

# Stockage/déstockage d'énergie sensible et ventilation naturelle en bâtiment : une approche expérimentale à l'échelle 1.

Miguel CHEN AUSTIN<sup>1,3\*</sup>, Alain SEMPEY<sup>1,2,3</sup>, Denis BRUNEAU<sup>3,1,2</sup>, Laurent MORA<sup>1,2,3</sup>, Alain SOMMIER<sup>1,2,3</sup>, Tingting VOGT-WU<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

<sup>2</sup>CNRS, I2M, UMR 5295, F- 33400 Talence, France

<sup>3</sup>Arts et Métiers ParisTech, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

\* (auteur correspondant : miguel.chen@u-bordeaux.fr)

**Résumé** - Une plateforme d'essais (bâtiment monozone) a été instrumentée afin d'appréhender les couplages existants entre ventilation naturelle et apports solaires directs, et stockage&déstockage d'énergie sensible dans le sol. Elle est dotée au Sud d'une dalle béton, d'une façade vitrée, de protections solaires et sur les façades Sud et Nord et en shed, d'ouvertures pilotables. Des mesures distinctes de flux convectif et radiatif en surface de dalle, sous différents scénarii de ventilation naturelle et de gestion des apports solaires de la plateforme, amènent à quantifier ces flux et qualifier ces couplages.

## Nomenclature

$E''$  densité de flux radiatif émise,  $W.m^{-2}$   
 $G''$  densité de flux radiatif incidente,  $W.m^{-2}$   
 $T$  température,  $K$   
 $FGT$  fluxmètre thermique à gradient tangentiel

### Symboles grecs

$\varphi$  densité de flux thermique,  $W.m^{-2}$   
 $\alpha$  absorptivité thermique, -  
 $\varepsilon$  émissivité thermique, -

### Indices et exposants

$PN$  module thermoélectrique noir (Peltier noir)  
 $PB$  module thermoélectrique brillant (Peltier brillant)  
 $C$  échanges convectifs nets  
 $R$  échanges radiatifs nets  
 $ref$  réfléchi  
 $total$  échanges convectif et radiatif combinés  
 $N$  noir (Peltier noir)  
 $B$  brillant (Peltier brillant)  
 $(\pm)$  possibilité d'être positif ou négatif

## 1. Introduction

L'étude de la ventilation naturelle en bâtiment fait l'objet de recherche depuis plus de 50 années, notamment dans le cadre d'études relevant du rafraichissement de bâtiment ou de la qualité de l'air et de la santé [1]. Par ailleurs, l'éclairage naturel, s'il est bien maîtrisé, aide à réduire les consommations électriques dues à l'éclairage artificiel mais peut amener à une réduction des besoins de chauffage en hiver [2]. Nous nous intéressons ici au couplage entre ventilation naturelle, éclairage et rayonnement naturelle et stockage/déstockage d'énergie en bâtiment.

Dans ce but, une plateforme d'essais, bâtiment BEPos monozone dénommé Sumbiosi, construite par le campus de Bordeaux dans le cadre de sa participation à la compétition interuniversitaire Solar Decathlon Europe 2012, a été conçue de façon à favoriser le stockage passif d'énergie diurne en hiver et le déstockage semi-passif d'énergie nocturne en été.

Deux éléments principaux permettent a priori ces fonctions de stockage et déstockage passifs d'énergie : (i) une dalle de forte masse thermique située du côté de la façade Sud vitrée du bâtiment, (ii) des protections solaires et ouvertures motorisées sur les façades Sud, Nord et en shed du bâtiment (voir figure 1). Ces protections (persiennes) et ouvertures (10 volets basculants d'axe horizontal), pilotables, permettent, selon les conditions météorologiques extérieures, l'installation ou non d'une ventilation naturelle, forcée ou mixte.

