

BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘI
Publicat de
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
Tomul LVII (LXI), Fasc. 1, 2011
Secția
CONSTRUCȚII. ARHITECTURĂ

ANALYSE DU COMPORTEMENT THERMODYNAMIQUE D’UNE FAÇADE DOUBLE PEAU - ÉTUDE NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE EN CONVECTION NATURELLE

PAR

**CĂTĂLIN GRIGORAȘ*, THEODOR MATEESCU, CĂTĂLIN POPOVICI
et NELU-CRISTIAN CHERECHEȘ**

Université Technique “Gheorghe Asachi” de Iași,
Faculté de Génie Civil

Reçue: le 15 février 2011
Acceptée pour publication, le 3 mars 2011

Résumé. L’étude effectuée a comme objectif l’analyse du spectre thermo-aérodynamique à l’intérieur du canal vertical chauffé asymétriquement d’une façade double vitrée, dans les conditions environnementales données. La simulation numérique a été réalisée dans une géométrie tridimensionnelle, en régime transitoire. Celle-ci a été complétée par des essais expérimentaux en utilisant les mêmes hypothèses.

Les résultats montrent qu’il y a une bonne concordance avec ceux expérimentaux, ce qui valide le modèle utilisé afin de décrire le comportement du système.

Mots-clés: convection naturelle; étude expérimentale; simulation numérique; façade double-peau.

1. Introduction

Au cours des vingt dernières années, la promotion du concept de la façade double-peau, comme un élément architectural important pour les bâtiments de bureaux et de logement, est pertinente non seulement du point de vue de la fonctionnalité, mais aussi de l’énergie.

* Auteur à adresser la correspondance: *e-mail*: catalinus_grigoras@yahoo.com

La nécessité de la ventilation naturelle, organisée dans ces bâtiments, l'esthétique générale du bâtiment et l'amélioration de l'environnement intérieur qui confère la transparence de la façade de verre, et aussi la réduction de la consommation d'énergie pendant la période de l'occupation du bâtiment par la valorisation du rayonnement solaire, le préchauffage solaire/le refroidissement de l'air introduit dans le système de ventilation, sont les principaux avantages qui justifient l'intérêt de construire ce type de façade double-peau.

La façade double-peau est une solution constructive caractérisée par l'application d'une surface vitrée extérieure, à une certaine distance, en face d'une autre surface vitrée intérieure, formant ainsi une façade active et très complexe du point de vue des détails architecturaux, techniques et fonctionnels.

Dans la littérature de spécialité, les études qui concernent le comportement thermo-aérodynamique des façades double-peau (Fedorov *et al.*, 1997; Zöllner *et al.*, 2002; Collins, 2004; Cherecheș *et al.*, 2009; Popa *et al.*, 2006), débattent, surtout les aspects suivants:

- a) l'analyse de l'écoulement de fluide et du transfert de chaleur entre deux plaques planes verticales différemment chauffées;
- b) l'influence des coefficients de transfert convectif et conductif pour une façade vitrée à protection solaire.

La présente étude a été effectuée afin de réaliser une analyse comparative des résultats obtenus à l'aide de la modélisation numérique et physique, en convection libre de l'air, dans un canal vertical double vitré, sous l'influence d'un flux radiatif constant, conditions imposées sur une certaine surface vitrée du canal.

2. Hypothèses de travail

L'analyse numérique et l'étude expérimentale ont été réalisées dans les hypothèses suivantes:

- a) la géométrie de la façade: $H = 2,1$ m, $L = 1,5$ m, $d = 0,4$ m;
- b) le flux de chaleur constant: $q = 408$ W/m², imposé dans la zone médiane de la façade, avec une hauteur de 0,6 m;
- c) l'écoulement direct de l'air en canal, entre les sections d'entrée et de sortie en convection libre;
- d) la température de l'air à l'entrée du canal: $T_{\text{entrée}} = 19,4^{\circ}\text{C}$.

