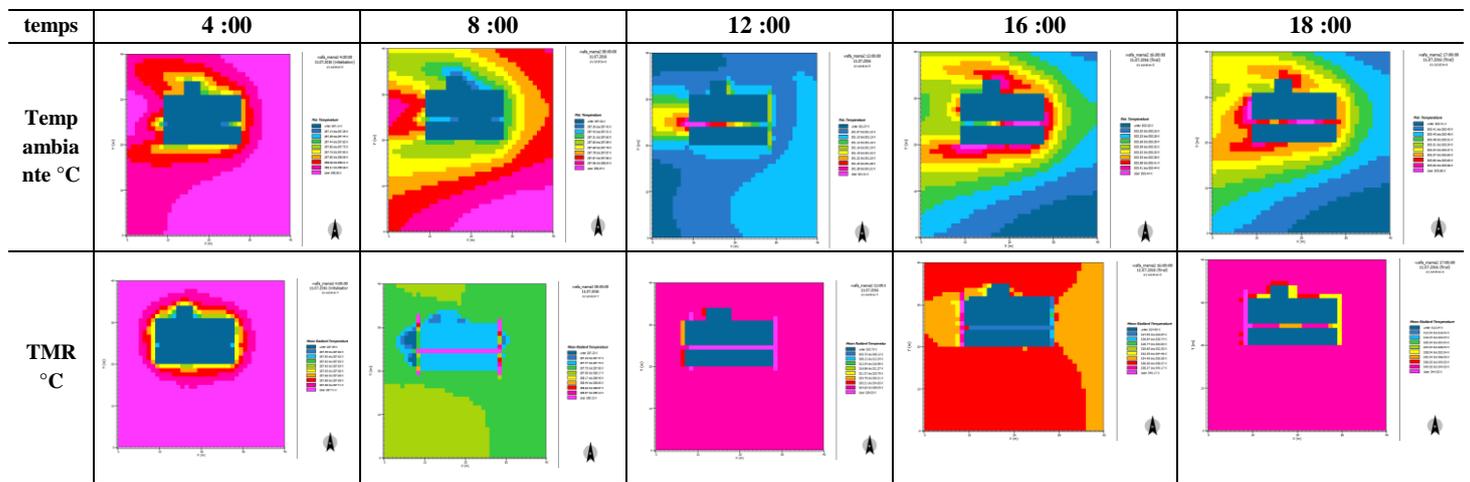


Tableau 4 : Résultats des températures pendant le mois de Juillet pour le Cas de base ; (Source : Auteur, 2017)

