

# Modélisation et simulation combinée des effets thermiques et visuels d'une façade de type double-peau sur une zone. Application à la commande optimale

GAVAN Valentin<sup>1,2</sup>, MURESAN Cristian<sup>1</sup>, ROUX Jean-Jacques<sup>2</sup>, DUMORTIER Dominique<sup>3</sup>, WOLOSZYN Monika<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment  
84, Av. Jean Jaurès, Champs sur Marne 77447 Marne-la-Vallée Cedex 02, France  
[valentin.gavan@cstb.fr](mailto:valentin.gavan@cstb.fr)

<sup>2</sup> CETHIL – Centre de Thermique de Lyon, UMR5008, INSA-Lyon, Université Lyon 1,  
Lyon, France  
9, rue de la Physique, 69100 Villeurbanne

<sup>3</sup> CNRS – ENTPE,  
3 rue Maurice Audin - 69518 Vaulx en Velin Cedex

---

## RESUME.

*Pour optimiser le confort (visuel et thermique) et l'économie d'énergie, les études liées à la protection solaire deviennent de plus en plus importantes. En effet il est nécessaire d'utiliser le maximum du soleil en hiver (évitant l'éblouissement) et de réduire au minimum le rayonnement transmis pendant la saison chaude afin d'éviter les surchauffes. Une modélisation de ces façades double-peau (FDP) sera réalisée. Les FDP étudiés sont munies des stores vénitiens et de la ventilation mécanique. L'impact de cette façade sur l'environnement intérieur en termes d'ambiance visuelle et thermique est analysé. Notre modèle global de simulation est représenté par un ensemble de modèles secondaires, caractérisant la partie thermique et visuelle (éclairage naturel et artificiel) et le contrôle. Tous ces modèles de simulation sont couplés à une zone de bureau et puis mis en application dans SIMBAD (HVAC Simulator for Building and Devices). Des descriptions détaillées de ces modèles appliqués, avec les procédures de validation sont présentées dans le papier.*

*MOTS-CLÉS : façade double-peau, simulation thermique et visuelle, régulation.*

---

*ABSTRACT. To optimize the comfort (visual and thermal) and energy savings, the topics related to solar protection are getting more and more important. Indeed it is necessary to use the maximum of the sun in winter (avoiding the glare) and to minimize transmitted radiation during the hot season in order to avoid the space overheating. The double-skin facades (DSF) could allow both characteristics. An exhaustive modelling of DSF will be realized. The studied DSF are equipped with Venetian blinds and provided with mechanical ventilation. The impact of this façade on the indoor environment in terms of visual and thermal ambiance is analyzed. Our global simulation model is represented by a set of sub models, each characterising thermal behaviour of the DSF, natural and artificial lighting. All these simulation models are coupled with an office zone and then implemented in SIMBAD (HVAC Simulator for Building and Devices). Detailed descriptions of these implemented models as well with the validation procedures are presented in the paper.*

*KEYWORDS : double-skin façade, thermal and visual simulation, control.*

---

## 1. INTRODUCTION

Les façades double-peau (FDP) sont des composants du bâtiment qui sont utilisés particulièrement pour des bâtiments de bureaux et répondent à de nombreuses exigences. Fréquemment utilisées dans les projets architecturaux actuels, les FDP sont conçues pour assurer plusieurs fonctions de l'enveloppe simultanément, telles que l'isolation thermique et acoustique, l'optimisation de l'éclairage naturel et l'amélioration du système de ventilation, et répondent parfois à des problèmes de sécurité.

En plus de l'enveloppe elle-même (façade classique), les FDP ont une deuxième couche vitrée (avec un rôle non structural) placée à une certaine distance de la couche intérieure (Streicher, 2005). La lame d'air située entre les deux vitrages agit comme une isolation entre l'extérieur et l'intérieur. Le canal situé entre les deux faces vitrées permet à l'air de circuler de manière naturelle (échauffement de l'air du canal) ou forcée (préchauffage de l'air « neuf » insufflé dans les locaux). La distance entre les deux couches va de quelques centimètres à plus d'un mètre. Dans ce canal d'air des protections solaires mobiles sont prévues et interceptent une partie du rayonnement solaire incident.

