Contribution À L'Étude Des Dispositifs De Guides Lumineux Tubulaires (D.G.L.T.) Appliqués Au Bâtiment:Expérimentation, Modélisation et Validation

Bruno Malet-Damour

▶ **To cite this version:**

Bruno Malet-Damour. Contribution À L'Étude Des Dispositifs De Guides Lumineux Tubulaires (D.G.L.T.) Appliqués Au Bâtiment:Expérimentation, Modélisation et Validation. Climatologie. Université de la Réunion, 2015. Français. NNT : . tel-01326961v1

HAL Id: tel-01326961

https://hal.science/tel-01326961v1

Submitted on 23 Feb 2017 (v1), last revised 6 Jun 2016 (v2)

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.

Thèse labellisée

2015 ANNÉE DE LA LUMIÈRE EN FRANCE

THESE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITE DE LA REUNION

Présentée par **Bruno MALET-DAMOUR**

Pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : « **Physique Énergétique Appliquée Au Bâtiment** »

Contribution À L'Étude Des Dispositifs De Guides Lumineux Tubulaires (D.G.L.T.) Appliqués Au Bâtiment: Expérimentation, Modélisation et Validation

Contribution to the study of Tubular Daylight Guidance Systems (TDGS): Experimentation, Modelling and Validation

Directeur de thèse : Pr. Harry BOYER
Co-encadrant de thèse : Dr. Stéphane GUICHARD

Soutenue le 7 décembre 2015, devant la commission d'examen composée de :

M. Belkacem ZEGHMATI	Pr. des Universités, Université de Perpignan (France)	Rapporteur
M. Georges ZISSIS	Pr. des Universités, Université Paul Sabatier, Toulouse, (France)	Rapporteur
M. Dimitri BIGOT	Maître de Conférences, Université de La Réunion, La Réunion (France)	Examinateur
M. Jean-Philippe PRAENE	Maître de Conférences, Université de La Réunion, La Réunion (France)	Examinateur
M. Harry BOYER	Pr. des Universités de La Réunion, La Réunion (France)	Directeur de thèse
M. Stéphane GUICHARD	Maître de Conférences, EI CESI, IRISE-CRITT, La Réunion (France)	Co-encadrant de thèse

Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'environnemeNt et le bâtimenT
(PIMENT - EA 4518)
Groupe thématique Physique du Bâtiment (PhyBÂT)
École Doctorale Sciences Technologies Santé (STS) - Université de La Réunion

Avant-Propos

« Omne ignotum pro magnifico »

« Ce que l'on ne sait pas, on lui donne une importance démesurée ».
L'ampleur des problèmes rencontrés n'est liée qu'à la distance à laquelle nous les percevons.

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au laboratoire de Physique Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'environnemeNt et le bâtimenT (PIMENT), au sein du groupe thématique Physique du Bâtiment (PhyBât).

« À l'impossible, nul n'est tenu ». Tels ont été ses mots. Humilité, humanité, modestie, compréhension, sagesse… et j'en passe tant ses qualités ne permettent pas d'établir une liste exhaustive. J'ai eu beaucoup de chance de vous rencontrer, Harry Boyer. Lorsque la pénombre gagnait ma vie, vous avez été présent pour me tendre la main. Une main lumineuse, compte tenu du sujet que vous m'avez proposé. J'ai beaucoup de respect pour le chercheur que vous êtes, et pas moins d'admiration pour la personne que vous incarnez. Un grand merci Harry Boyer, directeur de thèse et Professeur à l'Université de La Réunion. Sans vous, rien n'aurait pu commencer.

J'adresse également mes remerciements à Stéphane Guichard, Enseignant-Chercheur à l'EI CESI pour avoir co-encadré ce travail de thèse. Son dynamisme et sa prestance mathématique en font de lui un chercheur qui gagne à être connu et reconnu. Stéphane, merci d'avoir été présent pour moi, aussi bien pour des évènements personnels que professionnels avec une loyauté des plus tenaces.

Je ne pourrais oublier Dimitri Bigot et Jean-Philippe Praene, tous deux Maitres de Conférences à l'Université de La Réunion, d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse. Merci à toi Dimitri pour l'ensemble de ton savoir-faire et pour tout le partage associé. Merci à Jean-Philippe pour ces longues conversations téléphoniques qui ont su me mettre sur la voie au moment où j'en avais besoin. Merci à tous les deux pour votre amitié.

La réussite appartient à tout le monde. C'est au travail d'équipe qu'en revient le mérite. Le groupe thématique Physique du Bâtiment suit cette logique implacable ce qui génère une ambiance de travail des plus motivantes ! Dans ce cadre, je remercie sincèrement Frédéric Miranville, Professeur à l'Université de La Réunion, pour m'avoir inculqué sa rigueur et son dynamisme. Ton esprit d'ouverture et ton optimisme font de toi un manager digne de ce nom. Un grand merci d'avoir fait en sorte que ces travaux soient réalisés dans les meilleures conditions. Je pense également à Aurélien Jean, pour son aide précieuse dans l'univers de la programmation et ses conseils avisés sur tous les plans. Je te souhaite beaucoup de réussite dans ta longue carrière de chercheur. Je témoigne également ma gratitude à Damien Fakra, Docteur-Ingénieur en charge des études expérimentales, pour avoir laissé la « porte de la

photométrie » ouverte, avec tant de conseils, de réflexion, tant d'encouragements. J'adresse également mes sincères remerciements à Teddy Libelle, Docteur en Physique. Ces longues conversations, ces encouragements et ce soutien quand j'enseignais à tes côtés étaient pour moi bénéfiques. Ce petit groupe de personnes gagne à être connu. J'ai compris qu'être ami et collègue était tout à fait possible.

Je suis honoré que M. Georges Zissis, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse (France), et M. Belkacem Zeghmati, Professeur à l'Université de Perpignan (France) aient accepté de rapporter ce manuscrit et de participer à ce jury de thèse de Doctorat.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres de PIMENT, dirigé par Alain Bastide, Professeur à l'Université de La Réunion. Mes responsabilités au sein du laboratoire n'auraient pu être plus constructives sans une direction aussi performante. Je remercie cette grande famille qu'est PIMENT, en pensant particulièrement à Dominique (avec Jean-Philippe), mes compères « Coco'bongo ». Je ne pourrais oublier Laetitia, Jean-Claude, Philippe, Mathieu, Olivier, Garry, Christelle, El-Assad, Arthur et l'ensemble des doctorants.

Le début de ces travaux a été réalisé au sein du PROFIL. La jeunesse et le dynamisme de l'équipe ont été des atouts pour mener à bien mes enseignements au Cycle Préparatoire à l'Enseignement Supérieur et à l'Insertion Professionnelle (CPESIP). Un merci à toute cette équipe qui m'a appris qu'aider les étudiants en difficulté, les guider vers la réussite était un combat sans relâche, mais conférant la satisfaction du travail bien fait. La suite de ma mission d'enseignement s'est déroulée au département Génie Biologique de l'Institut Universitaire de Technologie de Saint-Pierre. Les expériences que j'y ai vécues ont été très formatrices et m'ont procuré beaucoup de plaisir. J'exprime ma gratitude à l'équipe pédagogique dirigée par Jean-Michel Huet. Merci à Florence, Philippe, France-Anne, Thomas, Pascal, Jean-Michel, Sébastien, Dalila, Gwendoline et Véronique. Je pense également à Éric, Emmanuelle et Julien.

L'étude expérimentale a pu naître grâce à la confiance qu'a su m'accorder la société SOVELO, dirigée par Franck Mizzi. Notre passion commune nous a valu de longues conversations pleines de perspectives.

Je tiens également à remercier mes amis et amies pour leur contribution « de près ou de loin ». Je pense particulièrement à Ruddy et Kévin pour leur soutien et leur amitié indéfectible.

Je ne pourrais continuer ces longs remerciements sans penser à mes frères et sœurs. Qu'ils soient encore présents ou non, ils représentent à mes yeux la grande famille que chaque « petit frère » souhaiterait avoir : Lé-thâne, Lindsey, Sandrine, Nathalie, Frédéric et Nicolas.

Je tiens à remercier du plus profondément mes parents pour tout ce qu'ils ont toujours fait pour moi. Il est peu de personnes qui peuvent se vanter d'avoir des parents comme vous,

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

aussi complémentaires qu'efficaces dans le soutien que vous m'avez constamment apporté. Votre dévouement à mon égard a été pour beaucoup dans la réussite de ce projet fou.

Je terminerai par remercier ma « Miss Réunion », Ingreed. Ton amour et notre complicité dans les moments les plus hauts comme les plus bas m'ont aidé, accompagné, boosté et surtout renforcé. J'espère que mon avenir continuera à converger vers le tien.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

À mes parents,

Vos efforts n'auront pas été vains

Résumé

Concevoir un bâtiment avec des préoccupations de confort et de maitrise de l'énergie est un enjeu primordial. Dans le contexte mondial alarmant, tant sur le plan énergétique que climatique, le secteur du bâtiment est pointé du doigt. En France, l'éclairage fait partie des mauvais élèves comparés aux autres pays européens. Le pays accuse un certain retard dans la qualité de l'éclairage tertiaire ou résidentiel en termes de performance énergétique, confort visuel ou santé au travail.

L'organisation de « 2015, Année de la Lumière en France » par l'ONU, l'UNESCO et le CNOP montre qu'un changement tend à s'opérer dans les consciences.

L'île de La Réunion, compte tenu de son fort gisement solaire, est une terre de choix pour expérimenter des dispositifs novateurs dans l'apport de lumière naturelle au sein des bâtiments. Pour cela, l'approche physique du phénomène offre des perspectives de prédiction où l'étude théorique d'aujourd'hui fera le bâtiment de demain.

En débutant par une approche généraliste, ce manuscrit de thèse se veut être le plus exhaustif possible dans l'étude bibliographique, expérimentale et modélisation du comportement des DGLT-R (Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Réfléchissants) appliqués au bâtiment.

Notre prospection bibliographique nous a révélé que ce procédé est couramment commercialisé et installé à l'échelle internationale sur les bâtiments soucieux de leur impact environnemental ou du bien-être de leurs occupants. Cependant, la littérature montre également qu'ils sont peu étudiés et que les approches ne peuvent être appliquées à tous types de climats. Dans ce cadre, une étude expérimentale à échelle réelle, comprenant de nombreux scénarios, a été menée en vue de créer une base de données de mesures expérimentales unique et comprendre les phénomènes mis en jeu.

La modélisation semi-empirique possède à la fois des atouts et des inconvénients. Forte de simplicité, elle reste toutefois limitée à une configuration ou un climat particulier.

À cette problématique, ces travaux de recherche offrent une solution : un outil numérique de modélisation dédié, assurant la génération des modèles au départ de mesures à effectuer, nommé HEMERA. Il utilise la puissance des algorithmes génétiques pour offrir une solution efficace à un problème local. Le code de calcul CODYRUN est le support de validation du modèle généré pour le climat de La Réunion. Ce code de calcul bénéficie d'une expérience et d'un développement de plus de 20 ans au sein du laboratoire PIMENT.

Abstract

Designing a building with comfort and energy conservation concerns is a key issue. In the alarming global context, both on energy-climate that the building sector is singled out. In France, the lighting is among the poor performers compared to other European countries. The country lags behind in quality tertiary or residential lighting in terms of energy performance, visual comfort or health.

The organization of "*2015, Année de la Lumière en France*" by the ONU, UNESCO and the CNOP shows a change which tends to take place in the popular consciousness.

Reunion Island, considering its strong solar radiation, is a land of choice to experiment with innovative devices in the contribution of daylight in buildings. For this purpose, the physical approach of the phenomenon provides prediction prospects, where the theoretical study of today will be tomorrow's building.

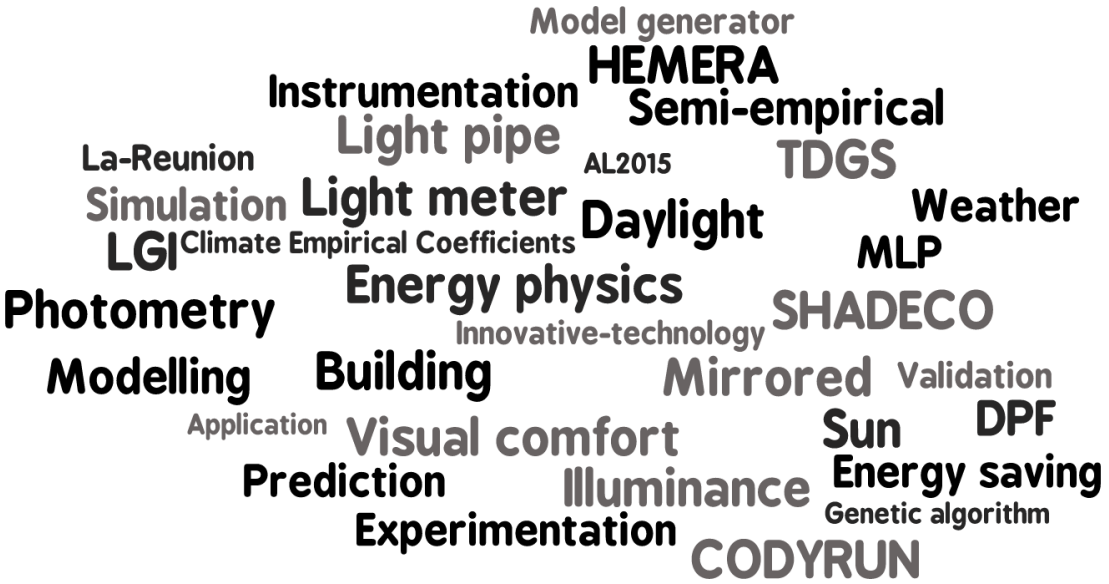
Starting with a generalist approach, this PhD thesis aims to be as comprehensive as possible in the literature review, experimental and modelling study of the TDGS (Tubular Daylight Guide Systems) applied to the building.

Our bibliographic survey has revealed that, this process is commonly marketed and installed internationally on the buildings concerned about their environmental impact or well-being of their occupants. However, the literature also shows they are poorly studied, and the approaches cannot be applied to all types of climates. In this context, a full-scale experimental study, including many scenarios was conducted to understand the phenomena involved.

The semi-empirical modelling has both strengths and weaknesses. With simplicity, it remains limited to a configuration or a particular climate.

In this issue, this research offers a solution: a numeric tool of dedicated modelling environment, ensuring the generation of the models according to need, called HEMERA. It uses the power of genetic algorithms to provide an effective solution to a local problem. The computer code CODYRUN is the support of the validation of the model developed as part of this work, and adjusted specifically for the climate of Reunion Island. This software profits an experience and a development of over 20 years in the PIMENT laboratory.

Mots-clés - Keywords



Nomenclature

Environnement extérieur

Caractères latins

AM	Masse d'air optique	[-]
A_s	Azimut solaire	[° ou rad]
c	Coefficient d'atténuation atmosphérique	[-]
$E_{G,h}$	Éclairement global extérieur sur un plan horizontal	[klux]
$E_{b,h}$	Éclairement direct extérieur sur un plan horizontal	[klux]
$E_{d,h}$	Éclairement diffus extérieur sur un plan horizontal	[klux]
$E_{r,h}$	Éclairement réfléchi sur un plan horizontal	[klux]
E_{ET}	Éclairement solaire extraterrestre	[klux]
$E_{G,CIE}$	Valeur théorique de l'éclairement global pour un ciel clair selon la CIE	[klux]
H_s	Hauteur solaire	[° ou rad]
I_{ET}	Rayonnement solaire extraterrestre	[W/m²]
$I_{G,h}$	Rayonnement solaire global sur un plan horizontal	[W/m²]
$I_{b,h}$	Rayonnement solaire direct sur un plan horizontal	[W/m²]
$I_{d,h}$	Rayonnement solaire diffus sur un plan horizontal	[W/m²]
J	Jour Julien	[-]
k_t	Indice de clarté du ciel	[-]
K_G	Efficacité lumineuse globale formulée par (Tariq Muneer 2000)	[lm/W]
L_{sky}	Luminance du ciel	[cd.m-2]
S_{evg}	Éclairement global standardisé	[klux]
SR	*Sky Ratio*	[-]

Caractères grecques et symbole

δ	Déclinaison solaire	[rad]
λ	Indice de clarté, égal au ratio entre l'éclairement global horizontal extérieur et l'éclairement global standardisé	[-]
υ	Angle zénithal solaire (angle complémentaire de la hauteur solaire)	[° ou rad]
Φ	Latitude du lieu considéré	[rad]
ω_s	Angle horaire	[rad]
ω_{so}	Angle horaire de lever et de coucher de soleil	[rad]
$\Re_{sun}$	Rayon angulaire du Soleil vu de la Terre qui couvre grossièrement 16 minutes angulaires	[arcmin]

Dispositif de **G**uides **L**umineux **T**ubulaires et **B**âtiment

Caractères latins

a_{coude}	Azimut du coude du conduit (0° : nord ; 90° : est ; 180° : sud ; 270° : ouest)	[° ou rad]
A_p	Rapport des longueurs (i.e. *aspect ratio)* du conduit droit : $A_p = {}^{L}/_{D_{diam}}$	[-]
A_{pe}	Rapport des longueurs (i.e. *aspect ratio)* du conduit courbe : $A_{pe} = {}^{L_e}/_{D_{diam}}$	[-]
A	Section transversale du conduit	[m²]
A_{wp}	Surface du plan de travail	[m²]
A_i B_i C_i	Expressions fonction de paramètres météorologiques ou relatifs au conduit de lumière, contenant des constantes à ajuster	[-]
a_i b_i c_i	Constantes à ajuster	[-]
D_{diam}	Diamètre du conduit	[m]
D_{eff}	Diamètre efficace du conduit	[m]
D	Distance directe entre le diffuseur et le point P du plan utile (distance euclidienne)	[m]
$D_{(\theta,as,\gamma_\theta,\varkappa_\theta)}$	Distance entre l'élément de surface situé à la position $\gamma_0, \varkappa_0$ sur le diffuseur et le point P du plan utile	[m]
f_{len}	Facteur de longueur équivalente compte tenu des coudes selon (Zhang 2002)	[-]
$f_{loss,collecteur}$	Facteur de pertes liées au collecteur	[-]
$f_{loss,diffuseur}$	Facteur de pertes liées au diffuseur	[-]
$f_{loss,obstacles}$	Facteur de pertes liées aux masques	[-]
$f_{loss,courbe}$	Facteur de pertes liées aux coudes selon (Zhang 2002)	[-]
H	Distance verticale entre le diffuseur et le point P du plan utile	[m]
L_b	Somme des longueurs linéaires de toutes les courbures	[m]
L	Longueur du tube du conduit de lumière	[m]
L_{eq}	Longueur équivalente de conduit droit présentant des pertes optiques similaires à un conduit courbe	[m]
$L_{pièce}$	Longueur de la pièce	[m]
$L_{diff_{\upsilon,\varphi,\gamma_0,\varkappa_0}}$	Luminance à la surface supérieure du diffuseur	[lm]
MF	Facteur de maintenance du conduit	[-]
$m_{courbure}$	Rapport de courbure (*bend ratio parameter*)	[-]
m	Exposant décrit par Zhang pour le modèle d'émission (Zhang 2002)	[-]
N_{30}	Nombre de coude d'angle 30° (Zhang 2002)	[-]
N_{coude}	Nombre de coude	[-]
N_{LP}	Nombre de conduit de lumière	[-]
N	Nombre de réflexion au sein du conduit	[-]
$p_{D_{\upsilon,\varphi,\theta,as}}$	Fonction de phase diffuse caractérisant la quantité de lumière diffusée vers le point sur le plan de travail si la direction des rayons d'incidence est υ, φ.	[-]
RI	Indices du local (*Room Index*)	[-]

R	Rayon du conduit	[m]
$SDTC$	Standard Daylight Transfer Characteristic	[-]
S_{diff}	Surface apparente du diffuseur	[m²]
UF	Facteur d'utilisation (Al-Marwaee and Carter 2006)	[-]
$W_{pièce}$	Largeur de la pièce	[m]

Caractères grecques

a_{LP}	Angle du coude	[°]
β	Angle fonction de l'azimut solaire et de l'orientation du coude	[° ou rad]
β_{roof}	Angle d'inclinaison de la toiture	[° ou rad]
$\beta_{dôme}$	Angle d'inclinaison du collecteur (dôme)	[° ou rad]
$\theta_{(x,y,z)}$	Angle entre la normale du diffuseur et le point P	[° ou rad]
μ	Surface initiale du diffuseur : $\mu = \pi . R^2$	[m²]
μ'	Surface apparente du diffuseur au point P	[m²]
ρ_{LP}	Réflectivité du conduit	[-]
τ_{TDGS}	Rendement du conduit de lumière	[-]
τ_{tube}	Transmission du tube	[-]
$\tau_{collecteur}$	Rendement du collecteur	[-]
$\tau_{diffuseur}$	Rendement du diffuseur	[-]
$\tau_{dir_{TDGS}}$	Transmission du conduit vis-à-vis de l'éclairement direct	[-]
$\tau_{diff_{TDGS}}$	Transmission du conduit vis-à-vis de l'éclairement diffus	[-]
$\tau_{dir_{Collecteur}}$	Transmission du collecteur vis-à-vis de l'éclairement direct	[-]
$\tau_{diff_{Collecteur}}$	Transmission du collecteur vis-à-vis de l'éclairement diffus	[-]
χ_{coude_n}	Facteur de pertes liées au coude	[-]
$\chi_{coude_{diff}}$	Facteur de pertes en éclairement diffus liées au coude	[-]
$\chi_{coude_{dir}}$	Facteur de pertes en éclairement direct liées au coude	[-]
$\chi_{skyview}$	Part du ciel vu par le collecteur	[%]
ω	Angle solide	[sr]

Ambiances intérieures

Caractères latins

$DPF_{(x,y,z)}$	Facteur de pénétration de la lumière du jour – *Daylight Penetration Factor*	[-]
$E_{(x,y,z)}$	Éclairement intérieur au point P de coordonnées (x, y, z)	[lux]
E_{in}	Éclairement intérieur moyen sur le plan utile	[lux]
$E_{LP,out}$	Éclairement en sortie du diffuseur	[lux]
$E_{ss,diff}$	Éclairement intérieur sous diffuseur	[lux]
$E_{LP,out}$	Éclairement moyen en sortie du conduit de lumière (au diffuseur)	[lux]
$E_{dir_{B(x,y,z)}}$	Éclairement intérieur au point P de coordonnées (x, y, z)	[lux]
$E_{Reflec,PV}$	Éclairement réfléchi reçu par le sol	[lux]
I_o	Intensité lumineuse normal au plan de la source lumineuse	[cd]
$L_{diffuseur}$	Luminance en sortie du diffuseur	[cd/m²]
$S_{PV,i}$	Surface d'une paroi verticale	[m²]

Caractères grecques

θ_i	Angle d'incidence du rayon entrant	[rad ou °]
$\theta_{(x,y,z)}$	Angle d'émission du rayon reçu au point P de coordonnées (x, y, z)	[rad ou °]
$\rho_{PV,i}$	Coefficient de réflexion d'une paroi verticale	[-]
$\rho_{PV,moyen}$	Coefficient de réflexion moyen des parois verticales	[-]
$\Phi_{conduit\ droit}$	Flux lumineux en sortie du conduit de lumière droit	[lm]
$\Phi_{conduit\ courbe}$	Flux lumineux en sortie du conduit de lumière courbe	[lm]
Φ_i	Flux lumineux incident	[lm]
$\Phi_{LP,out}$	Flux lumineux en sortie du conduit de lumière	[lm]
$\phi_{LP,out,dir}$	Flux lumineux en sortie du conduit de lumière lié au direct	[lm]
$\phi_{LP,out,diff}$	Flux lumineux en sortie du conduit de lumière lié au diffus	[lm]
$\Phi_{Collecteur,v}$	Flux lumineux au collecteur dépendant de l'angle azimutal	[lm]
$\Phi_{PV,int}$	Flux lumineux réfléchi par les parois verticales	[lm]

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Géométrie solaire

Caractères latins

AM	Masse d'air déterminée à partir de l'équation de (Tariq Muneer 1997)	[-]
b	Largeur de la bande pare-soleil	[m]
C_L	Facteur de correction de Le Baron	[-]
C_D	Facteur de correction de Drummond	[-]
C_B	Facteur de correction de Battles	[-]
C_M	Facteur de correction de Muneer	[-]
f	Proportion de rayonnement diffus obstruée par la bande pare-soleil	[-]
$I_{b,h,u}$	Rayonnement direct normal non corrigé	[W/m²]
J	Numéro du jour julien dans l'année, allant de 0 à 365.	[-]
r	Rayon de la bande pare-soleil	[m]
T	Rayonnement diffus total (valeur vraie)	[W/m²] ou [lux]
X	Partie du rayonnement diffus masquée par la bande	[W/m²] ou [lux]

Caractères grecques

δ	Déclinaison solaire	[rad] ou [°]
Φ	Latitude du lieu considéré	[rad] ou [°]
ω	Angle horaire	[rad] ou [°]
ω_{so}	Angle horaire au coucher du soleil (et lever)	[rad] ou [°]

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Table des matières générales

AVANT-PROPOS **3**

RESUME **9**

ABSTRACT **10**

NOMENCLATURE **13**

TABLE DES MATIERES GENERALES **19**

INTRODUCTION GENERALE **23**

1. L'HOMME ET LA LUMIERE 24
   - *1.1. Économie et Écologie : Éconologie* *25*
   - *1.2. Impact sur la physiologie humaine* *29*
   - *1.3. Introduction aux systèmes innovants passifs* *30*
2. STRUCTURE DE LA THESE 32

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES DGLT **33**

1. LES DGLT : DISPOSITIFS DE GUIDES LUMINEUX TUBULAIRES 35
   - *1.1. Généralités et terminologie* *35*
   - *1.2. Les DGLT par éléments constitutifs* *36*
2. LE CONDUIT DE LUMIERE REFLECHISSANT (*MIRRORED LIGHT PIPE*) 56
   - *2.1. Historique* *56*
   - *2.2. L'industrie du conduit réfléchissant* *59*
3. SYNTHESE DU CHAPITRE I 62

CHAPITRE II : ÉTAT DE L'ART SUR LA MODELISATION DES DGLT-R **63**

1. MODELISATION MATHEMATIQUE DES PERFORMANCES DES DGLT-R 65
   - *1.1. Approche semi-empirique* *65*
   - *1.2. Approche théorique : Fonction de transmission lumineuse* *78*
   - *1.3. Approche généralisée de la CIE* *88*
2. ÉTUDES NUMERIQUES ET EXPERIMENTALES EN LIEN AVEC NOS TRAVAUX 93
   - *2.1. Utilisation des conduits de lumière* *93*
   - *2.2. Utilisation des coudes* *93*
   - *2.3. Influence des paramètres géométriques et optiques du conduit* *95*
   - *2.4. Impact des paramètres (Ddiam, L, ρ_{LP})* *98*
   - *2.5. Influence de la couleur de la zone à éclairer* *98*
   - *2.6. Effet de la hauteur solaire et de l'indice de clarté du ciel* *99*
   - *2.7. Liaison entre spectre lumineux et couleurs de la lumière transmise* *99*
   - *2.8. Effet du diamètre et de la longueur du conduit* *100*
   - *2.9. Effet de la distance euclidienne D et de la hauteur verticale du diffuseur H* *100*
   - *2.10. Effet de la forme du diffuseur* *100*

2.11. Impact du type de surface diffusante ... *101*
2.12. Impact de l'angle d'incidence sur la réflectivité du conduit ... *101*
2.13. Impact de la position et de l'orientation du collecteur ... *103*
2.14. Impact du niveau d'éclairement extérieur ... *103*
2.15. Différentiation de l'éclairement direct et diffus ... *104*
2.16. Impact de la variabilité de l'ensemble des paramètres ... *104*
3. CONDITIONS DE VALIDITE DES MODELES SEMI-EMPIRIQUES ... 105
4. SYNTHESE DU CHAPITRE II ... 108

CHAPITRE III : ÉTUDE EXPERIMENTALE DU DGLT-R ... 109

1. GENERALITES SUR LE CLIMAT TROPICAL DE LA REUNION ... 111
1.1. Étude climatique succincte du gisement lumineux de la ville de Saint Pierre ... *112*
1.2. Objectifs généraux des expériences ... *113*
2. MISE EN PLACE D'UNE ETUDE EXPERIMENTALE PHOTOMETRIQUE ... 113
2.1. Description du support de l'expérience ... *113*
2.2. Démarche expérimentale ... *116*
2.3. Impact de l'environnement et des masques lointains ... *120*
2.4. Instrumentation utilisée ... *123*
2.5. SHADECO : un anneau d'ombrage « low-cost » pour les mesures de diffus ... *126*
2.6. Scénarios expérimentaux ... *146*
2.7. Cas de référence : conduit de lumière et parois noires ... *146*
2.8. Impact du coefficient de réflexion de la zone ... *156*
2.9. Disposition tropicale : impact du dôme paracyclonique ... *162*
3. SYNTHESE DU CHAPITRE III ... 165

CHAPITRE IV : DEVELOPPEMENT D'UN ENVIRONNEMENT DE MODELISATION DEDIE ... 167

1. MODELISATION DU COMPORTEMENT DU DGLT-R ... 169
1.1. Bilan général des approches de la littérature ... *169*
1.2. Proposition d'une forme générale de modèle ... *176*
2. LE CODE DE CALCUL HEMERA ... 182
2.1. L'environnement MATLAB ... *182*
2.2. Présentation structurelle ... *182*
2.3. Objectif du code de calcul : éclairagisme et optimisation ... *184*
2.4. Présentation fonctionnelle ... *186*
2.5. Optimisation par algorithme génétique ... *187*
3. MODELISATION EN ZONE TROPICALE HUMIDE : CAS DE LA REUNION ... 189
3.1. Critères de validité d'un modèle en photométrie ... *189*
3.2. Scénario expérimental de référence ... *190*
3.3. Procédure de détermination du modèle optimal ... *192*
3.4. Modèles tropicalisés ... *209*
3.5. Validation partielle du modèle tropicalisé ... *211*
4. INTEGRATION D'UN MODELE SIMPLIFIE POUR LA REFLEXION INTERNE ... 212
5. SYNTHESE DU CHAPITRE IV ... 214

CHAPITRE V : VALIDATION PHOTOMETRIQUE GLOBALE & APPLICATION 217

1. VALIDATION PHOTOMETRIQUE GLOBALE 219
   - *1.1. Démarche du groupe thématique PhyBÂT 219*
   - *1.2. Procédure de validation appliquée au conduit de lumière dans la littérature 220*
   - *1.3. Bilan sur la méthodologie à utiliser 222*
2. CODYRUN : INTEGRATION DU MODELE DANS UN ENVIRONNEMENT DEDIE 223
   - *2.1. Présentation de COde de calcul en régime DYnamique Réunion (CODYRUN) 223*
   - *2.2. Aspect multi-modèles de l'application 224*
3. VALIDATION COMPARATIVE INTERMODELE 232
   - *3.1. Modèles semi-empiriques comparables 232*
   - *3.2. Analyse comparative intermodèle 232*
4. VALIDATION COMPARATIVE EXPERIMENTALE 237
   - *4.1. Cas d'étude N°1 : parois verticales noires 237*
   - *4.2. Cas d'étude N°2 : parois verticales blanches 242*
   - *4.3. Synthèse de l'analyse comparative expérimentale 247*
5. VALIDATION COMPARATIVE INTERLOGICIELLE 248
   - *5.1. Recensement des codes de calcul concernés 248*
   - *5.2. Configuration des codes de calcul 252*
   - *5.3. Analyse comparative interlogicielle 254*
   - *5.4. Synthèse de l'analyse comparative interlogicielle 258*
6. NOUVEAU CONCEPT : LES COEFFICIENTS EMPIRIQUES CLIMATIQUES 259
7. APPLICATION : POTENTIEL ENERGETIQUE DES DGLT-R 261
8. SYNTHESE DU CHAPITRE V 265

CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVES 267

TABLE DES FIGURES 273

LISTE DES TABLEAUX 279

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 281

ANNEXES 293

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Introduction générale

« S'éclairer, c'est dissiper l'obscurité »

Marc La Toison

1. L'Homme et la Lumière

La lumière possède de nombreux objectifs. Le premier objectif est d'éclairer. L'Homme prend ainsi conscience de son environnement, lui offrant la sensation de contrôle engendrant le sentiment de sécurité. Il est également utilisé pour créer des ambiances, améliorant l'environnement architectural. La distinction entre « éclairer un espace » et « l'inonder de lumière » est nécessaire pour atteindre et comprendre le second objectif (Zissis 2006). Celui-ci consiste à apporter un confort et bien-être en conférant au milieu une ambiance propice à l'amélioration de ses performances. Ces deux fonctions ne dépendent que de l'utilisateur et de ses affinités. Ce but est en lien avec la nécessité du premier objectif : économiser sur l'action de s'éclairer. Les conséquences de ce dernier point vont au-delà de l'individu, mais à l'échelle de la planète : réduction des consommations électriques globales sur un poste de consommation inévitable, engendrant une baisse des émissions de gaz à effet de serre, responsables du changement climatique. Pour contribuer à atteindre ces objectifs, deux sources lumineuses, parmi d'autres, existent : l'éclairage artificiel et l'éclairement naturel. La Figure 1 présente ce modèle simplifié en associant les objectifs aux sources lumineuses.

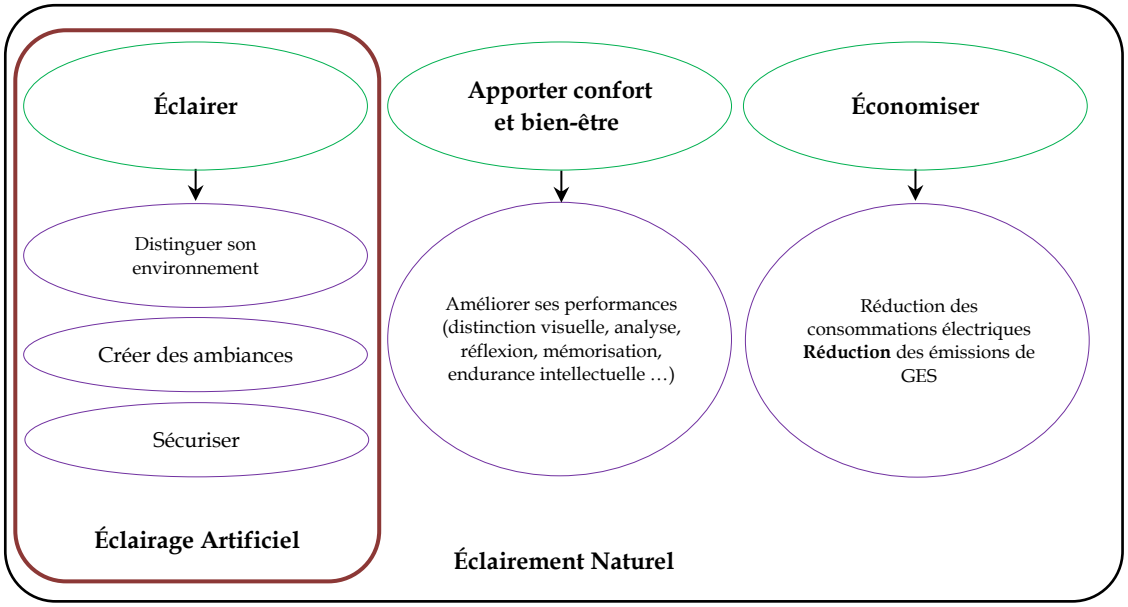


Figure 1 : Modèle simplifié de la distinction entre éclairage artificiel et éclairement naturel

La lumière naturelle est source de vie. Elle a été la source d'éclairement de nos aïeux, puis négligée au fils des années, les Hommes favorisant l'utilisation de l'éclairage artificiel. Soucieux de facilité, ils ont omis de considérer la sauvegarde énergétique et le confort apporté par la lumière du soleil. Rattrapé par les évènements et catastrophes naturelles, l'Homme a entrepris d'utiliser son bon sens pour créer une ambiance qui va améliorer son impact sur l'environnement, tout en considérant son confort et son sentiment de bien-être. La première partie de cette section s'intéresse à une analyse succincte des consommations liées à l'éclairage

artificiel, ciblant le potentiel de sauvegarde énergétique et d'émission de gaz à effet de serre de l'éclairement naturel. Souhaitant aller au-delà de la considération économique, la seconde partie de cette section tâche de mettre en avant les avantages considérables de l'utilisation de la ressource solaire sur la physiologie humaine. Liant éconologie et confort dans les bâtiments, des systèmes innovants utilisant les ressources naturelles voient le jour. La dernière section introduit ces dispositifs.

1.1. **Économie et Écologie : Éconologie**

L'éconologie est la contraction des mots économie et écologie. Faire de l'éconologie c'est donc essayer de faire coïncider l'économie personnelle et le respect de l'environnement. Plus généralement, c'est aussi faire la synergie entre l'intérêt particulier et l'intérêt collectif.

Le compromis éconologique en photométrie, qu'elle soit de source artificielle ou naturelle, consiste à étudier la nature de l'utilisation de l'éclairage et la potentialité de se passer ou de se limiter d'une ressource non naturelle. La question est d'établir les contextes dans lesquels nous devons trouver des solutions en fonction des urgences mondiales, nationales et locales.

1.1.1. Le contexte mondial et national

Le changement climatique est « sans équivoque » : les émissions de gaz à effet de serre (G.E.S.), provoquées par les activités humaines (industrie, transport, bâtiment, etc.) sont responsables de l'augmentation des températures depuis cent ans (+0,74 °C). De 1990 à 2010, les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté de près de 232 %, dont 51 % pour le plus important d'entre eux : le dioxyde de carbone (CO_2) (World Bank Group 2014). Même si en France, la courbe d'émission du CO_2 a tendance à s'infléchir (-9,5 % de 1990 à 2010), d'autres gaz à effet de serre ne cessent de croître (119 % sur la même période pour les G.E.S. hors dioxyde de carbone, méthane ou le protoxyde d'azote). En 2011, la consommation électrique moyenne annuelle mondiale par habitant était de 3045 kWh/habitant. La France consomme 2,4 fois plus avec une consommation annuelle de 7292 kWh/habitant.

Les récentes études sur le sujet montrent qu'un changement majeur dans les mentalités doit être opéré pour infléchir la tendance au réchauffement climatique global, qui ne pourra, de toute façon, totalement s'inverser. Nous sommes donc dans un processus déjà enclenché et qu'il faut impérativement freiner, par des actions généralisées et une démarche forte de développement durable. À l'échelle mondiale, cette volonté pérenne s'appuie sur l'ensemble des réflexions et études des hautes instances visant à la gestion globale des ressources énergétiques mondiales. En France, cette initiative s'est traduite par le Grenelle de l'Environnement, qui se concrétise par des actions opérationnelles. Dans le cadre de cette maîtrise de l'énergie, il est nécessaire de recourir à des solutions alternatives dont le fonctionnement a un impact limité sur l'environnement.

La situation française est proche du cas général. Au cours des trente dernières années, la consommation finale du secteur du bâtiment a augmenté de plus de 20%. Le bâtiment représente 43% de l'énergie finale consommée, devant les transports (31%), l'industrie (23%) et l'agriculture (3%). Il est responsable de 42% des émissions annuelles de CO_2, et 20% des émissions de gaz à effet de serre. Il constitue un secteur clé de la lutte contre le changement climatique.

Le secteur tertiaire[1] représente le 1/3 des consommations du secteur résidentiel-tertiaire. Le secteur résidentiel représente les 2/3 de la consommation du secteur résidentiel-tertiaire. Le parc se compose de 30 millions de logements avec un taux de renouvellement de 1 % par an. Malgré les évolutions récentes du parc, les consommations énergétiques augmentent malgré des réglementations thermiques plus exigeantes (Detrie 2007).

Le parc d'éclairage français fait figure de mauvais élève comparé à ceux d'autres pays européens et la France accuse un certain retard dans la qualité de l'éclairage tertiaire ou résidentiel en termes de performance énergétique, confort visuel ou santé au travail.

Dans le résidentiel, les deux principaux pôles de consommation sont le chauffage, qui reste en tête des consommations d'électricité des ménages, suivi par l'éclairage artificiel qui, à l'échelle européenne, occupe le premier poste dans le tertiaire (26 %). En France, ce dernier atteint 12 à 15 % du budget électricité, soit une consommation annuelle moyenne de 470 kWh/an/logement.

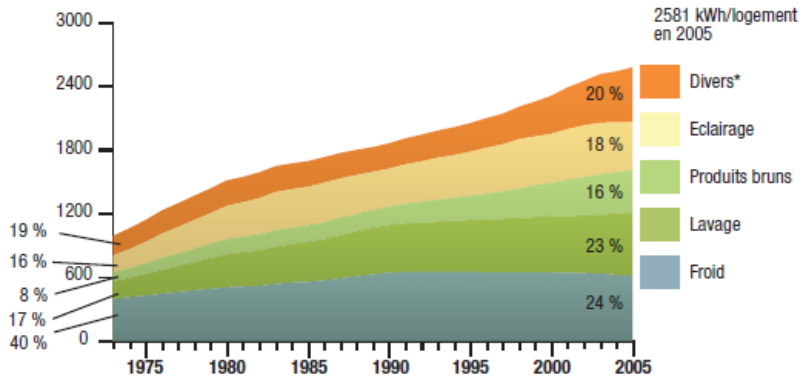


Figure 2 : Consommation d'électricité spécifique par usage dans le résidentiel (source : ADEME)

Le secteur tertiaire offre le même constat. Les bureaux, administrations et commerces sont en têtes des pôles consommateurs. Le chauffage reste l'usage le plus consommateur du secteur tertiaire, avec 51 % de la consommation totale en 2007.

La consommation d'électricité spécifique (éclairage, informatique, électroménager…) est le second poste de consommation d'énergie du secteur tertiaire, représentant 23 % de la consommation en 2007, et évolue de manière plus importante que le parc.

[1] Secteur qui produit des services (a contrario du secteur primaire et secondaire, respectivement liés à l'exploitation de ressources naturelles, et à la transformation des matières premières issues du secteur primaire)

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Une part substantielle de l'électricité est consommée par l'éclairage artificiel.

Des études sur les consommations d'immobilier du secteur tertiaire montrent l'impact de l'éclairage dans le bilan des consommations : 7 % dans les écoles, 10 % dans les bâtiments socioculturels, 11 % dans les équipements sportifs et 28 % dans les bureaux (AITF 2005). Ces bâtiments sont utilisés pendant la journée, alors que l'éclairement disponible à l'extérieur s'élève couramment à plus de 30 fois celui qui est requis à l'intérieur, même lorsque le ciel est couvert.

C'est à plus de 30 milliards que s'élève le nombre de lampes électriques fonctionnant chaque jour sur Terre, ce qui ne donne pas moins qu'un ratio de 4 lampes par habitant. Zissis (Zissis 2006) précise dans sa publication que l'éclairage artificiel est la seule invention visible depuis l'espace.

1.1.2. Le contexte local

L'île de La Réunion n'échappe pas au contexte énergétique mondial et doit dans le domaine environnemental se montrer exemplaire.

Sur les trente dernières années, le développement économique et démographique de l'île de La Réunion s'est accompagné d'une croissance soutenue des consommations d'énergie (3310 kWh/an/habitant en 2014). En 2006, selon l'INSEE, cette croissance à La Réunion a généré, par ses effets multiplicateurs, une augmentation de la consommation énergétique des ménages de l'ordre de 250 % entre 1980 et 2005. Cette évolution a été encore plus marquée pour l'électricité puisque, sur la même période, la demande pour cette forme d'énergie a quadruplé.

Cette énergie électrique est très polluante de par la constitution de son parc de production électrique particulièrement axé sur les énergies fossiles. Le coefficient de conversion est de 766 g de CO_2 pour un kWh électrique produit (2014). En France métropolitaine, ce coefficient de conversion est de 83 g. La contribution des ENR[2] (principalement Hydroélectricité et Bagasse, puis dans une moindre mesure le Photovoltaïque) reste toutefois importante avec plus de 33 % de l'électricité produite en 2014.

À La Réunion, le secteur du bâtiment, à lui seul, représente plus de 85 % de l'énergie électrique consommée avec un impact très significatif dans les rejets de CO_2. La maitrise de l'énergie et l'amélioration du confort sont donc des enjeux importants pour les concepteurs actuels.

Le secteur résidentiel est responsable de près de 45 % des consommations électriques, contre 39 % pour le tertiaire et 16 % pour les industries et l'agriculture.

En se focalisant sur cette problématique, un des éléments majeurs responsables de cette surconsommation énergétique peut être ciblé : l'éclairage artificiel.

[2] Énergies Nouvelles et Renouvelables

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Par exemple, selon l'OER[3], les petits commerces détiennent une consommation en éclairage de l'ordre de 48 % de leur consommation totale, soit près de 9252 kWh/an/commerce. L'équipement d'éclairage est souvent pointé du doigt : utilisation principale des néons et des halogènes.

En 2010, même constat pour les ménages réunionnais : l'ARER[4] publie un rapport indiquant la répartition des puissances électriques moyennes installées: pas moins de 57 % des installations utilisent des lampes à incandescence contre 28 % pour les lampes basses consommations (ARER 2010).

Une bonne gestion de la lumière naturelle dans la journée pourrait assurer des économies d'énergie, tout en privilégiant le confort visuel intérieur. Les nombreux problèmes rencontrés en architecture et la complexité du comportement de la lumière naturelle conduisent les concepteurs de bâtiments à privilégier l'éclairage artificiel au profit de l'éclairement naturel. Cependant, son utilisation judicieuse est un atout majeur pour développer les qualités architecturales, énergétiques et environnementales d'un bâtiment.

1.1.3. 2015 : année internationale de la Lumière

Figure 3 : Année Internationale de la Lumière et des Techniques utilisant la Lumière

L'année de soutenance de cette thèse est également « l'Année Internationale de la Lumière et des Techniques utilisant la Lumière » (AL2015). Cette proclamation a été faite par l'ONU[5] lors de la 68e session de sa Conférence générale. En proclamant une Année Internationale dédiée à la lumière ainsi qu'à ses applications, l'ONU reconnaît l'importance de sensibiliser la population à la capacité des techniques utilisant la lumière à contribuer au développement durable et à apporter des solutions aux grands défis contemporains tels que l'énergie, l'éducation, l'agriculture et la santé.

De nombreuses institutions scientifiques, l'UNESCO, et le CNOP[6] en France assurent la coordination et l'animation de l'Année internationale de la Lumière.

[3] Observatoire Énergie de La Réunion
[4] Agence Régionale Énergie Réunion
[5] Organisation internationale des Nations Unies
[6] Comité National d'Optique et de Photonique

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

La volonté internationale de mettre au-devant de la scène l'impact de la lumière et ses techniques révèle la considération de son impact sur l'Homme et sur la sauvegarde énergétique.

Nos travaux de recherche ont été labellisés en Août 2015 par le Comité National en charge de la coordination de ces événements, offrant une visibilité internationale à notre contribution scientifique.

1.2. **Impact sur la physiologie humaine**

Il est nécessaire de se rappeler que la clé du confort visuel et du bien-être, se base sur l'utilisation d'une ressource naturelle : la lumière naturelle. Pas moins de 80 % des informations que capture le cerveau humain lui sont transmises par la voie optique (Ziorjen 2000).

Sans une ressource lumineuse « propre », comment imaginer un résultat positif sur l'Homme ?

En 1999, Loisos (Loisos 1999; Heschong 2002) publie une étude sur la relation entre éclairement naturel et performance humaine. Pour ce faire, il étudie les performances de jeunes étudiants pour trois écoles (Californie, Washington, Colorado).

Les constats suivants ont été faits.

Les étudiants qui étaient les plus exposés à la lumière naturelle ont amélioré, respectivement, leur vitesse calculatoire et de lecture de 20 % et 26 %. Plus précisément, les étudiants ayant bénéficié d'un apport de lumière plus important, du fait d'une fenêtre de grande taille, ont amélioré leur rapidité de calcul en mathématiques de 15 % et de 23 % en lecture.

Les étudiants ayant reçu un éclairage zénithal ont amélioré leurs performances de 19 à 20 % par rapport à ceux soumis à de l'éclairage artificiel.

Les étudiants étant dans une salle dont les fenêtres peuvent s'ouvrir progressent de 7 à 8 % plus vite que les étudiants dans une salle aux fenêtres ne pouvant être ouvertes.

Globalement, l'auteur décrit les améliorations engendrées par l'utilisation de la lumière du jour :

- Amélioration de la visibilité due à l'amélioration de la qualité de la lumière ;
- Amélioration de la distribution lumineuse ;
- Amélioration du rendu des couleurs ;
- Absence d'effet stroboscopique (vacillement ou scintillement) ;
- Amélioration sanitaire ;
- Augmentation la production de vitamine D ;
- Bon traitement pour les désordres affectifs saisonniers ;
- Régulation du rythme circadien ;
- Réduction la production de mélatonine, améliore la vigilance ;
- Amélioration de l'humeur et du comportement social.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Il est évident que la lumière naturelle améliore les performances de l'intelligence telles que les facultés de perception et de réflexion (Ziorjen 2000).

D'autres études ont montré la façon dont l'œil perçoit la longueur spectrale de l'onde perçue par l'œil (IES 2000). Cet effet n'est pas plus accentué pour les performances liées à la vision (détection visuelle des objets) mais l'est pour les performances visuelles liées à la recherche. Il y a quelques doutes sur l'impact de ce paramètre sur les performances de réalisation d'une tâche. La longueur d'onde spectrale n'agirait principalement que sur la recherche visuelle liée à la détection de couleur. En effet, la couleur est l'une des dimensions sur laquelle la cible diffère d'autres objets qui l'entourent. En ce sens, la teneur spectrale de la source change le stimulus du système visuel. Ce constat met une nouvelle fois le doigt sur les problèmes pouvant être issus de l'utilisation de sources monochromatiques artificielles. Cette approche succincte montre que la part économique n'est qu'une partie des avantages liés à l'utilisation de la lumière naturelle.

À l'époque, la climatisation était la solution à utiliser pour améliorer le confort thermique. On se rend compte à présent des effets néfastes de ce procédé, et l'on privilégie la ventilation naturelle. Suivant la même logique, l'éclairage artificiel économique n'offre que l'avantage de limiter les consommations. Par le biais des systèmes innovants passifs, nous assurons la suppression des consommations en journée, et garantissons le bien-être plus connu sous le nom du confort visuel.

1.3. **Introduction aux systèmes innovants passifs**

La ressource solaire peut être intégrée dans le projet de construction suivant différentes formes, toutes plus ou moins innovantes. Nous introduisons l'appellation française du TDGS (*Tubular Daylight Guidance System)* : les Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires (DGLT). Les DGLT font partie de cette nouvelle génération de systèmes. Au même titre que d'autres procédés innovants, ils ont pour objectif d'harmoniser l'éclairement naturel au sein d'un environnement entouré par des parois opaques (Todorovic and Kim 2012).

Ce sont des dispositifs zénithaux ou latéraux qui transportent toute la lumière que l'on peut obtenir de la luminosité du ciel pendant les jours sereins ou avec pluie et ciel couvert, en hiver comme en été, de l'aube au coucher de soleil, dans tous les milieux de construction peu éclairés par des fenêtres normales, ou totalement sombres parce qu'ils ne communiquent pas avec l'extérieur (salle de bain, sanitaires, couloir, pièces dépourvues d'ouverture, hall d'entrée, coursive intérieure des logements collectifs, supermarché, gymnase, etc.). Ils sont en général requis lorsque la zone à éclairer est à plus de dix mètres des ouvertures en façades, ou lorsqu'elle ne possède aucune ouverture vers l'extérieur (Hansen 2006). D'autres auteurs parlent même d'une possibilité de transport allant jusqu'à une longueur équivalente à 14 étages quand les configurations sont propices à l'utilisation de ces procédés (Mayhoub 2014).

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

La mise en place d'un tel système permet de se passer de l'éclairage artificiel en journée dans toutes les pièces équipées, pour ainsi atteindre une autonomie en éclairage en journée. Cette économie d'énergie générée s'associerait à une économie d'énergie en climatiseur durant l'été, de par la réduction des charges internes (luminaire) produisant une source de chaleur non négligeable. Ils assurent également de s'affranchir des problèmes liés à l'éclairement direct naturel des ouvertures latérales ou zénithales courantes (éblouissement, tache solaire, etc.) en apportant une lumière principalement diffuse (selon le diffuseur utilisé).

Le principe général est de collecter, concentrer et dévier la lumière du soleil à l'aide d'un dispositif placé en toiture (ou en façade). Celle-ci est ensuite acheminée à travers un tube, puis diffusée au sein du local à l'aide d'un diffuseur, dont les propriétés varient en fonction des constructeurs. Le processus s'effectue une faible transmission de chaleur (liée notamment à la faible émissivité du matériau à l'intérieur du tube), tout en réduisant au minimum la perte de lumière (Šikula, Mohelníková, and Plášek 2013; CSTB 2011).

Comparé à une lucarne ou une fenêtre, le conduit de lumière offre de meilleures propriétés d'isolation thermique et une plus grande flexibilité d'utilisation au sein d'un bâtiment, mais un contact visuel réduit, voire inexistant, avec l'environnement extérieur (Kim and Kim 2010). Cependant, Mohelnikova conclut dans sa publication que les dispositifs de guide lumineux ne peuvent se substituer totalement à un système d'éclairement traditionnel (fenêtre, lucarne), mais peuvent offrir une bonne solution complémentaire pour des espaces non dédiés à des tâches visuelles (hall, escalier, espaces publics, etc.) ou d'éclairement principal dans des zones dépourvues d'ouverture (Mohelnikova 2008).

Ainsi, en fonction de la configuration et des exigences en niveau d'éclairage, plusieurs procédés de conduit de lumière existent.

Il importe de noter que, si ces dispositifs sont très facilement intégrables sous toiture, ils le sont aussi dans le cadre de logements collectifs/privés, ou établissements divers. Ces dispositifs sont d'ores et déjà présents sur le marché à La Réunion, sans pour autant que leur performance ait fait l'objet d'études locales. La forme commerciale disponible est le conduit de lumière aux parois hautement réfléchissantes, dont l'étude générale est amorcée au chapitre I.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2. Structure de la thèse

Les travaux de recherches menées depuis 2012 sont décomposés selon quatre axes. Le premier, consiste à faire un état de l'art sur les différentes études qui ont été menées tant sur le plan national qu'international. Il s'agit d'analyser les limites des approches, et de tirer des conclusions sur les difficultés rencontrées et les solutions associées. Cet axe fixe l'état des connaissances sur la prédiction du comportement des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires appliqués au Bâtiment, et est présenté en chapitre I et II. Il est le support de notre travail.

Galilée organisait son raisonnement scientifique suivant une cohérence chronologique éprouvée dans la communauté scientifique : « Observer, mesurer, modéliser et vérifier ». Dans ce cadre, et pour faire suite à la synthèse bibliographique, le second axe permettra de faire le choix sur l'expérimentation à mener afin d'être en concordance avec la théorie. Il présentera également le processus expérimental utilisé pour mesurer les performances du procédé et les résultats associés. Nous présenterons également les outils expérimentaux développés et les études parallèles associées. Les résultats fixeront le cadre de l'axe suivant. Le chapitre III s'attèle à décrire cet axe.

Le troisième axe est la concrétisation des deux premiers : il s'agit de présenter l'environnement numérique de modélisation photométrique développé pour les besoins des travaux. Celui-ci, présenté en chapitre IV, permettra de répondre aux limites énoncées dans le premier axe. Une nouvelle forme de modèle sera présentée, et adaptée aux conditions géométriques, optiques et climatiques de notre étude.

Le quatrième axe consistera à éprouver le modèle semi-empirique qui a été obtenu en le confrontant plusieurs références. Pour y arriver, nous appliquerons les différentes étapes de la méthodologie de validation globale adoptée au sein du laboratoire, exposées au chapitre V. Nous achèverons ce dernier chapitre sur une application permettant de mieux cerner l'impact énergétique du conduit de lumière installé dans un bâtiment.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Généralités sur les **DGLT**

« Qui, de nous ou de la lumière, connaît le mieux la géométrie ? »

G. Lochak

Résumé du Chapitre **I**

Les Dispositifs de Guide Lumineux Tubulaires, D.G.L.T., appellation française des T.D.G.S., « *Tubular Daylight Guidance System* », sont des procédés d'éclairement naturel innovants basés sur le transport de la lumière.

Ce chapitre présente une perspective étendue des différents DGLT étudiés depuis près de trente ans, et se concentre ensuite sur notre objet d'étude, les DGLT-R. Ces dispositifs, plus connus sous le nom de conduit de lumière réfléchissant, sont les plus commercialisés et étudiés à l'échelle internationale. Ils feront l'objet des travaux de recherche initiés et présentés dans ce manuscrit.

1. Les DGLT : Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires

Cette étude bibliographique débute en présentant les généralités relevées dans la littérature. Afin de saisir la diversité technologique du dispositif, nous exposerons les différents types de procédé. Orientés par un choix stratégique liant adaptabilité au climat, faisabilité technique et commerciale et notoriété, nous nous focaliserons sur les conduits de lumière réfléchissants (DGLT-R).

1.1. **Généralités et terminologie**

Les dispositifs de transport de lumière naturelle collectent et transportent la lumière sur de longues distances au sein d'un bâtiment et sont généralement appelés conduit de lumière ou guide de lumière. Ils ont l'avantage d'offrir une efficacité accrue dans les bâtiments dont l'apport de lumière est nécessaire pour des raisons de santé, d'économie ou d'améliorations architecturales. En 1990, les DGLT sont jugés par Littlefair comme étant la technologie la plus innovante en éclairement naturel (Littlefair 1990).

Dans la littérature, nous retrouvons de nombreuses appellations pour ces systèmes. Voici un listing non exhaustif des dénominations françaises et anglaises :

Dénominations françaises au sein de la littérature :

- Conduit de lumière ;
- Canon de lumière ;
- Cheminée lumineuse ;
- Fenêtre de toit.

Dénominations anglaises au sein de la littérature (Kim and Kim 2010) :

- *Light pipe;*
- *Light tube;*
- *Light guide;*
- *Sun pipes;*
- *Solar pipes;*
- *Solar light pipes;*
- *Daylight pipes;*
- *Tubular skylight;*
- *Sun scoop;*
- *Tubular daylighting device.*

1.2. **Les DGLT par éléments constitutifs**

Ces systèmes de transport sont généralement composés de trois éléments :

- Collecteur en tête de conduit : traque la course du soleil pour récupérer le maximum de lumière, ou simplement, redirige la lumière vers l'intérieur du conduit ;
- Conduit : transporte la lumière naturelle vers la zone à éclairer avec une technique de transport dépendant des propriétés optiques de son matériau (lentilles, conduit MLP, conduit prismatique, système à noyau solide. Celui-ci peut contenir des coudes influençant naturellement les performances de certains conduits ;
- Diffuseur en sortie de conduit : distribue uniformément la lumière du conduit au sein de la pièce à éclairer, ou tout au long du tube.

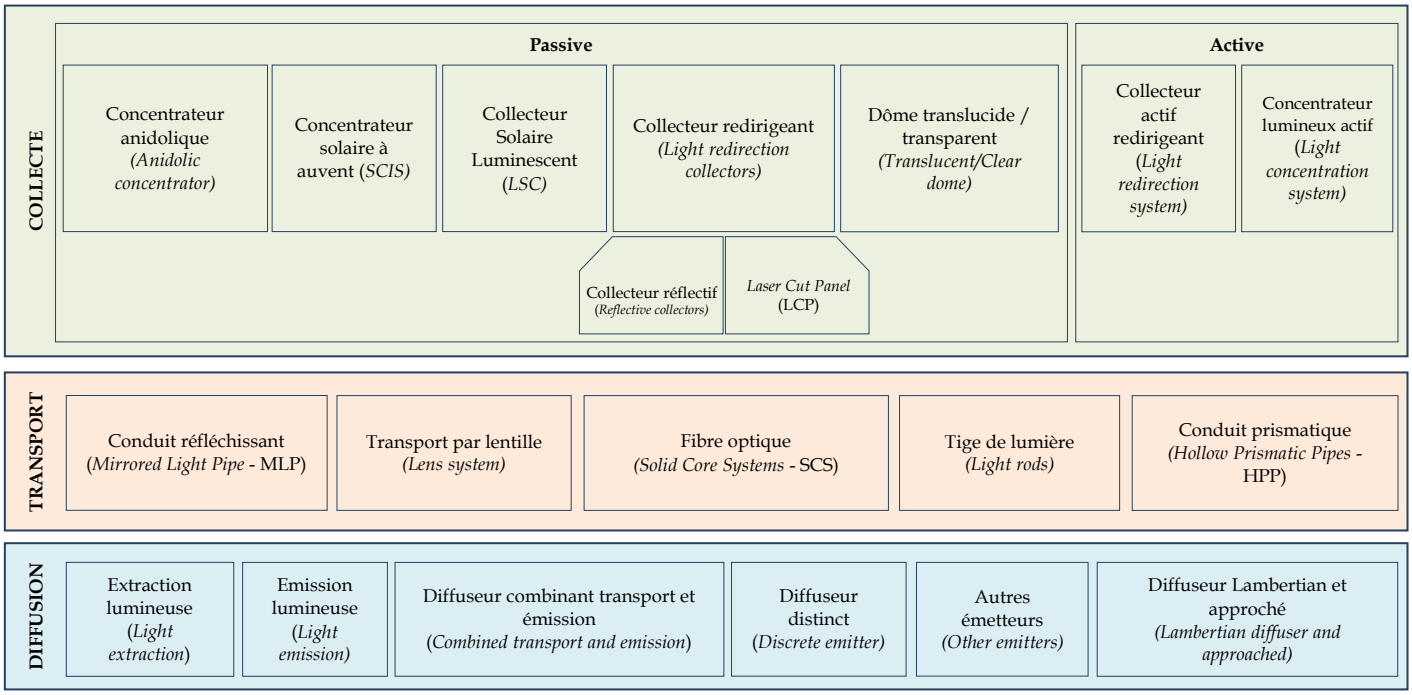


Figure 4 : Synthèse des procédés de collecte, de transport et d'émission

1.2.1. Les Collecteurs

Les systèmes de collecte de la lumière sont des procédés utilisant les propriétés réfractives ou réflectives des matériaux les composant et peuvent être passifs ou actifs. Les procédés actifs, également appelés traqueur solaire, sont onéreux, mais très efficaces. Ils ont l'inconvénient de nécessiter une maintenance régulière. Ils peuvent toutefois contenir un concentrateur. Les dispositifs passifs sont moins chers, mais offrent également une efficacité moindre.

Pour ce recensement, nous distinguerons deux types de collecteur permettant d'acheminer la lumière naturelle au sein du conduit : les systèmes actifs et les systèmes passifs.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

1.2.1.1. Les collecteurs passifs

Parmi les collecteurs passifs, nous recensons les collecteurs ne possédant aucune partie mobile. Ces dispositifs ont une seule orientation. Ils sont fixés dès l'installation du conduit de lumière en fonction du meilleur rendement. Ces collecteurs imposent d'avoir une large surface de collecte (et ainsi, un conduit de taille correspondante) pour atteindre des performances acceptables, comparables aux collecteurs actifs.

La simplicité du procédé lui permet d'être peu couteux, néanmoins, très visible de par sa taille, celui-ci peut engendrer des effets négatifs sur l'architecture du bâtiment.

Quatre types de collecteurs passifs existent :

- Concentrateurs anidoliques ;
- Collecteur Solaire Luminescent (*Luminescent Solar Contractors* - LSC) ;
- Collecteur redirigeant (*Light redirection collectors*) ;
- Dôme translucide.

