

LES CONDUITS DE LUMIERE TYPE MLP : CONFRONTATION INTER-MODELE ET EXPERIMENTALE

Bruno Malet-Damour, Harry Boyer, Stéphane Guichard, Ali Hamada Fakra

▶ **To cite this version:**

Bruno Malet-Damour, Harry Boyer, Stéphane Guichard, Ali Hamada Fakra. LES CONDUITS DE LUMIERE TYPE MLP : CONFRONTATION INTER-MODELE ET EXPERIMENTALE. 3ème Colloque International Francophone d'Énergetique et Mécanique, May 2014, Comores. pp.24-29 - ART-4-5. hal-01011711

HAL Id: hal-01011711
https://hal.science/hal-01011711

Submitted on 26 Jun 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES CONDUITS DE LUMIERE TYPE MLP : CONFRONTATION INTER-MODELE ET EXPERIMENTALE

Bruno **MALET-DAMOUR** [a*], Harry **BOYER** [a], Stéphane **GUICHARD** [a], Ali Hamada **FAKRA** [a]

[a] *Laboratoire Physique Ingénierie Mathématique pour l'Energie et l'environnemeNT (PIMENT) – Equipe Physique du Bâtiment (PhyBAT)*
Université de la Réunion – 117 rue du Général Ailleret 97430 Le Tampon, Réunion (France)

RÉSUMÉ

Les conduits de lumière de type MLP (*Mirrored Light Pipe*) permettent de transporter et de distribuer de la lumière naturelle dans des pièces sombres éloignées des ouvertures traditionnelles. Il offre l'avantage de réduire au minimum la perte de lumière, tout en limitant la transmission de chaleur. Ils font partie de la catégorie des convoyeurs à réflexion spéculaire multiple. Il s'agit de collecter, concentrer et dévier la lumière du soleil à l'aide d'un dôme placé en toiture. Celle-ci est ensuite acheminée à travers un tube aux parois hautement réfléchissantes puis diffusée au sein du local à l'aide d'un diffuseur.
Au cours des dernières décennies, de nombreux auteurs ont établis des modèles de prédiction des performances de ces dispositifs tubulaires en fonction des diverses configurations existantes. Cette variété d'approche a eu pour conséquence directe une dispersion des résultats des performances des conduits de lumière et une incohérence par rapport aux performances réelles de ce dispositif.
L'objectif de cette publication est de mettre en avant la disparité de ces modèles. Une étude bibliographique des différentes approches et une analyse comparative ont été réalisées. La cohérence des résultats théoriques a été évaluée à partir des données empiriques résultantes de l'expérimentation échelle 1:1 en condition météorologique réelle en cours.
Il en résulte que les divers modèles sélectionnés ont tendance à surestimer ou sous-estimer le phénomène réel. L'utilisation d'une base de données expérimentales a permis de mettre en avant les plus performants et les plus prometteurs.
Les perspectives futures de notre étude qui en ressortent se basent principalement sur la mise en place d'un nouveau modèle de prédiction des performances des conduits de lumière.

Mots Clés : Conduit de lumière, MLP, inter-modèle, expérimentation, photométrie,

NOMENCLATURE

Symboles :

Lettres latines :

kt	indice de clarté du ciel
Hs	hauteur solaire (en radians)
A_p	*aspect ratio* du conduit droit ($A_p = L\ /\ D$)
A_{pe}	*aspect ratio* du conduit courbe ($A_{pe} = L_e\ /\ D$)
L_e	longueur équivalente compte tenu des coudes
R	rayon du conduit (en mètre)
H	distance verticale entre le diffuseur et le point P du plan utile
D	distance directe entre le diffuseur et le point P du plan utile
f_{loss}	facteur de perte énergétique dû aux coudes
N_{30}	nombre de coude de 30°
f_{len}	facteur de longueur équivalente compte tenu des coudes
L_b	somme des longueurs linéaires de toutes les courbures
L	longueur du conduit droit
E_{int}	éclairement intérieur (en lux)
E_{ext}	éclairement global horizontal extérieur (en klux)

Lettres grecques :

ρ	réflectance du conduit
ϕ	angle du coude
θ	angle entre le point d'émission et de réception de la lumière
χ_n	facteur de perte lumineuse dû aux coudes

1. INTRODUCTION

Un conduit de lumière fait référence à une ouverture zénithale qui permet de laisser passer la lumière du jour dans un tube (souvent appelé à tort puits de lumière). Ce système est constitué d'un dôme placé en toiture, d'un tube aux parois hautement réfléchissantes (supérieur à 99%) et d'un diffuseur. Le dôme doit être résistant aux chocs et aux UV. Il protège le tube de la poussière et de la pluie. Le dispositif peut être couplé à un dispositif optique destiné à capturer et à rediriger le rayonnement du ciel vers l'intérieur du tube.

