



## Etude d'un Système de Rafraîchissement par un Capteur Thermique Nocturne

Nadhir GACEM<sup>1</sup>, Abderrahmane MOKHTARI<sup>1</sup>

<sup>(1)</sup>Faculté d'Architecture et de Génie Civil, Département de Génie Civil, Université Des Sciences et de la Technologies Mohammed Boudiaf USTOMB, Oran, Algérie,

Email : [gacem.nadhir@yahoo.com](mailto:gacem.nadhir@yahoo.com), [am.mokhtari@yahoo.com](mailto:am.mokhtari@yahoo.com)

**Résumé :** Une étude théorique est conduite dans ce travail afin d'évaluer le potentiel d'un système de rafraîchissement nocturne à réduire les besoins de rafraîchissement des résidences dans les climats arides. On décrit un système innovateur composé d'un capteur thermique placé sur les toits des résidences qui emploie le rayonnement du ciel dû à sa faible température pendant les nuits d'été à des fins de rafraîchissement. Le capteur en question, plan et non vitré composé d'une surface faite en métal de haute conductivité et une faible masse, est couplé aux espaces refroidis par un circuit hydraulique noyé dans les planchers bas. Les parois de ces espaces sont dotées d'une inertie thermique permettant le stockage du froid par l'utilisation de matériaux appropriés. Les bilans thermiques ainsi que les équations qui traduisent le comportement thermique de l'ensemble ont été traités afin de mener des simulations en régime dynamique sur TRNSYS, un climat est utilisé, celui de Bechar en Algérie.

**Mots Clés :** Rafraîchissement nocturne, Capteur thermique, Ciel, Inertie thermique, Trnsys.

### 1. Introduction

Le refroidissement passif des constructions peut être défini de plusieurs voies. L'une est de considérer un traitement de la construction qui réduit sa charge en saison estivale, tel que le contrôle solaire et le gain interne qui peuvent réduire à un minimum le tût de la chaleur, etc. [3]. Ces techniques comprennent plusieurs sujets, tels que l'abaissement des températures urbaines, ombrage des fenêtres, et des couleurs extérieures de l'enveloppe dotés d'un coefficient d'absorption solaire inférieur. Une autre voie est de considérer tous les sujets mentionnés ci-dessus comme éléments d'un modèle architectural et urbain approprié, sensibles au climat et qui vise à améliorer le confort thermique dans des périodes chaudes même lorsque la construction n'est pas mécaniquement traitée, ou à abaisser la charge et la consommation d'énergie de l'équipement dans les constructions climatisées [4]. Le refroidissement passif des constructions de ce point de vue vient après que le modèle approprié ait été appliqué, et peut être défini comme l'utilisation des sources d'énergie renouvelables pour améliorer la perte de chaleur de la construction. Le refroidissement radiatif nocturne et le système des plafonds rafraîchissants sont proposés pour explorer l'utilisation d'une source d'énergie de refroidissement naturelle, afin de remplacer et de substituer des systèmes de refroidissement traditionnel. Pendant ces années, le potentiel d'utilisation et le rendement des systèmes nocturnes à base de capteur nocturne a été pleinement étudié ([5] ; [6] ; [7] ; [8])

### 2. Principe de fonctionnement d'un capteur thermique nocturne

L'émission du rayonnement à grandes longueurs d'ondes est un phénomène continu de jour comme de nuit. Cependant, pendant la journée les capteurs thermiques sont exposés au rayonnement solaire. Le rayonnement solaire absorbé provoque une surchauffe, qui dans la plupart des cas est supérieur à l'effet de refroidissement produit par l'émission du rayonnement à grandes longueurs d'ondes. Pour cette raison, l'effet de refroidissement net des capteurs peut être obtenu seulement pendant la nuit (rayonnement nocturne) [9]. La connaissance de base du rayonnement nocturne est que la température de l'atmosphère est près du zéro absolu, environ 4°K [10], et elle peut servir ainsi comme source de froid. Le refroidissement radiatif d'une surface exposée au ciel la nuit peut être employé pour abaisser

la température d'un fluide caloporteur circulant dans un capteur thermique en dessous de la température ambiante environnante. Utilisant les propriétés d'un capteur thermique en inversant son fonctionnement dans un mode nocturne est un sujet attrayant pour des chercheurs dus à son objectif ultime de maintenir l'environnement hors de la contamination.