1.2.1.1.1. Concentrateurs anidoliques

Les concentrateurs anidoliques sont des dispositifs placés en façade, couplés à des conduits horizontaux (Figure 5). Ces systèmes sont un composé de concentrateurs paraboliques utilisés pour collecter la lumière à l'entrée du dispositif pour la concentrer vers une plus petite ouverture. Ce sont des étagères de lumières particulières qui utilisent des réflecteurs spéculaires courbes, conçus pour profiter de la lumière diffuse du ciel. L'éblouissement potentiel provenant du rayonnement solaire direct doit être contrôlé par une protection solaire mobile à l'entrée du système anidolique.

L'avantage de ce système est lié à ses performances très élevées en ciel couvert ou clair. Cependant, la taille du collecteur en façade en fait un système architecturalement difficile à intégrer.

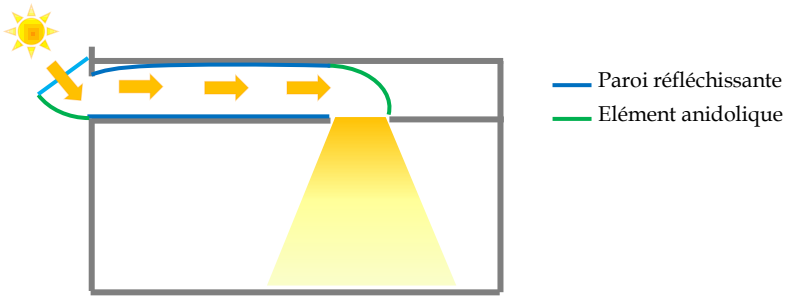


Figure 5 : Plafond anidolique

La technologie de concentrateur anidolique continue à être étudiée (Figure 6). En 2014, Taengchum propose d'associer la technologie de collecte du concentrateur anidolique à un conduit de lumière circulaire (Taengchum et al. 2014).

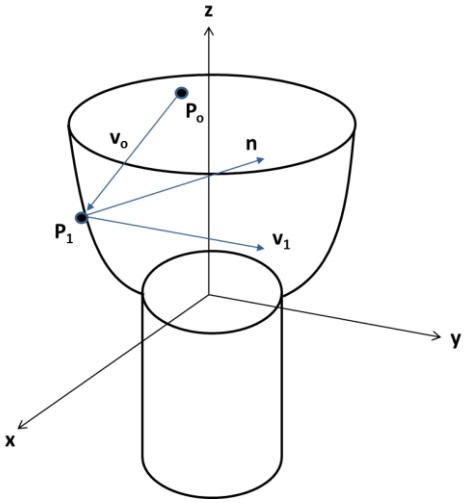


Figure 6 : Concentrateur anidolique couplé à un conduit circulaire (Taengchum et al. 2014)

1.2.1.2. Concentrateur solaire à auvent - *Solar Canopy Illumination System (SCIS)*

En 2008, Rosemann et al. proposent et évaluent les performances d'un dispositif de collecte utilisant des lames orientables réfléchissantes (Figure 7). Le dispositif est appelé *Solar Canopy Illumination System (*SCIS) et est directement fixé au-dessus de la fenêtre en façade. Le dispositif intègre également un éclairage artificiel offrant un complément de lumière si nécessaire (Rosemann, Mossman, and Whitehead 2008).

Figure 7 : Solar Canopy Illumination System (Rosemann, Mossman, and Whitehead 2008)

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

1.2.1.2.1. Collecteur Solaire Luminescent (*Luminescent Solar Contractors* - LSC)

Le LSC est un autre procédé conçu pour concentrer la lumière. Ce système est composé d'une plaque mince composée d'un matériau hautement transparent (Polyméthacrylate de méthyle – PMMA), qui est dopé avec des colorants fluorescents (Figure 8). Les molécules de colorant absorbent une partie du rayonnement solaire incident sur la plaque et réémettent un rayonnement fluorescent qui est transporté vers les bords de la plaque par réflexion interne.

À l'aide de filtres de couleurs, on peut obtenir une lumière blanche. L'avantage de ce procédé est que l'absorption de la lumière incidente ne dépend pas de la hauteur solaire. Le système peut opérer à n'importe quel angle d'incidence. De plus, il offre l'avantage de concentrer la partie diffuse de la lumière aussi bien que la partie directe. Cependant, la principale limitation du LSC réside dans sa faible efficacité lumineuse avec moins de 10 % de la lumière incidente en sortie. De plus, la dégradation prématurée des colorants (particulièrement bleu et violet) par les rayons U.V. et l'inefficacité des colorants à transporter la lumière en font un système quelque peu limité dans l'utilisation.

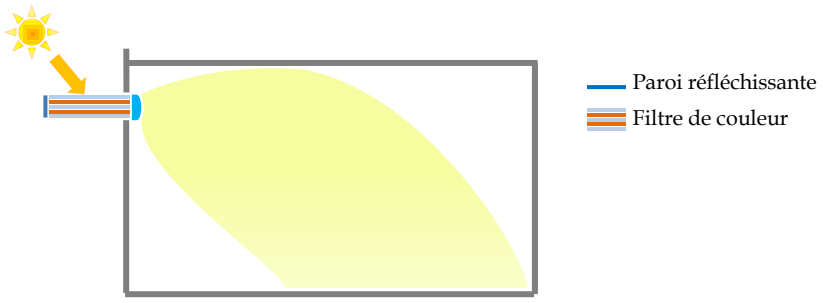


Figure 8 : ***Luminescent Solar Contractors (LSC)***

1.2.1.2.2. Collecteur redirigeant (*Light redirection collectors*)

1.2.1.2.2.1. Collecteur réflectif

Les collecteurs réflectifs sont conçus à l'aide de matériaux hautement réfléchissants plats ou incurvés pour rediriger le maximum d'éclairement vers l'ouverture du conduit de lumière. Ce procédé ne concentre pas la lumière, il optimise l'apport lumineux. Ce type de collecteur offre une solution idéale pour pallier la présence de masque proche de l'ouverture du conduit.

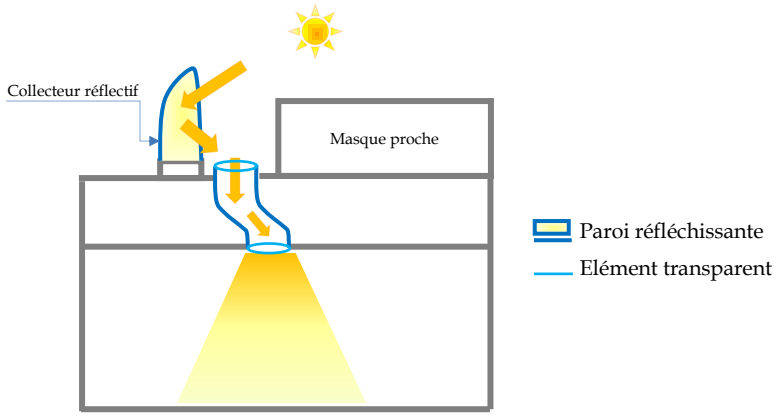


Figure 9 : Collecteur réflectif

En 2007, Duc Hien et Chirarattananon proposent un nouveau dispositif de conduit de lumière basé sur l'utilisation de miroirs pour concentrer et orienter la lumière collectée (Figure 10). Ce procédé innovant fait partie de la famille des collecteurs réflectifs. Les auteurs utilisent un dispositif expérimental et modélisent les performances de leur système en prenant en compte les apports de chaleur engendrés (Duc Hien and Chirarattananon 2007).

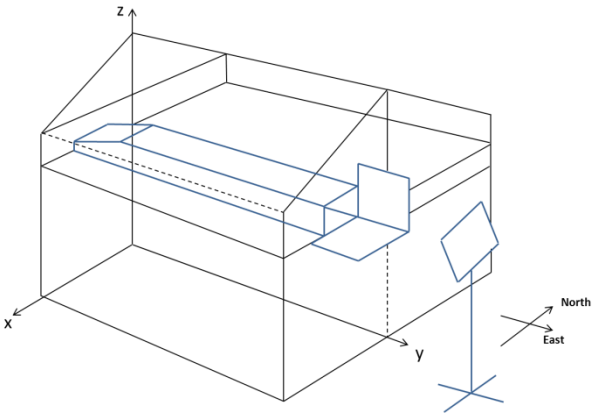


Figure 10 : Dispositif de Duc Hien et Chirarattananon (Duc Hien and Chirarattananon 2007)

En 2009, Duc Hien (Hien and Chirarattananon 2009) présente des résultats plus approfondis sur l'étude expérimentale de leur dispositif de guide de lumière. En complément, il utilise une étude basée sur le lancer de rayon pour évaluer la transmission de la lumière du procédé. Il conclut sur son étude expérimentale et numérique en indiquant que le système apporte un éclairement suffisant pour les zones éloignées des ouvertures latérales pour des conditions de ciel clair et couvert.

1.2.1.2.2.2. Laser Cut Panel (LCP)

Le *Laser Cut Panel* est un système redirigeant la lumière à l'aide de coupures réalisées par un laser dans un matériau acrylique (Figure 11). Ces panneaux assurent une bonne visibilité vers l'extérieur. Placés verticalement, ils réduisent l'apport lumineux pour des rayons ayant des angles

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

d'incidence élevés (> 30°, en pleine journée) et collectent les rayons lumineux de faibles incidences (matin et soir). Placés horizontalement, ils agissent en tant que protection solaire. Ils peuvent être employés comme système fixe ou mobile. Pour éviter certains risques d'éblouissement, il faut qu'ils soient situés au-dessus du niveau visuel. Le *Laser Cut Panel* est un produit onéreux, limitant son utilisation.

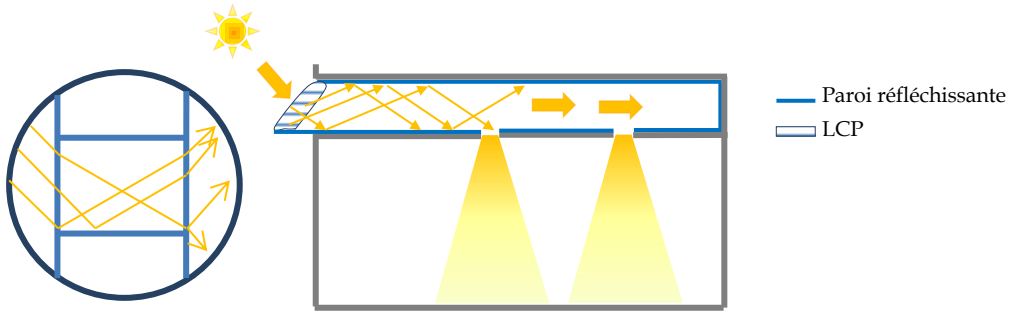


Figure 11 : *Laser Cut Panels* (LCP)

En 1995, Edmonds et Moore (Edmonds et al. 1995) proposèrent une première étude sur les LCP. Ils établirent des expressions théoriques de la transmission lumineuse pour un conduit simple et pour un conduit équipé d'un LCP. Ces expressions furent comparées et validées par une expérimentation sur un conduit de lumière commercial. Ils en déduisent que le conduit de lumière équipé de lames déflectrices est plus efficace pour les cas d'utilisation en bâtiment multi-étage.

En 1996, Edmonds et al. fournirent une seconde étude sur les LCP en tant qu'ouverture zénithale, mettant en avant la capacité du dispositif à rejeter les rayons lumineux pour des hauteurs solaires élevées, et, au contraire, laisser pénétrer les rayons de faibles hauteurs solaires. (Edmonds, Jardine, and Rutledge 1996).

En 1997, Edmonds et al. décrivirent le développement d'un dispositif pour l'extraction et la distribution de la lumière provenant d'une source lumineuse distante basé sur la technologie LCP. Les auteurs développèrent une théorie pour l'extracteur et le diffuseur conçu, associé à un conduit de lumière rectangulaire et horizontal. (Edmonds, Reppel, and Jardine 1997)

En 2009, Garcia Hansen évalue et compare les performances de deux type de collecteur (passif et actif, voir Figure 12) couplés à un conduit de lumière réfléchissant (Garcia Hansen, Edmonds, and Bell 2009). Le système actif correspond à un LCP incliné et rotatif (rotation de 360° en 24h). Le système passif consiste à utiliser le LCP en forme pyramidale. Les résultats montrent que le système passif LCP améliore de 2,5 fois les performances du conduit réfléchissant, tandis que le procédé actif augmente de 5 fois ses performances, lorsqu'ils sont comparés à un dispositif ouvert (sans collecteur) pour des hauteurs solaires faibles. Quelques années auparavant (Garcia Hansen and Edmonds 2003) avait démontré que le dispositif LCP assurait un niveau d'éclairement requis

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

dans des conditions météorologiques ensoleillées avec un rendement global de près de 32% (rapport entre le flux lumineux entrant et sortant). En condition de ciel couvert, ces performances étaient moindres (18%).

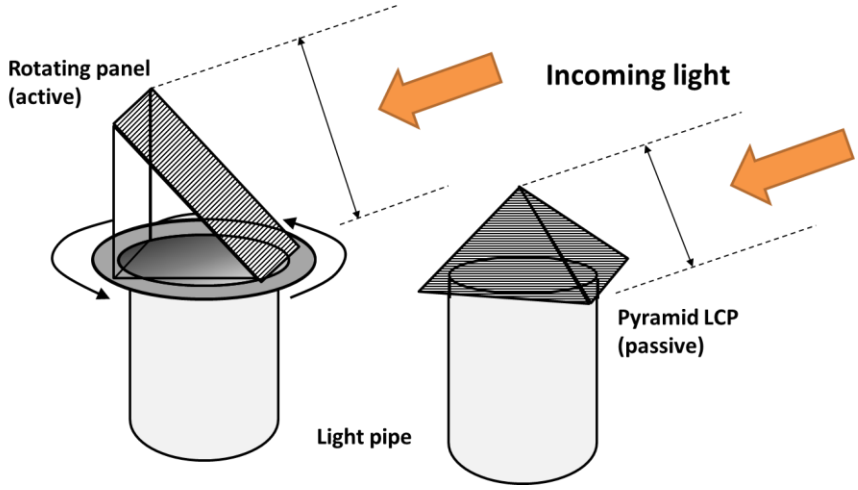


Figure 12 : Collecteurs LCP étudiés par Hansen (Garcia Hansen, Edmonds, and Bell 2009)

Depuis, la technologie continue à être étudiée et développée (Nair, Ganesan, and Ramamurthy 2014).

En 2015, le fabricant SOLATUBE® a présenté une nouvelle gamme de collecteurs passifs redirigeant nommés SkyVault®, s'apparentant au LCP (Figure 13). C'est un collecteur cylindrique en polycarbonate contenant des prismes permettant de réorienter la lumière de 10° à 25° et utilisant des déflecteurs pour les rayons de faible incidence. Le fabricant annonce que le dispositif assure une efficacité trois fois plus importante qu'un collecteur à dôme classique.

Figure 13 : Collecteur Skyvault de SOLATUBE® (www.solatube.com)

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

1.2.1.2.3. Dôme translucide/transparent

Cette technologie de collecte est la plus utilisée, commercialisée et étudiée. Le collecteur a une forme générale de dôme conçu d'un matériau hautement transparent (Polyméthacrylate de méthyle – PMMA). Certains fabricants l'équipent de stries jouant un rôle de prisme permettant d'optimiser la collecte de la lumière, ou de lentille de Fresnel (Figure 14).

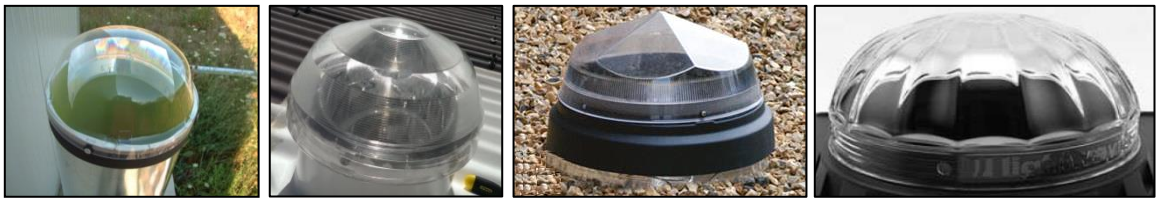


Figure 14 : Différentes formes de dôme

Ce système peut être également équipé de déflecteurs de différente forme en matériau hautement réfléchissant offrant des performances accrues pour les rayons lumineux de faibles incidences. Ils peuvent également contenir des technologies diverses de concentration de la lumière comme des LCP (*Laser Cut Panels*) (Edmonds et al. 1995).

1.2.1.3. Les collecteurs actifs

Ces collecteurs utilisent un système actif permettant de suivre la course solaire en orientant le collecteur suivant la direction du soleil. L'avantage principal de ce type de collecteur est qu'il peut collecter le maximum de lumière disponible à tout moment de la journée sans pour autant bénéficier d'une section de conduit importante. Cependant, ce type de produit reste coûteux dû au fait qu'il nécessite un design particulier couplé à des capteurs commandés par un programme. De plus, la partie mobile du système nécessite une maintenance accrue. En 2009, Lee propose une vue d'ensemble des dispositifs de traqueur solaire (Lee et al. 2009).

Deux types de collecteur actifs ont été recensés :

- Collecteur actif redirigeant ;
- Concentrateur lumineux actif.

1.2.1.3.1. Collecteur actif redirigeant

Souvent appelé Héliostat, ce sont des miroirs plans mécanisés usuellement placés sur le toit d'un bâtiment. Ils traquent la position du soleil et redirigent la lumière vers le dispositif de guide lumineux. Il peut également être conçu à l'aide de lentille, de miroir incurvé ou de lentille de Fresnel.

En 2005, Rosemann et Kaase présentent les résultats du projet ARTHELIO (Figure 15). Celui-ci consiste à examiner la possibilité de guider la lumière naturelle au centre des bâtiments. Pour se

faire, deux technologies ont été utilisées. Le prototype est un conduit dont la diffusion est linéaire. Celui-ci est couplé à un système héliostat utilisant des lentilles et des miroirs redirigeant, et est installé à Berlin en Allemagne (Rosemann and Kaase 2005).

Figure 15 : Collecteur réflectif du projet ARTHELIO (Rosemann and Kaase 2005)

1.2.1.3.2. Concentrateur lumineux actif

Ce procédé concentre les rayons lumineux en utilisant des réflecteurs incurvés ou des lentilles de Fresnel. Rosemann et Kaase (Rosemann and Kaase 2005) étudient dans leur projet une seconde configuration installée à Carpien, Italie. Les lentilles de Fresnel offrent une simple façon de concentrer la lumière, pour la diriger ensuite vers le dispositif de transport (Figure 16).

Figure 16 : Concentrateur lumineux actif du projet ARTHELIO (Rosemann and Kaase 2005)

Les systèmes de collecte utilisant les lentilles de Fresnel couramment rencontrés dans la littérature sont le système Parans ou le système Himawari (Figure 17).

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Figure 17 : a) Système Parans (www.parans.com) b) Système Himawari (www.himawari-net.co.jp)

D'autres formes de concentrateurs sont disponibles dans la littérature, comme le collecteur *Hybrid Solar Lighting* (HSL) présenté dans la publication de Mayhoub (Figure 18). Ce dispositif tout comme le système Parans ne distribue que la part directe de l'éclairement (Mayhoub and Carter 2012).

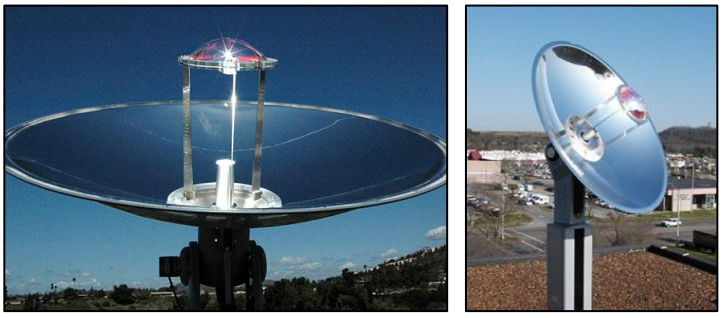


Figure 18 : Collecteur HSL

1.2.2. Les Conduits

Les systèmes de transport des rayons lumineux sont classés en fonction du matériau utilisé dont les propriétés optiques diffèrent d'un matériau à un autre. En effet, selon Hansen (Hansen 2006) la lumière peut être transporté par :

- Réflexion spéculaire multiple (conduit réfléchissant type *Mirrored Light Pipe* – MLP) ;
- Réflexion interne totale (fibre optique ou conduit prismatique) ;
- Réfraction par surface convergente (lentilles) ;
- Diffusion (conduit acrylique ou conduit à fluide).

Associés à ces phénomènes, nous relevons les différents systèmes de transport de la lumière courant (Schuman et al. 1992) :

- Conduit de lumière prismatique ;
- Conduit réfléchissant ;
- Conduit avec lentilles ;
- Fibre optique ;
- Conduit acrylique ;
- Conduit à fluide.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Les systèmes voient également leurs propriétés optiques évoluer en fonction de l'angle d'incidence des rayons entrants. Ceci est qualifié par un paramètre appelé « angle d'acceptation de la lumière » (i.e. *acceptance angle*) qui joue un rôle important sur les performances du guide lumineux (Figure 19).

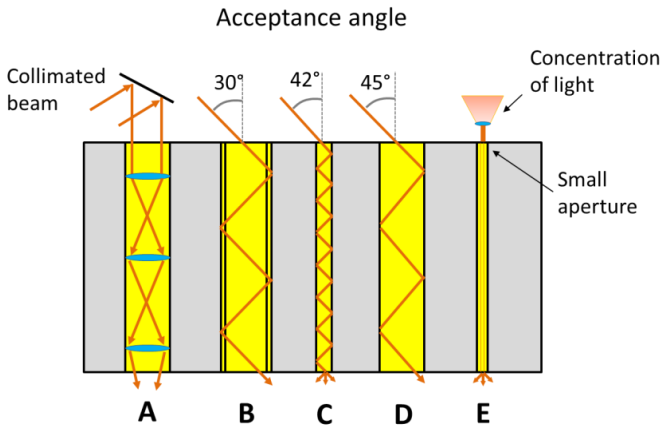


Figure 19 : Différentes méthodes de transmission des rayons lumineux fonction de l'angle d'incidence des rayons : A : Lentilles, B : Conduit creux prismatique, C : Tige lumineuse, D : Conduit réfléchissant et E : Fibres optiques (Hansen 2006)

1.2.2.1. Conduit prismatique – *Hollow prismatic pipes* (HPP)

Ce procédé a été développé par Lorne Whitehead (Whitehead, Nodwell, and Curzon 1982).

Le guide de lumière prismatique est un conduit de lumière creux dans lequel la lumière est acheminée par le biais de réflexions totales internes à partir d'une surface diélectrique prismatique (Figure 20). Le rayon lumineux doit se situer au maximum à 26° de l'axe central du conduit afin d'être propagé par réflexions totales internes. Le guide peut être de section quelconque. Les formes carrée, rectangulaire et circulaire sont les plus communes. Le conduit de lumière prismatique peut être utilisé pour transporter la lumière au centre d'un immeuble, répartir et distribuer de façon efficace la lumière le long de la surface du conduit (Figure 21). La lumière peut être transportée en moyenne à près de trente mètres.

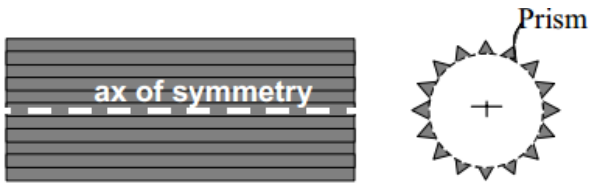


Figure 20 : Schéma conduit prismatique (Dobrre and Achard 2005)

Des études ont montré que les économies d'énergie générées par l'utilisation de ce procédé variaient en fonction du type de ciel. En effet, le système ne travaille réellement que lorsque le ciel est clair générant une économie d'énergie de l'ordre de 64 %, contre 39 % par ciel couvert.

Les HPP peuvent être couplés à un éclairage artificiel. Cette association permet d'atteindre un éclairement intérieur uniforme, un éclairement des grands espaces ou des rues, un éclairage des tunnels et des ponts, un éclairage esthétique (décoration, architecture, spectacle, etc.), des guides lumineux routiers, ou un couplage cohèrent lumière du jour/lumière artificielle au sein d'un bâtiment.

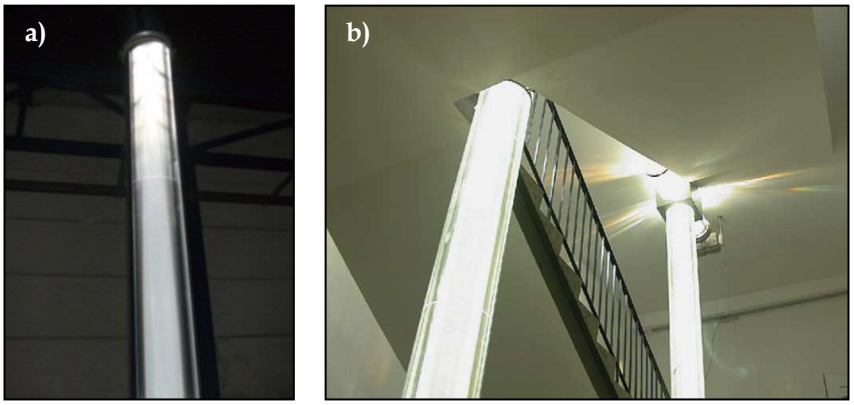


Figure 21 : Conduit prismatique utilisé pour transporter et distribuer la lumière
a) (Vazquez-Molini, Alvarez, and Garcia-Fernandez 2012)
b) Projet ARTHELIO (Rosemann and Kaase 2005)

A contrario du conduit réfléchissant offrant des valeurs d'éclairement variant entre 100 lux et 1200 lux (fonction de l'heure de la journée), le HPP couplé à l'éclairage artificiel permet d'atteindre un éclairement moyen tout au long du conduit de l'ordre de 200 lux en moyenne (Hansen 2006).

En 2010, Fernandez-Balbuena a étudié les performances de ce type de dispositif installé dans un bureau (Fernandez-Balbuena et al. 2010).

1.2.2.2. Transport par lentille

Le conduit de lumière à lentilles est un agencement de lentilles, dans lequel chaque lentille individuelle transmet une image de la lentille précédente à la suivante. Le transport se fait par l'enchaînement du processus convergence/divergence. Un conduit physique n'est pas nécessaire entre les lentilles. L'espacement des lentilles est fonction du degré de collimation de la source lumineuse. Les grandes lentilles peuvent être onéreuses, à moins qu'une lentille de Fresnel ou annulaire soit utilisé. La lumière peut être transportée en moyenne à près de trente mètres.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

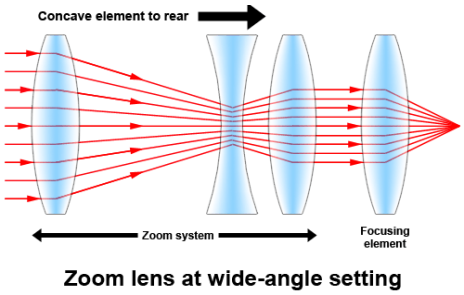


Figure 22 : Transport par superposition de lentilles convergentes et divergentes (Hansen 2006)

Les pertes de lumière sont dues aux lentilles dont la transmittance s'élève à 92 %.

Il est important de signaler que ce système reste très fragile dans la mesure où si les lentilles bougent, l'ensemble du système est affecté.

1.2.2.3. Fibre optique - *Solid CoreSystems* (SCS)

Ce procédé technique utilise la fibre optique comme conducteur lumineux et transmet la lumière par réflexions totales internes à travers une fibre mince solide de grande efficacité. L'avantage de la fibre optique est qu'elle retransmet la quasi-intégralité du flux lumineux incident en sortie. Le paramètre influençant l'efficacité du SCS est sa longueur (à contrario des MLP, pour le diamètre). La fibre optique destinée au transport lumineux est appelée *Solid Core Fibre Optics* due à son diamètre beaucoup plus élevé que la fibre optique destinée à l'information.

La transmission lumineuse au sein de la fibre optique dépend des propriétés optiques du matériau, à savoir la perte de la ligne (de l'ordre de 0,1 dB/m à 0,6 dB/m pour des longueurs de l'ordre de 18 m à 30 m), de l'angle d'acceptation [7] et de l'ouverture, qui indique la propagation du faisceau de lumière acceptée par la fibre (sinus de l'angle d'acceptation).

L'avantage de la fibre optique réside principalement en sa faculté à transporter la lumière vers des zones très éloignées de toutes sources lumineuses en enlevant les rayons infrarouges et ultra-violets. De plus, de par sa flexibilité et sa taille relativement petite, ses possibilités de mise en œuvre au sein d'un bâtiment ne sont pas limitées.

En toiture, des panneaux composés de l'ensemble des départs des fibres permettent d'obtenir des surfaces de collecte grandes par rapport aux nombres de fibres connectées.

Le système disponible dans le commerce le plus connu utilisant des fibres optiques est le Himawari, fabriqué par La Foret Engineering au Japon. Le système Himawari se compose d'un collecteur en nid d'abeilles composé de lentilles de Fresnel hexagonales qui filtre et concentre la lumière pour la transporter à l'aide de la fibre optique (Figure 23). Les câbles à fibres optiques à base de quartz transmettent la lumière pour des applications spéciales où la lumière doit être

[7] i.e. *acceptance angle*

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

filtrée afin d'obtenir un rendu optimal. Cependant, ces systèmes sont très onéreux. La lumière peut être transportée en moyenne à près de 90 mètres.

Figure 23 : Système Himawari
(Schuman et al. 1992)

Jin Oh (Oh et al. 2013) a effectué un comparatif entre deux dispositifs : le conduit de lumière et la fibre optique couplée à un concentrateur sur la base de simulation sous les logiciels PHOTOPIA et RADIANCE pour une salle de conférence. Son étude a mis en évidence le bénéfice des systèmes étudiés pour le captage de la lumière du jour, principalement pour la fibre optique pour des hauteurs solaires inférieures à 50°.

1.2.2.4. Tige de lumière – *Light rods*

Les tiges lumineuses sont une technologie de transport se basant sur le principe de réflexion interne totale, toute comme la fibre optique. La différence avec ce dernier dispositif est la rigidité de la tige.

Il a été constaté que la tige de lumière atteignait une transmission plus élevée que le conduit de lumière réfléchissant pour un diamètre beaucoup plus petit, favorisant l'emploi de cette technologie dans les zones limitées en espace (Callow 2003; Shao and Callow 2003).

Figure 24 : Tige de lumière – Light Rods
(Callow 2003)

Le flux lumineux maximal mesuré en sortie est d'environ 360 lm par tige. La courbure jusqu'à 90° des tiges n'engendre qu'une perte de 20 % de la quantité de lumière transportée. Les tiges lumineuses de faibles diamètres permettent de transmettre efficacement la lumière à des longueurs supérieures à 4 m (Shao and Callow 2003).

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

1.2.2.5. Conduit réfléchissant - *Mirrored Light Pipe* (MLP)

Les conduits de lumière réfléchissant utilisent le phénomène de réflexion spéculaire multiple pour transporter la lumière entrante grâce à la réflectivité de leur surface intérieure (Figure 25). La transmission globale est fonction de la réflectivité de la surface et de l'angle d'entrée de la lumière incidente. À l'aide d'un film de polyester très réfléchissant ($\rho_{LP} > 0{,}99$), la lumière peut être transmise à près de 30 mètres avec seulement de faibles pertes. Ces systèmes peuvent transmettre la part diffuse de la lumière, mais avec une efficacité moindre.

Figure 25 : Conduit de lumière réfléchissant équipé d'un dôme translucide – Système SOLATUBE (Malet-Damour, Boyer, Guichard, and Miranville 2014)

La transmission lumineuse dépend de l'angle d'incidence de la lumière à l'entrée du conduit, du rapport de longueur (i.e. *aspect ratio*), de sa réflectivité et du type de collecteur utilisé.

L'évolution du dispositif est liée à l'évolution du matériau réfléchissant. Voici quelques matériaux ayant été utilisés ou étant utilisés :

- Aluminium poli : $\rho_{LP} = 85\ \%$
- Silver coated plastics / Aluminium : $\rho_{LP} = 95\ \%$
- Miro-silver (aluminium amélioré avec PVD process) : $\rho_{LP} = 98\ \%$
    - Aluminium poli : $\rho_{LP} = 85\ \%$
    - Aluminiumargenté : $\rho_{LP} = 95\ \%$
    - Miro-silver (aluminium amélioré avec PVD process) : $\rho_{LP} = 98\ \%$
    - Spectralight infinity (SOLATUBE) : $\rho_{LP} = 99{,}7\ \%$

Ce type de conduit peut être couplé à des collecteurs actifs (*Sun tracking systems*) comme à des collecteurs passifs (*Laser Cut Panels*, Dôme translucide).

L'un des avantages de ce produit est qu'il transmet moins de chaleur qu'une ouverture zénithale, comme un skydome (Shao, Elmualim, and Yohannes 1998; Zhang, Muneer, and Kubie 2002).

Ces performances diminuent avec l'accroissement du rapport de longueur, mais aussi avec le nombre de courbures (Oakley, Riffat, and Shao 2000; Carter 2002).

Les conduits verticaux utilisant le MLP sont généralement circulaires. Pour les conduits horizontaux, des sections rectangulaires ou triangulaires sont principalement utilisées (Edmonds 2010).

Les MLP peuvent également connaître d'autres configurations. Dans la littérature, nous relevons des études dans lesquelles le conduit réfléchissant associe l'apport de lumière et la ventilation naturelle. En effet, par le biais d'une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur ou par la différence de pression due au flux d'air autour du conduit à l'extérieur, et en utilisant un MLP adéquat, une ventilation par gradient thermique peut être obtenue (Oliveira et al. 2001; Varga and Oliveira 2000).

Les conduits réfléchissants peuvent également être horizontaux (Figure 26). Les études montrent que, dans cette configuration, le conduit réfléchissant est efficace pour des petites longueurs. Dans le cas de bâtiment de grande taille, la collecte de la lumière est difficilement réalisable en toiture. Pour cette raison, l'apport lumineux se fait en façade, le conduit associé étant horizontal. Des collecteurs de la section précédente peuvent être utilisés. Nous pouvons citer l'exemple du conduit décrit par Canziani (Canziani, Peron, and Rossi 2004) ainsi que celui de Chirarattananon (Chirarattananon, Chedsiri, and Renshen 2000).

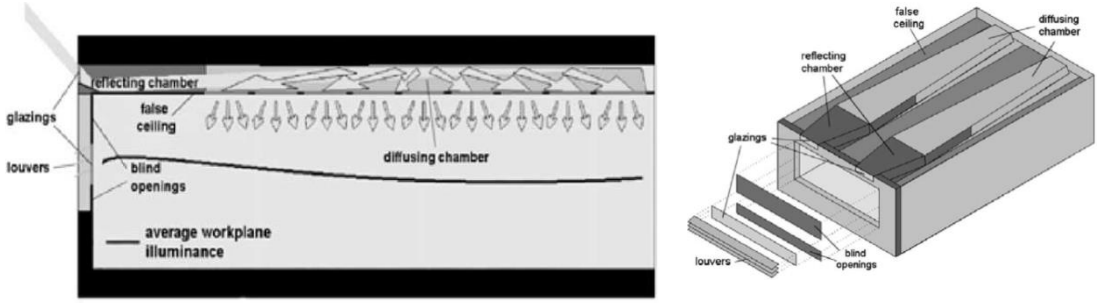


Figure 26 : Dispositif de conduit horizontal proposé par Canziani (Canziani, Peron, and Rossi 2004)

Le concentrateur anidolique couplé au conduit réfléchissant horizontal est couramment étudié. L'association des deux dispositifs offre un compromis intéressant en quantité de lumière apportée et diffusée de façon uniforme dans la pièce réceptrice.

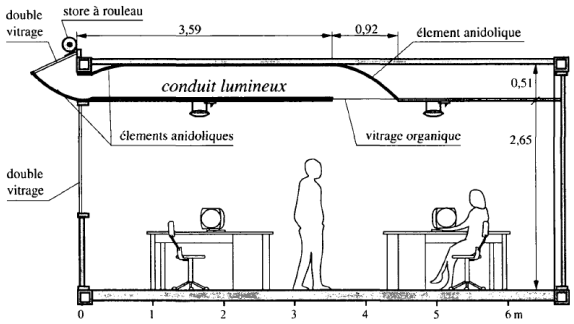


Figure 27 : Association Concentrateur anidolique / Conduit horizontal réfléchissant (Wittkopf et al. 2010; Courret 1999)

Des chercheurs se sont intéressés à l'utilisation de la configuration horizontale dans le cas de bâtiments situés en zone urbaine dense (Kwok 2011; Kwok and Chung 2008). Kwok a couplé la technologie de collecte *Laser Cut Panels* au conduit horizontal réfléchissant.

Les conduits réfléchissants peuvent être inclinés impliquant l'utilisation de coude afin de rétablir l'inclinaison (Figure 28).

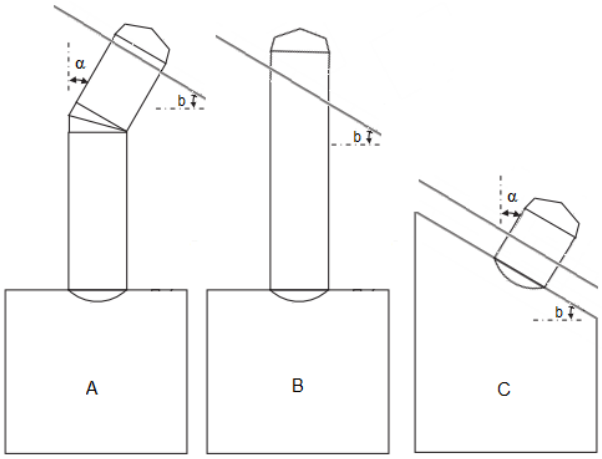


Figure 28 : Configuration d'inclinaison possible par rapport au toit pour les conduits de lumière :
A : Conduit normal au plan de la toiture et du plafond (collecteur dans le plan de la toiture) ;
B : Conduit vertical, collecteur horizontal ;
C : Conduit normal au plan incliné de la toiture et du plafond (collecteur dans le plan de la toiture)

Le conduit peut être incliné de 5° à 90°. Cependant, dans le bâtiment, cet angle varie de 20° à 60° (Darula et al. 2010).

Le collecteur incliné recueille la lumière du jour de la partie du ciel « vu » ainsi que la lumière réfléchie par le sol et les façades opposées (Darula et al. 2010).

Parmi les configurations innovantes d'utilisation des conduits réfléchissants répertoriées dans la littérature, nous retrouvons l'utilisation des guides réfléchissants horizontaux.

Le conduit réfléchissant est un Dispositif de Guides Lumineux Tubulaires Réfléchissant. Ce dispositif est le plus commercialisé et étudié. À l'échelle locale (île de La Réunion), les conduits de lumière utilisent ce mode de transport. Ce système de transport fera donc l'objet de notre sujet d'étude et d'investigation.

1.2.3. Les Diffuseurs

Dans cette section, nous distinguons deux processus liés à la diffusion de la lumière dans le local : l'extraction lumineuse et l'émission lumineuse. L'extraction lumineuse est réalisée à la fin du conduit, tout au long du conduit ou bien à certains endroits. Le type et la complexité du diffuseur dépendront principalement du type de conduit.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

1.2.3.1. Extraction lumineuse

Edmonds (Edmonds, Reppel, and Jardine 1997) a décrit le principe de l'extraction lumineuse lié aux conduits type MLP de la manière suivante : une certaine proportion de lumière peut être extraite à divers intervalles tout au long du conduit de lumière vertical éclairant divers étages ou à différents niveaux d'un conduit horizontal pour obtenir un éclairement uniforme (Figure 29).

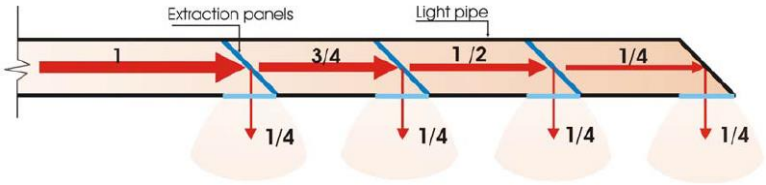


Figure 29 : Principe de l'extraction lumineuse selon Edmonds (Edmonds, Reppel, and Jardine 1997; Hansen 2006)

Dans l'exemple de la figure précédente, chaque extracteur est assez réfléchissant pour défléchir un quart de la lumière de façon égale.

1.2.3.2. Émission lumineuse

Ayers et Carter en 1995 (Ayers and Carter 1995) ont désigné l'émetteur comme un dispositif qui distribue et diffuse la lumière en sortie du système de transport.

Ses caractéristiques vont dépendre du système auquel il est rattaché. Ayers et Carter décrivent deux types d'émetteur : ceux qui combinent transport et émission dans lesquels la lumière, récoltée par le collecteur, est extraite tout au long de leur longueur, ou les émetteurs distincts qui fonctionnent comme un luminaire conventionnel en redistribuant la lumière délivrée par le conduit.

1.2.3.3. Diffuseur combinant transport et émission

Les exemples types de ce genre de diffuseur/conduit combinant transport et émission sont le conduit creux prismatique (HPP) (perte de 2 % tous les 300 mm, lumière diffuse, risque d'éblouissement), le double conduit de lumière (conduit avec un film hautement réfléchissant) ou la fibre optique (utilisation en décoration ou en signalétique). Ce genre de système est à la fois conducteur et diffuseur lumineux.

En 2010, Baroncini et al. (Baroncini et al. 2010) analysent numériquement et expérimentalement un nouveau dispositif de conduit de lumière basé sur l'association de deux tubes : le premier tube a ses parois intérieures et extérieures réfléchissantes et est positionné à l'intérieur du second tube translucide (aux parois diffusives). Ce dispositif, appelé DLP (*Double Light Pipe*), associe la technique d'un conduit de type MLP traditionnel et la technicité d'une diffusion linéaire décrite

par Rosemann en 2005. Ainsi, il permet d'acheminer la lumière jusqu'à un point donné, tout en éclairant les zones de passage du tube.

Figure 30 : ***Double Light Pipe*** **– DLP (Baroncini et al. 2010)**

1.2.3.4. Diffuseur distinct

Les diffuseurs distincts sont des émetteurs quasi indépendants du dispositif de transport. En effet, ils permettent de redistribuer, réorienter, dévier ou concentrer les rayons lumineux provenant du dispositif de transport. Les exemples types de ce genre de diffuseur distinct sont les éclairages de tunnel (*conductalite*), la fibre optique couplée à des lentilles de Fresnel (système Parans), les diffuseurs à miroir incliné, lentilles concaves et lentilles de Fresnel (*solar light flux emitters*) et les diffuseurs à miroir semi-transparent (*lumiduct*) (Figure 31).

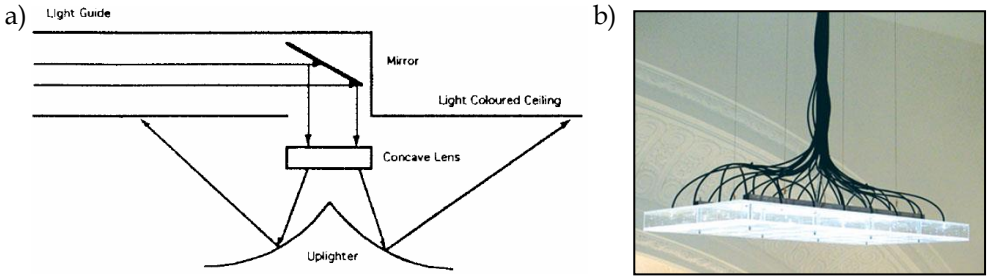


Figure 31 : a) ***Solar light flux emitter*** **(Ayers and Carter 1995) b) Système Parans (www.parans.com)**

Mayhoub en 2012 a étudié le dispositif « Parans » en le couplant à un dispositif d'éclairage artificiel donnant naissance au HLS, *HybridLighting System* (Mayhoub and Carter 2012).

1.2.3.5. Autres émetteurs

D'autres émetteurs voient le jour, utilisant, par exemple, des technologies connues dans la collecte de la lumière. Un exemple typique est l'utilisation du *Laser Cut Panel* (LCP) en tant qu'émetteur. À l'aide de cette technologie connue, il dévie la lumière en sortie du conduit vers le plafond.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

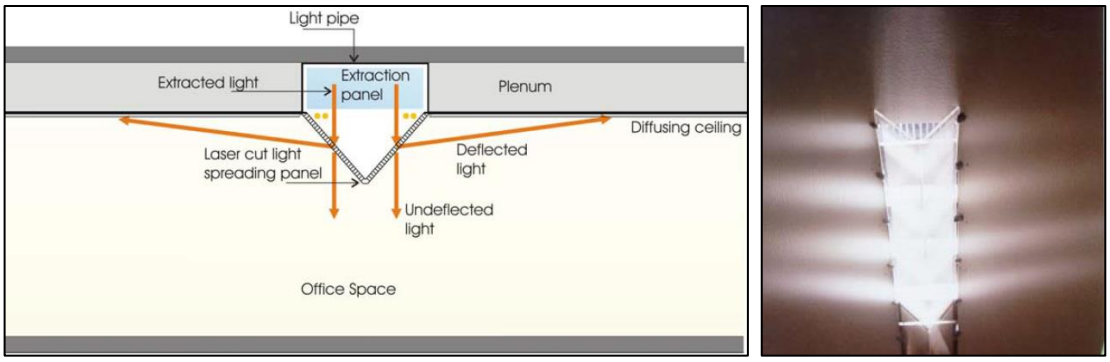


Figure 32 : Utilisation de la technologie LCP en tant que diffuseur (Hansen 2006)

1.2.3.6. Diffuseur Lambertien et approché

Ces diffuseurs correspondent au moyen d'émission le plus couramment rencontré sur le marché. Ils peuvent être de forme circulaire (le plus courant) ou rectangulaire. Plusieurs surfaces de diffusion sont proposées en fonction des besoins (Figure 33). Ils peuvent ainsi être transparents ou translucides. Dans ce dernier cas, la surface peut être prismatique, équipée de lentilles de Fresnel, ou de stries. Ces dispositifs font l'interface entre le dispositif de guide lumineux et la pièce réceptrice. Dans la littérature, les auteurs ont souvent tendance à considérer que le dispositif diffuse et distribue la lumière de façon Lambertienne (la luminance est indépendante de la direction d'émission).

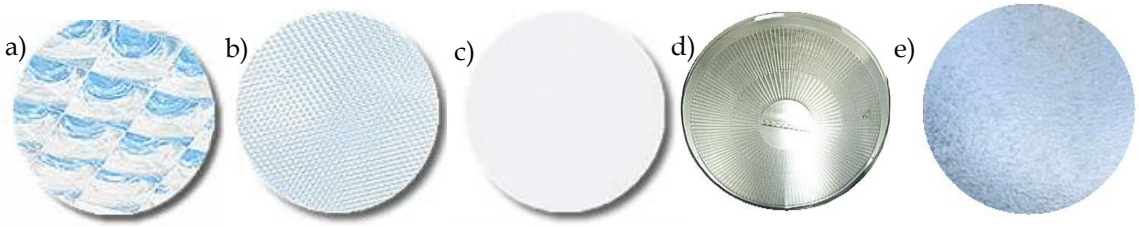


Figure 33 : Différentes surfaces de diffusion a) Diffuseur translucide à lentilles de Fresnel b) Diffuseur translucide prismatique c) Diffuseur transparent d) Diffuseur à stries e) Diffuseur en verre granulé

Dans un objectif d'identification des performances des dispositifs présents localement, nous nous focaliserons sur le diffuseur principalement commercialisé et distribué sur l'île comme dispositif de guide réfléchissant : le diffuseur prismatique.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2. Le conduit de lumière réfléchissant (*Mirrored Light Pipe*)

2.1. **Historique**

Le concept du Dispositif de Guides Lumineux Tubulaires Réfléchissant n'est pas récent. Avant d'avoir été conçu dans la configuration que nous connaissons (Solatube, Australie en 1986), le système avait été développé par les anciens Égyptiens.

2.1.1. L'Égypte, initiateur du concept

Les concepteurs égyptiens sont à l'origine de la notion d'apport lumineux aveugle. Il s'agissait d'utiliser la lumière du jour au sein des temples pharaoniques pour créer une ambiance lumineuse mystique et divine, faisant ressortir la statue de l'un ou l'autre Neter[8] en particulier. Les concepteurs égyptiens n'incorporaient pas de fenêtres classiques dans leur architecture. La lumière pénétrait généralement dans le temple par le toit. Elle entrait grâce à de petits trous ronds ou carrés pratiqués dans la toiture, au sommet des murs ou dans les joints (Figure 34). L'effet poursuivi et atteint faisait penser aux faisceaux lumineux produits par les spots d'aujourd'hui comme peuvent en témoigner les photographies à la suite (Figure 35, Figure 36).

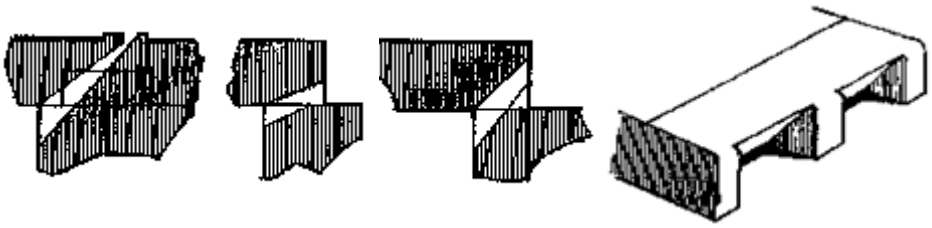


Figure 34 : Dispositifs d'apport de lumière naturelle suivant le concept égyptien

L'infiltration d'eau liée aux intempéries avait également été étudiée. En effet, les bords des trous permettant à la lumière de pénétrer dans les temples étaient plus élevés que le temple. L'eau qui s'était accumulée sur le toit ne pouvait donc pas entrer dans la voie réservée à la lumière. Dans certains petits temples, les toits étaient en pente. L'eau pouvait s'écouler par un chenal latéral. Certains systèmes plus complexes étaient composés de plusieurs pentes et de chenaux d'écoulement. L'eau était ensuite évacuée par des tuyaux d'écoulement.

[8] Appellation utilisée par les Égyptiens pour leurs dieux

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

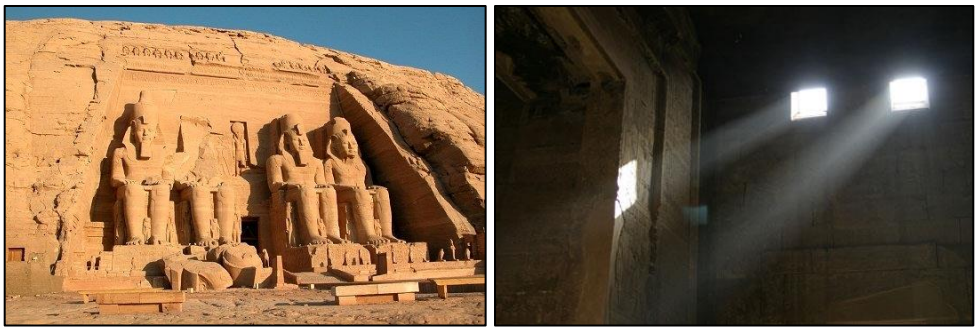


Figure 35 : Temple d'Abou Simbel
© Stéphane Orlando

Certains scientifiques ont émis l'hypothèse que les concepteurs égyptiens s'étaient servis de miroirs d'argent pour optimiser leur apport de lumière naturelle au sein des couloirs et des salles. Nous n'étions pas loin du dispositif commercialisé plus de 3000 ans après…

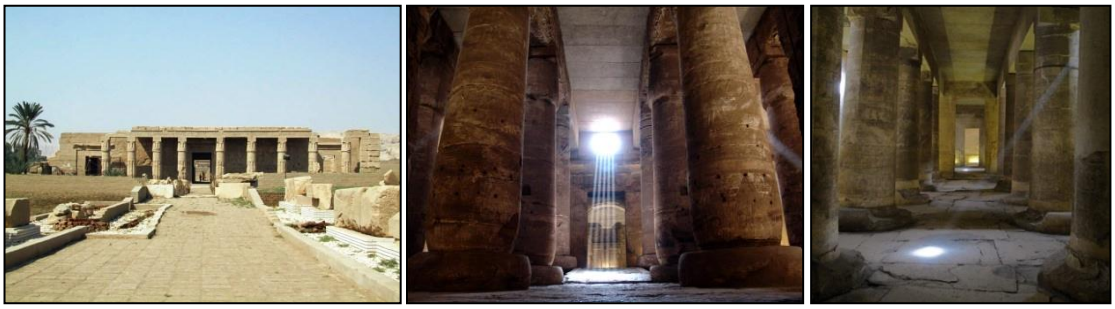


Figure 36 : Temple de Séthi Ier à Abydos (Vallée des Rois, Egypte)

2.1.2. Les premiers brevets

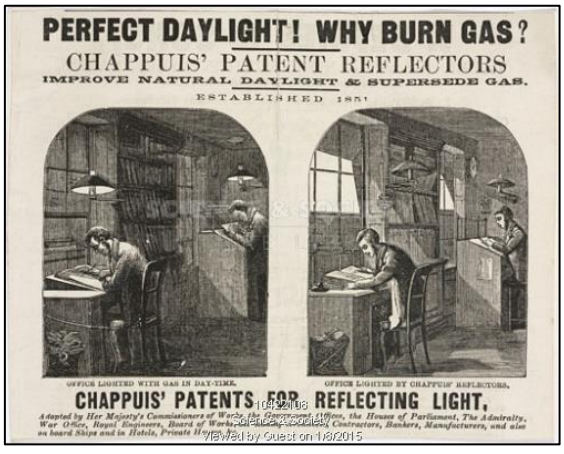


Figure 37 : Article de presse sur l'innovation de Chappuis

Les premiers systèmes de réflecteurs commerciaux ont été brevetés et commercialisés dans les années 1850 par Paul Emile Chappuis à Londres, en utilisant diverses configurations et formes de miroirs inclinés (Figure 37). Les réflecteurs de Chappuis étaient en production continue jusqu'à ce que l'usine soit détruite en 1943.

Il déposa plusieurs brevets pour ses différents dispositifs :

- Réflecteur en forme de diamant (également appelé *myriastratic* ou *diamond-shaped*) ;
- Réflecteur en verre cannelé et argenté (également appelé *silverfluted glass*) ;
- Réflecteur en argent et cristal (également appelé *argento-crystal*) ;
- Réflecteur « luminarium ».

2.1.3. Le système tel qu'on le connait aujourd'hui

Il faudra attendre 1986, en Australie, pour voir apparaitre le premier dispositif de conduit de lumière sous la forme la plus commercialisée au XXIe siècle : le conduit à paroi hautement réfléchissante. Il est plus connu sous son appellation anglo-saxonne : MLP, pour *Mirrored Light Pipe*, textuellement « le conduit de lumière miroir ».

En France, il existe plusieurs systèmes d'éclairement avec des caractéristiques très différentes. Différences de forme, de taille, de mode de fixation, de technologie et donc de résultats.

La société SOLATUBE, à l'initiative de la demande de ce brevet, a fait évoluer le produit depuis bientôt 30 ans. La Figure 38 présente l'évolution du collecteur, commercialisé sous le nom de « dôme ».

Figure 38 : Évolution du dôme au cours des 30 dernières années (www.solatube.com)

La forme de cet élément a beaucoup changé. Dans les années 2000, le dôme devient plus plat. Cette forme s'est révélée plus performante pour collecter un maximum de lumière du jour, en assurant une collecte des rayonnements solaires à 180°. Autrefois entièrement translucide, le collecteur de SOLATUBE est aujourd'hui équipé de prismes permettant de dévier et réorienter les rayons à faibles angles d'incidence au sein du tube.

Ce dispositif est amélioré par de nombreux constructeurs qui l'équipent de collecteur directionnel (appelé héliostat, permettant de suivre la trajectoire solaire), de réflecteur ou de lentille de Fresnel (permettant d'écrêter les rayons lumineux pour éviter la surintensité lumineuse).

Développé en 2003 à l'Université technologique du Queensland à Brisbane, le LCP (*Lazer Cut Panel*) est une configuration de collecteur composé d'un panneau acrylique découpé au laser et agencé pour rediriger la lumière du soleil vers le tube orienté horizontalement ou verticalement.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Les inventeurs de ce dispositif sont Veronica Garcia Hansen, Ken Yeang, et Ian Edmonds, auteurs connus dans la recherche scientifique relative aux innovations technologiques en éclairement.

2.1.4. Les conduits d'aujourd'hui

Aujourd'hui, les conduits de lumière sont manufacturés et commercialisés par de nombreuses enseignes. Chaque constructeur propose son dispositif de collecte de la lumière, un tube dont le coefficient de réflexion des parois s'approche de 1 (actuellement : 99,7 %), et un diffuseur de plus en plus adapté au confort visuel. Les performances sont également améliorées : dans sa publication (Kim and Kim 2010), Kim précise que ce dispositif permet, théoriquement, de guider les rayons lumineux collectés jusqu'à 4 à 8 étages plus bas avec une distribution à chaque étage s'étendant jusqu'à quinze mètres horizontalement à travers la structure du bâtiment par l'intermédiaire de dispositifs réfléchissants ou optiques.

2.2. **L'industrie du conduit réfléchissant**

Actuellement, différents systèmes de conduit de lumière sont disponibles dans le commerce et chaque système dispose de ses propres caractéristiques et sa propre efficacité. L'auteur Kim propose une liste non exhaustive des enseignes et des produits proposés.

Les systèmes de conduits de lumière fabriqués par Monodraught Ltd (Royaume-Uni), SOLATUBE International Inc. (USA), VELUX (Danemark), et DOEL Corp. (Corée) sont les dispositifs les plus couramment rencontrés.

Les systèmes de conduits de lumière de VELUX[9] peuvent être classés suivant la forme du collecteur (dôme ou rectangle). Ils peuvent être installés pour une pente de toiture entre 15° et 60°.

Les conduits de SOLARSPOT (DOEL) se composent d'un dôme de polycarbonate, d'un tube avec un film réfléchissant (mélange d'aluminium et de matériaux hautement réfléchissants), et d'un diffuseur (différentes formes sont proposées). Le dispositif de traqueur solaire optionnel est constitué d'une couche en forme de prisme qui peut collecter et réfléchir la lumière dans le tube améliorant son efficacité.

Le dispositif commercialisé par MONODRAUGHT est principalement orienté vers les toits plats typiques, offrant la possibilité de coupler éclairement et ventilation naturelle.

SOLATUBE propose un dôme directement équipé de prismes offrant une efficacité accrue pour les rayons solaires à faible incidence. De plus, une lentille de Fresnel au sommet du dôme assure une réduction de l'apport de chaleur lorsque le soleil est à son zénith.

Le Tableau 1 résume les systèmes d'éclairement naturel pour ces quatre fabricants.

[9] www.velux.com

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Tableau 1 : Les DGLT-R dans l'industrie

Marque	Fonction	Produit et détails techniques	Bâtiment d'usage	Image
MONODRAUGHT	Ventilation naturelle et lumière du jour	*Suncatcher* Prises d'air dans toutes les directions Tirage thermique Traqueur solaire	Etablissement recevant du public (ERP)	
		MonoventSuncatcher Rentable Léger Traqueur solaire compact	Etablissement recevant du public (ERP) / Bureaux	
		Sola-vent Eclairage artificiel intégré via alimentation PV d'un extracteur d'air	Salle de bain / Pièce d'eau / Stock	
	Lumière du jour	*Sunpipe* Réflectivité du tube : 98% Dôme anti-UV (via matériau polycarbonate) Pas de limite de longueur ou de coude	Arène / Hall d'exposition	
SOLATUBE	Lumière du jour	*Solatube Daylighting System* Brighten Up® Eclairage d'une surface jusqu'à 30m² Longueur de tube jusqu'à 9m Extracteur d'air possible	Etablissement recevant du public (ERP) / Usine / Stock	
		Solatube Daylighting System SolaMaster® Système ne nécessitant pas un plafond fini Utilisation d'un diffuseur rectangulaire Ouverture de toit plus discrète	Etablissement recevant du public (ERP) / Usine / Stock	
VELUX	Lumière du jour	*Daylighting Domeshape* Tube rigide (coefficient de réflexion accru) ou flexible (facilement installable)	Bureaux / Habitation	
		Daylighting Rectangle shape Collecteur plat en verre trempé	Bureaux / Habitation	

DOEL - Solarspot	Lumière du jour	Conduit de lumière droit et courbe Traqueur solaire additionnel Multiples diffuseurs (« Prismatic diffuser, Fresnel diffuser, Vision diffuser, Lamp diffuser »)	Usine / Habitation / ERP	
LIGHTWAY	Lumière du jour	*Lightway Crystal / Silver* Dôme en verre traité Tube en alliage Multicouche Diffuseur en verre traité antireflet Solution anti-condensation (« Blue performance »)	Usine / Habitation / ERP	

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

3. Synthèse du Chapitre I

Le chapitre I a permis de présenter les Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires dans leur globalité. Ce procédé assure trois fonctions à la fois : collecter la lumière naturelle extérieure, la transporter par le biais d'un tube, et la diffuser dans le bâtiment. Couramment appelé « conduit de lumière », la terminologie de la littérature est vaste pour citer le même dispositif.

Nous avons montré que le DGLT était un système global décomposé en un collecteur, un système de transport et un diffuseur. De multiples déclinaisons pour ces trois parties sont dénombrées, et continuent d'évoluer même trente années après le premier conduit. Les combinaisons des technologies offrent une diversité dans les performances du DGLT et un large panel d'innovation.

Nous nous sommes intéressés au DGLT-Réfléchissant, plus connu sous le nom de « conduit de lumière réfléchissant ». Le système associe un collecteur passif de type dôme translucide, un conduit réfléchissant et un diffuseur prismatique. La présence de cette combinaison sur l'île de La Réunion et la popularité du système (en termes d'étude et de commercialisation) ont été des éléments motivants notre sélection.

Les approches et démarches scientifiques doivent avoir la responsabilité de comprendre et de retranscrire le comportement des DGLT. C'est pourquoi une étude bibliographique sur la modélisation du phénomène est réalisée au chapitre suivant.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

État de l'art sur la modélisation des **DGLT–R**

« On peut répandre la lumière de deux façons :
... être la bougie, ou le miroir qui la reflète. »
Edith Wharton

Résumé du Chapitre **II**

Pour faire suite au premier chapitre, nous avons pu constater que les technologies innovantes en conduite de lumière sont nombreuses. Nous nous sommes concentrés sur le procédé le plus commercialisé et étudié : le conduit de lumière réfléchissant. Il s'agit maintenant de comprendre le comportement du guide lors d'une sollicitation externe : le Soleil.

Ce second chapitre expose la synthèse bibliographique menée à l'échelle nationale et internationale depuis les premières études sur les DGLT-R. Elle vise à présenter les différentes études et approches (semi-empiriques et théoriques) pour la modélisation des performances des DGLT-R. Cette section permettra de reconnaître les limites des modèles existants. Nous identifierons ainsi la contribution de nos travaux de recherche.

1. Modélisation mathématique des performances des DGLT-R

Il existe de nombreux modèles pour prédire les performances des conduits de lumière. Certains associent les fondements théoriques (loi de Bouguer, loi de Lambert, loi des cosinus) aux données expérimentales. Ces données sont couplées aux modèles par une optimisation à l'aide de méthode d'apprentissage ou d'algorithme évolutionniste (type algorithme génétique). Ils ont l'avantage d'offrir une méthode de calcul quantitatif simple des performances des DGLT, praticable par des néophytes des langages de programmation, ou adeptes de calcul analytique dit « à la main ». Si ces modèles allègent les performances des machines en temps de calcul, ils sont souvent limités aux configurations et matériels utilisés expérimentalement. La première section consiste à recenser les différents modèles semi-empiriques de la littérature.