3. Bases théoriques

Pour établir le régime d'écoulement de l'air à l'intérieur du canal on a calculé le critère adimensionnel de Rayleigh ($R a$), déterminé par la relation

$$R a = G r Pr = \frac{g \beta \varphi_p b^4}{k \nu^2} \cdot \frac{\mu c_p}{k}, \quad (1)$$

ou

$$Ra = \frac{g\beta c_p \rho \phi b^4}{k^2 \nu}, \quad (2)$$

dont

a) le critère de Grashof (Gr) caractérise la libre circulation des fluides générés par la différence de température (ΔT) et le rapport des forces gravitationnelles et de celles visqueuses qui agissent en fluide

$$Gr = \frac{g\beta\phi_p b^4}{k\nu^2}; \quad (3)$$

b) le critère de Prandtl (Pr), qui fournit des informations sur l'efficacité du transport par diffusion au long de la couche limite thermique et dynamique

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} = \frac{\nu \rho c_p}{k}. \quad (4)$$

Pour les paramètres physiques de travail qui correspondent à la température de l'air (19,4°C), les valeurs des critères adimensionnels sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1
Le calcul des critères adimensionnels

T °C	q W/m ²	b m	A m	g m/s ²	ρ kg/m ³	C_p J/kg.K	β 1/K
19,4	408	0,4	0,6	9,81	1,23	1005	0,00349
k W/m.K	ν m ² /s	μ kg/m.s	T_0 °K	$\Delta T =$ $= qb$	Gr	Pr	Ra
0,0253	1,43E-05	1,76E-05	292,56	6455	6,8E+10	0.70	4,81E+10

Conformément aux valeurs de la littérature de spécialité (Ospir *et al.*, 2008), pour $Ra > 1 \times 10^8$, le régime d'écoulement en convection naturelle est turbulent.

4. Simulation numérique

La modélisation a été réalisée avec le logiciel Fluent en utilisant le modèle de turbulence $k - \epsilon$ standard, dans les hypothèses mentionnées ci-dessus. La géométrie et la discrétisation du canal ont été réalisées à l'aide de logiciel Gambit (Fig. 1) sur un modèle trois-dimensionnel, en utilisant un maillage rectangulaire et uniforme tant pour le domaine solide, que pour celui fluide, en

résultant 5 400 nœuds dans la hauteur du canal; 2 700 nœuds dans la largeur du canal; 900 nœuds dans la profondeur du canal.

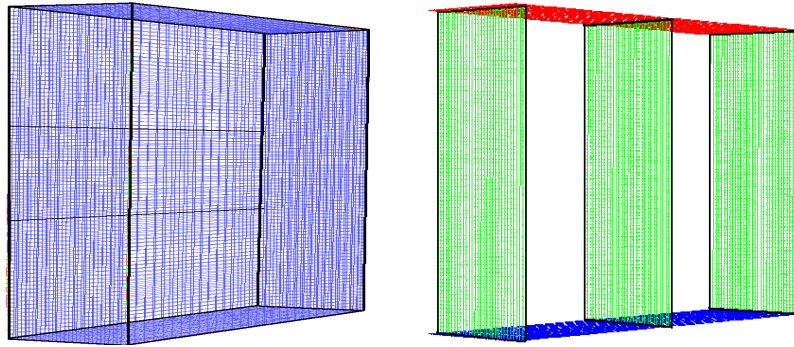


Fig. 1 – Le maillage de la géométrie considérée.

Pour la vérification expérimentale du comportement thermodynamique du canal ont été sélectionnées et représentées les valeurs de la température et de la vitesse en trois sections verticales équidistantes, adoptées en fonction des possibilités de positionnement des thermocouples dans le stand expérimental (Fig. 4).

Les résultats numériques obtenus sont présentés dans la Fig. 3.

