

# Conception et validation d'un capteur de mesure de la température extérieure équivalente d'une paroi opaque d'un bâtiment

Rémi Bouchié\*<sup>1</sup>, Stéphanie Derouineau<sup>1</sup>, Charlotte Abele<sup>1</sup>, Jean-Robert Millet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Paris Est – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)  
88 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne  
77447 MARNE-LA-VALLEE Cedex 2  
[\\*remi.bouchie@cstb.fr](mailto:remi.bouchie@cstb.fr)

---

*RESUME. Les conditions aux limites extérieures au niveau des parois opaques d'un bâtiment font intervenir des phénomènes couplés dont la mesure ou la modélisation peuvent s'avérer délicates (rayonnement vers l'environnement ...). Certains modèles de transfert thermique du bâtiment permettent de définir une température extérieure équivalente tenant compte du couplage de ces phénomènes. Un capteur permettant un mesurage direct de cette température extérieure équivalente a été développé et validé expérimentalement. Mis en œuvre sur les parois extérieures d'un bâtiment, son utilisation permettrait de réaliser un mesurage direct de l'effet des sollicitations extérieures pour fiabiliser les méthodes d'identification des performances thermiques intrinsèques des enveloppes de bâtiment.*

*MOTS-CLÉS : Transferts thermiques, conditions aux limites, performance thermique intrinsèque de l'enveloppe*

---

*ABSTRACT. External boundary conditions on opaque components of the envelope include complex phenomena (radiations...) which can be difficult to measure or to calculate. Some thermal transfer models of buildings can use an equivalent external temperature as an input for simulation. A sensor measuring directly this equivalent external temperature has been designed and validated. Installed on external faces of a building, this sensor provides a direct measurement of external boundaries, in order to make identification methods used to deduce intrinsic thermal performance of the envelope more accurate.*

*KEYWORDS : Thermal transfer, boundary conditions, thermal performance of the envelope*

---

## 1. INTRODUCTION

Des écarts sont aujourd'hui constatés entre les consommations énergétiques prévues en phase de conception à l'aide d'outils de simulation thermique et celles mesurées en exploitation. Si de nombreux éléments peuvent expliquer ces écarts (comportement des occupants, mise en œuvre...), une partie peut être attribuée aux hypothèses sur les sollicitations climatiques utilisées dans les outils.

Les calculs thermiques prédictifs simulant la consommation énergétique d'un bâtiment sont effectués à partir de mesures de paramètres climatiques extérieurs d'une part, et de corrélations reliant ces mesures à leurs effets sur les transferts thermiques d'autre part.

La vitesse d'air  $v$  au voisinage d'une paroi peut être mesurée à l'aide d'anémomètres et est communément reliée localement au coefficient d'échange thermique superficiel extérieur convectif  $h_{ce}$  en utilisant par exemple des équations de la forme (Sartori 2006) :

$$h_{ce} = a + b.v^n \quad (1)$$

Où  $a$ ,  $b$  et  $n$  sont des constantes semi-empiriques qui varient dans la littérature d'un auteur à l'autre et en fonction de l'inclinaison, de l'orientation, de la rugosité de la paroi. L'annexe A de la norme NF EN ISO 6946 (NF EN ISO 6946 : 2008) donne par exemple :

$$h_{ce} = 4 + 4.v \quad (2)$$

La vitesse d'air au voisinage extérieur d'une paroi est toutefois un paramètre dont la mesure précise s'avère délicate du fait de la variabilité du vent en vitesse et direction et des effets de turbulence dus aux interactions entre le vent et le bâtiment.

Le rayonnement solaire global incident sur chaque paroi d'inclinaison et d'orientation donnée peut être mesuré à l'aide de pyranomètres, mais il est généralement déduit d'autres données météorologiques plus facilement accessibles comme les rayonnements global et diffus horizontaux, en ajoutant une hypothèse sur l'albédo du sol (Th-BCE 2012).

Le rayonnement grande longueur d'onde vers l'environnement, et en particulier vers la voûte céleste, a été abondamment étudié. Le rayonnement vers la voûte céleste est fréquemment modélisé par l'intermédiaire d'une émissivité équivalente de la voûte céleste  $\varepsilon_{sky}$ , ou d'une température de ciel équivalente, qui sont reliées par la formule (Berdahl et Martin 1983) :

$$T_{sky} = \varepsilon_{sky}^{\frac{1}{4}} T_e \quad (3)$$

Si  $T_e$  est la température d'air extérieure.