D'autres modèles sont issus d'études théoriques se basant sur l'optique géométrique (propagation d'un rayon suivant les phénomènes optiques de réfraction et de réflexion). Ces approches font appels aux méthodes de tracé de rayon (i.e. *raytracing*). Les études en découlant ont à la fois un aspect quantitatif mais également qualitatif. L'avantage de ces modèles est leur adaptabilité aux configurations étudiées. L'inconvénient est qu'ils se limitent aux personnes portées sur la programmation, dont les temps de calcul logiciel varient en fonction de la précision désirée. La seconde section consiste à présenter succinctement la théorie du tracé de rayon et à recenser les modèles théoriques élaborés au cours des dernières décennies.

1.1. **Approche semi-empirique**

1.1.1. Modèle DPF de Zhang et Muneer

1.1.1.1. Première étape

En 2000, en utilisant des données expérimentales obtenues au Royaume-Uni, Zhang et Muneer (Zhang 2000) ont introduit le facteur de pénétration de lumière du jour d'un conduit de lumière (*Daylight Penetration Factor* - DPF).

Le DPF est un facteur qui s'apparente au Facteur de Lumière du Jour (F.L.J.), car il permet de déterminer l'éclairement à l'intérieur du local par le biais d'un concept commun, le rapport de l'éclairement intérieur à celui de l'extérieur :

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

Les auteurs modélisent alors les performances de conduit de lumière selon 3 paramètres principaux : la distance entre le point et la source, l'indice de clarté du ciel et la hauteur solaire. Le modèle à la suite (équation (4)) n'a été que la première étape de la modélisation de Zhang (Zhang 2000).

Sur la base d'une analyse paramétrique, Zhang établit le premier principe de sa démarche.

L'éclairement reçu par un point d'une source lumineuse de surface élémentaire et de taille finie est proportionnel au produit de l'intensité lumineuse de la source (I_o), du cosinus de l'angle d'émission, du cosinus de l'angle d'incidence et de l'inverse de la distance euclidienne au carré D :

$$Éclairement = I_o.\cos\theta_i \times \frac{\cos\theta_{(x,y,z)}}{D^2} \quad (2)$$

De par sa surface, le diffuseur ne peut être considéré comme une source ponctuelle. De plus, une observation expérimentale a permis de détecter que la luminosité du diffuseur n'était pas uniforme.

En première approximation, la relation entre le DPF et D peut être écrite de la sorte :

$$DPF_{(x,y,z)} = a(H_s, k_t) \times \frac{1}{D^2} \quad (3)$$

Avec, a : paramètre dépendant de la position du soleil et de l'indice de clarté du ciel

Les rôles de l'indice de clarté et de la hauteur solaire ont été étudiés. Il constate que pour une hauteur solaire, le DPF possédait une grande variabilité (par exemple, pour 41,5°, la variabilité du DPF s'élevait à près de 121 %). Ce comportement suggère que les paramètres météorologiques additionnels affectent grandement le DPF.

En regardant l'évolution du DPF en fonction de l'indice de clarté pour une hauteur solaire comprise entre 48,5° et 49,5°, il déduit qu'une relation peut être élaborée entre les deux variables.

Zhang précise dans sa publication que les éclairements direct et diffus du lieu sont pris en compte par le biais de k_t (Zhang 2000).

Première modélisation du DPF

Le DPF est influencé par D, la hauteur solaire et l'indice de clarté. Le modèle suivant est proposé :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(a_{00} + a_{01}.H_s + a_{02}.{H_s}^2 + a_{03}.k_t + a_{04}.k_t^2 + a_{05}.H_s.k_t + a_{06}.{H_s}^2.k_t + a_{07}.H_s.k_t^2 + a_{08}.{H_s}^2.k_t^2)}{D^2} \quad (4)$$

Celui-ci a été simplifié :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(a_{10} + a_{11}.H_s + a_{12}.{H_s}^2 + a_{13}.k_t + a_{14}.{k_t}^2 + a_{15}.H_s.k_t)}{D^2} \quad (5)$$

Le Tableau 2 présente les valeurs des coefficients empiriques du modèle de Zhang.

Tableau 2 : Coefficients empiriques du modèle de Zhang

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{03}	a_{04}	a_{05}	a_{06}	a_{07}	a_{08}	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}
0,053	0,032	-0,000	1,952	-1,878	-0,140	0,002	0,146	-0,002	0,407	0,008	0,000	-0,149	0,266	0,002

L'équation couvre l'ensemble des valeurs de k_t, du ciel très couvert ($k_t = 0{,}2$) au ciel clair ($k_t > 0{,}6$). Cependant, l'auteur précise qu'il est possible d'obtenir une précision accrue en développant des formulations spécifiques du type de ciel.

L'équation à la suite permet de calculer l'éclairement intérieur :

$$E_{(x,y,z)} = DPF_{(x,y,z)} \cdot I_{G,h} \cdot K_G \tag{6}$$

Avec,

$$K_G = 136{,}6 - 74{,}541 . k_t + 57{,}3421 . {k_t}^2 \tag{7}$$

Cependant, cette équation est limitée aux conduits droits.

1.1.1.2. Seconde étape

Zhang (Zhang et al. 2002) propose ensuite une nouvelle modélisation en prenant en compte des paramètres géométriques supplémentaires (longueur, diamètre, nombre de coudes, angle des coudes, type de diffuseur) et les paramètres météorologiques de la première étude (indice de clarté du ciel, rayonnement diffus céleste, course du Soleil). Les coefficients présents dans l'équation générale dérivent d'une analyse expérimentale.

Deux expérimentations sont menées en vue d'affiner la modélisation des phénomènes :

- *Craighouse*, Napier University : 8 conduits de lumière de taille égale (L = 6,10 m) et de diamètres différents (21 cm, 33 cm, 42 cm et 53 cm) tous équipés d'un dôme en polycarbonate et d'un diffuseur opale en polycarbonate traité. 15 configurations ont été étudiées (droit et courbe)
- *Currie Test Room*, Currie, Edinburgh : 1 conduit de 33 cm de diamètre. L'objet de cette expérimentation est d'étudier l'effet du diffuseur opale.

À l'aide de ces données expérimentales, Zhang propose deux modèles dont les approches sont décrites à la suite.

Le modèle pour conduit droit

Pour les conduits de lumière droits, Zhang propose une équation générale du modèle :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(356{,}7 - 572{,}4 . k_t - 1{,}2 . H_s + 42{,}8 . k_t^2 . H_s + 0{,}5 . k_t . H_s^2 - 0{,}9 . k_t^2 . H_s^2) . \rho_{LP}{}^{(137{,}7 + 3{,}5 A_p - 0{,}5 \cot H_s + 0{,}5 A_p \cot H_s)} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^m}{D^2} \tag{8}$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

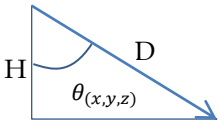
Dans sa modélisation, Zhang argumente sur le rôle de la réflectivité du conduit, notée ρ_{LP}. En se basant sur l'étude d'Edmonds, il explique que la transmittance du conduit est liée aux nombres de réflexions au sein de celui-ci ainsi qu'à sa réflectivité. Plus la réflectivité sera grande, plus la transmittance sera grande. Edmonds avait précisé que pour les rayons solaires directs, le nombre de réflexions est proportionnel au rapport de longueur (i.e., *aspect ratio*) et à la cotangente de la hauteur solaire, d'où la relation linéaire dans l'équation. Ceci explique le terme introduit dans les équations (8) (13) et (14) :

$$\rho_{LP}{}^{(a_{07} + a_{08}.A_p + a_{09}.cot\, H_s + a_{10}.A_p.cot\, H_s)} \tag{9}$$

Pour les mêmes équations, intéressons-nous ensuite au terme m. En étudiant la façon dont se propage la lumière issue du diffuseur vers l'intérieur de la pièce, une relation utilisant le facteur m a pu être mise en place. Pour obtenir l'éclairement résultant d'un point lumineux ou d'une source lumineuse finie vers un point donné de l'espace, la loi de l'inverse du carré des distances et la loi des cosinus doivent être utilisées.

Loi des cosinus :

$$\frac{H}{D} = cos\, \theta_{(x,y,z)} \tag{10}$$



Loi de l'inverse du carré des distances :

$$\frac{1}{D^2} \tag{11}$$

Un exposant a été affecté à cette relation afin de prendre en compte le nombre de fois que doit être utilisé la loi du cosinus. Cet exposant est la variable « m » :

$$\left(\frac{H}{D}\right)^m \tag{12}$$

Ainsi, si le diffuseur d'un conduit est considéré comme une source lumineuse ponctuelle, la loi du cosinus doit être appliquée une seule fois, alors :

$$m = 1$$

Si le diffuseur est considéré comme une source lumineuse finie, alors la loi de cosinus doit être appliquée 2 fois : une fois pour l'émission de la lumière (loi de distribution), l'autre pour la projection de la lumière dans le plan horizontal (modification de la forme apparente de la source lumineuse). Dans ce cas,

$$m = 2$$

Le paramètre m varie entre 1 et 2. Après optimisation, Zhang obtient $m = 1{,}3$.

Suivant la forme de l'équation (12), nous pouvons noter que Zhang utilise une valeur spéciale pour m. Par la suite, nous verrons que d'autres auteurs attribuent à m la valeur de 2 pour un dénominateur de D², et 4 pour la division par H² (cosinus biquadratique).

Zhang et Muneer ont également publié une version simplifiée de cette seconde approche pour un conduit droit (Zhang 2002):

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(62{,}5 - 17{,}2.k_t + 2{,}6.H_s) \cdot \rho_{LP}{}^{(136+4{,}3A_p+1{,}1\cot H_s - 0{,}4A_p \cot H_s)} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^m}{D^2} \quad (13)$$

Avec : $m = 1{,}3$ (Zhang 2002)

Le modèle pour conduit courbe

Un modèle a également été conçu pour un conduit courbe, dont le coude fait 30°.

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(192{,}5 - 108{,}8.k_t - 0{,}3.H_s) \cdot \rho_{LP}{}^{(132{,}4+4{,}4.A_{pe}+8{,}6\cot H_s - 2{,}6A_{pe}\cot H_s)} \cdot R^2 \cdot \left(1 - f_{loss,courbe}\right)^{N_{30}} \left(\frac{H}{D}\right)^m}{D^2} \quad (14)$$

Avec

$$A_{pe} = \frac{L + f_{len}.L_b}{2R} \quad (15)$$

Les paramètres f_{len} et $f_{loss,courbe}$ ont été déterminés à partir d'une procédure d'optimisation. Ils obtiennent les valeurs optimales suivantes :

$$f_{len} = 0{,}65$$

$$f_{loss,courbe} = 0{,}20$$

La valeur optimale obtenue pour le paramètre $f_{loss,courbe}$ est 0,20, ce qui indique que chaque coude d'angle 30° engendre une perte d'énergie de 20 % durant la transmission lumineuse. Pour un conduit composé de N_{30} coudes de 30°, la transmittance totale de lumière par les coudes vaut :

$$(1 - f_{loss,courbe})^{N_{30}} \quad (16)$$

L'utilisation de coudes dans le conduit augmente la valeur du rapport de longueur, et réduit la transmittance du conduit, ce qui réduit également le DPF.

Ce facteur réducteur dépend de la hauteur solaire et des conditions météorologiques (type de ciel) car la distribution des luminances célestes variait durant la journée (Darula et al. 2010).

Les valeurs de ces facteurs de perte sont en adéquation avec l'étude de Carter (Carter 2002).

Bilan de la littérature sur l'approche de Zhang

Des auteurs ont commenté les performances de ce modèle pour d'autres configurations météorologiques. En théorie, tout comme le FLJ, ce modèle peut être utilisé pour tout type de ciel.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

En pratique, ce modèle ayant été conçu suivant les conditions de ciel couvert du Royaume-Uni, Shin (Shin, Yun, and Tai Kim 2011) précise qu'il présente un taux d'erreur plus élevé que d'autres modèles.

Shin ajoute 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 (Shin, Yun, and Tai Kim 2011). Cependant, pour faire suite à son analyse comparative avec les modèles de Yun et Kim, il constate que les modèles de Zhang et Muneer surestiment très largement les performances du conduit de lumière.

1.1.2. Modèle de Jenkins et Muneer

En 2003 à Leicester (Royaume-Uni), Jenkins et Muneer ont développé un modèle basé sur des données expérimentales permettant d'évaluer la transmission du conduit en fonction du rapport de longueur (Jenkins and Muneer 2003; Jenkins and Muneer 2004; Jenkins, Muneer, and Kubie 2005; Jenkins, Zhang, and Muneer 2005)].

Le flux lumineux d'un conduit droit est donné par :

$$\Phi_{conduit,droit} = \tau_{TDGS}.E_{G,h}.\pi.R^2 \quad (17)$$

La transmission lumineuse τ_{TDGS} est obtenue pour des conduits de différents diamètres (30 cm, 33 cm, 45 cm et 53 cm) et une longueur variant de 0,60 m à 5,40 m. Le rapport de longueur évoluant, une fonction de τ_{TDGS} a pu être identifiée. Il en ressort :

$$\tau_{TDGS} = 0{,}82.e^{-0{,}11A_p} \quad (18)$$

Ainsi,

$$\Phi_{conduit,droit} = 0{,}82.e^{-0{,}11A_p}.E_{G,h}.\pi.R^2 \quad (19)$$

Cette procédure est correcte pour un certain type de conduit (conduit réfléchissant avec une réflectivité à 95 % utilisant de l'aluminium poli, couplé à un collecteur hémisphérique en polycarbonate dont la transmission lumineuse vaut 88 %, et un diffuseur en polycarbonate clair). Cependant, selon les auteurs, l'équation peut être généralisée par :

$$\Phi_{conduit,droit} = \left(\tau_{collecteur}.\tau_{diffuseur}\right).\tau_{tube}.E_{G,h}.\pi.R^2 \quad (20)$$

Vis-à-vis des conduits courbes, les auteurs ont produit une équation empirique permettant de prédire les pertes dues aux coudes (pour une 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 :

$$\chi_{coude\ n} = e^{-0{,}0052.\ a_{LP_n}} \quad (21)$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

De cette façon, le flux lumineux pour les conduits courbes devient :

$$\Phi_{conduit,courbe} = 0{,}822 \prod_{n=1}^{N} \chi_{coude_n} . e^{-0{,}11 A_p} . E_{G,h} . \pi . R^2 \quad (22)$$

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 droits ou courbes.

Pour les conduits droits :

$$E_{(x,y,z)} = 0{,}494 . \frac{\Phi_{sp} . \left(\cos \theta_{(x,y,z)}\right)^4}{H^2} . E_{G,h} \quad (23)$$

Pour les conduits courbes :

$$E_{(x,y,z)} = 0{,}494 \prod_{n=1}^{N} \chi_{coude_n} . \frac{\Phi_{sp} . \left(\cos \theta_{(x,y,z)}\right)^4}{H^2} . E_{G,h} \quad (24)$$

En prenant en compte l'expression de χ_{coude_n} et de a_{LP_n} :

$$E_{(x,y,z)} = 0{,}406 \prod_{\alpha_{LP_1}}^{\alpha_{LP_n}} e^{-0{,}0052\varphi} . \frac{e^{-0{,}11 A_p} . E_{G,h} . \pi . R^2 . \left(\cos \theta_{(x,y,z)}\right)^4}{H^2} \quad (25)$$

Notons que pour le conduit courbe, 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 (Jenkins, Muneer, and Kubie 2005).

Bilan de la littérature sur l'approche de Jenkins

Selon Schou (Schou 2012) la méthode développée par Jenkins et Muneer n'est pas précise dans des conditions de ciel dégagé pour un conduit de lumière de courte taille.

1.1.3. Modèles de Yun et Kim

En 2010, Yun et al. (Yun, Hwang, and Kim 2010a) ont déterminé les performances d'un système de conduit de lumière utilisé en Corée du Sud. Le modèle semi-empirique permet de déterminer l'éclairement intérieur ou le DPF pour un éclairement extérieur, une hauteur solaire et une quantité de nuages présents.

Yun et al. précisent que les modèles de Zhang et de Jenkins offrent une prédiction validée pour les conditions météorologiques propres au lieu de développement du modèle. Yun cible le fait que les modèles se basent sur des données mesurées. Il constate également que l'application de ces méthodes aux conditions météorologiques de la Corée du Sud ne permet pas de retranscrire le phénomène réel.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Les modèles de Yun se basent sur les modèles de Zhang et de Jenkins pour produire des relations plus en adéquations avec les conditions météorologiques de la Corée du Sud. Pour se faire, il remplace les paramètres empiriques des modèles existants. Les résultats de la régression permettent d'obtenir dix modèles :

- Modèle 1 :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(-0{,}1464.k_t - 0{,}001429.H_s + 0{,}003701.k_t.H_s + 1{,}115) \cdot \rho_{LP}{}^{(287{,}3.k_t + 2{,}135.H_s - 5{,}075.H_s.k_t - 169{,}8)} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^2}{D^2} \quad (26)$$

- Modèle 2 :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(-3{,}042.k_t - 0{,}02809.H_s + 0{,}05401.k_t.H_s + 2{,}650) \cdot \rho_{LP}{}^{(-5{,}712.k_t - 0{,}5037.H_s - 17{,}52)} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^2}{D^2} \quad (27)$$

- Modèle 3 :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(0{,}06728.k_t + 0{,}0004955.H_s + 1{,}004) \cdot \rho_{LP}{}^{(287{,}3.k_t + 2{,}135.H_s - 5{,}075.H_s.k_t - 169{,}8)} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^2}{D^2} \quad (28)$$

- Modèle 4 :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(0{,}07669.k_t - 0{,}000004672.H_s + 1{,}030) \cdot \rho_{LP}{}^{(-5{,}712.k_t - 0{,}5037.H_s - 17{,}52)} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^2}{D^2} \quad (29)$$

- Modèle 5 :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(-1{,}988.k_t - 0{,}0153.H_s + 0{,}03645.k_t.H_s + 1{,}611) \cdot e^{-0{,}11.A_p}.\pi.R^2.\left(cos\,\theta_{(x,y,z)}\right)^4}{H^2} \quad (30)$$

- Modèle 6 :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(0{,}1169.k_t + 0{,}003655.H_s + 0{,}5171) \cdot e^{-0{,}11.A_p}.\pi.R^2.\left(cos\,\theta_{(x,y,z)}\right)^4}{H^2} \quad (31)$$

- Modèle 7 :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(-0{,}08796.k_t - 0{,}001262.H_s + 0{,}002767.k_t.H_s + 1{,}113) \cdot \rho_{LP}{}^{(287{,}4.k_t + 2{,}135.H_s - 5{,}076.k_t.H_s - 88{,}95)} \cdot e^{-0{,}11.A_p}.\pi.R^2.\left(cos\,\theta_{(x,y,z)}\right)^4}{H^2} \quad (32)$$

- Modèle 8 :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(-0{,}8604.k_t - 0{,}01325.H_s + 0{,}01431.k_t.H_s + 0{,}8702) \cdot \rho_{LP}{}^{(-5{,}713.k_t - 0{,}5039.H_s + 63{,}34)} \cdot e^{-0{,}11.A_p}.\pi.R^2.\left(cos\,\theta_{(x,y,z)}\right)^4}{H^2} \quad (33)$$

- Modèle 9 :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(0{,}07181.k_t + 0{,}0001763.H_s + 1{,}030) \cdot \rho_{LP}{}^{(287{,}4.k_t + 2{,}135.H_s - 5{,}076.k_t.H_s - 88{,}95)} \cdot e^{-0{,}11A_p}.\pi.R^2.\left(cos\,\theta_{(x,y,z)}\right)^4}{H^2} \quad (34)$$

- Modèle 10 :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(-0{,}03385.k_t - 0{,}00581.H_s + 0{,}4407) \cdot \rho_{LP}{}^{(-5{,}713.k_t - 0{,}5039.H_s + 63{,}34)} \cdot e^{-0{,}11.A_p}.\pi.R^2.\left(cos\,\theta_{(x,y,z)}\right)^4}{H^2} \quad (35)$$

Les modèles 1 à 4 utilisent la base du modèle de Zhang. Les modèles 5 et 6 suivent le principe utilisé de Jenkins. Les modèles 7 à 10 complètent l'approche de Jenkins en prenant en compte la réflectivité du conduit de lumière (association des approches de Zhang et Jenkins).

Les résultats des tests statistiques menés par les auteurs montrent que les modèles 2, 5, 6, 8 et 10 sont statistiquement significatifs.

Bilan de la littérature sur l'approche de Yun et Kim

Dans la publication de Shin (Shin, Yun, and Tai Kim 2011), l'auteur effectue un comparatif entre les modèles de Zhang et Muneer et ceux de Yun et Kim pour une configuration de conduit éclairant un parking dans des conditions climatiques coréennes. À l'aide des outils « MBE » et « RMSE »[10], il montre que les modèles de Zhang et Muneer surestiment très largement les performances du conduit de lumière, notamment le modèle 2. A contrario, les modèles de Yun et Kim sont plus adéquats pour la prédiction de ces performances, notamment le modèle 6, et dans les conditions climatiques de la Corée du Sud.

1.1.4. Modèle de Su

Su (Su et al. 2012) a mené une expérimentation sur une cellule munie de 4 conduits de lumière de différents diamètres et longueurs (23 cm courbe de longueur 3,33 m, 45 cm courbe de longueur 3,37 m, 53 cm courbe de longueur 2,57 m et 53 cm droit de longueur 2,84 m) de marque Monodraught. Les conduits courbes ont leur collecteur incliné à 30°. Les mesures ont été réalisées à Nottingham, Royaume-Uni, pour des conditions célestes intermédiaires. Pour mesurer l'éclairement en sortie de conduit, il a mis en place des cubes de volume identique (1 m^3) peints en blanc mat et équipés d'un capteur.

Avant la mesure de l'impact du conduit, il a établi un facteur de calibration, noté CF, correspondant à l'éclairement à l'intérieur de la boite (sans conduit) sur l'éclairement global extérieur.

[10] *« Mean Bias Error » et « Root Mean Square Error »*

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

$$CF = \frac{E_{in}}{E_{G,h}} \tag{36}$$

Il montre que la relation entre les éclairements intérieurs et extérieurs est approximativement linéaire pour une configuration de boite donnée et une réflectivité donnée, indépendamment des conditions de ciel.

Le facteur de calibration CF peut être également utilisé pour calculer le flux lumineux en sortie du conduit pour une configuration d'instrumentation similaire à celle utilisée pour évaluer le CF. En effet, lorsque la boite est équipée du conduit de lumière, le rapport de l'éclairement à l'intérieur de la boite sur l'éclairement moyen en sortie du conduit est égal à CF :

$$CF = \frac{E_{in}}{E_{LP,out}} \tag{37}$$

De cette façon on a :

$$\Phi_{LP,out} = E_{LP,out}.A = \frac{E_{in}}{CF}.A \tag{38}$$

La transmittance du conduit est ainsi évaluée :

$$\tau_{\mathrm{TDGS}} = \frac{E_{LP,out}}{E_{G,h}} = \frac{\Phi_{LP,out}}{E_{G,h}.A} = \frac{E_{in}}{E_{G,h}.CF} \tag{39}$$

Cette équation donne la transmittance d'un conduit de lumière droit avec un dôme horizontal, mais ne fonctionne pas pour un conduit courbe avec le dôme incliné.

Les résultats de son expérimentation montrent que le conduit de lumière ayant un dôme incliné est plus efficace que celui ayant un dôme horizontal du fait que sa surface directement exposée est plus grande, et que l'azimut de la paroi influe. A contrario, pour un ciel clair, il montre que très tôt le matin et en fin d'après-midi, le flux lumineux traversant le conduit de lumière courbe est moindre par rapport au conduit droit, toujours du fait de la surface de dôme directement exposée au soleil. De la même manière, en ciel couvert, le flux lumineux en sortie du conduit courbe est légèrement plus bas.

Su précise que l'équation peut être utilisée pour calculer la transmittance de l'éclairement direct au travers d'un conduit droit. Cependant, pour la partie diffuse, la transmittance dépend principalement du rapport de longueur.

Carter a déterminé expérimentalement la relation entre la transmittance et le rapport de longueur pour un ciel couvert. Cependant, il a constaté une déviation significative des données expérimentales à cause de la légère inégalité de la distribution de la luminance céleste pour un ciel couvert.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Pour pallier ce problème, la CIE[11] a mis en place une équation permettant de prédire la transmittance d'un conduit de lumière sous un ciel couvert, dans lequel il est introduit un paramètre prenant en compte la portion zénithale de ciel couvert. Cette équation a été considérée comme une simple approximation.

Sur la base des travaux de Zhang, Muneer et Kubie, Su propose un modèle mathématique prenant en compte le flux lumineux en sortie du conduit courbe (ses capteurs ne mesurant que des flux lumineux) :

$$\tau_{\mathrm{TDGS}} = \frac{\Phi_{LP,out}}{E_{G,h} \times A} = \left(a_0 + a_1.H_s + a_2.\beta + a_3.\lambda + a_4.H_s.\beta + a_5.H_s.\lambda + a_6.\beta.\lambda + a_7.{H_s}^2.\beta.\lambda + a_8.H_s.\beta^2.\lambda + a_9.H_s.\beta.\lambda^2 + a_{10}.{H_s}^2.\beta^2.\lambda^2\right).{\rho_{LP}}^{\left(b_1.A_p + b_2.\cot H_s + b_3.A_p.\cot H_s\right)} \quad (40)$$

Avec,

$$\beta = |A_s - 180° - a_{coude}| \quad (41)$$

$$\lambda = \frac{E_{G,h}}{E_{G,CIE}} = \frac{E_{G,h}}{S_{evg}} \quad (42)$$

Notons que la hauteur solaire H_s et le paramètre β sont en radians dans l'équation (40).

Dans sa publication (Su et al. 2012) propose une équation définissant l'éclairement horizontal standardisé $E_{G,CIE}$ en fonction de la hauteur solaire. Malheureusement, l'équation est fausse et ne permet pas d'être utilisée en l'état. L'auteur n'identifiant pas de références bibliographiques claires, nous avons recherché dans la littérature les approches définissant l'éclairement horizontal standardisé.

Dans (Kittler, Kocifaj, and Darula 2012), les auteurs présentent le travail mené par Igawa qui introduit un nouveau facteur normalisé appelé l'éclairement global standardisé S_{evg} et définit par :

$$S_{evg} = -36{,}78.Hs^5 + 188{,}79.Hs^4 - 375{,}95.Hs^3 + 306{,}2.Hs^2 + 15{,}47.Hs + 0{,}83 \quad (43)$$

Avec Hs : en [rad]

Nous utiliserons ce paramètre dans l'équation (42) en remplacement de $E_{G,CIE}$. La problématique de ces éclairements est qu'ils sont généralisés et ne correspondent pas aux conditions d'ensoleillement de notre île. En effet, avec une hauteur solaire au zénith ($H_s = 90°$), nous obtenons approximativement S_{evg} égale à 122 klux. Or, nos conditions d'ensoleillement sont largement au-dessus de cette référence en ciel clair, en avoisinant un éclairement global de 200 klux. Il sera probablement nécessaire par la suite de s'orienter vers un autre indice de ciel.

[11] Commission Internationale de l'Éclairage

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Contrairement au modèle de Zhang et Muneer, le modèle de Su prend en compte l'azimut solaire et l'orientation du coude. De même, au lieu d'utiliser l'indice de clarté, il utilise le ratio de l'éclairement $E_{G,h}$ à l'endroit considéré sur la valeur théorique de l'éclairement en ciel clair du CIE. Globalement, cela revient à un indice de clarté car l'éclairement est optimal en ciel clair. Ainsi, nous pouvons à l'aide de ce ratio constater aussi bien un ciel clair qu'un ciel couvert.

Il effectue une comparaison modèle/mesure et constate un résultat très convenable, aussi bien pour des conduits courbes que droits.

Notons que les coefficients utilisés varient en fonction du type de conduit (Tableau 3).

Tableau 3 : Coefficients empiriques du modèle de Su

Coefficients	Conduit courbe	Conduit droit
a_0	0,816107343	1,146112964
a_1	0,565594828	-0,77025075
a_2	-0,00138609	-0,00296564
a_3	0,002749844	0,00053072
a_4	0,005284653	0,016810832
a_5	-0,00280118	0,00637853
a_6	1,39112E-05	3,00E-05
a_7	-0,00016276	-0,0001535
a_8	5,13272E-07	-1,19E-06
a_9	-3,1915E-06	-2,78E-06
a_{10}	5,53944E-08	6,19E-08
b_1	2,094452	
b_2	-0,000035	
b_3	0,083696	

Pour les conduits courbes, la déviation moyenne (mesure par rapport à la prédiction) s'élève à 14,7 % pour un conduit de 23 cm de diamètre, 20,6 % pour un conduit de 45 cm de diamètre et 11,6 % pour le conduit de 53 cm.

Pour les conduits droits, les résultats sont plus corrects en présentant une déviation moyenne de 13 %.

À partir du coefficient de transmission global, nous pouvons obtenir l'éclairement en un point :

$$E_{(x,y,z)} = \frac{I_\theta . \cos(\theta_{(x,y,z)})^3}{H^2} \tag{44}$$

Comme

$$I_\theta = \frac{\Phi_{LP,out}}{\omega} . \cos\theta_{(x,y,z)} \tag{45}$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Alors :

$$E_{(x,y,z)} = \frac{\Phi_{LP,out}.(\cos\theta_{(x,y,z)})^4}{\omega.H^2} \quad (46)$$

Avec,

$$\Phi_{LP,out} = \tau_{\mathrm{TDGS}}.E_{G,h}.\pi.R^2 \quad (47)$$

On obtient :

$$E_{(x,y,z)} = \frac{\tau_{\mathrm{TDGS}}.E_{G,h}.\pi.R^2.(\cos\theta_{(x,y,z)})^4}{\omega.H^2} \quad (48)$$

1.1.5. Modèle de Shin

Shin (Shin, Yun, and Kim 2012) a développé une méthode de prédiction basée sur les modèles existants de Yun et Kim et sur des données expérimentales. Son expérimentation a eu lieu en Corée du Sud avec des conduits de lumière dont le rapport de longueur était de 2,0 et de 5,2. Le modèle développé considère la hauteur solaire et l'indice de clarté du ciel comme facteur climatique local.

Le modèle de Shin s'écrit de la façon suivante :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(0{,}2402 + 0{,}002411.H_s + 0{,}2294.k_t)\cdot e^{-0{,}114\,A_p}.\pi.R^2.(\cos\theta_{(x,y,z)})^4}{H^2} \quad (49)$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

1.2. **Approche théorique : Fonction de transmission lumineuse**

1.2.1. Théorie

1.2.1.1. La propagation d'un rayon

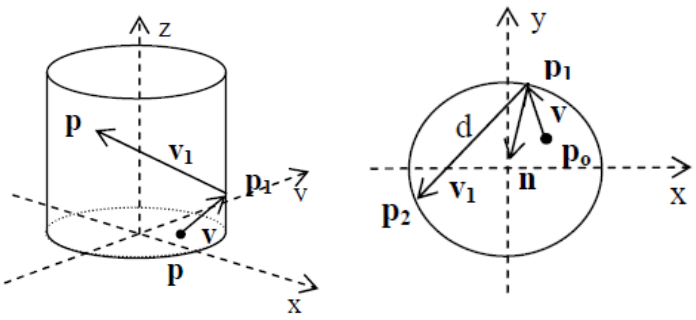


Figure 39 : Modèle de conduit de lumière cylindrique avec des coordonnées rectangulaire (Chirarattananon et al. 2010)

Nous considérons un rayon entrant dans un conduit de lumière droit (Figure 39). Le rayon lumineux entre à la position P_0. Le vecteur v représente le chemin parcouru par le rayon. Le rayon atteint le point P_1 à la surface du conduit, et sa réflexion atteint ensuite le point P_2. La longueur de projection du vecteur V_1, sur le plan x-y, est nommée d. Ce vecteur est un vecteur de réflexion.

1.2.1.2. L'application du tracé de rayon pour un conduit droit

La méthode du lancer de rayon (appellation anglo-saxonne : *raytracing*) est basée sur le tracé de la réflexion spéculaire des rayons individuels. Ce procédé a été appliqué à des configurations de conduits de lumière en considérant une multitude de surfaces planes.

Dans la méthode du lancer de rayon, chaque rayon individuel est tracé dans une direction donnée. Dès qu'il rencontre une surface, il est réfléchi. Au point de rencontre avec une surface, une partie du rayonnement électromagnétique du rayon peut être absorbé, et une autre partie est réfléchie de façon spéculaire. Il pourrait y avoir réfraction ou réflexion diffuse, et d'autres comportements de réflexion directionnelle en fonction des propriétés de la surface.

En général, un nombre suffisamment grand de rayons doivent être utilisés pour « saisir » les caractéristiques de transmission. Ces propriétés résultent de la direction des rayons entrants, de la configuration du conduit et des différentes propriétés de surface.

Globalement, la méthode est basée sur une approche géométrique. Le point d'entrée du rayon est situé sur une surface que l'on nommera surface d'entrée. Ce point est projeté dans une direction suivant un vecteur v_0 selon un angle d'incidence bien défini (fonction de la hauteur et l'azimut solaire). Celui-ci atteint la surface du conduit en un point nommée p_1 (selon l'appellation de la

section précédente). Le rayon est ensuite réfléchi spéculairement sur la surface selon un vecteur noté v_1. La normale à ce vecteur est notée n_1. Le point p_1 se trouve le long de la ligne parallèle au vecteur v_0 (sur la surface du conduit) et peut être obtenu à partir de l'équation suivante :

$$p_1 = p_0 + t_0 \times v_0 \tag{50}$$

Avec, t_0 scalaire

Le point p_1 se trouve sur la surface cylindrique de façon à ce que ses coordonnées x et y suivent l'équation de plan de la surface cylindrique :

Pour une section cylindrique :

$$\mathrm{S}: \ x^2 + y^2 - r^2 \tag{51}$$

Pour une section torique :

$$\mathrm{S}: \ x^2 + y^2 + z^2 + R^2 - 2R\sqrt{x^2 + y^2} - r^2 \tag{52}$$

L'équation de $p_1$et les équations de surface permettent de former 4 équations pour les 4 inconnues (3 coordonnées de v_0 et la valeur scalaire de t_0). Une fois les coordonnées du point p_1 connues, le vecteur normal à la surface en p_1, noté n_1, peut être calculé à partir des relations suivantes :

Pour une section cylindrique :

$$\mathrm{n} = -\frac{x}{r}i - \frac{y}{r}j \tag{53}$$

Pour une section torique :

$$\mathrm{n} = \left[\left(1 - \frac{R}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)^2 (x^2 + y^2) + z^2\right]^{-\frac{1}{2}} \left[-x\left(1 - \frac{R}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)i - y\left(1 - \frac{R}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)j - zk\right] \tag{54}$$

En appliquant les règles liées à la réflexion spéculaire, nous pouvons calculer les éléments suivants :

- L'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence :

$$|v_1 \cdot n_1| = \cos\theta_{(x,y,z)} = |v_0 \cdot n_1| \tag{55}$$

- L'angle entre v_1 et v_0 est le double de l'angle d'incidence :

$$|v_1 \cdot v_2| = \cos 2\theta_{(x,y,z)} \tag{56}$$

- Le produit vectoriel de n_1 et v_1 est normal à n_1 :

$$n_1 \cdot (v_1 \times n_1) = 0 \tag{57}$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Ces équations peuvent être utilisées pour obtenir le vecteur v_1. Lorsque le rayon réfléchi atteint le point p_2, la procédure précédente est de nouveau appliquée. Cette opération est répétée jusqu'à ce que le rayon atteigne la surface de sortie imaginaire (le diffuseur).

Lorsque le rayon atteint la surface imaginaire entre une section cylindrique et une section torique, le point conjonctif est identifié comme étant le point d'entrée dans le coude.

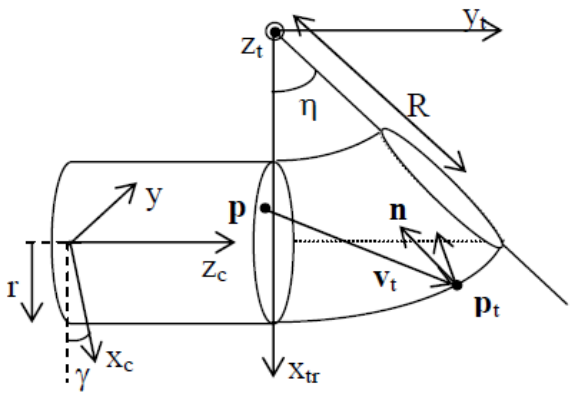


Figure 40 : Propagation d'un rayon dans un coude (Chirarattananon et al. 2010)

Pour le coude, la distance entre le centre du coude et le centre du conduit est R, alors que le rayon du tube (considéré comme identique au rayon du cylindre et connecté à toutes les sections du système) est r (Figure 40).

Dans la figure précédente (X_C, Y_C, Z_C) forme les coordonnées rectangulaires du cylindre. Le centre du coude est confondu avec Z_{tr}. Le centre du tube se trouve sur le plan formé par les coordonnées X_{tr} et Y_{tr}.

La coordonnée du coude est mise en rotation à partir de la coordonnée du cylindre par un angle γ. Elle est translatée également par rapport à la coordonnée du cylindre.

Le rayon émergent dans le coude ou de toute autres sections est tracé de la même manière que celle décrite dans le cas du cylindre. Pour chaque rayon, une évaluation du nombre de réflexions au sein de chaque section est utilisée pour calculer la perte en transmission. À la dernière section du conduit de lumière, la projection de chaque rayon vers la sortie est calculée et additionnée pour former finalement le flux lumineux de la conduite.

1.2.2. Fonction de Zastrow et Wittwer

En 1987, Zastrow et Wittwer ont publié la première étude décrivant la performance des conduits de lumière tubulaire circulaire et triangulaire (Zastrow and Wittwer 1987). Ils mirent en place une équation permettant de décrire la transmission lumineuse à l'aide d'un conduit en fonction des paramètres suivant : l'angle d'incidence de la lumière en entrée, le rapport de longueur et la réflectivité du conduit.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Zastrow et Wittwer définissent la longueur moyenne de projection des vecteurs de réflexion sur le plan x-y comme étant D_{eff}. Si la longueur du conduit est L, et si l'angle d'incidence du rayon lumineux est υ, alors le nombre approximatif de réflexions du rayon sur la surface, noté n vaut :

$$n \cong \frac{L}{\frac{D_{eff}}{\tan \upsilon}} = \frac{L \times \tan \upsilon}{D_{eff}} \tag{58}$$

Avec $\upsilon = 90 - H_s$

Les auteurs récupèrent la valeur de D_{eff} à partir de la longueur moyenne des vecteurs projetés :

$$D_{eff} = \frac{\pi \times D_{diam}}{4} \tag{59}$$

La fonction de transmission lumineuse obtenue pour les rayons directs traversant une section circulaire vaut :

$$T_{zastrow} = 2 \int_0^{\pi/2} \cos \theta_{(x,y,z)} \times {\rho_{LP}}^{\frac{L \times \tan \upsilon}{D_{eff}}} \times \sin \theta_{(x,y,z)} \, d\theta \tag{60}$$

$$T_{zastrow} = {\rho_{LP}}^{N} = {\rho_{LP}}^{\frac{L \times \tan \upsilon}{D_{eff}}} \tag{61}$$

La fonction de transmission $T_{zastrow}$ utilise la valeur de n, qui n'est pas obligatoirement un nombre entier. Il a été conçu comme une fonction d'approximation pour les rayons qui sont collimatés dans une direction (réflexion monodirectionnelle, ou spéculaire selon les lois de l'optique géométrique). Il est également supposé que D_{eff} se rapporte à la moyenne des rayons.

Les auteurs prennent comme hypothèse que l'angle d'incidence et la longueur d'onde du rayon lumineux entrant sont indépendants de la réflectivité du conduit de lumière. La fonction ne considère pas les propriétés du collecteur (entrée) et du diffuseur (sortie).

Zastrow précise que l'utilisation de D_{eff} est bien évidemment une approximation, et que pour être plus précis, il serait nécessaire de calculer la propagation de chaque rayon. Cela offre tout de même une simplification considérable du calcul, et permet d'obtenir l'efficacité de transmission lumineuse.

L'efficacité de l'approche a été évaluée expérimentalement sur la base d'un conduit triangulaire à échelle réduite. L'auteur considère que si son approche est validée pour une section triangulaire, elle le sera pour la section circulaire. Les paramètres du conduit expérimenté sont les suivants : 1,2 m de longueur, section triangulaire équilatérale de 10 cm de côté, et une réflectivité de 0,95. Les auteurs obtiennent une transmission lumineuse théorique de 0,296 contre 0,32 par l'expérimentation.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Bilan de la littérature sur l'approche de Zastrow et Wittwer

Shin et Swift soulignent que ce modèle ne tient pas compte du collecteur ou du diffuseur et est conçu pour des conduits circulaires droits (Shin, Yun, and Tai Kim 2011; Swift and Smith 1995). De plus, il a été validé pour des rapports de longueur faibles, ainsi que pour des angles d'incidence faibles (Shin, Yun, and Tai 2011; Swift and Smith 1995). Shin (Shin, Yun, and Kim 2012) précise que le modèle de Zastrow et Wittwer n'est valide que pour les conditions géométriques et optiques du guide utilisées pour la validation. En dehors de cette gamme de paramètres, il ne permettrait pas de prédire les performances réelles du conduit de lumière.

Su a également étudié ce modèle (Su et al. 2012). Il précise que l'équation peut être utilisée pour calculer la transmittance de l'éclairement direct au travers d'un conduit droit. Cependant, pour la partie diffuse, la transmittance dépend principalement du rapport de longueur.

1.2.3. Fonction de Swift et Smith

Pour Swift et Smith, le calcul de la transmission lumineuse n'est qu'une approximation (Chirarattananon et al. 2010). Les auteurs proposent un correctif du modèle de Zastrow et Wittwer en prenant en compte la surface du conduit (Swift and Smith 1995). Ils utilisent une fonction continue pour approximer la partie entière du nombre de réflexions et offrent la fonction suivante pour évaluer la transmission lumineuse d'un conduit :

$$T = \frac{4}{\pi}\int_{D_{diam}=0}^{1} \frac{{D_{diam}}^2}{\sqrt{1-{D_{diam}}^2}} \cdot {\rho_{LP}}^{Int\left[\frac{A_p \cdot \tan v}{D_{diam}}\right]} \cdot \left(1-(1-\rho_{LP}) \cdot \left(\frac{A_p \cdot \tan v}{D_{diam}} - Int\left[\frac{A_p \cdot \tan v}{D_{diam}}\right]\right)\right) dD_{diam} \qquad (62)$$

Avec, Int [x] indique la partie entière de x.

Cette fonction représente la transmission moyenne des rayons lumineux qui sont réfléchis dans une direction (réflexion monodirectionnelle, ou spéculaire selon les lois de l'optique géométrique). L'intégrale n'est pas intégrable analytiquement. Les auteurs ont également validé leur fonction expérimentalement. En outre, pour les surfaces de conduit qui possèdent une réflectivité spectrale sensible à certaines longueurs d'onde des rayons lumineux, les auteurs montrent que le conduit de lumière peut provoquer une distorsion spectrale de la lumière transmise en raison de réflexions non uniformes.

Bilan de la littérature sur l'approche de Swift et Smith

Shin dans son étude comparative de modèle précise que le modèle de Swift et Smith offre une précision accrue dans la prédiction des performances des conduits de lumière simples, et est idéal pour une évaluation initiale du dispositif (Shin, Yun, and Tai Kim 2011).

En 2007, Dutton et Shao (Dutton and Shao 2007) assemblent des surfaces rectangulaires longues et fines pour former le cylindre d'un conduit de lumière droit. Ils simulent la transmission

lumineuse en ayant recours au logiciel PHOTOPIA. Les auteurs montrent que les résultats de la simulation correspondent très bien avec ceux calculés à partir de la fonction de transmission de Swift et Smith.

Les auteurs étudient également la transmission de l'éclairement direct du soleil et de l'éclairement diffus céleste avec des différentes hauteurs solaires pour des conditions de ciel clair. En comparant toujours avec l'équation de Swift et Smith, ils constatent que les résultats coïncident.

Cependant, Dutton et Shao ne précisent pas la façon dont la fonction de Swift et Smith est appliquée pour l'éclairement céleste en condition de ciel clair, puisque cette fonction de transmission n'est applicable qu'aux rayons allant dans une direction donnée.

De plus, une comparaison entre des données de la simulation, pour un ciel clair avec une hauteur solaire fixe, et des résultats expérimentaux montrent que les résultats divergent. Les auteurs justifient cela par des incertitudes des valeurs de plusieurs paramètres et de la différence entre l'éclairement céleste calculé à partir de conditions météorologiques hypothétiques et l'éclairement céleste réellement mesuré.

1.2.4. Modèle de Tsangrassoulis

Une approche plus théorique a été proposée par Aris Tsangrassoulis (Jenkins and Muneer 2004). Son approche nécessite que l'utilisateur ait connaissance des propriétés optiques du collecteur, du conduit et du diffuseur. En effet, la méthode se base sur des données existantes (données du constructeur) pour les valeurs de transmittance des 3 éléments. Une hypothèse a été formulée dans laquelle il est considéré que l'émetteur produit une distribution de l'éclairement diffus. Pour estimer la luminance de l'émetteur, l'équation suivante est utilisée :

$$Luminance = \frac{E_{LP,out} \times \tau_{diffuseur}}{\pi} \tag{63}$$

L'éclairement $E_{(x,y,z)}$ en n'importe quel point situé directement sous le diffuseur peut être déterminé à partir de l'équation suivante :

$$E_{ss,diff} = \frac{\pi \,.\, Luminance \,.\, \mathrm{R}^2}{H^2 + \mathrm{R}^2} \tag{64}$$

Si le point d'étude n'est pas directement sous le diffuseur et est situé à une certaine distance horizontale x du point, alors l'expression devient :

$$E_x = 0{,}5\ \pi\ Luminance\ \times \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right) \tag{65}$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Avec,

$$F_1 = 1 + \frac{H^2}{x^2} - \frac{R^2}{x^2} \tag{66}$$

$$F_2 = \sqrt{Z^2 - 4\left(\frac{\mathrm{R}^2}{x^2}\right)^2} \tag{67}$$

Et

$$\mathrm{Z} = 1 + \frac{H^2 + \mathrm{R}^2}{\mathrm{x}^2} \tag{68}$$

L'avantage de cette approche est qu'elle est applicable à n'importe quelle configuration de conduit droit (Jenkins and Muneer 2004).

1.2.5. Modèle de Kocifaj

En 2008 (Kocifaj, et al. 2008), Kocifaj publie un modèle analytique de propagation lumineuse au sein d'un conduit droit basé sur une méthode optimisée de tracé de rayon. Le modèle a été implémenté dans le programme HOLIGILM. Celui-ci utilise, comme source lumineuse extérieure, les ciels standardisés par la CIE.

Pour les tubes équipés de coudes, les rayons propagés depuis l'entrée sont déviés une ou plusieurs fois jusqu'à la sortie avec un pourcentage de perte.

En 2009, Kocifaj (Kocifaj 2009) présente une approche simplifiée de sa théorie testée sur les conduits équipés d'un diffuseur Lambertien pour une application sur un diffuseur transparent. Il précise que la théorie développée au sein de son code de calcul est stable, et permet facilement d'incorporer d'autres dispositifs de diffuseur.

En 2010, Kocifaj met en place un nouveau modèle basé sur une approche semi-analytique pour prédire la propagation de la lumière au sein d'un conduit courbe dont les surfaces intérieures sont hautement réfléchissantes (type MLP) toujours en se basant sur la méthode de lancer de rayon (Kocifaj et al. 2010). Darula (Darula et al. 2010) précise que les dispositifs équipés d'un traitement spécifique (film structurel prismatique ou conduit de lumière avec plusieurs diffuseurs) ne peuvent pas être traités. Ces techniques additionnelles engendreraient une modification du calcul angulaire des rayons, et nécessiteraient une vérification de la procédure de tracé de rayon.

La distribution lumineuse des ciels standardisés suit la position du soleil. En outre, il est nécessaire de calculer les valeurs de la luminance absolue. La part du rayonnement direct dépend de la turbidité atmosphérique (trouble lié aux particules en expansion) et de la diffusion de la lumière à travers les particules et aérosols contenus dans l'air (Darula et al. 2010; Kocifaj, Darula, and Kittler 2008).

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

La relation entre l'éclairement direct mesuré au sol et la luminance du soleil peut se définir par l'équation suivante :

$$L_{(\upsilon)} = \frac{E_{b,h}}{\cos \upsilon} \times \frac{1}{2\pi(1 - \cos \Re_{sun})} \tag{69}$$

Avec $\frac{E_{b,h}}{\cos \upsilon}$, éclairement extérieur reçu par un plan normal aux rayons incidents directs

L'éclairement sur le plan utile peut être calculé de la façon suivante :

$$E_{(x,y,z)} = \frac{\tau_{\text{diffuseur}}}{\pi} \int_0^R r_0 \, dr_0 \int_0^{2\pi} \frac{(\cos \theta_{as,\gamma_0,\varkappa_0})^2}{D^2_{(\theta,as,\gamma_0,\varkappa_0)}} \, d\varphi \times \int_0^{\pi/2} \cos \upsilon \, . \sin \upsilon \, d\upsilon \int_0^{2\pi} L_{diff_{\upsilon,\varphi,\gamma_0,\varkappa_0}} \, . \, p_{D_{\upsilon,\varphi,\theta,as}} \tag{70}$$

1.2.6. Modèle de Mohelnikova

Dans sa publication, Mohelnikova (Mohelnikova 2008) reprend une méthode permettant de déterminer l'efficacité des conduits de lumière à partir du flux lumineux. Il utilise ce paramètre pour évaluer le potentiel de sauvegarde énergétique du dispositif comparé à un éclairage artificiel.

Le flux lumineux arrivant sur le dôme avec un angle d'incidence $\Phi_{Collecteur,\upsilon}$ est une entrée dans la formule permettant de déterminer le flux lumineux à la sortie du conduit de lumière. La formule suivante permet de déterminer ce flux :

$$\Phi_{LP,out}(\upsilon) = \Phi_{Collecteur,\upsilon} \cdot f_{loss,collecteur} \cdot f_{loss,diffuseur} \cdot f_{loss,obstacles} \cdot \rho_{LP}^{\frac{L \times \tan \upsilon}{D_{diam}}} \tag{71}$$

Le rendement du conduit de lumière est ensuite évalué à l'aide de la formule suivante :

$$\tau_{TDGS} = \frac{\Phi_{LP,out}}{\Phi_{Collecteur,\upsilon}} \tag{72}$$

Nous en déduisons donc que le rendement peut être obtenu par :

$$\tau_{TDGS} = f_{loss,collecteur} \cdot f_{loss,diffuseur} \cdot f_{loss,obstacles} \cdot \rho_{LP}^{\frac{L \times \tan \upsilon}{D_{diam}}} \tag{73}$$

L'efficacité du conduit de lumière peut être également approchée en rapportant la luminance au diffuseur sur la luminance du ciel :

$$\tau_{TDGS} = \frac{\Phi_{LP,out}}{\Phi_{Collecteur,\upsilon}} \cong \frac{L_{diffuseur}}{L_{sky}} \tag{74}$$

Avec,

$$L_{diffuseur} = \frac{E_{diffuseur}}{\pi} \tag{75}$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Et

$$E_{diffuseur} = \frac{d\,\Phi_{LP,out}}{d\,A_{diffuseur}} \tag{76}$$

1.2.7. Diverses autres approches théoriques

Les approches développées à la suite s'orientent vers d'autres formes géométriques, ou bien vers d'autres finalités telles que l'estimation de la réflectivité du conduit. S'éloignant de l'objectif de ces travaux, ces études sont abordées à la suite de façon succincte.

1.2.7.1. Approche de Teijido

En 1998, Teijido (Teijido et al. 1998) introduit une approche aux éléments finis pour décrire la puissance transmise au travers d'un volume choisi sur la base du lancer de rayon. Cette méthode donne une bonne estimation du comportement macroscopique du conduit de lumière.

1.2.7.2. Approche de Van Derlofske and Hough

En 2004, Van Derlofske et Hough ont présenté un modèle analytique basé sur la propagation du flux lumineux dans un conduit de lumière de section transversale rectangulaire (Van Derlofske and Hough 2004).

1.2.7.3. Approche de Koshel et Gupta

En 2005, Koshel et Gupta ont développé un jeu de paramètres permettant de décrire la forme générale d'une section de conduit de lumière plan. Ces paramètres incluent l'épaisseur, le rayon de courbure, l'indice de réfraction, et un rapport de l'ensemble de ces paramètres. Cette étude peut être utile pour automatiser le développement d'une géométrie particulière de conduit de lumière au sein d'une analyse optique numérique (Koshel and Gupta 2005).

1.2.7.4. Approche de Kómar et Darula

En 2012, Kómar et Darula (Kómar and Darula 2012) publient des résultats théoriques sur l'efficacité de transmission d'un conduit de lumière à partir de la méthode de lancer de rayon. Ils comparent leurs résultats à une étude expérimentale en condition météorologique contrôlée (ciel artificiel). L'objectif étant de proposer une méthode pour déterminer la réflectivité du conduit intérieur et de prouver mathématiquement que l'efficacité de transmission du conduit est différente pour plusieurs types standardisés de ciel couvert.

La méthode théorique de détermination de l'efficacité du dispositif est basée sur le calcul du flux lumineux entrant (flux lumineux extérieur) et sortant (flux lumineux intérieur) du conduit. Le collecteur et le diffuseur ne sont pas considérés dans leur étude.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Les auteurs précisent que la réflectivité du conduit est un paramètre important qui subit des variations en fonction des conditions dans lesquelles se trouve le conduit (pollution, vieillissement, etc.). Les valeurs indiquées par les fabricants sont issues d'expérimentation. Cependant, cette valeur reste nominale, et devrait, normalement, être vérifiée. C'est la raison pour laquelle les auteurs ont utilisé un ciel artificiel pour déterminer la valeur de ρ_{LP}.

Les auteurs précisent que la lumière reçue à des angles zénithaux faibles (donc hauteur solaire haute) a une plus grande intensité et moins de réflexion à l'intérieur du tube.

De plus, les calculs et les mesures effectuées sous deux différents ciels artificiels montrent que les analyses théoriques utilisant la réflectivité du conduit comme constante ne suffisent pas pour permettre une prédiction fine de l'efficacité du conduit de lumière. En effet, ils montrent que la réflectivité du conduit dépend de l'angle du rayon pénétrant et frappant la surface intérieure du conduit.

1.2.7.5. Approche de Zhu

En 2013, Zhu (Zhu, et al. 2013) et al. développent une méthode analytique basée sur une distribution gaussienne, permettant d'évaluer la propagation des rayons lumineux via un conduit de lumière creux polygonal de n côtés. Les résultats de leur étude montrent que l'uniformité de la distribution lumineuse varie avec les paramètres optiques et structurels du conduit de lumière.

1.2.7.6. Approche de Chirarattananon

En 2010, Chirarattananon et al. (Chirarattananon et al. 2010) étudient la transmission de l'éclairement direct et diffus au sein de conduits de lumière droits et courbes de type MLP. Ils modélisent et simulent les éclairements séparément puis ensemble. Les auteurs proposent une alternative au modèle établi par Zastrow et Wittwer en 1986 et réexaminé en 1995 par Swift et Smith. Leur approche théorique diffère à la fois en termes de procédure de calcul de la transmission des composants de la lumière du jour, et de la façon dont sont utilisés les éclairements. Les sections toriques sont utilisées pour modéliser les coudes dans le conduit cylindrique.

Chirarattananon propose une méthode théorique de lancer de rayon pour évaluer la transmission lumineuse d'un conduit de lumière équipé de coude, basé uniquement sur la réflexion spéculaire. Ils excluent le collecteur et le diffuseur.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

1.2.7.7. Approche de Mankova

En 2009, Mankova (Maňkova et al. 2009) présente les résultats de leur étude expérimentale concernant l'évaluation de l'efficacité d'un conduit de lumière vertical. Pour se faire, elle utilise deux méthodes : l'une pour évaluer la transmission lumineuse du tube, l'autre pour prédire la répartition du flux lumineux en sortie de conduit.

Pour la transmission lumineuse, le programme Radiance utilisant le *photomaping* sert de vérification.

Pour la répartition lumineuse, la méthode de cavité zonale est choisie (ou *zonal cavity method*). Également appelée « *lumen method* », elle permet de calculer l'éclairement sur un plan utile sur la base de facteur d'utilisation défini comme étant le rapport entre le flux lumineux total « tombant » sur un plan de travail et le flux lumineux sortant de la source lumineuse. Chaque surface de la pièce réfléchit uniformément la lumière dans l'ambiance selon la loi de Lambert.

Cette méthode offre l'avantage de sa simplicité, mais ne permet d'obtenir qu'un éclairement moyen sur le plan de travail sur la base de la transmittance du conduit de lumière calculée à partir de l'équation élaborée par simulation à l'aide d'une régression non linéaire :

$$\tau_{\mathrm{TDGS}} = -0{,}26152 + 0{,}17333 \,.\, \sin(\ln(5{,}82691 \,.\, D_{diam})) + 0{,}377 . e^{\rho_{LP}{}^{8}} + 0{,}07899 \,.\, \sin L \tag{77}$$

Mankova précise que cette équation est valable pour les conduits verticaux droits avec un diamètre inférieur à 60 cm.

À partir de cette donnée, Mankova propose d'utiliser la méthode Lumen :

$$E_{in} = \frac{N_{LP} \,.\, \pi \,.\, D_{diam} \,.\, \tau_{\mathrm{TDGS}} \,.\, UF}{\mathrm{A_{wp}}} \tag{78}$$

1.3. **Approche généralisée de la CIE**

Du fait de la présence de nombreuses méthodes et procédures de calcul des performances des conduits de lumière, la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) a missionné un comité technique qui a synthétisé les nombreuses études menées sur le thème pour en ressortir une méthode de calcul standardisée basée sur des principes fondamentaux de physique (Al-Marwaee and Carter 2006). Ce modèle se base sur le TTE (*Tube-Transmission Efficiency*), à savoir l'efficacité de transmission du conduit, qui revient à la notation à τ_{tube}.

Pour un conduit donné de longueur et de diamètre optiquement équivalent, le TTE peut être déterminé comme ceci :

$$\mathrm{TTE} = \tau_{tube} = \frac{\mathrm{e}^{\varepsilon}}{\sqrt{1-\varepsilon}} \tag{79}$$

Avec,

$$\varepsilon = A_p \,.tan\ \upsilon\ .ln\,\rho_{LP} \tag{80}$$

Ainsi l'efficacité du conduit τ_{TDGS} peut être calculée comme ceci :

$$\tau_{TDGS} = \tau_{tube}\ .\tau_{collecteur}\,.\tau_{diffuseur}\,.MF \tag{81}$$

L'éclairement moyen intérieur sur un plan de travail E_{in} peut être déterminé en utilisant la « *lumen design method* » qui prend en compte les composants direct et diffus :

$$E_{in} = \frac{N_{LP}\,.\tau_{TDGS}\,.\pi.r^2.E_{G,h}\,.UF}{A_{wp}} \tag{82}$$

Ainsi, l'efficacité global du système muni d'un collecteur passif, noté τ_{TDGS}, peut être déterminée à partir des équations suivantes :

$$\tau_{TDGS} = \frac{SDTC}{A} \tag{83}$$

Avec

$$SDTC = \frac{\phi_{LP,out}}{E_{input}} \tag{84}$$

En toute logique, l'efficacité du conduit dépend de l'efficacité des 3 composants qui le définissent:

$$\tau_{TDGS} = \tau_{collecteur}\,.\ \ \tau_{tube}\,.\tau_{diffuseur} \tag{85}$$

τ_{TDGS} est une valeur résultante de la combinaison appropriée de l'efficacité du système relative à l'éclairement direct $\tau_{dir_{TDGS}}$ et diffus $\tau_{diff_{TDGS}}$, d'où :

$$\tau_{TDGS} = \frac{E_{b,h}\,.\tau_{dir_{TDGS}} + E_{d,h}\,.\tau_{diff_{TDGS}}}{E_{G,h}} \tag{86}$$

Notons que $\tau_{dir_{TDGS}}$ dépend de la hauteur solaire Hs pour ciel clair et ciel intermédiaire. Cependant, pour ciel couvert, l'efficacité du système relative au direct ne dépend plus de la hauteur solaire.

L'efficacité du collecteur est normalement indiquée dans les documentations du constructeur. Celle-ci est évaluée à partir de l'efficacité relative au direct et au diffus. Elle correspond au rapport des flux avec ou sans collecteur, les flux étant déterminés de manière calculatoire ou par mesure :

$$\tau_{dir_{Collecteur}} = \frac{\phi_{LP,out,dir_{avec\ collecteur}}}{\phi_{LP,out,dir_{sans\ collecteur}}} \tag{87}$$

$$\tau_{diff_{Collecteur}} = \frac{\phi_{LP,out,diff_{avec\ collecteur}}}{\phi_{LP,out,diff_{sans\ collecteur}}} \tag{88}$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Ainsi, nous obtenons pour l'efficacité globale du collecteur :

$$\tau_{collecteur} = \frac{E_{b,h} \cdot \tau_{dir_{Collecteur}} + E_{d,h} \cdot \tau_{diff_{Collecteur}}}{E_{G,h}} \quad (89)$$

Au vu de la multitude de configurations possibles pour le conduit, son efficacité est évaluée à partir d'équations dépendantes de ses paramètres géométriques, optiques et du type de ciel. La formule de l'efficacité en ciel dégagé a été développée par Zastrow et Wittwer (Zastrow and Wittwer 1987). Celle pour le ciel couvert est issue des publications du CIE (Al-Marwaee and Carter 2006) que l'on peut également trouver sous le nom de TTE.

Pour un ciel dégagé ($k_t \geq 0,65$) :

$$\tau_{\text{tube}} = \rho_{LP}^{\frac{L \times \tan \upsilon}{D_{eff}}} \quad (90)$$

Pour un ciel couvert ($k_t < 0,65$) :

$$TTE = \tau_{\text{tube}} = \frac{e^{A_p . \tan \upsilon \, . \ln \rho_{LP}}}{\left[1 - A_p . \tan \upsilon \, . \ln \rho_{LP}\right]^{0.5}} \quad (91)$$

Avec,

$$D_{eff} = \frac{D_{diam} \times \pi}{4} \quad (92)$$

Su précise que cette équation prend en compte la portion zénithale de ciel couvert. Mais cette équation ne reste qu'une simple approximation (Su et al. 2012).

Vis-à-vis des performances du diffuseur, l'efficacité de celui-ci est à récupérer dans la documentation du constructeur (si indiquée) :

$$\eta_{diffuseur} = \tau_{diffuseur} \quad (93)$$

Ainsi, l'efficacité globale du conduit de lumière peut être ainsi déterminée. L'éclairement global sur un plan de travail se détermine à partir des équations publiées par le CIE (sur la base de « *lumen design method* ») :

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{E_{in}}{E_{G,h}} = \frac{N_{LP} \cdot \tau_{TDGS} \cdot A \cdot UF}{A_{wp}} \quad (94)$$

D'où :

$$E_{in} = \frac{N_{LP} \cdot \tau_{TDGS} \cdot A \cdot UF \cdot E_{G,h}}{A_{wp}} \quad (95)$$

Notons que ce type de calcul d'éclairement donne l'éclairement moyen sur le plan de travail. Il est plus intéressant de travailler, dans notre cas, avec la formule du cosinus quadratique donnant l'éclairement en un point particulier. C'est ce qui a été introduit dans le code de calcul élaboré, à savoir :

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

$$E_{(x,y,z)} = \frac{\tau_{TDGS} \,.\, E_{G,h} \,.\, \pi \,.\, R^2 \,.\, (\cos\theta_{(x,y,z)})^4}{\omega \,.\, H^2} \,.\, UF \tag{96}$$

Nous intégrons à l'équation le « UF », facteur d'utilisation propre au modèle du CIE. Il est déterminé à l'aide d'un tableau en fonction du de l'indice du local RI et de la réflectivité des parois.