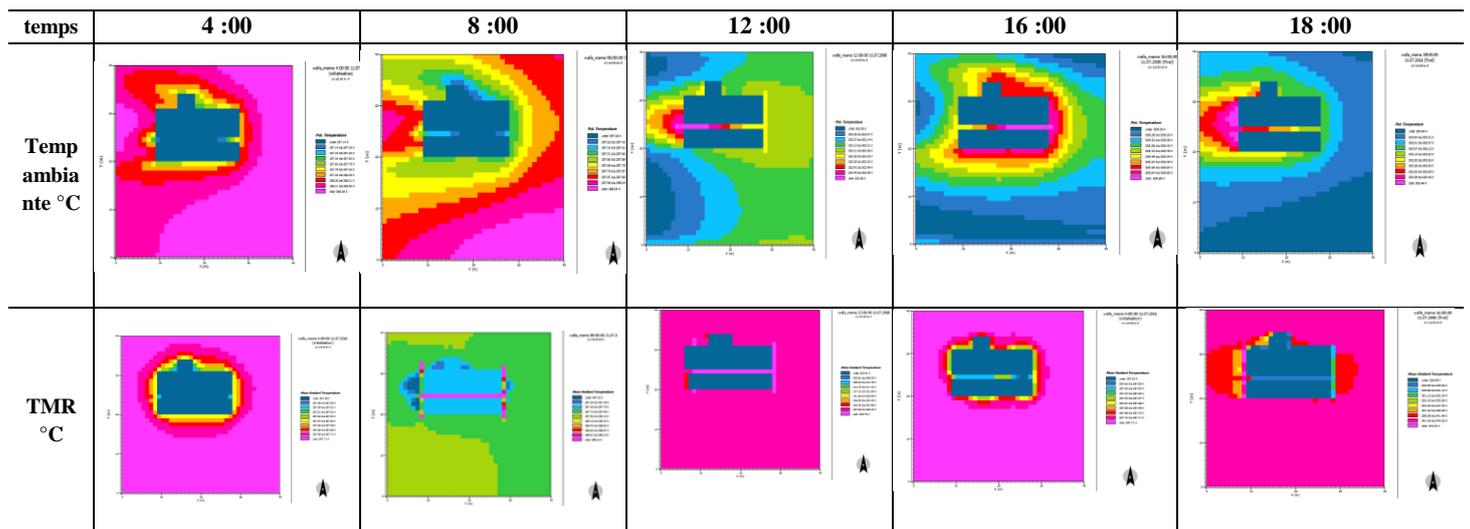


Tableau 5 : Résultats des températures pendant le mois de Juillet pour le Cas Cool Roof (Envi-met V3) ; (Source : Auteur, 2017)

La figure 5 présente des histogrammes qui permettent de comparer entre l'évolution de la température ambiante ($T^{\circ}\text{amb}$) et la température radiante moyenne (TMR) au cours du mois de Juillet avant et après l'application de la solution passive choisie (cool roof).

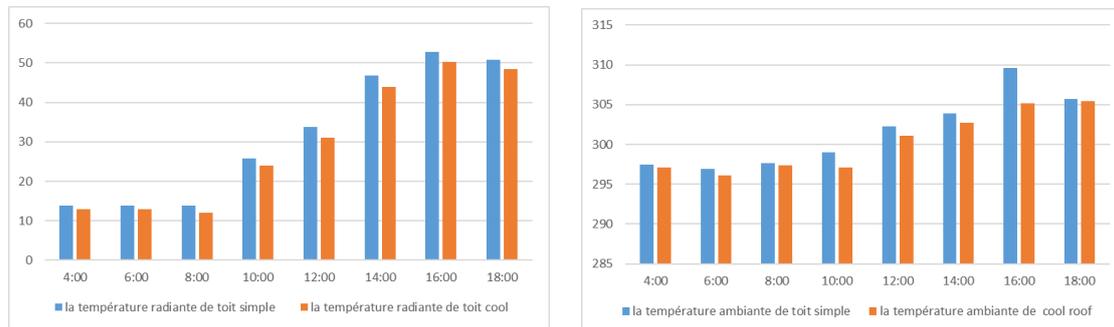


Figure 5 : Comparaison entre la température ambiante et la température radiante moyenne (TMR) des deux modèles : Cas de base et du Cas Cool Roof ; (Source : Auteur, 2017)

On peut constater que la $T^{\circ}\text{amb}$ présente une valeur maximale de 35.85°C et minimale de 22.8°C pour une surface de toit en béton brut avec un albédo de 0.3 ; tandis que, pour la surface du toit recouvert avec un « Cool Paint » à haute réflectance solaire et un albédo de 0.9, la $T^{\circ}\text{amb}$ atteint un maximum de 31.85°C et un minimum de 22.5°C . Un écart de 5°C a été réalisé. Pour la température moyenne radiante (TMR), on peut constater que cette dernière varie en fonction de l'intensité des radiations solaires reçues et réfléchies par les surfaces. Il est apparent qu'elle est proportionnelle à la température de l'air (plus $T^{\circ}\text{amb}$ augmente plus TMR augmente et vice versa). La température moyenne radiante atteint une valeur maximale de 52°C l'après-midi (16.00 H) et sa valeur minimale de 13.85°C est enregistrée le matin. Cela confirme que la haute réflectance de la surface externe du toit peut contribuer à l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

5.2. Résultats à l'échelle du bâtiment

La modélisation des cas d'études a été effectuée par SKETCHUP pro 2015, puis par Open Studio. Tous les détails de l'enveloppe ont été créés, de même que la densité de puissance d'éclairage, la densité d'occupation, les Schedule nécessaires et les propriétés thermo-physiques du modèle. Les résultats de la simulation sont générés par EnergyPlus dont les outputs permettent de lire la température opérative ainsi que la température surfacique intérieure et extérieure des toits.