Dans des cas où le ciel est clair, le rayonnement incident a deux crêtes distinctes aux environs des valeurs de longueur d'onde 7 et de 15  $\mu\text{m}$ , respectivement [11], d'autant plus il a également une profonde marge clairement évidente en valeur de rayonnement entre les valeurs de longueur d'onde de 8 et 13  $\mu\text{m}$ , appelé fenêtre atmosphérique, et dont l'atmosphère est presque transparente pour absorber le rayonnement dans cette dernière marge ([12]; [13]). Dans le cas des applications de refroidissement de construction, la surface refroidie est la construction ou le capteur thermique nocturne et la source froide est le ciel. Cet effet est particulièrement évident dans une nuit claire avec une faible humidité [14]. Il y a deux méthodes d'appliquer les bases du refroidissement radiatif dans les constructions [9]. La première méthode s'appelle refroidissement direct, ou passif, radiatif. Dans ce cas-ci l'enveloppe de construction rayonne vers le ciel et obtient le refroidissement. La deuxième méthode s'appelle refroidissement radiatif hybride. Dans ce cas-ci la surface rayonnée n'est pas l'enveloppe de construction mais habituellement une plaque métallique faisant guise d'un capteur thermique nocturne. Il y a plusieurs options qui permettent d'appliquer le refroidissement radiatif passif dans les constructions, trois types fondamentaux de capteurs nocturnes peuvent être énumérés [9]: (1) un système mobile d'isolant qui peut être déplacé au-dessus du toit de la construction, (2) d'un poids léger, un capteur thermique habituellement en plaque métallique qui refroidit l'air ambiant en dessous de sa température initiale, et (3) un capteur solaire type eau non vitré. Pour le premier type, [14] ont conçu une résidence indépendante du point de vue énergétique, comportant un système de refroidissement radiatif de ciel disposé dans le toit activé en saison estivale, un capteur solaire thermique en saison hivernale et le photovoltaïques durant toute l'année. Pour le deuxième type de capteur, [9] ont étudié un capteur métallique léger doté de plusieurs espaces permettant le passage d'un flux d'air ambiant. Le fonctionnement d'un tel capteur est l'opposé d'un capteur solaire à air.

L'air est refroidi par diffusion sous la surface métallique du capteur avant d'être injectée dans la construction pour fournir le refroidissement instantané pendant la nuit, et pour refroidir la masse intérieure de la construction par la convection, produisant un entreposage du froid pour le jour suivant. Les deux différences principales entre le capteur métallique léger utilisé et un capteur solaire à air sont premièrement la période d'opération pendant le jour, et deuxièmement le capteur nocturne est sans vitrages puisque le vitrage simple utilisé dans les systèmes solaires n'est pas transparent au rayonnement à grandes longueurs d'ondes. Pour le troisième type, [12] ont utilisé un capteur muni de deux plaques parallèles, avec le capteur nocturne étant une plaque en aluminium peinte en couleur noire, cette dernière a été couverte par un cache constitué d'une plaque de polyéthylène. Ce type de capteur nocturne a été vérifié par plusieurs chercheurs par voies expérimentale ([12]; [14]) et par voies numérique ([15]; [12]; [9]; [16]).

[14] ont proposé une maison de rendement optimum comportant un capteur solaire thermique et un capteur thermique de refroidissement nocturne radiatif-ciel. La maison HARBEMAN a deux caractéristiques importantes : comportement deux réservoirs de stockage chaleur/froid d'une capacité de 30 et 60  $\text{m}^3$  qui permettent le stockage l'énergie de façon saisonnière. Une autre caractéristique est d'utiliser le refroidissement radiatif de ciel saisonnier. Cette difficulté a été surmontée en changeant la période du fonctionnement capteur nocturne : l'eau du réservoir de stockage souterrain est refroidie à l'avance au printemps quand la température ambiante et l'humidité sont relativement inférieures. La température de l'eau du réservoir est refroidie au 4°C à l'aide d'une pompe à chaleur de petite capacité 600 W. Basé 3 ans de moniteur, les résultats d'expérience ont indiqué que la maison absorbe seulement un sixième d'énergie fossile comparé avec une maison conventionnelle. Le système émet également des quantités très inférieures de dioxyde de carbone et d'autres gaz polluants.