Le paramètre *Room Index* (i.e. indice du local) est un paramètre connu en éclairagisme. Il peut être évalué à partir de l'équation suivante :

$$RI = \frac{L_{pièce} \,.\, W_{pièce}}{H.\,(L_{pièce} + W_{pièce})} \tag{97}$$

Ce modèle est prévu pour des conduits de diamètre inférieur à 60 cm. Il présente l'avantage de pouvoir être couplé à de l'éclairage artificiel (Maňková et al. 2009)

Dans sa publication, Al Marwaee présente des tableaux indiquant les valeurs des facteurs présentés dans les modèles CIE (TTE en Tableau 4, $f_{loss,conduit_{droit}}$ en Tableau 5, UF en Tableau 6).

Tableau 4 : Valeurs de TTE pour un conduit avec une réflectivité de 90,5%

Longueur	Diamètre (m)									
	0,25		0,375		0,53		0,65		0,9	
	TTE	L/D	TTE	L/D	TTE	L/D	TTE	L/D	TTE	L/D
0,25	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	0,47	1,00	0,38	1,00	0,28
0,5	0,99	2,00	0,99	1,33	1,00	0,94	1,00	0,77	1,00	0,56
1	0,98	4,00	0,99	2,67	0,99	1,89	0,99	1,54	1,00	1,11
2	0,97	8,00	0,98	5,33	0,98	3,77	0,99	3,08	0,99	2,22
3	0,95	12,00	0,97	8,00	0,98	5,66	0,98	4,62	0,97	3,33
4	0,93	16,00	0,95	10,67	0,97	7,55	0,97	6,15	0,98	4,44
5	0,92	20,00	0,94	13,33	0,96	9,43	0,97	7,69	0,98	5,56
6	0,90	24,00	0,93	16,00	0,95	11,32	0,96	9,23	0,97	6,67
8	0,87	32,00	0,91	21,33	0,94	15,09	0,95	12,31	0,96	8,89
10	0,84	40,00	0,89	26,67	0,92	18,87	0,94	15,38	0,95	11,11
12	0,82	48,00	0,87	32,00	0,91	22,64	0,92	18,46	0,94	13,33
14	0,79	56,00	0,85	37,33	0,89	26,42	0,91	21,54	0,94	15,56
15	0,78	60,00	0,84	40,00	0,89	28,30	0,91	23,08	0,93	16,67

Tableau 5 : Longueur équivalente de conduit droit présentant des pertes optiques similaires à un conduit courbe

Angle du coude	Diamètre du conduit (m)			
	0,25	0,375	0,53	0,65
30°	1,2	1,3	1,2	1,0
60°	2,4	2,4	2,1	1,8
90°	3,2	3,1	2,7	2,4

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

L'intégration de ce tableau dans un code de calcul peut être faite en le retranscrivant sous forme d'équation :

$$L_{eq} = a \times \ln(\alpha_{LP}) + b \tag{98}$$

Avec, $a = 11{,}888.{D_{diam}}^3 - 14{,}974.{D_{diam}}^2 + 4{,}4056.D_{diam} + 1{,}4596$

$b = -36{,}778.{D_{diam}}^3 + 41{,}315.{D_{diam}}^2 - 9{,}2107.D_{diam} - 4{,}6789$

Tableau 6 : Facteurs d'utilisation

Room index (Indice du local)	Coefficient de réflexion du plafond (%)	Coefficient de réflexion du sol ou du plan de travail = 10 %				Coefficient de réflexion du sol ou du plan de travail = 30 %			
		Coefficient de réflexion des murs				Coefficient de réflexion des murs			
		50%	30%	10%	0%	50%	30%	10%	0%
0,8	70	0,51	0,43	0,37	0,34	0,54	0,44	0,37	0,35
	50	0,49	0,42	0,36	0,34	0,52	0,43	0,37	0,35
	30	0,48	0,41	0,36	0,34	0,50	0,42	0,37	0,34
1,0	70	0,57	0,49	0,43	0,40	0,61	0,51	0,44	0,41
	50	0,55	0,48	0,42	0,40	0,58	0,50	0,43	0,41
	30	0,54	0,47	0,42	0,40	0,56	0,49	0,43	0,40
1,3	70	0,63	0,55	0,49	0,46	0,68	0,59	0,51	0,48
	50	0,61	0,54	0,49	0,46	0,65	0,57	0,50	0,47
	30	0,59	0,53	0,48	0,46	0,62	0,55	0,49	0,47
1,5	70	0,68	0,60	0,54	0,52	0,74	0,64	0,57	0,54
	50	0,66	0,59	0,54	0,51	0,70	0,62	0,56	0,53
	30	0,64	0,58	0,53	0,51	0,67	0,60	0,54	0,52
2,0	70	0,75	0,68	0,62	0,59	0,83	0,74	0,66	0,63
	50	0,72	0,66	0,61	0,59	0,78	0,70	0,64	0,61
	30	0,70	0,65	0,60	0,58	0,74	0,68	0,62	0,60
3,0	70	0,83	0,77	0,72	0,70	0,93	0,85	0,79	0,76
	50	0,80	0,75	0,71	0,69	0,87	0,81	0,75	0,73
	30	0,78	0,74	0,70	0,68	0,82	0,77	0,73	0,70
4,0	70	0,88	0,83	0,78	0,76	0,99	0,92	0,86	0,84
	50	0,85	0,81	0,77	0,75	0,93	0,87	0,83	0,80
	30	0,83	0,79	0,76	0,74	0,87	0,83	0,79	0,77

Il est important de noter que cette approche a été conçue dans un objectif de généralisation. Ainsi, le modèle n'est applicable qu'à condition de détenir des informations sur la façon dont se comporte le conduit de lumière dans les conditions météorologiques souhaitées. En effet, l'approche n'évalue pas la transmission lumineuse obtenue par le dispositif utilisé. Pour utiliser le modèle du CIE, il est nécessaire d'avoir des informations obtenues par les dispositions constructives (rarement fournies) ou par expérimentation.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2. Études numériques et expérimentales en lien avec nos travaux

La présente partie est destinée à faire un bilan sur les différentes études pouvant être trouvées dans la littérature mettant en avant certains comparatifs entre mode constructif, ou typologie de conduit de lumière.

2.1. **Utilisation des conduits de lumière**

Dans son étude expérimentale, Oakley a mis en évidence les performances de six conduits de lumière installés dans trois zones différentes (magasin, bureau et un logement) (Oakley, Riffat, and Shao 2000). Les résultats ont montré que les conduits de lumière sont des appareils efficaces pour apporter de la lumière naturelle dans un bâtiment. Selon son étude, les conduits les plus efficaces sont les conduits droits, courts, ayant un rapport de longueur faible. Il précise que si le diamètre augmente, le conduit sera sans doute plus efficace. Il met également en avant l'impact du conduit sur les économies d'énergie réalisées, montrant qu'un bureau, dont le niveau d'éclairement requis (300 lux) pouvait être fourni en totalité et durant toute la journée par le conduit de lumière. Oakley précise également que le dispositif joue nettement sur la satisfaction des utilisateurs vis-à-vis du confort visuel engendrant un environnement plus sain.

En 1997, Shao et Riffat (Shao et al. 1997) présentent une étude expérimentale sur les performances des conduits de lumière en saison hivernale au Royaume-Uni. Ils montrent que le potentiel de sauvegarde énergétique s'élève à près de 30 %, et peut même accroître significativement en période estivale.

2.2. **Utilisation des coudes**

Su a mené une étude à partir d'expérimentation sur des conduits de lumière commerciaux dans des conditions climatiques réelles (Su et al. 2012). La zone d'étude est équipée de conduits droits et de conduits courbes (avec coude). Les données issues du monitoring de ce local ont révélé une différence notable du flux lumineux en sortie entre les conduits droits et courbes sous des conditions de ciel clair. Le nombre d'heures d'éclairement cumulées entre un conduit droit et courbe varie également. Selon l'étude, le conduit courbe est plus performant. La différence se creuse et semble se maintenir entre les deux configurations pour des flux lumineux supérieurs à 2000 lm (Figure 41).

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

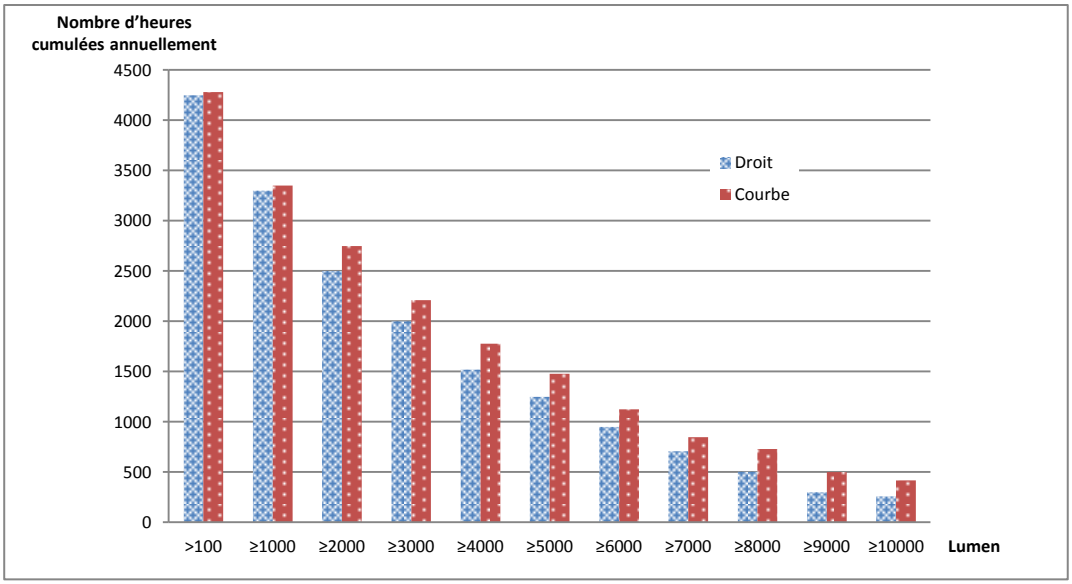


Figure 41 : Heures cumulées annuelles en fonction du flux lumineux en sortie d'un conduit droit et courbe de 53 cm de diamètre et de longueur 2,0 m (Su et al. 2012)

Comme vu dans la précédente section, Zhang (Zhang 2002) a également montré que la perte lumineuse liée à l'utilisation d'un coude de 30° s'élevait à 20 %.

De la même manière, Jenkins et Muneer (Jenkins and Muneer 2004) ont effectué une étude de sensibilité sur l'utilisation de conduit courbe pour des inclinaisons de 30°, 60° et 90°. Ils ont constaté une légère différence de performance entre ces conduits. Ils en ont déduit une relation exponentielle traduisant les pertes liées au transfert au sein des coudes.

En 2005, pour les besoins de leur modélisation des performances d'un conduit de lumière (Jenkins, Muneer, and Kubie 2005) ont poursuivi leur étude de l'impact des coudes sur la transmission lumineuse. Ils déduisent un ratio d'équivalence entre la perte lumineuse singulière engendrée par un coude et la perte lumineuse linéaire d'un conduit droit. À l'aide de mesures expérimentales sur des coudes de 5° à 75°, ils proposent l'équation suivante pour calculer le pourcentage de perte pour des coudes du même angle :

$$\chi_{coude_n} = e^{N_{coude}.\ln(1-K)} \tag{99}$$

Avec, K : constante empirique

Dans une étude leur permettant d'établir un modèle analytique de propagation du flux lumineux, Van Derfolske et Hough ont également étudié l'impact des coudes sur la transmission lumineuse par le conduit de lumière. Ils constatent qu'un coude de 50° engendre une perte du flux de près de 50 % tandis que deux coudes de 25° n'occasionnent qu'une perte de 36 % du flux lumineux (Darula et al. 2010).

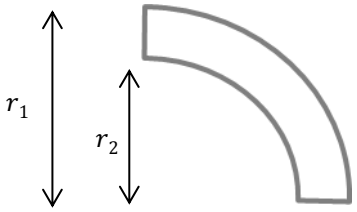
Le rapport de la CIE (Darula et al. 2010) concernant l'efficacité des conduits de lumière, recommande d'utiliser un tube standard d'une longueur de 1,0 m et de mesurer les flux lumineux

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

entrant et sortant. Dans ce rapport, les experts utilisent des lampes fluorescentes montées sur des panneaux intégrant une sphère et deux tubes raccordés par un coude. Plusieurs angles de coude ont été sélectionnés pour l'étude (0°, 30°, 60°, 90°, 2x30° et 2x90°).

Sur la base de conduits droits et courbes (avec un coude unique circulaire) et pour des sections elliptique ou rectangulaire, Gupta et al. (Gupta, Lee, and Koshel 2001) ont également étudié cette problématique. Ils ont proposés un rapport de courbure $m_{courbure}$ (*bend ratio parameter*) définissant la relation entre le rayon de courbure extérieur et le rayon intérieur.

$$m_{courbure} = \frac{r_2}{r_1}$$



Pour se faire, ils ont effectué une simulation en tracé de rayon (i.e. *ray-tracing*) avec des variations de rayon de courbure. Ils constatent que la propagation de la lumière au sein du tube est concentrée en partie centrale pour une section droite tandis qu'elle est prépondérante sur la périphérie intérieure pour une section avec coude.

En 2002, Carter (Carter 2002) met en place une étude lui permettant de comparer des données expérimentales (in situ et en laboratoire) et prédites pour les performances de différentes configurations de conduit de lumière. Les flux lumineux sont mesurés à la sortie des conduits à l'aide de boite cubique (approche des caractéristiques d'un intégrateur photométrique). Les conduits ont tous une longueur de 6,1 m et des diamètres variant entre 20 cm, 33 cm, 45 cm et 53 cm. Son étude permet également de mettre en avant la décroissance de l'efficacité du dispositif en fonction de l'angle du coude. Carter constate qu'un coude dont l'angle varie de 0 à 30° engendre une perte d'efficacité de près de 20 % (à 30°, -20 %). Entre 30° et 90°, la décroissance de l'efficacité est moindre (de l'ordre 5 % de 30° à 90°).

2.3. **Influence des paramètres géométriques et optiques du conduit**

Mankova a mené une étude sur les conduits de lumière droits avec une surface intérieure hautement réfléchissante (type MLP) (Manková et al. 2009). Il cherchait à déterminer une méthode simplifiée pour évaluer l'éclairement à l'intérieur d'une pièce équipée d'un conduit. Il a également montré l'impact des paramètres géométriques et optiques (diamètre, longueur du conduit, réflectivité) sur l'efficacité de transmission lumineuse du conduit. Les résultats de simulations effectuées sous Radiance (combiné à un algorithme « *photon map* ») ont permis d'effectuer ces analyses.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

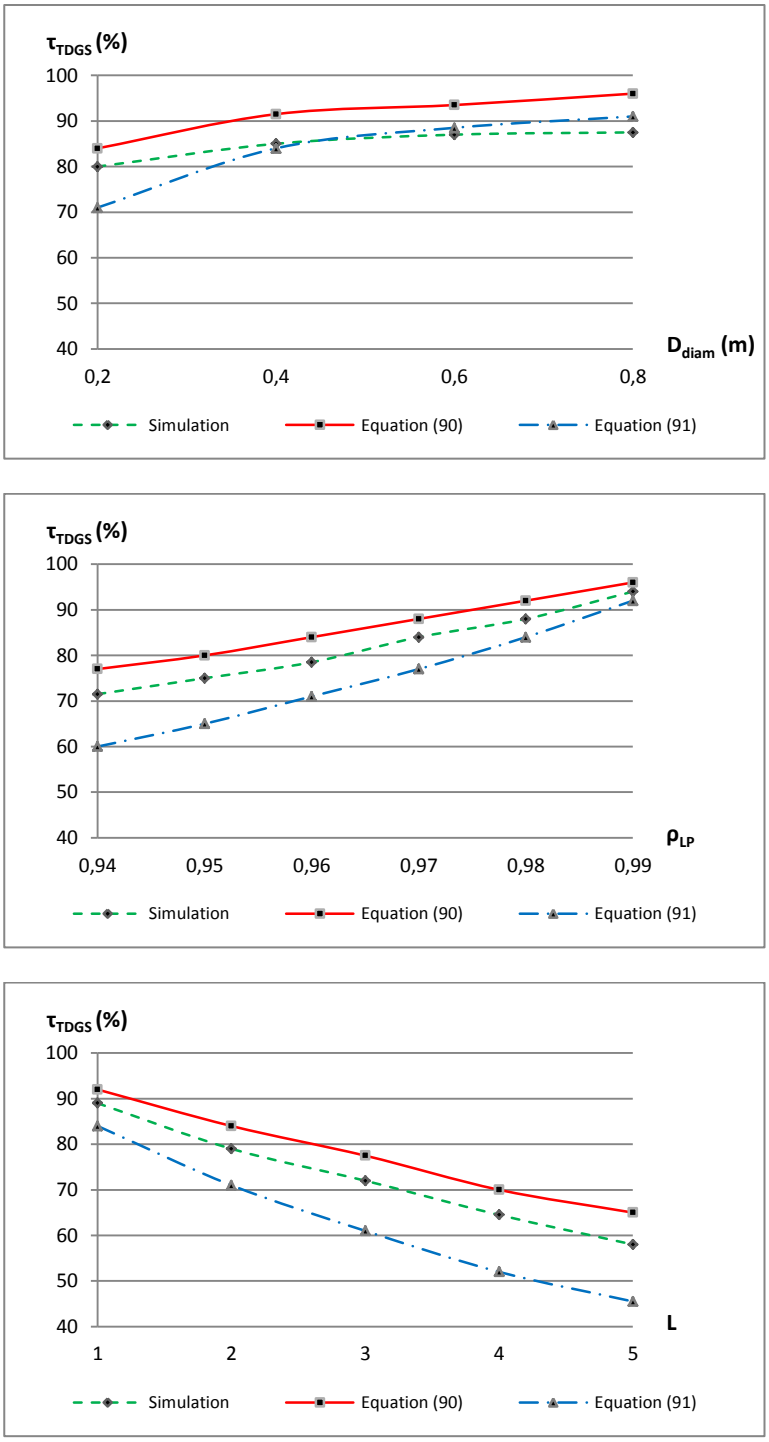


Figure 42 : Évolution des paramètres sous l'éclairement direct (Manková et al. 2009)

Pour la part directe de l'éclairement, lorsque le diamètre du conduit augmente, l'efficacité du conduit croît de façon logarithmique. Même constat pour la réflectivité, où lorsque celle-ci augmente, l'efficacité croît linéairement. À contrario, l'accroissement de la longueur du conduit entraîne une décroissance exponentielle de l'efficacité lumineuse.

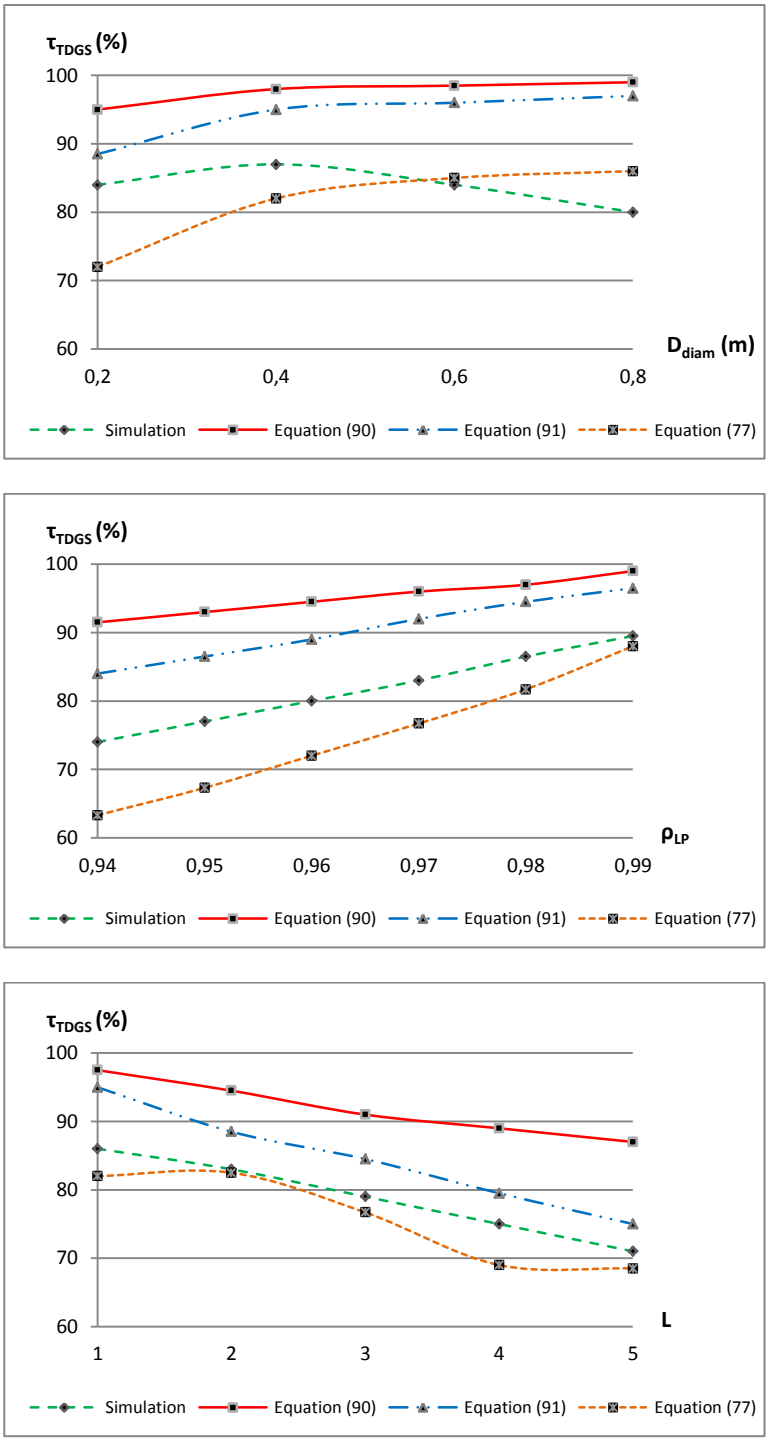


Figure 43 : Évolution des paramètres sous l'éclairement diffus (Manková et al. 2009)

Le constat reste le même pour la part diffuse de l'éclairement, mais reste moins prononcé que pour le direct. Mankova précise tout de même que ces résultats sont validés pour le type de conduit étudié, et peut évoluer en fonction de la réflectivité du tube.

Cette étude lui a permis de mettre en avant des équations permettant d'évaluer la transmission du conduit de lumière : deux premières issues de la bibliographie (équation de Swift et de la CIE

dans CIE 173-2006), et les autres provenant de son étude (ajustées pour correspondre aux résultats de sa simulation) :

$$\tau_{TDGS} = \rho_{LP}^{\frac{L.\tan H_s}{D_{diam}}} \tag{100}$$

$$\tau_{TDGS} = \frac{e^{\frac{L}{D_{diam}}.\tan H_s.\ln \rho_{LP}}}{\left(1 - \frac{L}{D_{diam}}.\tan H_s.\ln \rho_{LP}\right)} \tag{101}$$

$$\tau_{TDGS} = \rho_{LP}^{\frac{L}{D_{diam}}} - 0{,}1 \tag{102}$$

$$\tau_{TDGS} = -0{,}26152 + 0{,}17333\,.\sin(\ln(5{,}82691\,.D_{diam})) + 0{,}377.e^{\rho_{LP}{}^{8}} + 0{,}07899.\sin L \tag{103}$$

2.4. Impact des paramètres (Ddiam, L, ρ_{LP})

Ellis (Ellis, Strand, and Baumgartner 2004) dans son étude sur la simulation des dispositifs d'éclairage innovants (conduit de lumière et étagère de lumière), a montré l'influence du rapport de longueur sur la transmittance du conduit de lumière. En effet, dans son étude comparative interlogicielle (ENERGYPLUS VS. FSEC – Programme utilisant la méthode de lancer de rayon), il constate que l'augmentation du rapport de longueur provoque une chute exponentielle de la transmittance.

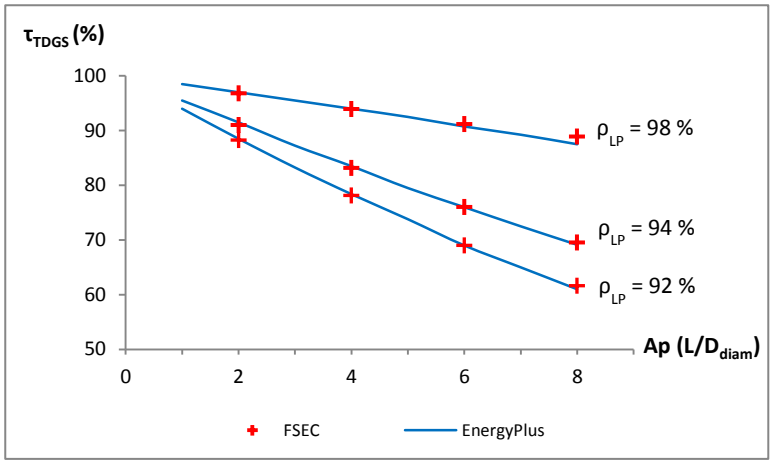


Figure 44 : Comparaison des transmissions des conduits de lumière en fonction du paramètre *Ap* (Ellis, Strand, and Baumgartner 2004)

En se basant sur l'étude de Mankova, nous en déduisons que le rapport de longueur est principalement influencé par la longueur du conduit.

2.5. Influence de la couleur de la zone à éclairer

En 1997, Shao a étudié les performances des conduits de lumière sous ciel couvert ou dégagé. Il a montré que la couleur des parois de la zone éclairée avait un effet prononcé sur l'éclairement intérieur. Comme élément comparatif, il définit le rapport de l'éclairement intérieur sur

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

l'éclairement global extérieur. Pour une pièce blanche, ce ratio vaut en moyenne 14 % (dans les conditions de ciel couvert). Pour des parois noires et les mêmes conditions météorologiques, ce rapport peut valoir 4 %. Un ratio de 7 % pour les murs blancs contre 2 % pour les murs noirs est également annoncé pour des conditions de ciel dégagé (Shao et al. 1997).

Cette tendance est vérifiée dans une analyse paramétrique réalisée par Zhang en 2002 (Zhang 2002) mais reste très limitée. En effet, Zhang précise que son influence, en utilisant le modèle DPF, n'excède pas plus de 5 % sur le bilan de l'éclairement intérieur.

En 2006, Chella et al. (Chella, Zazzini, and Carta 2006) proposent une étude comparative entre les résultats issus d'une analyse numérique (à l'aide de trois codes de calcul : RADIANCE, ENERGYPLUS et ECOTECT) et expérimentale (échelle réduite avec un ciel artificiel) pour des réflectivités de parois différentes (clairs et sombres). Ils considèrent également deux types de ciel : clair et couvert. Sur la base d'un comparatif des facteurs de réflexion, les auteurs montrent que pour un ciel clair, la composante réfléchie au sein du local a un impact variant entre 19,4 % et 37,8 % (fonction de la position dans la pièce).

2.6. **Effet de la hauteur solaire et de l'indice de clarté du ciel**

Zhang (Zhang 2000; Zhang, Muneer, and Kubie 2002) précise que la hauteur solaire affecte le DPF en modifiant le nombre d'interréflexions au sein du conduit. Quand la hauteur solaire augmente, le nombre d'interréflexions décroit ce qui engendre une meilleure transmittance.

Toutefois, lorsque k_t change, la mesure dans laquelle la hauteur solaire agit sur le DPF change également. Le DPF varie considérablement avec la variation de la hauteur solaire en ciel clair.

Wu, en 2008 (Wu et al. 2008), précise que la hauteur solaire est le principal facteur ayant un effet sur la performance des conduits de lumière. L'azimut solaire peut également affecter l'éclairement durant la journée, eu égard de la configuration du conduit.

En 2010, Darula (Darula, Kittler, and Kocifaj 2010) présente quelques exemples d'utilisation du programme développé par Kocifaj et nommé HOLIGILM 4.2. Ils constatent que l'efficacité lumineuse des conduits de lumière sous les tropiques est meilleure grâce aux hauteurs solaires élevées prédominantes et à la longue durée d'ensoleillement. À contrario, en climat tempéré, et particulièrement en période hivernale, ces deux paramètres ne permettent pas de mettre à profit la performance d'un conduit de lumière quoique nécessaire durant cette époque.

2.7. **Liaison entre spectre lumineux et couleurs de la lumière transmise**

La perception qualitative des ambiances est influencée par l'intensité lumineuse d'une source. Toutefois, la couleur de la lumière délivrée a un aspect très important. Il est généralement supposé que les variations spectrales engendrées par les conduits de type MLP n'affectent pas la

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

couleur de la lumière transmise. En 2014, Nilsson et al. (Nilsson, Jonsson, and Roos 2014) étudièrent et confirmèrent cette hypothèse à l'aide des mesures d'un spectrophotomètre et de simulation en lancer de rayon pour des éclairements directs ou diffus. Notons que l'auteur a fait abstraction du dispositif de collecte et de diffusion. Le conduit MLP semble posséder des propriétés achromatiques.

2.8. **Effet du diamètre et de la longueur du conduit**

Pour une hauteur solaire et un indice de clarté donnés, le rayon du conduit mis au carré affecte la quantité de lumière entrante. En outre, le rapport de longueur du conduit de lumière et la hauteur solaire agissent sur la transmittance du conduit (Zhang, Muneer, and Kubie 2002).

En 1998, Shao et al. (Shao, Elmualim, and Yohannes 1998) étudièrent les performances de conduits de lumière installés dans une douzaine de bâtiments au Royaume-Uni. Les performances des dispositifs ont été évaluées pour 4 types de bâtiments : le siège social d'une compagnie d'assurance, une clinique, un bâtiment résidentiel et une salle de restauration d'un collège. Les conduits ont tous un rapport de longueur modéré, et permettent d'atteindre des éclairements supérieurs à 450 lux, avec un DPF de l'ordre de 1 %. Celui-ci est réduit de 0,1 % dans le cas d'un conduit fin et long équipé de coude. L'auteur conclut que les conduits de large diamètre sont à utiliser le plus souvent possible.

2.9. **Effet de la distance euclidienne D et de la hauteur verticale du diffuseur H**

Le modèle DPF montre que la performance du dispositif tubulaire dépend fortement de D. Dans l'équation (8), la valeur optimale pour m était 1,3. Cela indique qu'en situation réelle, les conduits réagissent plus comme une source ponctuelle plutôt que comme une surface finie. L'éclairement atteint à l'intérieur de la pièce est proportionnel à $(H/D)^{1/3}$ et inversement proportionnel à D^2 (Zhang, Muneer, and Kubie 2002).

2.10. **Effet de la forme du diffuseur**

Zhang (Zhang, Muneer, and Kubie 2002) a testé l'impact du type de diffuseur sur l'évolution du DPF. Pour ce faire, il a expérimenté avec un diffuseur droit et un diffuseur incurvé. Il constate que le DPF atteint avec le diffuseur plat est plus élevé que celui atteint avec le diffuseur incurvé. Il déduit un ratio de gain en performance appelé facteur de diffuseur et noté f_D. En appliquant le f_D moyen à la valeur d'éclairement intérieur obtenue à partir des équations précédentes, nous obtenons l'éclairement intérieur atteint avec un diffuseur plat. En moyenne, ce facteur vaut 2,9.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2.11. Impact du type de surface diffusante

En 2008, Wu (Wu et al. 2008) étudie expérimentalement deux types de diffuseurs équipant des conduits de lumière zénithaux : un diffuseur prismatique (*diamond type*) et un diffuseur translucide opaque (*snow type*).

Les données expérimentales révèlent que le conduit équipé du diffuseur translucide opaque atteint de meilleures performances que le conduit avec diffuseur prismatique.

Une étude proche de celle de Wu a également était mené par Baroncini en 2010 (Baroncini et al. 2010). Il testa deux types de diffuseur en polycarbonate, l'un caractérisé par une géométrie prismatique, l'autre caractérisé par une géométrie radiale, mais entièrement transparent au centre. Les conclusions furent les mêmes que celles de Wu.

2.12. Impact de l'angle d'incidence sur la réflectivité du conduit

En 2009, Hansen et al. (Hansen et al. 2009) démontre que l'angle d'incidence des rayons entrants a un effet remarquable sur les performances d'un conduit de lumière. En effet, la perte lumineuse dans un conduit est liée à la multitude de réflexions que l'onde subit. En conséquence, un rayon lumineux dont l'angle d'incidence est le plus grand permet de minimiser le nombre de réflexion. Ainsi, la réduction de ce paramètre est l'un des principaux objectifs d'amélioration des performances d'un conduit MLP.

Deux solutions permettent d'atteindre cet objectif : élargir les composants du système ou améliorer le dispositif de collecte. C'est dans le cadre de la deuxième solution que Hansen propose l'utilisation du collecteur LCP.

La Figure 45 permet d'imager le lien entre l'angle d'incidence (hauteur solaire) et le nombre de réflexions.

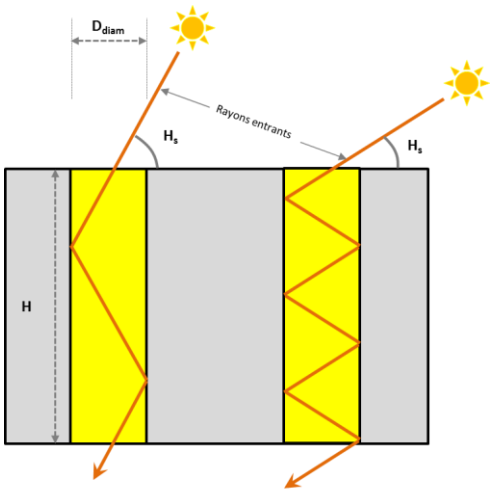


Figure 45 : Propagation du rayon en fonction de la hauteur solaire (angle d'incidence)
Inspirée de (Hansen et al. 2009)

En 2010, Edmonds (Edmonds 2010) confirme ces résultats en présentant son étude sur les transmissions lumineuses à l'aide de conduit de lumière de section transversale diverse (rectangulaire, triangulaire, rhombique ou hexagonale). Edmonds effectue également des mesures permettant de comparer ses valeurs théoriques pour des sections rectangulaires et triangulaires. Il justifie expérimentalement que la réflectivité du conduit varie en fonction de l'angle d'incidence des rayons pénétrants dans le conduit.

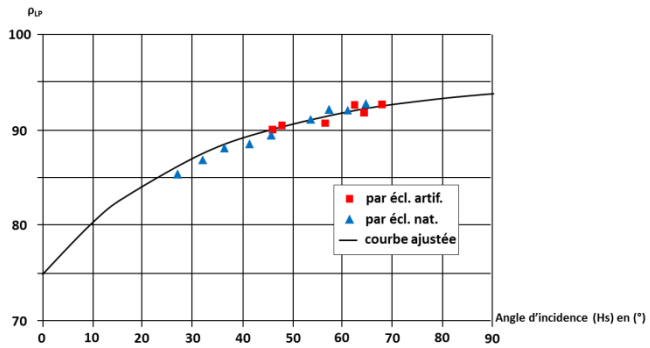


Figure 46 : Réflectivité de conduits rectangulaire et triangulaire en fonction de l'angle d'incidence (Edmonds 2010)

Pour un conduit rectangulaire ou triangulaire, avec une réflectivité nominale de 95%, il propose une expression empirique permettant d'évaluer la réflectivité en fonction de l'angle d'incidence :

$$\rho_{LP}(H_s) = 0{,}75 + 0{,}20 \times \left(1 - e^{\frac{-H_S}{33}}\right) \tag{104}$$

Selon l'auteur, la variation de ce paramètre a un impact non négligeable sur l'efficacité du conduit de lumière. Edmonds donne l'exemple d'un conduit rectangulaire (Figure 47).

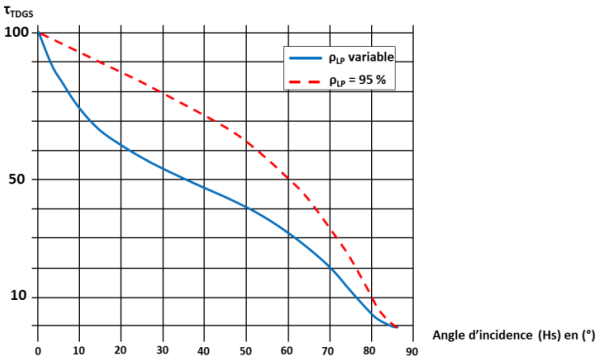


Figure 47 : Transmittance du conduit en fonction de l'angle d'incidence des rayons entrants (Edmonds 2010)

L'auteur précise que la variation de la réflectivité du conduit en fonction de l'angle d'incidence peut être liée à la dépendance angulaire de la réflectivité sur la surface de Fresnel (miroir lisse parfait).

La tendance est vérifiée et confirmée au travers de l'étude de Swift (Swift 2010). En 2010, il présente ses travaux concernant la mise en place d'une expression permettant d'évaluer la

transmission lumineuse au sein d'un conduit de section rectangulaire pour des conditions d'ensoleillement sur toute une année. Il montre que la quantité de lumière traversant le conduit rectangulaire augmente significativement durant les mois où les angles d'incidence des rayons pénétrants sont faibles (hiver).

2.13. Impact de la position et de l'orientation du collecteur

En 2008, Wu (Wu et al. 2008) a effectué une analyse expérimentale des performances d'un conduit de lumière latéral et de deux conduits de lumière zénithaux. Les mesures ont été prises aux mêmes moments pour chaque procédé en conditions météorologiques réelles (journée hivernale ensoleillée à Beijing, Chine). Les résultats montrent que le conduit de lumière latéral offre de meilleurs résultats que les conduits zénithaux, à condition qu'aucun masque ne vienne obstruer l'accès à la lumière naturelle.

En 2013, Kocifaj (Kocifaj et al. 2012) publie une étude démontrant la configuration optimale pour profiter de l'efficacité nominale d'un conduit de lumière courbe. Il précise que l'efficacité maximale est atteinte quand le collecteur est orienté vers la course solaire, et pointé vers le soleil.

Il montre que les conduits droits avec collecteurs horizontaux sont moins performants que les conduits dont le collecteur est incliné en direction du soleil pour des ciels clairs. Cependant, en ciel couvert, le conduit droit capte une plus grande quantité de l'éclairement céleste.

Il a également été montré que pour des climats tempérés, les conduits transmettent plus de lumière s'ils sont courbés.

2.14. Impact du niveau d'éclairement extérieur

Dans sa publication, Li (Li et al. 2010) étudie expérimentalement les performances de conduits de lumière droits équipés de capteurs à l'intérieur positionnés suivant différents rayons d'un cercle. Il démontre que la transmittance du dispositif n'est pas une valeur constante pour un conduit donné, car elle varie en fonction de la quantité d'éclairement extérieur. Dans son cas d'étude, l'efficacité globale de son dispositif, rapport entre le flux lumineux sortant et entrant, variait entre 0,14 et 0,27.

En 2003, Callow (Callow 2003) a effectué une analyse paramétrique des performances des conduits de lumière. Ses mesures ont été faites à Nottingham et à Singapour, et ont permis à l'auteur de développer des modèles l'évaluation de l'efficacité des conduits de lumière. Il a accordé beaucoup d'importance à étudier l'impact du changement des conditions météorologiques extérieures sur les performances du dispositif, ce qui lui a permis de conclure que l'efficacité du conduit de lumière n'était pas toujours proportionnelle à l'éclairement extérieur.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2.15. Différentiation de l'éclairement direct et diffus

Dans son étude, Lo Verso (Lo Verso, Pellegrino, and Serra 2011) montre à l'aide de simulations sous SkyVision qu'il est plus juste de décomposer la lumière (direct et diffus), et le justifie à l'aide d'une expérimentation sur un conduit de lumière de type MLP pour deux types de ciel (couvert et clair). Il effectue également un comparatif avec les modèles qui prennent en compte cette différentiation (modèles du CIE : modèle de Zastrow et Wittwer pour le ciel clair, et le modèle de Al-Marwaee pour le ciel couvert). La philosophie de son étude est de montrer que l'évaluation des performances du conduit de lumière se fait en décomposant le dispositif en 3 parties. La première concerne le collecteur. Pour cette section, la différentiation des composantes de la lumière du jour est de rigueur. Il propose ainsi une équation pour déterminer les performances (le rendement η) du collecteur pour la partie diffuse et directe de la lumière, l'ensemble pouvant être simplement reconstitué par une simple addition des deux parties. Il précise également qu'en général un dispositif aussi complexe nécessite l'utilisation d'outil tel que le BTRDF (fonctions de distribution de la réflectivité et la transmittance bidirectionnelle).

Pour le conduit, la différentiation se fait sur le type de ciel (modèle de Zastrow et Wittwer, et Modèle d'Al-Marwaee). De ce fait, indirectement nous considérons la part du direct et du diffus, sans pour autant avoir une différentiation marquée.

Le rendement du diffuseur n'est pas calculé, et simplement récupéré de la documentation du constructeur car il ne correspond qu'à une transmittance. Il précise qu'une approche similaire à celle des collecteurs pourrait être menée sur les systèmes de conduite.

Mohelnikova (Mohelnikova 2009a) réalise une étude sur les conduits de lumière droits. Il montre également que la luminance au niveau du diffuseur et la répartition des éclairements sous de diffuseur est uniforme et symétrique lorsque le ciel est couvert. En ciel clair, il constate que l'intensité lumineuse n'est pas directement uniforme.

Oh (Oh et al. 2013) montre à l'aide d'un diagramme « *Candela power distribution curve* – CDC » que la distribution lumineuse du conduit de lumière est directement liée à la hauteur solaire. Il conclut que le conduit de lumière utilise l'ensemble des composantes de la lumière du jour (diffuse et directe).

2.16. Impact de la variabilité de l'ensemble des paramètres

En 1995, Swift et Smith (Swift and Smith 1995) étudient les liens entre la conception et les paramètres des matériaux pour un conduit de lumière circulaire de type MLP. Ils calculent précisément le coefficient de transmission en utilisant une analyse optique de la propagation des rayons lumineux tout au long d'un conduit. Ils en déduisent une équation impliquant les paramètres du conduit, la réflectivité, les proportions du conduit (rapport de longueur) et l'angle

d'incidence des rayons entrants. Cette étude a permis de montrer clairement que les performances du conduit de lumière dépendaient de nombreux paramètres, eux-mêmes pouvant varier considérablement.

3. Conditions de validité des modèles semi-empiriques

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons aux modèles semi-empiriques. Ces modèles présentent l'avantage d'une utilisation simple et intégrable sous tout type de support, aussi bien tableur que code de calcul. Souhaitant effectuer un transfert de connaissance vers le milieu de l'ingénierie, ces approches offrent le meilleur compromis temps de calcul/précision pour permettre de les intégrer dans les formes mathématiques de dimensionnement des éléments de la construction. La limite de ces modèles est qu'ils font appel à des coefficients ajustés par optimisation selon les paramètres optiques et géométriques du conduit de lumière, mais également selon les conditions météorologiques. Comme vu précédemment, cette dernière joue un rôle prépondérant sur le comportement du modèle physique.

Dans cette section, nous effectuons une synthèse des approches semi-empiriques au travers du Tableau 7.

Nous constatons que l'ensemble des modèles semi-empiriques provient de la Corée du Sud ou du Royaume-Uni (Figure 48). Compte tenu des divergences météorologiques entre chaque zone du globe, et de l'impact des conditions météorologiques sur le comportement du conduit de lumière, il est évident que les modèles repris à la suite ne peuvent être utilisés en l'état dans d'autre pays.

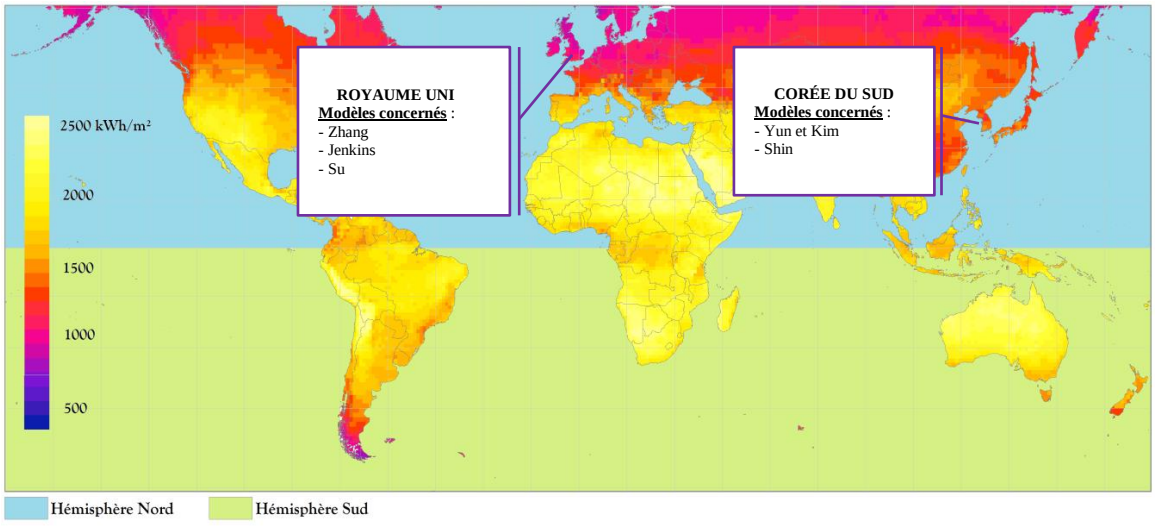


Figure 48 : Ensoleillement global annuel (Source : Meteonorm 6.0) et répartition géographique des modèles semi-empiriques développés au cours des dernières décennies

Les études faites ces dernières décennies ont également montré l'impact de la course solaire sur les performances des conduits de lumière en ciel clair (la hauteur solaire étant particulièrement étudiée). Sachant que la course solaire « vue » n'est pas la même dans l'hémisphère nord et sud, il

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

est logique que les coefficients associés à chaque approche semi-empirique développés dans l'hémisphère nord, et obtenus à l'aide de données expérimentales, ne peut être adaptés à l'évaluation du comportement des conduits dans l'hémisphère sud. Outre la trajectoire du soleil, les niveaux d'ensoleillement ne sont pas les mêmes comme en témoigne la Figure 48. Le Royaume-Uni et la Corée du Sud font partie des pays les moins ensoleillés. Or, l'ensemble des modèles provient de ces régions. Il est évident qu'ils ne seront pas adaptés aux conditions de l'île de La Réunion, où tout autre pays ayant un ensoleillement pas moins de 2,5 fois plus important.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Tableau 7 : Synthèse des approches semi-empiriques

Modèle	Période d'expérimentation	Localisation	Type de conduit utilisé	Conditions météorologiques générales	Type de résultat	Référence
Zhang	1. Du 10 mai au 15 septembre 2000 2. Du 28 au 30 Mai 2001	Currie, Edimbourg, Royaume-Uni	1. 8 conduits (droit et courbe) de longueur 6,10 m, avec dôme clair en polycarbonate, diffuseur clair en polycarbonate traité : - diam. 21 cm - diam. 33 cm - diam. 42 cm - diam. 53 cm 2. Currie Test Room : 1 conduit de 33 cm de diamètre Distance Diffuseur – PU : 1,67 m	Données écartées : - hauteur solaire < 10° - kt ≥ 1 Ciel principalement Couvert	DPF	(Zhang, Muneer, and Kubie 2002)
Jenkins et Muneer	2003	*Conçu* : Leicester, Royaume-Uni *Vérifié/ajusté* : Nottingham, Royaume-Uni	Conduit Monodraught Sunpipes de longueur variant de 0.6m à 5.4m, MLP de réflectivité 95% utilisant de l'aluminium poli, collecteur hémisphérique en polycarbonate (transmission lumineuse = 88%), diffuseur en polycarbonate clair : - diam. 30 cm - diam. 33 cm - diam. 45 cm - diam. 53 cm	Limité au ciel couvert	- Mesure du flux, et déduction de la transmittance - Basé sur l'expression empirique déterminant la transmittance du conduit - Conduit courbe d'inclinaison variant entre 5° et 75°	(Jenkins and Muneer 2003; Jenkins and Muneer 2004; Jenkins, Zhang, and Muneer 2005)
Yun et Kim	Avril à Mai 2009	Yongin, Corée du Sud	Conduit MLP de 65 cm de diamètre avec une longueur de 3,4 m dôme clair en acrylique, diffuseur en polycarbonate Distance Diffuseur – PU : 6,1 m	Ciel principalement Couvert	DPF Basé sur méthode de Jenkins et Zhang	(Yun, Hwang, and Kim 2010b)
Su	Février à Juillet 2008	Nottingham, Royaume-Uni	Conduit de lumière courbe type MLP marque Monodraught (collecteur incliné), avec dôme clair en polycarbonate : - conduit courbe diam. 23 cm (collecteur incliné à 30°) L =3,33 m - conduit courbe diam 45 cm (collecteur incliné à 30°) L = 3,37 m - conduit droit diam. 53 cm L= 2,57 m - conduit courbe diam. 53 cm (collecteur incliné à 30°) L= 2,84 m	Mesures sous différents types de ciel Eclairement max en ciel clair : 149 klux	Utilisation de « boîte photométrique », mesure de l'éclairement intérieur et extérieur, déduction d'une expression empirique pour la transmission lumineuse du conduit	(Su et al. 2012)
Shin	Juillet 2009	Yongin, Corée du Sud	Conduit MLP droit de rapport de longueur 2,0 et 5,2 (65 cm de diamètre et 3,40 m de long), avec dôme clair en polycarbonate, diffuseur clair en polycarbonate	Mesures sous différents types de ciel (mais principalement partiellement couvert avec éclairement maxi à 40 klux) Eclairement max en ciel clair : 100 klux	DPF Le modèle développé considère la hauteur solaire et l'indice de clarté du ciel propre de la Corée comme facteur climatique local. Basé sur modèle Yun & Kim	(Shin, Yun, and Kim 2012)

Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

4. Synthèse du Chapitre II

Nous avons abordé dans ce chapitre les diverses préoccupations qui concernent les DGLT-R. Nous avons en premier lieu proposé une synthèse bibliographique des travaux de la communauté scientifique internationale, en dégageant les principaux thèmes traités. Nous avons pu dresser une synthèse exhaustive des approches de modélisation du comportement du conduit de lumière.

De ce fait, nous avons pu constater que l'étude des conduits de lumière réfléchissants a fait l'objet de nombreuses attentions, portant notamment sur :

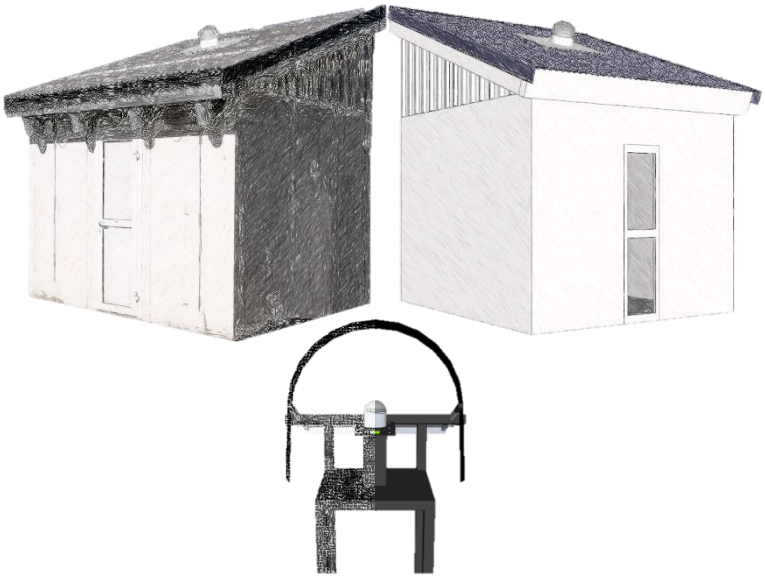
- La caractérisation de leurs performances photométriques, à l'aide d'approche semi-empirique ou théorique ;
- L'influence des variables géométriques et optiques de la zone ;
- L'influence des variables géométriques et optiques du conduit de lumière ;
- L'influence du niveau d'éclairement extérieur avec différentiation entre éclairement direct extérieur et éclairement diffus extérieur ;
- L'influence de la trajectoire du Soleil.

L'ensemble des modèles recensés a été développé dans deux zones géographiques du globe où les conditions d'ensoleillement sont faibles. Les coefficients empiriques inhérents sont ajustés pour les conditions météorologiques bien définies. De cette façon, ces approches sont inapplicables dans d'autres climats, tels que celui de l'île de la Réunion où le gisement solaire est important. L'étude expérimentale prend alors tout son sens afin de caractériser le climat d'étude.

À l'issue de ce chapitre, nous présentons l'expérimentation menée en conditions météorologiques réunionnaises. Cette campagne pratique nous permettra d'obtenir une base de données propice au développement de notre propre méthode de modélisation. De plus, elle permettra d'observer le comportement du conduit de lumière en conditions météorologiques réelles.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Étude expérimentale du **DGLT–R**



« *Expérimenter, c'est imaginer.* »

De Friedrich Nietzsche

Résumé du Chapitre **III**

Au travers de l'état de l'art réalisé à l'échelle internationale depuis ces dernières décennies, nous avons montré qu'il était nécessaire d'identifier et d'étudier le climat dans lequel est placé le conduit de lumière. En effet, les performances et le comportement du conduit dépendent fortement des conditions d'ensoleillement.

Ce troisième chapitre présente l'étude expérimentale menée sur les Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Réfléchissants verticaux. De façon à cerner la problématique expérimentale, la première partie consiste à présenter le climat dans lequel l'expérimentation a été entreprise. Suite à l'étude météorologique, nous présenterons les conditions de notre expérimentation sur les DGLT-R. En troisième partie de ce chapitre, nous définissons différents scénarios d'étude et les résultats associés.

1. Généralités sur le climat tropical de La Réunion

La Réunion est caractérisée par un climat de type tropical humide. Il est sous l'influence des vents d'alizée qui soufflent d'est en ouest. Nous y retrouvons différents microclimats engendrés par la présence de hautes montagnes. Cela occasionne une diversité marquante, notamment au niveau des précipitations, entre une côte pluvieuse exposée au vent (côté Est) et une côte assez sèche, car protégée par le relief (côte Ouest), mais également au niveau des températures entre un littoral chaud et des zones d'altitude relativement fraiches.

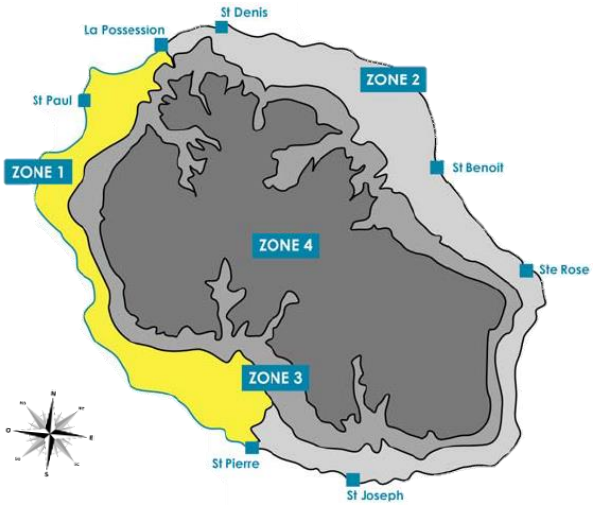


Figure 49 : Ile de La Réunion et ses 4 zones climatiques

Le climat réunionnais peut être divisé en quatre zones principales, appelées « zones climatiques », et référencées comme telles dans la RT2ADOM[12] et le référentiel PERENE[13] (Figure 49). Les 2 premières zones correspondent à la norme côtière des climats tropicaux. Ils sont tous deux situés en dessous de 400 mètres d'altitude et se différencient principalement par la moyenne de la vitesse du vent (une zone « sous le vent » et une zone « au vent »). La côte sous le vent, du nom de la zone 1, est la plus sèche, la plus ensoleillée et la plus chaude. La zone au vent côte Est, appelée zone 2, est humide à cause de son exposition au vent. La zone 3 est une zone à mi-hauteur située entre 400 et 800 mètres d'altitude. La température moyenne annuelle y est de 18,2 °C. Le rayonnement solaire moyen et le taux d'humidité sont élevés toute l'année. Les hautes terres, du nom de la zone 4, sont situées au-dessus de la ligne de 800 mètres. La température est fraîche en été et froide en hiver.

[12] Réglementation Thermique Acoustique et Aération des Départements d'Outre-Mer
[13] Performances Énergétiques des bâtiments à La Réunion

1.1. **Étude climatique succincte du gisement lumineux de la ville de Saint Pierre**

Nous effectuons une étude climatique brève afin de permettre au lecteur d'appréhender le potentiel solaire de la ville de Saint Pierre, située dans le sud de l'île de La Réunion et support de notre étude expérimentale.

Étant inscrits dans une approche photométrique, nous cherchons à discerner l'évolution annuelle de l'éclairement global extérieur mesurée à l'aide d'un luxmètre extérieur (références détaillées en section 2.4.3.2 du présent chapitre).

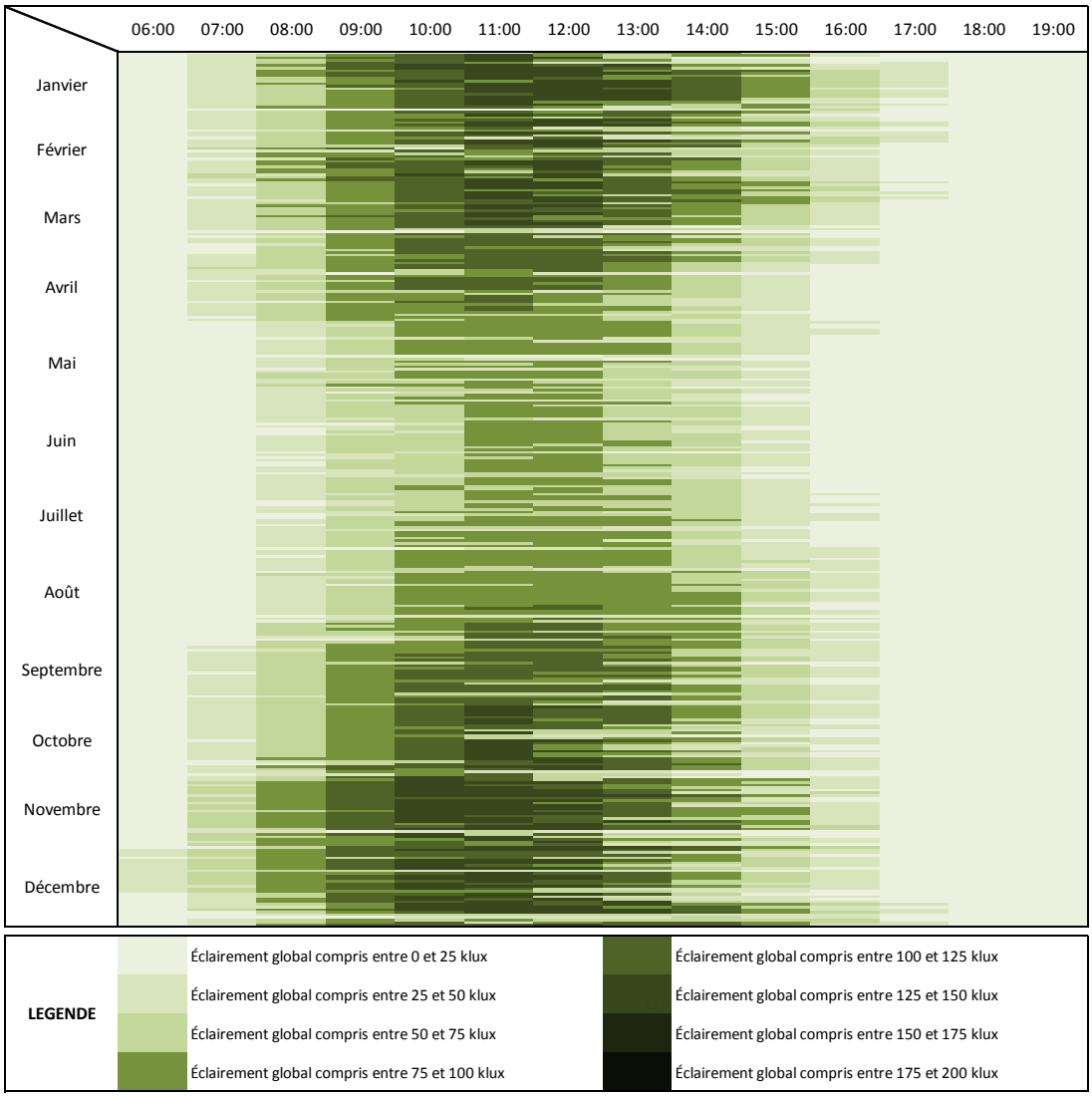


Figure 50 : Distribution horaire de l'éclairement global extérieur de la ville de Saint Pierre durant l'année 2014

La Figure 50 permet de mettre en évidence une saisonnalité importante de l'éclairement global correspondant sensiblement aux saisons présentes à La Réunion. L'été austral s'étend de novembre à avril. C'est la période où le gisement solaire est le plus abondant. Les journées sont

plus longues, avec un éclairement maximal fréquemment compris entre 150 klux et 200 klux (les jours de ciel clair), et des débuts et fins de journée proche de 50 à 75 klux.

L'hiver austral, de mai à octobre, est la période où l'éclairement maximal avoisine les 100 à 125 klux. Les journées sont plus courtes. Les matinées et fins de journée offrent un éclairement inférieur à 75 klux. La tendance change dès le mois d'août, au moment où les journées récupèrent des heures d'ensoleillement.

Globalement, nous constatons que le gisement solaire local est très abondant, avec des éclairements pouvant atteindre des niveaux remarquables. La saisonnalité ne semble pas proprement en lien avec la ressource photométrique. En effet, un système utilisant la lumière naturelle au sein d'un bâtiment offrira une efficacité notable de septembre à avril, et moindre le reste de l'année.

Ayant cerné le potentiel climatique de La Réunion, nous souhaitons maintenant présenter l'étude menée localement sur les conduits de lumière réfléchissants (DGLT-R).

1.2. **Objectifs généraux des expériences**

L'expérimentation initiée a pour objectif d'observer et de comprendre le phénomène de transmission de la lumière à l'aide du DGLT-R sélectionné pour l'étude. Nous cherchons à obtenir une solide base de données du comportement du dispositif pour plusieurs configurations d'étude. Pour ce faire, nous avons expérimenté 15 scénarios en faisant varier la couleur de la zone d'étude, en modifiant la position d'un déflecteur dans le dôme, en ajoutant un sous dôme anticyclonique et en associant l'effet du conduit à celui d'une ouverture verticale. Nous disposons de près de deux années de données, offrant une base solide pour l'objectif initial de nos travaux : établir un modèle empirique permettant de prédire les performances du système.