5.2.1. La température opérative

La température qui mesure le fonctionnement thermique d'une zone est celle qui tient compte à la fois de la température de l'air interne ($T^{\circ}\text{amb}$) et de la température moyenne des surfaces intérieures de la structure ; il s'agit de la température opérative [30]. Selon Bennadji, la soustraction des températures moyennes extérieures de celles de l'intérieur du local permet d'apprécier l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur [31]. Les graphes ci-dessous (fig. 6) illustrent les variations de la température opérative en fonction de la température sèche extérieure de l'air pour les 6 cas de référence et le modèle optimisé (application du Cool Roof).

Le profil de la température opérative de la figure 6 montre que les toits construits en hourdis, béton armé et entrevous de terre cuite avec un revêtement en chape de ciment (soient **TdRc**, **TpRc** et **TbRc**) enregistrent une température opérative maximale de 42.87°C à 14 :00 H et minimale de 29°C à 5 :00 H avec un écart de 5°C par rapport à la température de l'air extérieure qui atteint une valeur maximale de 48°C à 14 :00H. On constate, également, une différence de 1°C par rapport aux toitures recouvertes en carrelage (soient **TdRt**, **TpRt** et **TbRt**) avec une température opérative maximale de 41.95°C . Cet écart est dû à une différence entre la valeur de réflectance du carrelage (= 0.45) tandis que celle de la chape de ciment (= 0.3). Ces résultats révèlent que ce type de construction est inadapté au climat chaud et aride.

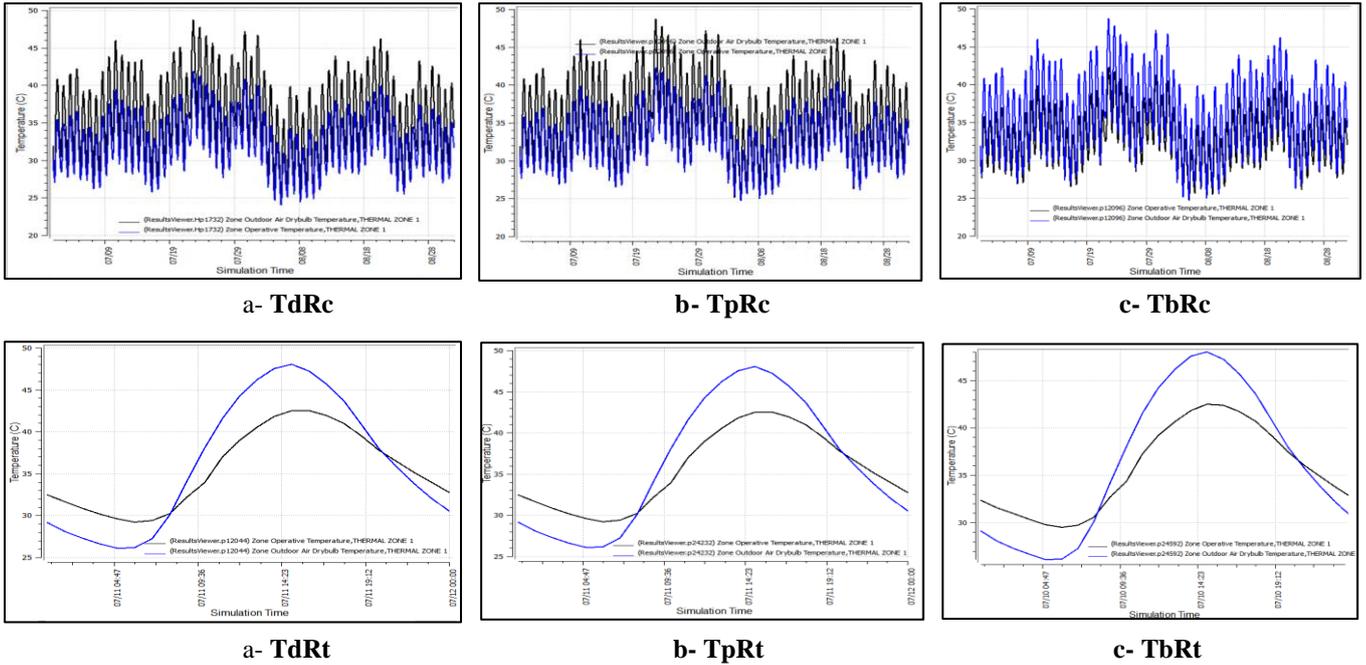


Figure 6 : Températures opératives des différentes toitures pendant le mois de Juillet obtenues avec EnergyPlus - les Cas de Base - ; (Source : Auteur, 2017)