## 2. MODELE DE LA FAÇADE DOUBLE-PEAU

Pour la modélisation, une FDP sur un étage courant à été choisi (Loncour *et al.*, 2004). Dans ces hypothèses, une FDP de taille réelle munie d'un store de type vénitien à l'intérieur a été étudiée. La FDP réelle, étudiée ici est schématisée dans la Figure 1. Réalisé en aluminium, le cadre de la FDP présente des ouvertures de ventilation d'une hauteur de 4 cm.

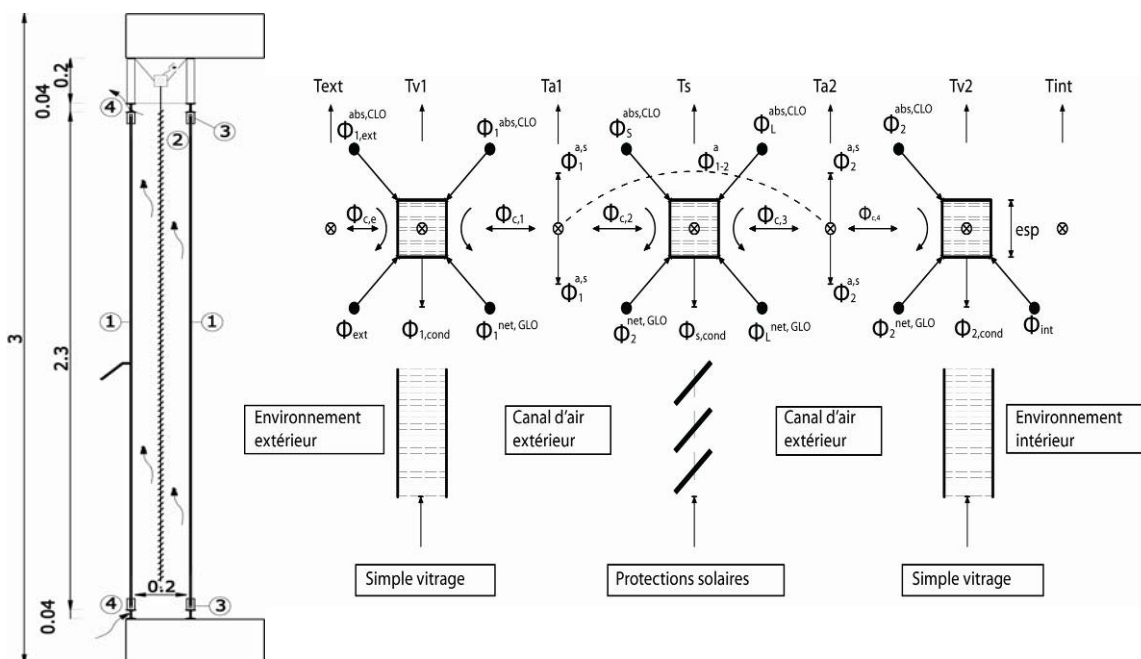


Figure 1. Vue en section de la FDP et modèle de la FDP: 1) vitrage simple (épaisseur 6 mm); 2) protection solaire (largeur lamelles de 25 mm); 3) cadre en aluminium; 4) ouvertures de ventilation.

Ces ouvertures couvrent la totalité de la largeur de la FDP, en haut et en bas de chaque panneau vitré. Ainsi, différentes configurations de ventilation peuvent être testées par simple obturation de ces ouvertures. Les protections solaires installées dans la FDP sont de type vénitien et sont placées au milieu de la cavité. La FDP est ventilé mécaniquement.

Le modèle est représenté par une FDP ventilée mécaniquement. Le modèle est une représentation bidimensionnelle d'une FDP. La hauteur de la FDP est découpée dans un nombre de bandes horizontales. Chaque bande horizontale est découpée à son tour en 5 nœuds caractérisés par leur température (Figure 1). Le modèle peut être modifié facilement pour la prise en compte d'un vitrage supplémentaire à l'extérieur ou à l'intérieur afin de mieux prendre en compte les types de FDP avec double-vitrage. Dans ce cas, un nœud supplémentaire de température est introduit dans le schéma du modèle. Le bilan est ensuite écrit dans chaque nœud de chaque bande. La radiation CLO et GLO, la convection, la conduction et le flux de chaleur par transfert de masse sont pris en compte dans ce modèle. Le modèle réalisé a été confronté avec des résultats issus de simulations CFD et des mesures PIV présentées dans (Safer *et al.* 2005a), (Safer *et al.* 2005b). Eléments comme l'angle des protections solaires, le débit de ventilation dans la cavité, les angles solaires, les caractéristiques thermiques des vitrages et les conditions climatiques sont prises en compte dans le processus de modélisation et de validation expérimentale.