De nombreux auteurs proposent des corrélations liant l'émissivité équivalente d'un ciel clair aux caractéristiques d'humidité de l'air ambiant, et d'autres paramètres correctifs liés à l'altitude et à l'heure de la journée (Berdahl et Martin 1983). La prise en compte de l'effet de la couverture nuageuse est réalisée par un coefficient tenant compte de la nébulosité du ciel corrigeant l'émissivité équivalente du ciel clair (Picha et Villanueva 1962). La nébulosité du ciel peut être estimée par observation du pourcentage de ciel couvert, en 10° ou 8° de ciel couvert, ce qui constitue une mesure peu objective.

Pour les parois verticales ou de forte inclinaison, le rayonnement grande longueur d'onde vers l'environnement est difficilement modélisable du fait de la grande variabilité des surfaces environnantes et de leurs températures. Le flux radiatif net peut être déduit de mesures de flux radiatifs incidents, réalisées par un pyrgéomètre, et de température de surface des parois étudiées (Oliveti et al. 2012).

Là aussi, des approches simplificatrices sont aussi proposées : la norme NF EN ISO 13790 (NF EN ISO 13790 : 2013) propose notamment un écart entre températures d'air et de la voûte céleste constant, dépendant de la latitude (11 °C dans les régions tempérées). Un comparatif entre les résultats de cette norme et ceux obtenus à l'aide d'essais plus précis a relevé des écarts significatifs au niveau des flux radiatifs nets échangés (Oliveti et al. 2012). L'origine de ces écarts s'explique selon les auteurs par la simplification utilisée dans la norme EN ISO 13790 concernant la température du ciel, mais aussi pour les parois verticales par l'échauffement diurne de la surface du sol, non prise en compte dans le bilan radiatif simplifié de la norme EN ISO 13790.

Ainsi, la caractérisation précise des conditions à limites extérieures au voisinage de chaque paroi d'un bâtiment s'avère délicate du fait du mesurage de grandeurs très localisées et variables (vitesse

d'air, réflexions et émissions de rayonnement par l'environnement) et de l'utilisation de corrélations simplifiées (convection, température de ciel).

La connaissance précise des conditions aux limites extérieures appliquées réellement sur chaque paroi du bâtiment est cependant nécessaire lors de la mise en œuvre de protocoles de vérification des performances énergétiques, en particulier pour la caractérisation des performances intrinsèques du bâti à réception. Le principe de ces protocoles repose en effet sur des méthodes d'identification s'appuyant sur des modèles thermiques d'une part, et d'autre part sur des mesures de consommations énergétiques, de conditions aux limites intérieures et de sollicitations extérieures comme la méthode « coheating » (Johnston 2012). Il est alors crucial de maîtriser ces incertitudes sur les sollicitations extérieures pour l'application de méthodes d'identification de paramètres intrinsèques au modèle, sous peine d'augmenter significativement l'incertitude sur les paramètres identifiés.

## 2. METHODOLOGIE

Le principe consiste à regrouper tous les flux en provenance de l'environnement extérieur dans une température extérieure équivalente.

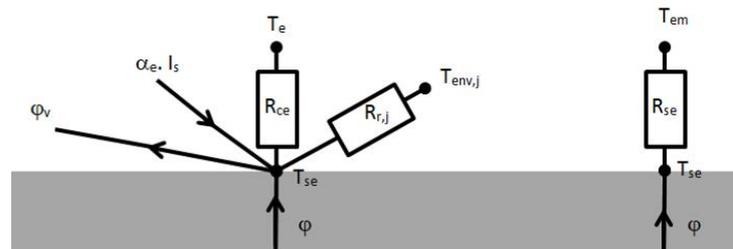


Figure 1 : Schéma électrique équivalent des transferts thermiques dans une paroi opaque

Un bilan au nœud de température de surface extérieure permet d'écrire :

$$\varphi = \varphi_v + h_{ce} \cdot (T_{se} - T_e) + \sum_j F_j \cdot h_{rj} \cdot (T_{se} - T_{env,j}) - \alpha_e \cdot I_s = \frac{T_{se} - T_{em}}{R_{se}} \quad (4)$$

Avec :

