

# Etude de l'impact des « cool roofs », de la ventilation naturelle et de l'inertie thermique du sol sur les performances énergétiques de bâtiments commerciaux

Remon LAPISA<sup>1</sup>, Emmanuel BOZONNET<sup>1</sup>, Marc O. ABADIE<sup>1</sup>, Patrick SALAGNAC<sup>1\*</sup>, Rémi PERRIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LaSIE (FRE-CNRS 3474), Université de La Rochelle, La Rochelle, France

<sup>2</sup>SOPREMA, 14 Rue de Saint-Nazaire-67025, Strasbourg Cedex 01, France

\* (auteur correspondant : [patrick.salagnac@univ-lr.fr](mailto:patrick.salagnac@univ-lr.fr))

**Résumé** - Les bâtiments commerciaux de faible hauteur sont souvent caractérisés par de faibles performances énergétiques dues aux transferts thermiques importants au niveau de la toiture et du sol. Dans cet article, le comportement d'un bâtiment de « référence » a été modélisé afin d'étudier les paramètres principaux qui impactent sur la demande d'énergie et le confort. On montre que l'utilisation simultanée de « cool roof » et de la ventilation naturelle combinées avec une forte inertie thermique du bâtiment peut être une solution de rafraîchissement passive suffisante en été.

## 1. Introduction

Le bâtiment est le premier secteur consommateur de l'énergie. En France, il représente 43,87% de la consommation annuelle d'énergie finale en 2010 [1] dont 20,9% concernent le secteur tertiaire/commercial [2].

L'objectif de cette étude est de définir et de maîtriser les facteurs clés des déperditions thermiques des bâtiments commerciaux de faible hauteur pour améliorer leurs performances énergétiques, la finalité étant de réduire la consommation énergétique liée au système de chauffage en assurant un confort thermique en été sans système de climatisation. L'utilisation d'un revêtement à forte réflectivité solaire (« cool roof »), couplé avec une ventilation naturelle (VN) peut être une solution intéressante pour le refroidissement passif.

Le principe fondamental des « cool roofs » est de réduire les gains thermiques dus au rayonnement solaire en modifiant la réflectivité et l'émissivité thermique de la surface extérieure de la toiture. La surface extérieure de la toiture est revêtue par un matériau ayant un coefficient de réflexion solaire important, par ailleurs la chaleur stockée sera émise en grande quantité vers le ciel grâce à une valeur élevée de l'émissivité thermique. L'utilisation de cette technologie dans un bâtiment commercial réduit les pics de températures de la surface extérieure de la toiture d'environ 33°C à 42°C en été [3]. La facture énergétique des systèmes de climatisation peut être réduite jusqu'à 70 Wh.m<sup>-2</sup>/jour (52 % du besoin total). Une étude [5] menée sur la région de Marseille a montré une diminution significative de la température moyenne de la surface extérieure de la toiture d'environ 10°C en été.

La ventilation naturelle nocturne atténue la surchauffe de l'air intérieur en l'évacuant vers l'extérieur. Une étude menée par Wang et al. [6] a montré que la ventilation nocturne est très efficace pour faire baisser la température opérative surtout dans l'hémisphère nord. Elle constitue un moyen de refroidissement passif et permet de réduire la température intérieure de 1,5°C à 3°C [7–10] en fonction de la localisation, des enveloppes et des scénarios d'utilisation des bâtiments.