L'utilisation d'une peinture de haute réflectance « cool paint » est un facteur efficace pour augmenter le niveau de confort dans les espaces intérieurs. La lecture des graphes de la figure 7, fait ressortir l'abaissement de la température dû à l'utilisation du « cool roof ». En examinant le profil des températures opératives enregistrées en supposant que les 6 toitures étudiées sont recouvertes d'une couche de « cool paint » (fig. 7), une diminution de 2°C a été enregistrée. La température atteint sa valeur maximale à 40 °C à 14 :00 H, au moment où la température à l'extérieur atteint un maximum de 48°C. Cela s'explique par une faible diffusion de chaleur à l'intérieur due à la haute réflectance (=0.9) et la haute émittance thermique (=0.80) du matériau à propriétés radiatives élevées (cas cool roof).

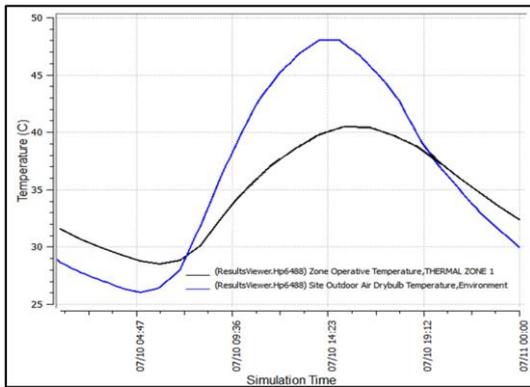


Figure 7 : La température opérative enregistrée pendant le mois de Juillet -cas Cool Roof-; (Source : Auteur, 2017)

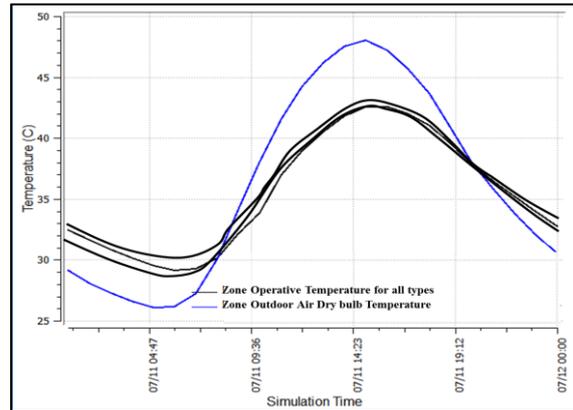


Figure 8 : La température opérative enregistrée pendant le mois de Juillet -tous les types de toits-; (Source : Auteur, 2017)

5.2.2. La température surfacique des toitures

La figure 9 présente les températures surfaciques internes ($T^{\circ}S$ int.) et externes ($T^{\circ}S$ ext.) des 6 toits de référence (modèles de base sans traitement). Les graphes ci-dessous indiquent que les valeurs de $T^{\circ}S$ int. Et $T^{\circ}S$ ext. des toits augmentent progressivement à partir du matin pour atteindre un pic à 14 :00H au moment où le soleil est au zénith, les rayons sont alors perpendiculaires à la surface du toit. Ensuite, les températures surfaciques des toits diminuent pour enregistrer leur plus basse valeur à 6 :00H. Ces variations de températures qui vont de 26.02 °C tôt le matin à 47.98 °C l'après-midi sont dues aux propriétés de la surface extérieure du toit.

La structure du toit de type **TpRc** présente une T°S int. Maximale de 39.92°C, et minimale de 31.20°C et une T°S ext. maximale de 47.98°C, tandis que l'utilisation des carreaux de carrelages, permet de diminuer les températures surfaciques. Ainsi, le toit **TpRt** indique une T°S int. Maximale de 38.8°C et une T°S ext. maximale de 44.5°C. Le type **TdRc**, pour sa part, représente le cas le plus défavorable avec une T°S int. Maximale qui atteint 41°C. Cela est dû au béton qui possède une grande absorptance thermique et une faible émittance, ces deux propriétés font en sorte que le flux de chaleur traverse rapidement l'épaisseur du toit et provoque un réchauffement interne. Enfin, le toit **TbRt** présente les meilleures conditions thermiques avec une T°S int. Maximale de 38°C et T°S ext. maximale 45°C donc un écart de 7°C entre l'intérieur et l'extérieur.

