Approches multi-échelles en vue de la gestion optimale des façades de type double-peau équipées de protections

Nassim SAFER

CETHIL. – Centre de Thermique de Lyon – CNRS-UMR 5008 - UCBL – INSA de Lyon. INSA de Lyon : Bât. Freyssinet – 20 Avenue Albert Einstein 69621 Villeurbanne Cedex

---

RESUME. Les façades transparentes, très prisées par les architectes, connaissent actuellement un développement important. En effet, ce type de façade permet l'ouverture des espaces intérieurs à la lumière du jour en gardant une bonne maîtrise des apports solaires. Certaines de ces façades, appelées "façades de type double-peau", sont composées d'un vitrage intérieur et d'un vitrage extérieur séparés par un canal de 20 à 80 cm de largeur. Ce canal est ventilé dans la plupart des cas et pourvu d'une protection solaire. Celle-ci permet de contrôler la pénétration de la lumière et les surchauffes dues au rayonnement solaire. Ce travail concerne l'étude expérimentale, la modélisation et la simulation du comportement thermo-aéraulique de telles façades. Après avoir recensé les différents types de "façades double-peau" existants, nous proposons d'une part une modélisation fine et par ailleurs une modélisation plus globale de ce type de façades. La modélisation fine et les études expérimentales permettent la validation de l'approche plus globale, quant à cette dernière elle rend possible des simulations sur l'année entière avec pour objectif la gestion optimale des protections solaires afin de réduire les consommations énergétiques des bâtiments tertiaires.

MOTS-CLÉS : Façade de type double-peau, Modèle global, Consommations énergétiques, Modèle CFD.

ABSTRACT. Double skin façades, appreciated, currently experience a significant development. Indeed, this type of façades allows the optimal use of the light of the day by keeping a good control of the solar loads. Some of these frontages, called "frontages of the double-skin type", are made up of an interior glazing and a glazing external separated by a channel from 20 to 80 cm from width. This channel is ventilated in the majority of the case and is equipped with a solar protection. This one makes it possible to control the penetration of the light and overheating due to the solar radiation. My work of thesis relates to the experimental study, the modelling and the simulation of the behaviour thermo-aerodynamics of such frontages. After having to count the various types of existing "frontages double-skin", we propose on the one hand a fine modelling and in addition a more total modelling of this type of frontages. Detailed modelling and the experimental studies allow the validation of the global model, as for the latter it makes possible of simulations over the whole year with for objective the optimal management of protections solar in order to reducing the power consumptions of the tertiary buildings

KEYWORDS: Double skin façades, Global model; energy consumptions, CFD model.

---

1. INTRODUCTION

L'utilisation des "façades de type double-peau" (FDP) équipées de protections solaires est en pleine expansion. Afin de démontrer leurs efficacités autant du point de vue du confort des individus que des consommations énergétiques, un modèle décrivant le comportement global des FDP doit être établi afin de permettre des études paramétriques sans difficulté. Ce modèle est basé sur une étude fine du comportement thermo-aéraulique de la FDP. Une partie expérimentale complète cette étude afin de définir les paramètres les plus influents sur le comportement thermo-aéraulique de la façade.

Le présent document décrit la méthodologie permettant le développement du modèle global FDP**i** ("**F**açade de type **D**ouble-**P**eau **i**ntelligente"). Une première partie est dédiée à la modélisation et à la simulation fine du comportement thermo-aéraulique des FDP. La modélisation a été effectuée à l'aide d'une approche CFD (Computational Fluid Dynamics) et permet d'étudier les différents phénomènes régissant le comportement thermo-aéraulique de la façade d'une manière locale et détaillée. Une étude expérimentale a été également effectuée à l'aide de la technique PIV (Particle Image Velocimetry). Elle permet la visualisation des écoulements à l'intérieur du canal de la façade et une meilleure compréhension de l'impact des différents composants de la façade. La modélisation fine et l'étude expérimentale nous ont permis d'élaborer le modèle global qui seul autorise des simulations à l'échelle de l'année, sous conditions météorologiques réelles et avec un pas de temps de simulation horaire.