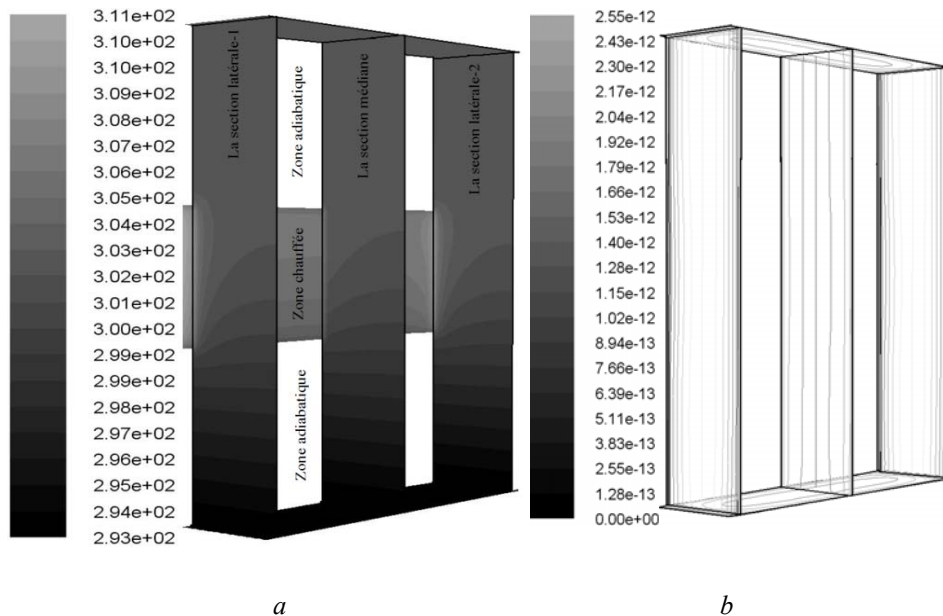


Fig. 2 – Spectres de la température et de la vitesse en convection naturelle :
a – spectres de la température, [K]; *b* – spectres de la vitesse, [m/s].

L'analyse des résultats, en convection naturelle, mettent en évidence le champ des températures qui indique l'évolution progressive entre les sections extrêmes (entrées-sorties), avec une croissance évidente dans la zone d'influence de la plaque rayonnante (Fig. 2).

Sur les plans horizontaux, les températures sont maintenues approximativement à une valeur constante, avec une légère influence du transfert par conduction et des pertes de chaleur par les éléments de fermeture vitrés. Cet aspect est mis en évidence en comparant les images des trois sections verticales (Fig. 3).

Par rapport à l'écart de température $\Delta T = 8^\circ\text{C}$, la vitesse de l'air dans le canal est négligeable et enregistre des valeurs très faibles, de $2,55 \times 10^{-12}$, ainsi que l'écoulement se produit sans des recirculations de l'air.