[15] se servent d'une banque de données de 12, ans comportant les caractéristiques horaires des conditions météorologiques, et cela afin d'évaluer le potentiel de refroidissement radiatif à Athènes. Le modèle a été employé

pour prévoir la dépression de la température du ciel et la température de l'air à la sortie d'un capteur nocturne radiatif à air, utilisant les valeurs horaires des caractéristiques et conditions météorologiques suivantes : température ambiante, hygrométrie, vitesse du vent. Les résultats du rendement pour un capteur simple sont également présentés. Le potentiel de refroidissement radiatif pour Athènes est prometteur et des capteurs simples peuvent être utilisés pour estimer le potentiel de refroidissement. [15] ont également indiqué que dépression de la température de ciel est la différence entre la température de l'air ambiante et la température de ciel. Tandis que les quantités de dépression de la température du ciel et le potentiel du refroidissement radiatif sont en fonction des caractéristiques et des conditions météorologiques à un site particulier, la température de stagnation tient compte non seulement de ces dernières mais également des caractéristiques du capteur nocturne en question. La température de stagnation est la plus basse température possible pour un capteur nocturne et pour des conditions météorologiques et des paramètres de fonctionnement particulières. [15] ont tiré la conclusion que le refroidissement radiatif est utile à Athènes, et l'évaluation des performances des techniques de refroidissement naturelles devrait être basée sur des caractéristiques climatiques détaillées.

[12] ont effectué des études expérimentales et théoriques du système de refroidissement radiatif composé d'un ensemble de capteur nocturne. L'étude expérimentale a été conduite pour un système avec un écoulement en boucle ouverte par gravité. Les paramètres étudiés comprennent l'effet du régime d'écoulement, la température produite par le capteur nocturne versus la température de l'air ambiant et la température de l'eau dans le réservoir de stockage chaud, l'épaisseur de la couverture ou le pare-brise sur le rendement. Une définition neuve du rendement a été exprimée par une performance globale. Une comparaison entre le refroidissement nocturne de l'eau stagnante et en circulation a été également faite. Dans l'étude théorique ils ont développé un modèle complet qui prévoit les pertes de chaleur par rayonnement de la couverture, la plaque du capteur, en considérant des réflexions multiples et des absorptions entre cette dernière et la plaque. La balance énergétique a été alors appliquée sur la couverture, la plaque du capteur et l'eau. La couverture et l'isolant ont été considérés un élément chacun, alors que chacune de la plaque du capteur et l'eau était divisée en nombre discret d'élément. Le stockage de l'énergie dans le bâti, l'isolant du capteur, et les éléments de l'eau ont été considérés. Des résultats expérimentaux ont été également employés pour la vérification du modèle théorique.

Des écrans de vent sont utilisés dans les systèmes de refroidissement radiatifs pour réduire le gain de chaleur par convection l'air ambiant. Ce système a été établi par plusieurs chercheurs ([17] ; [15] ; [12]; [9]). [17] donnent des investigations expérimentales et des simulations sur les connaissances de base du transfert thermiques dans le capteur, l'influence de l'humidité, la condensation et la nébulosité, les couleurs et les matériaux des écrans de vent, et l'influence d'autres facteurs comme la poussière. De l'autre côté, quelques chercheurs ne proposent pas la présence de l'écran de vent dans le système de refroidissement radiatif. Dans l'étude de [9], le capteur nocturne a été couvert par une mince couche de polyéthylène qui augmente les gains de chaleur par convection de l'air ambiant au capteur, de ce fait améliorant le rendement du système. Compte tenu de cela, les pare-brise doivent être transparent au rayonnement à grandes longueurs ondes, les pellicules de polyéthylène minces (60-100/µm) peuvent être employé dans des ces capteur. Cependant, [9] ont indiqué que la contribution de l'écran de vent à la réduction de la température de stagnation ne semble pas significative. Pour des conditions atmosphériques optimales, la température de stagnation du capteur non protégé s'échelonne de 22°C en septembre à 27°C en juillet pour 80 % du temps. Pour les capteurs équipés d'un pare-vent, elle s'échelonne de 19°C en septembre à 23°C en juillet. Mais il n'a pas proposé l'écran de vent d'utilisation à Athènes en raison du coût élevé et de l'effet limité.