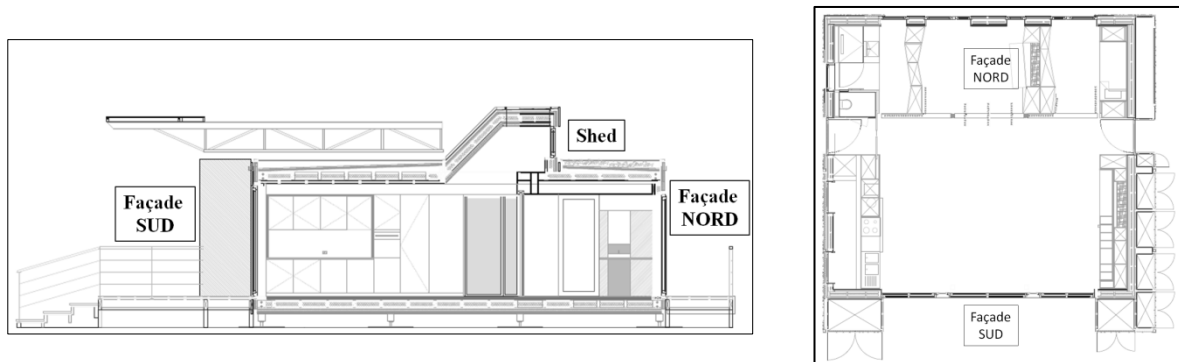


Figure 1 : Schéma de la plateforme expérimentale SUMBIOSI. A gauche : vue de côté Est, et à droite : vue de dessus.

## 2. Approche expérimentale

Elle consiste à observer le stockage et le déstockage d'énergie dans la dalle de béton, sous diverses sollicitations thermiques, notamment divers scénarii de ventilation naturelle. Pour ce faire, des couples de fluxmètres ont été apposés sur cette dalle derrière la baie vitrée de la façade Sud (voir figure 2). Cette instrumentation en termes de flux de chaleur, complétée par des mesures de températures et de vitesses d'air proche de la dalle, nous amène à la possibilité de pouvoir par la suite, relier, qualitativement, la présence nette ou non de ventilation naturelle dans le bâtiment et le stockage et déstockage de chaleur dans cette dalle, ceci en distinguant les échanges convectifs et radiatifs.

Les scénarii sont contrôlés grâce aux ouvertures motorisées du bâtiment et aux persiennes motorisées de la baie vitrée en face Sud du bâtiment.

L'instrumentation retenue et son implantation est décrite ci-dessous (§2.1), puis les configurations des 4 essais menés lors de l'été 2015 sont décrites (§2.2).

### 2.1. Instrumentation de la plateforme d'essais

L'instrumentation de la dalle en termes de flux est composée de plusieurs capteurs : un couple de deux modules thermoélectriques (qui sont utilisés ici en mode à effet Seebeck) et un fluxmètre (effet Seebeck) à gradient tangentiel (voir figures 2 et 3). Ils sont tous positionnés sur la dalle en béton en minimisant une éventuelle résistance de contact par l'apposition préalable de graisse thermique (conductivité thermique de  $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Les 10 positions de mesures de flux sur cette dalle sont représentées par des croix encadrées sur la figure 2.

Chaque module Peltier est composé de plusieurs thermopiles interconnectées, situées entre deux plaques céramiques. Alors, si une différence de température apparaît entre les deux surfaces du module Peltier, celui-ci donnera une réponse en tension ; cette réponse peut être positive ou négative selon le choix de branchement électrique au voltmètre, et bien-sûr, selon le signe de la différence de température entre les 2 surfaces de ce module, c'est-à-dire selon le sens du flux thermique qui traverse le capteur.

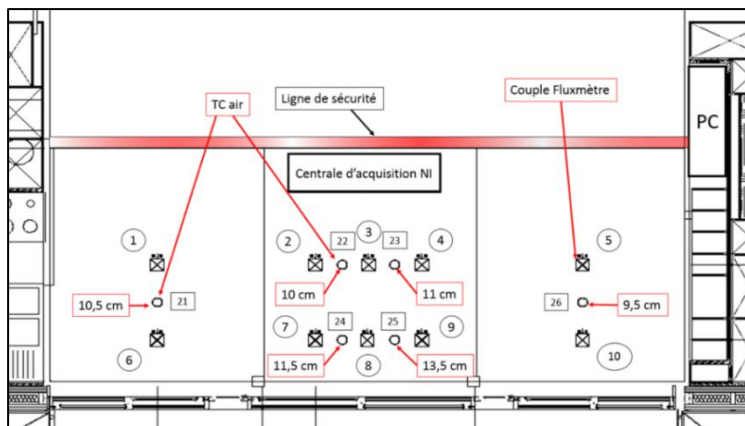


Figure 2 : Implantation spatiale des capteurs sur la dalle en béton (façade Sud en bas)