Ce concept a été breveté par Solatube en Australie en 1986. Dans leurs applications de transport de lumière

* auteur correspondant
Adresse électronique : bruno.malet-damour@univ-reunion.fr

naturelle, ils sont souvent appelés canons de lumière, lucarne tubulaire ou encore lumiduc.
Les conduits de lumière sont en général requis lorsque la zone à éclairer est à plus de 10 mètres des ouvertures en façades [1]. Ils permettent de s'affranchir des problèmes liés à l'éclairement direct (éblouissement, tâche solaire, etc.) en apportant une lumière diffuse (dans le cas d'un diffuseur lambertien). Ainsi, en fonction de la configuration et des exigences en niveau d'éclairage, plusieurs procédés de conduit de lumière existent. Nous relevons les plus connus : par exemple les conduits utilisant des lentilles de diffusion, les conduits prismatiques, les systèmes à noyau solide et les conduits de type MLP (*Mirrored Light Pipe*). Ces dispositifs peuvent être verticaux ou horizontaux, avec un ou plusieurs diffuseurs. Le tube peut être droit ou comporté des coudes. Dans le cas de notre étude, nous nous focaliserons sur l'un des procédés les plus couramment utilisés dans une configuration standard pour l'intégration dans un bâtiment : un conduit MLP courbe (inclinaison à 20°) comportant un unique diffuseur.

De nombreux modèles permettent de prédire leur performance sans pour autant offrir des résultats comparables. Le Tableau 1 à la suite recense l'ensemble des modèles théorique et semi-empirique les plus fréquemment utilisés.

Tableau 1. Synthèse des modèles mathématiques de prédiction des performances des conduits de lumière droits et courbes

Modèles théoriques	Droit	Courbe
Modèle de Zastrow et Wittwer [2]–[5]	X	
Modèle de Swift et Smith [5]	X	
Modèle de Tsangrassoulis [6]	X	
Modèle d'Edmonds [7]	X	X
Modèle de Kocifaj [8], [9]	X	X
Modèles semi-empiriques	**Droit**	**Courbe**
Modèles de Zhang et Muneer [4], [10]	X	X
Modèles de Yun et Kim [4], [11]	X	
Modèle de Jenkins et Muneer [6], [12], [13]	X	X
Modèle de Su [14]	X	X
Modèle de Shin [3]	X	
Modèle du CIE [15]	X	X

Pour cette étude, nous n'étudierons que certains des modèles de type semi-empirique permettant de prédire les performances pour des dispositifs courbes. Nous choisissons les plus couramment cités dans la littérature. Ces approches sélectionnées font l'objet d'une analyse comparative sur la base des résultats expérimentaux en conditions météorologiques réelles obtenues au sein du laboratoire pour un conduit de lumière courbe. Une publication ultérieure fera l'objet d'une analyse comparative inter-modèle, où seront confrontées les approches théoriques et semi-empiriques.

2. LES MODELES SEMI-EMPIRIQUES DE PREDICTION DE PERFORMANCE

Il existe de nombreux modèles pour prédire les performances des conduits de lumière. Certains sont issus d'études théoriques liées aux propriétés optiques des conduits, d'autres proviennent de l'association de l'expérimentation et de la théorie. Parmi ces modèles il existe des modèles semi-empiriques basés sur une approche quantitative permettant d'évaluer les performances photométriques des conduits de lumière. En 2002, Zhang [10] établit un concept basé sur un facteur nommé *Daylight Penetration Factor* (DPF) s'apparentant au Facteur de Lumière du Jour (FLJ). Il permet de déterminer l'éclairement à l'intérieur du local par le biais d'un concept commun :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{E_{int\,(x,y,z)}}{E_{ext}} \quad (1)$$