Par ailleurs, la surface du plancher importante et les caractéristiques du sol jouent un rôle important dans le bilan énergétique et la performance thermique des bâtiments commerciaux

de faible hauteur. La plupart des études portent sur des bâtiments spécifiques, mais néanmoins dans ces études on constate que le rôle du sol ne doit pas être négligé. Une étude menée par Labs et al. [11] sur les déperditions thermiques à travers un plancher a montré que si le bâtiment est non-isolé, ces déperditions représentent 10 % des pertes totales et de 30 % à 50 % pour les enveloppes bien isolés. De plus, le sol constitue un facteur clé à prendre en considération en raison de son inertie thermique pour les bâtiments de faible hauteur qui sont souvent construits avec des matériaux à faible inertie (surtout pour la construction métallique). L'étude numérique d'une cellule virtuelle par Aste et al. [12] a montré qu'il existe une différence de charge thermique pour le système de chauffage d'environ 10 % en comparant les performances de l'enveloppe à forte et à faible inertie thermique. Les performances énergétiques du bâtiment vont dépendre fortement de l'inertie thermique du sol et des éléments le constituant. Une attention particulière doit être portée pour le choix optimum de ces paramètres.

Dans cet article, nous démontrons l'effet des stratégies des systèmes de refroidissement (« cool roof » et ventilation naturelle) en étudiant un bâtiment commercial « type » de faible hauteur. Une analyse paramétrique est effectuée pour étudier les impacts du « cool roof », de la ventilation naturelle et de l'inertie thermique du sol sur les besoins énergétiques et le confort.

## 2. Problématique et cas étudié

### 2.1. Description du bâtiment commercial

Un bâtiment commercial d'une surface au sol de  $36 \times 36 \text{ m}^2$ , d'une hauteur de 6 m, situé à Marseille, a été considéré (Figure 1).

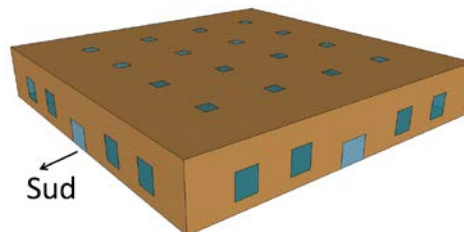


Figure 1 : Géométrie du bâtiment étudié

Sa structure est en acier. La toiture comprend 16 lanterneaux représentant une surface de  $31,36 \text{ m}^2$ , soit 2,4 % de la surface totale. Les parois verticales (sauf celle au nord) comprennent  $30 \text{ m}^2$  de fenêtres. Les murs extérieurs sont isolés et ont une épaisseur totale de 30,5 cm (1,3 cm de plâtre, 14 cm de laine de verre, 15 cm de laine de roche et un bardage externe en acier de 2 mm). L'inertie thermique du sol de ce bâtiment est principalement due à la dalle en béton de 160 mm d'épaisseur sans isolation thermique. On suppose que les rayonnages occupent 10 % du volume total du bâtiment. Ils sont constitués de cartons (40 %), de liquides (30 %), de métaux (10 %) et de matières plastiques (20 %). Le bâtiment est équipé d'un système de chauffage mais pas de système de climatisation. Afin d'assurer le renouvellement d'air, une ventilation mécanique contrôlée (VMC) double flux fournit un débit d'air de 0,75 vol/h pendant la journée. Le bâtiment est occupé tous les jours de 7 h à 22 h sauf le dimanche.

## 2.2. Stratégies de rafraîchissement : « cool roof » et ventilation naturelle

Deux techniques passives ont été utilisées pour rafraîchir le bâtiment en été : le « cool roof » (CR) qui consiste à traiter spécialement le revêtement de toiture afin d'avoir des réflectivités solaires élevées et la ventilation naturelle. Pour le bâtiment de référence, une réflectivité solaire (albédo) de 0,3 a été considérée pour le revêtement de la toiture et une émissivité aux grandes longueurs d'ondes ( $\lambda > 4 \mu\text{m}$ ) de 0,9. Lors de l'étude paramétrique, l'albédo peut varier de 0,1 à 0,9. En ce qui concerne la ventilation naturelle (VN), elle est assurée par l'ouverture des lanterneaux durant l'été pendant la période nocturne de 20 h à 6 h et lorsque la température intérieure est supérieure à la température extérieure (écart de  $2^\circ\text{C}$ ). L'entrée d'air se fait uniquement par infiltration. La VMC fonctionne pendant l'été et peut être réglée en fonction des besoins de ventilation.

