

# ÉTUDE DYNAMIQUE D'UNE CAVITÉ CONTRÔLÉE SOUMISE À DIVERSES SOLLICITATIONS THERMIQUES – EXPÉRIMENTATION ET MODÉLISATION

*Frédéric KUZNIK<sup>a</sup>, Joseph VIRGONE<sup>a</sup>, Jean NOEL<sup>b</sup>*

<sup>a</sup> Centre de Thermique de Lyon (CETHIL UMR5008), INSA de Lyon - UCBL, 69100, Villeurbanne, **France**

<sup>b</sup> Ingénieur Free Lance, 15 place Carnot, 69002, Lyon, **France**

*e-mail : frederic.kuznik@insa-lyon.fr*

## INTRODUCTION

Comme l'Homme passe la plupart de son temps dans des espaces clos, le contrôle environnemental des bâtiments devient primordial. La notion de confort thermique et de consommation énergétique d'une pièce de bâtiment nécessite de pouvoir connaître les paramètres de température sous diverses sollicitations thermiques en régime dynamique. Cependant, il existe peu de données expérimentales en situations contrôlées permettant de servir de référence pour des simulations numériques, principalement dans le cas de sollicitations radiatives solaires.

Afin de produire des données exploitables, nous avons utilisé la cellule expérimentale Minibat (*Allard et al. 1982*), mais avec quelques modifications concernant la régulation afin de pouvoir reproduire des cas de journées ensoleillées. La première partie de notre article présente donc la cellule expérimentale. Les données obtenues dans deux cas tests sont confrontées à un code de simulation dynamique des bâtiments, CODYBA, développé au sein du laboratoire et qui est présenté dans la seconde partie. Les comparaisons entre les données expérimentales et les simulations numériques sont réalisées dans la troisième partie de l'article. Nous concluons enfin quant à l'utilisabilité de la cellule expérimentale pour produire des cas tests et des modifications à apporter à l'instrumentation.

## PRÉSENTATION DE LA CELLULE MINIBAT

La cellule expérimentale Minibat, présentée figure 1, se compose de deux pièces identiques de dimensions 3.10mx3.10x2.50m respectivement au repère (x, y, z). Nous n'utiliserons dans notre étude que la cellule 1 qui sera dénommée cellule expérimentale. La cellule 2 n'est pas distincte de la partie garde thermique car la porte de communication entre ces deux entités est ouverte. La composition des parois est donnée dans le tableau 1.

La façade vitrée sépare la cellule d'une chambre climatique dont la température contrôlée peut varier au maximum de -10°C à 30°C. Un caisson à température contrôlée permet de garder les cinq autres faces à une température extérieure constante de 19°C lors de nos essais.

Une batterie de 12 projecteurs contenant des lampes CSI de 1000W chacune permet de simuler un ensoleillement artificiel (lampes à décharge aux hallogénures métalliques dont le spectre est proche de celui du soleil). Les projecteurs sont disposés sur 3 rangées horizontales (voir figure 2), chaque rangée étant inclinée d'un angle  $\alpha$  : pour la rangée A  $\alpha=0^\circ$ , pour la rangée B  $\alpha=25^\circ$  et pour la rangée C  $\alpha=50^\circ$ . Le flux radiatif ainsi créé pénètre dans la cellule par l'intermédiaire de la paroi

vitrée. La régulation permet de contrôler dynamiquement la température du caisson climatique ainsi que le niveau du flux radiatif entrant, par l'intermédiaire du nombre de projecteurs allumés.

Paroi	Matériau	Épaisseur (mm)
<b>Plancher</b>	béton cellulaire	200
	plâtre	10
	polystyrène	50
<b>Paroi</b>	plâtre	10
	bois aggloméré	50
	plâtre	10
<b>Plafond</b>	contreplaqué	8
	laine de verre	55
	bois	25
<b>Face vitrée</b>	verre	10

*Tableau 1 : Composition des parois*

Les températures intérieures et extérieures des faces sont mesurées à l'aide de thermocouples de résolution  $\pm 0.4^\circ\text{C}$ , chaque face comportant 9 thermocouples. Les températures du caisson climatique et des différentes parties de la garde thermique sont mesurées à l'aide de sondes Pt100 dont la résolution est de  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ . Les différents niveaux d'ensoleillements sont mesurés à l'aide d'un pyranomètre.