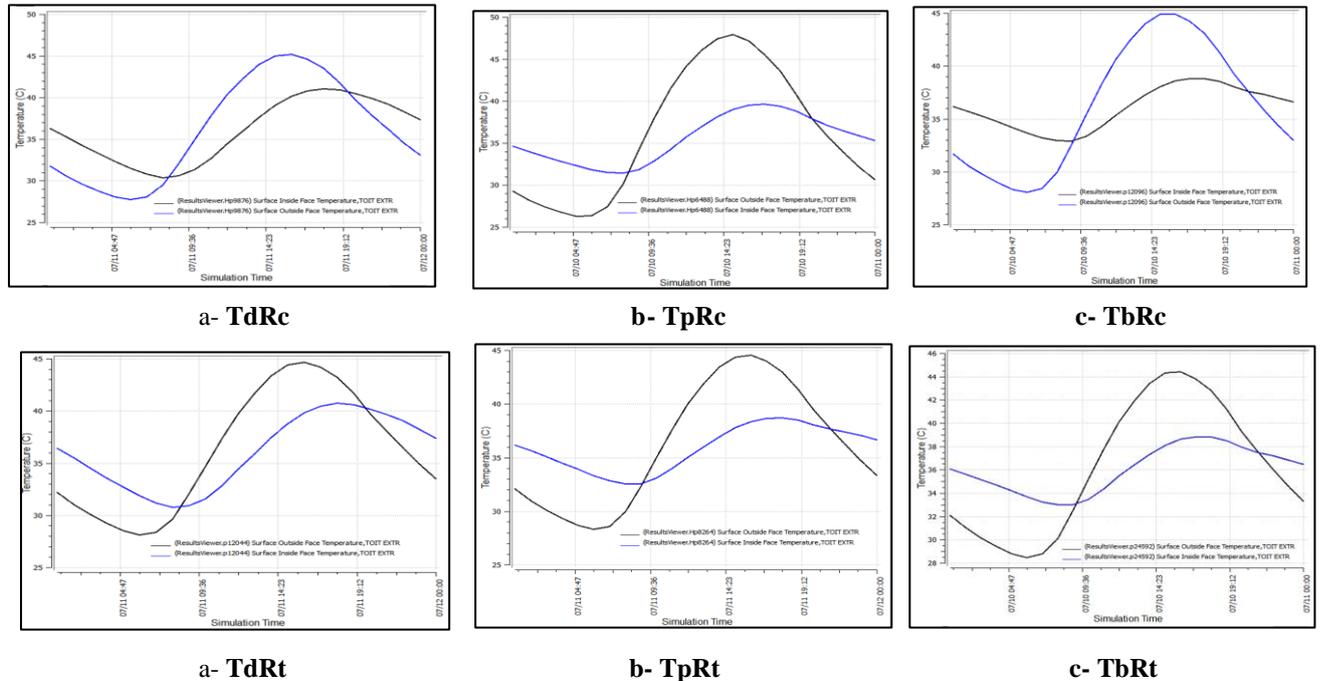


Figure 9 : Les températures surfaciques des toitures typiques simulées pendant le mois de juillet (Energy Plus) pour différents matériaux de construction et revêtements– Cas de Base –; (Source : Auteur, 2017)

L'information à retenir à partir de ces résultats est que : plus le toit est réfléchissant, plus la température surfacique est basse, et par conséquent plus le transfert de chaleur est ralenti. L'analyse a, également, montré que la température surfacique interne est plus élevée, pendant la nuit, que celle de l'extérieur (soit de 2:00H à 7:00H). Cela est dû à l'absence de ventilation nocturne qui permet à la structure de se refroidir par évacuation des gains de la journée.

L'analyse des courbes de températures surfaciques interne et externe du toit traité avec une peinture de haute réflectance « cool paint » indique des valeurs T°S int de l'ordre de 35°C et T°S ext. de l'ordre de 42°C (fig. 10).