## 3. Modèle du bâtiment

La simulation thermique du bâtiment a été réalisée en couplant un modèle thermique développé sous TRNSYS et un modèle aéraulique via le logiciel CONTAM. Comme illustré par la Figure 2a, le bâtiment est modélisé comme un bâtiment mono-zone qui interagit avec les éléments suivants : un modèle « aéraulique » qui permet de calculer le débit de ventilation et la perméabilité à l'air à travers l'enveloppe, un modèle de toiture pour tenir compte des propriétés radiatives du « cool roof » et un modèle de sol pour évaluer le transfert de chaleur par le sol.

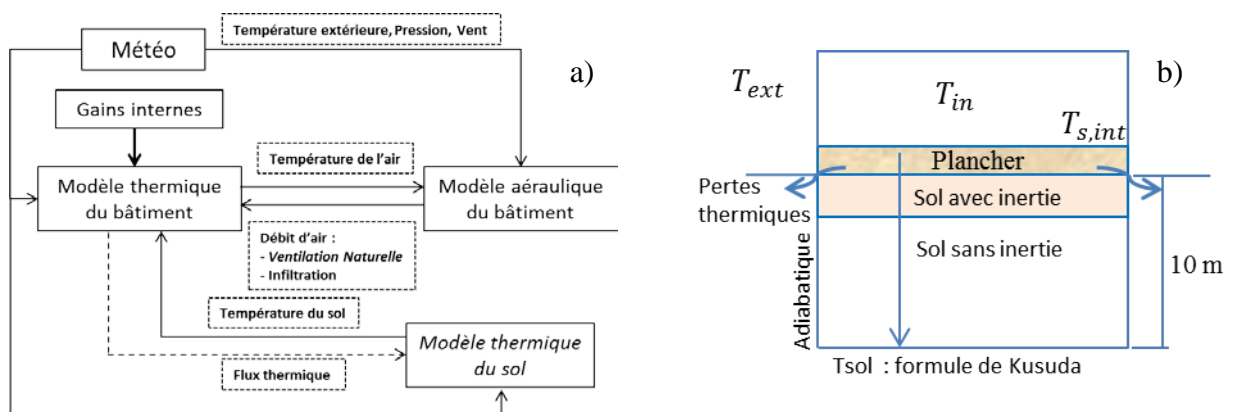


Figure 2 : a) Couplage thermo-aéraulique ; b) Modèle de sol RT+I

Pour évaluer les transferts thermiques à travers le sol, deux modèles ont été utilisés : un modèle unidimensionnel avec inertie du sol (RT+I) et un modèle basé sur la réglementation thermique qui ne prend pas en compte l'impact de l'inertie du sol (RT). Le transfert d'humidité n'est pas considéré ici. Ces deux modèles représentent respectivement une dalle non isolée et une dalle parfaitement isolée.

Le **modèle RT** est utilisé afin d'identifier l'effet de l'inertie du sol sur les besoins énergétiques du bâtiment et le confort d'été par comparaison avec le modèle suivant (RT+I). Les échanges thermiques sont modélisés comme des ponts thermiques.

Le **modèle RT+I**, illustré par la Figure 2b, reprend les échanges du modèle RT et divise le sol en-dessous de la dalle en deux couches. La première couche est considérée comme un sol massif représentant une inertie thermique. La deuxième couche est assimilée à une résistance thermique (sans masse et sans inertie thermique). Le modèle simule un sol de 10 m d'épaisseur. Adjali et al [13] ont montré que la variation de la température du sol peut être considérée comme indépendante du comportement thermique du bâtiment au-delà de 10 m de

profondeur. Le calcul de cette température est précisé dans la référence [14]. Une étude paramétrique a été réalisée par Lapisa et al. [15] afin d'évaluer l'épaisseur minimale de la couche massive du sol nécessaire pour assurer une bonne représentation de l'inertie thermique. Le modèle proposé, avec une épaisseur de 30 cm de la couche massive, donne des résultats se rapprochant d'un modèle tridimensionnel de sol. Ce dernier modèle, plus précis, a été exclu car il nécessite des temps de simulation trop importants [16] vis-à-vis des études paramétriques effectuées dans le présent article.