De même, le refroidissement radiatif du ciel apparaît le plus d'une manière significative [14] : (1) dans un état de temps clair, (2) dans une faible hygrométrie, (3) vitesses du vent minimales. La performance dépend de la différence entre la température du ciel et le capteur de refroidissement nocturne. Par conséquent, l'évaluation des performances des techniques de refroidissement naturelles devrait être basée sur des caractéristiques climatiques détaillées [9]. Les conditions météorologiques en été à Hong Kong et d'autres villes tropicales ne sont pas appropriées pour que le rayonnement de ciel soit effectivement employé en raison de la température ambiante et d'une humidité élevées (80-90 %) [18].

### 3. Etude et simulation d'un bâtiment équipé d'un capteur nocturne

#### 3.1. Etude d'un cas et cellule d'essai

La cellule (Figure 1) ; faite en rez de chaussé ; qui compte une surface de 40 m<sup>2</sup>, se compose de deux locaux identiques A et B avec les dimensions intérieures de 4,75 m de longueur et de 3,75 m de largeur, sa hauteur es de 2,70 m. La cellule est posé directement sur le sol. Chacun des compartiments A et B comporte son propre accès et une fenêtre. Les quatre parois verticales ont été orientées suivant les 4 directions cardinales (Nord, Sud, Est, Ouest). Le local B est doté d'un circuit hydraulique fait en deux boucles escargots, est noyé dans la dalle, représentant le plancher chauffant/rafraichissant. Les tubes du circuit hydraulique sont faits de polyéthylène, et sont posés directement sur l'isolant d'épaisseur 4 cm, le tout est couvert par 10 cm de Chappe liquide de béton. Comme revêtement du plancher, la cellule est dotée de plaques en gerfléx de 20 cm x 20 cm. La composition ainsi que les propriétés thermo-physique des matériaux sont désignées dans le Tableau (1).



Figure 1 : Cellule d'essai utilisée dans les simulations. [1]

Tableau 1 : Composition des parois. [2]

Parois	Composition	Épaisseur (m)	Conductivité (W/m.K)	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Capacité (Kj/Kg.m <sup>3</sup> °C)
Paroi extérieure et intérieure	Enduit de ciment	0,01	1,15	1800	1000
	Brique	0,1	0,5	1100	920
	Polystyrène	0,04	0,03	38	920
	Brique	0,1	0,5	1100	920
Plafond	Enduit de plâtre	0,01	1,15	1800	1000
	étanchéité supérieure	0,03	0,04	200	670
	Polystyrène	0,02	0,04	25	670
	dalle de compression	0,04	1,75	2300	920
	corps creux	0,16	1,14	1500	920

	Enduit de plâtre	0,015	1,15	1800	1000
Vitrage	simple	0,04	0,2	-	-
porte	Iso-plane	0,05	0,23	600	920

Pour les paramètres d'entrées de la simulation, un fichier métrologique de la zone de Bechar est utilisé, à base de la température de l'air et l'humidité relative de zone considérée, la température du ciel peut être calculé et injecté dans la simulation comme état initial. Le Tableau (2) représente la température moyenne de l'air ambiant et la température moyenne de l'air à l'intérieur issu des simulations.

Tableau 2 : Température de l'air à l'intérieur de la cellule d'essai simulée.

Mois	Tamb Oran	Tamb Bechar	Tin Oran	Tin Bechar
Janvier	11,23	9,97	12,95	14,78
Février	11,83	12,71	14,28	17,58
Mars	12,85	15,88	16,60	22,11
Avril	14,55	19,13	19,95	25,91
Mai	17,76	24,26	23,79	29,93
Juin	20,99	28,82	27,28	34,52
Juillet	24,72	33,08	30,44	37,18
Août	25,17	32,61	29,92	36,30
Septembre	22,89	27,49	26,52	31,55
Octobre	19,36	21,27	21,56	25,49
Novembre	14,99	14,68	20,00	26,00
Décembre	12,07	10,41	13,22	13,90