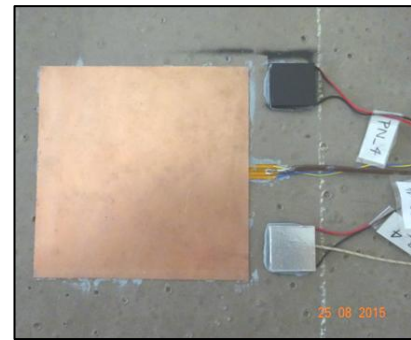


Figure 3 : Les modules Peltier et le fluxmètre à gradient tangential FGT

L'un de ce couple des modules est peint en noir mat sur sa surface en contact avec l'air, l'autre est recouvert d'un adhésif brillant (réflecteur du rayonnement thermique) sur sa surface en contact avec l'air. Le capteur noir permet d'estimer l'échange thermique total (convectif + radiatif) grâce à sa surface avec une émissivité thermique proche du corps noir. Le capteur « brillant » sert a priori à estimer l'échange thermique par convection grâce à sa surface avec une émissivité et absorptivité thermique proche du zéro.

Les capteurs de flux à gradient tangential ont été installés à proximité des modules Peltier afin de comparer les performances de ces 2 types de capteurs (notamment en termes de perturbations ajoutées à la mesure). Bien que leur principe physique de fonctionnement soit le même que pour les modules Peltier, ces fluxmètres sont moins intrusifs grâce à leur faible épaisseur (0,5 mm). Toute sollicitation de flux est moyennée sur la surface du capteur, et, en raison d'un faible temps de réponse, ils sont aptes à appréhender des sollicitations fortement dynamiques.

Chacun de ses capteurs est caractérisé par sa constante de transduction (communément dénommée : sensibilité thermique du fluxmètre), qui permet de relier la tension mesurée au flux de chaleur le traversant [3, 4]. Chaque module Peltier à surface brillante et chaque fluxmètre à gradient tangential est muni d'un thermocouple de type T afin d'avoir une estimation précise de la température de surface de la dalle aux emplacements de mesure de flux.

Des thermocouples de type T sont placés à environ 10 cm au-dessus de la dalle, aux 6 emplacements repérés par des ronds sur la figure 2. D'autres thermocouples, aussi de type T, sont placés au niveau des ouvertures de la façade Nord, de la façade Sud et du shed (voir figure 1), ceci afin d'estimer la température de l'air traversant ces ouvertures.

De plus, deux capteurs de vitesse d'air à fil chaud, ont été placés l'un à proximité de la dalle (entre les mesures de flux n° 8 et n°3 sur la figure 2) et l'autre proche de l'ouverture du shed. Cette mesure de vitesse d'air proche de dalle, nous permet de repérer la présence ou non de ventilation traversante qui peut prendre place si les ouvertures en façade Sud et Nord sont ouvertes. La mesure de vitesse d'air proche du shed a été implantée de façon à permettre la mise en évidence d'un éventuel effet de tirage thermique qui pourrait exister lorsque les ouvertures en shed sont ouvertes (ainsi qu'au moins une des 8 ouvertures en façade Nord et façade Sud) et que la température de la dalle est élevée.

L'ensemble des capteurs implémentés ont été étalonnés par nos soins, à l'exception des fluxmètres à gradient tangential. Nous ne précisons pas ici les procédures d'étalonnage des

modules Peltier, des thermocouples et des fils chaud, par soucis de concision. L'acquisition des données expérimentales (64 capteurs) est effectuée sur des cartes d'acquisition (NI 9205, NI 9213). Les données brutes sont récupérées et traduites en températures, flux thermiques et vitesses d'air, via une interface développée sous Labview.