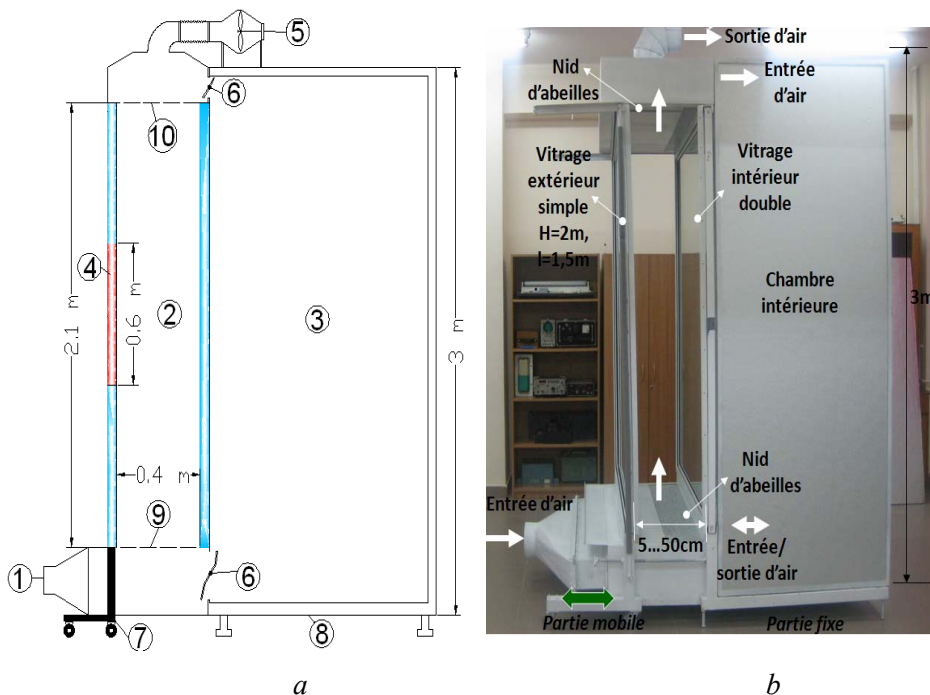


Fig. 3 - La description du stand expérimental; *a* – le schéma du stand: 1 – la voie d'entrée de l'air dans le canal de la façade double-peau; 2 – le compartiment double vitré, à géométrie variable; 3 – la chambre adjacente de la façade double-peau, isolée du point du thermique; 4 – la source de chaleur pour chauffer l'air intérieur; 5 – le ventilateur à vitesse variable; 6 – les clapettes de régulation et de contrôle de la lame d'air avec la possibilité d'adaptation fonctionnelle du système en fonction de la méthode de ventilation désirée; 7 – le cadre mobile pour le mouvement de la façade double-peau à une certaine distance (entre 5...50 cm qui correspond aux canaux non-visibles); 8 – le cadre fixe du stand expérimental; 9 – nid d'abeille à l'entrée de l'air dans le canal de la façade double-peau; 10 – nid d'abeille à la sortie de l'air du canal de la façade double-peau. *b* – la photo du stand.

5. Étude expérimentale

Afin de vérifier et valider les résultats obtenus par la simulation numérique, les hypothèses de travail ont été considérées toutefois pour l'étude expérimentale.

Le stand expérimental est représenté dans la Fig. 4.

La température de l'air et des surfaces vitrées ont été mesurées avec des thermocouples, modèle PT1000TGL4/0, respectivement le modèle PT1000TG7/0, pour mesurer la température de l'air. Les thermocouples ont été placés sur la surface vitrée, à l'intérieur, dans les trois sections, comme on peut voir dans la Fig. 4 à savoir

- dans la section latérale 1 – les thermocouples T11-T12-T13, pour l'air dans le canal, et un thermocouple (T41), pour la surface vitrée adiabatique;
- dans la section latérale 2 – les thermocouples T31-T32-T33, pour l'air et un thermocouple (T41) pour la surface vitrée adiabatique;
- dans la section médiane – les thermocouples T21-T22-T23-T24 pour l'air dans le canal et deux thermocouples (T42-T44), pour la surface vitrée adiabatique.

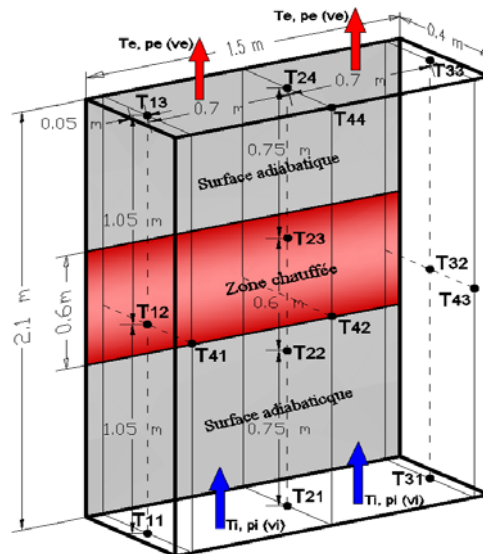


Fig. 4 – Le schéma de l'emplacement des thermocouples dans le stand expérimental.