Pour les deux modèles (RT et RT+I), les ponts thermiques parois verticales/plancher sont calculés selon les normes internationales (EN ISO 13370, 2007).

#### 4. Le potentiel de rafraîchissement passif du « cool roof » et de la ventilation

L'étude paramétrique est basée sur le bâtiment de référence défini précédemment : la toiture a une faible réflectivité solaire (0,3), la ventilation mécanique fonctionne uniquement au cours de la période d'occupation et les lanterneaux sont fermés (pas de ventilation naturelle). L'inertie intérieure (rayonnement) est prise en compte. Dans ce qui suit, les critères de surchauffe de l'air intérieur sont basés sur la température opérative pendant l'été et la période d'occupation :

- Les degrés-heures (DH) au-dessus de la température du confort adaptatif d'été (EN-ISO-15251). Ces DH [ $^{\circ}\text{Ch}$ ] sont proportionnels aux besoins d'énergie pour le rafraîchissement.
- Le taux d'inconfort au-dessus de la température du confort adaptatif pendant la période d'occupation (EN-ISO-15251).

Les simulations ont été réalisées sur deux années consécutives afin de s'affranchir des conditions initiales.

##### 4.1. Impact de l'albédo

La Figure 3 présente l'évolution de la température opérative (Top) sur trois jours d'été (1-3 Août) pour les deux modèles de sol et deux réflectivités solaires (0,3 pour la toiture de référence et de 0,9 pour le cool roof). Text est la température extérieure et Ts est la température de la surface de la toiture.

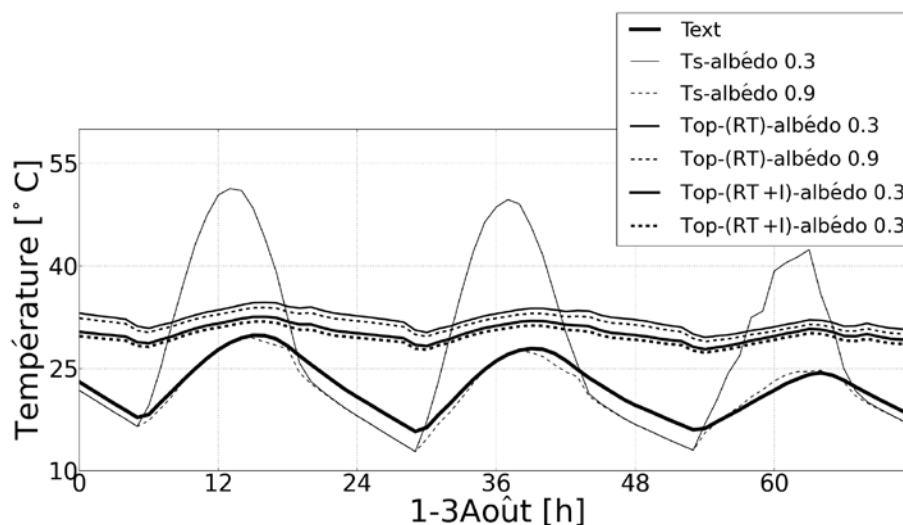


Figure 3 : Evolution des températures opérative et de surface de la toiture en été

On note que les pics de température se produisent sur l'intervalle 12h00-15h00. En raison de la présence d'un revêtement « cool roof », on constate que la moyenne des températures maximales de la surface extérieure de la toiture diminue fortement de 45,2°C à 26,7°C. En revanche, l'impact sur la température opérative est seulement de 0,63°C. Cela est principalement dû à la forte isolation thermique de la toiture. L'impact de l'inertie thermique du sol, qui est évalué à partir des différents résultats entre les modèles RT+I et RT, est important sur le moyenne de la température opérative maximale en été avec un écart d'environ 1,64°C dans le cas de référence et d'environ 1,57°C dans le cas d'un bâtiment avec « cool roof ». Ces effets sont favorisés par les échanges en-dessous de la dalle qui limitent la surchauffe de l'air intérieur.