2. LA SIMULATION THERMO-AERAULIQUE DES "FAÇADES DE TYPE DOUBLE-PEAU" A L'AIDE D'UNE APPROCHE CFD

La prédiction des mouvements de l'air et des champs de températures à l'intérieur du canal est effectuée à l'aide d'une approche CFD (Computational Fluid Dynamics). Cette méthode – considérée comme étant une approche fine – consiste à remplacer un problème continu décrit par les équations aux dérivées partielles, par un problème discret défini par une union finie d'éléments. Pour la détermination des grandeurs radiatives, l'approche CFD a été couplée à la méthode radiative des ordonnées discrètes. Les champs de pressions-vitesses et de températures à l'intérieur du canal de la FDP sont simulés à l'aide du code commercial FLUENT 6.1.18 (Fluent, 2003). Ce code est basé sur la méthode des volumes finis utilisant l'algorithme SIMPLE développé par Patankar (Patankar, 1998) et basé sur une méthode prédicteur-correcteur pour la résolution numérique.

Compte tenu de la ventilation mécanique et de la présence d'obstacles dans le canal (les lamelles), l'écoulement d'air à l'intérieur est supposé turbulent. Ainsi, pour la prédiction des champs de pressions-vitesses et de températures à l'intérieur du canal, des équations additionnelles doivent être introduites (deux équations de transport pour notre cas : l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation de l'énergie turbulente notés respectivement "k" et "ε").

La modélisation des transferts radiatifs consiste à résoudre l'équation de transfert radiatif (ETR). Cette résolution est effectuée à l'aide de la méthode des ordonnées discrètes. Cette méthode consiste à évaluer les intégrales angulaires par des quadratures numériques (Vaillon, 1997). Le couplage du modèle radiatif au modèle CFD est un couplage classique : la source d'énergie est injectée directement dans l'équation de conservation de l'énergie. La convergence numérique de l'ensemble du problème est obtenue par itérations successives.

Pour montrer l'impact du rayonnement solaire direct sur le comportement thermo-aéraulique de la FDP, nous avons simulé son comportement en faisant varier l'angle d'incidence du rayonnement solaire direct. La première configuration a été effectuée pour des conditions climatiques estivales normales (angle d'incidence=66°). La deuxième consistait à simuler la même façade en modifiant seulement l'angle d'incidence du rayonnement solaire direct (angle d'incidence=24°). Enfin, la dernière configuration consistait à simuler la FDP sans rayonnement solaire direct (seulement le diffus est pris en compte).

La figure 1 donne les profils de températures à l'intérieur du canal de la FDP à 2 m de hauteur (partie gauche) et les iso-vitesses à l'intérieur du canal de la façade (partie droite) pour les trois configurations énumérées précédemment.

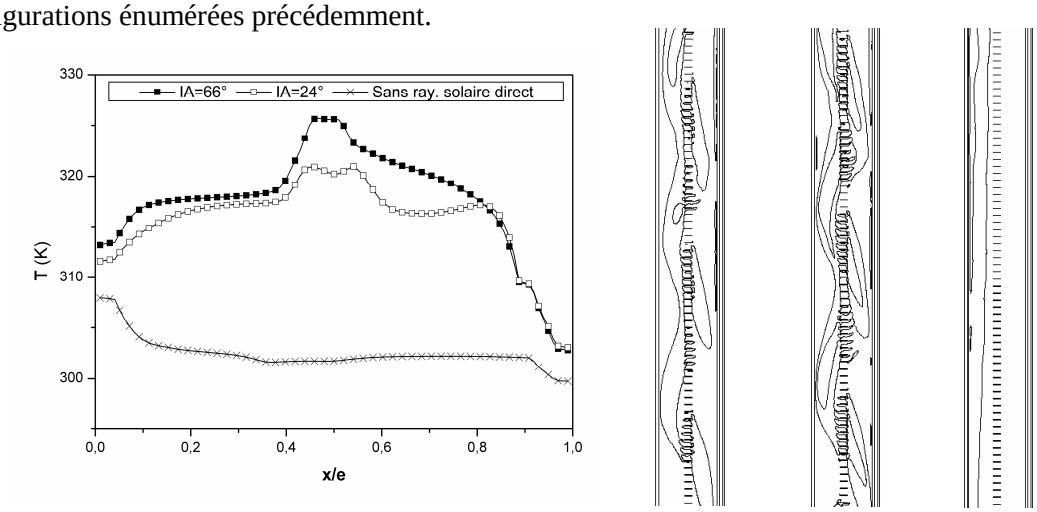

Figure 1 : Profils de températures à l'intérieur du canal à 2 m de hauteur (à droite) et iso-vitesses à l'intérieur du canal de la FDP en fonction du rayonnement solaire direct.