2. Mise en place d'une étude expérimentale photométrique

2.1. **Description du support de l'expérience**

Une cellule expérimentale du laboratoire, baptisée cellule LGI (Miranville 2002), a été réalisée pour valider expérimentalement les modèles physiques inclus dans CODYRUN et ISOLAB[14]. En plus des dispositifs expérimentaux déjà installés par les différents membres du laboratoire, cette cellule a été le support de l'étude photométrique initiée par Fakra en 2009 (Fakra 2009; Fakra, Miranville, et al. 2011; Fakra, Boyer, et al. 2011a). À l'époque, des mesures d'éclairement global extérieur et intérieur à la cellule (éclairement lumineux en cinq points) ont été menées pour évaluer valider les résultats du modèle photométrique implémenté sous CODYRUN. L'expérimentation s'était axée sur une ouverture verticale.

[14] Codes de calcul développés lors des thèses de Harry Boyer (Harry Boyer 1993) et Frédéric Miranville (Miranville 2002)

Figure 51 : Plateforme expérimentale - IUT Saint Pierre (La Réunion)

La plate-forme expérimentale de PIMENT, située à l'IUT de Saint-Pierre, a été conçue de sorte que l'ensemble des supports expérimentaux bénéficie des mêmes conditions expérimentales (Figure 51). L'emplacement alloué étant limité (650 m²), la disposition des supports expérimentaux a été réalisée en tenant compte de la course du soleil et en favorisant une orientation sans obstacle au vent.

La cellule expérimentale LGI est une structure modulaire conçue pour le test en environnement réel de composants d'enveloppe de bâtiments. Le volume initial intérieur était de 27,1 m³, pour une surface au sol de 9 m². Elle s'apparente à une pièce classique de type chambre à coucher ou bureau.

Représentative d'un bâtiment de faibles dimensions, elle se compose de parois opaques verticales en panneaux composites, d'un vitrage de type jalousies et d'une porte vitrée.

Figure 52 : Cellule LGI - Vues extérieures avant modification

Avant modification, les parois externes sont peintes en blanc, et les parois intérieures, en vert clair. L'absorptivité de toutes les faces intérieures est de 0,3.

La toiture initiale est inclinée (20°) et est constituée d'un complexe tôle/lame d'air/matériau à changement de phase/plaque de Placoplatre. Cette composition correspond à une étude précédemment menée sur l'isolation par matériau à changement de phase (Guichard 2013). La tôle de la cellule est une tôle ondulée, de couleur bleu nuit.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Les parois verticales sont réalisées en panneaux Thermax™ de la société Réuniplast. Ce sont des panneaux isolants utilisés habituellement en toiture. Leur constitution est la suivante : une feuille de fibrociment 5 mm, une de mousse polyuréthane 6 cm et une de fibrociment de 5 mm.

Le plancher est constitué de dalles en béton de couleur grise de 4 cm d'épaisseur et de plaques de polystyrène de 5 cm. L'ensemble de la cellule repose sur une dalle flottante en béton lourd de 20 cm destinée à recevoir ce genre d'expérimentations (Figure 53).

Figure 53 : Cellule LGI - Vues intérieures avant modification (Guichard 2013)

La LGI est orientée Nord/Nord-Ouest : l'azimut de la cellule par rapport au Nord géographique est de 9° (Figure 54).

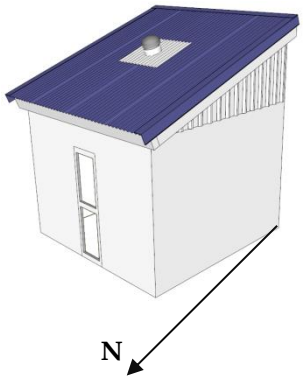


Figure 54 : Orientation de la LGI

La cellule en l'état nécessite des modifications pour être utilisée pour une expérimentation sur les conduits de lumière. Les parties suivantes présentent notre protocole de la modification générale du support expérimental, à la confection de nouveaux outils instrumentaux et au suivi des mesures durant les deux années d'expérimentation.

2.2. **Démarche expérimentale**

Avant d'entamer la présentation des dispositifs expérimentaux et des séquences de mesure associées, nous proposons de décrire la démarche expérimentale. Le protocole établi allait de la conception de l'expérimentation en fonction des différents scénarios d'étude jusqu'au suivi expérimental, en passant par la confection d'un instrument de mesure pour l'éclairement diffus extérieur. Nous présentons brièvement ces deux grandes étapes.

2.2.1. Modification pour l'étude

Dans le cas de notre expérimentation, nous avons eu à effectuer certaines modifications pour mener à bien l'expérimentation en réduisant le nombre de facteurs pouvant influencer les résultats (Figure 55). Ainsi, nous avons eu à installer un conduit de lumière, réaliser un faux plafond horizontal, et repeindre l'intérieur de la cellule en blanc (pour assurer un coefficient de réflexion de 0,7). La phase suivante a consisté à instrumenter la cellule et à placer les instruments de mesure à l'extérieur. D'autres scénarios ont nécessité l'apport de modifications, telles que la couleur intérieure de la zone.

Figure 55 : Modification de la cellule LGI

Le conduit de lumière et son équipement sont fournis par la société SOVELO, fournisseur de conduit de lumière de la marque SOLATUBE® à l'île de La Réunion. Ce dispositif est du type DGLT-R, autrement référencé : MLP (*Mirror Light Pipe*). Le Tableau 8 présente les coefficients de transmission solaire et de réflexion solaire des principaux éléments convoyeurs déterminés ainsi que les références précises du conduit de lumière utilisé.

Tableau 8 : Caractéristiques du conduit de lumière SOLATUBE

Dispositif	**SOLATUBE® Brighten Up® Series 160 DS Daylighting System**		
Éléments du kit « SOLATUBE® »		$\tau_{e\,(\%)}$	$\rho_{e\,(\%)}$
Collecteur	Coupole en PMMA[15] translucide	80	8
	Convoyeur « Spectralight® Infinity »	-	93
Diffuseur	Dual Diffuseur Vusion® en PMMA translucide	79	11
τ_e : Transmission solaire normal/hémisphérique (en %) – *Selon NF EN 410*			
ρ_e: Réflexion solaire normal/hémisphérique (en %) – *Selon NF EN 410*			

La coupole est de forme quasi hémisphérique en ton incolore. Pour la série de conduits de lumière Brighten Up®, les coupoles sont équipées de la technologie Raybender^{MC} 3000. Il s'agit de stries en face intérieures pouvant conduire à une déviation de la lumière incidente rasante dans le convoyeur cylindrique placé à un niveau inférieur. La coupole est fixée sur l'anneau de fixation lié au convoyeur cylindrique. Pour un conduit de 25 cm de diamètre, la coupole dispose d'un diamètre de 30,3 cm.

A l'intérieur de la coupole, un dispositif déflecteur nommé Light Tracker™ a été installé. Il consiste en une languette en aluminium revêtue du film réfléchissant, à l'identique du matériau employé pour les convoyeurs cylindriques. Ce système est positionné en face intérieure de la coupole, la face réfléchissante étant côté intérieur, au plus près de l'axe du convoyeur cylindrique. Le but recherché par le système Light Tracker™ est d'orienter la lumière incidente rasante du soleil couchant ou soleil levant vers l'intérieur du convoyeur cylindrique. L'orientation Nord est préconisée.

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. L'empilement des différentes couches de matériaux diélectriques permet d'obtenir une haute réflectivité dans le domaine du visible de type « miroir », y compris pour de faibles angles d'incidences de la lumière. La couche extérieure transparente joue le rôle de protection permanente et est conçue à l'aide d'un film polymère à base de polyéthylène naphtalate (PEN). Le coefficient de réflexion du film multicouche vaut 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.

[15] PMMA : Polyméthacrylate de méthyle modifié choc (PMMA-I)

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

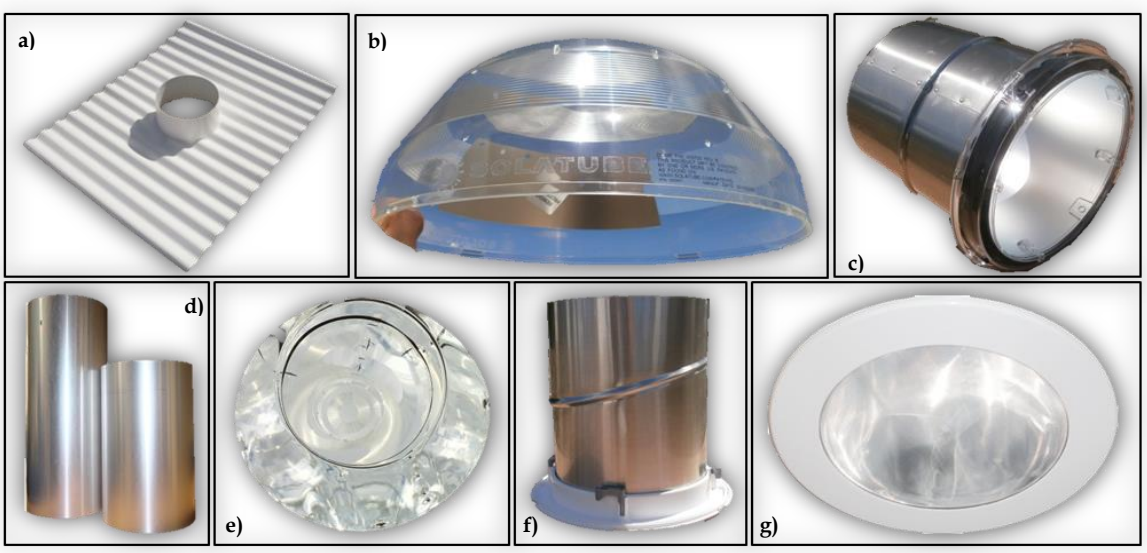


Figure 56 : a) Solin adapté aux tôles ondulées b) Coupole, avec le système Light Tracker™ c) Tube convoyeur cylindrique supérieur d) Rallonges pour convoyeur de lumière e)Vue intérieure du conduit – Paroi hautement réfléchissante f) Tube convoyeur cylindrique inférieur modulable, équipé des fixations pour plafond g) Diffuseur

2.2.2. Caractéristiques de la nouvelle cellule LGI

Afin de se rapprocher d'une mise en œuvre usuelle, la cellule initiale est divisée en deux zones par un faux plafond en contreplaqué équipé d'une trappe étanchéifiée par un joint. Cette interambiance est positionnée à 2,26 m. Le volume d'étude résultant est de 21,2 m^3 (symbolisé par la couleur jaune sur la Figure 57). Cette hauteur sous plafond reste conforme aux dispositions des deuxième et troisième alinéas de l'article R. 111-2[16] du code de la construction et de l'habitation.

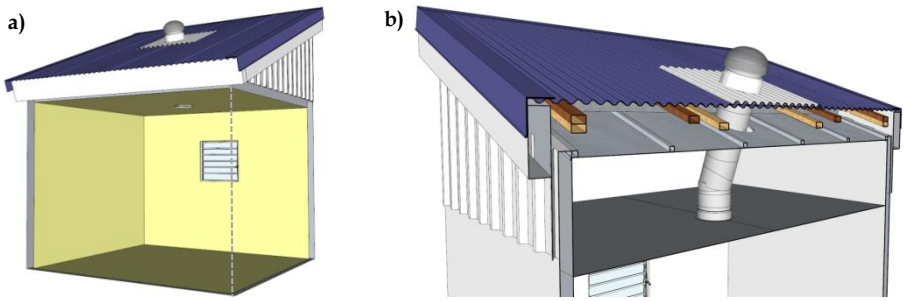


Figure 57 : a) Zone d'étude b) Coupe schématique transversale de la zone « comble » équipée du conduit

Les dimensions géométriques décrites dans le Tableau 9 correspondent à la zone considérée dans notre expérimentation. Nous nous limitons à la description apparente des différentes parois (i.e. indépendamment des éléments de structure).

[16] Code de la construction et de l'habitation R111-2

Tableau 9 : Caractéristiques dimensionnelles de la nouvelle LGI

Parois	Description	Dimension (m)	Surface opaque (m²)	Surface vitrée (m²)	Couleur surface opaque	Coef. réflexion / transmission
Plancher	Dalles mobiles	3,06 x 3,06m	9,36 m²	-	Grise	0,20
Parois Nord	Paroi opaque (Fibrociment + Polyuréthane + Fibrociment)	3,06 x 2,26m ht	5,80 m²	-	Blanche	0,70
	Porte vitrée (Simple vitrage)	0,56 x 2,00m ht	0,35 m²	0,77 m² (2 x 0,45 x 0,86m ht)	Blanche	0,85
Parois Sud	Paroi opaque (Fibrociment + Polyuréthane + Fibrociment)	3,06 x 2,26m ht	6,42 m²	-	Blanche	0,70
	Vitrage (type jalousie)	0,72 x 0,70m ht	-	0,50 m²	-	0,85
Paroi Est	Paroi opaque (Fibrociment + Polyuréthane + Fibrociment)	3,06 x 2,26m ht	6,92 m²	-	Blanche	0,70
Parois Ouest	Paroi opaque (Fibrociment + Polyuréthane + Fibrociment)	3,06 x 2,26m ht	6,92 m²	-	Blanche	0,70
Plafond	Paroi opaque (Plaque de Placoplatre+ Lame d'air + Plaque de Placoplatre+ MCP + Lame d'air + tôle)	3,06 x 3,06m ht	9,36 m²	-	Blanche	0,70

Le conduit de lumière utilisé a un diamètre de 25 cm. Afin que le collecteur et le diffuseur soient respectivement dans le plan de la toiture et du faux plafond, le tube est équipé d'un coude de 20°. Ce choix a été fait pour optimiser la collecte de la lumière, l'inclinaison du collecteur étant en adéquation avec notre latitude. La longueur totale est de 126 cm. Les portions sont droites, il n'y a donc pas de longueur de courbure (Figure 58). Le diffuseur est positionné au centre suivant l'axe $\overrightarrow{Ox}$ (axe Est-Ouest) et à 133 cm selon l'axe $\overrightarrow{Oy}$ (axe Sud-Nord). Il n'a pas pu être positionné au centre selon l'axe $\overrightarrow{Oy}$ du fait de la composition structurelle de la toiture. Dans l'absolument, cela n'aura qu'un impact sur la distribution lumineuse au sein de la pièce (la proximité d'une paroi favorisant les échanges par réflexion, i.e. les éclairements réfléchis internes).

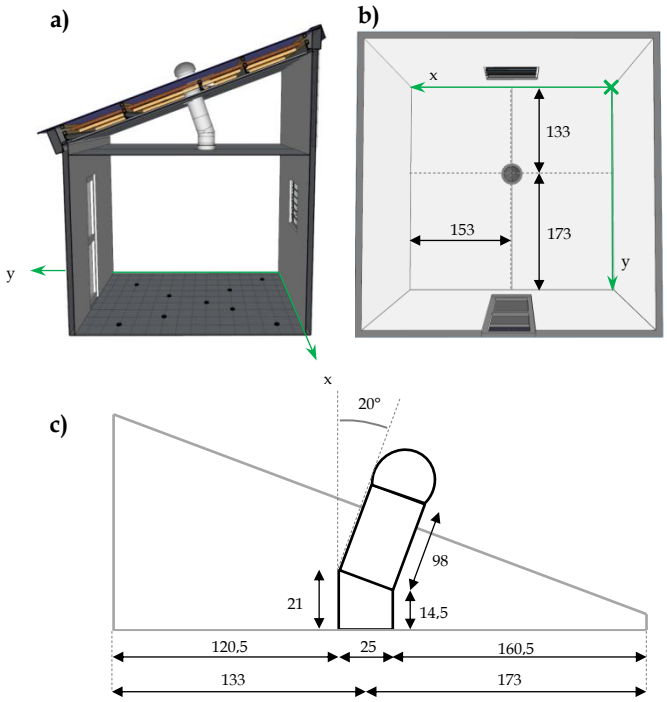


Figure 58 : a) Vue en coupe de la cellule LGI b) Vue de dessous de la LGI

2.3. **Impact de l'environnement et des masques lointains**

La cellule LGI est placée sur la plateforme expérimentale de l'IUT de Saint Pierre. Celle-ci dispose de nombreuses instrumentations. Il est important de noter que ces instrumentations n'ont pas d'impact sur l'objet de notre expérimentation, à savoir sur les phénomènes photométriques au sein de la zone d'étude. Le sol de la plate-forme est engazonné, ainsi nous considérerons que l'albédo du sol est de l'ordre de 0,70.

L'environnement de la cellule ne comprend qu'un masque lointain pouvant jouer un rôle prépondérant dans l'étude : le bâtiment du CROUS. Construit en 2005, il est situé à près de 20 mètres de la cellule LGI. Il peut affecter l'éclairement direct provenant du Soleil (par le biais des ombres portées recouvrant le support expérimental), et masquer une partie de la voûte céleste (éclairement diffus).

2.3.1. Impact de l'environnement sur l'accessibilité à l'éclairement direct

Nous nous sommes basés sur l'outil d'ombrage présent dans SketchUp afin de mettre en avant l'impact de l'ombre portée.

Avant tout, nous souhaitons valider notre approche par le biais d'un comparatif modèle/réalité. La Figure 59 donne une bonne idée de la justesse et de la précision de l'outil, du moins à un instant donné.

Figure 59 : Comparatif modèle 3D/réalité pour la journée du 20 mai 2013 à 8h55.

À l'aide de ce modèle, et d'après les relevés topographiques du site, nous constatons que le bâtiment du CROUS est susceptible de masquer une partie de l'éclairement direct reçu par la cellule, in fine, reçu par notre conduit de lumière.

Nous relevons les périodes pour lesquelles nous rencontrons un ombrage touchant la cellule ou recouvrant la toiture. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Synthèse des résultats des ombres portées du solveur SketchUp

	Période où l'ombre atteint la cellule		**Période où l'ombre atteint la toiture**		**Période où l'ombre recouvre le conduit de lumière**	
Heure d'étude	Date de début	Date de fin	Date de début	Date de fin	Date de début	Date de fin
6h30	22 février	27 octobre	22 février	16 octobre	28 février	8 octobre
7h00	15 février	13 octobre	2 mars	27 septembre	14 mars	18 septembre
7h30	3 mars	23 septembre	1 avril	6 septembre	20 avril	26 août
8h00	2 avril	6 septembre	3 mai	16 août	27 mai	28 juillet
8h30	27 avril	20 août	*Au-delà de 8h30, l'ombre du bâtiment du CROUS n'atteint pas la toiture de la cellule.*		*Au-delà de 8h12, l'ombre du bâtiment du CROUS n'atteint pas le conduit de lumière*	
8h40	20 mai	30 juillet				
	Au-delà de 8h40, l'ombre du bâtiment du CROUS n'atteint pas la cellule.					

Globalement, nous remarquons que le bâtiment ne s'interpose entre le Soleil et le conduit de lumière qu'une partie limitée de la matinée, et principalement, durant la période hivernale (où le Soleil est bas dans le ciel). L'apport en éclairement naturel (direct et diffus confondu) étant faible jusqu'à 8h00, nous estimons que le masque lointain joue un rôle négligeable dans le cadre de notre phase de validation expérimentale.

2.3.2. Impact de l'environnement sur l'accessibilité à l'éclairement diffus

Il est aussi nécessaire de voir la part de l'éclairement diffus (céleste) masquée par l'environnement de la cellule. Pour ce faire, nous utiliserons un imageur céleste appelé « *Total Sky Imager* ». Cet appareil est un système automatisé qui permet d'effectuer une prise de vue du ciel soit en continu, soit à un instant *t*. Il traite en temps réel les prises de vue et quantifie le pourcentage de couverture nuageuse. Dans notre cas, nous l'utiliserons pour évaluer la part du ciel caché par les masques proches ou lointains du champ de vision du collecteur du conduit (Figure 60).

Figure 60 : Le TSI positionné dans l'axe du collecteur

Nous utilisons un logiciel d'imagerie pour déterminer le pourcentage des masques en calculant le ratio entre les quantités de pixels dans la zone sombre (représentant les obstacles) sur celles dans la zone bleue (représentant la voûte céleste). Le cliché de la figure ci-dessous a été pris le 11 juin 2015 (Figure 61). Le bras support de la caméra ainsi que le masque solaire ne sont pas comptabilisés dans la part des masques.

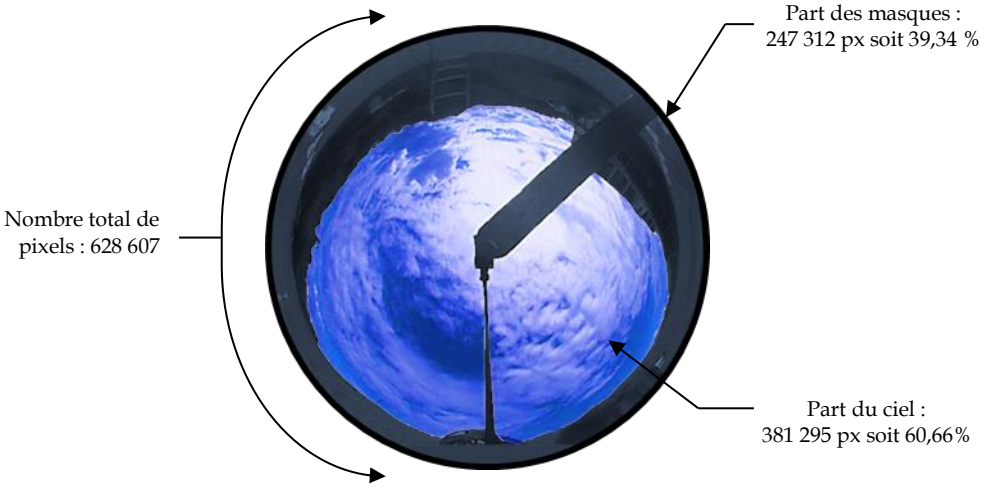


Figure 61 : Cliché du TSI dans le plan du collecteur

Les masques lointains cachent une part non négligeable de la voûte céleste. Nous devrons prendre ce facteur en compte lors de l'utilisation des données expérimentales. Nous nommons ces paramètres $\chi_{obstacle}$ et $\chi_{skyview}$:

$$\chi_{obstacle} = 39{,}34\ \%$$

$$\chi_{skyview} = 60{,}66\ \%$$

2.4. **Instrumentation utilisée**

2.4.1. Instruments à disposition

Les mesures liées à notre travail tel que les éclairements naturels extérieur et intérieur sont collectés à partir d'appareils de type AHLBORN possédant leur propre centrale d'acquisition. Nous avons synchronisé les centrales d'acquisition afin de pouvoir exploiter les résultats des mesures. Nous disposions de 9 luxmètres intérieurs, de 2 luxmètres extérieurs et de 2 centrales d'acquisition dont les caractéristiques sont fournies dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Caractéristiques des capteurs utilisés

Env.	Centrale d'acquisition	Capteurs	Variables mesurées	Plage d'utilisation
Intérieur	Centrale ALMEMO (AHLBORN) Nombre d'entrées disponibles : 9 Nombre d'entrées utilisées : 9	Luxmètre FLA603VL2 * 9 unités *Norme DIN classe B avec câble ALMEMO 2m et certificat d'étalonnage d'usine, calibré en lx résolution 0,01 lx*	Éclairement lumineux intérieur	0,05 à 12 500 lux
Extérieur	Centrale ALMEMO (AHLBORN) Nombre d'entrées disponibles : 8 Nombre d'entrées utilisées : 2	Luxmètre FLA613VLM *Luxmètre : Mesure de l'éclairement lumineux 360nm à 760nm, boitier alu anodisé à dôme plastique PMMA, perméable aux UV, étanche à la pluie. + 4 mètres de câble, soit 5,5 mètres de câble*	Éclairement lumineux global extérieur	*0 à 170 klux*
	Centrale ALMEMO (AHLBORN) Nombre d'entrées disponibles : 8 Nombre d'entrées utilisées : 2	Luxmètre FLA613VLM *Luxmètre : Mesure de l'éclairement lumineux 360nm à 760nm, boitier alu anodisé à dôme plastique PMMA, perméable aux UV, étanche à la pluie. + 4 mètres de câble, soit 5,5 mètres de câble* + Anneau d'ombrage pour luxmètre *Fabrication du laboratoire*	Éclairement lumineux diffus extérieur	*0 à 170 klux*

Les centrales ALMEMO sont synchronisées entre elles. Les données sont enregistrées au pas de temps de la minute.

2.4.2. Calibration des capteurs

Les luxmètres intérieurs datant de 2007, il a été nécessaire de les recalibrer. Pour ce faire, nous les avons placés dans une ambiance lumineuse similaire. Nous enregistrons les mesures puis évaluons l'éclairement moyen. De là, nous calculons pour chaque capteur l'erreur sur l'éclairement moyen. Cette valeur est utilisée lors de la programmation des instruments via le logiciel de la centrale d'acquisition ALMEMO.

Les luxmètres extérieurs sont neufs, nous n'avons pas eu besoin de les recalibrer (calibration préalablement effectuée par le fabricant, chaque capteur possède sa propre fiche technique).

2.4.3. Positionnement des capteurs

2.4.3.1. Luxmètres intérieurs

Les luxmètres ont été positionnés à l'intérieur de la cellule suivant la disposition des schémas à la suite (Figure 62). Étant limités par le nombre de capteurs, ceux-ci ont été positionnés de façon à respecter un maillage. Le décalage du plan utile suivant $\overrightarrow{Oy}$ par rapport au nu des murs est de 13 cm pour une maille de 20 cm. Le décalage du maillage en x est de 13 cm pour une maille de 28 cm. Le capteur central A0 est positionné dans l'axe vertical du diffuseur. Les autres capteurs sont positionnés suivant les diagonales de la cellule. De cette façon, chaque capteur est situé sur un cercle de diamètre différent dont le centre est A0, favorisant un visuel en courbe isolux. Le plan utile est placé à une hauteur de 10 cm, sur une structure métallique assurant l'horizontalité globale (Figure 83).

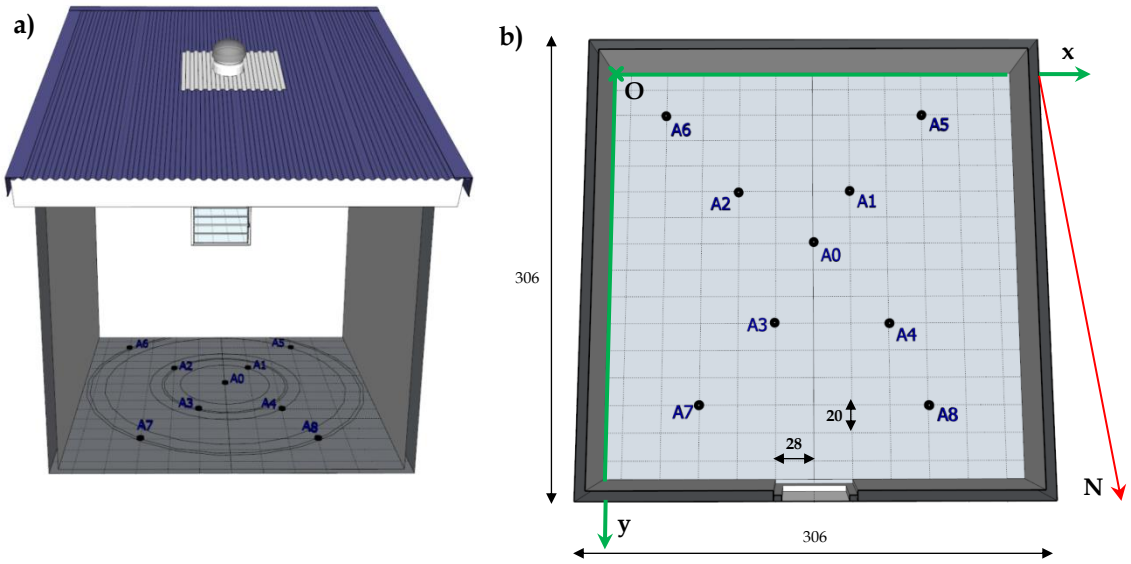


Figure 62 : Position des luxmètres à l'intérieur de la pièce

Le Tableau 12 recense les positions de chaque capteur, au départ d'une origine et des axes indiqués sur la figure précédente.

Tableau 12 : Position des luxmètres intérieurs

Capteur	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Capteur	x (cm)	y (cm)	z (cm)
A0	153	133	10	A5	237	33	10
A1	181	93	10	A6	41	33	10
A2	97	93	10	A7	69	253	10
A3	125	193	10	A8	237	253	10
A4	209	193	10				

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2.4.3.2. Luxmètres extérieurs

Les luxmètres extérieurs ont deux objectifs différents : la mesure de l'éclairement global et celle de l'éclairement diffus (Figure 63).

Figure 63 : Luxmètres extérieurs pour les éclairements diffus et global

Le luxmètre mesurant l'éclairement global est positionné sur la structure de la centrale météorologique (à 2 m du sol). La mesure de l'éclairement lumineux diffus ne doit prendre en compte que la contribution de la voûte céleste. C'est pourquoi nous associons un système à notre capteur permettant de s'interposer entre le Soleil et la cellule photosensible du luxmètre. Ce dispositif est un anneau d'ombrage et a été conçu au laboratoire. Le processus de conception est présenté en section 2.5.

L'éloignement de la cellule LGI nous oblige à utiliser deux centrales d'acquisition ALMEMO qui sont synchronisées.

2.4.4. Limite des capteurs

Les luxmètres utilisés ont des gammes particulières d'utilisation. Selon la documentation du constructeur, le luxmètre intérieur permet de relever un éclairement maximal limite de 12,5 klux. Vis-à-vis du luxmètre extérieur, le constructeur préconise une valeur limite maximale de 170 klux. Or, nous avons pu constater expérimentalement que ce luxmètre extérieur ne permettait une mesure réelle de l'éclairement que jusqu'à une certaine limite (Figure 64).

Le phénomène est largement visible lors d'un comparatif de courbes d'éclairement extérieur pour des journées en ciel clair. Nous sélectionnons la journée du 19 septembre 2013, où l'éclairement maximal est typique pour la période hivernale (117 klux), et la journée du 21 janvier 2014 où l'éclairement maximal mesuré atteint 137 klux, représentatif des éclairements rencontrés en été.

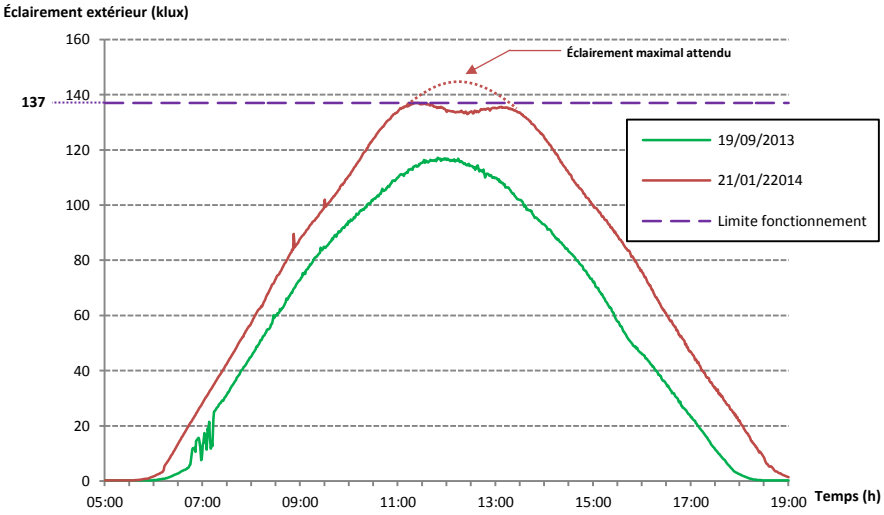


Figure 64 : Évolution de l'éclairement global et limite du luxmètre extérieur

Les deux jours n'ont pas leur éclairement global maximal au même instant : cela est dû à la différence de course solaire en été (journée du 21/01/2014) et en hiver (19/09/2014). Ce facteur n'est pas important pour ce que nous souhaitons mettre en avant dans ce paragraphe.

Nous constatons qu'au-delà de 137 klux, l'instrument fournit des mesures dont la décroissance n'est pas justifiée par des évènements extérieurs (pas de nuage, ni de faune ou flore pouvant engendrer une ombre).

La marge d'erreur de l'appareil étant inférieure à 10 % (cf. documentation technique du capteur), les valeurs entre 11h00 et 13h00 de cette courbe sont certainement erronées.

Ce constat nous force à limiter l'utilisation des jours de notre base de données où l'éclairement global extérieur avoisine 137 klux.

2.5. SHADECO : un anneau d'ombrage « low-cost » pour les mesures de diffus

Dans le contexte économique d'un projet de recherche expérimental, placé sous le signe de la maitrise du budget, il est nécessaire de créer des solutions efficaces et peu coûteuses afin d'éviter l'achat de dispositifs instrumentaux onéreux.

L'objet de ce travail a été d'établir un protocole de fabrication à moyen coût d'une bande pare-soleil, utilisable pour mesurer l'éclairement horizontal diffus, couplé à un luxmètre extérieur. La bande d'ombrage décrite dans ce protocole a été réalisée à partir de matériaux basiques. La procédure est décrite pour une latitude de 21°S, mais peut être aisément transposable aux autres parallèles.

La mesure de l'éclairement global (tel que mené au laboratoire dans les précédentes expérimentations) ne nécessite pas de dispositif couplé au capteur. Un positionnement parfaitement horizontal, loin de tout masque pouvant entrainer des ombres sur le capteur, suffit

au bon déroulement de l'acquisition. Ainsi, l'éclairement total est obtenu, comprenant la part[17] du direct et du diffus :

$$E_{global} = E_{direct} + E_{diffus} \quad (105)$$

Pour obtenir la quantité assimilée au direct ou au diffus, deux solutions sont possibles.

La première consiste à mesurer séparément l'éclairement horizontal global et l'éclairement direct normal. La mesure de l'éclairement direct normal nécessite alors un dispositif permettant de suivre la trajectoire du soleil (type traqueur solaire) et possédant un cône centré sur le soleil dont l'angle d'ouverture total est égal à 5° afin d'occulter le rayonnement diffus. L'éclairement horizontal diffus résulte alors de la différence entre l'éclairement horizontal global et l'éclairement direct normal à un facteur prés (hauteur solaire).

La seconde méthode consiste à mesurer la portion du diffus dans le bilan global, et de ce fait, déduire le direct. Cette approche nécessite également un dispositif occultant permettant de soustraire le rayonnement direct. Il existe deux approches: la bande d'ombrage solaire (peu onéreuse) et la boule solaire (onéreuse, nécessitant un tracker).

Pour notre étude, nous nous intéresserons à la seconde méthode, et plus particulièrement à la bande d'ombrage solaire. Cette approche correspond à notre philosophie de recherche: obtenir une instrumentation à peu de frais sans entacher la précision des résultats.

2.5.1. Mesure de l'éclairement diffus

La mesure du diffus demande une méthodologie toute particulière. Avant tout, il est nécessaire de préciser à quoi correspond l'éclairement diffus. L'éclairement horizontal diffus ne doit prendre en compte que la contribution de la voûte céleste. Celle-ci n'est pas isotrope ce qui explique que le rayonnement provenant de l'environnement relativement proche du soleil est beaucoup plus élevé.

Ce rayonnement peut être obtenu à l'aide d'un système permettant d'occulter le disque solaire par rapport à la cellule photosensible. Deux dispositifs assurent cette fonction. Le premier joue le même rôle que pour la mesure de l'éclairement direct normal, à savoir un disque ou une sphère placée sur un mécanisme automatisé qui permet de s'interposer à tout moment entre le Soleil et la cellule. Ces systèmes relativement récents nécessitent au départ un réglage parfait du mécanisme, puis plus aucune intervention de l'opérateur mis à part d'éventuelles maintenances. L'avantage est qu'il ne cache qu'une infime partie de la voûte céleste. L'inconvénient est que ce système est très coûteux par rapport à un dispositif simple comme les bandes pare-soleil (approximativement

[17] Nota : Il a été reporté par Drummond en 1956, et d'autres auteurs par la suite, que le ratio moyen entre la part du rayonnement diffus sur le rayonnement direct était supérieur ou égal à 0,65.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

11 k€[18]). Notons tout de même que cet appareil offre une estimation correcte de l'éclairement solaire dans des conditions de ciel clair, mais est équivalent au second dispositif, moins coûteux, en ciel couvert, à savoir la bande pare-soleil (Ineichen et al. 1983).

Ce système est le procédé classique de mesure du diffus. Il est utilisé depuis de nombreuses années de par son faible coût par rapport au premier dispositif ainsi que sa simplicité d'utilisation. L'inconvénient est qu'il nécessite un réglage fréquent (au moins 2 fois par semaine au moment des équinoxes lorsque la déclinaison varie rapidement), ce qui nécessite l'intervention fréquente d'un opérateur. Cependant, c'est le système dont le suivi est le plus facile à assurer. Dans notre étude, nous nous proposons d'analyser le fonctionnement de la bande pare-soleil afin de concevoir un dispositif peu coûteux et adapté aux luxmètres dont le diamètre du dôme de mesure est de 8 cm.

2.5.2. Principe de l'anneau d'ombrage

L'anneau d'ombrage, également appelé bande pare-soleil, est un dispositif permettant de cacher les rayons solaires directs afin de ne mesurer que la part du diffus. Il n'est réglé qu'en fonction de la déclinaison solaire (Figure 65).

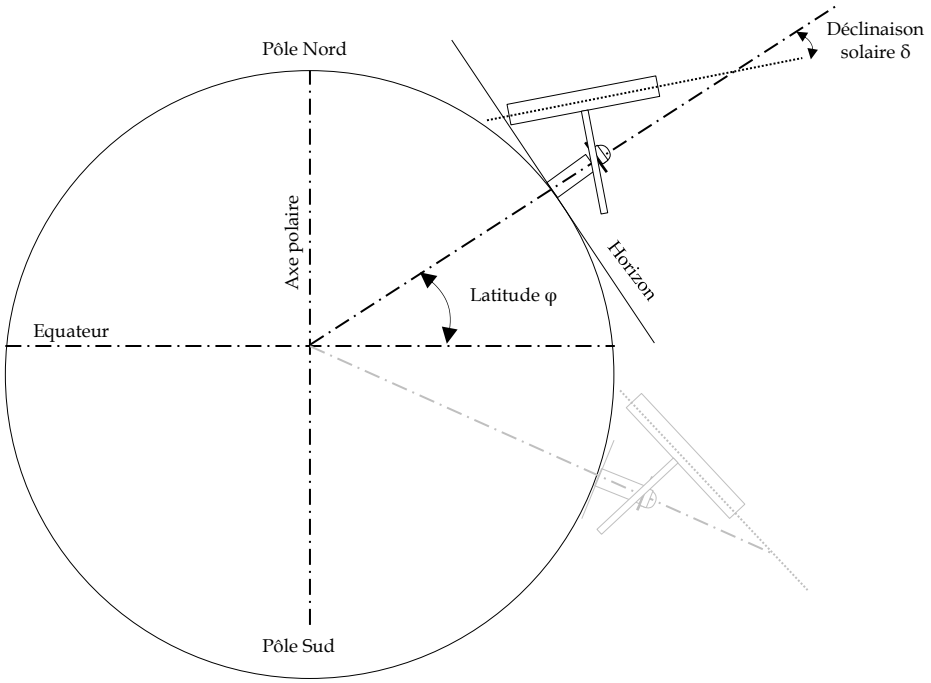


Figure 65 : Fonctionnement de l'anneau d'ombrage dans le repère global

L'anneau est fixé au support à l'aide de deux bras coulissants. Il est positionné de telle façon à ce qu'il se trouve parallèle au plan équatorial. Autrement dit, il fait avec la verticale un angle égal à la latitude du lieu (ou ses bras font avec l'horizontale un angle égal à la latitude du lieu). Ces deux bras coulissants permettent d'ajuster la position de la bande de telle manière que le

[18] Source : Kipp&Zonen

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

luxmètre et le sommet de la bande se trouvent dans l'axe des rayons du soleil. La droite réunissant la cellule et le sommet de la bande fait avec le plan de l'anneau un angle égal à la déclinaison solaire (Figure 66).

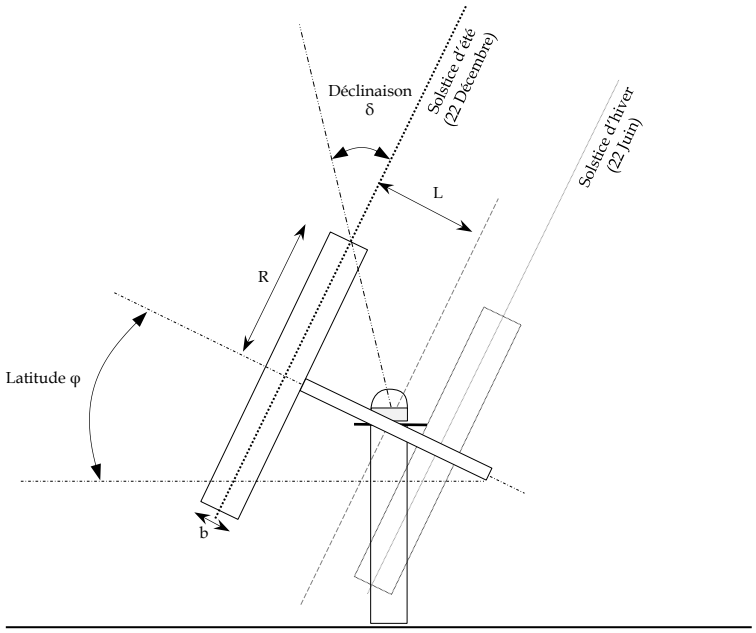


Figure 66 : Fonctionnement de l'anneau d'ombrage dans le repère local

Les différentes trajectoires prises par le soleil au cours de l'année sont en effet parallèles. Pour l'hémisphère Sud, la hauteur solaire minimale est atteinte le 22 juin (solstice d'hiver) et la maximale le 22 décembre (solstice d'été). L'équinoxe représentant les jours où le soleil se lève exactement à l'Est pour se coucher exactement à l'Ouest (Figure 67).

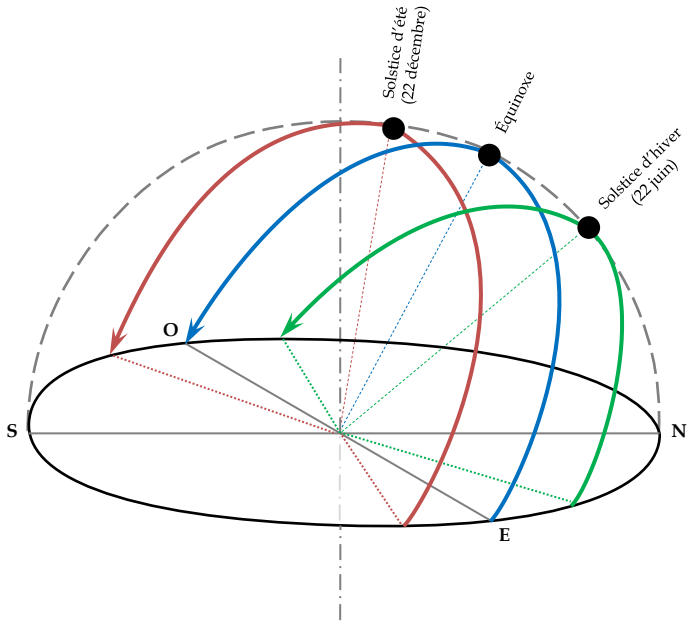


Figure 67 : Course du Soleil dans l'hémisphère sud

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2.5.3. Les principaux types de bande de la bibliographie

La bande pare-soleil est couramment utilisée pour les mesures d'éclairement énergétique utilisant un capteur de type pyranomètre. Elle existe depuis plus d'un demi-siècle.

2.5.3.1. Anneau de Drummond

En 1956, Drummond crée l'un des premiers anneaux permettant la mesure de l'éclairement diffus (Figure 68). Il proposa à l'époque deux technologies d'anneau en fonction de la latitude dans lequel il est utilisé (Drummond 1956).

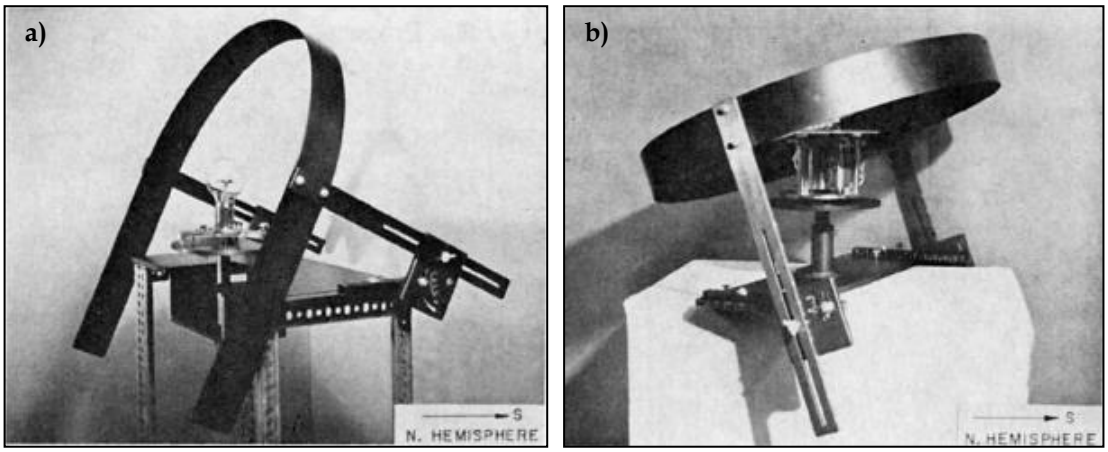


Figure 68 : Anneau de Drummond
a) des latitudes comprises entre 0-60° N ou S
b) des latitudes comprises entre 60-90° N ou S
(Drummond 1956)

2.5.3.2. Anneau de Robinson

En 1964, Robinson (Robinson and Stoch 1964) élabore un dispositif permettant d'ombrager un pyranomètre pour relever la part de l'éclairement diffus (Figure 69). La bande est une partie de la sphère entourant le pyranomètre Eppley avec une distance constante anneau/capteur tout au long de l'année. Dans ses travaux, il précise sa démarche de conception de sa bande en précisant que la largeur minimale du système doit correspondre au minimum à la largeur du dôme en verre du pyranomètre. En effet, si l'on se focalise uniquement sur la cellule photosensible des phénomènes d'interréflexions pourraient fausser les mesures. De plus, et de façon à réduire la fréquence des réglages de sa bande, Robinson avait choisi d'agrandir la largeur du dispositif.

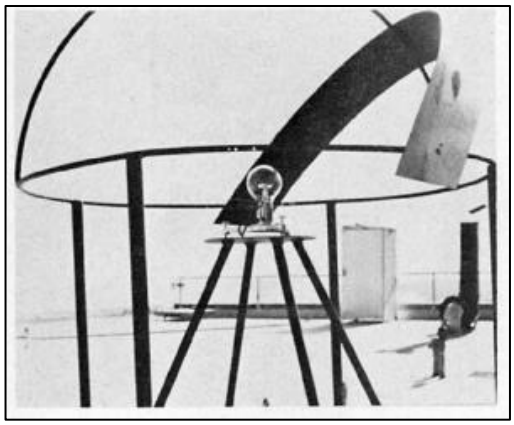


Figure 69 : Anneau de Robinson
(Robinson and Stoch 1964)

2.5.3.3. Anneau CM121B de Kipp&Zonen

L'anneau le plus connu est l'anneau de la société Kipp&Zonen. Celui-ci a un profil en U permettant de pallier la variation saisonnière de l'angle de vue de la bande variant en fonction de la déclinaison (Figure 70). Un tel profil permet, lorsque la valeur absolue de la déclinaison augmente, de compenser la diminution de la surface apparente de la partie plate du U par une augmentation de la surface apparente du rebord du U. Cette correction semble garantir un angle de vue constant à ±2% quelle que soit la déclinaison. Le réglage s'effectue au moyen d'une réglette dont la mesure varie en fonction de la déclinaison. L'anneau translate au moyen de barres le reliant à la structure inclinée par rapport à la latitude du lieu.

Il est important de noter que Kipp&Zonen n'a apporté qu'une originalité au niveau du profil de la bande. Le système restant est basé sur la technologie développée par Drummond en 1956 (Drummond 1956).

Figure 70 : Anneau CM121B
(Kipp & Zonen)

2.5.3.4. Anneau de Brooks

Brooks a proposé en 2010 un anneau multifonctionnel permettant de mesurer à la fois l'éclairement énergétique global et diffus en utilisant un seul pyranomètre (Brooks 2010). La

forme générale du procédé est issue des travaux de Drummond. La bande perforée assure alternativement une série de mesures du diffus en partie pleine et une autre série pour le global en partie creuse (Figure 71).

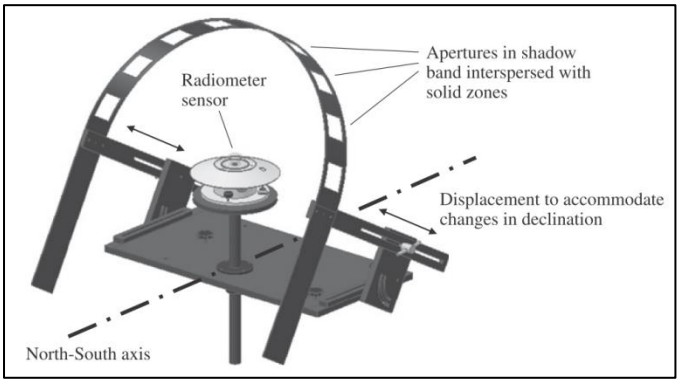


Figure 71 : Anneau de Brooks
(Brooks 2010)

Ainsi, le capteur ne mesure qu'une grandeur à la fois. Brooks a également développé un algorithme permettant de retrouver la valeur manquante (éclairements diffus ou direct). Tout comme l'anneau de Kipp&Zonen, le réglage quotidien pour compenser la déclinaison solaire se fait à l'aide de tiges. La bande est également dans l'axe Nord-Sud et est inclinée en fonction de la latitude du lieu.

2.5.3.5. Anneau MDD (Movable Detector Device)

Dans sa publication parue en 2001, Oliveira présente un anneau appelé *Mobale Detector Device* utilisé pour la mesure de l'éclairement énergétique (Oliveira et al. 2001). Contrairement aux deux premiers systèmes, le MDD compense la variation saisonnière de l'ombre par un déplacement horizontal du capteur (Figure 72).

Figure 72 : Anneau MDD
(Oliveira et al. 2001)

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2.5.3.6. Choix pour l'étude

Dans notre étude, nous utiliserons l'approche de Drummond pour élaborer une bande pare-soleil adaptée à la latitude dans laquelle elle est utilisée. La bande réalisée aura son inclinaison fixe vu qu'elle ne sera utilisée qu'à la latitude du lieu d'étude. Notons tout de même que cette inclinaison pourra aisément être modifiée pour une conception dans un autre lieu.

Considérant notre latitude, et conformément aux préconisations de Drummond (1964), nous utiliserons une bande plate en forme de U.

Comme précisé en section 2.5.1, notre bande pare-soleil est destinée à être utilisée pour des mesures en éclairement lumineux. Pour se faire, un luxmètre de type ALHBORN de référence FLA 613 VLM sera utilisé (Figure 73).

Figure 73 : Tête de mesure d'éclairement lumineux type FLA 613 VLM

La tête de mesure utilise un boîtier en aluminium anodisé à dôme plastique perméable aux UV et protégé contre la pluie, les projections d'eau et la condensation ce qui le rend efficace pour les mesures en environnement extérieur.

2.5.4. Conception géométrique de l'anneau

D'une manière générale, le rapport entre la largeur de la bande et son rayon (b/R) pour un anneau standard varie entre 0,1 et 0,3 (Dumortier 1995).

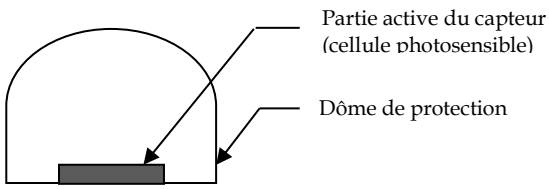


Figure 74 : Décomposition terminologique du capteur

La différence entre le pyranomètre CMP11 (utilisé pour les mesures avec l'anneau Kipp&Zonen) et le luxmètre FLA 613 VLM est que le dôme du capteur n'a pas le même diamètre. L'anneau de diffus Kipp&Zonen a été conçu pour des pyranomètres de dôme 5 cm, c'est la raison pour laquelle sa bande ne mesure que 5,5 cm. Celui-ci masque le dôme du capteur, mais surtout sa partie active pour la mesure en éclairement énergétique. Le luxmètre d'ALHBORN ayant un

dôme plus grand (8 cm de diamètre), il est nécessaire d'utiliser une bande plus large. En effet, comme mentionné par Robinson nous ne pouvons pas nous contenter de masquer la partie active du capteur, car les phénomènes de réflexions ont un impact non négligeable pour une mesure en éclairement lumineux.

Pour ce faire, nous évaluons de façon analytique la largeur b de la bande nécessaire pour garantir une ombre minimale l_{ombre} de 8 cm.

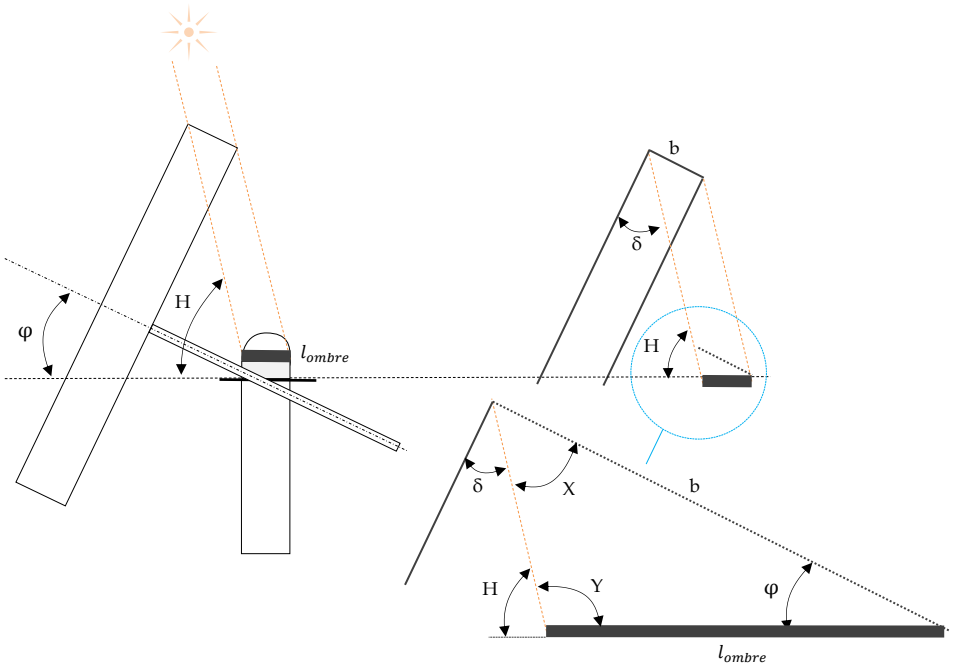


Figure 75 : Impact de la hauteur solaire sur l'ombre

En utilisant la loi sur les sinus, nous obtenons :

$$\frac{b}{\sin Y} = \frac{l_{ombre}}{\sin X} \tag{106}$$

Avec,

$$\sin Y = \sin(\pi - H_s) \tag{107}$$

$$\sin X = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \tag{108}$$

$$H_s = \frac{\pi}{2} - \delta + \varphi \tag{109}$$

Nous obtenons :

$$\sin Y = \sin\left(\pi - \frac{\pi}{2} + \delta - \varphi\right) \tag{110}$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Soit

$$sin\,Y = cos(\delta - \varphi) \tag{111}$$

Et

$$sin\,X = cos(\delta) \tag{112}$$

Il vient :

$$b = l_{ombre} \times \frac{cos(\delta - \varphi)}{cos(\delta)} \tag{113}$$

Nous souhaitons obtenir la valeur de « b » maximale permettant d'assurer une ombre au moins égale au diamètre du dôme du capteur. Dans cette équation, le seul paramètre à varier tout au long de l'année est la déclinaison solaire.

La hauteur solaire est définie par une fonction dépendante de sa déclinaison ainsi que de la latitude du lieu. La déclinaison solaire est l'angle entre le plan équatorial terrestre et le plan écliptique apparent. La déclinaison varie de -23°27′ au solstice d'hiver à +23°27′au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. Elle varie très faiblement à chaque instant de la journée. Ainsi, nous la considérerons comme constante pendant cette période. Dans la littérature (Clarke 2001), nous retrouvons couramment la formule suivante pour déterminer la déclinaison solaire :

$$\delta = 23{,}45.sin(280{,}1 + 0{,}9863.J) \tag{114}$$

Cette équation décrit la déclinaison à 1° près (Bertolo and Bourges 2014).

Nous obtenons une largeur de bande nécessaire de 8,7 cm pour garantir une ombre de 8 cm durant l'année. Notons que cette dimension a été relevée pour les jours proches des solstices.

2.5.4.1. Évaluation du diamètre nécessaire

Comme vu précédemment, le ratio b/R courant pour les bandes pare-soleil se situe entre 0,1 et 0,3. Nous calculons le diamètre nécessaire à notre anneau pour qu'il puisse être dans cet intervalle tout en limitant l'utilisation de matériau (coût). Pour ce faire, nous testons les bornes de cet intervalle :

Pour b/R = 0,3 : $R = {}^{b}/_{0,3}$ R = 29 cm, soit un diamètre de 58 cm

Pour b/R = 0,1 : $R = {}^{b}/_{0,1}$ R = 87 cm, soit un diamètre de 174 cm

Le critère de choix est également quantitatif et économique. Nous choisissons un diamètre de 60 cm, assurant un ratio de 0,29.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2.5.4.2. Conception de la bande via SketchUp

Afin de concevoir la forme générale de notre bande, nous utilisons le modeleur 3D, SketchUp, développé par Trimble. Trimble SketchUp est un logiciel de modélisation 3D, d'animation et de cartographie orienté vers l'architecture. Il possède un outil de simulation des ombres basé sur les coordonnées GPS du lieu d'étude.

L'objectif de cette section est de mettre en image les calculs précédemment faits, en vérifiant l'efficacité de la largeur de la bande pare-soleil au cours de l'année.

2.5.4.2.1. Conception Assistée par Ordinateur

Le support de l'anneau est réalisé en acier de façon à avoir une structure légère capable de changer de position en fonction des besoins. Nous préconisons le choix de tubes carrés en acier de section 35x35 cm, protégé par de la peinture anticorrosion.

Nous ajoutons à la structure une plaque métallique d'épaisseur 2 mm afin de rigidifier le support du capteur. Le capteur est élevé par rapport à la structure porteuse à l'aide d'une pièce fixée au centre du support. Sur cette pièce, repose un système de plaque parallèle, et de mêmes dimensions, couplées à des vis permettant un réglage de l'horizontalité. Des bulles de niveau, récupérables sur des niveaux de maçon, positionnées de part et d'autre des plaques permettent d'ajuster l'horizontalité (Figure 76).

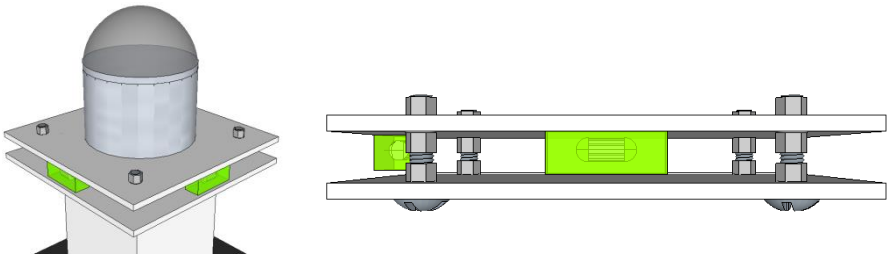


Figure 76 : Réglage de l'horizontalité du capteur

Sur cette pièce reposera un système de deux plaques parallèles, et de mêmes dimensions, couplées à des vis permettant le réglage de l'horizontalité.

Le capteur est ensuite positionné au centre de la plaque. Le réglage des tiges s'effectue par translation dans la pièce usinée ci-dessus. Afin de maintenir les tiges, une vis bloquante est utilisée. La pièce de la Figure 77 a) est usinée de sorte à obtenir en inclinaison la latitude du lieu considéré.

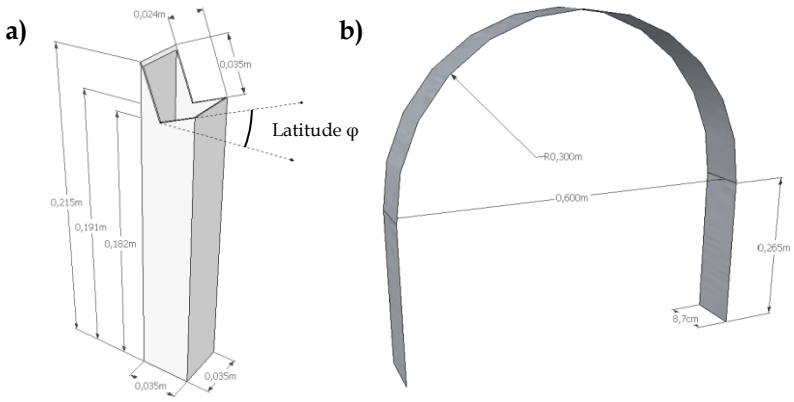


Figure 77 : a) Pièce usinée selon la latitude du lieu b) bande U de rayon 30 cm

Nous obtenons ainsi l'anneau d'ombrage Shadeco, présenté en Figure 78.

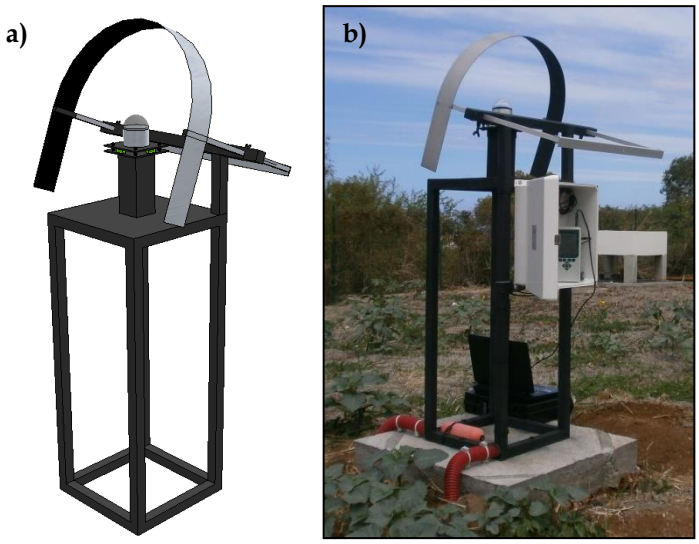


Figure 78 : a) Modélisation 3D de Shadeco b) Shadeco réalisé

2.5.4.2.2. Vérification à l'aide du CAD (*Computer-Aided-Design*)

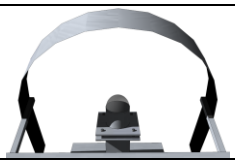
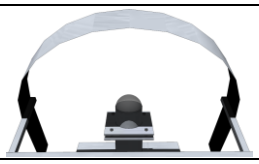
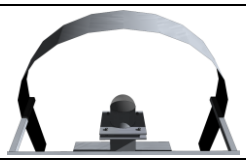
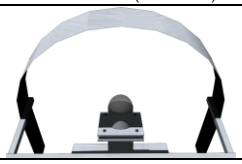
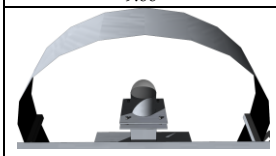
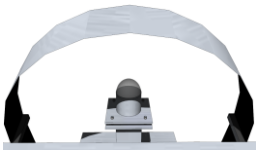
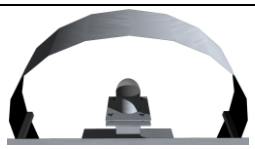
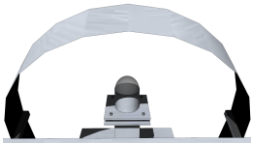
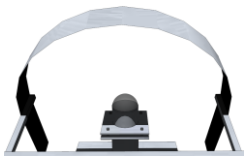
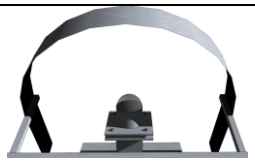
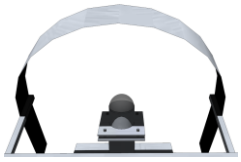
Nous souhaitons vérifier que les dimensions choisies pour notre bande pare-soleil sont justes. Pour ce faire, nous allons utiliser l'application « Ombre portée » du logiciel SketchUp pour quelques dates caractéristiques, et vérifier si la bande pare-soleil est efficace.