#### 4. Modélisation du capteur thermique nocturne

Partons du bilan thermique effectué sur un capteur en mode nocturne :

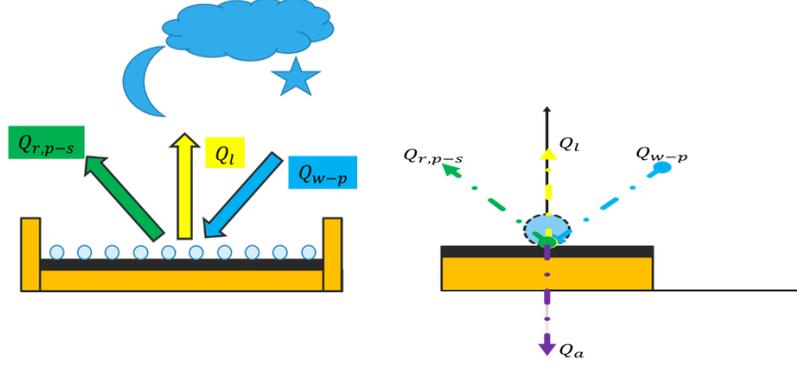


Figure 2 : Capteur en mode nocturne.

$$Q_{w-p} = Q_{r,p-s} + Q_l \quad (1)$$

$$Q_{w-p} = mC \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

$$Q_{r,ps} = Q_{cs} (1 - 0.09N) \left\{ \begin{array}{l} Q_{cs} = \varepsilon_p \cdot \sigma T_p^4 [1 - (0.50 + 0.072\sqrt{e})] \\ Q_{cs} = \varepsilon_p \cdot \sigma T_p^4 [1 - (0.44 + 0.08\sqrt{e})] \\ Q_{cs} = \varepsilon_{ap} \cdot \sigma T_p^4 \quad \quad Q_{cs} = \varepsilon_p \cdot \sigma (T_p^4 - T_s^4) \end{array} \right.$$

La température du ciel peut être reformulée comme suit :

$$T_s = 0.0552 \cdot T_a^{1.5} \quad T_s = (0.0037 \cdot T_{dp} - 0.208)^{0.25} \cdot T_a$$

$$\left. \begin{array}{l} U_l = U_t + U_b \\ U_b = \frac{1}{R_1} = \frac{k}{l} \\ U_t = h_{vent} = 5.7 + 3.8V \end{array} \right\} \begin{array}{l} Q_{r,p-s} = \varepsilon_p \cdot \sigma (T_p^4 - T_s^4) (1 - 0.06N) \quad (3) \\ Q_l = A_p \cdot U_l (T_p - T_a) \quad (4) \end{array}$$

$$Q_{w-p} = mC (T_{w-i} - T_{w-o}) \quad (5)$$

D'après les équations (3, 4, 5) la température de l'eau à la sortie du capteur peut être écrite comme suit :

$$T_{w-o} = T_{w-i} - \left[ \frac{A_p [(5.7 + 3.8V + k/l) (T_p - T_a) + \varepsilon_p \cdot \sigma (T_p^4 - T_s^4) (1 - 0.06N)]}{mC} \right]$$

## 5. Résultats et interprétations

Le résultat de la simulation est représenté dans la (Figure 3a. et Figure 3b.), les trois températures à savoir la température du ciel, la température de l'air ambiant, et la température de l'eau à la sortie du capteur.

Le capteur thermique nocturne peut garder une température stable dans les environs de 20°C durant la période estivale et cela pour un climat aride désigné par le climat de Bechar, même pour des sollicitations de température grande variant entre 40 °C et 25° C, d'où le potentiel accablant que peut fournir la température du ciel interagissant avec le capteur thermique.

Après avoir étudié les deux composantes séparément, à savoir le comportement thermique de la cellule d'essai, sans l'utilisation d'un moyen de rafraîchissement, d'une part, et le comportement thermique du capteur nocturne, fonctionnant en mode nuit d'une autre part, il bien évident d'étudier l'intégration de ce dernier dans la cellule d'essai, et cela pourra se faire par le biais d'un circuit hydraulique, noyé dans le plancher bas, constituant le plancher rafraichissant., ainsi cela pourrai être une technique adoptée pour l'abaissement de la température de l'air à l'intérieur de la cellule.