Nous allons nous attarder un peu plus sur la mesure de la température de l'air dans le volume intérieur de la cellule. Un thermocouple placé dans une boule noire permet de mesurer une température  $T_{bn}$ . Afin de déterminer la température de l'air, le bilan énergétique suivant a été réalisé :

$$\alpha E + \sigma T_p^4 - \sigma T_{bn}^4 + h(T_a - T_{bn}) = 0$$

avec :

- $\alpha$  le facteur de forme de la sphère par rapport à la face vitrée, évalué à 0.25,
- $E$  l'éclairement solaire mesuré,
- $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann,
- $T_p$  la température radiative des parois,
- $h$  le coefficient d'échange convectif autour de la sphère,
- $T_a$  la température de l'air.

Afin de déterminer le coefficient d'échange convectif autour de la sphère, nous avons utilisé une corrélation tirée de *Kakaç et al 1987* concernant le cas de convection naturelle autour d'une sphère et donnant le nombre de Nusselt en fonction du nombre de Rayleigh :

$$Nu = 2 + 0.43Ra^{1/4}$$

$$Nu = \frac{hD}{k}$$

avec  $Ra$  le nombre de Rayleigh basé sur le diamètre  $D=0.12m$  de la sphère et  $k$  la conductivité thermique de l'air. La fiabilité de la mesure de température de l'air ainsi déterminée sera discutée dans la partie concernant les résultats.

L'acquisition des différents paramètres se fait par l'intermédiaire d'une centrale de multiplexage reliée à un PC. Le pilotage de l'ensemble des appareils, sauf de la régulation, est fait à l'aide du logiciel LABVIEW. Le pas de temps choisi entre deux séries de mesure est de 10mn et la durée de chaque essai de trois jours.

Deux essais sont présentés dans le présent article afin de reproduire deux journées typiques :

⇒ un essai mi-saison avec chauffage pour lequel la température du caisson climatique varie de  $5^{\circ}C$  à  $15^{\circ}C$  et avec un radiateur de 1500W réglé à  $19^{\circ}C$  (la puissance consommée par le radiateur a été mesurée lors de l'essai à l'aide d'un wattmètre),

⇒ un essai été pour lequel la température du caisson varie de  $15^{\circ}C$  à  $30^{\circ}C$ .

Les conditions de température du caisson ( $T_{\text{caisson}}$ ) et d'éclairement (E) sont données pour les deux essais sur les figures 3 et 4. On peut remarquer la bonne répétabilité des régulations de la température du caisson et de l'allumage des projecteurs. En ce qui concerne ces derniers, il faut signaler une inertie lors de leur allumage et de leur extinction, illustrée par des discontinuités de paliers d'éclairement lors des mesures.

En conclusion, la procédure expérimentale nous a permis d'obtenir l'ensemble des conditions extérieures à la cellule et également des mesures de température d'air dans la pièce.

## MODÉLISATION NUMÉRIQUE : CODYBA

Le logiciel CODYBA (COde de simulation DYnamique des BATiments) est un outil sur PC de simulation énergétique des bâtiments. Ce logiciel est développé au sein du CETHIL depuis 1981 et a été depuis largement validé (Noel et al. 2001, Noel 2004).

Les équations physiques régissant la modélisation sont celles classiquement utilisées pour calculer l'équilibre thermique d'une pièce (Pedersen et al. 1997). Les hypothèses principales sont :

⇒ les variables sont constantes dans une pièce (une seule température d'air, une seule température radiante moyenne),

⇒ un modèle de conduction monodimensionnel est implémenté pour chaque paroi (Roux 1984),

⇒ le flux solaire traversant le vitrage est supposé atteindre le sol où il est absorbé et réfléchi.

Les conditions d'entrée du modèle sont la température du caisson, la température de la garde climatique, le flux radiatif ainsi que la puissance dissipée par le radiateur. Le pas de temps lors de la simulation est de 10mn et la durée totale du calcul de 30 secondes.

## RÉSULTATS

La figure 5 et la figure 6 présentent les données expérimentales et les résultats de la simulation de la température de l'air au centre de la pièce, ainsi que la

température de la boule noire mesurée. Les mesures n'ont pas été représentées avec les incertitudes correspondantes afin d'améliorer la lisibilité des graphiques. Deux types de résultats nous importent : la détermination de la température de l'air à partir de la température de la boule noire et la comparaison entre les données expérimentales et les données numériques.