Le modèle de la FDP a été développé en SIMBAD (environnement MATLAB®/Simulink®) et couplé avec un modèle de zone. L'interconnexion du modèle de la FDP avec le modèle de zone se fait à chaque pas de temps conformément aux actions suivantes : la température moyenne du vitrage intérieur de la FDP est introduite, avec les autres températures des parois, dans un module de calcul de la température résultante ; la radiation solaire transmise par la FDP dans la pièce est introduite dans la zone sous forme d'un gain énergétique; la température de la zone calculée dans le pas de temps antérieur est utilisée afin de calculer le flux convectif de chaleur entre la FDP et l'air intérieur (Safer *et al.*, 2006). Ce modèle de la FDP a été validé dans la cellule d'essais Minibat (situé à l'INSA de Lyon). Ainsi, une FDP a été installée dans l'enceinte climatique Minibat est soumise à différents scénarios et conditions aux limites.

### 3. MODELISATION DE LA RADIATION SOLAIRE ET DES CONDITIONS CLIMATIQUES

La FDP reçoit le rayonnement solaire qui arrive sous la forme d'une composante diffuse venant du ciel et d'une composante directe du soleil. Pour calculer l'éclairage naturel dans la pièce munie d'une FDP, l'éclairement arrivant sur la FDP doit être calculé. Celui-ci se distingue de l'éclairement énergétique par la prise en compte de la sensibilité relative spectrale de l'œil : non nulle uniquement sur le domaine: 380 nm-760 nm, appelé de ce fait le domaine visible. Les fichiers météorologiques ne fournissent généralement pas les éclairements lumineux extérieurs sur des plans verticaux (Woloszyn *et al.*, 2007). Le plus souvent, ils fournissent l'éclairement énergétique diffus sur un plan horizontal ainsi que l'éclairement énergétique direct normal (c'est-à-dire dans un plan perpendiculaire aux rayons).

Pour passer des éclairements énergétiques aux éclairements lumineux, nous utilisons un modèle d'efficacité lumineuse proposé par Perez (Perez *et al.*, 1990). L'efficacité lumineuse est le rapport entre l'éclairement lumineux et l'éclairement énergétique. L'efficacité lumineuse du rayonnement diffus est différente de celle du rayonnement direct. L'efficacité lumineuse diffuse varie avec les conditions de ciel (trouble atmosphérique, couverture nuageuse) et avec la hauteur du soleil. Le modèle complet est schématisé dans la Figure 2 (Perez *et al.*, 1990). Le flux lumineux diffus et direct reçu par la façade double peau est ensuite transmis à l'intérieur de la pièce. La quantité de flux transmis dépend du facteur de transmission lumineux des vitrages, du facteur de réflexion lumineux et de l'inclinaison des

lames du store vénitien. En conclusion, le modèle météo implémenté, permet le calcul des angles solaires (angle zénithal, azimut du soleil, hauteur du soleil, angle d'incidence) et des grandeurs énergétiques comme le rayonnement solaire et des grandeurs lumineuses comme le flux lumineux arrivant sur une surface (dans notre cas sur la FDP).