La vitesse de l'air a été mesurée dans le centre de la section horizontale à savoir

- dans les sections d'entrée et de sortie du canal avec un anémomètre à turbine (le domaine de mesure: 0...3 et 3,1...30 m/s, précision $\pm 3\%$ pour la valeur lue, résolution 0,1 m/s);

b) dans la section médiane du canal la vitesse a été mesurée avec un anémomètre thermique à fil chaud (le domaine de mesure: 0...3 et 3,1...30 m/s, précision $\pm 3\%$ pour la valeur lue, résolution 0,01 m/s).

L'enregistrement des températures a été réalisée à l'aide d'une centrale d'acquisition de données (DataLogger MS5), réalisée pour enregistrer les températures à des intervalles de temps fixes, après la stabilisation des régimes d'écoulement dans le canal.

Les paramètres caractéristiques (la température et la vitesse) ont été enregistrés en convection naturelle, dans les délais suivants: $t = 0$ min, $t = 30$ min, $t = 60$ min.

Pour l'enregistrement des vitesses dans la section d'entrée, respectivement dans la section de sortie du canal, on a utilisé une unité AMI 300 STD, avec un logiciel intégré.

Les résultats expérimentaux sont présentés, en comparaison avec ceux obtenus numériquement, dans la Fig. 5.

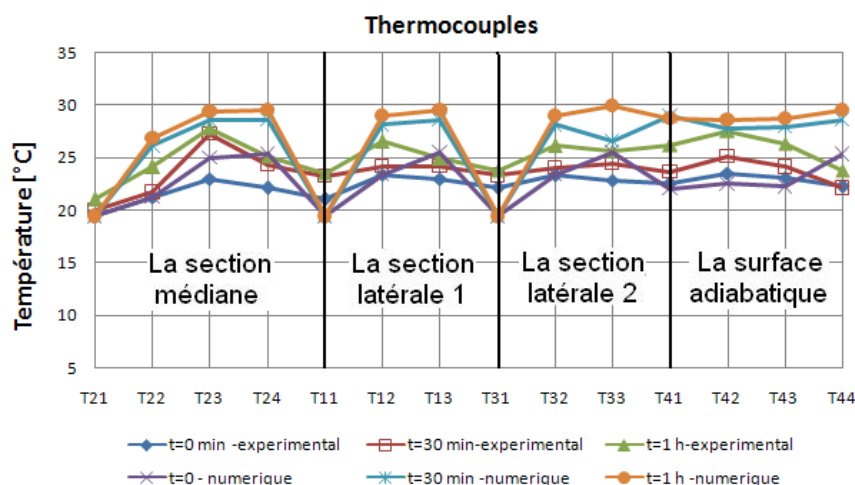


Fig. 5 - Les températures dans les points caractéristiques en convection naturelle.

6. Résultats

Les résultats numériques obtenus en régime non-stationnaire sont confirmés, du point de vue expérimental, par des mesures réalisées dans les mêmes conditions que dans le modèle physique.

En ce qui concerne l'analyse des résultats obtenus dans les mêmes points de mesure, on peut observer que les températures du modèle numérique montrent une bonne concordance avec celles obtenues par voie expérimentale. Les températures sont plus grandes dans le cas de la simulation numérique, allant de 0 à 5°C, par rapport aux valeurs enregistrées expérimentalement.

Les différences sont dues aux conditions de travail, parce que le stand expérimental n'est pas situé dans une chambre stabilisée du point de vue thermique (chambre climatique).

Puisque l'étude a été effectuée dans des conditions de flux de chaleur partiel sur la surface de canal, les conclusions sont valables seulement pour la zone de régime stabilisé, adjacente au flux incident.

Les températures baissent à partir de la surface chauffée vers la surface de la paroi adiabatique et dans la section de sortie de l'air du canal, la température est d'environ 30°C. Dans la section de sortie du stand expérimental l'air ne peut pas être facilement extrait du canal à cause de la tendance de l'air de s'arrêter dans cette zone, favorisant des températures plus élevées.

7. Conclusions

Les résultats numériques sont validés par voie expérimentale, ce qui confirme le modèle d'étude, dans les hypothèses de travail mentionnées ci-dessus.