## 2.2. Configurations des essais

Le tableau ci-dessous nous présente les 4 configurations, en termes de gestion des ouvertures, qui ont été testées sur la période de mi-juillet au début septembre 2015.

	Périodes de mesure					
	Diurne			Nocturne		
	Configuration des ouvertures					
	Nord	Sud	Shed	Nord	Sud	Shed
1	Ouvertes	Ouvertes	Ouvertes	Fermées	Fermées	Fermées
2	Fermées	Fermées	Fermées	Ouvertes	Ouvertes	Ouvertes
3	Ouvertes	Ouvertes	Ouvertes	Ouvertes	Ouvertes	Ouvertes
4	Fermées	Fermées	Fermées	Fermées	Fermées	Fermées

Tableau 1 : *Gestion des ouvertures*

Sur cette période, la météorologie a été essentiellement ensoleillée et anticyclonique. Deux périodes de la journée sont distinguées : une, dénommée diurne, d'une durée d'environ 14h (entre 7h00 et 21h00), et une, dénommée nocturne, correspondant au reste d'une rotation de 24h. Pour les premiers essais faisant l'objet de cette campagne, il nous a semblé raisonnable de ne retenir que des configurations à potentiels (en termes de conséquences de stockage et déstockage de la dalle de béton) marqués : nous avons ainsi choisi que les ouvertures des façades et du shed soient soit toutes ouvertes, soit toutes fermées (cf. tableau 1). Notons ici qu'ouvrir en période diurne doit a priori favoriser les apports d'énergie par convection à la dalle (stockage) et qu'ouvrir en période nocturne doit a priori favoriser le retrait d'énergie par convection à cette dalle (déstockage).

## 3. Qualification expérimentale du stockage/déstockage

Nous présentons dans ce paragraphe, certains résultats d'essais issus de la campagne de mesure menée pendant l'été 2015 et l'analyse de ceux-ci en termes de stockage-déstockage d'énergie dans la dalle. Notamment, nous cherchons à distinguer les parts convectives et radiatives du stockage-déstockage.

### 3.1. Modélisation des échanges thermiques par convection et radiation

Les grandeurs mesurées et utilisées dans notre analyse sont : la densité de flux total qui traverse la surface du module Peltier noir  $\varphi_{PN}$ , la densité de flux total qui traverse la surface du module Peltier brillant  $\varphi_{PB}$ , la température interne du module Peltier de surface brillante  $T_{PB}$ , et la température de l'air proche des modules Peltier et de la dalle,  $T_{air}$ . La figure 4 ci-dessous, propose une représentation schématique des échanges prenant place à la surface des modules Peltier.

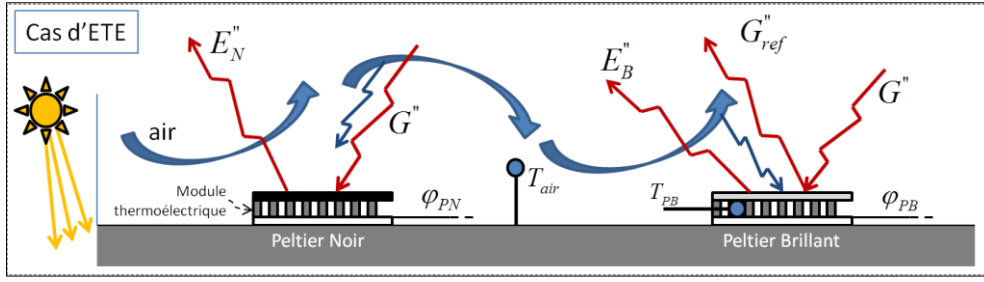


Figure 4 : Schéma représentant les échanges thermiques au niveau de la dalle

Notons ici que nous ne disposons pas de mesure directe de la densité de flux radiatif solaire, ni de la densité de flux radiatif IR moyens et lointains, incidents sur la dalle de béton. Si la première pourrait être estimée en utilisant les données de la station météorologique dont est dotée la plateforme Sumbiosi et la valeur du facteur solaire des vitrages en façade Sud, l'estimation de la seconde est quasi impossible puisqu'elle dépend des échanges thermiques entre cette dalle et l'ensemble des faces internes de l'enveloppe et surfaces du mobilier présent dans Sumbiosi.