- $\alpha_e$  Coefficient d'absorption énergétique de la face extérieure,
- $I_s$  Flux solaire incident sur la paroi, en W/m<sup>2</sup>
- $\varphi$  Densité de flux thermique nette par conduction sur la face extérieur de la paroi opaque, en W/m<sup>2</sup>
- $\varphi_v$  Densité de flux thermique équivalente due aux effets des précipitations sur la paroi extérieure (évaporation de l'eau, rosée matinale, gel, fusion de la neige...), en W/m<sup>2</sup>
- $h_{ce}$  Coefficient d'échange superficiel extérieur convectif, en W/(m<sup>2</sup>.K)
- $T_{se}$  Température de la surface extérieure, en K
- $T_e$  Température d'air extérieure, en K
- $F_j$  Facteur de forme entre la paroi et la surface j vue par la paroi,
- $h_{rj}$  Coefficient d'échange superficiel extérieur radiatif linéarisé, en W/(m<sup>2</sup>.K)

$T_{envj}$	Température équivalente de la surface j vue par la paroi, en K
$U_p$	Coefficient de transmission thermique surfacique de la paroi, en W/(m <sup>2</sup> .K)
$R_{se}$	Résistance thermique superficielle extérieure, en m <sup>2</sup> .K/W, définie par :

$$R_{se} = \frac{1}{h_{ce} + \sum_j F_j \cdot h_{r_j}} \quad (5)$$

On en déduit donc une expression de la température extérieure équivalente  $T_{em}$  :

$$T_{em} = T_e + R_{se} \cdot \left( \alpha_e \cdot I_s - \varphi_v - \sum_j F_j \cdot h_{r_j} \cdot (T_e - T_{env_j}) \right) \quad (6)$$

Cette température  $T_{em}$  permet donc à chaque instant de regrouper les effets des conditions aux limites extérieures sur les parois opaques. Si l'on se place en régime permanent, on peut ainsi remarquer que le flux net moyen est directement relié à l'écart moyen entre température intérieure  $T_i$  et  $T_{em}$  par l'intermédiaire du coefficient de transmission thermique de la paroi  $U_p$  :

$$\bar{\varphi} = U_p \cdot (T_i - T_{em}) \quad (7)$$

On peut également noter que cette température extérieure équivalente est une donnée d'entrée directe du schéma règlementaire 5R1C utilisé dans la RT 2012 (Th-BCE 2012), ce qui permet donc son utilisation dans un modèle horaire dynamique.

Le calcul de cette température extérieure équivalente  $T_{em}$ , faisant intervenir de nombreux flux thermiques difficiles à mesurer, le principe consiste donc à réaliser une mesure directe à l'aide d'un capteur dédié.

### 3. MESURAGE DE LA TEMPERATURE EXTERIEUR EQUIVALENTE $T_{EM}$

#### 3.1. PRINCIPES

Le principe de fonctionnement du capteur consiste à mesurer la température en surface d'un revêtement dont les caractéristiques d'absorption énergétique  $\alpha_e$  et d'émissivité  $\varepsilon$  sont connues. Ce revêtement est mise en œuvre sur un isolant thermique de manière à limiter au maximum le flux thermique sur la face arrière du revêtement.

En effet l'équation (4) nous montre que :

$$T_{se} = T_e + R_{se} \cdot \left( \alpha_e \cdot I_s - \varphi - \varphi_v - \sum_j F_j \cdot h_{r_j} \cdot (T_e - T_{env_j}) \right) \quad (8)$$

Si  $\varphi = 0$ , on a :

$$T_{se} = T_{em} \quad (9)$$

Toutefois, la mesure ne serait valable que si le revêtement utilisé sur le capteur possédait exactement les mêmes caractéristiques  $\alpha_e$  et  $\varepsilon$  que celles de la face extérieure de la paroi testée. Pour pallier à ce problème, le capteur développé est réalisé avec deux revêtements connus, l'un de couleur sombre et l'autre de couleur claire. Ce type de capteur a déjà été utilisé pour la mesure simplifiée de la température de la voûte céleste en condition nocturne (Braun 1997).