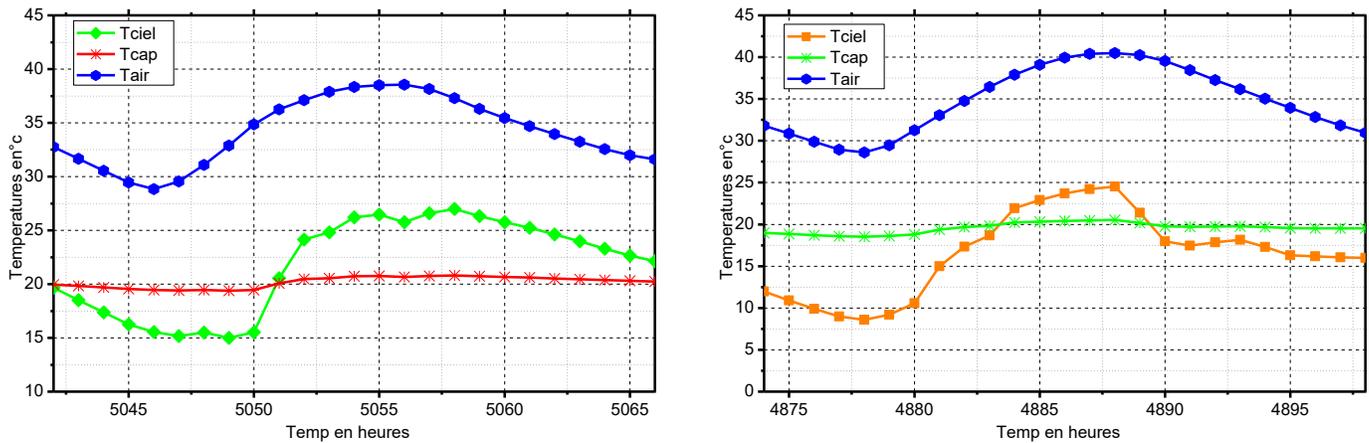


Figure 3a : Simulation de la température de l'eau fournie par le capteur thermique pour 24 heures.

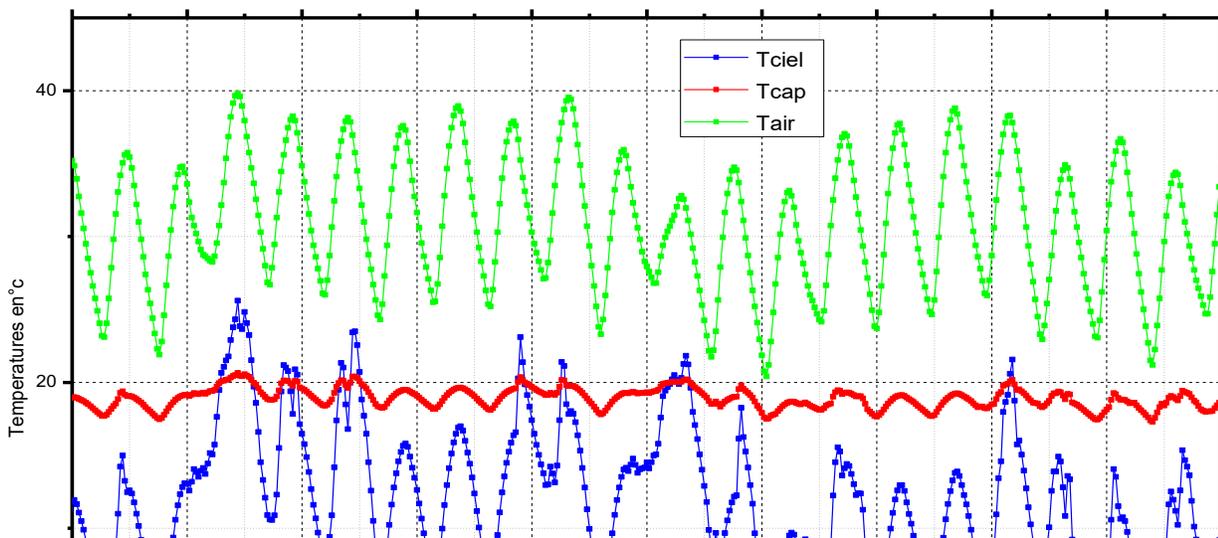


Figure 3b : Simulation de la température de l'eau fournie par le capteur thermique pour la saison.