Nous paramétrons notre modèle SketchUp pour une latitude et une longitude locale (Réunion : 21,34°S / 55,48°E). L'anneau doit être orienté Nord.

Nous constatons que l'anneau assure sa fonction durant l'ensemble de l'année, aux deux extremums du réglage des tiges, i.e. aux équinoxes (Tableau 13).

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Tableau 13 : Évolution de l'ombre masquant le capteur au cours de l'année

La Réunion - 21.34 S / 55.48 E (UTC+4)				
Date	Heure			
22 mars	9:00	12:00	16:00	Midi solaire (11:34 am)
				
22 juin	9:00	12:00	16:00	Midi solaire (11:40 am)
				
22 septembre	9:00	12:00	16:00	Midi solaire (11:50 am)
				
22 décembre	9:00	12:00	16:00	Midi solaire (11:42 am)

2.5.5. Facteur de correction

La bande pare-soleil a l'inconvénient de masquer, en plus du disque solaire, une part non négligeable de la voûte céleste (Figure 79), ce qui donne des résultats sous-estimant la réalité (Painter 1981; LeBaron, Michalsky, and Perez 1990). Cette approximation est complexe à prendre en compte, car elle ne dépend pas uniquement des paramètres géométriques de l'anneau, mais également de la distribution hémisphérique de l'éclairement solaire (Basher 1984; Burek, Norton, and Probert 1988). Un facteur doit permettre de corriger ces éléments en permettant de prendre en compte la contribution de la partie de la voûte céleste masquée par la bande.

Figure 79 : Vue de la bande dans la position du capteur

Ce facteur de correction est évalué à partir du rapport de l'éclairement qu'aurait dû recevoir le capteur et la part de l'éclairement stoppé par l'anneau. Il a été démontré que l'erreur maximale engendrée par une bande pare-soleil pouvait atteindre 24 %. Il est donc nécessaire d'apporter une correction précise des mesures (Oliveira 2002).

Ce facteur de correction peut être évalué à partir de la méthode établie par Drummond en 1956 (Drummond 1956) basée sur une analyse géométrique, permettant de calculer la proportion de la surface du ciel masquée par la bande. Or, en réalité, la distribution lumineuse de la voûte céleste n'est pas isotrope. Un facteur d'anisotropie doit être pris en considération (prise en compte du phénomène circumsolaire). De nombreux auteurs ont justifié la nécessité d'appliquer un facteur de correction anisotropique, comme Kudish et Ianetz en 1993 (Kudish and Ianetz 1993) qui ont démontré que ce facteur variait entre 2,9 % et 20,9 % alors que le facteur de correction géométrique ne varie que dans l'intervalle 2,9 % à 14 %.

Painter, en 1981 (Painter 1981), a comparé les résultats obtenus entre un anneau d'ombrage et un disque occultant (à l'aide d'un traqueur). Il conclut que le facteur de correction anisotropique subit une forte variation selon la saison.

En 1999, Vartiainen (Vartiainen 1999) a montré que l'écart type du facteur de correction mensuel isotrope par rapport au facteur de correction totale est compris entre 1% pour l'hiver à 7,5 % pour les mois d'été.

Au cours de la dernière décennie, plusieurs chercheurs ont entrepris des travaux concernant l'élaboration d'une méthode de correction du rayonnement diffus anisotrope.

En 1983, Ineichen et al. (Ineichen et al. 1983) ont rapporté leur méthode de combinaison des deux modèles simples pour déterminer le facteur de correction total : l'un était le modèle géométrique isotrope et l'autre est basé sur le rayonnement diffus, exprimé en fonction de l'altitude solaire.

En 1983, Kasten et al. (Kasten, Dehne, and Brettschneier 1983) ont examiné l'influence de trois paramètres qui sont les plus importants pour déterminer le facteur de correction anisotrope, à savoir le rapport entre le rayonnement diffus et le rayonnement global, la déclinaison solaire et le coefficient de transmission atmosphérique.

En 1987, l'analyse et l'évaluation de Siren (Siren 1987), basée sur un modèle de rayonnement céleste à deux composantes, ont montré que le facteur de correction total était fonction de la géométrie de la bande pare-soleil, de son l'emplacement et de la distribution du rayonnement céleste.

En 1990, LeBaron et al. (LeBaron, Michalsky, and Perez 1990) ont présenté un modèle basé sur le jeu de paramètres mis en avant par Perez et al . en 1990.

2.5.5.1. L'anisotropie de l'éclairement céleste

Les modèles de facteurs de correction ont tous été conçus pour corriger les mesures de rayonnement diffus associés à l'utilisation d'un anneau d'ombrage. L'objectif était de prendre en compte la partie du ciel caché par la bande, et de la comptabiliser afin d'obtenir une valeur du diffus plus juste. Comme montré précédemment, le rayonnement céleste ne peut être considéré uniquement comme isotrope, surtout lorsque celui est couvert. L'anisotropie céleste a été étudiée et pris en compte par la suite dans les modèles de facteur de correction.

Les modèles de facteur de correction établis se basent sur des hypothèses différentes. Drummond en 1956 a créé un facteur de correction isotrope, en considérant le ciel comme uniforme (pas de prise en compte du phénomène d'anisotropie lié, par exemple, au cercle circumsolaire). Si ce modèle semble fournir des résultats acceptables en ciel clair, il atteint ses limites en ciel couvert. Pour répondre à cette problématique, d'autres auteurs ont mis en place des modèles se généralisant à différents types de ciel en considérant l'anisotropie céleste. En 2004, Pérez précise que le modèle de Drummond est à exclure des études météorologiques car l'isotropie du ciel est une erreur grossière.

Ces modèles de facteur de correction ont été établis pour le rayonnement solaire (spectre complet énergétique). Or, il est intéressant de se demander si ces mêmes modèles restent valables pour corriger les mesures de diffus effectuées en éclairement (bande spectrale du visible : 0,4 à 0,8 µm).

L'anisotropie céleste du flux énergétique est-elle la même que celle du flux lumineux ?

En première approximation, nous pourrions le considérer. Sur l'aspect quantitatif, si une zone du ciel (circumsolaire) émet plus de rayonnement dans la bande spectrale totale, il parait logique qu'elle en émette également plus dans la bande visible. Appelons $R_{ani_{totale}}$ le coefficient d'accroissement du flux en fonction de la position dans le ciel pour la bande totale, et $R_{ani_{visible}}$ pour la bande visible. Cette hypothèse se traduit par :

$$R_{ani_{totale}} = R_{ani_{visible}} \quad (115)$$

Il serait intéressant de savoir si ce rapport se conserve d'une bande spectrale à une autre, et d'une zone géographique à une autre.

Cependant, cette approximation reste une hypothèse. Voici les éléments motivant cette réflexion :

- Lors de sa diffusion, la lumière change de comportement en fonction de la matière qu'elle traverse. La masse atmosphérique, engendrant l'anisotropie (principalement en ciel couvert), contient tout un panel de particules pouvant engendrer une propagation de la lumière différente entre l'onde électromagnétique située dans la bande spectrale du visible et l'onde complète.
- L'indice de réfraction, du moins l'angle de réfraction varie en fonction de chaque bande spectrale, et peut avoir une conséquence sur la distinction de l'onde visible et totale. En effet, une goutte

d'eau, par exemple, réagit comme un dioptre. Elle décompose le rayonnement électromagnétique (et nous ne voyons usuellement que son impact sur la lumière visible, source des arc-en-ciel). Il est possible que la répartition du flux lumineux total soit différente de celle du flux énergétique. Le flux énergétique contient des bandes spectrales ayant leur propre indice de réfraction, qui, sur un angle solide donné distinguerait le « plan énergétique » du « plan lumineux ». La propagation à travers une couche atmosphérique « chargée » (ex. nuage) engendrerait une répartition reçue par le capteur de l'anneau différente selon l'aspect énergétique ou lumineux.

- La température et la matière agissent sur le comportement de la lumière (en fait, la température agit sur la matière qui agit sur la lumière : c'est le principe de ralentissement des molécules par la température, qui « s'écartent » moins vite à l'arrivée des photons). La couche atmosphérique contient une multitude de zones thermiques et de gaz. Il est possible que chaque bande spectrale réagisse différemment en fonction de ces zones.
- Lorsqu'un rayonnement électromagnétique atteint un objet, certaines longueurs d'onde sont absorbées tandis que d'autres sont réfléchies par l'objet.
- Une partie du rayonnement peut éventuellement être transmise à travers l'objet si celui-ci est plus ou moins transparent, avec un changement de direction de la propagation du rayonnement dû à la réfraction. La partie du rayonnement qui est absorbée modifie l'énergie interne de l'objet et produit de la chaleur qui sera réémise sous forme d'un rayonnement à une plus grande longueur d'onde. Ce phénomène sera intercepté et mesuré par le pyranomètre (flux énergétique), alors que le luxmètre (flux lumineux) ne captera que la lumière blanche.

Pour la suite, nous prendrons comme hypothèse que l'anisotropie est indépendante de la bande spectrale. Cependant, cela pourra faire l'objet de perspectives expérimentales intéressantes.

2.5.5.2. Méthode de Drummond

En 1956, Drummond (Drummond 1956) établit un modèle de facteur de correction en prenant l'hypothèse que le ciel est isotropique. Partant de cette simplification, il en déduit l'équation à l'aide d'une analyse géométrique du dispositif. Il en ressort le facteur de correction isotrope :

$$C_D = \frac{1}{1-f} \tag{116}$$

Avec,

$$f = \frac{X}{T} = 2 \times \left(\frac{2.b}{\pi.r}\right) \cos^3 \delta \, (\omega_{so} \sin\phi \;\; \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \sin\omega_{so}) \tag{117}$$

L'équation est basée sur l'hypothèse que la distribution du rayonnement de la voûte céleste est uniforme (que l'intensité du rayonnement céleste reste invariante en fonction de la position).

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

En utilisant le facteur de correction de Drummond, nous obtenons la valeur du rayonnement corrigé par le facteur de correction de Drummond :

$$I_{d\ Drummond} = C_D . I_d \tag{118}$$

2.5.5.3. Méthode de LeBaron

La méthode de LeBaron (LeBaron, Michalsky, and Perez 1990) a été construite à partir de l'approche de Drummond (1956). Son modèle de correction utilise quatre paramètres pour décrire à la fois des conditions de ciel isotropique et anisotropique. Trois des quatre paramètres décrivent les conditions anisotropiques (angle zénithal ν, utilisé pour positionner le soleil suivant l'axe vertical, indice de clarté du ciel ε et l'indice de luminosité du ciel Δ). Notons que ε est fonction des conditions nuageuses et que Δ dépend de l'épaisseur de la couche nuageuse et des charges d'aérosols. Le dernier paramètre correspond à C_D.

Dans le modèle de LeBaron, le paramètre ε est simplifié par rapport à celui annoncé par Perez, car il n'est pas corrigé par rapport à l'angle zénithal.

Les trois paramètres ν, ε et Δ sont utilisés pour décrire le facteur de correction anisotropique de l'anneau d'ombrage :

$$\varepsilon = \frac{\left(I_{b,h,u} + I_{d,h}\right)}{I_{d,h}} \tag{119}$$

Le rayonnement direct normal non corrigé, $I_{b,h,u}$, pouvant être calculé par :

$$I_{b,h,u} = \frac{I_{G,h} - I_{d,h}}{\cos \nu} \tag{120}$$

$$\Delta = \frac{I_{d,h} . AM}{I_{sc}} \tag{121}$$

Avec,

$$AM = \frac{1}{\sin H_s + 0{,}15 \times (93{,}885 - \nu)^{-1{,}253}} \tag{122}$$

En utilisant les quatre paramètres dans l'ordre, ν, C_D, ε et Δ, le modèle regroupe les données selon 256 catégories distinctes, de sorte que le facteur de correction final de LeBaron, noté C_L soit « recherché» dans le tableau présenté dans (LeBaron, Michalsky, and Perez 1990) et appliqué aux mesures obtenues avec la bande pare-soleil selon l'équation suivante :

$$I_{dLebaron} = C_L \times I_d \tag{123}$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2.5.5.4. Méthode de Batlles

Le modèle de Batlles (Batlles, Olmo, and Alados-Arboledas 1995) est basé sur une régression linéaire utilisant les quatre paramètres de Le Baron (m, C_D et Δ) associés à des variables empiriques dépendantes de ε :

- Pour $\varepsilon \leq 3{,}5$

$$C_B = 1{,}178.C_D + 0{,}207.\ln\Delta + \frac{0{,}122}{e^{AM}} \tag{124}$$

- Pour $3.5 < \varepsilon \leq 8$

$$C_B = 1{,}454.C_D + 0{,}655.\ln\Delta + \frac{0{,}4756}{e^{AM}} \tag{125}$$

- Pour $8 < \varepsilon \leq 11$

$$C_B = 1{,}486.C_D + 0{,}495.\ln\Delta \tag{126}$$

- Pour $\varepsilon > 11$

$$C_B = 1{,}384.C_D + 0{,}363.\ln\Delta \tag{127}$$

On en déduit le rayonnement corrigé par le facteur de correction de Batlles :

$$I_{dBattles} = C_B \times I_d \tag{128}$$

2.5.5.5. Méthode de Muneer et Zhang

Le modèle de Muneer et Zhang (Muneer and Zhang 2001) est basé sur les travaux de Moon et Spencer de 1942 sur la correction liée à la distribution lumineuse du ciel. Il couple la prise en compte de la géométrie de la bande et l'anisotropie du ciel. Le rayonnement diffus dépend du rayonnement zénithal L_z et des paramètres $b_1$et b_2 qui correspondent aux indices de distribution du rayonnement dans les 2 cadrans célestes : celui contenant le soleil et son opposé.

$$I_{d,h} = \left(\frac{\pi.L_z}{6}\right) \times \left[\frac{3+2b_1}{1+b_1} + \frac{3+2b_2}{1+b_2}\right] \tag{129}$$

Où pour $k_t > 0{,}2$:

$$b_1 = \frac{3{,}6 - 10{,}462k_t}{-0{,}4 + 6{,}974k_t} \tag{130}$$

$$b_2 = \frac{1{,}565 - 0{,}990k_t}{0{,}957 - 0{,}660k_t} \tag{131}$$

Où pour $k_t \leq 0{,}2$:

$$b_1 = b_2 = 1{,}68 \tag{132}$$

Le facteur de correction associé :

$$C_M = \frac{1}{\left(1 - \frac{F}{I_{d,h}}\right)} \tag{133}$$

Avec,

$$F = W.L_z.\cos\delta.\left[\frac{I_1 + b_1.I_2}{1 + b_1}\right] \tag{134}$$

Avec,

$$I_1 = \cos\Phi.\cos\delta.\sin\omega_{so} + \omega_{so}.\sin\Phi.\sin\delta \tag{135}$$

$$I_2 = \omega_{so}.(\sin\Phi)^2.(\sin\delta)^2 + 2\sin\omega_{so}.\sin\Phi.\cos\Phi.\sin\delta.\cos\delta + (\cos\Phi)^2.(\cos\delta)^2 \times\left[\frac{\omega_{so}}{2} + \frac{\sin 2.\omega_{so}}{4}\right] \tag{136}$$

Pour une bande plate, nous pouvons déterminer W :

$$W = \frac{b}{r}.(\cos\delta)^2 \tag{137}$$

Ainsi, nous obtenons le rayonnement corrigé par le facteur de correction de Muneer :

$$I_{d,M} = C_M \times I_{d,h} \tag{138}$$

2.5.5.6. Bilan de la littérature des approches et choix pour l'étude

En 2004, Lopez et al. (López, Muneer, and Claywell 2004) publient une étude ayant pour objectif de comparer les performances des facteurs de correction des modèles présentés en première partie. Les auteurs montrent que l'utilisation unique d'un facteur de correction isotropique (modèle de Drummond) sous-estimait globalement le rayonnement diffus de 4 à 11 %. En comparant les résultats, ils précisent que les modèles de LeBaron et de Muneer offrent de meilleures performances que les modèles de Drummond et de Batlles.

En 2008, Kudish (Kudish and Evseev 2008) a publié une étude comparant ces mêmes facteurs de correction pour les conditions météorologiques de BeerSheva, Israël. Par le biais de test d'erreurs statistiques, et pour les quatre types de ciel sélectionnés (tous types de ciel confondus, ciel clair, ciel couvert et ciel partiellement couvert), il montre que le facteur de correction global (prenant en compte la géométrie de la bande et anisotropie du ciel) de Muneer et Zhang est statistiquement plus performant, suivi de Batlles, Le Baron et de Drummond.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

En 2014, Kotti (Kotti, Argiriou, and Kazantzidis 2014) établit une nouvelle étude comparative entre ces modèles de facteur de correction pour la ville d'Athènes, Grèce. Les conclusions de son étude sont les suivantes : le rayonnement diffus corrigé par le modèle de Batlles permet de s'approcher des valeurs expérimentales obtenues par un pyrhéliomètre (mesure du rayonnement direct). La méthode de Muneer et Zhang présente de meilleures performances que celle de Drummond, mais a tendance à sous-estimer le rayonnement diffus annuel. La méthode de LeBaron offre des performances équivalentes à celle de Batlles en sous-estimant sensiblement le rayonnement diffus annuel. L'auteur précise que lorsque le rayonnement diffus mensuel est corrigé par l'approche de Batlles, le rayonnement diffus annuel est légèrement surestimé. De plus, les écarts moyens les plus faibles proviennent du facteur de correction de Batlles.

La méthode de Batlles utilise le paramètre Δ qui lui-même utilise le rayonnement solaire extraterrestre. L'utilisation de l'éclairement diffus dans cette formule génère des incohérences dimensionnelles. De plus, le paramètre AM a été étudié pour une diffusion optique des rayons (toute longueur d'onde) au sein de l'atmosphère. Nous ne pourrons pas utiliser ces approches pour l'éclairement lumineux (spectre visible). D'un point de vue mathématique, l'utilisation du logarithme népérien pour les valeurs de ε nulle ou proche de zéro (début et fin de journée, et nuit), font que CB est infini. Compte tenu de ces limites, nous ne considérerons pas cette approche.

Globalement, nous en retirons la nécessité de prendre en considération la partie anisotropique du rayonnement solaire diffus. Nous prenons comme hypothèse que la correction du rayonnement solaire diffus peut être appliquée à l'éclairement diffus. Pour vérifier cette hypothèse, il aurait été nécessaire de disposer de mesure « d'éclairement diffus vrai » par le biais d'une mesure de l'éclairement direct (traqueur solaire muni d'un luxmètre). Ceci est inscrit parmi les perspectives d'amélioration du projet SHADECO, et permettrait également d'évaluer l'erreur commise par son utilisation. Ainsi, nous utiliserons le paramètre le « plus adaptable » à notre cas, i.e. qui semble plus ouvert à l'utilisation du facteur en éclairement et non en rayonnement. Nous utiliserons donc la méthode de Muneer et Zhang.

2.6. **Scénarios expérimentaux**

Nous testons plusieurs scénarios afin de cerner au mieux l'impact de certains paramètres. Le Tableau 14 synthétise et décrit succinctement ces différents scénarios.

Tableau 14 : Scénarios d'étude expérimentale

Étude :		Réf.	Déflecteur				Sous dôme	Couleur parois				Conduit + vitrage			Vitrage seul	
Référence scénario :		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Conduit de lumière		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Vitrage vertical												■	■	■	■	■
Paroi Nord	Blanche										■			■		■
	Noire	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■		■	
Paroi Sud	Blanche								■	■	■		■	■		■
	Noire	■	■	■	■	■	■	■				■			■	
Paroi Est	Blanche									■	■		■	■		■
	Noire	■	■	■	■	■	■	■	■			■			■	
Paroi Ouest	Blanche							■	■	■	■		■	■		■
	Noire	■	■	■	■	■	■					■			■	
Plancher	Gris										■					
	Noire	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■
Plafond	Blanc										■			■		■
	Noir	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■		■	
Déflecteur	Nord		■													
	Sud			■												
	Est				■											
	Ouest					■										
Dôme anticyclonique							■									
Durée de la séquence (en jour) :		57	9	8	5	8	8	9	8	8	346	15	7	16	10	24

2.7. **Cas de référence : conduit de lumière et parois noires**

2.7.1. Description du cas

La présente configuration correspond au scénario N°1. Elle permet d'obtenir des résultats servant de références pour les constats expérimentaux de la suite, mais également de support pour l'élaboration de notre modèle semi-empirique. L'ensemble des parois intérieures de la cellule est recouvert d'un papier peint de couleur noire (Figure 80). L'objectif est de supprimer les facteurs pouvant influencer la distribution lumineuse au sein de la pièce. En optant pour une couleur noire avoisinant un coefficient de réflexion proche de 0,05, nous pouvons émettre l'hypothèse que

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

la part des réflexions internes est négligeable. Le conduit de lumière est alors la seule source lumineuse de la pièce.

Figure 80 : Cas d'étude N°1

Ce premier scénario est l'un des plus importants du protocole expérimental. Il a débuté le 5 septembre 2014 et s'est achevé le 21 décembre 2014. De cette façon, nous nous plaçons dans la période où l'éclairement global annuel est inférieur à 135 klux, donc inférieur à la limite des luxmètres extérieurs. Nous disposons approximativement de 57 jours de données.

2.7.2. Constatations expérimentales : impact du type de ciel

Grâce à ce premier scénario, nous avons pu constater l'impact du type de ciel sur la distribution lumineuse au sein de la pièce.

Dans la littérature, et selon les données du constructeur (SOLATUBE), nous avons relevé que le diffuseur engendrait, en théorie, un éclairement diffus suivant une loi de Lambert. Ainsi, le diffuseur serait considéré comme source lumineuse orthotrope dont la luminance serait la même dans chaque direction. Si cela se confirme en ciel couvert, la théorie n'est pas valable en ciel clair. En effet, le diffuseur ne « diffuse » pas complètement la lumière acheminée par le tube, et engendre l'apparition de « tache solaire » se déplaçant durant la journée en fonction de la position du Soleil.

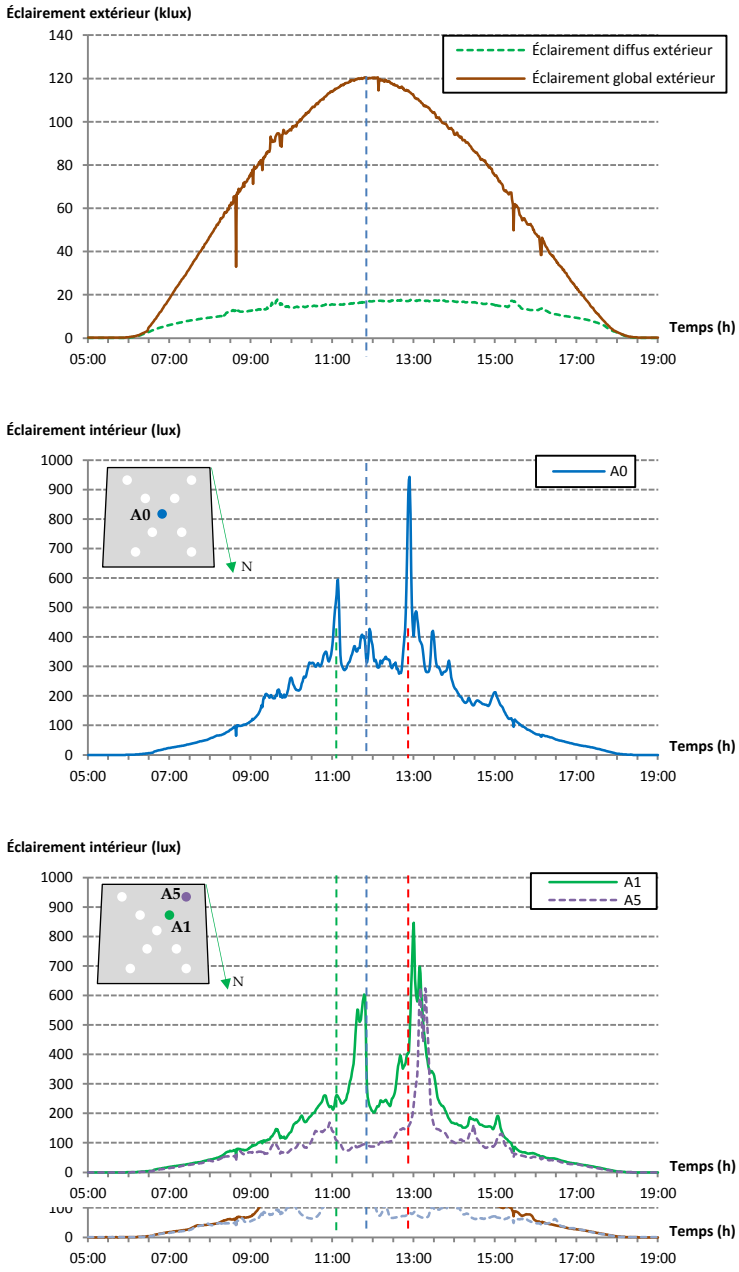
Pour expliciter cela, nous choisissons la période de mesure correspondant au scénario 2 : la cellule ayant les parois internes de couleur noire. Ainsi, nous écartons différents phénomènes pouvant accroître ou diminuer notre constat. La journée du 23 septembre 2014 présente un ciel clair, avec un éclairement global extérieur maximal de 120 klux. La contribution de la voûte céleste quant à elle est inférieure à 17 klux. Ces conditions sont typiques des conditions d'ensoleillement pour une journée au ciel dégagé en période hivernale à l'île de La Réunion (Figure 81).

Sous le diffuseur (A0), nous remarquons que les valeurs maximales pour l'éclairement intérieur ne se situent pas à midi solaire (marqué par un trait vertical bleu). Reformulé, cela signifie que lorsque l'éclairement global extérieur atteint son maximum en journée, le conduit de lumière n'engendre pas un éclairement pouvant être considéré comme maximal dans la zone. Tout du

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

moins, de ce qui a été relevé par nos capteurs. En effet, nous constatons qu'à ce même instant, les capteurs A1 et A2 présentent des valeurs d'éclairement proche de 600 lux simultanément. Les autres capteurs ne semblent pas présenter d'évènement particulier.

D'une manière globale, si l'on se réfère à l'évolution horaire de l'éclairement pour chaque instrument, nous constatons entre un et deux pics d'éclairement non synchronisés apparaissent durant la journée. Ces évènements sont localisés. Leur évolution est liée au temps et à l'espace. Nous supposons qu'il s'agit de « taches solaires » dépendantes de la position du Soleil.



Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

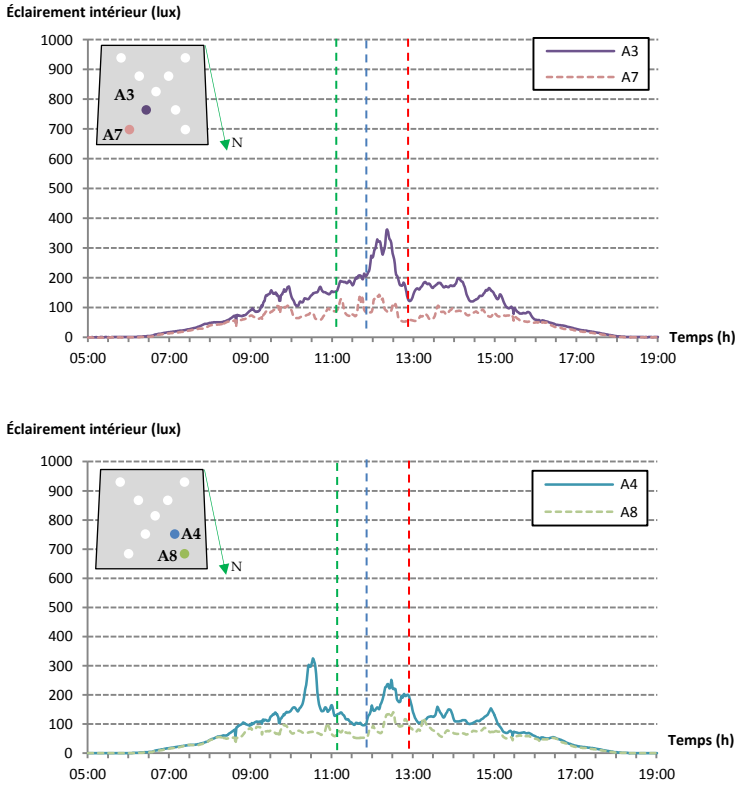


Figure 81 : Évolution horaire des éclairements extérieur et intérieur pour une journée de ciel clair (23 septembre 2014)

Pour confirmer cela, nous traçons la répartition au sol de l'éclairement au sein de la pièce pour différentes heures (Figure 82). Ce mode de représentation est couramment utilisé en éclairagisme grâce à la facilité à imager une distribution lumineuse sur un plan de travail.

Nous sélectionnons des heures « caractéristiques », où l'éclairement intérieur est assez important pour permettre de constater un phénomène. À 9h00, l'éclairement moyen avoisine les 150 lux, et la distribution lumineuse semble uniforme angulairement. Le nombre de capteurs limite l'apparition d'une distribution propre autour de la source, mais nous donne une bonne approximation de ce qui se passe. Les heures suivantes, la distribution ne semble plus suivre une loi de Lambert car les éclairements maximaux changent de position au cours du temps. À 11h00 notamment, l'éclairement maximal se situe Sud-Est alors que le Soleil est orienté Nord-Est. Lorsque le Soleil est dans l'axe du conduit (plein Nord), la distribution semble se recentrer autour du point central (sous le diffuseur). L'heure suivante nous constatons une position opposée à l'évènement de 11h00 : l'éclairement maximal est localisé Sud-Ouest alors que le Soleil se situe dans l'axe Nord-Ouest. Les heures suivantes ressemblent aux premières heures de la journée en ne marquant pas d'orientation particulière dans la distribution de l'éclairement intérieur.

Vraisemblablement, la position du Soleil impacte la distribution lumineuse, et plus précisément, l'éclairement direct ne suit pas une loi de diffusion « logique » car la source se déplace au cours de la journée.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

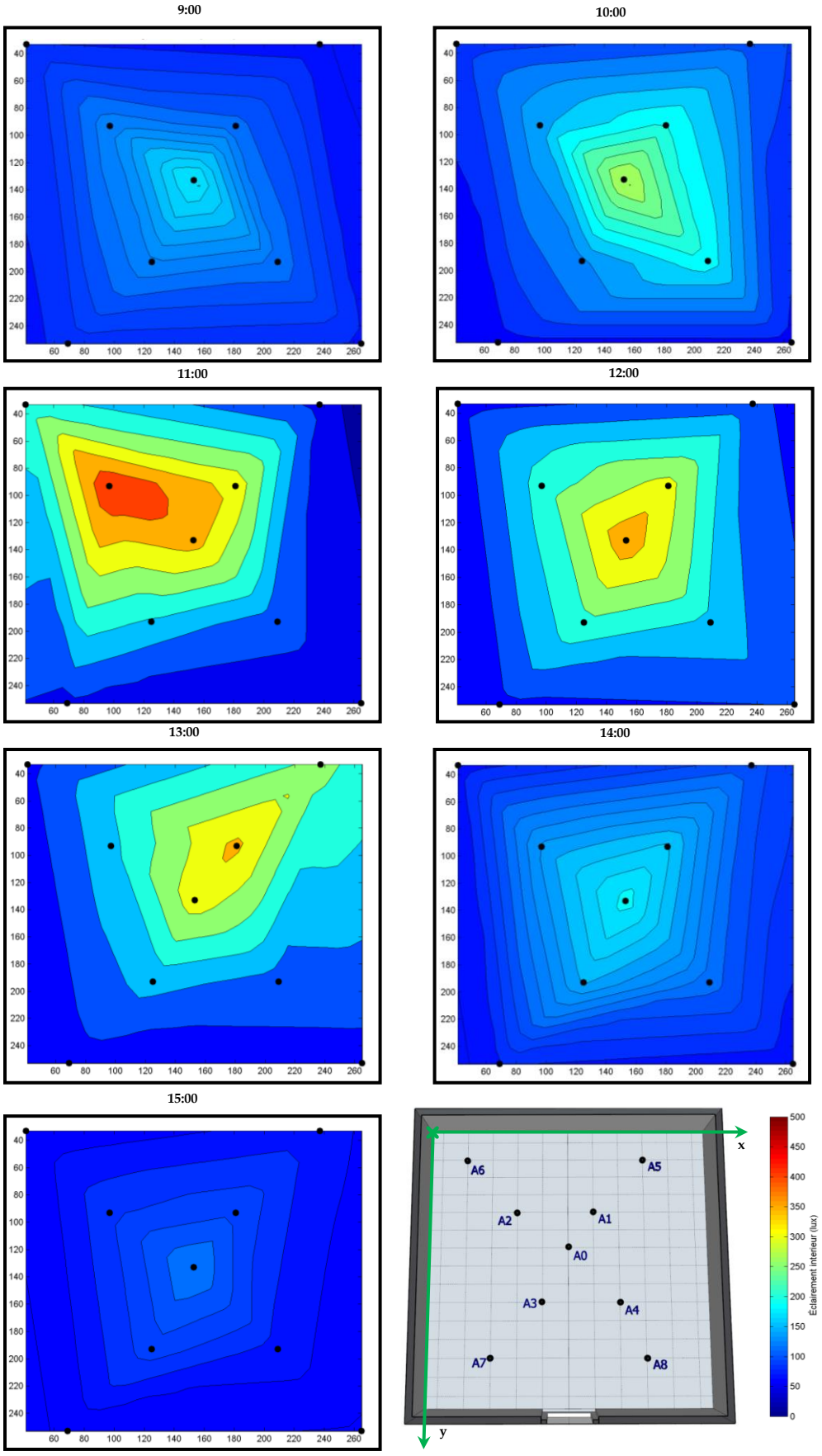


Figure 82 : Distribution spatio-temporelle de l'éclairement intérieur au sein de la pièce en ciel clair (23 septembre 2014)

Visuellement, nous pouvons confirmer ces résultats à l'aide des photographies (Figure 83) à la suite. Celles-ci montrent des bandes solaires marquées par un éclairement plus intense. Ainsi, si une bande se positionne sur l'un des capteurs, celui-ci relèvera un éclairement élevé sans pour autant que le phénomène soit visible par le biais des autres instruments. Ces clichés permettent également de mettre en évidence que le diffuseur ne permet pas d'engendrer une distribution suivant une loi de Lambert au sein de la pièce.

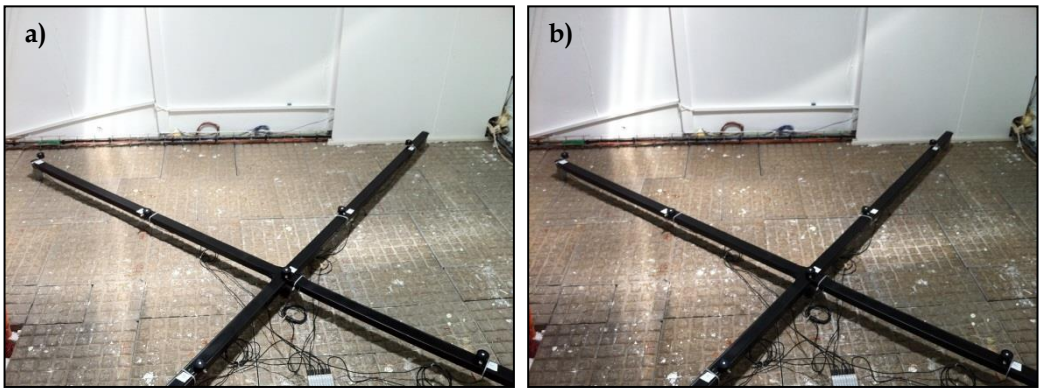


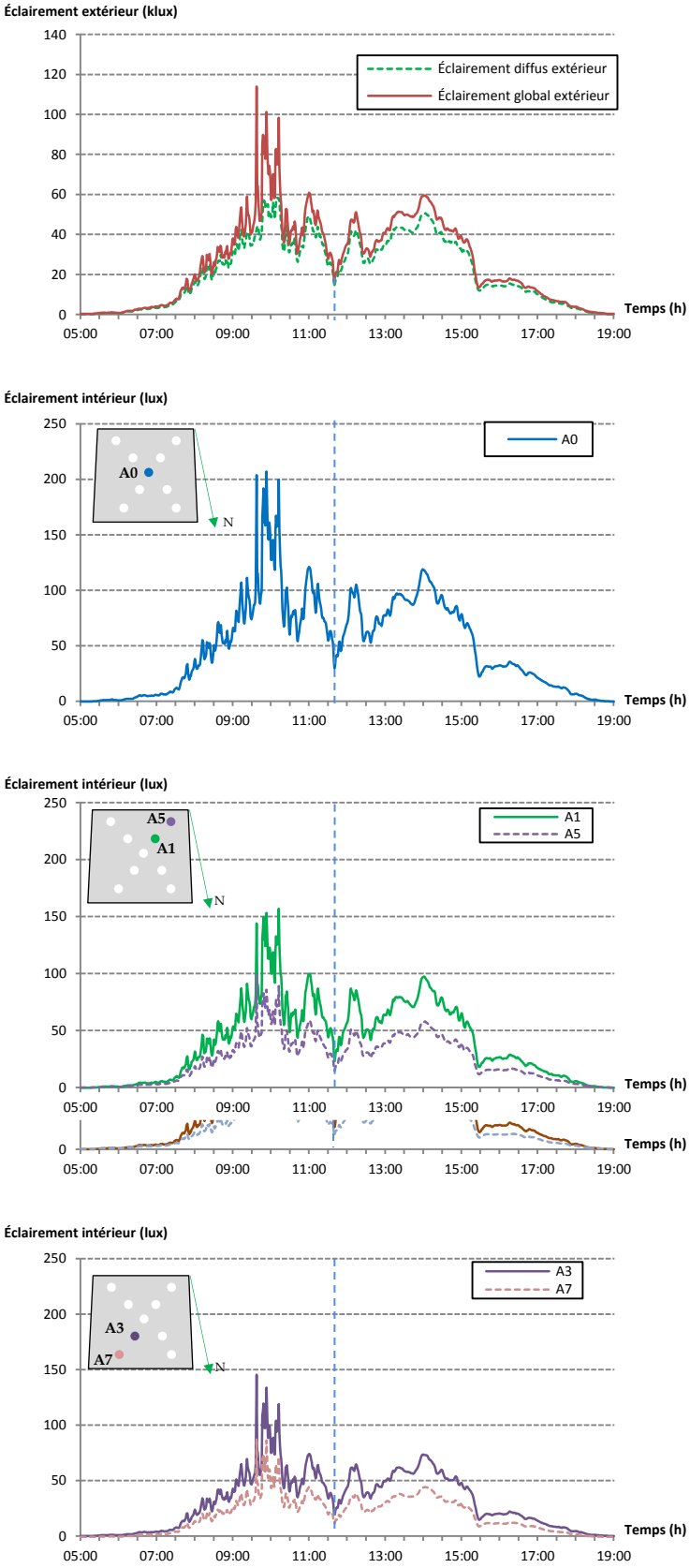
Figure 83 : a) Tache solaire avec diffuseur b) Tache solaire sans diffuseur

Pour conclure, l'éclairement direct ne se répartit pas de façon rigoureusement diffuse au sein de la pièce. Il est localisé, et génère des bandes lumineuses dont le niveau d'éclairement est élevé. Dans une approche globale, le phénomène constaté étant localisé, nous pourrions considérer l'impact global, et non local, de ces « taches solaires ».

Nous cherchons maintenant à visualiser les phénomènes photométriques lorsque l'éclairement direct est bien inférieur à l'éclairement diffus : une journée de ciel couvert. La journée du 30 novembre 2014 répond à ces critères. Comme nous pouvons le constater sur les graphes à la suite (Figure 84), l'éclairement global extérieur suit la tendance de l'éclairement diffus. Un éclairement maximal est relevé à 10h00 et peut correspondre à un dégagement partiel des nuages. Autrement, les éclairements extérieurs global et diffus avoisinent les 50 klux entre 9h30 et 14h30.

L'éclairement direct extérieur étant proche de zéro, nous remarquons que l'évolution horaire en chaque point de mesure est similaire. Pour justifier ce constat, nous nous focalisons sur un évènement (marqué par une ligne verticale en pointillés). Cet évènement, pouvant correspondre au passage d'un nuage plus dense, est répercuté à l'intérieur de la cellule au même moment. Globalement, nous constatons que plus le point de mesure s'éloigne du point situé sous le diffuseur, plus l'éclairement diminue, de façon proportionnelle. Ce comportement laisse penser à une distribution issue d'une source lumineuse orthotrope.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »


Éclairement extérieur (klux)
Éclairement diffus extérieur
Éclairement global extérieur
Temps (h)
Éclairement intérieur (lux)
A0
N
Temps (h)
Éclairement intérieur (lux)
A5
A1
A1
A5
N
Temps (h)
Éclairement intérieur (lux)
A3
A7
A3
A7
N
Temps (h)

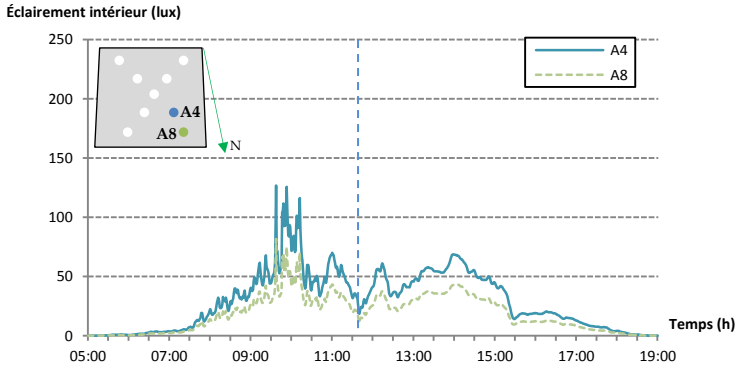


Figure 84 : Évolution horaire des éclairements extérieur et intérieur pour une journée de ciel couvert (30 novembre 2014)

Globalement, nous remarquons qu'en ciel couvert, l'évolution journalière de l'éclairement intérieur suit parfaitement l'évolution de l'éclairement extérieur.

Appliquant la même méthodologie que pour le ciel clair, nous traçons l'évolution de l'éclairement au sein de la pièce pour différentes heures. Dans la configuration d'un ciel couvert, les niveaux d'éclairement atteint sont bien inférieurs à ceux obtenus en ciel clair. L'écart moyen sous le diffuseur est proche de 200 lux.

Au cours des heures de la journée, la distribution lumineuse ne change pas (Figure 85). À 9h00, l'éclairement au centre de la pièce augmente (200 lux), puis diminue les heures suivantes pour croître à nouveau à 13h00. Globalement, nous confirmons le constat effectué sur les courbes précédentes : la luminance augmente, mais reste stable suivant la direction d'émission : la distribution lumineuse suit une loi de Lambert.

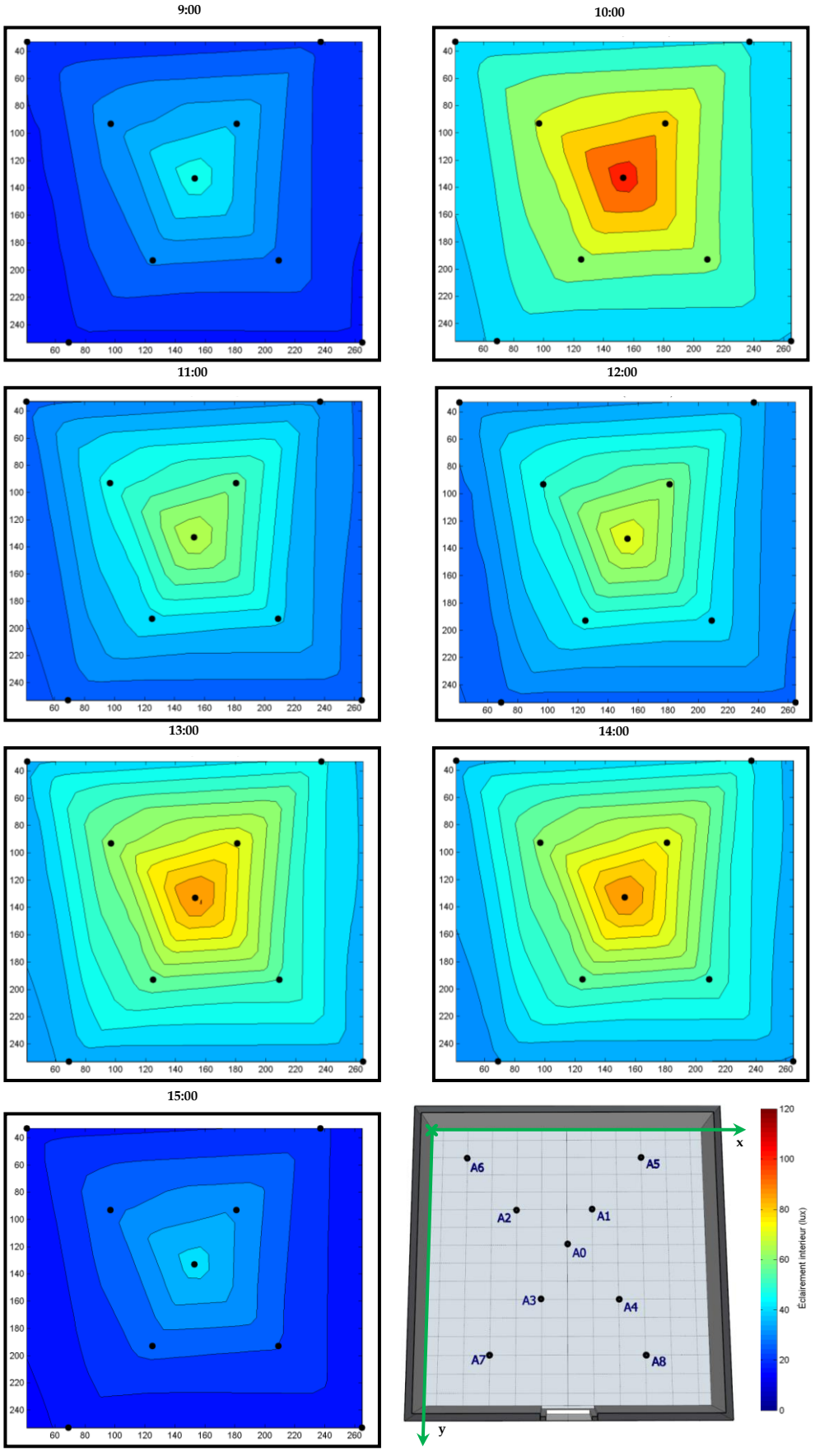


Figure 85 : Distribution spatio-temporelle de l'éclairement intérieur au sein de la pièce en ciel couvert (30 novembre 2014)

En conclusion, le conduit de lumière peut-être considéré comme une boite noire qui reflète la sollicitation d'entrée en sortie, à une inversion près. De cette façon, la diffusion au sein de la pièce pourra être uniforme en ciel couvert, et directionnelle en ciel clair (Figure 86).

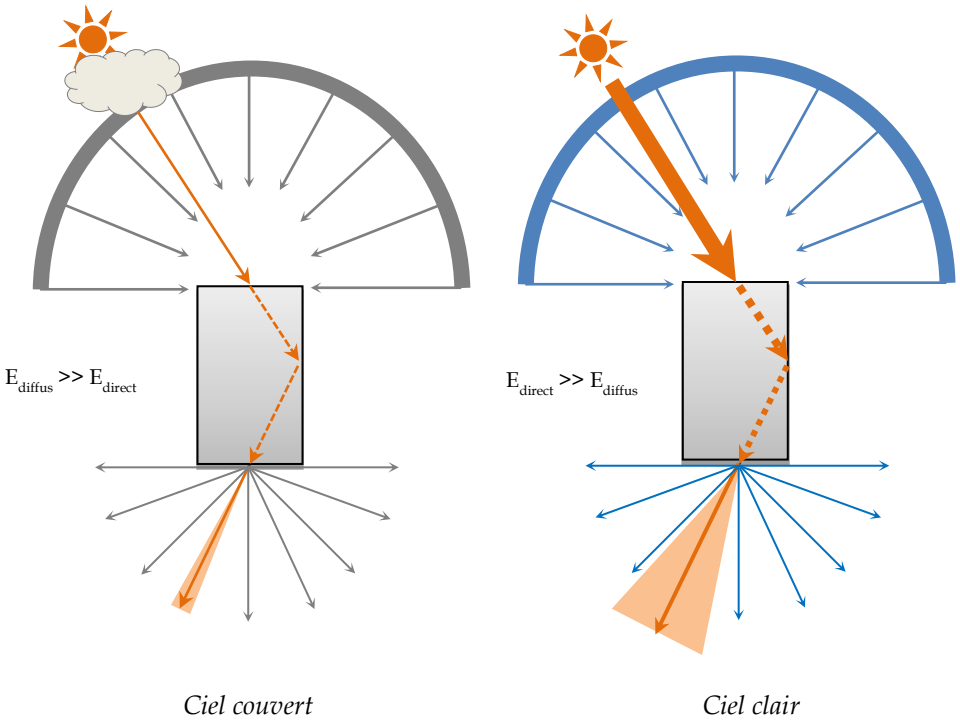


Figure 86 : Schématisation de la constatation expérimentale

Pour le reste des scénarios, nous chercherons à démontrer l'impact des différentes configurations sur trois critères à la fois quantitatifs et qualitatifs :

- Le niveau d'éclairement ou le facteur de transmission ;
- La distribution lumineuse au sein de la pièce ;
- L'autonomie en éclairage artificiel selon le niveau d'éclairement requis par la réglementation.

Cette méthodologie a été utilisée pour la publication (Malet-Damour, Boyer, Guichard, and Miranville 2014).

2.8. **Impact du coefficient de réflexion de la zone**

2.8.1. Description du cas

La présente étude se base sur les scénarios N° 1, 7, 8, 9, 10, qui consistent à faire varier les couleurs des parois intérieures de la zone. Nous utiliserons le coefficient de réflexion moyen afin de comparer les différentes situations. Ne disposant pas du matériel permettant de vérifier notre hypothèse, nous supposerons constants et connus les coefficients de réflexion des surfaces :

- Coefficient de réflexion de la paroi blanche : $\rho_{PV} = 0{,}70$
- Coefficient de réflexion de la paroi noire : $\rho_{PV} = 0{,}05$
- Coefficient de réflexion de la paroi grise : $\rho_{PV} = 0{,}30$

Figure 87 : Variation du coefficient de réflexion moyen de la zone

Nous pouvons calculer le coefficient de réflexion moyen par le biais de l'équation suivante :

$$\rho_{moy} = \frac{\sum Si \times \rho i}{S_{tot}} \tag{139}$$

De cette façon, le Tableau 15 indique les valeurs de ce paramètre en fonction du scénario d'étude.

Tableau 15 : Coefficient de réflexion moyen

Scénario	$\boldsymbol{\rho_{moy}}$
1	0,050
7	0,162
8	0,274
9	0,385
10	0,699

Afin de considérer l'impact de ce paramètre sur l'autonomie énergétique de la pièce, nous considérerons que la pièce est une zone de travail de bureau (tertiaire) nécessitant un éclairement minimal de 200 lux (selon la norme européenne EN 12 464-1).

2.8.2. Constatations expérimentales

Dans ce cas d'étude, étant donné la large période dont nous disposons, notre référence sera le cas 10 (ensemble des parois blanches). Ainsi, nous comparerons les événements d'une année à une autre. Les données du cas de référence s'étendent sur les années 2013 et 2014, tandis que les autres scénarios ont été menés de 2014 à 2015. En comparant les mêmes dates pour des années différentes, nous avons l'assurance que la course solaire est théoriquement similaire. Ainsi, la hauteur et l'azimut solaire peuvent être écartés des paramètres influents. Puis, il est évident que d'une année à une autre, nous n'aurons pas le même type de journée. Comme nous cherchons à évaluer l'impact global de la variation du coefficient de réflexion moyen au sein de la zone, nous utiliserons un ratio horaire de l'éclairement intérieur moyen (moyenne des éclairements horaires relevés par les capteurs intérieurs) sur l'éclairement global extérieur. Celui-ci peut être exprimé comme suit :

$$Ratio_{\,moyen,horaire} = \frac{\sum_{i=0}^{i=8} E_{int,Ai,horaire} \Big/ 9}{E_{g,h,horaire}} \tag{140}$$

En moyennant les éclairements intérieurs relevés par les capteurs, nous obtenons une tendance générale pour l'évolution horaire de l'éclairement sur le plan utile. Ajoutons que même si les dates comparées sont similaires (à l'année près), en nous focalisant sur l'éclairement moyen sur le plan utile nous parons au constat réalisé en 2.7 du présent chapitre, à savoir l'impact de l'éclairement direct sur la distribution lumineuse au sein de la pièce.

Grâce à notre large base de données, nous sélectionnons des jours présentant des profils de rayonnement similaires d'une année à une autre. Puis, nous évaluons le ratio de l'éclairement moyen intérieur sur l'éclairement global extérieur. Pour parer aux divers aléas (faune, flore, nuage, etc.) liés à la grande variabilité de l'éclairement, nous traitons les données au pas de temps de l'heure.

2.8.2.1. Comparaison du scénario 1 avec le scénario 10

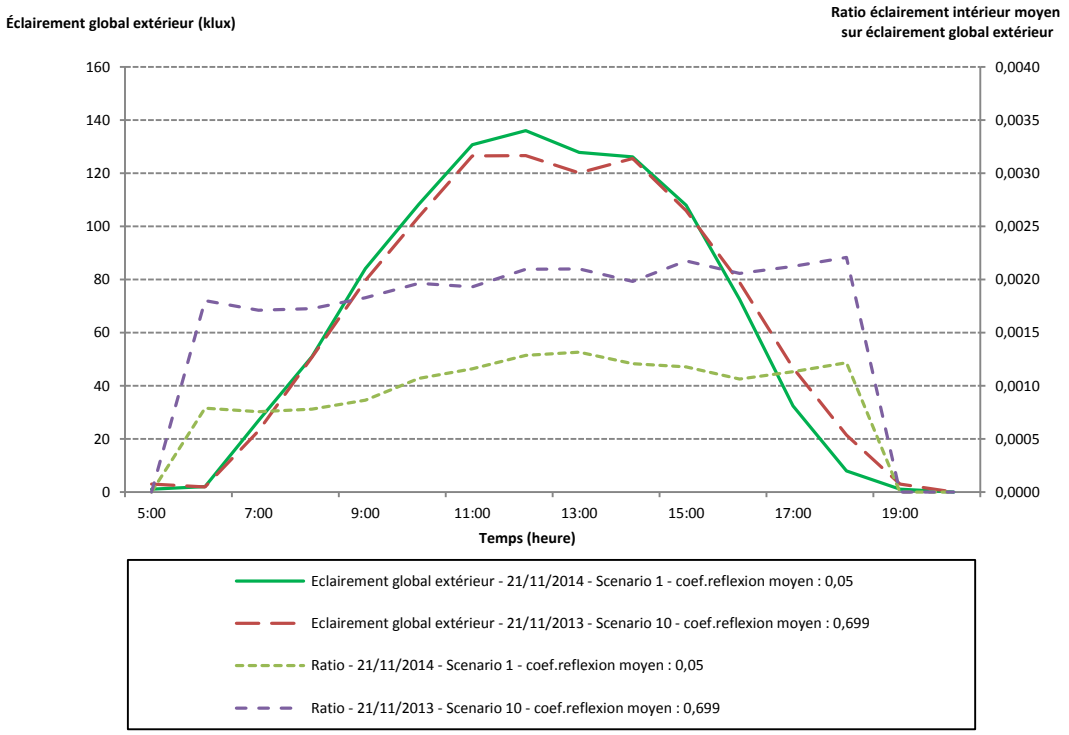


Figure 88 : Évolution des éclairements globaux extérieurs et ratio d'éclairement intérieur moyen horaire de la configuration 1 et 10 pour la journée du 21/11/2013 et du 21/11/2014

Les journées du 21 novembre 2013 et du 21 novembre 2014 sont des journées de ciel clair (Figure 88). Le profil horaire de l'éclairement global extérieur d'une année à une autre est semblable avec un éclairement maximal de l'ordre de 131 klux.

Nous comparons la configuration 1 (ensemble des parois noires) à la configuration 10 (ensemble des parois blanches). Le ratio de l'éclairement intérieur moyen sur l'éclairement global extérieur est de l'ordre de 0,53 %. Le profil de ce ratio pour la configuration 1 semble correspondre à celui de la configuration 10 à un facteur près (Figure 88). Ainsi, en augmentant le coefficient de réflexion moyen de 0,05 à 0,699, nous augmentons en moyenne l'éclairement intérieur moyen de 47 %.

Le scénario 1 permet d'être autonome énergétiquement près de 3 % du temps contre 37 % pour le scénario 10 (durant la journée du 21 novembre). Cela signifie que 3 % du temps nous sommes supérieurs à 200 lux, le niveau requis minimal. De ce fait, pour une configuration telle que celle du scénario 1, l'appoint artificiel est inévitable à 97 % du temps (en ciel clair) contre 63 % pour une pièce aux parois blanches.

2.8.2.2. Comparaison du scénario 7 avec le scénario 10

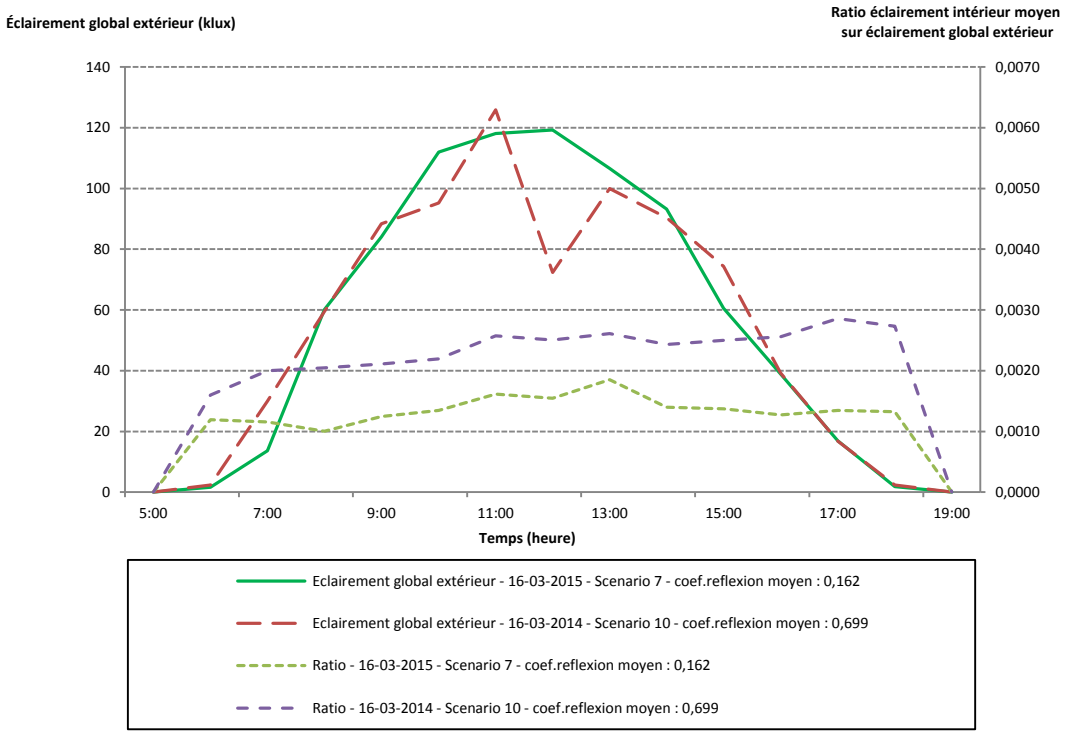


Figure 89 : Évolution des éclairements globaux extérieurs et ratio d'éclairement intérieur moyen horaire de la configuration 7 et 10 pour la journée du 16/03/2014 et du 16/03/2015

La journée du 16 mars 2015 est une journée en ciel clair. Celle du 16 mars 2014 est partiellement couverte (Figure 89). Ces deux jours ont les profils les plus comparables de la période de mesure du scénario 7. L'éclairement global extérieur maximal est de l'ordre de 120 klux.

Nous comparons la configuration 7 (5 parois noires, 1 paroi blanche) à la configuration 10 (ensemble des parois blanches). Le ratio de l'éclairement intérieur moyen sur l'éclairement global extérieur est de l'ordre de 0,58. Le profil de ce ratio pour la configuration 7 semble correspondre à celui de la configuration 10 à un facteur près (Figure 89). L'augmentation du coefficient réflexion moyen de 0,162 à 0,699 permet d'augmenter l'éclairement intérieur moyen sur le plan utile de 42%.

Le scénario 7 permet d'être autonome énergétiquement près de 10 % du temps contre 32 % pour le scénario 10 (durant la journée du 16 mars) afin de garantir un niveau d'éclairement de 200 lux. Pour un coefficient de réflexion moyen de 0,162, l'appoint artificiel est inévitable à 90 % du temps (en ciel clair) contre 68 % pour une pièce aux parois blanches.

2.8.2.3. Comparaison du scénario 8 avec le scénario 10

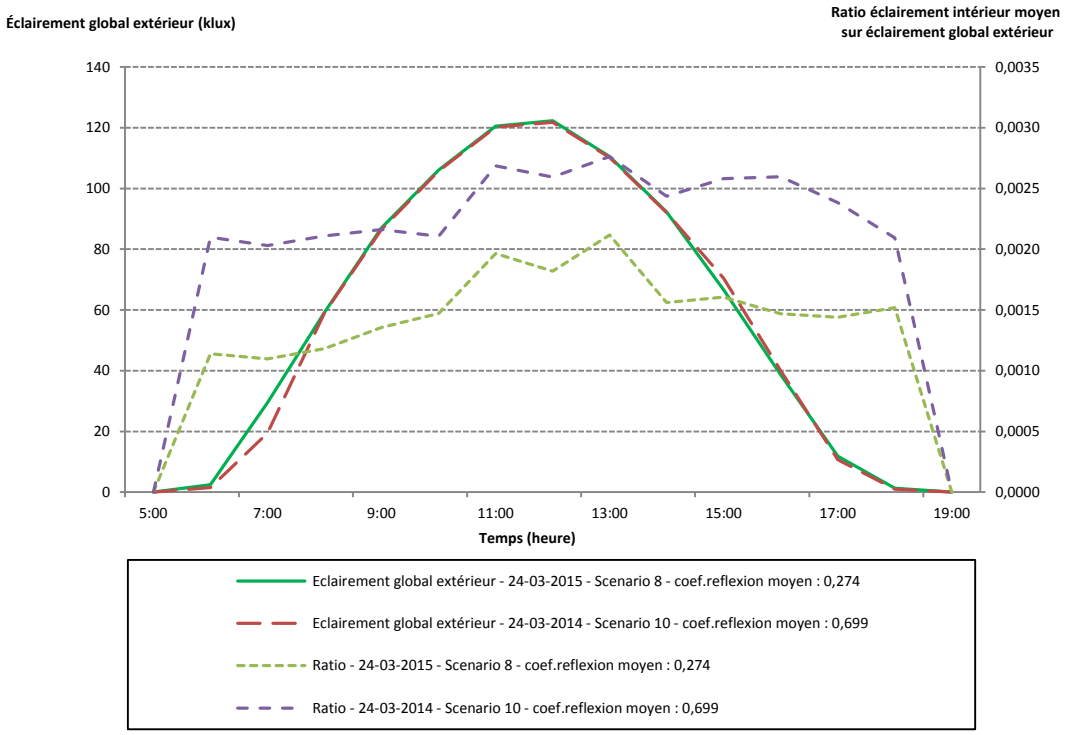


Figure 90 : Évolution des éclairements globaux extérieurs et ratio d'éclairement intérieur moyen horaire de la configuration 8 et 10 pour la journée du 24/03/2014 et du 24/03/2015

Les journées du 24 mars 2014 et du 24 mars 2015 sont des journées de ciel clair dont le profil horaire de l'éclairement global extérieur est similaire (Figure 90). L'éclairement maximal est de l'ordre de 121 klux.