La Figure 4 présente les effets du revêtement « cool roof », évalués sur les critères de confort d'été préalablement définis (DH et taux d'inconfort) dans le cas d'un bâtiment avec et sans inertie thermique (liée au sol) et avec ou sans présence de rayonnement.

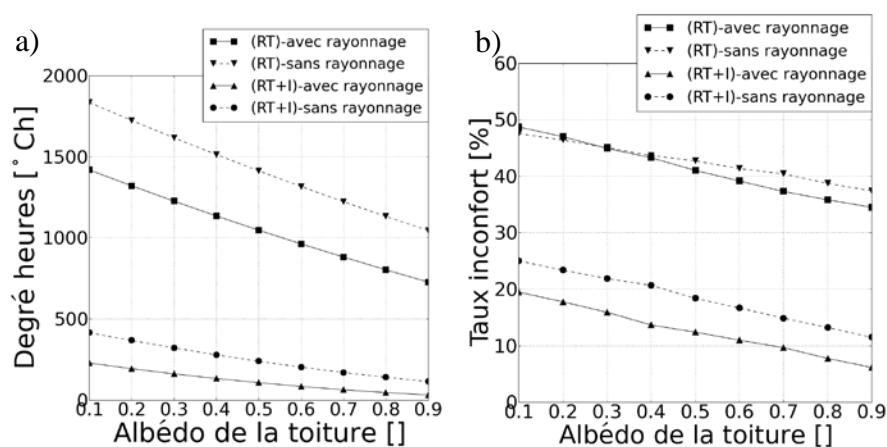


Figure 4 : Effet de l'albédo de la toiture sur a) DH et b) taux d'inconfort

Pour le cas du bâtiment de référence, une réduction de 79,1 % des DH a été constatée si l'inertie du sol est prise en compte. Dans le cas contraire (sans inertie), la réduction n'est que de 40,6 %. Ces diminutions sont observées dans un intervalle d'albédo variant entre 0,1 et 0,9 (Figure 4.a). L'inertie thermique du sol contribue à une réduction de 1063,8°Ch des DH et de 694,8°Ch pour le bâtiment avec le revêtement « cool roof ». D'autre part, on peut noter que les rayonnages absorbent une partie importante de la chaleur de l'air intérieur et réduisent les DH d'environ 49,4 % par rapport à un bâtiment vide. Pour ce type de bâtiment bien isolé, on constate qu'on ne peut pas négliger l'impact de l'inertie du sol.

La Figure 4.b présente la variation du taux d'inconfort en fonction de l'albédo. Une tendance similaire est constatée pour le modèle RT+I. En revanche, l'effet de l'inertie des rayonnages (modèle RT) est plus important dans le cas d'un bâtiment avec « cool roof ». Ce résultat met en évidence l'effet important de l'inertie thermique des rayonnages sur le comportement thermique de ce type de bâtiment.

#### 4.2. Impact de la ventilation naturelle

La Figure 5 montre l'impact de l'ouverture des lanterneaux sur le débit de ventilation naturelle et les DH au-dessus de la limite de la température du confort adaptatif.

Le débit de ventilation naturelle augmente de façon quasi linéaire en fonction du degré d'ouverture des lanterneaux. Cela indique que l'effet du vent est le facteur déterminant par rapport à la différence de la température intérieure et extérieure. Le cas RT avec des

températures intérieures plus élevées présente le plus fort débit ce qui montre que le gradient de température agit sur la ventilation par l'effet du tirage thermique.