La Figure (4) représente la température de l'air à l'intérieur de la cellule avant et après l'intégration du capteur nocturne. Il apparaît clairement que l'intégration du capteur thermique qui peut délivrer une température d'eau à 20°C à put améliorer d'une manière considérable la température de l'air a l'intérieure de la cellule ou la différence peut atteindre les 10°C entre les deux cas.

Ce dont il apparait de la simulation est que la température de l'air dans le cas habituel peut atteindre les 40° c dans les conditions normales de la température de l'air et de l'humidité de la zone de Bechar, par contre un maximum de la température ne dépassant guère les 30°C est enregistré dans le cas où le capteur est utilisé comme technique de rafraîchissement, fournissant une température assez faible que celle de l'air extérieur.

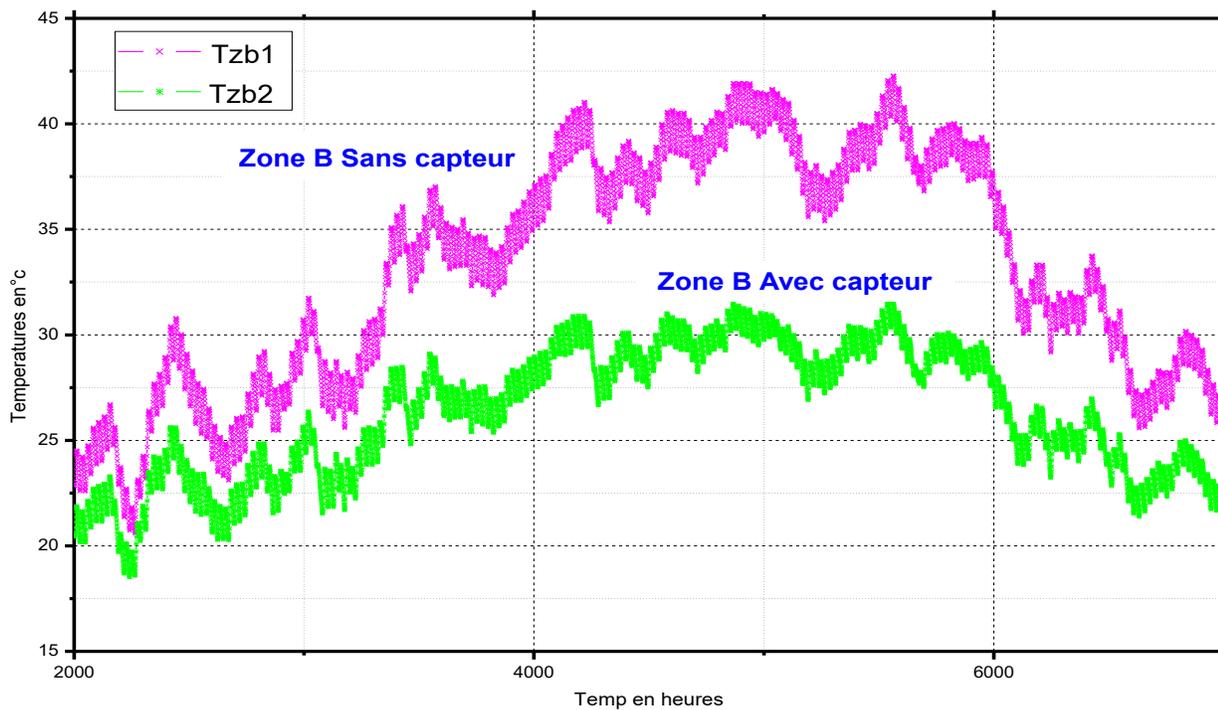


Figure 4 : Simulation de la température de l'air dans la cellule avant et après intégration du capteur nocturne.