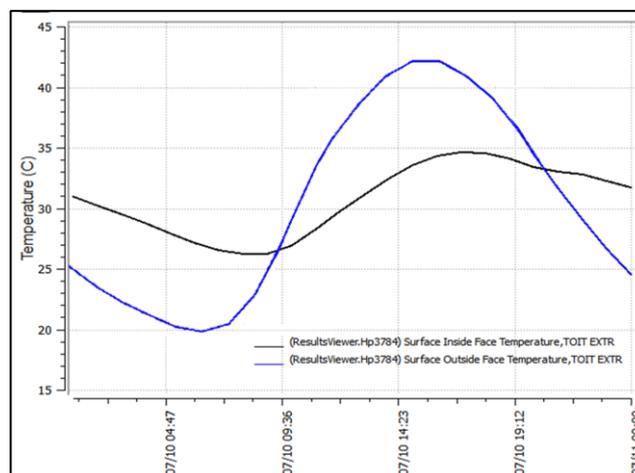


Figure 10 : Comparaison entre les températures surfaciques intérieure et extérieure du cool roof pendant le mois de Juillet (Energy Plus) ; (Source : Auteur, 2017)

Ainsi, l'application de la technique du « cool roof » permet d'atteindre une réduction de la température de surface de 7°C entre les faces interne et externe, et de 6°C entre la T°S ext. (42°C) et la température de l'environnement extérieure (48°C), ce qui confirme, une fois de plus, son efficacité en tant que stratégie de rafraîchissement.

En conclusion, ce travail expérimental a établi, l'effet du « cool roof » sur le comportement thermique de la toiture et son rôle en tant que stratégie de rafraîchissement passif favorisant les conditions de confort intérieur. Des écarts de températures appréciables ont pu être atteints entre les toits conventionnels (cas de référence) et les toits « cool roof ». Ces performances thermiques sont dues à la capacité des surfaces radiatives à refléter une grande quantité du rayonnement solaire doublée de leur faible absorption du rayonnement solaire. Il reste à préciser, cependant, que les températures ambiantes mesurées –selon les conditions de la simulation- sont également tributaires d'autres facteurs tels que l'inertie thermique, la ventilation naturelle et les fluctuations climatiques extérieures.

5.2.3. Evaluation de la performance énergétique

L'analyse du graphe (fig. 11) indique que la toiture a un grand impact sur la quantité d'énergie utilisée par le bâtiment pour assurer des conditions de confort thermique aux occupants. La toiture est responsable des 2/3 du transfert de chaleur avec l'extérieur, par conséquent, sa protection par des techniques passives, présente un bon potentiel d'amélioration du rendement énergétique du bâtiment

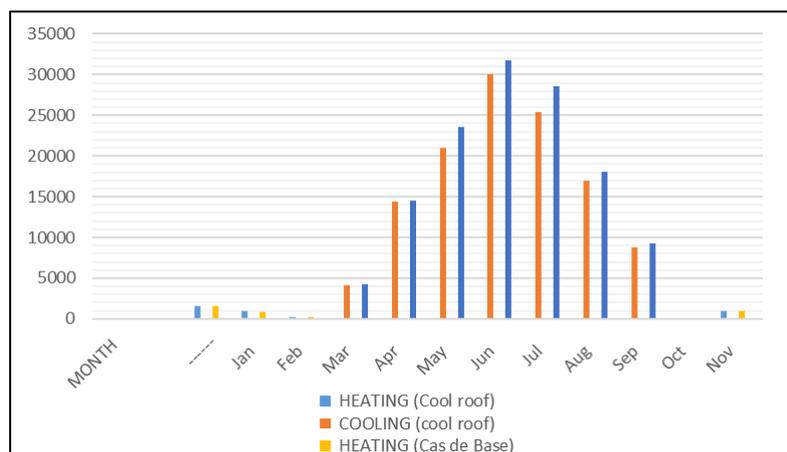


Figure 11 : Consommation d'énergie pour le refroidissement et le chauffage : comparaison entre le toit de référence et le toit cool roof ; (Source : Auteur, 2017)

D'après les simulations effectuées, visant à quantifier la consommation énergétique du bâtiment -avec et sans « Cool Roof », il apparaît que l'énergie dépensée pour le refroidissement du local avec un toit standard sombre atteint une valeur maximale de 32000 W pour le mois de Juillet dans le climat de Biskra. Ceci représente une consommation énergétique excessive qui nous oblige à réagir pour tenter de la réduire. Avec l'utilisation du « cool roof » la consommation d'énergie est diminuée de 200W à 300W, car la réduction de température de surface du toit limite automatiquement l'utilisation des climatiseurs pour des durées de plus en plus longues. En contrepartie, on remarque que la technique du « cool roof » augmente la quantité d'énergie de chauffage, mais la différence est faible, de l'ordre de 97W.