Si l'on suppose que les deux revêtements du capteur ont une émissivité proche de celle de la paroi testée ( $\epsilon_{e,s1} \approx \epsilon_{e,s2} \approx \epsilon_{e,p} = \epsilon_e$ ), et en appliquant les équations (8) et (9), on obtient le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} T_{em,s1} - T_e = A \cdot \alpha_{e,s1} + B \\ T_{em,s2} - T_e = A \cdot \alpha_{e,s2} + B \end{cases} \quad (10)$$

Avec :

$T_{em,s1}$  Température extérieure équivalente du revêtement sombre mesurée, en K

$T_{em,s2}$  Température extérieure équivalente du revêtement clair mesurée, en K

$T_e$  Température d'air extérieur, en K

$\alpha_{e,s1}$  Coefficient d'absorption énergétique du revêtement sombre,

$\alpha_{e,s2}$  Coefficient d'absorption énergétique du revêtement clair,

A, B Paramètres climatiques intégrant les effets combinés de l'environnement extérieur (radiatif courte et grande longueur d'onde, précipitations...).

Ces paramètres peuvent être identifiés à l'aide du système d'équations (11) ce qui permet de déduire la température extérieure équivalente de la paroi sur laquelle le capteur est fixé :

$$T_{em,p} = \frac{T_{em,s1} - T_{em,s2}}{\alpha_{e,s1} - \alpha_{e,s2}} \cdot \alpha_{e,p} + \frac{\alpha_{e,s1} \cdot (T_{em,s2} - T_e) - \alpha_{e,s2} \cdot (T_{em,s1} - T_e)}{\alpha_{e,s1} - \alpha_{e,s2}} + T_e \quad (11)$$

Ainsi, en plus des mesures et caractéristiques propres au capteur ( $T_{em,s1}$ ,  $T_{em,s2}$ ,  $\alpha_{e,s1}$  et  $\alpha_{e,s2}$ ), le calcul de  $T_{em,p}$  de la paroi considérée ne nécessite que la mesure de la température d'air extérieur ainsi que le coefficient d'absorption énergétique de la paroi testée  $\alpha_{e,p}$ .

### 3.2. VALIDATION EXPERIMENTALE

La validation expérimentale a été réalisée à l'aide d'un prototype constitué de deux blocs en polystyrène extrudé (XPS) de 100 mm d'épaisseur (résistance thermique mesurée à 2.96 m<sup>2</sup>.K/W) mis en œuvre dans deux boîtes indépendantes fixées sur un même support. Trois thermocouples de type T (TCT) sont incrustés dans de petites rainures en surface de chaque isolant. Deux plaques en aluminium, préalablement poncées et peintes à l'aide de deux peintures de teintes noire et blanche, sont collées sur chaque surface. Les jeux entre les parois de la boîte et l'isolant sont comblés à l'aide de cire puis d'un mastic en silicone en surface. Les six TCT sont reliés à une centrale d'acquisition par l'intermédiaire de câbles d'extension :



Figure 2 : Capteur de température extérieure équivalente

Les caractéristiques d'absorption énergétique et d'émissivité de chacune des plaques sombres et claires ont été mesurées à l'état initial :

	Plaque noire « 1 »	Plaque blanche « 2 »
Emissivité $\epsilon_e$	$0.89 \pm 0.03$	$0.88 \pm 0.03$
Absorption solaire $\alpha_{e,s}$	$0.96 \pm 0.03$	$0.21 \pm 0.03$

Tableau 1 : Coefficients d'absorption énergétique et émissivités des revêtements noir et blanc du capteur prototype

On peut par ailleurs constater que les émissivités mesurées sont très proches entre elles et correspondent à la valeur couramment rencontrée pour les revêtements standards des parois opaques, ce qui permet de valider cette hypothèse nécessaire pour la déduction de  $T_{em}$  d'une paroi (cf. 3.1).

Le capteur prototype est placé sur une toiture plate dégagée d'un bâtiment du site de Champs-sur-Marne, à proximité immédiate d'une station météorologique qui enregistre entre autre la température d'air, la vitesse du vent, la présence de pluie et le flux solaire global horizontal. Le flux radiatif vers l'environnement se limitant au rayonnement vers la voûte céleste, on peut calculer la température extérieure équivalente théorique de chaque plaque en admettant les hypothèses simplificatrices de la norme EN ISO 13790 (NF EN ISO 13790 : 2013). La formule (6) devient alors :

$$T_{em,s \text{ calculée}} = T_e + \frac{\alpha_{e,s} \cdot I_s - F_r \cdot h_r \cdot (T_e - T_{sky})}{h_{ce} + h_r} \quad (12)$$

Le coefficient d'échange superficiel convectif  $h_{ce}$  est estimé à l'aide de la vitesse du vent mesurée et de l'équation (2), la température de la voûte céleste  $T_{sky}$  est estimée par les corrélations de la littérature (Berdahl et Martin 1983) et (Picha 1962) en fonction de la nébulosité du ciel fournie par des données Météo France enregistrée à Roissy (environ 20 km du site de Champs-sur-Marne).