2.1. MODELE DPF DE ZHANG ET MUNEER

En utilisant des données expérimentales, Zhang et Muneer ont créé le facteur de pénétration de lumière du jour DPF d'un conduit de lumière [10].
Les paramètres principaux influençant le DPF sont les caractéristiques géométriques du conduit de lumière ainsi que les conditions climatiques telles que la hauteur solaire ou l'indice de clarté du ciel. Après avoir développé une équation générale dérivant de leur expérimentation, Zhang et Muneer publie une version simplifiée du modèle initial DPF pour les conduits courbes d'inclinaison 30°, et de réflectance du convoyeur égale à 97% :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{1}{D^2}(192.5 - 108.8k_t - 0.3H_s) \times \rho^{(132.4+4.4A_{pe}+8.6\cot H_s - 2.6A_{pe}\cot H_s)} \times R^2 \cdot (1 - f_{loss})^{N_{30}} \left(\frac{H}{D}\right)^m \quad (2)$$

Avec :

m=1.3 [10]

$$A_{pe} = \frac{L + f_{len} \times L_b}{2R} \quad (3)$$

Zhang a démontré que les valeurs les plus correctes pour f_{len} et f_{loss} sont respectivement 0.65 et 0.2, ce qui est en adéquation avec l'étude de Cater [10].
Tout comme le FLJ, ce modèle est normalement applicable sous tout type de ciel. Cependant, il a été conçu suivant les conditions de ciel couvert du Royaume Uni, et selon Shin [4] ce modèle présente un taux d'erreur plus élevé que d'autre modèle.
Shin précise dans sa publication que l'avantage premier d'un tel modèle est qu'il permet de considérer à la fois la configuration du conduit de lumière et les conditions météorologiques pour décrire les performances du dispositif [4]. Cependant, suite à son analyse comparative avec les modèles de Yun et Kim [11], il constate que les modèles de Zhang et Muneer surestiment très largement les performances du conduit de lumière.

2.2. MODELE DE JENKINS ET MUNEER

Jenkins et Muneer ont développé un modèle considérant les dimensions du conduit ainsi que la relation existante entre l'*aspect ratio* et le niveau d'éclairement transmis

par le diffuseur. Ils utilisent des données expérimentales pour approximer la transmission du conduit en une fonction de l'*aspect ratio* [6], [12], [13].
La transmission lumineuse est, quant à elle, déterminée expérimentalement. Elle est obtenue pour un conduit de 0.3m de diamètre et une longueur variant de 0.6m à 5.4m. L'*aspect ratio* évoluant, une fonction de la transmission lumineuse a pu être développée.
Cette procédure est correcte pour un certain type de conduit (MLP de réflectance 95% utilisant de l'aluminium poli; collecteur hémisphérique en polycarbonate dont la transmission lumineuse vaut 88% ; diffuseur en polycarbonate clair).
Vis-à-vis des conduits courbes, les auteurs ont produit une équation empirique permettant de prédire les pertes dues aux coudes (inclinaison variant entre 5° et 75°). Ce ratio correspond au rapport d'un conduit avec un coude à celle d'un conduit rectiligne de longueur égale :

$$\chi_n = e^{-0.0052\varphi_n} \qquad (5)$$

Le modèle final de prédiction de l'éclairement a été développé comme un modèle basé sur un cosinus biquadratique. Ce modèle peut prédire l'éclairement en n'importe quel point sous le diffuseur pour des conduits courbes :

$$E_{(x,y,z)} = 0.406 \prod_{\varphi_1}^{\varphi_n} e^{-0.0052\varphi} \times \frac{e^{-0.11A_p} \times E_{ext} \times \pi \times R^2 \times cos^4\theta}{H^2} \qquad (6)$$

Notons que seul l'angle du coude est important. En effet, Jenkins et Muneer ont pris l'hypothèse que la position des coudes dans le conduit n'était pas critique.
Selon Schou [16] la méthode développée par Jenkins et Muneer donne un éclairement qui contredit les propriétés du diffuseur non-uniforme. Il précise que c'est la raison pour laquelle ce modèle n'est pas précis dans des conditions de ciel dégagé avec un conduit de lumière de petite taille.