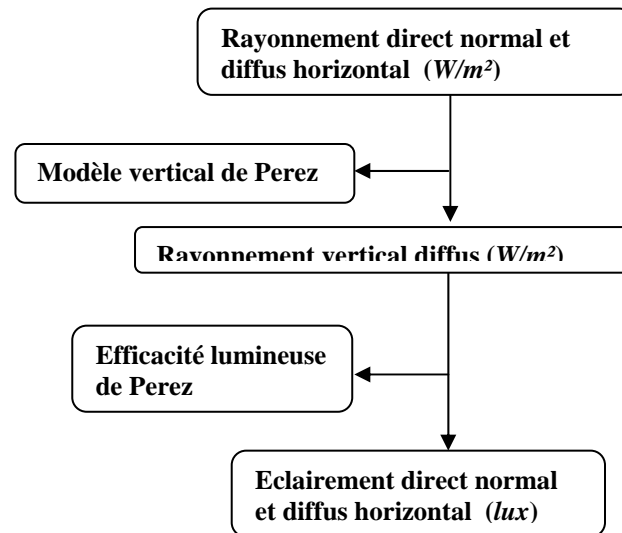


Figure 2. Modélisation du rayonnement solaire (Woloszyn et al., 2007)

#### 4. MODELISATION DE L'ECLAIRAGE

Les modèles d'éclairage présentés dans cette étude sont réalisés principalement pour répondre aux exigences en matière de confort visuel. Ces modèles sont créés pour assurer en plus du confort lumineux, une économie d'énergie avec la prise en compte de l'éclairage naturel. Effectivement, cette fonction est réalisée par la modulation de la puissance de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel dans la zone.

Pour le confort lumineux, une approche qui prend en compte que la luminance de la baie a été considérée. Cette approche repose sur les résultats de plusieurs études (Sutter, 2003) qui ont montré que les occupants ajustaient la position de leur store vénitien de manière à ce que la luminance moyenne de leur baie vitrée reste inférieure à une valeur maximale située vers 2000 cd/m<sup>2</sup>. Cette valeur sous-entend que le store vénitien bloque systématiquement tout rayonnement solaire direct. Cette approche a l'avantage de faciliter la modélisation de la prise en compte du confort visuel car elle ne fait pas intervenir la position de l'occupant dans le bureau, ni la nature de son activité.

##### 4.1. ECLAIRAGE NATUREL

Le modèle de transmission du flux lumineux diffus par la façade suppose que ce flux est transmis de manière uniforme dans la pièce. Vue de l'intérieur, la façade double peau est donc considérée comme une source de lumière uniforme de l'éclairage diffus extérieur. Si de plus, nous considérons toutes les surfaces de la pièce comme des surfaces parfaitement diffusantes (mates, sans aucun reflet), nous pouvons de ce fait utiliser des formules simplifiées pour calculer la contribution de la façade (la source de rayonnement) sur les murs et sur le plan de travail. Ces formules reposent très classiquement sur la notion de facteur de forme entre surfaces.

L'éclairage en un point de la pièce dû au rayonnement solaire diffus transmis par la façade est la somme de deux composantes : une composante directe et une composante de réflexions multiples (Figure 3). Cet éclairage est calculé au centre de chacune des mailles utilisées pour les murs et le plan utile. La composante directe prend en compte le flux lumineux venant de la façade et arrivant directement sur l'élément de surface  $dS_p$  situé au point P (équation 1).

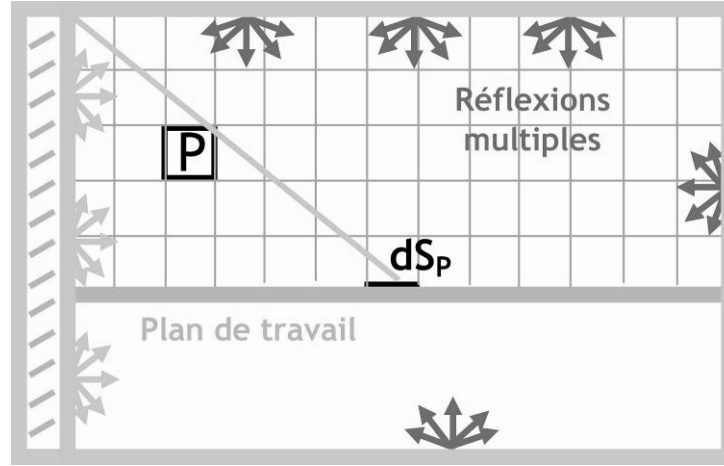


Figure 3. Modélisation de l'éclairage naturel (Woloszyn et al., 2007)

$$E_{P,dD} = F_{DSF} \cdot \frac{\Phi_{d,DSF}}{S_{DSF}} \quad (1)$$

Où:  $F_{DSF}$  est le facteur de forme entre  $dS_p$  et la FDP,  $\Phi_{d,DSF}$  est l'éclairage lumineux diffus transmis par la FDP et  $S_{DSF}$  la surface de la FDP.