Par contre, une estimation de la somme de ces 2 flux radiatifs peut être faite à partir de nos mesures. En effet, d'après Cherif et al. [5] et Douiri [6], l'écriture d'un bilan thermique au niveau de la surface supérieure du module Peltier noir (à gauche sur la figure 4) amène à l'équation suivante :

$$\varphi_{PN} = G'' - E_N'' + \varphi_C^{(\pm)} - G_{ref,N}'' \quad (1)$$

où  $G''$  est la densité de flux radiatif incidente sur la dalle et  $E_N''$  est la densité de flux radiatif émise par la surface du module Peltier à surface noire (approximativement égale à celle-émise par la dalle). Dans l'équation précédente, un exposant  $\pm$  est apposé à la densité de flux convectif  $\varphi_C$  pour rappeler que cette dernière, peut être sortante ou entrante de la dalle, respectivement positive ou négative.

De la même façon, pour le module Peltier brillant (à droite sur la figure 4), l'écriture d'un bilan thermique au niveau de sa surface supérieure amène à l'équation suivante :

$$\varphi_{PB} = G'' - E_B'' + \varphi_C^{(\pm)} - G_{ref,B}'' \quad (2)$$

où  $G_{ref}''$  est la densité de flux radiatif réfléchi par la surface brillante du module Peltier considéré et  $E_B''$  est la densité de flux radiatif émise par la surface du module Peltier à surface brillante.

Les équations 3 et 4 ci-dessous expriment les densités de flux émises, selon la loi de Stefan-Boltzmann :

$$E_N'' = \varepsilon_N \cdot \sigma \cdot (T_{PN})^4 \quad (3)$$

$$E_B'' = \varepsilon_B \cdot \sigma \cdot (T_{PB})^4 \quad (4)$$

où, du fait de la configuration expérimentale, les températures  $T_{PN}$  et  $T_{PB}$  sont considérées comme étant identiques (et égales à la température de surface de la dalle) ; notons ici que cette hypothèse a été vérifiée en amont des essais expérimentaux présentés ici. Les équations 5 et 6, quant à elles, expriment les parts réfléchies du rayonnement incident en fonction de ce dernier :

$$G_{ref,B}'' = (1 - \alpha_B) \cdot G'' \quad (5)$$

$$G_{ref,N}'' = (1 - \alpha_N) \cdot G'' \quad (6)$$

où  $\alpha_B$  et  $\alpha_N$  sont les coefficients d'absorption moyens du rayonnement incident par la surface du Peltier brillant et la surface du Peltier noir.

Nous supposons dans la suite que  $\varepsilon_N = \alpha_N = 1$ , c'est-à-dire que la surface du module Peltier noir se comporte comme un corps noir. On suppose de plus que la surface, rugueuse, de la dalle se comporte aussi comme un corps noir. Enfin, les surfaces rayonnantes sont supposées toutes grises, diffuses et uniformes, afin d'avoir qu'une valeur constante. D'autre part, la valeur de l'émissivité de la surface brillante retenue lors de l'analyse proposée au paragraphe ci-dessous est  $\varepsilon_B = 0,1$  car d'après la littérature, elle varie entre 0 et 0,2. De plus, la littérature montre que l'absorptivité aux courtes longueurs d'onde varie entre 0,08 et 0,3 [7]. Aux grandes longueurs d'ondes, la loi de Kirchhoff conduit à l'égalité avec l'émissivité  $\varepsilon_B$ . Ainsi, nous fixerons dans un premier temps l'absorptivité totale  $\alpha_B$  à 0,1.