3. ETUDE EXPERIMENTALE

3.1. DESCRIPTION DE LA CELLULE

La cellule expérimentale LGI est située à Saint-Pierre (Ile de la Réunion, France). Avec une superficie de 9m², ce bâtiment expérimental ressemble à une pièce classique de type chambre ou au bureau. Le bâtiment d'essai a été construit pour valider expérimentalement les modèles physiques introduites dans CODYRUN et ISOLAB [17]–[19]. Les parois interne et externe sont de couleur blanche (le coefficient d'absorption des surfaces internes est d'environ 60%). Le toit est réalisé en tôle ondulée bleu nuit. Un conduit de lumière est installé sur le toit (figure 1). Le plafond, dans lequel le diffuseur du conduit de lumière est installé, est horizontal, et est fait de contre-plaqué. Les parois verticales sont réalisées en panneaux isolants (fibrociment et laine de verre). Le plancher est composé de dalles de béton posées sur une couche de polystyrène (épaisseur de 4 à 5 cm). La cellule a deux ouvertures: une porte et une jalousie, tous deux en vitrage simple, qui sont calfeutrés pour les besoins de l'étude. Les dimensions du bâtiment sont représentées sur la figure 2.



Fig. 1. Vue extérieure et intérieure de la cellule LGI

Le bâtiment est orienté Nord / Nord-Ouest: l'azimut de la cellule par rapport au nord géographique est de 9 °.
Le conduit de lumière est de type MLP. Le tableau 2 présente les coefficients de réflexion et de transmission solaire des principaux éléments de transport, ainsi que les références spécifiques du conduit de lumière utilisé.

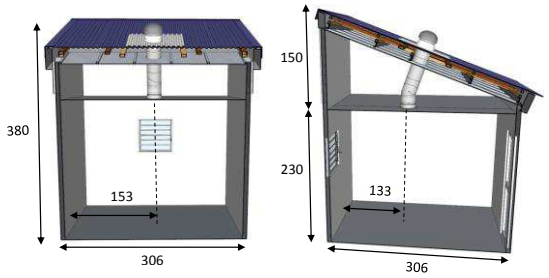


Fig. 2. Dimensions de la cellule expérimentale

Le tube utilise un film multicouche incorporant une couche intermédiaire de haute réflectivité à forte teneur en éléments silicium, permettant le convoyage de la lumière naturelle. Le coefficient de réflexion associé atteint 99,7%.
Le diffuseur est l'élément d'optique disposé en plafond du système de conduit de lumière SOLATUBE® permettant une diffusion homogène de la lumière naturelle vers l'intérieur du local à éclairer. Il est conçu à l'aide de la même matière que la coupole [20].

Tableau 2. Caractéristiques du conduit de lumière utilise

Dispositifs	SOLATUBE® Brighten Up® Series 160 DS Daylighting System		
	Kit components « SOLATUBE® »	τe	ρe
Collecteur	Dome en PMMA translucent	80	8
	Conveyor « Spectralight® Infinity »	-	93
Diffuseur	Dual Diffuseur Vusion® in PMMA translucent	79	11
τe : Solar transmittance normal/hemispherical (en %) –NF EN 410			
ρe : Solar reflection normal/ hemispherical (en %) –NF EN 410			

3.2. DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT DE LA CELLULE

La cellule est placée sur la plateforme expérimentale du laboratoire PIMENT (située aux coordonnées 21.19S, 55.28E, and 70.40 m au-dessus de la mer). Celle-ci dispose de nombreuses instrumentations. Il est important de noter que ces instrumentations n'ont pas d'impact sur l'objectif de l'expérimentation, à savoir sur les phénomènes photométriques au sein de la zone d'étude. Le sol de la plate-forme est fait d'herbe (albédo de l'ordre de 0,70).
L'environnement de la cellule ne comprend qu'un masque lointain gênant l'accessibilité à la lumière

naturelle qu'une certaine partie de l'année. Notre période expérimentale ne subit pas l'impact de ce masque.



Fig. 4. Plateforme expérimentale - IUT Saint Pierre (Réunion)

3.3. INSTRUMENTATION ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

Un luxmètre extérieur mesurant l'éclairement lumineux global est installé sur la station météorologique portable du laboratoire à une hauteur de 2m. Le luxmètre extérieur mesurant l'éclairement lumineux diffus est installé à proximité de cette même station météo, et utilise l'anneau d'ombrage *Shadeco*, fabriqué au sein du laboratoire. Ces capteurs sont de type FLA613 VLM de ALHBORN.