Les Figures 5b et c montrent l'efficacité de la ventilation naturelle pendant la nuit même avec un faible débit d'air. Les DH du bâtiment de référence, pendant la période d'occupation, diminuent proportionnellement avec l'augmentation de la surface des lanterneaux. Dans ce cas, le stockage de la chaleur par les rayonnages favorise le rafraîchissement pendant la nuit et contribue à la réduction de la température intérieure. Pour le modèle RT+I, la ventilation naturelle réduit les DH de 21,3%, dans le cas d'un bâtiment vide (sans rayonnement), et de 18,2 % dans le cas du modèle RT.

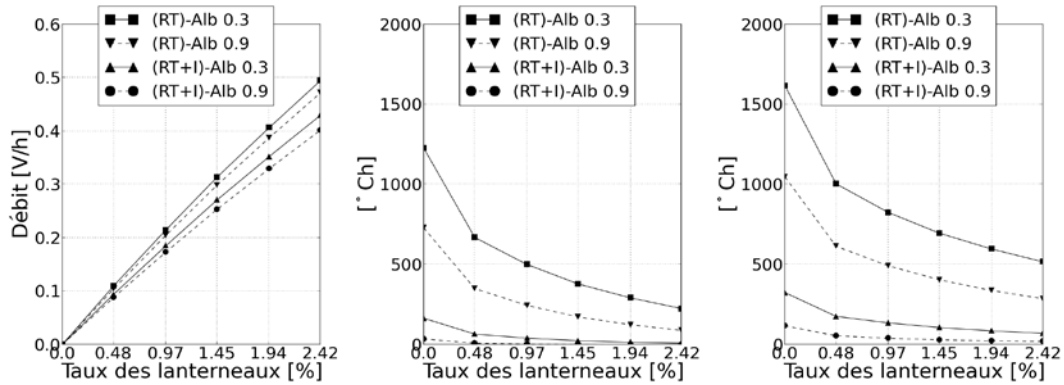


Figure 5 : Effet du ratio de la surface des lanterneaux sur (a) le débit de ventilation naturelle, (b) DH pour le bâtiment avec des étagères et (c) DH pour le bâtiment sans étagères

### 4.3. Les stratégies de rafraîchissement passif

Cette partie a pour objectif d'évaluer l'effet de la combinaison entre la ventilation naturelle et les revêtements « cool roofs » en tenant compte de l'effet de l'inertie thermique du sol et des étagères. La surchauffe pendant la période d'occupation en été est exprimée par la moyenne des températures maximales journalières et les degrés-heures.

#### 4.3.1. Effet du couplage du cool roof et de la ventilation naturelle

Le potentiel du couplage de l'effet du « cool roof » et de la ventilation naturelle en fonction de la surface des lanterneaux et de l'albédo de la toiture est présenté par la Figure 6. Les deux graphes présentent les mêmes effets sur les stratégies de rafraîchissement passif.