Nous comparons la configuration 8 (4 parois noires, 2 parois blanches) à la configuration 10 (ensemble des parois blanches). Le ratio de l'éclairement intérieur moyen sur l'éclairement global extérieur est de l'ordre de 0,64. Le profil de ce ratio pour la configuration 8 correspond à celui de la configuration 10 à un facteur près (Figure 90). Ainsi, en augmentant le coefficient réflexion moyen de 0,274 à 0,699, nous augmentons en moyenne l'éclairement intérieur moyen de 36 %.

Le scénario 8 permet d'être autonome énergétiquement à 17,5 % du temps contre 39,8 % pour le scénario 10 (durant la journée du 24 mars) pour assurer un éclairement réglementaire minimal de 200 lux. Ainsi, pour le scénario 8, l'appoint artificiel est inévitables 82,5 % du temps (en ciel clair) contre 60,2 % pour une pièce aux parois blanches.

2.8.2.4. Comparaison du scénario 9 avec le scénario 10

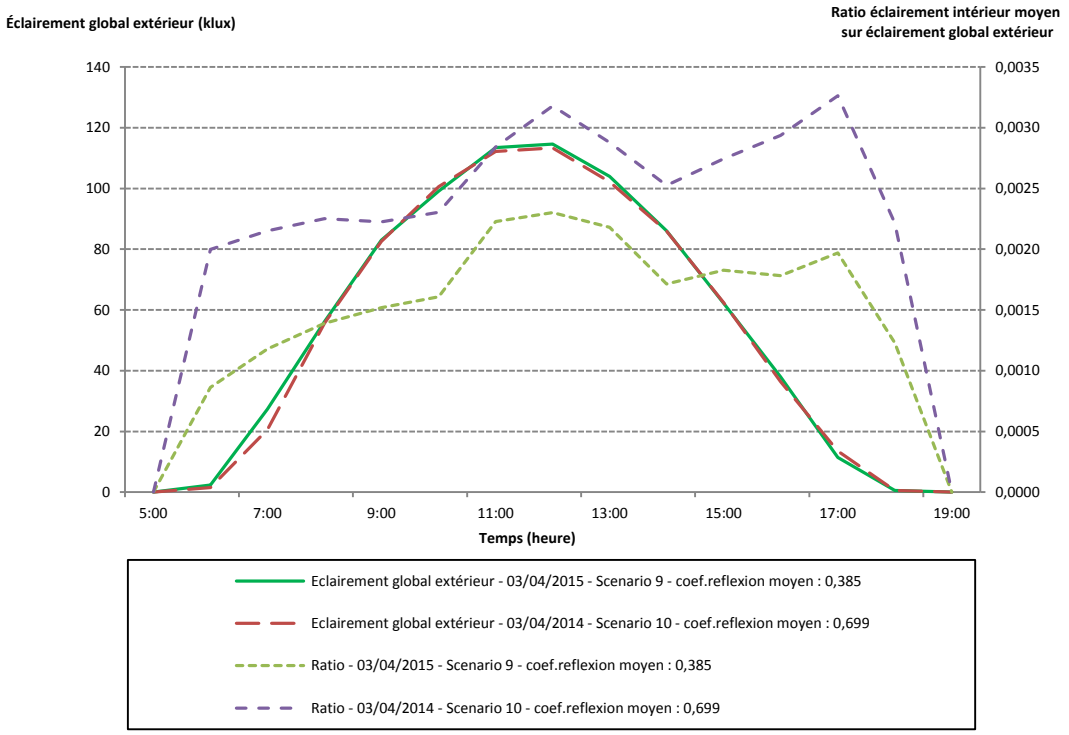


Figure 91 : Évolution des éclairements globaux extérieurs et ratio d'éclairement intérieur moyen horaire de la configuration 9 et 10 pour la journée du 03/04/2014 et du 03/04/2015

Les journées du 3 avril 2014 et du 3 avril 2015 sont également des journées de ciel clair dont le profil horaire de l'éclairement global extérieur est analogue (Figure 91). L'éclairement maximal est de l'ordre de 113 klux.

Nous comparons la configuration 9 (3 parois noires, 3 parois blanches) à la configuration 10 (ensemble des parois blanches). Le ratio de l'éclairement intérieur moyen sur l'éclairement global extérieur est de l'ordre de 0,65. Le profil de ce ratio pour la configuration 8 est semblable à celui de la configuration 10 à un facteur près (Figure 91). Ainsi, en augmentant le coefficient de réflexion moyen de 0,385 à 0,699, nous augmentons en moyenne l'éclairement intérieur moyen de 35%.

Le scénario 9 permet d'être autonome énergétiquement à 17,7% du temps contre 39,2% pour le scénario 10 (durant la journée du 3 avril) pour assurer un éclairement réglementaire minimal de 200 lux (selon la norme européenne EN 12 464-1). De ce fait, pour le scénario 9, l'appoint artificiel est inévitable à 82,3% du temps (en ciel clair) contre 60,8% pour une pièce aux parois blanches.

2.8.2.5. Synthèse

Globalement, nous constatons que le coefficient de réflexion des parois a un impact considérable sur l'éclairement moyen au sein de la zone. Plus nous aurons une zone aux parois claires, plus nous augmenterons l'éclairement moyen sur le plan utile. Ceci s'explique par le fait que les parois noires ont tendance à absorber l'éclairement, en limitant considérablement l'éclairement réfléchi interne.

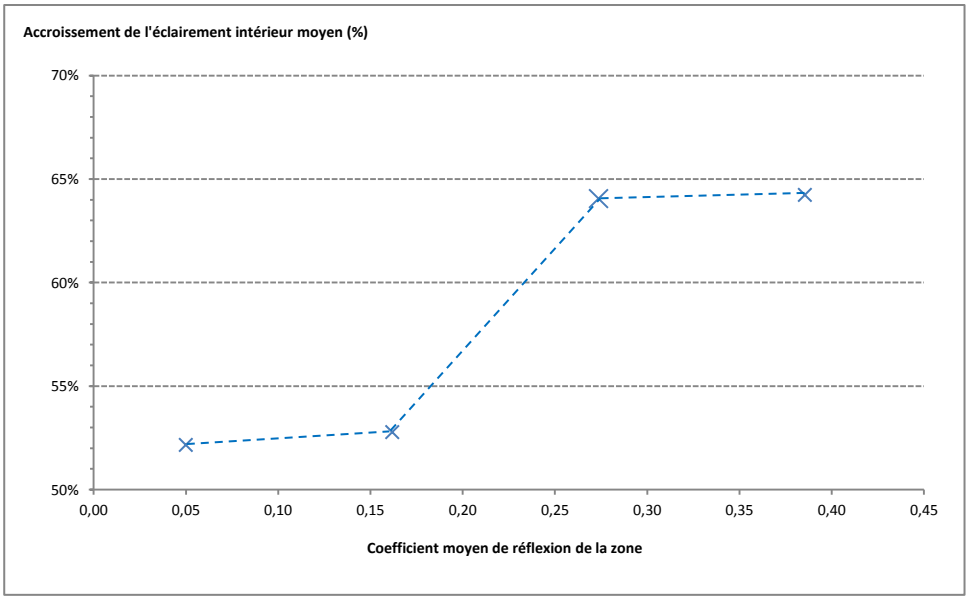


Figure 92 : Évolution de l'éclairement intérieur en fonction du coefficient de réflexion moyen de la zone

Cette constatation peut être imagée par la Figure 92. En passant d'une pièce aux parois noires à une pièce aux parois blanches, nous pouvons doubler le niveau d'éclairement intérieur.

2.9. **Disposition tropicale : impact du dôme paracyclonique**

Lors d'un cyclone tropical, plusieurs phénomènes extrêmes peuvent endommager, voire détruire une construction (rafales de vent, pluie diluvienne, inondations, débris transportés par le vent ou les rivières, glissements de terrain, etc.).

En général, une construction anticyclonique est conçue pour résister aux effets directs du vent, aux débris aériens, et à la pluie. Il s'agit donc de concevoir et de réaliser des bâtiments ayant un niveau suffisant pour assurer les trois fonctions de base : résistance mécanique, abri du vent et de la pluie. Pour se faire, il est nécessaire de protéger les zones de fragilité d'une construction. La difficulté technologique est d'établir un compromis entre résistance, étanchéité sans entraver la fonction initiale. Le conduit de lumière du fait de sa position sur la bâtisse représente un point de fragilité. Pour pallier aux chocs liés à de potentiels débris volants, SOLATUBE a préconisé l'utilisation d'un sous dôme anticyclonique.

2.9.1. Description du cas

Ce cas d'étude est particulier et propre aux zones géographiques assujetties aux dispositions paracycloniques. Nous installons le sous dôme sur le conduit de lumière comme présenté en Figure 93.

Figure 93 : Sous dôme anticyclonique

Nous cherchons à évaluer l'impact de ce second dôme sur la performance générale du conduit de lumière. Cette configuration correspond au scénario 6. Les parois de la zone d'étude sont noires.

2.9.2. Constatations expérimentales

Pour évaluer l'impact du dôme anticyclonique, nous utiliserons comme référence le scénario 1 (ensemble des parois noires). L'analyse que nous menons est comparative étant donné que l'unique différentiation entre les scénarios 6 et 1 est la présence de ce dôme.

Les périodes de mesure n'étant pas les mêmes, nous basons notre comparaison sur le rapport entre l'éclairement moyen intérieur mesuré par chaque capteur sur l'éclairement global extérieur (comme définie en section 2.8.1). Nous utilisons uniquement les journées de ciel clair, les journées de ciel couvert étant trop bruitées par les aléas (nuages).

Tableau 16 : Résultats de l'étude sur l'impact du dôme sur la transmission lumineuse

Cas de référence (scénario 1)		Avec dôme anticyclonique (scénario 6)				
		25/02/2015	26/02/2015	28/02/2015	29/02/2015	30/02/2014
		Éclairement global extérieur max (lux) :				
		135386	134405	135016	134523	131975
06/12/2014		11,09%	10,59%	11,82%	11,92%	11,79%
Éclairement global extérieur max (lux) :	135684					
09/12/2014		6,79%	6,27%	7,55%	7,65%	7,52%
Éclairement global extérieur max (lux) :	139051					
11/12/2014		9,65%	9,15%	10,39%	10,49%	10,36%
Éclairement global extérieur max (lux) :	123669					
13/12/2014		9,58%	9,07%	10,32%	10,42%	10,29%
Éclairement global extérieur max (lux) :	137112					
16/12/2014		6,97%	6,45%	7,73%	7,83%	7,70%
Éclairement global extérieur max (lux) :	136781					

Nous constatons que le dôme anticyclonique a un impact sur le facteur de transmission du conduit de lumière (Tableau 16). Cet élément additif réduit en moyenne de 9,2% ± 3% la transmission lumineuse. S'il peut être négligeable pour les éclairements intérieurs atteints en ciel clair, il sera important de prendre en compte sa contribution en ciel couvert.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

3. Synthèse du Chapitre III

Le troisième chapitre nous a permis de comprendre et d'appréhender le comportement du conduit de lumière. Nous avons constaté que la distribution lumineuse au sein de la pièce était fortement liée au type de ciel. En ciel couvert, le diffuseur se comporte comme une source orthotrope dont la diffusion suit une loi Lambertienne. Le conduit de lumière se comporte alors comme une boite noire, où le profil de l'éclairement intérieur est similaire au profil de la sollicitation extérieure (éclairement global extérieur). En ciel clair, le constat n'est plus valable. L'éclairement intérieur devient directionnel, lié à la position du Soleil. La loi de Lambert n'est plus valable. Dans une problématique de modélisation photométrique, l'ensemble des approches recensées de la littérature et basées sur un facteur de transmission ne sera performant qu'en ciel couvert. En ciel clair, l'approche semi-empirique n'est pas juste.

Nous avons pu tester d'autres configurations expérimentales telles que la variation des couleurs de la zone réceptrice. Nous avons remarqué que l'accroissement du coefficient de réflexion moyen pouvait engendrer une augmentation considérable de l'éclairement moyen intérieur. L'autonomie énergétique est le paramètre le plus révélateur de l'étude en montrant que le passage d'une pièce sombre à claire permettait d'éviter pas moins de 37 % du temps l'utilisation d'une source lumineuse artificielle.

Compte tenu de notre localisation et nos problématiques cycloniques, nous avons cherché à évaluer l'impact d'un sous dôme anticyclonique placé sous le collecteur principal. Nous concluons que celui-ci n'affecte qu'à hauteur de 9,2% la transmission moyenne du conduit de lumière.

À l'issue de ce chapitre, nous présentons l'environnement de modélisation que nous avons élaboré ; c'est l'objet du chapitre IV. Pour être conformes à nos pères, nous nous focaliserons sur la modélisation des phénomènes photométriques d'un point de vue macroscopique.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Développement d'un environnement de modélisation dédié

HEMERA
Energy Modelling for Engineering & Reseach Applications

" **H**yper **E**nergy **M**odelling for **E**ngineering & **R**esearch **A**pplications "[19]

[19] Modélisation énergétique pour des applications en ingénierie et en recherche (-hyper)

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Résumé du Chapitre **IV**

Ce quatrième chapitre présente la démarche théorique que nous avons adoptée afin de répondre aux limitations des études relevées dans la littérature. À cet effet, il démarre par une présentation uniforme des approches relevées en chapitre II, permettant de faire le lien entre les équations et leur signification physique. Dans un second temps, nous tâcherons de proposer des formes de modèle cohérentes avec la réalité du phénomène.

Les éléments que nous exposons jettent les bases de l'outil de modélisation que nous avons développé dans le cadre de ces travaux, qui s'apparente à un prototype de code de simulation multimodèle du comportement photométrique des dispositifs de guides lumineux appliqués aux bâtiments. Ce programme, nommé HEMERA, est également couplé à un algorithme d'optimisation lui conférant le titre de générateur de modèle, associé à la problématique des conduits de lumière, mais transposable à d'autres sujets d'étude.

Après une description de ce dernier et de l'algorithme d'optimisation utilisé, nous proposons d'appliquer l'outil à la problématique des conduits de lumière en associant nos données expérimentales et notre modélisation physique.

Le modèle élaboré et valable pour nos conditions d'étude est alors validé en partie, ouvrant les perspectives du dernier chapitre concernant la validation photométrique globale.

1. Modélisation du comportement du DGLT-R

Les deux courants de pensée prépondérants dans l'approche de la modélisation du comportement des conduits de lumière réfléchissant sont ceux de Zhang et de Jenkins. Les approches parvenues par la suite s'inspirent fortement des principes de ces deux auteurs.

Nous proposons d'analyser ces approches, de constater les divergences amenées par les études postérieures afin d'en retirer des conclusions et permettre d'apporter une contribution concrète.

1.1. **Bilan général des approches de la littérature**

Évaluer l'éclairement en un point à l'intérieur d'une pièce par le biais d'un dispositif revient à évaluer la façon dont se comporte la lumière à l'intérieur du système, puis de la répartir suivant un maillage. Le modèle se construit alors en deux approches distinctes, mais liées : un modèle de transmission et un modèle de diffusion.

1.1.1. Modèle de diffusion

Le modèle de diffusion s'intéresse à la façon dont la lumière va se répartir dans la zone. Il se base sur la loi de l'inverse du carré de la distance. Celle-ci permet de calculer la décroissance de l'éclairement en fonction de son éloignement par rapport à la source ponctuelle. Dans notre cas, le diffuseur est orthotrope et l'intensité lumineuse dépend de la direction considérée.

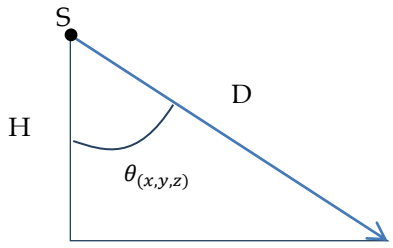


Figure 94 : Schématisation de la loi de Bouguer

Ainsi, la loi de l'inverse de la distance au carré (loi de Bouguer) s'écrit :

$$E_{(x,y,z)} = \frac{I_0 . \cos \theta_{(x,y,z)}}{D^2} \tag{141}$$

Certains auteurs la dénomment également « la loi du cosinus cubique de l'éclairement » et la reformule de la manière suivante :

$$E_{(x,y,z)} = \frac{I_0 . (\cos \theta_{(x,y,z)})^3}{H^2} \tag{142}$$

Le flux lumineux et l'intensité lumineuse sont deux grandeurs liées au travers de l'angle solide. Dans notre cas, comme la diffusion s'effectue sur une demi-sphère, nous pouvons considérer l'angle solide égal à 2π sr. En supposant que l'intensité lumineuse est connue, le flux lumineux dans un angle solide ω de 2π sr émis par une source ponctuelle a pour expression :

$$I_0 = \frac{\Phi_{LP,out}}{2\pi} \tag{143}$$

Cette forme est valable pour une source ponctuelle. Or, en réalité, le diffuseur n'est pas un point.

Lorsque l'on applique simplement la loi de l'inverse du carré des distances à partir du centre de la source sphérique, on a :

$$E = \frac{I_0}{H^2} = \frac{\mu . L_{diffuseur}}{H^2} \tag{144}$$

Dans (Toison 1982), l'auteur précise que cette simplification n'engendre qu'une erreur de 1% pour une distance verticale égale à cinq fois le diamètre de la source. Dans notre cas, nous pouvons donc appliquer cette approximation, l'erreur commise étant négligeable.

Comme notre source est orthotrope, la luminance doit être constante dans chaque direction. De ce fait, la surface μ du capteur doit être modifiée en fonction de l'angle de vue pour prendre en compte la surface apparente de la source.

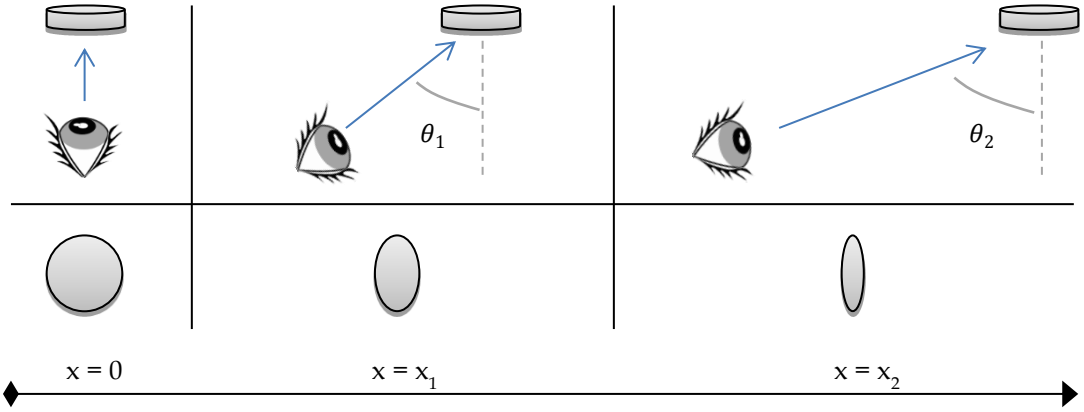


Figure 95 : Évolution de la surface apparente de la source

Nous en retirons la relation suivante :

$$\mu' = \mu . \cos \theta_i \tag{145}$$

Ceci est pris en compte dans le calcul du flux en sortie du conduit de lumière :

$$\Phi_{LP,out} = \tau_{TDGS} . E_{G,h} . \boldsymbol{\pi} . \boldsymbol{R^2} . \boldsymbol{\cos \theta_{(x,y,z)}} \tag{146}$$

Ce qui nous donne pour l'intensité lumineuse :

$$I_0 = \frac{\tau_{TDGS} \cdot E_{G,h} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \cos\theta_{(x,y,z)}}{2\pi} \quad (147)$$

Ainsi, nous pouvons en déduire l'éclairement en n'importe quel point :

$$E_{(x,y,z)} = \tau_{TDGS} \cdot E_{G,h} \cdot \left[\frac{\boldsymbol{\pi . R^2 . (\cos\theta_{(x,y,z)})^4}}{\boldsymbol{2\pi . H^2}}\right] \quad (148)$$

Dans cette approche, la partie entre crochets concerne le modèle d'émission. Dans d'autres approches, nous pouvons la trouver sous la forme de l'inverse du carré des distances euclidiennes :

$$E_{(x,y,z)} = \tau_{TDGS} \cdot E_{G,h} \cdot \left[\frac{\boldsymbol{\pi . R^2 . (\cos\theta_{(x,y,z)})^2}}{\boldsymbol{2\pi . D^2}}\right] \quad (149)$$

Dans la forme présentée par Zhang, l'auteur précise qu'il serait nécessaire de prendre en considération à la fois l'angle d'incidence du rayon, mais aussi l'angle d'émission au sein de la pièce. Il synthétise ces deux angles en une puissance associée au cosinus de l'angle d'émission et nomme ce paramètre : m. De plus, il intègre la part de l'angle solide aux coefficients empiriques.

Le modèle d'émission de Zhang s'écrit alors :

$$E_{(x,y,z)} = \tau_{TDGS} \cdot E_{G,h} \cdot \left[\frac{\boldsymbol{R^2 . (\cos\theta_{(x,y,z)})^m}}{\boldsymbol{D^2}}\right] \quad (150)$$

1.1.2. Modèles de Transmission

Les modèles de transmission prennent en compte le transport ainsi que les transmittances du collecteur et du diffuseur. Dans la suite, nous noterons $\boldsymbol{a_i, b_i, c_i, d_i, e_i}$ et $\boldsymbol{f_i}$, des constantes à ajuster par optimisation en fonction des données expérimentales.

1.1.2.1. Approches selon la forme de Jenkins

Dans son modèle, Jenkins (Jenkins and Muneer 2004) considère que la fonction de transmission lumineuse suit une forme exponentielle. Par le biais de coefficients empiriques et du rapport de longueur du conduit, il propose la forme suivante :

$$\tau_{TDGS} = A_{jenkins} \cdot e^{B_{jenkins} \cdot A_p} \quad (151)$$

Avec, $A_{jenkins} = \boldsymbol{a_1}$

$B_{jenkins} = \boldsymbol{b_1}$

En 2006, la CIE (Al-Marwaee and Carter 2006) propose d'utiliser la fonction de transmission lumineuse suivant l'approche de Jenkins pour des ciels couverts ($k_t < 0{,}65$). La fonction change

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

sensiblement en proposant une approche « théorique » pour l'estimation de A_{cie} et B_{cie} qui nécessitent la prise en compte de la transmittance du collecteur et du diffuseur :

$$\tau_{TDGS} = A_{CIE}.\ e^{B_{CIE}\ .\ A_p}\ .\ \tau_{collecteur}\ .\ \tau_{diffuseur} \tag{152}$$

Avec, $A_{CIE} = \left(1 - A_p\ .\tan\upsilon\ .\ln\rho_{LP}\right)^{-0.5}$

$B_{CIE} = \tan\upsilon\ .\ln\rho_{LP}$

Yun et Kim (Yun, Hwang, and Kim 2010b) suivirent l'approche de Jenkins et proposèrent deux formes différentes pour le coefficient A_{yun_i} dépendantes de la hauteur solaire Hs ainsi que de l'indice de clarté du ciel k_t :

$$\tau_{TDGS} = A_{yun_i}.\ e^{B_{yun}\ .\ A_p} \tag{153}$$

Avec, $A_{yun_1} = \boldsymbol{a_1} + \boldsymbol{a_2}.k_t + \boldsymbol{a_3}.H_s + \boldsymbol{a_4}.k_t\ .H_s$

$A_{yun_2} = \boldsymbol{a_1} + \boldsymbol{a_2}.k_t + \boldsymbol{a_3}.H_s$

$B_{yun} = \boldsymbol{b_1}$

En 2011, Shin et al. (Shin, Yun, and Tai Kim 2011) utilisèrent le même courant de pensée. Ils écrivirent une forme similaire à Yun et Kim, avec des coefficients a_i ajustés à leurs conditions météorologiques :

$$\tau_{TDGS} = A_{shin}.\ e^{B_{shin}\ .\ A_p} \tag{154}$$

Avec, $A_{shin} = \boldsymbol{a_1} + \boldsymbol{a_2}.k_t + \boldsymbol{a_3}.H_s$

$B_{shin} = \boldsymbol{b_1}$

1.1.2.2. Approches selon la forme de Zhang

Comme vu dans le chapitre II, Zhang (Zhang 2000; Zhang, Muneer, and Kubie 2002) est l'un des pionniers des études sur les conduits de lumière. Son approche a permis à de nombreux auteurs de s'en inspirer pour produire leur propre modèle. L'utilisation de la réflectivité du conduit à la puissance N provient des travaux d'Edmonds (Edmonds et al. 1995) sur la propagation des rayons dans le tube.

Edmonds a décrit une équation simple permettant de calculer la transmission lumineuse via un conduit circulaire pour une intensité lumineuse I, une hauteur solaire H_s, un diamètre D_{diam} et une longueur de tube L. L'hypothèse de départ est celle de l'optique géométrique, à savoir que les rayons lumineux provenant d'une source lointaine sont tous parallèles.

Le nombre de réflexions de la lumière dans le conduit est estimé par le calcul de la distance parcourue par la lumière à chaque réflexion (distance « descendante » notée ΔL) donnée par :

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

$$\Delta L = D_{diam} . \tan H_s \quad (155)$$

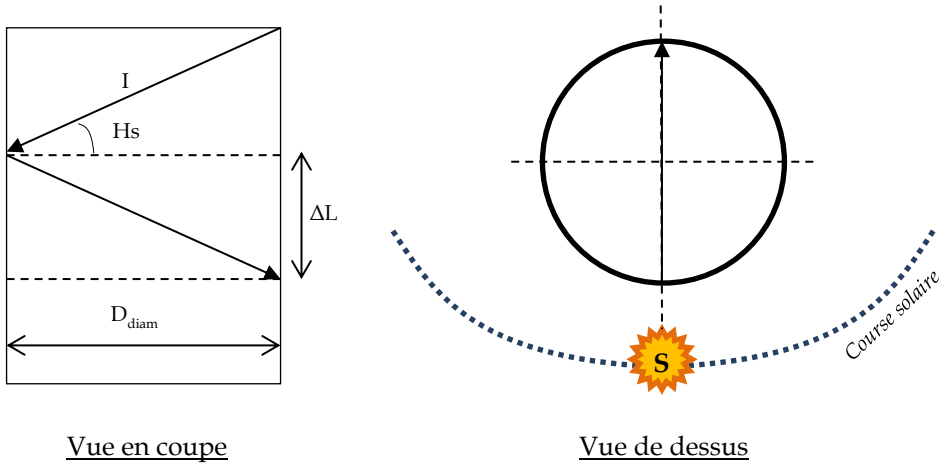


Figure 96 : Trajectoire théorique d'un rayon dans le tube (dans l'axe du conduit)

Le nombre de réflexions N au sein du conduit vaut alors :

$$N = \frac{L}{\Delta L} = \frac{L}{D_{diam} \, . \, tan \, H_s} \quad (156)$$

Cette forme est vraie si on considère que le rayon passe par le centre du conduit où la distance horizontale vaut D_{diam} (Figure 96). Lorsque les rayons s'éloignent du centre du conduit, situation similaire à la comptabilisation de l'azimut solaire, la lumière n'est plus réfléchie comme précédemment. Pour cette raison, Edmonds a développé un calcul prenant en compte la transmission lumineuse en spirale via le conduit. En effet, le nombre de réflexions (i.e. distance parcourue) va évoluer en fonction de l'azimut solaire.

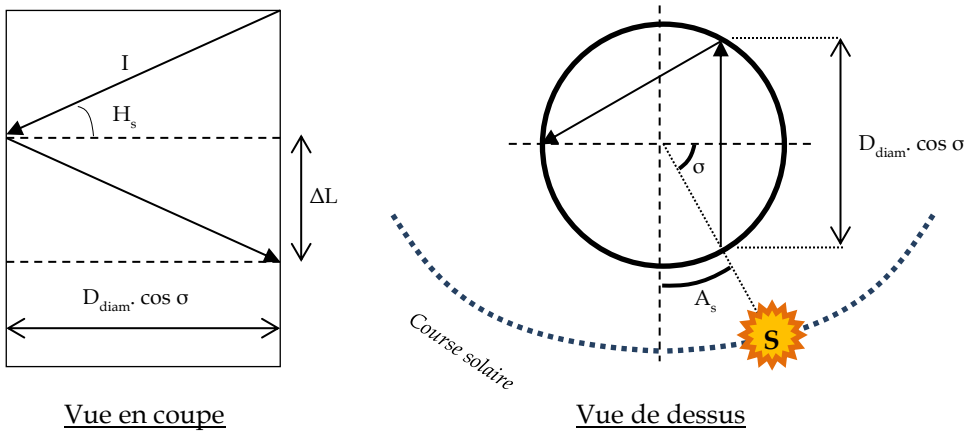


Figure 97 : Trajectoire théorique d'un rayon dans le tube (excentré de l'axe du conduit)

Ainsi, les rayons lumineux voyagent suivant une distance horizontale de $D_{diam} . \cos \sigma$ et descendent d'une distance de $D_{diam} . \tan H_s$ (Figure 97). De cette façon, le nombre de réflexions vaut :

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

$$N = \frac{L}{D_{diam}.\cos\sigma\,.\tan H_s} = \frac{A_p\ .\ \cot H_s}{\cos\sigma} \tag{157}$$

Une expérience succincte en laboratoire permet de confirmer cette approche. Lorsque le soleil est au zénith et est aligné avec le collecteur, le faisceau lumineux traverse le tube normalement (Figure 98). Lorsque l'azimut solaire n'est plus nul, le faisceau lumineux change de direction en accord avec l'approche proposée.

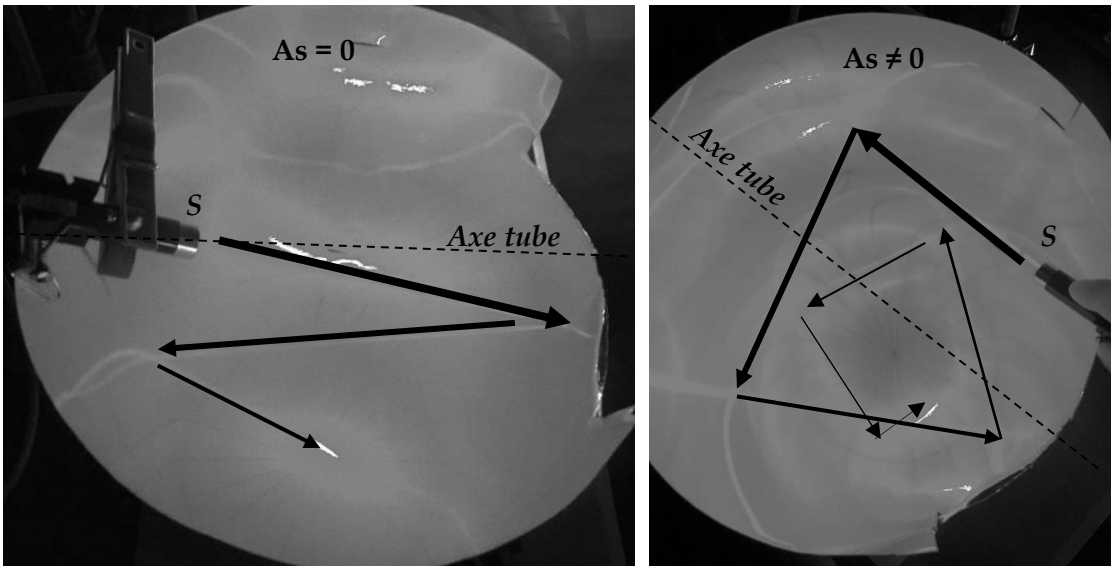


Figure 98 : Trajectoire expérimental d'un rayon dans le tube (excentré de l'axe du conduit)

Dans ses propres travaux, Zhang a proposé une forme générale simplifiée, avec une prise en compte empirique de N :

$$\tau_{TDGS} = C_{zhang_i}.{\rho_{LP}}^{N_{zhang}} \tag{158}$$

Avec, $C_{zhang_1} = \boldsymbol{a_1} + \boldsymbol{a_2}.k_t + \boldsymbol{a_3}.H_s + \boldsymbol{a_4}.{k_t}^2.H_s + \boldsymbol{a_5}.k_t.{H_s}^2 + \boldsymbol{a_6}.{k_t}^2.{H_s}^2$

$C_{zhang_2} = \boldsymbol{a_1} + \boldsymbol{a_2}.k_t + \boldsymbol{a_3}.H_s$

$N_{zhang} = \boldsymbol{b_1} + \boldsymbol{b_2}.A_p + \boldsymbol{b_3}.\cot H_s + \boldsymbol{b_4}.A_p.\cot H_s$

Dans l'étude de Yun et Kim (Yun, Hwang, and Kim 2010b), les auteurs utilisèrent également la forme de Zhang pour leur problématique. Contrairement à Zhang, ils modifient les paramètres pris en compte dans le calcul de la variable N_{yun} :

$$\tau_{TDGS} = C_{yun_i}.{\rho_{LP}}^{N_{yun_i}} \tag{159}$$

Avec, $C_{yun_1} = \boldsymbol{a_1} + \boldsymbol{a_2}.k_t + \boldsymbol{a_3}.H_s + \boldsymbol{a_4}.k_t.H_s$

$C_{yun_2} = \boldsymbol{a_1} + \boldsymbol{a_2}.k_t + \boldsymbol{a_3}.H_s$

$N_{yun_1} = \boldsymbol{b_1} + \boldsymbol{b_2}.k_t + \boldsymbol{b_3}.H_s + \boldsymbol{b_4}.k_t.H_s$

$N_{yun_2} = \boldsymbol{b_1} + \boldsymbol{b_2}.k_t + \boldsymbol{b_3}.H_s$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

En 2012, Su (Su et al. 2012) étudie le comportement du conduit, mais s'intéresse à un paramètre supplémentaire : l'azimut solaire A_s. Il offre une nouvelle forme pour A_{su} n'utilisant pas l'indice de clarté du ciel k_t :

$$\tau_{TDGS} = C_{Su}.{\rho_{LP}}^{N_{Su}} \tag{160}$$

Avec, $C_{Su} = \boldsymbol{a_1} + \boldsymbol{a_2}.H_s + \boldsymbol{a_3}.\beta + \boldsymbol{a_4}.\lambda + \boldsymbol{a_5}.H_s.\beta + \boldsymbol{a_6}.H_s.\lambda + \boldsymbol{a_7}.\beta.\lambda + \boldsymbol{a_8}.H_s.\beta^2.\lambda + \boldsymbol{a_9}.H_s.\beta.\lambda^2 + \boldsymbol{a_9}.{H_s}^2.\beta^2.\lambda^2$

$N_{Su} = \boldsymbol{b_1}.A_p + \boldsymbol{b_2}.\cot H_s + \boldsymbol{b_3}.A_p.\cot H_s$

$\beta = |A_s - a_{LP}|$

Pour compléter son étude sur la fonction de transmission en ciel clair ($k_t \geq 0{,}65$), la CIE fit appel au modèle théorique de Zastrow et Wittwer (Zastrow and Wittwer 1987) permettant d'évaluer le nombre de réflexions N à l'intérieur du tube. Tout comme pour le ciel couvert, l'approche nécessite de tenir compte de la transmittance du collecteur et du diffuseur :

$$\tau_{TDGS} = {\rho_{LP}}^{N_{CIE}}.\tau_{collecteur}.\tau_{diffuseur} \tag{161}$$

Avec,

$$N_{CIE} = \frac{L.tan\,v}{D_{eff}} \tag{162}$$

L'utilisation de D_{eff} permet de simplifier l'approche. Zastrow et Wittwer ont proposé la valeur suivante (basée sur la moyenne des vecteurs projetés) :

$$D_{eff} = \frac{\pi.D_{diam}}{4} \tag{163}$$

1.1.3. Prise en compte des coudes

Les coudes sont aux conduits de lumière ce que les singularités sont aux systèmes hydrauliques : les changements de géométrie engendrent des pertes de charges réduisant leur rendement.

Les précurseurs de la prise en compte empirique du facteur de perte lumineuse par les coudes sont encore Zhang et Jenkins. Ils évaluent ce paramètre en fonction du nombre de coudes du même angle :

$$\chi_{coude_1} = (1 - D)^{N_{coude_1}} \tag{164}$$

D s'apparente à un facteur de pertes. Pour ce modèle, un coefficient $\boldsymbol{c_1} = D$ sera à optimiser.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Et en ils déduisent un facteur global :

$$\chi_{coude_{tot}} = \prod_{1}^{n} (1 - D)^{N_{coude_n}} \tag{165}$$

Zhang, contrairement à Jenkins, modifie également le rapport de longueur :

$$A_{pe} = \frac{L_{eq}}{D_{diam}} = \frac{L + E.L_b}{D_{diam}} \tag{166}$$

Avec, $E = \boldsymbol{d_1}$

1.1.4. Prise en compte des masques environnants

Mohelnikova (Mohelnikova 2009b) est le seul auteur à prendre en compte la part des masques environnants dans le calcul de la transmission lumineuse. Ce facteur de perte lumineuse est principalement lié à l'éclairement diffus dans la mesure où il permet de comptabiliser la partie du ciel « vu » par le collecteur. Il doit être multiplié à l'efficacité globale du système (τ_{TDGS}). Nous le nommerons $\chi_{skyview}$, en référence à la section 2.3.2 du chapitre III, où nous avons pu le quantifier.

1.2. **Proposition d'une forme générale de modèle**

1.2.1. Considération de l'angle d'incidence du rayon

Dans les formes présentées en première partie, nous considérons que l'intensité lumineuse I_0 est verticale. Or, en réalité, si la source à l'origine n'est pas alignée avec le conduit, alors un autre angle doit être pris en compte. Si nous définissons le diffuseur comme source secondaire, dépendant du soleil qui serait ici la source primaire, alors il est nécessaire de prendre en considération la position de l'astre. Considérant ν comme étant l'angle d'incidence de la lumière entrante, à savoir l'angle zénithal solaire (angle complémentaire à la hauteur solaire H_s), nous pouvons calculer l'intensité lumineuse modifiée :

$$I_\nu = I_0 . cos\ \theta_{(x,y,z)} \ .\ cos\ \nu \tag{167}$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

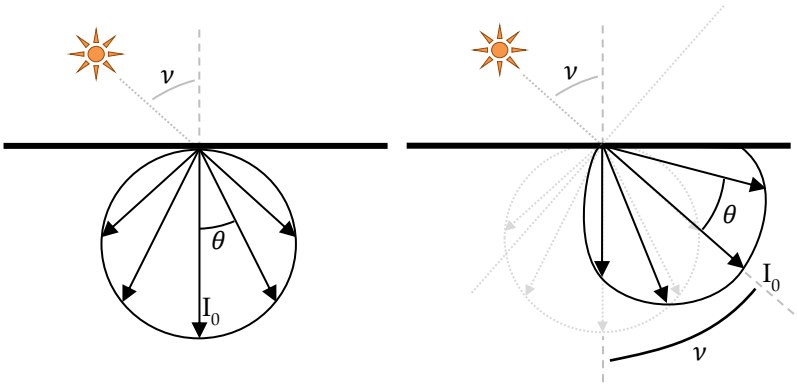


Figure 99 : Schéma de prise en compte de l'angle azimutale v

Il est également nécessaire de prendre en compte l'inclinaison du collecteur $\beta_{dôme}$. Celui-ci peut suivre l'inclinaison de la toiture ou être horizontal. L'impact sur la captation de l'éclairement direct sera alors modifié. L'équation (148), en l'état, est valable pour un collecteur horizontal. Elle ne permet pas de considérer un collecteur incliné à 90° (collecteur en façade). Dans ce cas, nous considérons que le conduit de lumière ne reçoit plus d'éclairement direct, mais uniquement de l'éclairement diffus. La prise en compte de l'angle d'inclinaison est valable pour notre modèle où l'impact des éclairements diffus et direct est différentié.

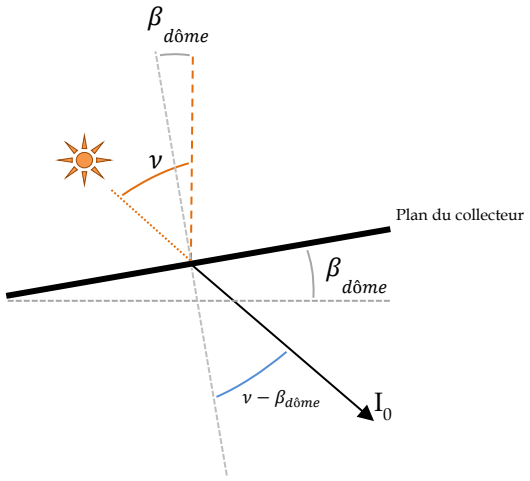


Figure 100 : Schéma de prise en compte de l'inclinaison du collecteur

Ce qui donne pour la part de l'éclairement intérieur lié à l'éclairement direct :

$$E_{dir\,(x,y,z)} = \frac{I_0 . cos(v - \beta_{dôme}) . cos\,\theta_{(x,y,z)}}{D^2} \tag{168}$$

soit

$$E_{dir\,(x,y,z)} = \tau_{dir\,TDGS} . E_{b,h} \times \frac{\boldsymbol{\pi . R^2 . cos(v - \beta_{dôme}) . (cos\,\theta_{(x,y,z)})^3}}{\boldsymbol{2\pi . D^2}} \tag{169}$$

1.2.2. Modélisation du comportement du conduit de lumière

Nous avons pu voir que la majorité des modèles utilise l'indice de clarté du ciel k_t afin de distinguer la part de l'éclairement diffus de celle de l'éclairement direct au sein du Global. Aux erreurs près sur cet indice, l'approche est intéressante si nous ne disposons que de l'éclairement global extérieur. Cependant, nous nous rendons compte que certains modèles de prédiction ont de plus grandes dispositions à être associés à l'éclairement direct ou diffus. La méthode de Jenkins, comme le confirme la CIE, propose, comme mode de transmission, un facteur de perte global évoluant de façon exponentielle avec le rapport des dimensions du tube A_p. La multitude des rayons multidirectionnels provenant de la voûte céleste engendre l'impossibilité de suivre un rayon particulier. De ce fait, l'approche de Jenkins est tout indiquée pour prédire le comportement de la transmission lumineuse de l'éclairement diffus au sein du tube.

A contrario, l'éclairement direct dépend d'une position : celle du Soleil. L'astre peut être suivi à l'aide de son angle azimutal et de sa hauteur verticale. La direction du faisceau lumineux « vu » par le collecteur dépendra de cette trajectoire. Les rayons pénétrants sont parallèles (hypothèse générale de l'optique) et ont une intensité lumineuse largement plus grande que la multitude des petits rayons diffus. Leur parallélisme en fait des rayons que l'on peut suivre. L'approche décrite par Edmonds, et reprise par Zhang, semble être tout indiquée pour la considération de la transmission lumineuse de l'éclairement direct. Cependant, comme nous avons pu le constater au chapitre précédent, l'éclairement direct engendre la formation de taches solaires localisées. Celles-ci ont tendance à mettre en défaut la distribution Lambertienne au sein de la pièce. Les modèles semi-empiriques basés sur le facteur d'efficacité du conduit considérant la source comme orthotrope ne pourront qu'approcher ce phénomène par le biais des pondérations sur les coefficients empiriques.

De ce constat, et compte tenu des données expérimentales dont nous disposons, nous proposons une forme de modèle généralisable à tout type de conduit et de conditions météorologiques.

1.2.2.1. Nouveau modèle : forme généralisable

La forme détaillée de notre modèle est celle prenant en compte la variabilité de certains paramètres considérés comme constants ou non impactant dans la littérature. Ainsi, nous incorporerons la perte lumineuse engendrée par les masques proches ou lointains du collecteur (associés à la partie diffuse), et nous dissocierons l'éclairement direct et diffus. Nous proposons également deux formes pour l'éclairement direct, distinguées par leur modèle d'émission.

Éclairement diffus :

$$E_{diff_{(x,y,z)}} = \tau_{diff_{TDGS}} . \frac{\pi . R^2 . (\cos\theta_{(x,y,z)})^4}{2\pi . H^2} . E_{d,h} \quad (170)$$

Avec,

$$\tau_{diff_{TDGS}} = A_{diff} . e^{B_{diff} . A_p} . \chi_{skyview} . \chi_{coude_{diff}} \quad (171)$$

Avec, A_{diff}, constante à ajuster par optimisation ;

B_{diff} , constante à ajuster par optimisation ;

$\chi_{skyview}$, part du ciel vu par le collecteur [%].

$$\chi_{coude_{diff}} = \prod_{1}^{n} e^{N_{coude} . \ln(1 - C_{diff})} \quad (172)$$

Avec, C_{diff}, constante liée au facteur de perte par les coudes pour la partie diffuse, à ajuster par optimisation.

Éclairement direct :

$$E_{dir_{A(x,y,z)}} = \tau_{dir_{TDGS}} . \frac{\pi . R^2 . (\cos\theta_{(x,y,z)})^4}{2\pi . H^2} . E_{b,h} \quad (173)$$

ou

$$E_{dir_{B(x,y,z)}} = \tau_{dir_{TDGS}} . \frac{\pi . R^2 . cos(\nu - \beta_{dôme}) . (cos\ \theta_{(x,y,z)})^3}{2\pi . H^2} . E_{b,h} \quad (174)$$

Avec,

$$\tau_{dir_{TDGS}} = A_{dir} . {\rho_{LP}}^{N_i} . \chi_{coude_{dir}} \quad (175)$$

Avec,

$$\chi_{coude_{dir}} = \prod_{1}^{n} e^{N_{coude} . \ln(1 - C_{dir})} \quad (176)$$

Avec, C_{dir}, constante liée au facteur de pertes par les coudes pour la partie directe, à ajuster par optimisation.

Nous choisissons volontairement la forme simplifiée du paramètre A_{dir} assurant un nombre limité de coefficients à ajuster par optimisation :

$$A_{dir} = \boldsymbol{a_1} + \boldsymbol{a_2} . H_s + \boldsymbol{a_3} . \beta + \boldsymbol{a_4} . H_s . \beta \quad (177)$$

Avec, $\beta = |a_s - a_{coude}|$

Pour le paramètre N_i deux formes théoriques (selon d'Edmonds et Zastrow) et une forme empirique peuvent être évaluées :

$$N_1 = \frac{A_p \,.\, cot\, H_s}{cos\, \sigma} \tag{178}$$

$$N_2 = \frac{4.L\,.\tan v}{\pi.D_{diam}} \tag{179}$$

$$N_3 = \boldsymbol{b_1}.A_p \;+\; \boldsymbol{b_2}.\cot H_s \;+\; \boldsymbol{b_3}.A_p.\cot H_s \tag{180}$$

Les équations (178) et (180) posent un problème en début et en fin de journée lorsque la hauteur solaire est proche de zéro ou nulle, car la cotangente de « 0 » est infinie. Pour cette raison nous préconisons l'utilisation de l'équation (179). De plus, N_2 est cohérent avec la réalité physique, car lorsque le Soleil est au zénith ($v = 0°$), aux coudes prés, il n'y a plus d'interréflexion au sein du tube. La réflectivité du conduit mise à la puissance N_2 vaut alors 1. Lorsque la hauteur solaire est nulle, l'angle zénithal est alors proche de 90°, la tangente de 90° vaut l'infini. Le paramètre N_2 prend alors une valeur infinie. La réflectivité du conduit mise à la puissance N_2 tend vers 0.

Nous obtenons au final la forme complète (avec modèle d'émission similaire pour l'éclairement direct et diffus) :

$$E_{(x,y,z)} = \left(\tau_{dir\,TDGS}.E_{b,h} \;+\; \tau_{diff\,TDGS}.E_{d,h}\right).\frac{\pi.R^2.(\cos\theta_{(x,y,z)})^4}{2\pi.H^2} \tag{181}$$

Si nous détaillons l'équation :

$$E_{(x,y,z)} = \left(A_{dir}.{\rho_{LP}}^{N_i}.\chi_{coude_{dir}}.E_{b,h} + A_{diff}.e^{B_{diff}.A_p}.\chi_{skyview}.\chi_{coude_{diff}}.E_{d,h}\right) \times \frac{\pi.R^2.(cos\,\theta_{(x,y,z)})^4}{2\pi.H^2} \tag{182}$$

Et en dissociant l'émission directionnelle et diffuse :

$$E_{(x,y,z)} = \tau_{dir\,TDGS}.\frac{\pi.R^2.cos(\nu-\beta_{dôme})\,.(cos\,\theta_{(x,y,z)})^3}{2\pi.H^2}.E_{b,h} + \tau_{diff\,TDGS}.\frac{\pi.R^2.(\cos\theta_{(x,y,z)})^4}{2\pi.H^2}.E_{d,h} \tag{183}$$

1.2.2.2. Synthèse de l'approche proposée et hypothèses générales

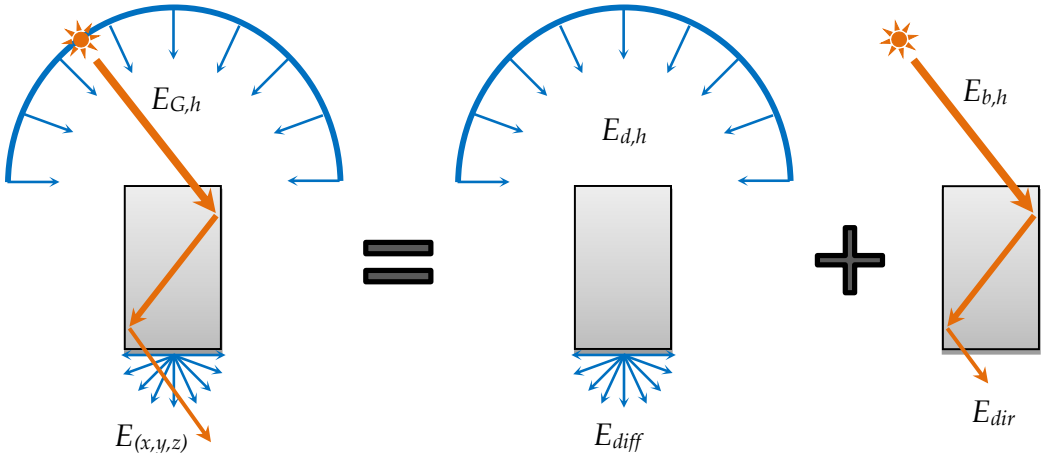


Figure 101 : Illustration de l'approche choisie

La Figure 101 présente et synthétise globalement l'approche choisie pour la modélisation des performances du conduit de lumière.

Les hypothèses associées à notre modèle, et plus généralement aux autres approches, sont les suivantes :

- Pour la pondération de nos coefficients, nous négligeons la part de l'éclairement réfléchi par les parois (nous nous placerons dans des conditions expérimentales assurant cette hypothèse) ;
- Le flux lumineux est monodirectionnel : il pénètre à l'intérieur du conduit par le biais du collecteur et ne ressort pas (de l'extérieur vers l'intérieur) ;
- La distance Terre-Soleil permet de considérer l'ensemble des rayons provenant de l'astre comme parallèles ;
- La distribution lumineuse au sein de la pièce peut être approximée en considérant la source (le diffuseur) comme orthotrope ;
- Seul l'éclairement direct permet d'engendrer une distribution lumineuse directionnelle au sein de la pièce. En effet, cela rejoint l'hypothèse 2 : comme le Soleil est extrêmement éloigné, les rayons arrivants sur Terre sont considérés comme parallèles ;
- L'éclairement diffus est considéré comme une source secondaire lumineuse intraémissive proche. À la différence de l'hypothèse 2, le ciel est assez proche pour considérer les rayons comme orthogonaux à la tangente de l'atmosphère. De ce fait, les rayons célestes arrivent dans toutes les directions ;
- L'éclairement céleste est isotrope : l'anisotropie du ciel n'est pas considérée.

2. Le code de calcul HEMERA

Comme nous l'avons constaté, les conditions météorologiques jouent un rôle prépondérant dans le comportement du conduit de lumière. Sans utiliser une théorie solide, axée principalement sur les méthodes de lancer de rayon, il n'est pas possible d'énoncer un modèle qui soit généralisé à tout climat et tout type de conduit. Les modèles semi-empiriques sont efficaces à condition d'avoir été conçus pour la zone géographique concernée. Cette limite peut être une force :

« Et si ce n'était pas le modèle que l'on généralisait, mais l'outil permettant de l'obtenir ? »

Cette partie concerne le code de calcul que nous avons développé. Ce dernier s'apparente à un code de calcul multimodèle du comportement photométrique des bâtiments auquel nous avons ajouté la possibilité d'optimiser des paramètres afin d'ajuster le modèle aux conditions d'étude. Il a été développé sous la plate-forme de modélisation MATLAB, dont un bref descriptif est dans un premier temps effectué. Vient ensuite la description proprement dite du code de calcul, d'un point de vue structurel d'une part et fonctionnel ensuite.

2.1. L'environnement MATLAB

MATLAB a été choisi pour le développement de notre outil numérique. Il utilise un langage de programmation considéré comme de haut niveau. Il est optimisé pour les calculs matriciels avancés, et présente de nombreux avantages en terme de syntaxe, gestion des variables et traitement de fichier. MATLAB offre également des outils tant en création graphique qu'en optimisation. L'utilisation de diverses fonctions issues du langage C fait de cet environnement de programmation une solution simple et puissante pour la création d'application à orientations diverses.

2.2. Présentation structurelle

Le code de calcul que nous avons développé dans l'environnement MATLAB a été baptisé HEMERA, **H**yper **E**nergy **M**odelling for **E**ngineering and **R**esearch **A**pplications.

HEMERA propose les modules suivants :

- Description de la zone et du site ;
- Simulation avec choix multimodèle ;
- Tracé de graphiques ;
- Optimisation par algorithme génétique ;
- Aspect réglementaire : conformité par rapport aux références réglementaires.

La gestion des modules est centralisée dans une fenêtre d'accueil, et l'ensemble des opérations exploite la convivialité du multifenêtrage. Nous présentons au travers des Figure 102 et Figure 103, la fenêtre principale d'HEMERA ainsi que la fenêtre de description de la zone.

Figure 102 : Fenêtre principale d'HEMERA

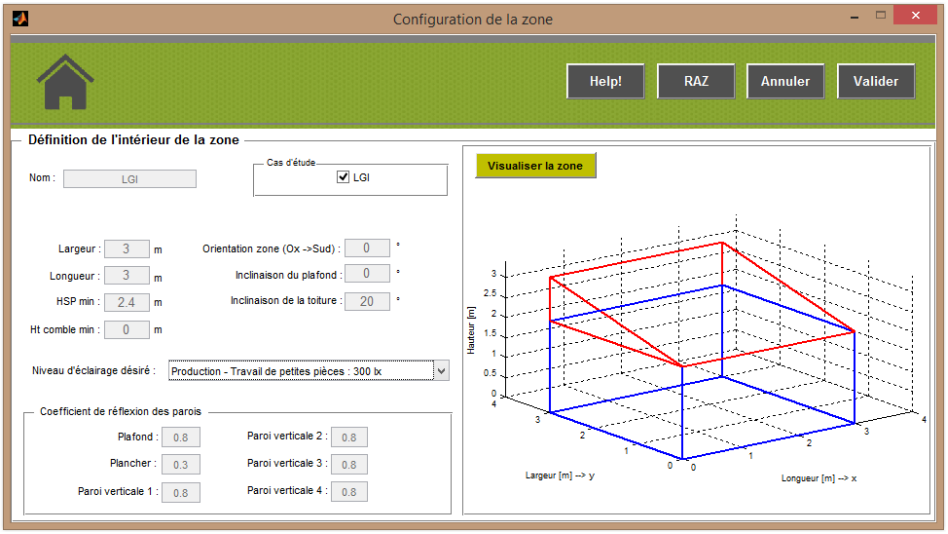


Figure 103 : Fenêtre de description de la zone d'étude

Concernant les conduits de lumière, HEMERA permet de simuler une enceinte monozone équipée de plusieurs conduits de lumière et de sélectionner le modèle de calcul à utiliser parmi un choix de 35 modèles (à terme), dont 19 modèles semi-empiriques déjà disponibles et 2 modèles dont les coefficients empiriques sont associés aux résultats de l'algorithme génétique et basés sur la forme du modèle développé dans le cadre de ces travaux (Figure 104).

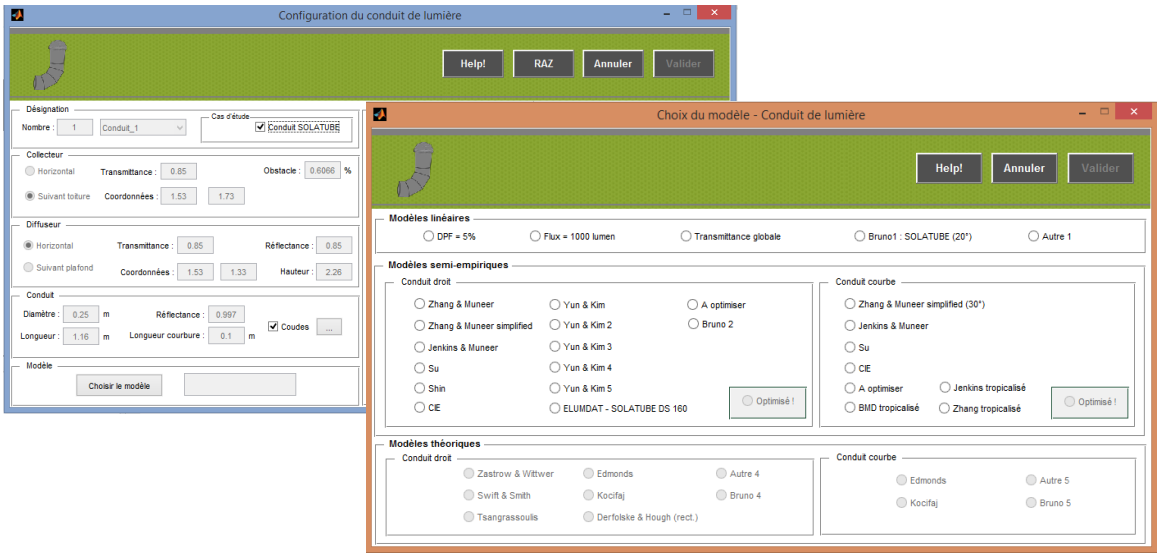


Figure 104 : Fenêtre de description du conduit de lumière et choix du modèle associé

2.3. Objectif du code de calcul : éclairagisme et optimisation

La problématique réelle de ces travaux de recherche n'est pas de faire une modélisation qui fonctionnera pour des conditions bien spécifiques tant en climat qu'en matériel. La problématique est la suivante :

« Comment rendre générique le (ou les modèles) de comportement des conduits de lumière ? »

Dans le principe, c'est impossible, car nous utilisons des modèles semi-empiriques, dont l'expression obtenue est créée pour répondre aux conditions de création. Nous remarquons dans la littérature que les modèles publiés sont élaborés suivant deux climats (Royaume-Uni et Corée du Sud). Ces modèles ne sont pas, ou que dans certains cas, applicables à d'autres conditions climatiques. Ainsi, si nous appliquons une approche de modélisation similaire à ce qui a déjà été fait, notre modèle fonctionnera très bien pour notre type de conduit et pour notre climat. Si nous utilisons notre modèle dans d'autres conditions, il risque de diverger par rapport à la réalité.

Pour cette raison, nous nous sommes questionnés sur la méthode permettant de généraliser un modèle semi-empirique. La première réponse a été qu'il était presque impossible de généraliser ce type de modèle, compte tenu des résultats publiés dans la littérature. De ce fait, il est nécessaire de voir le problème sous un autre angle.

Nous avons créé HEMERA, code de calcul d'étude macroscopique de photométrie dont la version initiale permet de modéliser les conduits de lumière au sein d'une enceinte monozone. L'ensemble des modèles de la littérature y a été implanté. HEMERA intègre également les modèles développés. Ceux-ci possèdent un certain nombre de paramètres à ajuster par optimisation. Le couplage d'HEMERA à un algorithme génétique, en fait un outil tout privilégié pour les tâches d'optimisation.

Nous créons en réalité un générateur de modèle. De cette façon, nous rendrons générique, non pas le modèle final, mais notre protocole de modélisation. À condition de posséder les caractéristiques du conduit, de la zone du bâtiment, de disposer de la ressource solaire extérieure (rayonnement/éclairement global ou direct et diffus) et des mesures d'éclairement sous le diffuseur, HEMERA est capable de proposer le modèle de comportement du dispositif le plus optimal en fonction des entrées.

Dans le cas où l'utilisateur ne possède pas d'information sur les ressources solaires extérieures, il est prévu de moduler la forme du modèle, le degré de précision étant impacté.

Par exemple, si le rayonnement global est la seule donnée disponible, HEMERA va convertir l'information en éclairement, puis utiliser une forme « simplifiée » de notre modèle (pas de distinction entre éclairements diffus et direct, mais utilisation uniquement d'un éclairement global). La précision sera moindre.

Si les rayonnements global et diffus sont disponibles, HEMERA les convertit en éclairement, et utilise la forme générale de notre modèle. La précision est améliorée, mais est sujette aux erreurs associées aux constantes d'efficacités valables pour la zone climatique d'étude.

Si nous ne disposons que de l'éclairement global extérieur, notre modèle dans une version simplifiée sera utilisé. Dans ce cas, la précision s'en verra impactée : la prédiction de l'éclairement sera meilleure, mais moins optimale que si l'on disposait des éclairements global et diffus.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2.4. **Présentation fonctionnelle**

Le fonctionnement d'HEMERA peut être résumé selon le synoptique de la Figure 105. Son fonctionnement est dissocié en deux branches communicantes.