Ces hypothèses, raisonnables, nous permettent d'affirmer que la densité de flux traversant le module Peltier est la somme des densités de flux convective et radiative traversant l'interface dalle-air environnant :

$$\varphi_{PN} = \varphi_R + \varphi_C \quad (7)$$

Les équations précédentes amènent à proposer les expressions suivantes de ces parts convective et radiative.

$$\varphi_C^{(\pm)} = -\frac{\alpha_B}{1 - \alpha_B} \cdot \varphi_{PN} + \frac{1}{1 - \alpha_B} \cdot \varphi_{PB} + \left( \frac{\varepsilon_B - \alpha_B \cdot \varepsilon_N}{1 - \alpha_B} \right) \cdot \sigma \cdot T_{PB}^4 \quad (8)$$

$$\varphi_R^{(\pm)} = \frac{1}{1 - \alpha_B} \cdot \varphi_{PN} - \frac{1}{1 - \alpha_B} \cdot \varphi_{PB} - \left( \frac{\varepsilon_B - \alpha_B \cdot \varepsilon_N}{1 - \alpha_B} \right) \cdot \sigma \cdot T_{PB}^4 \quad (9)$$

où l'exposant  $\pm$  rappelle que ces densités de flux peuvent être entrantes ou sortantes de la dalle (respectivement positives ou négatives).

### 3.2 Résultats expérimentaux et analyse

Les résultats présentés sur la figure 5 ci-dessous sont pour la configuration 2 (cf. tableau 1) et pour 2 journées situées au milieu d'un ensemble de journées ensoleillées anticycloniques estivales équivalentes. Sur l'ensemble de ces figures, l'axe des abscisses représente le temps. Les tirets de graduations sur cet axe correspondent à l'horaire de minuit (00h00) des jours représentés. Les courbes bruitées correspondent respectivement aux densités de flux en surface de dalle, convectives (à gauche) et radiatives (à droite). Les températures de surface de dalle et d'air environnant sont respectivement présentées en trait fin pointillé et trait gras continu.

On constate que par définition, la densité de flux convectif sortante de la dalle est négative quand la température de la dalle est supérieure à celle de l'air (figures 5 à gauche). Concernant la densité de flux radiatif sortant de la dalle, celle-ci est positive sur une durée plus courte que la densité convective sortante ; ceci peut s'expliquer par le fait que cet échange radiatif est provoqué par la température des parois internes du bâtiment, dont le plafond, lui-même stockeur d'énergie en période diurne (de par le rayonnement direct sur la toiture terrasse, transféré au travers du plafond vers l'intérieur du bâtiment avec un décalage temporel certain).

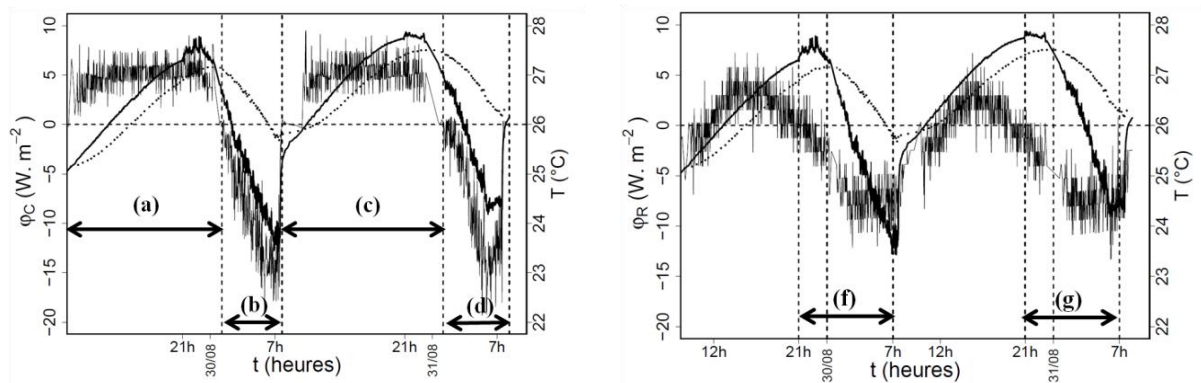


Figure 5 : Lignes non bruitées : températures de surface de dalle (ligne pointillée) et d'air (ligne continue). Ligne bruitées : densités de flux de chaleur sortantes convective ( $\phi_C$ , à gauche) et radiative ( $\phi_R$ , à droite). Configuration 2, ensemble de fluxmètres n°8 (cf. figure 2).