A l'intérieur de la cellule sont utilisés neuf luxmètres de type FLA603VLM (AHLBORN) pour quantifier la pénétration de la lumière du jour.

Les capteurs intérieurs sont placés suivant la disposition des schémas à la suite (figure 5). Ils sont surélevés de 10cm et sont répartis suivant les mailles d'une grille fictive.

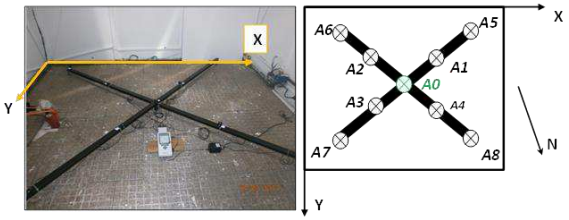


Fig. 5. Schéma du positionnement des neufs luxmètres intérieurs

Le décalage du maillage suivant y est de 13cm pour une maille de 20cm. Le décalage en x est de 13cm pour une maille de 28cm. L'un des capteurs est placé suivant l'axe vertical du diffuseur du dispositif. Les autres capteurs sont répartis autour du capteur central A0 (sous le diffuseur).

Tous les capteurs sont installés dans une position qui est relativement exempt de toutes obstructions externes, et est facilement accessible pour l'inspection et le nettoyage général.

Les données météorologiques sont mesurées chaque minute, toute la journée. Tous les instruments de mesure sont synchronisés.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

L'analyse comparative entre les résultats des modèles et ceux de l'expérimentation se sont révélés très intéressant. En effet, en ciel clair, les modèles de Zhang et de Jenkins, utilisés dans leur forme initiale, ne retranscrivent pas le phénomène photométrique mesuré. En ciel couvert, pour un pas de temps d'analyse fixé à 10min, ces approches deviennent plus performantes, mais n'offrent guère une estimation précise des performances du conduit de lumière. Nous nous intéresserons à ce type de ciel, et ciblons les paramètres pouvant être corrigé afin d'améliorer les performances des modèles. Le Tableau 3 synthétise la valeur des paramètres choisis pour l'étude.

Tableau 3. Paramètres de l'analyse comparative

Paramètres	Modèle de Zhang	Modèle de Jenkins
ρ	0.997 (soit 99.7%)	
k_t	0.2 (ciel couvert)	
A_{pe}	4.66	
A_p		4.8
R	0.125	
f_{loss}	0.2	
f_{len}	0.65	
N_{30}	1	
m	1,3	
ϕ		20°
θ		0°
H	2.2 m	
D	2.2 m	

4.1. RESULTATS EN CONDITION DE CIEL COUVERT SANS CORRECTION DES MODELES

La journée du 1er octobre 2013 présentait un ciel couvert avec un éclairement global extérieur à 14:40 de près de 92 Klux pour un éclairement diffus de l'ordre de 47 Klux. L'éclairement maximal sous le diffuseur est atteint à 14:40 et vaut 336 lux, pour un éclairement moyen sur le maillage de 223 lux.

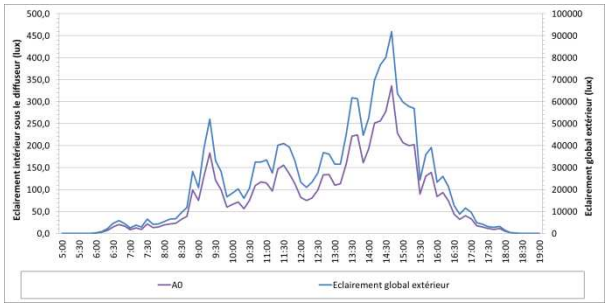


Fig. 6. Eclairement extérieur et intérieur (sous diffuseur), en lux

Le profil journalier de l'éclairement au point A0 montre clairement que l'éclairement diffus est prépondérant face à l'éclairement direct car l'éclairement sous le diffuseur suit le profil de l'éclairement extérieur.

L'utilisation du modèle de Zhang dans l'état ne permet pas de retranscrire le comportement photométrique du conduit de lumière, comme le montre la figure 7. En effet, Zhang surestime très largement les performances du conduit de lumière, en offrant une valeur irréel pour un tel conduit (éclairement maximal intérieur sous diffuseur de 13 355 lux), ce qui ne permet même plus de le comparer aux autres valeurs.