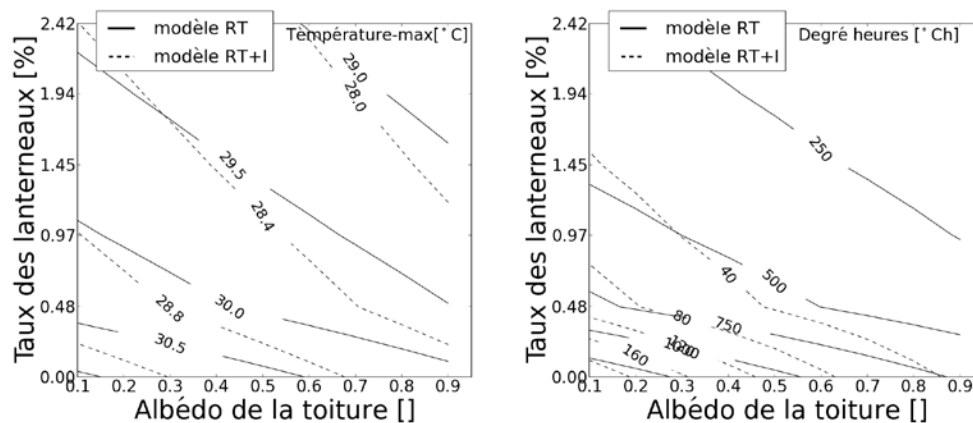


Figure 6 : Abaque d'iso valeur entre l'albédo de la toiture et le ratio de la surface des lanterneaux - a) pour la température opérative, b) pour les DH d'inconfort

Entre 0 % et 0,5 % d'ouverture des lanterneaux, on constate que la ventilation naturelle est plus efficace. La moyenne de la température maximale diminue de 0,4°C à 0,9°C. L'effet combiné de la ventilation et du « cool roof » engendre une réduction d'environ 1,5°C de la température opérative (Figure 6a) et des DH (Figure 6b).

#### 4.3.2. Comparaison entre les différentes stratégies de rafraîchissement

Afin de comparer les stratégies de rafraîchissements (CR-0,9, VN nocturne, VMC nocturne) définies précédemment, nous avons analysé les températures absolues (Figure 7) et les DH (Figure 8) pour le modèle RT+I. Dans cette étude, l'effet de la ventilation (naturelle et/ou mécanique) est plus important de point de vue rafraîchissement par rapport à celui du cool roof. La moyenne de la température opérative maximale en été pour le cas de référence est 30,8°C. Il diminue d'environ 0,7°C pour le cool roof, et jusqu'à 1,6°C pour la VN nocturne. Avec une VMC nocturne, la diminution de la température opérative est presque similaire au cas de la ventilation naturelle (1,4°C). L'efficacité de la ventilation est cependant, fortement dépendante du débit d'air et de la température de l'air extérieur. L'effet combiné de ces stratégies permet de réduire la température opérative de 2,8°C (Figure 7).

Les DH de température d'inconfort pour le bâtiment de référence sont de 163,7°CCh et se réduisent respectivement à 34,2°C et 8°CCh pour le CR et la VN. Lorsque l'on combine ces différentes techniques, l'inconfort est annulé (Figure 8).

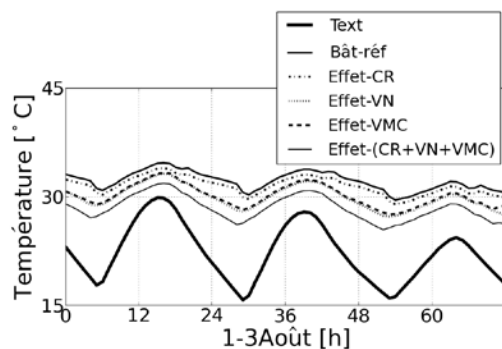


Figure 7 : Impact des techniques de rafraîchissement passif sur la température opérative