Nous remarquons que la température des lamelles ainsi que celle de l'air du canal de la FDP dépend de l'angle formé entre le rayonnement direct et les lamelles. Les températures les plus importantes concernent la première configuration (l'angle d'incidence sur la façade est égal à 66°). Les lamelles étant horizontales, l'angle formé entre le rayonnement solaire direct et la normale aux lamelles est de 24° (66° pour la deuxième configuration). En effet, les lamelles reçoivent l'éclairement maximum lorsque cet angle est réduit. Enfin, en absence de rayonnement solaire direct, les lamelles ainsi que l'air de la double-peau sont, du fait de la présence de la ventilation mécanique, à la température extérieure.

En ce qui concerne le développement des écoulements, nous remarquons que le rayonnement solaire direct génère des "oscillations spatiales" à l'intérieur du canal : l'écoulement d'air traverse le store et passe de la partie gauche vers la partie droite du canal et vice-versa plusieurs fois sur la hauteur de la façade. Ces "oscillations" disparaissent en l'absence de rayonnement solaire direct.

De la même manière que précédemment, nous avons simulé le comportement thermo-aéraulique de la FDP en faisant varier d'autres paramètres telle que l'inclinaison des lamelles, les débits de ventilation, les dimensions de l'entrée d'air, la position des entrées sorties d'air, etc. Ces simulations nous permettent d'une part d'établir les paramètres les plus influents sur le comportement local des FDP et, d'autre part, nous permet la quantification des coefficients de transferts convectifs et radiatifs. Nous rappelons que ces coefficients seront les entrées de notre modèle global FDP**i** présenté dans le détail au paragraphe 4.

Enfin, la méthode utilisée pour le calcul des coefficients de convection est basée sur le flux convectif à la paroi donné par les résultats CFD et de la différence de température entre celle de la paroi et celle du fluide du canal considéré. En ce qui concerne la quantification des coefficients de transferts radiatifs, elle repose sur les flux absorbés, transmis et réfléchis de l'ensemble des composants de la façade. L'utilisation de la méthode des ordonnées discrétes nous permet ainsi de les quantifier (Safer *et al.*, 2005a), (Safer *et al.*, 2005b).

3. ETUDE EXPERIMENTALE DES ECOULEMENTS D'AIR DANS UNE "FAÇADE DE TYPE DOUBLE-PEAU"

Cette partie concerne la description d'une nouvelle expérimentation (montage d'une "façade de type double-peau" à échelle réelle) au sein de l'Ecole Royale Militaire Belge en collaboration avec deux universités belges : l'Ecole Royale Militaire (Professeur Walter BOSSCHAERTS) et le laboratoire physique du bâtiment (Laboratorium Bouwfysica) de l'Université Catholique de Leuven (Professeur Jan CARMELIET).

Le but de cette expérimentation est la visualisation des écoulements de l'air à l'intérieur du canal de la FDP à l'aide de la technique "Vélocimétrie par images de particules" (PIV). Cette technique consiste à ensemencer l'écoulement en microparticules diffusant de la lumière et à émettre deux impulsions lumineuses décalées dans le temps d'un intervalle Δt programmable. Ces impulsions traversent un dispositif optique réalisant un plan de lumière et les particules présentes dans ce plan sont éclairées à deux instants différents. Un système de prise de vue permet d'enregistrer les positions des particules éclairées pour chaque impulsion lumineuse.

L'utilisation de cette technique nous permet de mieux comprendre le comportement aéraulique de ce type de façade puisqu'il s'agit d'une méthode optique non intrusive permettant l'obtention de champs de vitesses instantanées dans un plan de l'écoulement étudié. A cet effet, une campagne expérimentale a été élaborée et une étude paramétrique a été effectuée en faisant varier différents paramètres de la façade (position de la protection solaire, dimension de l'entrée d'air, etc.). Cette étude nous a permis de répondre à une série de questionnement concernant l'écoulement dans le canal de la façade. L'essentiel de ces questions sont : L'écoulement est-il bidimensionnel ? Est-il stationnaire ? L'influence de l'inclinaison des lamelles est-elle conséquente ? Quelle est l'influence de la position des lamelles ? L'écoulement est-il constant en hauteur ? Quelle est l'influence de la largeur de l'entrée d'air ?