Pour la prise en compte des réflexions multiples à l'intérieur, un modèle simplifié proposé en (BRE, 1986). La méthode utilisée s'intitule "split-flux" (équation 2).

$$E_{P,dd} = \frac{2 \cdot (0.39 \cdot \rho_{fw} + 0.05 \cdot \rho_{cw})}{(1 - \bar{\rho})} \cdot \frac{\Phi_{d,DSF}}{S_{DSF}} \quad (2)$$

Où:  $\rho_{fw}$  est le facteur de réflexion des parois en dessous de la mi-hauteur,  $\rho_{cw}$  est le facteur de réflexion des parois en dessus de la mi-hauteur and  $\bar{\rho}$  est le facteur moyen de réflexion des parois.

L'évaluation de la composante directe est calculée similairement.

L'éclairage lumineux au centre de chacune des mailles des murs ou du plan utile est la somme des éclairages lumineux apportés par les flux diffus et direct transmis par la façade (équation 3).

$$E_{P,total} = E_{P,dD} + E_{P,dd} + E_{P,DD} + E_{P,Dd} \quad (3)$$

Où:  $E_{P,dD}$  est la composante diffuse et  $E_{P,dd}$  la composante des réflexions multiples de l'éclairage diffus, respectivement  $E_{P,DD}$  est la composante directe et  $E_{P,Dd}$  la composante des réflexions multiples de l'éclairage direct. Le modèle de l'éclairage naturel a été testé et validé dans deux projets européens (Sutter et al., 1999) et (Dumortier et al., 2002).

#### 4.2. ECLAIRAGE ARTIFICIEL

L'éclairage artificiel est toujours dimensionné pour fournir l'éclairage le plus uniforme possible sur le plan de travail. Il vient en complément à l'éclairage naturel. Il n'est donc pas nécessaire de calculer les éclairages sur un maillage comme cela a été fait pour l'éclairage naturel. L'éclairage moyen sur le plan utile est suffisant. La méthode de calcul que nous avons choisie est la méthode de calcul simplifiée de la norme française NF 71-121 (NF C71-121, 1993). Cette méthode suppose que les luminaires sont répartis au plafond sur une grille régulière.

La méthode de calcul donne très rapidement l'éclairage moyen sur le plan utile ainsi que sur les murs. Le calcul est rapide car il est basé sur des résultats obtenus pour des installations de référence. Les éclairages sont obtenus à partir de la notion d'utilance (le rapport entre le flux total atteignant le plan utile et le flux total quittant les luminaires). Les installations de référence correspondent donc à des luminaires de classes différentes ainsi qu'à des géométries et des photométries de la pièce différentes. Les utilances des installations de référence sont données par la norme.

Les calculs d'éclairage artificiel sont effectués une fois seulement avant toute simulation climatique. Ils permettent de vérifier que le nombre de luminaires, ainsi que le flux délivré par chacun des luminaires, est bien suffisant sans éclairage naturel pour obtenir le niveau d'éclairage recommandé pour l'activité des occupants. Les éclairages recommandés sont donnés par la CIE (CIE, 2001).

Pendant la simulation, le flux lumineux délivré par l'éclairage artificiel est ajusté de manière à ce que l'éclairage moyen sur le plan utile dû à l'éclairage artificiel complète celui dû à l'éclairage naturel pour le rendre égal à l'éclairage recommandé. Nous supposons ainsi que tous les luminaires de la pièce sont régulés de la même façon et qu'ils sont équipés de ballasts électroniques permettant de faire varier le flux lumineux délivré par les lampes de 1 à 100%.

### 5. PLATEFORME DE SIMULATION ET COUPLAGE DES MODELES

Les modèles auxiliaires comme le modèle de la zone, la météo, l'unité HVAC, etc., sont fournis par la bibliothèque SIMBAD HVAC Library. La bibliothèque SIMBAD est un outil basé sur l'architecture MATLAB®/Simulink®.