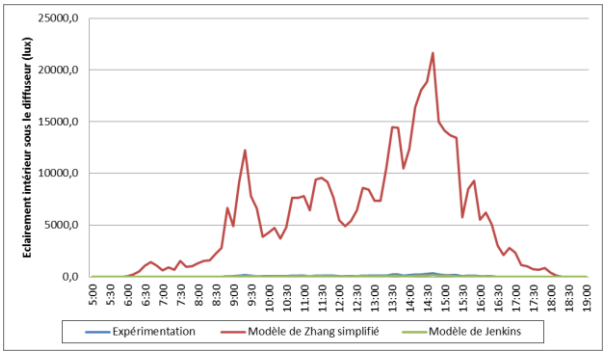


Fig. 7. Comparaison des éclairements intérieurs expérimentaux et issus des modèles

Le modèle de Jenkins, quant à lui, semble retranscrire correctement le phénomène, sans pour autant offrir des valeurs comparables (voir graphe…).

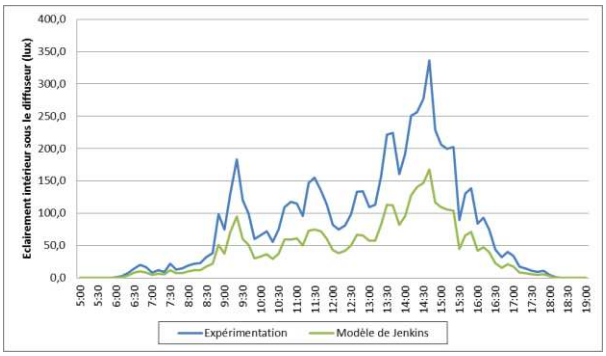


Fig. 8. Comparaison des éclairements intérieurs expérimentaux et issus du modèle de Jenkins

4.2. RESULTATS EN CONDITION DE CIEL COUVERT AVEC CORRECTION DES MODELES

Suite à une analyse paramétrique, nous avons mis en évidence les paramètres influents considérablement sur les résultats des modèles. La constatation est la même pour les deux approches : dans leur état actuel, ils ne sont pas généralisables à n'importe quel type de conduit.

Le modèle de Zhang a été conçu à l'aide d'un dispositif ayant une réflectance de 97%. Si nous modifions ce paramètre en y mettant la valeur de réflectance de notre dispositif, les résultats sont alors incomparables. Cependant, si l'on garde la valeur pour ρ de 97%, alors le modèle de Zhang suit parfaitement les données expérimentales :

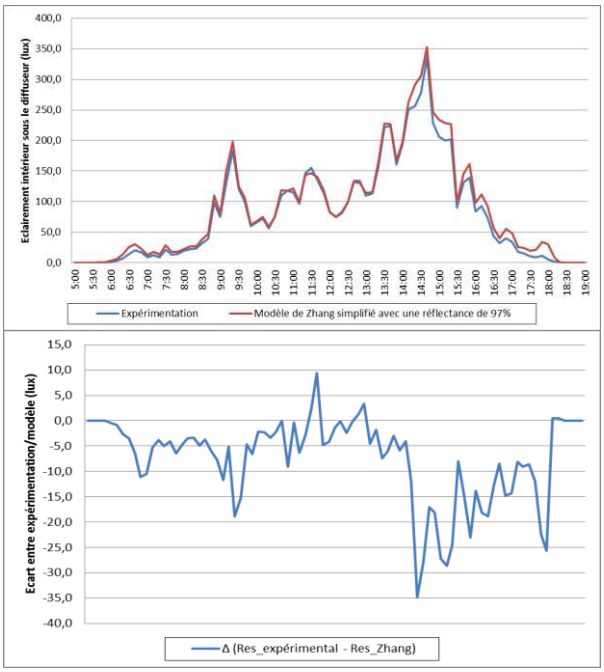


Fig. 9. Comparaison des éclairements intérieurs expérimentaux et issus du modèle de Zhang, et écart entre valeurs mesurées et prédites