Les discontinuités observées sur les graphiques montrant l'évolution de la température de la boule noire illustrent les effets dus à l'éclairement. La température calculée de l'air est évidemment beaucoup moins élevée que la température de la boule noire. L'évolution de  $T_a$  n'est cependant pas continue et il subsiste de légères discontinuités de l'ordre de  $0.5^{\circ}C$ , montrant les limites d'utilisation du modèle proposé. Ces discontinuités peuvent être dues au fait que les mesures ne sont pas réalisées simultanément pour un instant donné, à cause du multiplexage des différentes voies de la centrale d'acquisition (le temps d'acquisition de l'ensemble des voies est de 3mn). L'autre explication peut être la propagation des erreurs de mesure.

Plusieurs critères permettent de comparer les données expérimentales et numériques : les valeurs hautes et basses de la température de l'air ainsi que les pentes relatives à l'évolution de  $T_a$ , ces dernières permettant de juger de l'aspect dynamique dans la comparaison des résultats. L'essai mi-saison avec chauffage présente un bon accord entre les données expérimentales et numériques (voir figure 5). Les valeurs minimales et maximales de la température atteinte dans le local sont en bon accord. Les pentes de croissance et de décroissance de la température de l'air sont très similaires, même si l'on peut noter une différence lors de l'allumage du radiateur, dont la température de consigne est de  $19^{\circ}C$ . En ce qui concerne le cas été, les températures minimales sont semblables expérimentalement et numériquement. La température maximale expérimentale est légèrement plus basse que la valeur numérique. L'évolution dynamique globale de la température de l'air expérimentale est en bon accord avec les données issues de la modélisation numérique.

## DISCUSSION et CONCLUSION

Nous nous sommes proposés dans cet article de réaliser des expériences sur une cellule test en conditions climatiques contrôlées avec apports solaires. Les données expérimentales ont été comparées avec des simulations numériques basées sur le logiciel CODYBA.

Dans le cas particulier des apports solaires, la mesure de la température de l'air doit faire l'objet d'une attention particulière. Nous avons utilisé pour cela une boule noire dans laquelle la température a été mesurée, la température de l'air étant déduite du bilan énergétique de la sphère. Des corrélations nous ont permis de déterminer le coefficient d'échange convectif de la boule noire. Les résultats montrent que la température de l'air ainsi déterminée présente une évolution quasi-continue proche de la température simulée. Il semble donc que la méthode soit satisfaisante. Pourtant, et afin d'améliorer le système de mesure, nous pensons utiliser une méthode basée sur deux mesures de température réalisées dans deux sphères différentes : une boule noire et une boule de couleur grise

et d'émissivité connue. Les bilans énergétiques réalisés sur les deux boules permettront d'éliminer les effets du rayonnement solaire lors de la détermination de la température de l'air. Les légères discontinuités existantes dans la méthode actuelle pourront être fortement diminuées.

Les simulations numériques réalisées à l'aide du logiciel CODYBA sont en bon accord avec les données expérimentales. L'utilisation des données issues de la cellule Minibat est envisageable afin de produire des cas tests pour des situations avec ensoleillement.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**ALLARD F., BRAU J., PALLIER J.M.** « Étude de l'incidence des apports solaires sur une cellule test en ambiance climatique simulée ». Rapport final du contrat COMES n° 811106933328, INSA de Lyon, 51p. (1982).