Sur la période du 27 Mai au 3 Juin 2013, le graphique suivant indique les températures extérieures équivalentes mesurées et calculées pour les plaques blanches et noires, ainsi que les mesures de nébulosité en octat (8 = ciel complètement couvert) et la présence de pluie (5 = présence de pluie) :

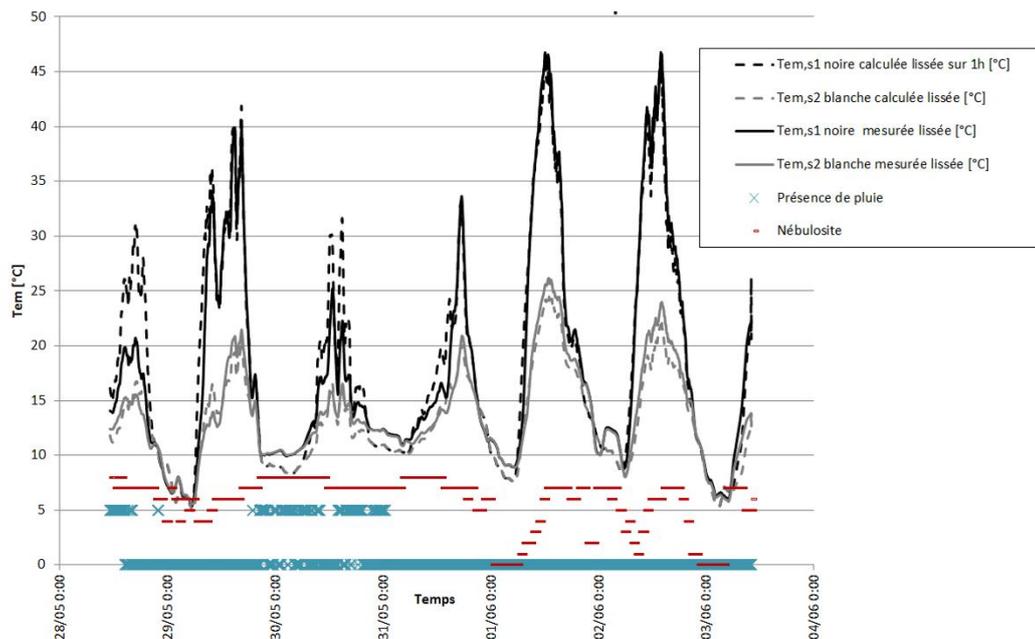


Figure 3 : Températures extérieures équivalentes des plaques noires et blanches mesurées et calculées

L'incertitude de mesurage des températures des faces noires  $T_{em,s1}$  et blanches  $T_{em,s2}$ , tenant compte de toute la chaîne d'acquisition, est estimée à  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Cette incertitude est à comparer à celle obtenue sur la base des hypothèses de calcul utilisées pour estimer les températures extérieures équivalentes des deux faces à partir des données météorologiques et en tenant compte de l'incertitude de mesurage de ces données météorologiques. La valeur de cette incertitude sur les températures calculées est estimée à  $\pm 2.5^\circ\text{C}$ .

On peut constater une bonne concordance entre les valeurs théoriques et mesurées, hormis après les épisodes pluvieux. Les écarts peuvent être dus aux hypothèses des corrélations utilisées pour les valeurs de  $T_{em}$  calculées, en particulier le fait de ne pas considérer l'impact des précipitations qui créent une couche d'eau liquide refroidissant la surface par évaporation pendant la journée et protégeant cette surface du rayonnement froid vers la voûte céleste pendant la nuit. L'impact relativement important des précipitations constaté lors de ces campagnes doit toutefois être relativisé du fait de la position horizontale du capteur qui favorise l'accumulation d'eau. D'autres tests de validation ont été menés en périodes estivale et hivernale et confirment les phénomènes observés sur cette période.