Pour l'analyse thermodynamique complète, l'étude sera continuée, dans des conditions similaires, en régime de convection forcée.

Afin de déterminer les performances du système est nécessaire l'application d'un flux de chaleur sur la surface entière de la façade vitrée et la réalisation du bilan thermique en différentes hypothèses d'exploitation différentes, conformément aux conditions réelles.

Remerciements. Ce travail a été réalisé dans le cadre du Programme IDEI, Projet de Recherche Exploratoire, CNCSIS code ID 327, No. 603/19.01.2009, financé par l'Autorité Nationale pour la Recherche Scientifique, Ministère de l'Education, de la Recherche et de la Jeunesse de Roumanie. Les auteurs tiennent à remercier cette institution pour son soutien à cette recherche.

Notations

A – longueur zone chauffée, [m];	k – conductivité thermique, [W/m.K];
H – hauteur du canal, [m];	q – flux de chaleur imposée sur le vitrage, [W/m ²];
L – longueur du canal, [m];	β – coefficient d'expansion volumique, [1/K];
d – largeur du canal, [m];	ρ – masse volumique, [kg/m ³];
g – accélération de la pesanteur, [m/s ²];	ν – viscosité cinématique, [m ² /s];
k – conductivité thermique, [W/m.K];	φ – densité de flux, [w/m ²];
Ra – nombre de Rayleigh;	μ – viscosité dynamique, [kg.m].
Pr – nombre de Prandtl;	
Gr – nombre de Grashof;	
t – temps, [s];	

REFERENCES

- Cherecheș N.-C., Popa C.-V., Cherecheș M., *Étude numérique des régimes d'écoulement en convection naturelle dans une façade type double-peau*. Bul. Inst. Politehnic, Iași, **LV (LIX)**, 2, s. Constr., Archit., 43-52 (2009).
- Collins M., *Convective Heat Transfer Coefficients from an Internal Window Surface and Adjacent Sunlit Venetian Blind*. Energy a. Build., **36**, 309–318 (2004).
- Fedorov A.G., Viskanta R. *Turbulent Natural Convection Heat Transfer in an Asymmetrically Heated, Vertical Parallel-Plate Channel*. Int. J. Heat Mass Transfer, **40**, 16, 3849-3860 (1997).
- Ospir D., Popa C.V., Defay B., Fohanno S., *Étude d'un écoulement de convection naturelle dans un canal vertical chauffé asymétriquement*. XXVI-èmes Rencontres de l'AUGC, 2008; actes sur CD-Rom.
- Poirazis H., *Double Skin Facades – A Literature Review*. Lund Inst. of Technology, Sweden, 2006.
- Popa C.-V., Cherecheș N.C., Polidori G., Fohanno S., *Experimental Simulations of Ventilation Modes in Double-Skin Envelopes*. Bul. Inst. Politehnic, Iași, **LII (LVI)**, 1-2, s. Constr., Archit., 125-132 (2006).
- Zöllner A., Winter E.R.F., Viskanta R., *Experimental Studies of Combined Heat Transfer in Turbulent Mixed Convection Fluid Flows in Double-Skin-Facades*. Int. J. Heat a. Mass Transfer, **45**, 22, 4401-4408 (2002).

ANALIZA COMPORTĂRII TERMODINAMICE A UNEI FAȚADE DUBLU
VITRATE – STUDIU NUMERIC ȘI EXPERIMENTAL

(Rezumat)

Studiul efectuat are ca obiect analiza spectrului termo-aerodinamic în interiorul unui canal vertical încălzit asimetric al unei fațade dublu vitrate, în condiții de mediu date. Simularea numerică a fost realizată într-o geometrie tridimensională, în regim tranzitoriu. Aceasta a fost completată de încercări experimentale utilizând aceleași ipoteze de lucru.

Rezultatele numerice arată o bună concordanță cu cele experimentale, ceea ce validează modelul utilizat, pentru a descrie comportamentul sistemului.