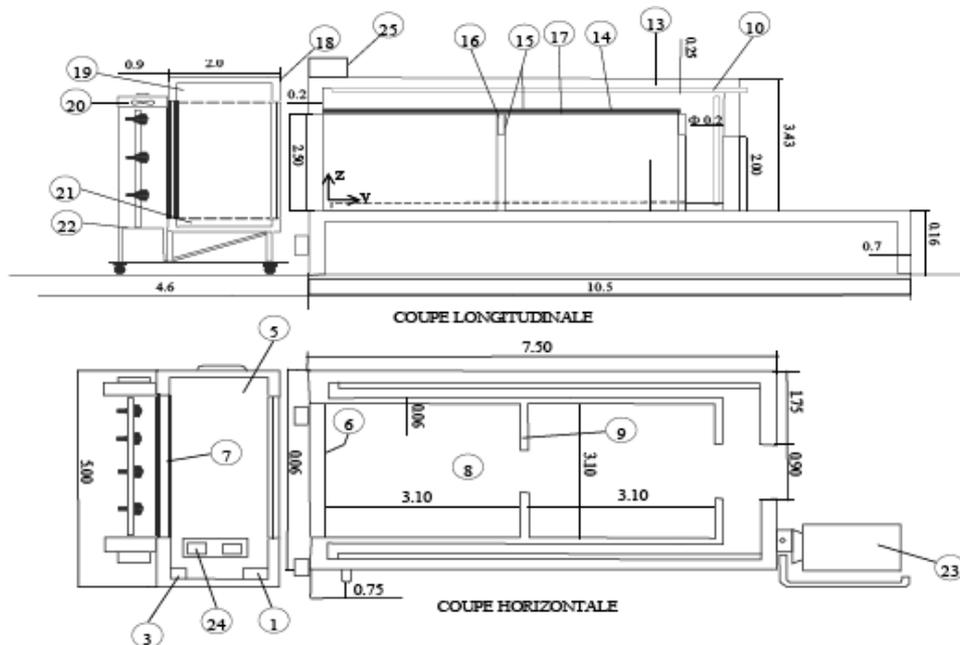
**KAKAÇ S., SHAH R.K., AUNG W.** « Handbook of single-phase convective heat transfer ». John Wiley & Sons. New York (1987).

**NOEL J., ROUX J.J., SCHNEIDER P.S.** « CODYBA, a design tool for building performance simulation ». Building Simulations, Rio de Janeiro, Brésil (2001).

**NOEL J.**, « CODYBA BESTEST Qualification ». Rapport n°0401 (2004).

**PEDERSEN C.O., FISHER DE, LIESEN R.J.**, « Development of a heat balance procedure for calculating cooling loads ». ASHRAE Transactions 103, Part 2 (1997).

**ROUX J.J.**, « Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments ». Thèse présentée à l'INSA de Lyon (1984).



(1) groupe frigorifique; (2) insolateur; (3) alimentation lampes; (4) volet roulant; (5) caisson climatique; (6) simple vitrage; (7) double vitrage; (8) local expérimental; (9) cloison et porte; (10) gaine de soufflage; (11) gaine de reprise; (12) vide technique; (13) béton isolant; (14) laine de verre; (15) placoplâtre; (16) bois aggloméré; (17) contre plaqué; (18) enceinte isolée; (19) plenum de soufflage; (20) ventilateurs d'extraction; (21) plenum de reprise; (22) section filtrante; (23) climatisation vides techniques; (24) climatisation caisson climatique; (25) ventilation cellule d'essai