6. Conclusion

Il est convenu que la toiture est l'une des parties du bâtiment les plus difficiles à protéger du fait qu'elle est la plus exposée aux rayons solaires directs. Ce papier présente les principaux résultats d'un travail d'investigation consacré à l'optimisation de la performance thermique et énergétique de l'habitation individuelle par l'application de la technique du « cool roof » ; les conditions climatiques sont celles chaudes et arides de la

ville de Biskra. L'étude s'intéresse aux méthodes de rafraîchissement passif de l'enveloppe et se concentre sur l'évaluation de la technique du « cool roof » en tant que stratégie passive, innovante et peu coûteuse. La recherche explore les moyens d'application de cette technique selon les conditions et les spécificités propres au contexte de l'étude.

Les simulations effectuées ont montré que l'emploi de la technique du Cool Roof sur des toitures standard en béton, réduit sensiblement la température surfacique extérieure du toit ; l'écart enregistré entre le cas de référence et le cas « cool roof » est de l'ordre de 7°C pour le cas le plus favorable. Par ailleurs, le « cool roof » entraîne un retard dans le transfert du flux de chaleur vers l'intérieur ce qui réduit considérablement la température opérative et améliore les conditions de confort. Enfin, la réduction du gain de chaleur assuré par le toit « cool roof » signifie une réduction des besoins de refroidissement durant la période de surchauffe avec un abaissement de la consommation énergétique de 300W.

Pour conclure, les résultats obtenus ont validé, par la simulation, les investigations fondant cette recherche et ont démontré l'efficacité de la technique du Cool Roof qui a l'avantage, à la fois, de minimiser le stress thermique subi dans les bâtiments et son effet néfaste sur la santé et la productivité et, en même temps, de rationaliser la consommation de l'énergie en réduisant la demande de pointe estivale en électricité.

Références

- [1] H. Bencheikh, Full scale experimental studies of a passive cooling roof in hot arid areas, *International Journal of Renewable Energy Technology Research*, Vol 2, pages 2, 2013.
- [2] Y. Anand, A. Gupta, A et al, Comparative Thermal Analysis of Different Cool Roof Materials for Minimizing Building Energy Consumption, *Journal of Engineering*, 9 pages, 2014.
- [3] A. Madhumathi, S. Radhakrishnan and R. Shanthi Priya, Sustainable Roofs for Warm Humid Climates - A Case Study in Residential Buildings in Madurai, Tamilnadu, India, *World Applied Sciences Journal*, vol 32 (6), 1167-1180, 2014.
- [4] "Energy Efficiency Improvement in Commercial Building," United Nations Development Program India, Global Environmental Facility Project Document, (2010-2012).
- [5] Marwa Dabaieh, Omar Wanas, Mohamed Amer Hegazy, Erik Johansson, Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings, *Energy and Buildings*, 89, 142-152, 2015.
- [6] M. Santamouris, Ed., Energy and Climate in the Urban Built Environment, James and James Science Publishers, London, UK, 2001.
- [7] H. Akbari, R. Levinson, L. Rainer. Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings. *Energy and Buildings*. vol 37, 1007-1016, 2005.
- [8] Anna Laura Pisello, Ansgar Thiemann, Mattheos Santamouris, Franco Cotana, Analysis of a Cool Roof System for Reducing Cooling Loads and Improving Cooling System Efficiency, *World Applied Sciences Journal*, 2010.
- [9] Dario Ambrosini, Giorgio Galli, Biagio Mancini, Iole Nardi and Stefano Sfarra, Evaluating Mitigation Effects of Urban Heat Islands in a Historical Small Center with the ENVI-Met® Climate Model, *Sustainability* 2014, 6, 7013-7029.
- [10] A. Synnefa, M. Santamouris, K. Apostolakis, On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment, *Sol. Energy* 81 (4), 488-497, 2007.
- [11] Mohammed Salem Bakhlah, and Ahmad Sanusi Hassan, the Effect of Roof Colour on Indoor House Temperature In Case of Hadhramout, Yemen, *American Transactions on Engineering & Applied Sciences*, Volume 1 No.4 ISSN 2229-1652, 2012.
- [12] Hassan Radhi Stephen Sharples Hanan Taleb Mohammad Fahmy, will cool roofs improve the thermal performance of our built environment? A study assessing roof systems in Bahrain, *Journal Energy Building*, 2016.
- [13] A. Synnefa, M. Santamouris, and H. Akbari, "Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions, *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 11, pp. 1167-1174, 2007.
- [14] D. Parker, J. Huang, S. Konopacki, L. Gartland, J. Sherwin, L. Gu, Measured and simulated performance of reflective roofing systems in residential buildings, *ASHRAE Trans.* Vol 104, 963-975, 1998.
- [15] H. Suehrcke, E.L. Peterson, N. Selby, Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate, *Energy Build.* Vol 40.12, 2224-2235, 2008