3.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Concernant le dispositif expérimental, notre choix s'est porté sur une façade déjà existante à l'Ecole Royale Militaire. La façade en question est une "façade de type double-peau" de 3,00 m de hauteur et de 1,30 m de largeur. Le canal formé par le vitrage extérieur et le vitrage intérieur est de 30 cm. Nous avons équipés cette façade avec une protection solaire de type vénitien, la largeur des lamelles est de 25 mm et l'espacement entre deux lamelles est également de 25 mm. Les stores vénitiens sont placés au milieu du canal de la façade dans un premier temps. Enfin, les lamelles sont de couleur "blanc satiné" et les deux faces des lamelles ont des caractéristiques radiatives identiques.

Cette façade est équipée d'une ventilation intérieure–extérieure forcée (l'air circulant dans la le canal de la "façade double-peau" arrive de l'intérieur du local et repart vers le système de ventilation) :

Concernant l'entrée d'air du canal de la façade, elle se situe au niveau bas et du coté intérieur (l'entrée d'air est soumise à l'ambiance intérieure). La largeur de cette entrée d'air est de 2cm sur toute la largeur de la façade (cf. Figure 2).

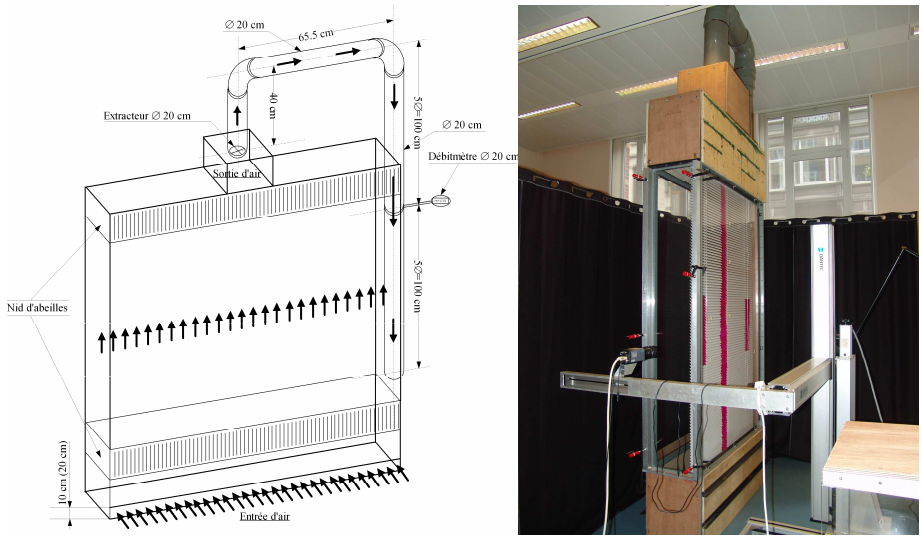

Figure 2 : Schéma de la façade double-peau (gauche) et photo du dispositif expérimental (droit).

3.2. RESULTATS

Pour montrer l'impact de l'inclinaison des lamelles sur le développement de l'écoulement à l'intérieur du canal de la "façade de type double-peau" (nous nous limitons à ce résultat), les champs de vitesse à l'intérieur du canal de la façade ont été mesurés pour différentes inclinaisons : 0°, 15°, 30°, 45° et 60°.

La figure 3 présente les vitesses moyennes développées dans le canal au milieu du canal pour deux inclinaisons : 0° et 60°. Cette figure nous permet de remarquer que les lamelles ainsi que leur inclinaison joue un rôle important en ce qui concerne le développement de l'écoulement dans le canal de la façade. En effet, les lamelles séparent le canal de la façade en deux canaux distincts et le développement de l'écoulement (la vitesse de l'air et la direction de l'écoulement en particulier) dans chaque canal dépend principalement de l'inclinaison des lamelles.