$Q_l$	Energie Perdu par le capteur thermique vers l'environnement $W/m^2$	$\epsilon_p$	Emissivité
$Q_{r,ps}$	Energie Perdu par rayonnement vers le ciel nocturne $W/m^2$	$\sigma$	Constante de Stéphane Boltzmann
$Q_{w-p}$	Energie transmise par le fluide vers la plaque $w/m^2$	$U$	Coefficient de déperdition thermique en $w/m^2\text{°C}$
$m$	Masse en Kg	$h$	Coefficient d'échange convectif en $w/m^2\text{°C}$
$C$	Chaleur massique en $Kj/m^3\text{°C}$	$A$	Surface en $m^2$
$dT$	Différentiel de température en $\text{°C}$	$V$	Vitesse du vent en $m/s$
$dt$	Différentiel de temps		

## 5. Conclusion

Dans ce travail une étude théorique pour étudier le comportement thermique ainsi que le potentiel du rafraichissement en utilisant un capteur thermique fonctionnant en mode nocturne. Les simulations menées pour un climat de Bechar désigné comme étant un climat aride avec une température très haute le jour et une baisse assez remarquable la nuit, notant qu'il est aussi caractérisé par une faible humidité, ont permis de prouver qu'un potentiel de rafraichissement peut être remarqué. L'intégration et l'utilisation d'un capteur thermique nocturne comme technique de rafraichissement peut être prometteuse et exploitable dans le contexte saharien, bien évidemment des études plus approfondies et paramétrique peuvent nous renseigner davantage.

## Nomenclature

## Références

- [1] Gacem, Etude expérimentale de l'efficacité énergétique d'une citerne d'eau enterrée dans le sol pour le conditionnement climatique des locaux, *Journées Internationales de Thermique JITH 2013*, Marrakech, Maroc, 6 Pages, 2013.
- [2] Jannot, Y. Transferts thermiques, *Iére Ed, École des mines*, Nancy, France, P 1-151, 2003.
- [3] Santamouris. M, Passive cooling – the state of the art. *Advances in Solar Energy*, London, James and James Science Publishers, 2006.
- [4] Givoni. B, Indoor temperature reduction by passive cooling systems, *Solar Energy*, 85(8), 1692-1726, 2011.
- [5] Michell, D, K L. Biggs, Radiation cooling of buildings at night, *Applied Energy*, 5(4), 263-275, 1976.
- [6] Kimball. B A, Cooling performance and efficiency of night sky radiators, *Solar Energy*, 34(1), 19-33, 1985.
- [7] Saitoh. T, Matsubishi. H, An energy-independent house combining solar thermal and sky radiation energies. *Solar Energy*, 35(6), 541-547, 1985.
- [8] Parker. D S, Theoretical Evaluation of the Night Cool Nocturnal Radiation Cooling Concept, *Florida Solar Energy Center*, 2005.
- [9] Mihalakakou. G, Ferrante. G A, The cooling potential of a metallic nocturnal radiator, *Energy and Buildings*, 28(3), 251-256, 1998.
- [10] Bliss. R W. Atmospheric radiation near the surface of the ground: A summary for engineers, *Solar Energy*, 5(3), 103-120, 1961
- [11] Berdahl. P, Martin. M, Emissivity of clear skies, *Solar Energy*, 32(5), 663-664, 1984.
- [12] Hamza H. Ali, I M S Taha, Cooling of water flowing through a night sky radiator, *Solar Energy*, 55(4), 235-253, 1995.
- [13] Erell. E, Etzion. Y, Radiative cooling of buildings with flat-plate solar collectors, *Building and Environment*, 35(4), 297-305, 2000.
- [14] Saitoh. T S, Fujino. T, Advanced energy-efficient house 'HARBEMAN' house with solar thermal, photovoltaic, and sky radiation energies experimental results, *Solar Energy*, 70(1), 63-77, 2001.
- [15] Argiriou. A, Santamouris. M, Assessment of the radiative cooling potential of a collector using hourly weather data, *Energy*, 19(8), 879-888, 1994.
- [16] Dobson. R T, Thermal modelling of a night sky radiation cooling system, *Journal of Energy in South Africa*, 16(2), 2005.
- [17] Mostrel. M, Givoni. B, Windscreens in radiant cooling, *Passive Solar Journal*, 229-238, 1982.
- [18] Khedari. J, Waewsak. J, Field investigation of night radiation cooling under tropical climate, *Renewable Energy*, 20(2), 183-193, 2000.