La conclusion directe est que ce paramètre n'est pas une variable, mais une constante. Ainsi, nous pouvons dire que le modèle de Zhang n'est pas généralisé. Nous obtenons un écart maximal entre les résultats mesurées et les valeurs prédites de 35lux, pour un pas de temps de 10min. Le modèle de Zhang serait donc égal à :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{1}{D^2}(192.5 - 108.8k_t - 0.3H_s) \times \mathbf{0,97}^{(132.4+4.4A_{pe}+8.6\cot H_s-2.6A_{pe}\cot H_s)} \times R^2 \cdot (1-f_{loss})^{N_{30}} \left(\frac{H}{D}\right)^m \quad (7)$$

Le modèle de Jenkins, quant à lui, ne permet d'atteindre les valeurs expérimentales quand y appliquant un coefficient multiplicateur de « 2 » sur la première constante (0.406), pouvant correspondre au nombre de partie de conduit. Les résultats du modèle sont alors présentés dans la figure 10. Nous obtenons un écart maximal entre les valeurs mesurées et prédites de 25lux, pour un pas de temps de 10min.

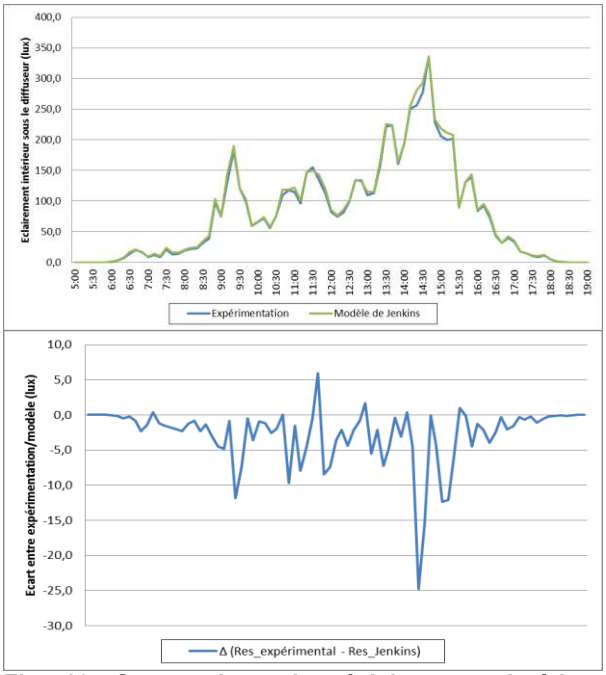


Fig. 10. Comparaison des éclairements intérieurs expérimentaux et issus du modèle de Jenkins, et écart entre valeurs mesurées et prédites

Le modèle de Jenkins corrigé serait donc de la forme suivante :

$$E_{(x,y,z)} = 0.812 \prod_{\varphi_1}^{\varphi_n} e^{-0.0052\varphi} \times \frac{e^{-0.11A_p} \times E_{ext} \times \pi \times R^2 \times cos^4\theta}{H^2} \quad (8)$$

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude menée nous a permis d'effectuer une analyse comparative entre deux modèles choisies dans la bibliographie permettant de prédire le comportement d'un conduit de lumière courbe. La justesse et la précision des modèles ont été appréciées à l'aide d'un comparatif avec les données obtenues grâce à l'expérimentation à échelle 1 :1 menée au sein du laboratoire sur un conduit courbe d'inclinaison 20°. Les données ont été

confrontées sur la base d'une journée en ciel couvert, le ciel clair n'offrant aucun résultat comparable.

Nous avons constaté que dans l'état actuel, si l'on reste fidèle à la configuration d'étude, les modèles de Zhang et de Jenkins ne permettent pas de prédire convenablement les performances du conduit de lumière utilisé. Suite à une analyse paramétrique, nous avons mis en évidence les grandeurs ayant un impact considérable sur les résultats. Nous en avons déduis que le modèle de Zhang n'est pas généralisé à tout type de conduit. En effet, son modèle a été élaboré à l'aide d'un conduit de réflectance égale à 97%. Ce n'est qu'en utilisant cette valeur que le modèle offre des résultats convenables. Vis-à-vis du modèle de Jenkins, celui-ci nécessite l'application d'un coefficient sur sa première constante afin d'obtenir des résultats proches des données expérimentales.