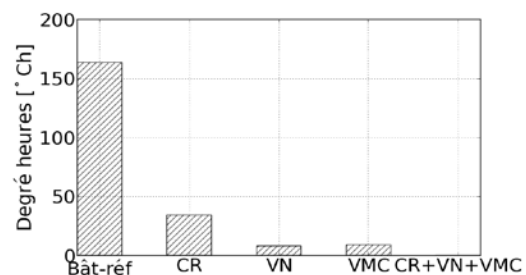


Figure 8 : Impact des techniques de rafraîchissement passif sur les DH

## 5. Conclusions

À travers l'étude d'un bâtiment commercial, bien isolé, situé dans un climat méditerranéen, nous avons montré l'intérêt des stratégies du rafraîchissement passif telles que la ventilation naturelle assurée par les lanterneaux qui contribue à une forte réduction de l'inconfort d'été de 163,7°CCh à 8°CCh et aux revêtements « cool » qui permettent une diminution à 34,2°C. La ventilation mécanique nocturne contribue d'une manière similaire à la ventilation naturelle. Pour une meilleure efficacité, la combinaison de ces techniques est souhaitable, et permet d'assurer le confort thermique. Par ailleurs, nous avons démontré que ces solutions ne pourraient pas être totalement efficaces sans la contribution de l'inertie thermique du sol. En effet, cette dernière contribue à une réduction importante des DH. Cela signifie que pour les bâtiments de grands volumes et faible hauteur, le sol est un facteur important à prendre en considération. En revanche, l'isolation du sol pourrait avoir un effet négatif pendant la période estivale. D'autre part, l'inertie des rayonnages contribue également au

rafraîchissement passif, et elle réduit de 49,4% les DH par rapport à un bâtiment sans rayonnement.

## Références

- [1] Chiffres clés de l'énergie édition 2012, MEDDE, Commissariat général au développement durable.
- [2] Rabai Y., 2012, "Dix ans de consommation d'énergie dans le secteur tertiaire [Publications, Chiffres & statistiques, 2012] : Observation et statistiques."
- [3] Akbari H., Levinson R., and Rainer L., 2005, "Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings," *Energy and Buildings*, **37**(10), pp. 1007–1016.
- [4] Xu T., Sathaye J., Akbari H., Garg V., and Tetali S., 2012, "Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions," *Building and Environment*, **48**, pp. 1–6.
- [5] Bozonnet E., Doya M., and Allard F., 2011, "Cool roofs impact on building thermal response: A French case study," *Energy and Buildings*, **43**(11), pp. 3006–3012.
- [6] Wang Z., Yi L., and Gao F., 2009, "Night ventilation control strategies in office buildings," *Solar Energy*, **83**(10), pp. 1902–1913.
- [7] Blondeau P., Spérandio M., and Allard F., 1997, "Night ventilation for building cooling in summer," *Solar Energy*, **61**(5), pp. 327–335.
- [8] Geros V., Santamouris M., Tsangrasoulis A., and Guarracino G., 1999, "Experimental evaluation of night ventilation phenomena," *Energy and Buildings*, **29**(2), pp. 141–154.
- [9] Kubota T., Chyee D. T. H., and Ahmad S., 2009, "The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia," *Energy and Buildings*, **41**(8), pp. 829–839.
- [10] Shaviv E., Yezioro A., and Capeluto I. G., 2001, "Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy," *Renewable Energy*, **24**(3–4), pp. 445–452.
- [11] Labs K, Shen L, Huang Y, Parker D, and Carmody J, 1988, "Building Foundation Design Handbook," Oak Ridge National Lab., TN (USA); Minnesota Univ., Minneapolis (USA). Underground Space Center, **RNL/Sub-86-72143/1**.
- [12] Aste N., Angelotti A., and Buzzetti M., 2009, "The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings," *Energy and Buildings*, **41**(11), pp. 1181–1187.
- [13] Adjali M. H., Davies M., Rees S. W., and Littler J., 2000, "Temperatures in and under a slab-on-ground floor: two- and three-dimensional numerical simulations and comparison with experimental data," *Building and Environment*, **35**(7), pp. 655–662.
- [14] Kusuda T., and Bean J. W., 1984, "Simplified methods for determining seasonal heat loss from uninsulated slab-on-grade floors," *ASHRAE Trans. (United States)*, **90**(CONF-840124-).
- [15] Lapisa R., Bozonnet E., Abadie M., Salagnac P., and Perrin R., 2013, "Effect of ground thermal inertia on the energy balance of commercial low-rise buildings," *Building Simulation 2013*, Chambéry, France.
- [16] McDowell T. P., Thornton J. W., and Duffy M. J., 2009, "Comparison of a Ground-Coupling Reference Standard Model to Simplified Approaches," Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le gouvernement indonésien pour son soutien financier.