Dans cette optique, tous les modèles sont couplés en vue de la création d'une plateforme de simulation dédiée à l'étude des FDP. Cette plateforme permet la simulation des systèmes couplés pour une période annuelle afin d'optimiser le confort (thermique et visuel) et l'économie d'énergie.

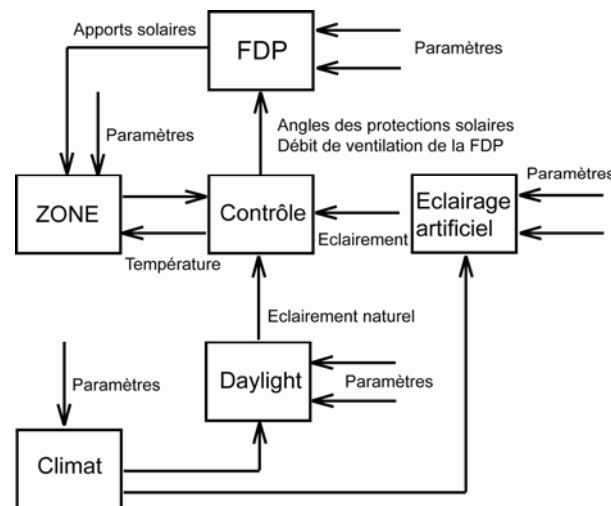


Figure 4. Couplage du modèle de la FDP avec les autres modèles

La Figure 4 présente le schéma de couplage simplifié entre les modèles étudiés. Le block de contrôle, nécessaire ici pour l'optimisation et le bon fonctionnement de l'ensemble, implémente un set de règles qui supervisent les autres composants. En plus, ce système de contrôle sert comme élément échangeur et de décision sur les informations qui arrivent des autres blocks. Les règles implémentées dans ce block prennent en compte un set de priorités qui gouvernent les autres composants. Par exemple, pendant la période d'inoccupation le contrôle donne la priorité aux économies d'énergie. Un autre but du contrôleur est d'éviter l'éblouissement à l'intérieur, en fonction des conditions extérieures et des caractéristiques de la FDP. Le contrôleur régule aussi l'éclairage (naturel et artificiel) sur le plan de travail et la température de l'air intérieur.

Aux hypothèses de simulation sur le contrôle, présentées auparavant, s'ajoutent les caractéristiques de la zone. Cette zone est représentée par une pièce à destination de bureaux de 20m<sup>2</sup>, avec la FDP qui occupe toute la surface de la paroi Sud. L'espace est occupé par 2 personnes avec une activité normale de bureau. Les simulations ont été réalisées pour deux villes de la France, avec climats très différents (Carpentras - un climat avec des influences méditerranéennes et Trappes avec des influences continentales).

## 6. RESULTATS

La Figure 5 présente l'évolution des grandeurs associées au climat extérieur et aux conditions intérieures de la zone simulée. Une journée représentative d'hiver a été choisie.

La Figure 5a présente l'évolution des conditions extérieures pour la ville de Trappes pendant une journée de Janvier. On peut observer que pendant l'inoccupation le régulateur passe en mode économie d'énergie. Cette chose est réalisée par la réduction de la température de consigne du chauffage à 15°C et par la fermeture des protections solaires pour une meilleure gestion des pertes de chaleur. Avant l'occupation, le système de contrôle modifie la consigne à 19°C et passe la gestion des protections solaires en mode actif. Les protections solaires sont ouvertes au maximum pour une meilleure prise en compte des gains solaires. Dans la journée, grâce aux apports le système de chauffage fournit de moins en moins d'énergie. En conséquence, l'évolution du local est libre. On peut observer que la protection solaire réagit en milieu de la journée à cause de l'augmentation du rayonnement solaire et de la température extérieure de l'air. En fin de journée, le système passe de

nouveau en mode économie d'énergie et ferme les protections solaires. Grace aux apports gagnés pendant la journée, la reprise du chauffage est considérablement tardée.

La Figure 5b présente l'évolution les mêmes grandeurs que la Figure 6a, mais pour un emplacement très différent. Une des principales caractéristiques de cet emplacement est son fort ensoleillement. La première conséquence de l'augmentation de l'ensoleillement se traduit par une réduction de la période de fonctionnement du système de chauffage dans la première partie de la journée. Simultanément, les protections solaires réagissent et limitent l'augmentation de la température. Dans ce cas, avec des conditions extérieures très douces, les protections solaires restent fermées plus longtemps dans la journée que dans le cas de la ville de Trappes.