Figure 1 : Cellule expérimentale Minibat

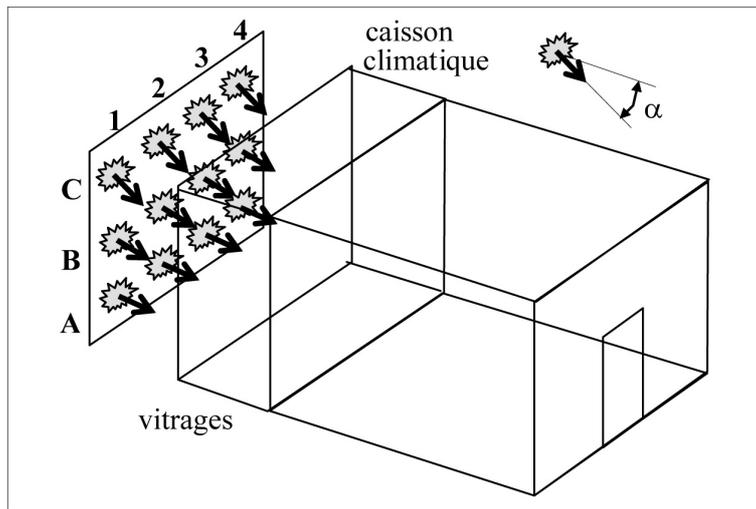


Figure 2 : Schéma isométrique du caisson climatique avec les projecteurs

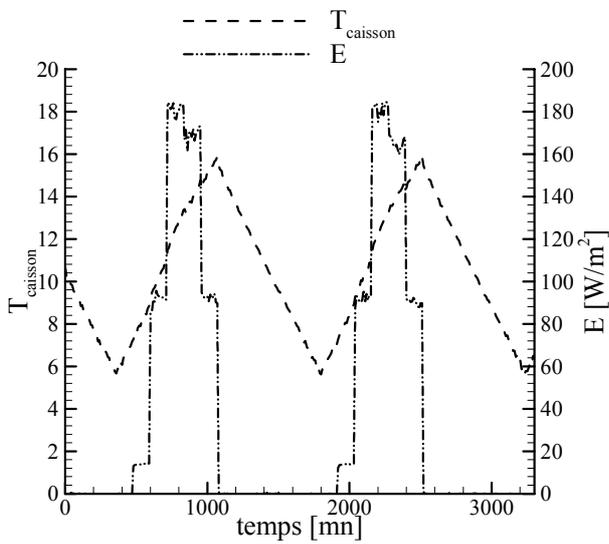


Figure 3 : Conditions essai mi-saison avec chauffage

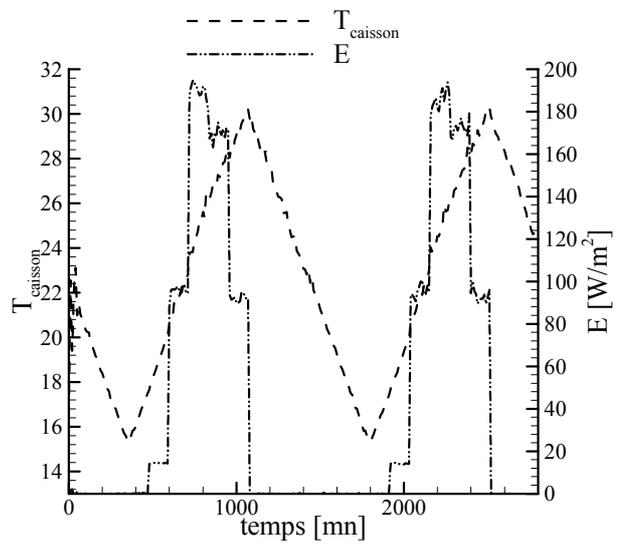


Figure 4 : Conditions essai été

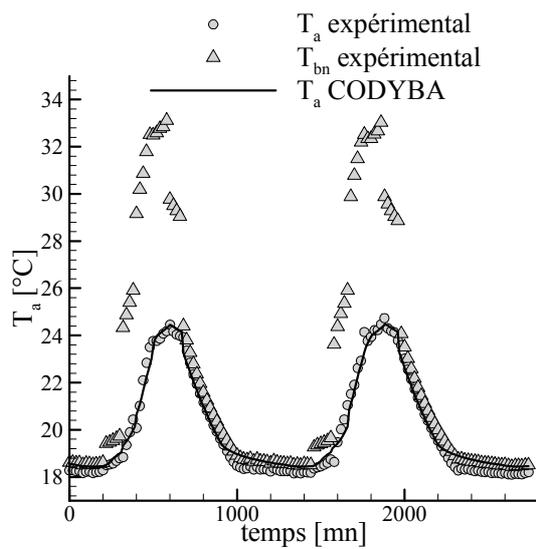


Figure 5 : Comparaisons essai mi-saison avec chauffage

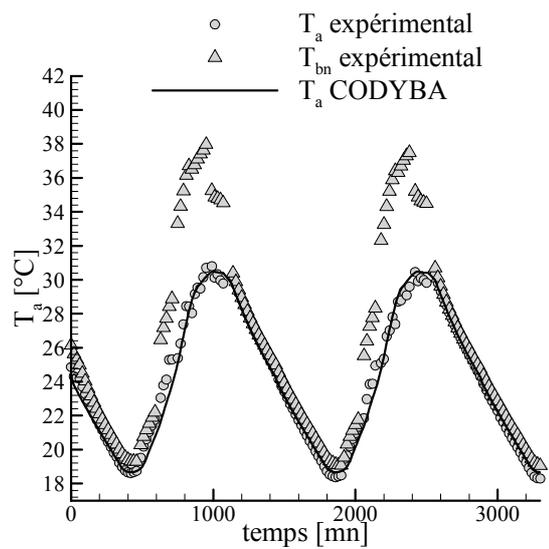


Figure 6 : Comparaisons essai été