Concernant les lamelles horizontales (0°), l'écoulement dans le canal droit est ascendant et développé tandis que l'écoulement dans le canal gauche est perturbé et des mouvements de re-circulation sont visibles. Les vitesses moyennes longitudinales au milieu du plan considéré avoisinent 0,10m/s pour le canal droit et ne dépassent pas 0,03 m/s pour le canal gauche. En ce qui concerne les vitesses moyennes transversales (dans l'axe de la largeur du canal), elles tendent vers 0 pour les deux canaux. Néanmoins, elles sont de quelques millimètres pour le canal gauche. Pour le canal gauche, les vitesses moyennes oscillent entre des vitesses positives (mouvement ascendant) et des vitesses négatives (mouvement descendant), les vitesses négatives se développent du coté des lamelles. En ce qui concerne des lamelles à 60°, les échanges entre les deux canaux (gauche et droit) sont très limités puisque les lamelles tendent à être fermées. Les mouvements d'air sont ascendants dans deux canaux, les vitesses moyennes au milieu du plan considéré sont de 0,23 m/s pour le canal droit et de 0,1 m/s pour le canal gauche. Enfin, Concernant l'impact de l'inclinaison des lamelles, nous remarquons d'une manière globale que l'essentiel de l'écoulement transite par le canal droit. En effet, les vitesses moyennes dans cette partie du canal varient entre 0,1 m/s et 0,32 m/s. Par contre, l'air de la partie gauche du canal est pratiquement immobile et les vitesses moyennes au milieu du plan considéré sont assez faibles et ne dépassent pas 0,1 m/s.

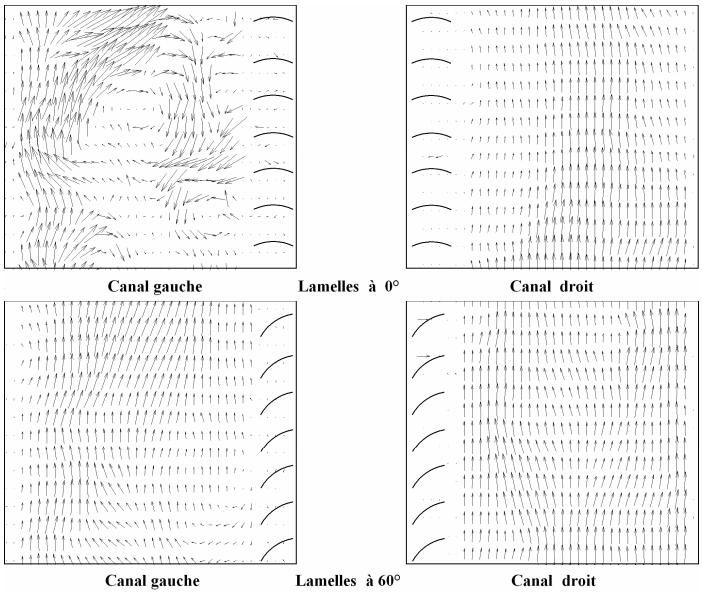

Figure 3 : Champs de vitesses moyennes pour différentes inclinaisons des lamelles.

Nous pouvons notamment remarquer que le développement de l'écoulement peut être favorisé dans le sens de la largeur de la façade en fonction de l'inclinaison des lamelles. En effet, les vitesses moyennes au milieu du canal considéré augmentent au fur et à mesure que les lamelles sont fermées. De la même manière que précédemment, un ensemble de paramètres a été testé et les plus influents ont été la base pour le développement du modèle global FDP**i.** Nous avons également pu constater expérimentalement que l'écoulement dans le canal est globalement bidimensionnel. Ceci vient conforter notre première hypothèse qui consistant à considérer la configuration complète de la FDP comme un problème bidimensionnel et non tridimensionnel.

4. LE MODELE GLOBAL : "FAÇADE DE TYPE DOUBLE-PEAU"

Le modèle global FDP développé est un modèle bidimensionnel basé sur un découpage vertical par bande de la façade. Chaque bande verticale est décomposée en 6 zones, chaque zone est caractérisée par sa température moyenne.