La Figure 6 montre les résultats issus des simulations pour la période d'été. Comme la surface vitrée est importante, les apports solaires sont élevés. La conséquence directe est que pour un climat ensoleillé (le cas la ville de Carpentras), le système de production de froid est en marche pendant toute la journée. Le système passif, représenté ici par les protections solaires de la FDP, ne peut assurer le maintien de la température intérieure à un niveau acceptable par le blocage du rayonnement solaire. Pour un climat avec moins de soleil (le cas de la ville de Trappes), le système de contrôle des protections solaires permet le maintien de la température dans un intervalle de confort acceptable.

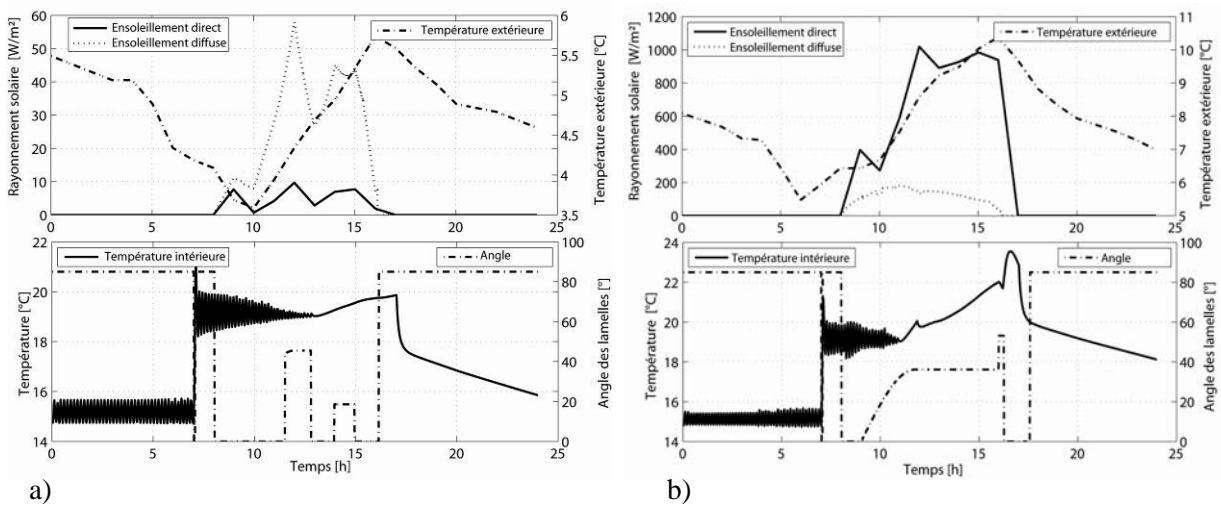


Figure 5. Simulation pendant la période d'hiver. a) Ville de Trappes; b) Ville de Carpentras