Globalement, nous avons montré que les modèles choisis et corrigés permettaient de prédire correctement le comportement photométrique d'un conduit de lumière en ciel couvert. Il est maintenant nécessaire de généraliser l'équation de Zhang et de Jenkins pour n'importe quel type de conduit de lumière courbe. Cette étude fera l'objet d'une prochaine publication.

REFERENCES

[1] V. G. Hansen, "Innovative Daylighting Systems For Deep-Plan Commercial Buildings," Thèse Sci., School of Design Queensland University of Technology, 2006.

[2] J. Callow, "Daylighting Using Tubular Light Guide Systems," University of Nottingham, 2003.

[3] J. Y. Shin, G. Y. Yun, and J. T. Kim, "Evaluation of Daylighting Effectiveness and Energy Saving Potentials of Light-Pipe Systems in Buildings," *Indoor Built Environ.*, vol. 21, no. 1, pp. 129–136, Feb. 2012.

[4] J. Y. Shin, G. Y. Yun, and J. Tai Kim, "Daylighting and Energy Performance Prediction of a Light Pipe used in Underground Parking Lots," presented at the SHB2011 - 5th International Symposium on Sustainable Healthy Buildings, Seoul, Korea, 2011, pp. 277–281.

[5] P. D. Swift and G. B. Smith, "Cylindrical mirror light pipes," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 36, no. 2, pp. 159–168, Feb. 1995.

[6] D. Jenkins and T. Muneer, "Light-pipe prediction methods," *Appl. Energy*, vol. 79, no. 1, pp. 77–86, Sep. 2004.

[7] I. Edmonds, "Transmission of mirror light pipes with triangular, rectangular, rhombic and hexagonal cross section," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 6, pp. 928–938, Jun. 2010.

[8] M. Kocifaj, F. Kundracik, S. Darula, and R. Kittler, "Availability of luminous flux below a bended light-pipe: Design modelling under optimal daylight conditions," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2753–2761, Sep. 2012.

[9] M. Kocifaj, "Efficient tubular light guide with two-component glazing with Lambertian diffuser and clear glass," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 7–8, pp. 1031–1036, Jul. 2009.

[10] X. Zhang, *Daylighting Performance of Tubular Solar Light Pipes: Measurement, Modelling and Validation*. Napier University of Edinburgh, 2002.

[11] G. Y. Yun, T. Hwang, and J. T. Kim, "Performance Prediction by Modelling of a Light-pipe System used under the Climate Conditions of Korea," *Indoor Built Environ.*, vol. 19, no. 1, pp. 137–144, Feb. 2010.

[12] D. Jenkins and T. Muneer, "Modelling light-pipe performances—a natural daylighting solution," *Build. Environ.*, vol. 38, no. 7, pp. 965–972, Jul. 2003.

[13] D. Jenkins, T. Muneer, and J. Kubie, "A design tool for predicting the performances of light pipes," *Energy Build.*, vol. 37, no. 5, pp. 485–492, May 2005.

[14] Y. Su, N. Khan, S. B. Riffat, and O. Gareth, "Comparative monitoring and data regression of various sized commercial lightpipes," *Energy Build.*, vol. 50, pp. 308–314, Jul. 2012.

[15] M. Al-Marwaee and D. Carter, "Tubular guidance systems for daylight: Achieved and predicted installation performances," *Appl. Energy*, vol. 83, no. 7, pp. 774–788, Jul. 2006.

[16] A. Schou, "ion of light pipe simulation algorithms," Technical University of Denmark, DTU Informatics, E-mail: reception@imm.dtu.dk, Bachelor thesis [Industrial collaboration], 2012.

[17] H. Boyer, "Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones.Proposition d'un outil à choix multiples," Thèse Sci., 'Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon, Lyon, 1993.

[18] F. Miranville, "Contribution à l'étude des parois complexes en physique du bâtiment : modélisation, expérimentation et validation expérimentale de complexes de toitures incluant des produits minces réfléchissants en climat tropical humide," La Réunion, 2002.

[19] A. H. Fakra, "Intégration de modèles d'éclairage à un code de calcul en physique du bâtiment : Modélisation, Validation et Applications," Thèse Sci., Université de la Réunion, Réunion, 2009.

[20] CSTB, "Solatube® S160-DS, S290-DS et S330-DS - Conduit de lumière naturelle - Avis Technique 6/10-1836," Avis Technique Avis Technique 6/10-1836, 2011.