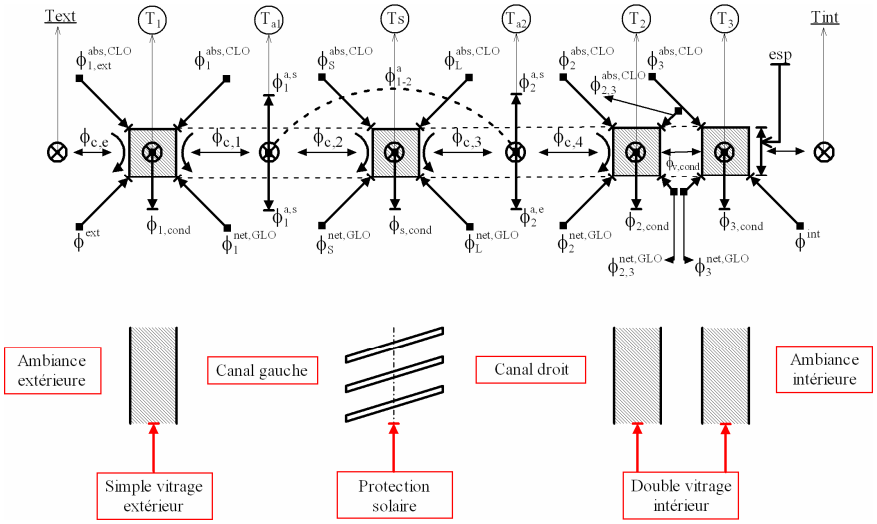

Figure 4 : Définition de la bande verticale.

Nous rappelons que notre modèle concerne les FDP dotées d'une ventilation extérieure mécanique. Le vitrage extérieur de la façade est un simple vitrage et le vitrage intérieur est un double vitrage (cf. figure 4). Un bilan énergétique est écrit à chaque nœud de chaque bande verticale, les différents flux intervenant dans ces bilans sont listés dans le tableau 1.

Flux	noté
- Flux absorbé en courte longueur d'onde	$\phi_i^{abs,CLO}$
- Flux net échangé en grande longueur d'onde	$\phi_i^{net,GLO}$
- Flux échangé par convectif	$\phi_{c,i}$
- Flux échangé par conduction	$\phi_{cond,i}$
- Flux radiatif échangé avec l'ambiance extérieure	ϕ_{ext}
- Flux échangé avec l'ambiance intérieure	ϕ_{int}
- Flux d'enthalpie (canal gauche, canal droit)	ϕ_k^a

Tableau 1 : Définition des différents flux du modèle global.

Le modèle décrit auparavant a été comparé et validé par une série de comparaison avec des résultats expérimentaux et numériques en régime permanent. La figure 5 concerne une comparaison des résultats FDPi et ceux de travaux de Campbell (Campbell *et al.*, 1997). L'auteur a analysé les grandeurs radiatives d'une FDP pourvue d'une protection solaire de type vénitien.

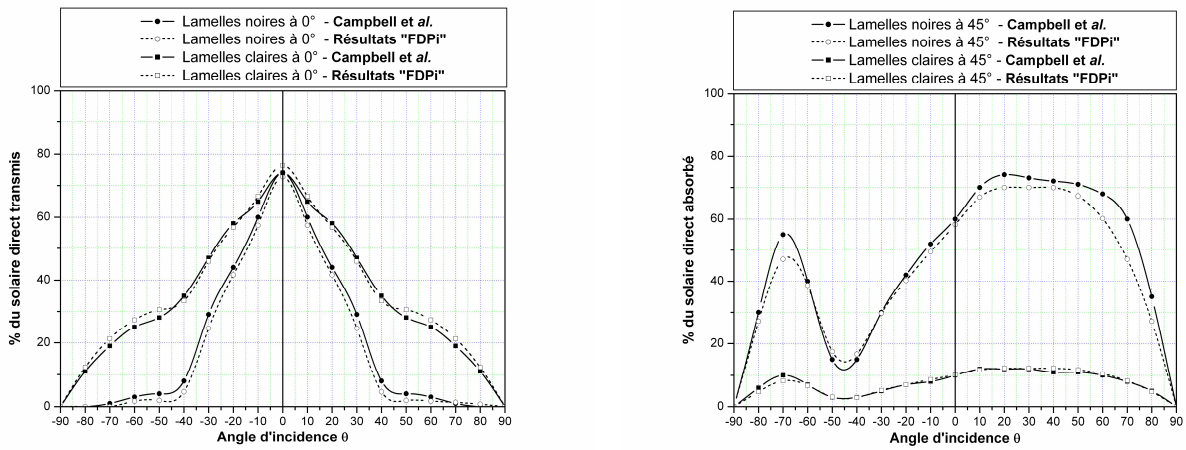

Figure 5 : Pourcentage du flux solaire transmis à travers une FDP pourvue de lamelles horizontales (droite) et celui du flux solaire absorbé par des lamelles inclinées à 45° (gauche).