### 3.3. DISCUSSIONS

L'intérêt de ce capteur réside avant tout dans la réduction du nombre de grandeurs à mesurer pour caractériser expérimentalement les conditions aux limites extérieures, et donc l'incertitude qui en découle. En effet, une estimation des conditions aux limites extérieures n'est réalisable qu'à partir de mesures de nombreuses grandeurs locales délicates ou coûteuses à mesurer, citons au minimum : température et vitesse d'air pour estimer le flux convectif, rayonnement solaire incident et absorption énergétique de la paroi pour estimer le flux solaire absorbé, rayonnement grande longueur d'onde incident, émissivité et température de la paroi pour estimer le flux radiatif net vers l'environnement. L'utilisation du capteur permet une estimation de l'effet combiné de ces conditions aux limites à l'aide de cinq mesures : émissivité, absorption énergétique de la paroi, température d'air et températures des surfaces du capteur. Par ailleurs, la mesure directe par ce capteur ne requiert pas l'emploi de corrélations dont l'utilisation peut s'avérer imprécise dans le cas général (corrélation liant la vitesse d'air au coefficient de transfert convectif, température de ciel...).

La principale hypothèse sous-jacente à l'utilisation du capteur consiste à supposer que l'environnement extérieur a le même impact sur les faces du capteur que sur la face extérieure de la paroi sur laquelle il est fixé. Il est possible que la vitesse d'air soit localement différente au voisinage du capteur, mais la principale source d'écart est probablement attribuable à la différence d'état de surface entre les plaques lisses du capteur et un revêtement extérieur de la paroi pouvant être très variable. Cette différence d'état de surface peut avoir un impact sur le coefficient de transfert convectif, mais également sur la capacité d'adsorption de l'eau liquide due aux précipitations.

## 4. CONCLUSIONS

Un capteur permettant un mesurage direct de la température extérieure équivalente d'une paroi opaque a été développé et validé. Cette température peut servir directement de condition aux limites extérieure équivalente pour le calcul du flux net moyen en régime permanent (équation (7)), ou pour des modèles dynamiques horaires simples à une capacité (Th-BCE 2012). Les mesures issues de ce

capteur pourraient permettre de tenir compte de nouveaux phénomènes climatiques actuellement non pris en compte dans les modèles prédictifs, comme l'effet thermique des précipitations.

De plus, l'utilisation de ce capteur serait particulièrement intéressante pour l'application de méthode d'identification qui, à partir de mesures des sollicitations intérieures et extérieures et des consommations de chauffage, permettent d'identifier les paramètres d'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment. L'instrumentation en cours de toutes les parois d'une cellule expérimentale à l'aide de ce capteur permettra de valider l'intérêt de son utilisation et d'envisager son utilisation plus large dans le cadre des outils méthodologiques de garantie de performance énergétique intrinsèque.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- Berdhal, Paul, et Marlo Martin. 1983. « Emissivity of clear skies ». *Solar Energy* vol. 32 n°5: 663-664.
- Brau, Jean. 1997. « Température du ciel : une mesure simplifiée ». *Essais industriels*: 20-22.
- Johnston, David, Dominic Miles-Shenton, David Farmer, Jez Wingfield, Malcom Bell. In Full Scale Dynamic Testing: Ed. Gorse C. A and Erkoreka, IEA Annex 58 2nd Meeting, April 2 – 5 2012 Bilbao.
- NF EN ISO 6946 : 2008. « Composants et parois de bâtiments – Résistance thermique et coefficient de transmission thermique – méthode de calcul ».
- NF EN ISO 13790 : 2013. « Performance énergétique des bâtiments – Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des locaux ».
- Olivetti, Giuseppe, Natale Arcuri, Marilena De Simone, Roberto Bruno. 2012. « Experimental evaluations of the building shell radiant exchange in clear sky conditions ». *Solar Energy* 86: 1785-1795. doi:10.1016/j.solener.2012.03.009
- Picha, K.G., et Jose Villanueva. 1962. « Nocturnal radiation measurements, Atlanta, Georgia ». *Solar Energy* vol. 6 n°4: 151-154.
- Sartori, Ernani. 2006. « Convection coefficient equations for forced air flow over flate surfaces ». *Solar Energy* 80: 1063-1071. doi:10.1016/j.solener.2005.11.001.
- Th-BCE. 2012. « Arrêté du 30 avril 2013 portant approbation de la méthode de calcul Th-BCE 2012 prévue aux articles 4, 5 et 6 de l'arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments ». *Journal officiel* n°0106: 7782.