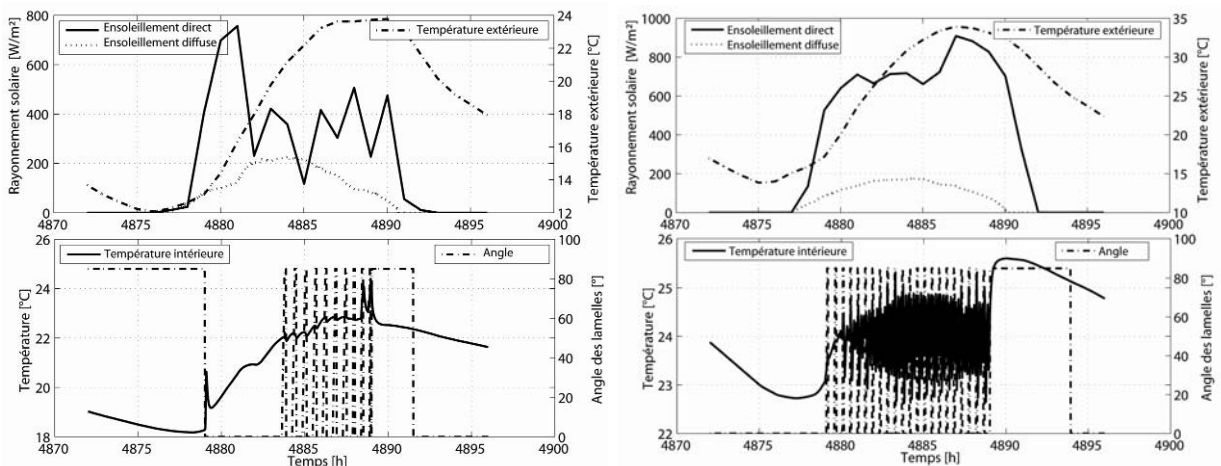


Figure 6. Simulation pendant la période d'été. a) Ville de Trappes; b) Ville de Carpentras



## 7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les simulations numériques effectuées ici montrent la faisabilité d'un système de contrôle des FDP. Comme cette étude est un travail exploratoire sur la régulation de FDP, la plateforme de simulation n'est pas encore optimisée au maximum. Des études sont prévues dans ce sens.

Le système de contrôle proposé permet de prendre en compte correctement l'économie d'énergie. En plus, l'étude a des ressources non explorées encore, comme la prise en compte de l'énergie engendrée par la ventilation de la FDP. Des études supplémentaires sur la mise en place d'une récupération ou d'un système de préchauffage de l'air de ventilation sont en cours.

Pour les perspectives, une analyse plus complète est à entreprendre, en se ne basant pas seulement sur la manière de régulation mais aussi sur la performance des éléments terminaux de régulation (moteurs, actionneurs, etc.) et sur l'inconfort engendré par le mouvement des protections solaires (limitation du nombre d'ajustements pour une période de temps).

## 8. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier à l'ADEME pour le financement du projet RFI (Régulateur de Façade Intelligente), au CSTB et CNRS-ENTPE pour les compétences spécifiques dans le cadre du projet.

## 9. BIBLIOGRAPHIE

Streicher W., 2005. Bestfaçade - *Best Practice for Double Skin Façades EIE/04/135/S07.38652*. WP 1 Report State of the Art.

Loncour X., Deneyer A., Blacso M., Flamant G., Xouters P., (2004). Les double façades ventilées. *Classification & Illustration des concepts de façades*. Centre Scientifique & Technique de la Construction, Département Physique du Bâtiment, Climat intérieur & Equipements, Belgique.

Safer N., Woloszyn M., Roux J.J., (2005a). *Global modelling of double skin façades equipped with Venetian blind model based on CFD approach*. CISBAT 2005, Lausanne (Switzerland).

Safer N., Woloszyn M., Roux J.J., Kuznik F. (2005b). *Modelling of the double skin façades for building energy simulation: radiative and convective heat transfers*. 9th International IBPSA Conference Building Simulation 2005, vol. 2, Montreal (Canada).

Safer N., Gavan V., Woloszyn M. and Roux J.-J.. (2006). *Double-skin façade with Venetian blind: global modelling and assessment of energy performance*. EPIC Conference, Lyon (France).

Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J. and Stewart R., (1990). *Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*, Solar Energy 44 (1990), 271-289.

BRE, (1981). *Estimating daylight in buildings: part 2*. Building Research Establishment Digest N°310, Garston (UK).

Woloszyn M., Gavan V., et al., (2007). *RFI - Towards Intelligent Façades: double-skin façade with modular solar shadings*. Internal report (France).

Sutter Y., SATEL-LIGHT, (1999). *Etude analytique et expérimentale du pilotage de stores vénitiens en vue d'obtenir des conditions de confort visuel optimales dans le cas du travail sur écran de visualisation*, PhD thesis, INSA-ENTPE.

Dumortier D., Van Roy F. (2002). *SODALIGHT 1.0 - A Daylighting Service for SODA*. European Project IST-1999-12245.

NF C71-121, (1993). *Méthode simplifiée de prédétermination des éclairagements dans les espaces clos et classification correspondante des luminaires*. Norme Afnor et UTE C 71-121.

CIE, (1986). *Guide on Interior Lighting. Second Edition. Publication No 29.2. Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)*. Vienna (Austria).