Afin de simuler le comportement global des FDP pourvues de protection solaire de type vénitien et d'étudier les performances énergétiques des bâtiments équipées de ce type de façade, notre modèle FDP**i** a été implémenté dans un outil dynamique de simulation thermique (TRNSYS en l'occurrence). La figure suivante présente l'évolution de la température des différentes peaux de FDP ainsi que celle du bâtiment pourvu de la FDP. Cette figure présente notamment le flux solaire total incident et le flux solaire traversant la FDP.

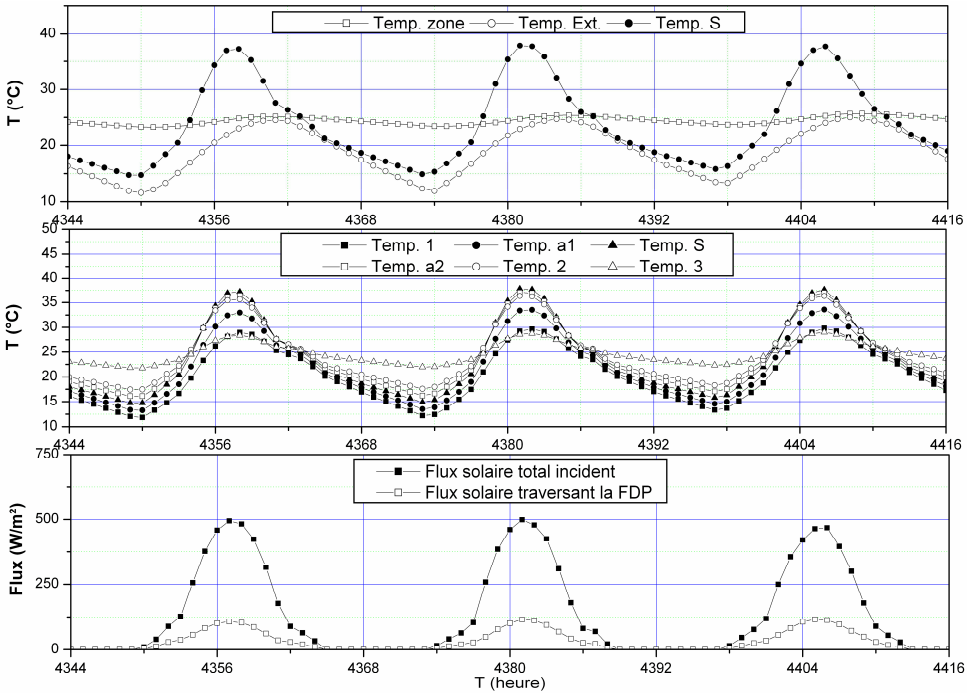

Figure 6 : Evolution des températures et des flux solaires pour une inclinaison de 0° du 1er juillet au 3 juillet (FDP orientée Sud).

Enfin, des études paramétriques complémentaires ont été effectuées afin d'établir les scénarii pour une gestion optimale des protections solaires et des débits de ventilation des FDP**i**.

5. BIBLIOGRAPHIE

Campbell N.S., Whittle J.K. (1997) « Analysing radiation transport through complex fenestration systems ». 7th International IBPSA Conference, Prague, 8-10 September 1997.

Fluent Inc. (2003) « Fluent user's manual, version 6.1. ». Lebanon : Fluent Inc..

Patankar S.V. (1980) « Numerical Heat Transfer and Fluid Flow ». Washington : Mac Graw and Hill, 197p.

Safer N., Woloszyn M., Roux J.J. (2005a) « Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin façade equipped with a venetian blind ». Solar Energy journal, vol. 79, pp. 193-203.

Safer N., Woloszyn M., Rusaouen G., Roux J.J., Kuznik F. (2005b) « Modelling of the double-skin facades for building energy simulations: radiative and convective heat transfer ». 9th International Building Performance Simulation Association - Building simulation, Montreal, 15-18 August 2005.

Vaillon R. (1997) « Méthodes numériques en rayonnement thermique, la méthode des ordonnées discrètes ». Paris : ENSAM, 197p.