Notons que sur la période diurne, quand toutes les ouvertures sont fermées, la valeur de la densité de flux de chaleur convectif stockée par la dalle (correspondant aux zones (a) et (c) sur la figure 5 à gauche) est de l'ordre de  $5 W/m^2$ . Les zones (f) et (g) sur la figure 5 à droite, correspondent à l'ouverture des ouvertures (21h00-7h00) ; le reste du jour elles restent fermées. Pour la période nocturne, quand toutes les ouvertures sont ouvertes, la valeur de la densité de flux de chaleur convectif déstocké (correspondant aux zones (b) et (d) sur la figure 5 à gauche) est environ de l'ordre de  $6 W/m^2$ . Cette différence de valeurs moyennes entre période diurne et période nocturne se retrouve aussi pour la densité de flux radiatif. Quoiqu'il en soit, sur des journées identiques se suivant, on retrouve une énergie stockée (radiative + convective) sur la période diurne (somme des aires sous les courbes sur leurs parties négatives) environ égale à l'énergie déstockée sur la période nocturne (somme des aires sous les courbes sur leurs parties positives).

#### 4. Conclusion et perspectives

Une plateforme expérimentale a été instrumentée en termes de capteurs de flux de chaleur et de température afin de caractériser le comportement d'une dalle de forte masse thermique située en façade Sud dans son environnement proche. Cette plateforme ainsi instrumentée, dont les ouvertures (volets) et protections solaires (persiennes) situées en façades Sud, Nord et en shed sont pilotables, a permis d'acquérir les premières données expérimentales au cours de l'été 2015. Ces données permettent d'appréhender qualitativement, pour des scénarii simples, les couplages existant entre le stockage et le déstockage d'énergie dans cette dalle et la gestion des ouvertures et des protections solaires.

La modélisation détaillée des échanges par rayonnement, associée à une caractérisation des surfaces principales du bâtiment en termes d'émissivité et d'absorptivité (plafond, sol) permettra une meilleure description des transferts convectifs et radiatifs. De plus, les mesures de vitesses d'air locales en surfaces de dalles permettront de les relier aux transferts convectifs en surface de dalle. L'objectif final étant de relier ces modélisations locales, à une caractérisation expérimentale en termes de relation débit - pertes de charges des ouvertures et aux données météorologiques extérieures (vitesse et direction du vent, température d'air, rayonnement direct et diffus).

## Références bibliographiques

- [1] D. Etheridge, « A perspective on fifty years of natural ventilation research », *Build. Environ.*, vol. 91, p. 51-60, 2015.
- [2] D. Roditi, *Ventilation et lumière naturelles*. Eyrolles, 2011.
- [3] T. Wu, « Formalisme des impédances thermiques généralisées - Application à la caractérisation thermique de parois de bâtiments », Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 2011.
- [4] M. Yala-Aithammouda, « Etude et réalisation de microcapteurs de flux thermique en technologie silicium », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007.
- [5] Y. Cherif, A. Joulin, L. Zalewski, et S. Lassue, « Superficial heat transfer by forced convection and radiation in a horizontal channel », *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 48, n° 9, p. 1696-1706, 2009.
- [6] I. Douiri, « Instrumentation d'un four pilote pour la cuisson de génoise », Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires, 2007.
- [7] M. N. Özisik, *Heat Transfer. A Basic Approach*. McGraw-Hill, 1985.

## Remerciements

Nous remercions ici les techniciens et ingénieurs du laboratoire I2M pour l'aide à la mise en œuvre du système d'acquisition, et l'institution panaméenne IFARHU et l'Université du Panama (*Universidad Tecnológica de Panamá*) pour le support financier apporté à ces travaux.