- [16] Urban, B., Roth, K., Guidelines for Selecting Cool Roofs, *U.S. Department of Energy Building Technologies Program and Oak Ridge National Laboratory*, 2010.
- [17] Karam M. Al-Obaidin, Mazran Ismail, Abdul Malek Abdul Rahman, Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review, *ELSEVIER*, vol 3, 283–297,2014.
- [18] E. Carnielo, A. Fanchiotti, M. Zinzi, Energy and comfort benefits of a cool roof application in a non-residential building belonging to Roma Tre University, *Energy architecture(LEA)*, 2011.
- [19] M. Zinzi for Earthscan/Aber, Cool materials and cool roofs: Potentialities in Mediterranean buildings, *Advances in building energy research*, vol.4, pp. 6 – 11, 2010.
- [20] Akbari, H., Berdahl, P., Levinson, R., Wiel, S., Miller, W., Desjarlais, Cool-color roofing material. California, *energy commission PIER Building End-Use Energy Efficiency Program*,2006.
- [21] M. Zinzi, G. Fasano, Properties and performance of advanced reflective paints to reduce the cooling loads in buildings and mitigate the heat island effect in urban areas, *Int. J. Sustainable Energy*, vol 28 (1–3), 123–139,2009.
- [22] M. Zinzi, S. Agnoli, Cool and green roofs: an energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region, *Energy Build.* Vol 5, 66–76, 2012.
- [23] D.S. Parker, S.F. Barkaszi Jr., S. Chandra, D.J. Beal, measured cooling energy savings from reflective roofing systems in Florida: field and laboratory research results, in Proceeding of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings, *ASHRAE, Clearwater*, Vol (4-8), pp 105–115, 1995.
- [24] A.L. Pisello, M. Santamouris, F. Cotana, Active cool roof effect: impact of cool roofs on cooling system efficiency, *Adv. Build. Energy Res.* vol 7.2, pp 209–221,2013.
- [25] F. Rossi, P. Anna Laura, N. Andrea, F. Mirko, P. Massimo, F. Rossi, Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: a new analytical model, *Appl. Energ.* vol 114, pp 621–631, 2014.
- [26] H. Akbari, R. Levinson, W.A. Miller, P. Berdahl, Cool colored roofs to save energy and improve air quality, *International Conference Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment Greece*, pp. 89–100,2005.
- [27] MINISTERE DE L'ENERGIE ET DES MINES, 'Consommation Énergétique Finale de l'Algérie, Chiffre Clé -Année 2012.
- [28] U.S. Department of Energy, Design Builder, DOE. EnergyPlus, 2010
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- [29] Vishal Garg, Shikher Somal, Rathish Arumugam, Aviruch Bhatia, Development for cool roof calculator for India, *Energy and Buildings*, ENB-5927, 2015.
- [30] BENNADJI. A., Adaptation climatique ou culturelle en zones arides : cas du sud-est Algérie, Thèse de doctorat. Université d'Aix-Marseille1-Université de Provence,1999.