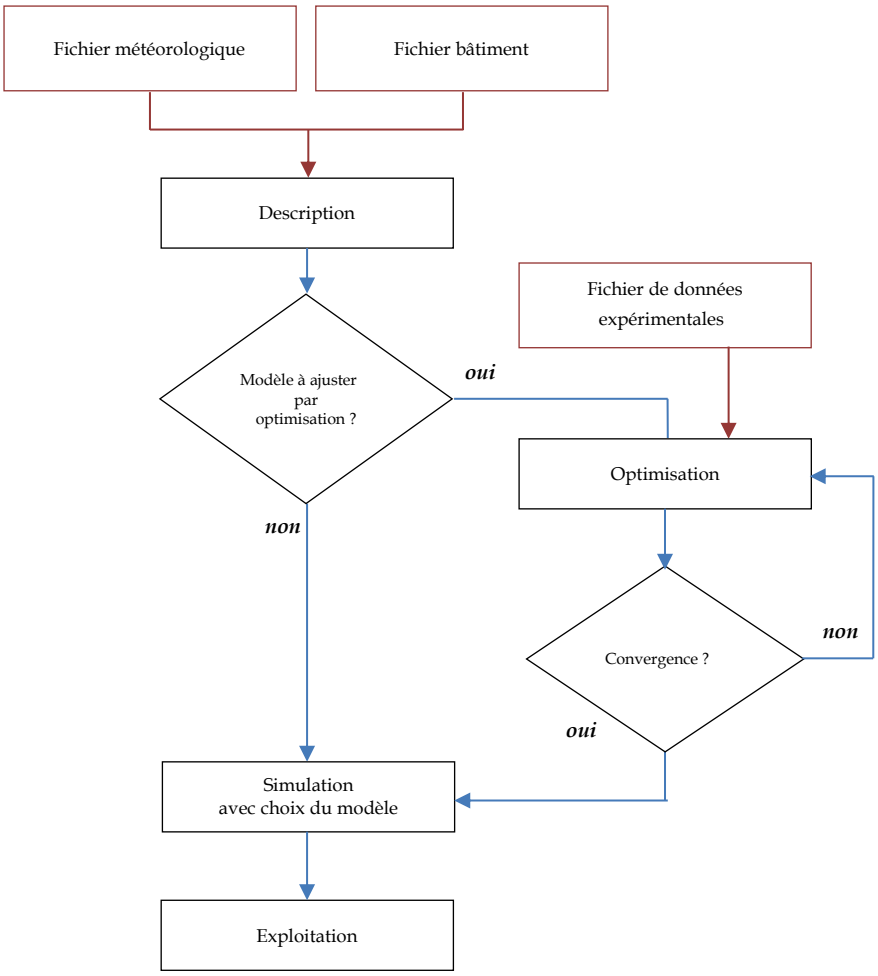


Figure 105 : Synoptique fonctionnelle d'HEMERA

Pour être conforme à ce qui a été fait dans les codes précédemment élaborés au laboratoire (CODYRUN et ISOLAB), l'élément fondamental de l'architecture informatique intervenant dans le fonctionnement d'HEMERA est la structure de données. Plusieurs variables de ce type servent à gérer le stockage des informations liées à la description du bâtiment, à la résolution numérique du problème et aux résultats.

2.5. **Optimisation par algorithme génétique**

2.5.1. Définition de l'outil d'algorithme génétique

Les algorithmes génétiques font partie d'une famille de méthodes stochastiques[20] appelées Méthodes Evolutionnistes basées sur une analogie avec la Théorie de l'Evolution Naturelle de Darwin. Initiés dans les années 1970 par John Holland, ils reposent sur le principe que les individus d'une population les mieux adaptés à leur environnement ont une plus grande probabilité de survivre et de se reproduire de génération en génération, ceci en donnant des descendants encore mieux adaptés. Les algorithmes génétiques tentent donc de simuler le processus de l'évolution naturelle dans un environnement donné en s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : croisement, mutation, sélection.

« Tout comme un individu est lié à un environnement par son code d'ADN, une solution est liée à un problème par son indice de qualité »

L'objectif est de simuler l'évolution d'une population d'individus divers (tirée aléatoirement au départ) à laquelle on applique différents opérateurs (croisements, mutations, …) et que l'on soumet à une sélection (réduction de résidu, valeurs à atteindre, …) à chaque génération (Figure 106).

Si la sélection s'opère à partir de la fonction d'adaptation, alors la population tend à s'améliorer. Un tel algorithme peut être représenté comme une boîte noire comportant des entrées (les variables) et des sorties (les fonctions objectif). L'algorithme ne fait que manipuler les entrées, lire les sorties, manipuler à nouveau les entrées de façon à améliorer les sorties et ce jusqu'à atteindre le critère de validité.

Les algorithmes évolutionnaires offrent un compromis intéressant entre la solution analytique exacte et l'approximation numérique : ils permettent de trouver des solutions satisfaisant au mieux à différents critères.

[20] Les méthodes stochastiques sont des méthodes dites « aléatoires » : les résultats d'ajustement des coefficients ne seront probablement jamais les mêmes.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

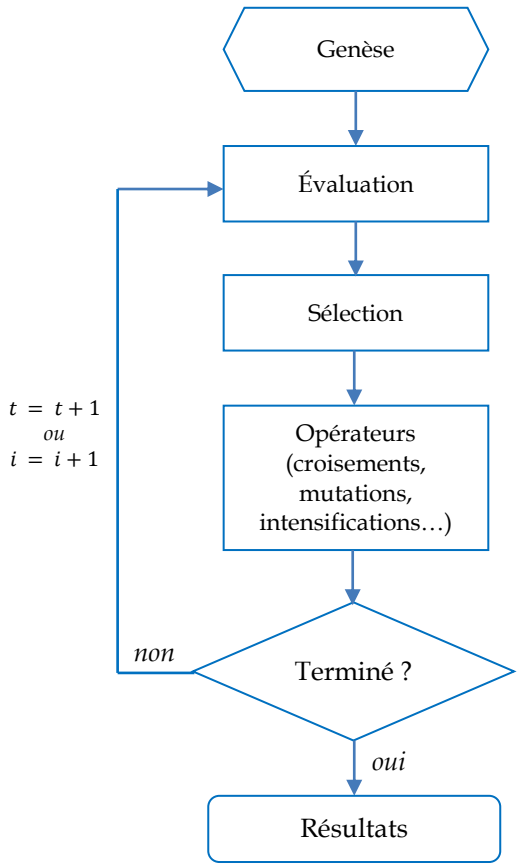


Figure 106 : Synoptique fonctionnel de l'algorithme génétique

2.5.2. Présentation de l'outil d'algorithme génétique de MATLAB

Comme pour de nombreux algorithmes génétiques, celui de MATLAB utilise un ensemble d'opérateurs qui sont appliqués à une population donnée. Cette population est un ensemble de points dans l'espace de conception, générée de façon aléatoire par le générateur de nombres aléatoires de Matlab. La population initiale est, par défaut, générée de façon aléatoire. Le solveur utilise alors des opérateurs pour produire la prochaine génération de la population. Ces opérateurs peuvent être choisis en appliquant les options liées au solveur. Pour générer la génération suivante, nous pouvons choisir les opérateurs d'intensification (*scaling*), de croisement (*crossover*) ou de mutation.

La génération suivante de la population est calculée en évaluant la justesse des individus de la génération actuelle à répondre aux critères de la fonction « objectif » fixée.

L'algorithme utilise trois critères pour déterminer quand le solveur doit s'arrêter :

- Lorsque le nombre maximum de générations est atteint ;
- Lorsque le solveur détecte qu'il n'y a plus de changement dans le meilleur jeu de valeurs des paramètres à ajuster. Le critère peut alors être :
    - Temporel : provoque l'arrêt du solveur après un temps limite ;

- Itératif : provoque l'arrêt du solveur après un nombre limité de générations ;

- Lorsque le délai maximum de calcul est atteint.

À la fin, le solveur propose le meilleur jeu de valeurs pour les paramètres à ajuster de la fonction.

Dans l'ensemble des optimisations à la suite, notre critère à atteindre est la minimisation de l'écart type entre le modèle et la mesure. L'écart type est le paramètre de dispersion le plus parlant du fait qu'il s'exprime dans la même unité que la variable mesurée. De façon simplifiée, nous pouvons considérer que l'écart type est l'écart que nous observerons en moyenne entre une donnée prise au hasard dans la population et la moyenne des données.

3. Modélisation en zone tropicale humide : cas de La Réunion

3.1. **Critères de validité d'un modèle en photométrie**

Les raisonnements et calculs que nous pouvons réaliser en photométrie ont une particularité : nous disposons d'outils qui appartiennent à de la physique « mélangée » à de la physiologie statistique : la courbe de sensibilité moyenne de l'œil humain.

Des modèles très puissants pourront être élaborés, associant des calculs éventuellement très théoriques, mais nous ne serons plus en physique. Nos résultats ne seront valides que dans la limite de la validité de notre courbe de sensibilité moyenne de l'œil humain. Tout résultat mis en défaut par l'expérience (insatisfaction usagère par exemple) n'est souvent que l'expression d'une divergence de l'œil de la personne insatisfaite par rapport à la courbe « moyenne ».

Cette remarque fondamentale montre que notre approche scientifique est valide pour une moyenne (selon des règles de calculs pour un « œil type ») du fait de la large variabilité de la physiologie humaine. En plus de réagir aux couleurs de l'ambiance (la perception des luminances est liée aux contrastes de l'ambiance), l'œil est sensible à l'éclairement. Celui-ci joue un rôle important, car il prend en compte l'éloignement de la source (loi de l'inverse du carré de la distance).

Le seuil différentiel (Delétré 2001) exprime la différence minimale qu'il doit exister entre deux éclairements pour que notre œil perçoive une différence. Ce seuil dépend du temps d'exposition :

- Seuil différentiel à long terme : nous retrouvons dans la littérature qu'un individu restera insensible jusqu'à une variation des éclairements de 20 % (variation de l'ordre de 0,8).
- Seuil différentiel à très court terme : la variation quasi immédiate de l'éclairement est perçue par l'individu lorsque la différence entre les niveaux d'éclairement passe du simple au double. Nous relevons une sensibilité de l'œil lorsque la variation entre les éclairements est de l'ordre de 2.

Le seuil d'acceptabilité pour l'écart modèle/mesure ne doit pas être inférieur au seuil différentiel à long terme. Pour être conforme au seuil différentiel à très court terme, il serait nécessaire

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

d'utiliser des données expérimentales au même pas de temps que le temps de réponse de l'œil (typiquement 0,1 seconde) ce qui n'est pas concevable.

Le pas de temps de validation est également un élément décisif. La variabilité de l'éclairement global extérieur génère une difficulté accrue dans la modélisation des phénomènes en photométrie. Cela est principalement dû à la récurrence des aléas (variation de la couverture nuageuse, impact de la faune sur les mesures, masques temporaires, salissures, etc.). Même si les mesures sont prises au pas de temps de la minute, nous augmenterons celui-ci afin d'éviter que l'algorithme retranscrive les bruits ou aléas perçus par les capteurs. Nous sélectionnons les pas de temps de 10 minutes et 60 minutes, du plus précis (éclairement intérieur « instantané ») au plus généraliste.

Dans la bibliographie, Zhang (Zhang 2002) valide son modèle en se fixant une limite pour l'écart modèle/mesure de 10 % de la valeur moyenne. L'œil humain étant sensible à une variation de l'éclairement à hauteur de 50 lux, nous pouvons considérer cette exigence comme une référence pour valider notre modèle.

Le modèle développé étant semi-empirique, nous devrons également prendre en compte la précision des instruments utilisés. En effet, nul ne sert de se fixer un critère trop exigeant que l'on ne pourra respecter compte tenu de la sensibilité des capteurs, à la fois pour la modélisation et la validation des résultats.

Le Tableau 17 synthétise les erreurs sur les mesures. La valeur de cet écart est cohérente avec la limite que nous nous sommes fixée.

Tableau 17 : Erreurs sur les mesures des luxmètres

Référence	Type	Erreur absolue [21]
FLA603VL2	Luxmètres intérieurs	±10 %
FLA613VLM	Luxmètres extérieurs	±10 %

3.2. **Scénario expérimental de référence**

Nous utilisons le scénario N°1 référencé dans le chapitre III. Celui-ci correspond au cas de la zone d'étude équipée de parois noires dont la seule source lumineuse est le conduit de lumière. L'objectif est de ne prendre en compte que l'éclairement issu du DGLT. La période de mesure s'étend du 5 septembre 2014 au 21 décembre 2012 (57 jours). Nous avions noté au chapitre précédent (section 2.3.2) l'impact d'un masque environnant (bâtiment à proximité) sur l'apport en éclairement direct pour une période horaire très courte compte tenu de l'heure moyenne du lever du soleil en hiver. Étant contraints par la nécessaire présence de jours de tout type (été/hiver, ciel/intermédiaire/couvert), et compte tenu de la taille de notre base de données, nous

[21] Selon la documentation du constructeur fournie en annexe 1.

utiliserons tout de même ces données pour la période d'optimisation. L'impact du masque, peu impactant, sera alors intégré dans les coefficients empiriques ajustés par l'algorithme génétique.

3.2.1. Génération du fichier météorologique

HEMERA supporte plusieurs formats de fichiers météorologiques (MTO, MTX, MTZ, EPW et prochainement TMY2). Les différences entre ces fichiers sont les informations qu'ils contiennent. Le MTO est un fichier météorologique comprenant les informations de base nécessaire aux simulations thermiques dynamiques. Historiquement, c'est le format des premières versions d'un logiciel de simulation thermique développé à l'INSA Lyon, CODYBA. Le MTX et le MTZ comportent de plus, respectivement, les éclairements global, direct et diffus. Le Tableau 18 décrit le contenu de ces fichiers.

Tableau 18 : Composition des fichiers météorologiques de type « MT »

Colonne	Nb de digits	Paramètres	MTO	MTX	MTZ
1	3	Jour julien			
2	2	Mois			
3	2	Jour dans le mois			
4	2	Heure (TSV)			
5	4	Température sèche air extérieur1/10ieme de [°C]			
6	4	Rayonnement direct horizontal [W/m²]			
7	3	Rayonnement diffus horizontal [W/m²]			
8	3	Humidité relative extérieure [%]			
9	4	Azimut du soleil [°] (0° Sud, -90 Est, +90 Ouest, …)			
10	2	Hauteur du soleil [°] (entre 0 et 90°)			
11	4	Température équivalente du ciel 1/10ieme de [°C]			
12	3	Vitesse du vent en 1/10ieme de [m/s]			
13	2	Direction du vent par rapport au Sud Secteur de 1à 36 (convention)			
14	6	Éclairement global horizontal [lux]			
15	6	Éclairement diffus horizontal [lux]			

Pour assurer un formalisme rigoureux, nous avons créé un générateur de fichiers météorologiques nommé HEMERA - MT Maker (Figure 107). Celui-ci permet de modifier le pas de temps des fichiers, mais également de calculer les informations nécessaires à la confection des fichiers météorologiques (jour julien, hauteur et azimut solaire notamment). L'annexe 2 synthétise la procédure de calcul des éléments de géométrie solaire.

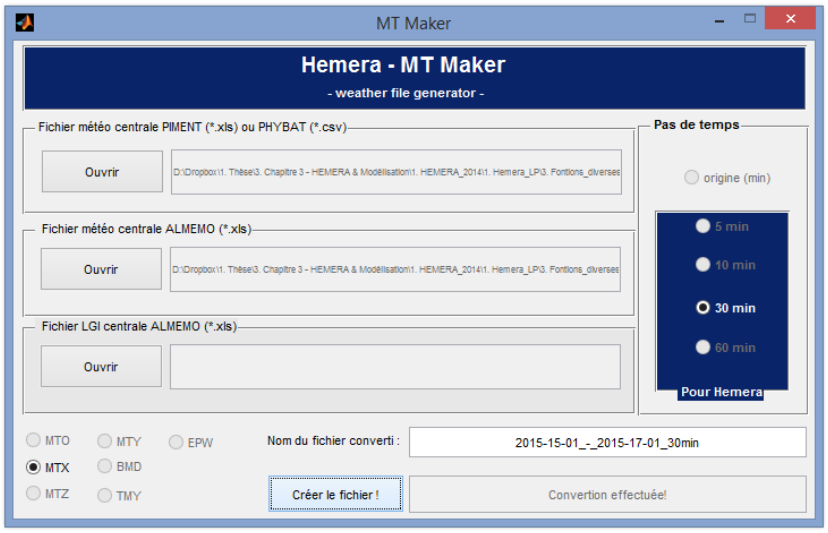


Figure 107 : Générateur de fichier météorologique

Il propose la conversion des fichiers selon plusieurs formats, notamment le format EPW [22].

3.2.2. Rappel sur les limites de la modélisation semi-empirique

De nombreux auteurs ont présenté la limite de leur modèle en précisant que leur approche n'était effectivement pas performante en ciel clair, mais aucun n'a concrètement fixé les limites de la modélisation empirique. L'explication physique a été faite au chapitre III et en début du présent chapitre. En effet, les modèles semi-empiriques sont basés sur un facteur de transmission du conduit de lumière τ_{TSGS}. Or, celui-ci n'est pas une constante, mais bien un scalaire qui évolue en fonction de paramètres dynamiques (course solaire, indices de clarté, etc.) et de paramètres fixes (caractéristiques du conduit, de la zone d'étude, site géographique, etc.). Le modèle d'émission associé à ce scalaire est un modèle Lambertien. Il est donc impossible de le prédire pour des conditions de ciel clair dans lesquelles le profil de l'éclairement extérieur n'est pas le même que celui de l'éclairement intérieur. Nous pouvons l'approcher, mais la présence de taches solaires fausse les résultats du modèle.

3.3. **Procédure de détermination du modèle optimal**

La section 1.2.2 a présenté différents types d'approche pour la modélisation du comportement du conduit de lumière. Dans l'absolu, toutes ces approches peuvent être appliquées à notre cas, engendrant des résultats plus ou moins fiables.

Les modèles utilisent tous le même facteur de transmission pour évaluer la part du diffus (équation (171)). Pour rappel, $\tau_{diff_{TDGS}}$ est évalué à partir de 3 paramètres à ajuster : $a(1)$, $a(2)$ (notés respectivement A_{diff} et B_{diff} dans l'équation (171)) et $a(3)$ (noté C_{diff} dans l'équation (172)).

[22] *EnergyPlus Weather*

La forme générale du facteur de transmission lié au direct $\tau_{dir_{TDGS}}$ reste la même (équation 32). La distinction s'opère au niveau des coefficients à ajuster, mais également au niveau des modèles de répartition au sein de la pièce. Le Tableau 19 et le Tableau 20 récapitulent les modèles testés.

Nous devons établir une méthodologie pour départager ces modèles. Nous proposons d'utiliser l'algorithme génétique comme outil d'ajustement. Cependant, dans ce cas, l'ajustement n'est pas l'objet de notre étude : il ne permettrait que d'attribuer des valeurs aux coefficients empiriques. Nous choisissons plutôt d'évaluer 2 éléments : la fiabilité de la forme du modèle et sa capacité à faire converger l'algorithme génétique vers les valeurs « vraies » (valeurs mesurées). Dans ce cadre, notre problématique prend une forme pouvant être complexe du fait du nombre de facteurs influents. En effet, la fiabilité de notre modèle varie en fonction du pas de temps, de la position de référence (i.e. les mesures d'un unique capteur sont utilisées) et de la sollicitation externe (les éclairements globaux, directs et diffus, pour une période hivernale et estivale).

De façon à évaluer notre valeur ajoutée, nous comparerons les modèles ajustés au modèle « référence » de la littérature : le modèle de Zhang pour les conduits courbes. Il sera optimisé à l'aide de nos données climatiques et sera dénommé par la suite « Zhang tropicalisé ».

Les modèles BMD 1 et BMD 2 sont semblables, au modèle d'émission près. Le modèle BMD 1 utilise la même approche pour distribuer l'éclairement au sein de la pièce (distribution selon une loi de Lambert). Le modèle BMD 2 distingue les distributions en fonction de la sollicitation externe : l'éclairement diffus est associé à une distribution Lambertienne, tandis que l'éclairement direct utilise la forme que nous avons développée en section 1.2.1 de ce chapitre. Ces deux modèles sont des innovations compte tenu des éclairements diffus et direct, mais aussi dans l'association des formes recensées dans la littérature, ou développées dans le cadre de ces travaux.

Le modèle de Zhang correspond à celui valide pour notre cas d'étude, à savoir le modèle développé pour les conduits courbes (voir Chapitre II, section 1.1.1.2 équation (14)). Pour être comparable, il a été tropicalisé au travers de nouvelles valeurs de a_i recalculées à l'aide de l'algorithme et de notre base de données.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Tableau 19 : Synthèse des formes de modèle développées à évaluer

Modèle	Description		Nombre de paramètres à ajuster
BMD 1	**Modèle de transmission du Diffus** $\tau_{diff_{TDGS}} = \boldsymbol{a(1)}.e^{\boldsymbol{a(2)}.A_p} \cdot \chi_{skyview} \cdot \chi_{coude_{diff}}$	$\chi_{coude_{diff}} = \prod_{1}^{n} e^{N_{coude}.\ln(1-\boldsymbol{a(3)})}$	8
	Modèle de transmission du Direct $\tau_{dir_{TDGS}} = A_{dir}.{\rho_{LP}}^{N_2} \cdot \chi_{coude_{dir}}$	$A_{dir} = \boldsymbol{a(4)} + \boldsymbol{a(5)}.H_s + \boldsymbol{a(6)}.\beta + \boldsymbol{a(7)}.H_s.\beta$	
		$N_2 = \frac{4.L.\tan\upsilon}{\pi.D_{diam}}$	
		$\chi_{coude_{dir}} = \prod_{1}^{n} e^{N_{coude}.\ln(1-\boldsymbol{a(8)})}$	
	Modèle d'émission au sein de la pièce	$E_{(x,y,z)} = \left(\tau_{dir_{TDGS}}.E_{b,h} + \tau_{diff_{TDGS}}.E_{d,h}\right).\frac{\boldsymbol{\pi.R^2.(\cos\theta_{(x,y,z)})^4}}{\boldsymbol{2\pi.H^2}}$	
BMD 2	**Modèle de transmission du Diffus** $\tau_{diff_{TDGS}} = \boldsymbol{a(1)}.e^{\boldsymbol{a(2)}.A_p} \cdot \chi_{skyview} \cdot \chi_{coude_{diff}}$	$\chi_{coude_{diff}} = \prod_{1}^{n} e^{N_{coude}.\ln(1-\boldsymbol{a(3)})}$	8
	Modèle de transmission du Direct $\tau_{dir_{TDGS}} = A_{dir}.{\rho_{LP}}^{N_2} \cdot \chi_{coude_{dir}}$	$A_{dir} = \boldsymbol{a(4)} + \boldsymbol{a(5)}.H_s + \boldsymbol{a(6)}.\beta + \boldsymbol{a(7)}.H_s.\beta$	
		$N_2 = \frac{4.L.\tan\upsilon}{\pi.D_{diam}}$	
		$\chi_{coude_{dir}} = \prod_{1}^{n} e^{N_{coude}.\ln(1-\boldsymbol{a(8)})}$	
	Modèle d'émission au sein de la pièce	$E_{(x,y,z)} = \tau_{dir_{TDGS}}.\frac{\boldsymbol{\pi.R^2.cos\nu.(\cos\theta_{(x,y,z)})^3}}{\boldsymbol{2\pi.H^2}}.E_{b,h} + \tau_{diff_{TDGS}}.\frac{\boldsymbol{\pi.R^2.(\cos\theta_{(x,y,z)})^4}}{\boldsymbol{2\pi.H^2}}.E_{d,h}$	

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Tableau 20 : Synthèse de la forme du modèle de référence (Zhang)

Modèle	**Description**		**Nombre de paramètres à ajuster**
Zhang tropicalisé	**Modèle de transmission du global :** $\tau_{TDGS} = C_{zhang} \times {\rho_{LP}}^{N_{zhang}}.\chi_{coude_{dir}}$	$C_{zhang} = \boldsymbol{a(1)} + \boldsymbol{a(2)}.k_t + \boldsymbol{a(3)}.H_s$	10
		$N_{zhang} = \boldsymbol{a(4)} + \boldsymbol{a(5)}.A_{pe} + \boldsymbol{a(6)}.\cot H_s + \boldsymbol{a(7)}.A_{pe}.\cot H_s$	
		$\chi_{coude_{dir}} = \left(1 - \boldsymbol{a(8)}\right)^{N_{coude}}$	
		$A_{pe} = \frac{L + \boldsymbol{a(9)}.L_b}{2R}$	
	Modèle d'émission au sein de la pièce	$E_{(x,y,z)} = \tau_{TDGS}.E_{G,h}.\frac{\boldsymbol{R}^2.(\cos \boldsymbol{\theta}_{(x,y,z)})^{\boldsymbol{a(10)}}}{\boldsymbol{D}^2}$	

3.3.1. Génération d'une base de données pour l'optimisation

3.3.1.1. Caractérisation des types de jour

De nombreuses approches ont été réalisées pour caractériser le type de ciel (Dumortier 1995), mais peu d'entre elles ont été faites pour définir les journées types.

(Fakra 2009) a entamé une étude ayant pour objectif de caractériser de façon simplifiée une journée type à partir de modèles de type de ciel. Comme le rayonnement énergétique est intimement lié à l'éclairement lumineux (par l'efficacité lumineuse), et que de nombreux modèles de caractérisation du type de ciel ont été élaborés à partir de cette donnée, cet auteur s'est intéressé à cette variable énergétique.

Sur critère d'applicabilité vis-à-vis de sa base de données expérimentale, il relève dans la littérature les modèles de Kittler (Kittler 1986), de Perez (Perez, Michalshy, and Seals 1992), de Perraudeau (Perraudeau 1988) et un modèle simplifié (Pattanasethanon et al. 2007). Ce dernier est basé sur le rapport du rayonnement diffus sur le rayonnement global. En évaluant la caractérisation donnée par ces indices sur 3 types de journée (ciels clair, intermédiaire et couvert), il conclut que le modèle simplifié semble mieux convenir. En dehors du lever et du coucher de soleil pour chaque journée, l'indice SR[23] caractérise globalement bien le type de jour.

Cet indice peut être évalué à partir du ratio suivant :

$$SR = \frac{I_{d,h}}{I_{G,h}} \tag{184}$$

Les valeurs caractéristiques proposées sont reprises dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Valeurs caractéristiques de SR (Fakra 2009)

Type de journée	SR
Clair	$SR \leq 0.3$
Intermédiaire	$0{,}3 < SR < 0{,}8$
Couvert	$SR \geq 0{,}8$

En traitant nos données, nous constatons que l'indice SR révèle un phénomène climatique reconnu pour notre climat d'alizé : le matin, les journées sont claires, l'après-midi le ciel se couvre. C'est la raison pour laquelle nous avons 2 journées identifiées comme de type intermédiaire dans la séquence suivante (Figure 108).

[23] *Sky Ratio*

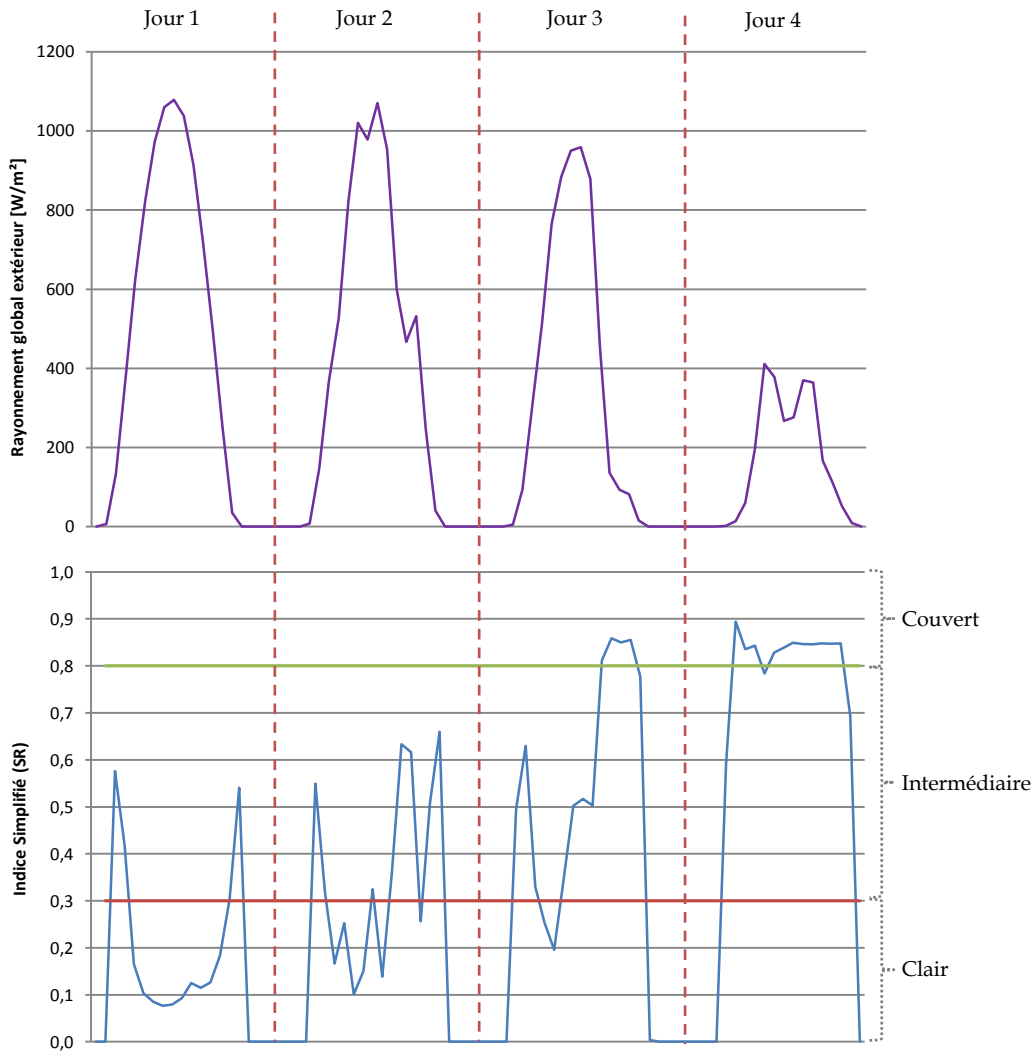


Figure 108 : Exemple d'évaluation des types de jour sur la base de l'indice SR

3.3.1.2. Confection de la base de données d'apprentissage

L'algorithme génétique doit pouvoir pondérer les coefficients sur une base de données ayant différents types de ciel. Pour faire suite à notre étude de caractérisation, nous avons sélectionné des jours clairs, intermédiaires et couverts selon l'indice SR. Pour que les résultats de l'algorithme ne soient pas influencés par le type de journée, il est important de proposer le même nombre de types de journée.

Nous avons constaté, en début du chapitre III, que l'éclairement global extérieur à l'île de La Réunion présentait une saisonnalité importante, comme la température ou l'humidité. Ainsi, le comportement de l'éclairement à l'intérieur de la pièce sera différent en hiver ou en été. En hiver, les journées sont plus courtes, mais plus souvent dégagées. Le soleil est plus bas dans le ciel (faible hauteur solaire), les rayons pénétrant l'atmosphère ont donc une masse d'air optique plus importante à traverser. L'éclairement diffus pour les journées de ciel couvert s'en voit considérablement impacté en montrant de plus grandes amplitudes. En été, les journées sont plus

souvent couvertes, mais la durée d'ensoleillement est plus grande. Partant de ce constat, il est nécessaire d'intégrer à la fois une séquence hiver et une séquence été. Dans l'absolu, il serait préférable de proposer une base de données sur toute une année, mais il est important que notre période d'apprentissage utilise les données de mesure correspondant au scénario 1 (parois noires). Étant limités par cette période, nous avons été contraints de concevoir notre base de données en utilisant des données de l'intersaison : fin de l'hiver et début de l'été. La période estivale étant plus importante, le modèle ajusté y sera alors plus performant qu'en plein hiver, les conditions d'ensoleillement étant différentes.

La sélection des jours pour chaque période a été faite à partir de l'indice SR selon la méthodologie exposée en section 3.3.1.1. Deux jours de types intermédiaires ont été sélectionnés : ceux dont le SR s'étend à la fois du ciel clair au ciel couvert (variation forte entre 0,3 et 0,8) et ceux dont le SR est situé entre 0,3 et 0,8. La séquence créée est donc représentative des types de jour rencontrés à la fois en hiver et en été.

Pour la période estivale (Figure 109), nous sélectionnons des journées de novembre à décembre. En ciel clair, l'éclairement global extérieur avoisine les 130 klux. En ciel couvert, celui-ci atteint en moyenne 50 klux.

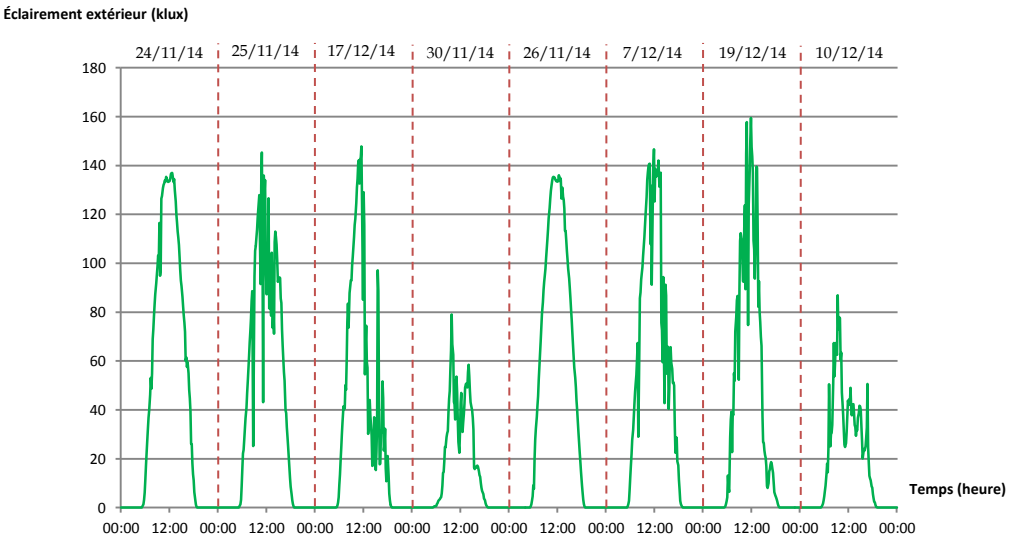


Figure 109 : Jours dédiés à la base d'apprentissage en été (ΔT = 10 min)

Pour la période hivernale (Figure 110), nous sélectionnons des journées du mois de septembre. En ciel couvert, l'éclairement global extérieur atteint en moyenne 80 klux. En ciel clair, celui-ci avoisine les 125 klux.

Les données climatiques sont ensuite concaténées. Dans la globalité, les journées ne sont pas dans un ordre chronologique, permettant à l'algorithme de ne pas se focaliser sur l'évolution temporelle annuelle.

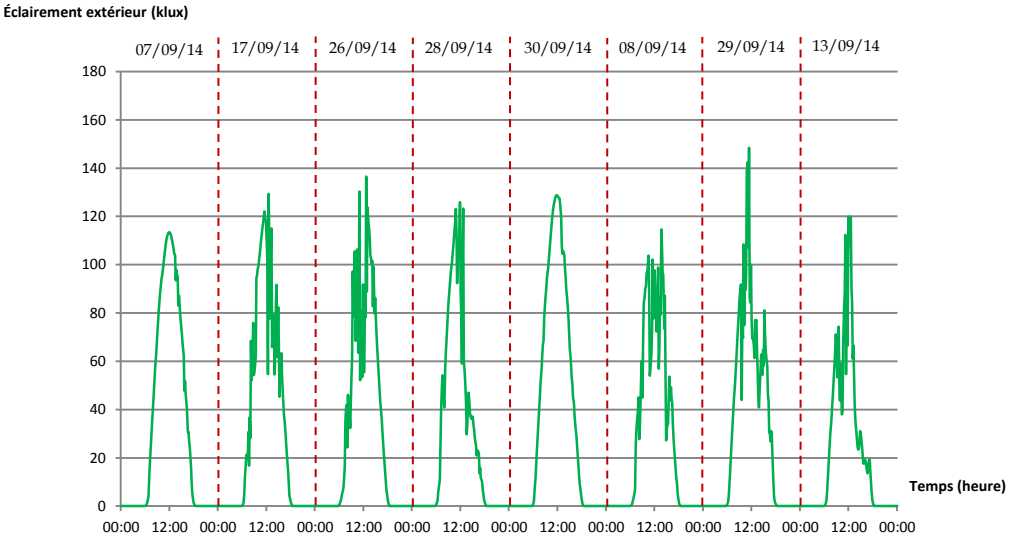


Figure 110 : Jours dédiés à la base d'apprentissage en hiver (ΔT = 10 min)

Il est nécessaire de souligner que l'utilisation d'une base de données composée de plusieurs types de jour, tant dans la quantité d'éclairement, la durée d'ensoleillement que dans la course solaire, assurera des résultats valables dans une généralité. Le modèle engendré sera plus souvent fiable (les données prédites seront plus fréquemment proches des données mesurées), mais moins adapté à des conditions spécifiques. Par exemple, en ciel couvert, le modèle ajusté sur notre base d'apprentissage sera moins fiable que si nous n'avions composé notre base que de journées du même type.

3.3.2. Paramétrage de l'algorithme génétique

Pour les optimisations liées à la section 3, nous paramétrons notre algorithme génétique suivant les grandeurs référencées dans le Tableau 22. Le nombre de générations est limité afin de répondre au second objectif de cette analyse : la capacité du modèle à faire converger l'algorithme vers les valeurs vraies. Le croisement entre générations est fixé à 50 %. Nous avons effectué ce choix afin que l'algorithme puisse, une fois sur deux, brassés les résultats de chaque génération. Nous avons également constaté que l'augmentation de ce paramètre avait tendance à générer des résultats divergeant des valeurs cibles (mesures expérimentales). Suite à de nombreux essais avec des paramètres algorithmiques différents, tant sur la taille de la population que sur le nombre de générations, le meilleur compromis temps/résultat est atteint avec les valeurs inscrites en Tableau 22.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Tableau 22 : Paramètres de l'algorithme génétique pour la section 3

Paramètres	Valeurs
Croisement entre générations	0,5
Taille de la population	1000
Décrochage	700
Nombre de générations	900

L'amplitude de variation des coefficients empiriques est un paramètre supplémentaire à renseigner à l'algorithme génétique. Elle varie en fonction de la signification physique des paramètres à ajuster dans l'équation. Les coefficients associés aux paramètres $\chi_{coude_{dir}}$, $\chi_{coude_{diff}}$ et A_{pe} peuvent varier entre 0 et 1. Les deux premiers sont associés au complémentaire de « 1 ». Pour des coefficients proches de zéro, $\chi_{coude_{dir}}$ et $\chi_{coude_{diff}}$ convergeront vers « 1 », ce qui signifie que les coudes n'engendrent pas ou peu de pertes sur le facteur de transmission du tube. Pour des valeurs proches de l'unité, les pertes engendrées par les coudes sont telles qu'elles minorent au maximum le rendement du tube. Pour A_{pe}, et selon l'équation de Zhang, le coefficient empirique est relatif à la modification du rapport de longueur (i.e. *aspect ratio*) engendrée par la présence de coudes. Il doit donc agir comme une constante permettant d'établir l'équivalence entre une section droite et courbe. Pour les autres paramètres à ajuster, leurs bornes de variation ont été fixées suivant l'amplitude des valeurs rencontrées dans la littérature. Cet intervalle vaut $[-900\,;\,900]$.

3.3.3. Définition des outils statistiques de référence

Pour départager nos modèles, nous utiliserons les outils statistiques les plus connus.

Le résidu maximal est également appelé en statistique « étendue » (*range*, en anglais). Il reflète l'écart maximal pouvant être relevé entre les données expérimentales et les résultats du modèle. En statistique, c'est un paramètre peu objectif dans l'information qu'il offre sur les données dans leur globalité. De plus, il ne peut être considéré qu'à titre informatif dans notre cas au vu de nos constatations expérimentales. Pour rappel, les taches solaires engendrées par l'éclairement direct ne peuvent être appréhendées par nos approches. Même si l'évènement est ponctuel, il est responsable du résidu maximal.

L'erreur moyenne, ou *Mean Bias Error* (MBE) est l'un des outils de tests d'erreur utilisés par Zhang pour valider le modèle qu'il avait établi. Il correspond à l'écart moyen entre l'éclairement estimé et l'éclairement mesuré :

$$MBE = \frac{\sum(E_{estimé} - E_{mesuré})}{n_{valeurs}} \tag{185}$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Il est couramment associé à l'écart type sur l'erreur moyenne, ou *Root Mean Square Error* (RMSE) qui représente une mesure de la propagation des valeurs d'éclairement autour de l'erreur moyenne. Il se détermine par la forme suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(E_{estimé} - E_{mesuré})^2}{n_{valeurs}}} \quad (186)$$

Le dernier test est plus limitatif. En effet, sur la base des critères de validité exposés en section 3.1, nous cherchons à vérifier la capacité du modèle à approcher les données expérimentales aux erreurs du capteur près. La précision des capteurs (±10% de la valeur mesurée) en fait un critère restrictif. Ainsi, il est évalué le pourcentage de fois où les données prédites se situent dans le fuseau de tolérance expérimentale.

Sur la base de ces trois outils comparatifs, nous entamons l'analyse comparative des modèles sélectionnés.

3.3.4. Analyse comparative spatio-temporelle

Nous effectuons une analyse comparative entre les formes des modèles proposées en section 3.3 en fonction d'une variation spatiale (changement de capteur de référence) et temporelle (variation du pas de temps). Cette dernière permet de comprendre la façon dont le modèle va réagir en fonction des événements aléatoires. Par événement aléatoire, nous entendons les aléas n'étant pas liés à la saisonnalité. Un fichier météorologique au pas de temps horaire aura tendance à lisser les aléas, pour ne plus les distinguer dans certains cas. Le fichier au pas de temps de 10 minutes reflétera clairement la variabilité de l'éclairement. La variation saisonnière de l'éclairement est garantie par la mixité de notre base de données d'apprentissage. De façon à pallier à la limite des méthodes stochastiques, nous relançons plusieurs fois (quatre, choix arbitraire) l'algorithme génétique afin de s'assurer des valeurs optimales obtenues. Du Tableau 23 au Tableau 25, les résultats statistiques sont synthétisés pour chaque modèle en fonction des variables pour la séquence décrite en section 3.3.1. Nous avons coloré les lignes où les modèles sont statistiquement les plus fiables.

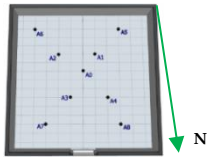
Le Tableau 23 et le Tableau 24 permettent de comparer les approches pour une prédiction du phénomène au pas de temps horaire. Le modèle est alors évalué sur son aptitude à gérer la saisonnalité de l'éclairement (sans les aléas).

En nous référant à la capacité de la forme du modèle à être en mesure de répondre aux exigences spatiales (différentes positions des capteurs), nous relevons que les modèles BMD 1 et 2 offrent des résultats intéressants comparés à ceux du modèle de référence. Sur l'ensemble des points de mesure, le modèle BMD 1 est statistiquement plus souvent fiable que le modèle BMD 2.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Pour la zone centrale (A0, A1, A2, A3 et A4), les modèles présentent tous un résidu maximal supérieur à 50 lux (limite haute liée à la physiologie humaine, définie en 3.1). Cependant, et comme nous l'avons démontré à la fois de façon analytique et expérimentale, les modèles de prédiction se basent sur une loi de Lambert, les pics d'éclairement liés à l'éclairement direct (tache solaire) ne sont pas réellement interprétés par l'algorithme qui pondère les coefficients pour convenir à une majorité plutôt qu'à un événement localisé. Si nous nous intéressons à l'écart type sur l'erreur moyenne (RMSE), il est bien en dessous des 50 lux. Les modèles sont donc cohérents avec les exigences posées.

Tableau 23 : Résultats statistiques sur la fiabilité des modèles au pas de temps horaire pour les points A0 à A4 (zone centrale)



		BMD 1				BMD 2				Zhang tropicalisé			
		Numéro de séquence				Numéro de séquence				Numéro de séquence			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
A0	Résidu max (lux)	189,99	205,76	198,23	193,66	183,47	206,17	181,9	191,14	272,39	272,66	272,49	272,47
	MBE[24]	1,89	-0,67	0,67	1,31	0,25	-1,36	0,05	-0,73	-3,09	-3,08	-3,07	-3,08
	RMSE[25]	21,32	22,30	21,48	21,19	20,28	23,01	20,44	21,75	34,55	34,56	34,55	34,55
	% dans fuseau[26]	52	50	54	54	53	47	54	53	20	20	20	20
A1	Résidu max (lux)	344,49	344,05	340,22	344,56	335,94	341,07	335,8	313,70	401,19	401,15	400,96	401,16
	MBE	0,67	0,00	0,24	0,00	0,02	-0,50	-0,21	1,37	-2,88	-2,72	-2,92	-2,88
	RMSE	27,78	28,54	28,09	28,59	27,78	28,44	27,90	26,99	37,07	37,22	37,08	37,07
	% dans fuseau	36	40	40	40	38	40	41	43	17	13	16	17
A2	Résidu max (lux)	241,11	246,02	251,56	250,85	222,45	215,97	225,9	250,95	329,30	329,46	330,69	329,29
	MBE	-0,01	-0,40	-0,57	-0,56	-0,22	1,61	1,37	-1,07	-2,52	-2,47	-2,37	-2,53
	RMSE	22,24	23,79	23,84	23,84	20,78	20,42	20,64	24,10	32,71	32,72	32,75	32,71
	% dans fuseau	56	48	50	50	51	34	32	43	24	25	22	24
A3	Résidu max (lux)	100,64	103,71	100,57	103,95	96,56	107,09	101,1	101,43	134,98	134,96	134,83	135,09
	MBE	-1,44	-1,56	-1,44	-0,47	-1,70	-2,06	-1,87	-1,86	-0,95	-0,95	-0,96	-0,95
	RMSE	15,21	15,26	15,21	12,73	16,18	16,21	16,17	16,14	15,54	15,54	15,54	15,54
	% dans fuseau	30	25	30	47	28	24	26	26	31	31	31	31
A4	Résidu max (lux)	102,79	142,14	141,50	136,68	111,59	140,43	93,58	71,30	75,72	75,92	75,90	75,95
	MBE	-0,29	-2,16	-2,08	-2,31	-1,23	-2,57	-0,78	0,09	-0,37	-0,35	-0,38	-0,35
	RMSE	11,26	15,90	15,68	16,08	12,24	16,73	10,90	10,66	12,39	12,39	12,39	12,40
	% dans fuseau	45	22	24	20	41	20	45	35	29	30	30	30

[24] *Mean Bias Error*, i.e. erreur moyenne
[25] *Root Mean Square Error*, i.e. écart type sur l'erreur moyenne
[26] Nombre de points prédits situés dans la tolérance associée aux erreurs de mesures (±10%)

Pour ces mêmes points (A0, A1, A2 A3 et A4), le modèle BMD 2 semble assurer des résidus maximaux inférieurs à ceux du modèle BMD 1. Pour rappel, le second modèle prend en compte une nouvelle forme d'équation pour prédire l'émission au sein de la pièce pour la composante directe de l'éclairement. Ainsi, nous pouvons conclure que BMD 2 a plus de facilité à prendre en compte l'impact des taches solaires au sein de la pièce.

Sous le diffuseur (A0), le modèle BMD 2 présente des résultats statistiquement plus fiables, en sous-estimant sensiblement l'éclairement intérieur par rapport aux mesures (erreur moyenne de 0,05 lux). L'écart type sur l'erreur moyenne est également plus faible, reflétant une dispersion plus faible autour des valeurs mesurées. D'autant que le modèle permet d'être dans le fuseau 54% du temps contre 20 % pour le modèle de référence tropicalisé. Le modèle BMD 1 offre également de bons résultats avec une erreur moyenne de 0,67 lux.

Au niveau des capteurs A1 et A4 (proche du diffuseur), le modèle BMD 2 garantit une plus grande justesse en assurant respectivement 43 % et 45 % des points prédits dans le fuseau des points mesurés, contre 17 % et 30 % pour le modèle de Zhang.

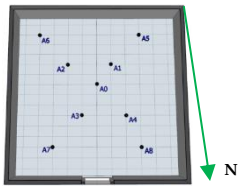
En A2, le modèle BMD 1 est de loin le plus fiable, en sous-estimant légèrement l'éclairement intérieur. En effet, l'erreur moyenne est la plus faible sur l'ensemble des approches avec -0,01 lux contre -0,22 lux pour le modèle BMD 2. Vis-à-vis de la dispersion des valeurs, les modèles se valent hormis le modèle de Zhang qui présente un écart type de 32,71.

En A3, position Est de la cellule LGI, c'est de nouveau BMD 1 qui assure une fiabilité au-dessus des autres approches. La forme commune du modèle d'émission pour l'éclairement direct et diffus semble offrir des perspectives intéressantes pour cette zone.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Tableau 24 : Résultats statistiques sur la fiabilité des modèles au pas de temps horaire pour les points A5 à A8 (zone éloignée du centre)

$\Delta T = 60\ min$



		BMD 1				BMD 2				Zhang tropicalisé			
		Numéro de séquence				Numéro de séquence				Numéro de séquence			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
A5	Résidu max (lux)	156,77	171,96	165,63	170,81	156,59	147,80	173,61	149,12	158,69	158,44	158,55	158,84
	MBE	0,24	-1,73	-0,51	-1,66	-0,22	0,49	-1,88	0,44	-0,36	-0,39	-0,37	-0,39
	RMSE	16,45	19,03	16,91	19,03	16,49	16,44	19,51	16,57	17,35	17,35	17,35	17,35
	% dans fuseau	43	29	36	30	43	42	26	43	31	30	30	31
A6	Résidu max (lux)	85,38	83,28	76,73	76,28	73,54	78,26	79,32	72,33	118,34	118,23	118,14	118,20
	MBE	-0,20	-0,18	-1,58	-1,19	-0,39	-1,97	-1,98	-0,44	-0,13	-0,14	-0,15	-0,15
	RMSE	9,83	9,69	11,94	10,95	9,77	12,84	12,91	9,80	12,73	12,73	12,73	12,73
	% dans fuseau	64	62	25	29	45	20	20	44	54	54	53	52
A7	Résidu max (lux)	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00
	MBE	-0,16	-1,16	-0,24	-0,59	-0,94	-0,80	-1,20	-2,46	-0,62	-0,61	-0,62	-0,62
	RMSE	7,17	7,95	7,18	7,02	7,54	7,32	7,69	11,80	7,34	7,34	7,34	7,34
	% dans fuseau	53	33	53	43	39	49	41	18	47	47	47	47
A8	Résidu max (lux)	27,84	30,70	28,02	66,20	66,48	74,38	29,51	41,19	29,83	29,03	29,32	28,88
	MBE	-0,09	-0,72	-0,26	-2,30	-2,51	-2,32	-0,82	-3,70	0,05	0,06	0,04	0,10
	RMSE	4,88	5,96	4,87	12,194	13,29	13,26	5,34	11,95	5,18	5,15	5,15	5,15
	% dans fuseau	61	49	59	19	17	20	57	19	54	55	56	54

Au Tableau 24, le modèle BMD 1 semble plus efficace en A6 et A8 avec des taux de fiabilité supérieurs à 60 %. Le modèle de Zhang tropicalisé offre également des résultats intéressants avec une fiabilité de 56 % pour une erreur moyenne de 0,04 lux (zone Ouest de la cellule). Ce constat semble être en adéquation avec nos hypothèses : le modèle de Zhang est performant dans les zones sollicitées par l'éclairement diffus. En ces points, hormis les pics d'éclairement en hiver, le profil de l'éclairement prédit est extrêmement proche de celui mesuré. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 111, le constat est entièrement valable en période estivale, et moins en hiver compte tenu de l'amplitude de l'éclairement intérieur.

En A5, le modèle BMD 2 présente une erreur moyenne sensiblement plus faible que le modèle BMD 1 pour un pourcentage de fiabilité similaire.

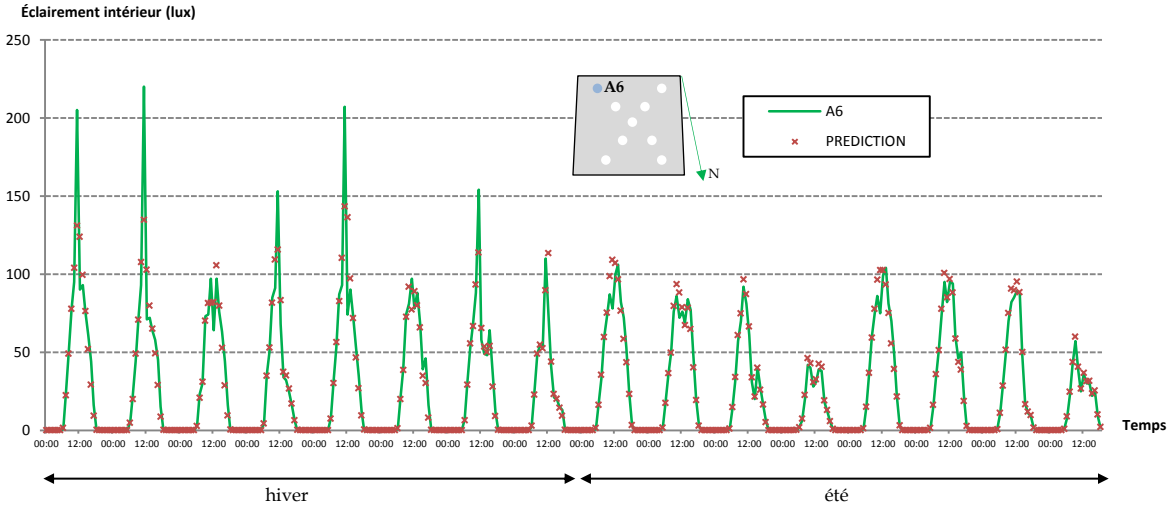


Figure 111 : Comparaison des résultats du modèle BMD 1 par rapport aux mesures en A6 pour la période d'apprentissage

Globalement, nous constatons que pour les zones éloignées du diffuseur (A5 à A8), le modèle BMD 1 assure une justesse accrue comparée aux autres modèles. Il atteint d'excellents résultats en A6, la zone Est de la cellule expérimentale, zone sujette aux effets de l'éclairement direct comme le révélait la Figure 85. Dans son ensemble, nous constatons que cette étude met en avant le modèle BMD 1. Nous déduisons qu'il est plus apte à retranscrire le phénomène mesuré pour un pas de temps horaire, où les aléas ont été intégrés dans l'ensemble.

Intéressons-nous maintenant à un pas de temps plus petit ($\Delta T = 10min$). L'objectif est alors de constater la capacité des modèles à réagir face à un aléa non associé aux effets saisonniers (Tableau 25 et Tableau 26). En globalité, le constat reste le même. Le modèle BMD 1 est statistiquement plus fiable que le modèle BMD 2 et le modèle de référence.

Les résidus maximaux sont plus élevés que ceux présentés aux Tableau 23 et Tableau 24. Les écarts-types sont inférieurs à 50 lux ce qui permet de dire que chaque modèle permet d'atteindre une efficacité notable vis-à-vis des limites de l'œil humain.

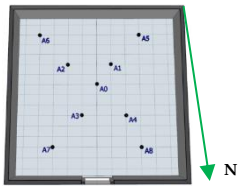
En A0 (sous le diffuseur), les modèles BMD 1 et 2 semblent se valoir, avec un avantage pour le premier modèle qui permet d'atteindre une fiabilité de 48 %.

Autour du diffuseur (A1, A2, A3 et A4), le modèle BMD 2 est en tête avec des taux de justesse proches de BMD 1, hormis en A4 où il atteint 58 % contre 38 % au maximum pour le premier modèle.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Tableau 25 : Résultats statistiques sur la fiabilité des modèles au pas de temps de 10 min pour les points A0 à A4 (zone centrale)

$\Delta T = 10\ min$



		BMD 1				BMD 2				Zhang tropicalisé			
		Numéro de séquence				Numéro de séquence				Numéro de séquence			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
A0	Résidu max (lux)	406,44	426,31	431,90	433,35	430,46	428,00	424,94	421,49	485,06	484,89	485,07	484,80
	MBE	-0,07	0,08	1,25	-0,28	0,25	0,26	0,59	1,02	-2,99	-3,02	-2,99	-3,02
	RMSE	26,54	29,22	29,26	29,73	29,00	28,82	28,59	28,44	39,20	39,20	39,20	39,20
	% dans fuseau	48	46	45	47	46	46	46	45	23	22	22	22
A1	Résidu max (lux)	573,11	578,08	575,47	567,87	569,15	569,23	577,58	575,61	617,90	617,91	617,94	617,59
	MBE	0,76	0,25	0,37	1,74	0,48	0,70	-0,27	-0,19	-2,91	-2,91	-2,90	-2,81
	RMSE	36,37	36,75	36,56	36,34	36,18	36,11	36,82	36,83	43,92	43,92	43,92	43,92
	% dans fuseau	35	37	37	37	39	37	36	38	20	20	20	20
A2	Résidu max (lux)	482,44	484,36	501,14	476,54	469,69	470,46	500,12	471,85	582,70	583,43	582,54	582,60
	MBE	0,45	0,27	-0,54	0,55	0,62	0,44	-1,04	0,47	-2,45	-2,34	-2,47	-2,46
	RMSE	28,19	28,38	30,15	27,94	27,64	27,64	30,28	27,73	37,56	37,58	37,56	37,56
	% dans fuseau	46	47	43	46	49	48	39	49	19	18	19	19
A3	Résidu max (lux)	150,29	154,00	149,72	163,70	149,11	151,70	151,87	163,76	199,48	199,45	199,47	199,49
	MBE	-1,49	-0,50	-1,42	0,78	-1,82	-1,89	-0,61	0,21	-0,91	-0,91	-0,91	-0,91
	RMSE	17,64	15,56	17,47	14,58	18,37	18,43	15,19	14,54	17,96	17,96	17,96	17,96
	% dans fuseau	29	40	30	44	25	24	40	45	30	30	30	30
A4	Résidu max (lux)	161,70	168,21	158,36	177,83	162,86	185,17	182,33	185,56	185,73	185,36	185,74	185,50
	MBE	-0,27	0,65	-0,91	-2,04	0,98	-2,69	-2,89	-2,57	-0,44	-0,47	-0,45	-0,49
	RMSE	15,73	15,72	16,70	19,38	14,72	20,86	20,96	20,79	16,62	16,62	16,62	16,63
	% dans fuseau	38	36	36	25	58	19	18	21	29	29	29	29

À la position A2, zone Est de la cellule et proche du diffuseur, le modèle BMD 2, différenciant la diffusion du direct et du diffus, semble sensiblement plus fiable avec une dispersion des erreurs de l'ordre de 27,64 lux. Le modèle BMD 1 est sensiblement moins fiable, mais permet tout de même d'atteindre une présence de 47 % dans le fuseau de tolérance des mesures.

En A4, le modèle BMD 2 semble bien plus performant que BMD 1 et que le modèle de Zhang avec un taux de fiabilité de l'ordre de 58 % contre 38 % pour le premier modèle et 29 % pour le modèle de référence. Les erreurs moyennes et les écarts types des modèles BMD se valent.

La Figure 112 présente le profil de l'éclairement intérieur, mesuré au point A4 (zone centrale), comparé aux résultats du modèle BMD 2. Nous constatons que le modèle semble avoir pris les pics d'éclairement pouvant être associés à l'éclairement direct. Ceci se justifie par le nouveau modèle d'émission que nous avons élaboré en section 1.2 de ce présent chapitre.

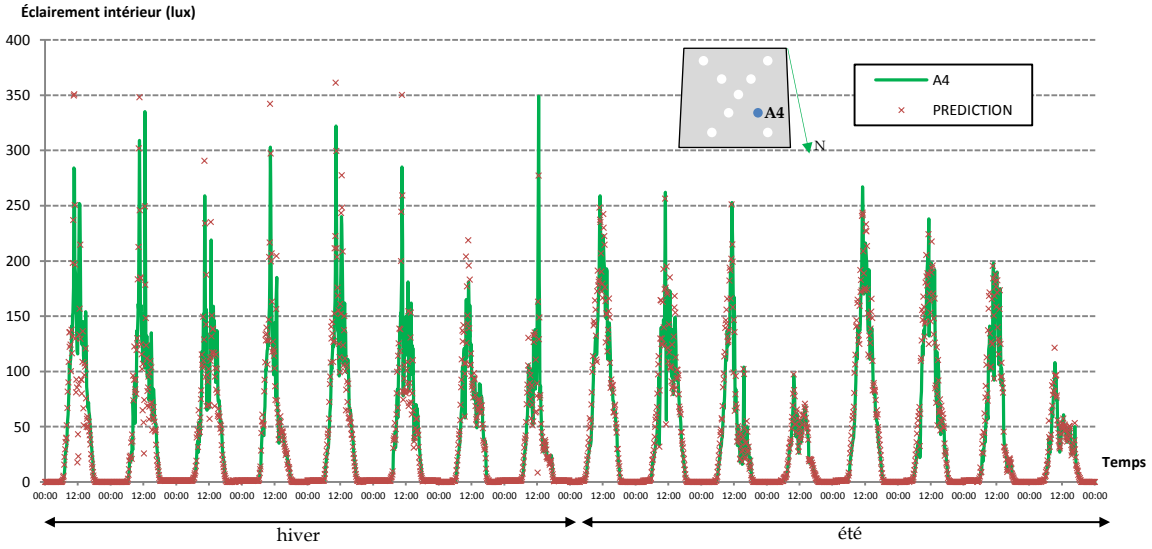


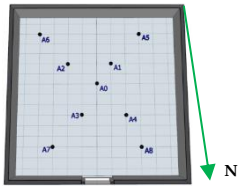
Figure 112 : Comparaison des résultats du modèle BMD 2 par rapport aux mesures en A4 pour la période d'apprentissage

Le Tableau 26 présente les résultats des modèles pour la zone éloignée du diffuseur. Le modèle BMD 1 présente des résultats plus performants que BMD 2 et que le modèle de Zhang.

À l'image du constat fait pour le pas de temps horaire, c'est en A6 et A8 que nous atteignons un taux de fiabilité maximal de 56 % des points prédits dans le fuseau des points mesurés, contre 48% pour le modèle de référence.

Malgré la présence marquée des aléas, le modèle BMD 1 reste le plus souvent fiable même si, dans la globalité, les résidus moyens et les écarts types de chaque modèle sont largement acceptables, ce qui permet de valider en partie les approches considérées. Aussi, nous remarquons que pour la zone centrale, plus sujette à l'impact de l'éclairement direct, le modèle BMD 2, utilisant une forme différente d'émission en fonction de l'éclairement, retranscrit mieux le phénomène que BMD 1. Le constat est différent si l'on s'éloigne du centre. BMD 1 est alors plus fiable.

Tableau 26 : Résultats statistiques sur la fiabilité des modèles au pas de temps de 10 min pour les points A5 à A8 (zone éloignée du centre)



		BMD 1				BMD 2				Zhang tropicalisé			
		Numéro de séquence				Numéro de séquence				Numéro de séquence			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
A5	Résidu max (lux)	407,22	403,50	405,43	403,16	403,74	403,27	403,59	403,78	407,25	407,30	407,25	407,11
	MBE	0,02	0,45	0,42	0,09	0,60	-0,61	-1,01	-0,28	-0,45	-0,44	-0,44	-0,46
	RMSE	23,48	23,24	23,27	23,34	23,48	23,56	23,99	23,41	24,07	24,07	24,07	24,07
	% dans fuseau	42	39	38	37	39	36	31	38	27	27	27	27
A6	Résidu max (lux)	203,79	191,26	190,14	205,04	205,28	193,85	206,91	193,32	242,73	242,35	242,53	242,41
	MBE	-0,32	-1,37	-1,47	-0,37	-1,01	-2,05	-0,50	-2,04	-0,15	-0,19	-0,18	-0,20
	RMSE	14,33	15,55	15,75	14,38	14,96	16,94	14,53	16,93	16,44	16,44	16,44	16,44
	% dans fuseau	51	24	23	51	37	18	47	18	43	43	43	43
A7	Résidu max (lux)	58,00	61,40	75,89	76,30	80,45	76,30	63,29	58,00	61,24	62,18	61,55	61,33
	MBE	-0,83	-0,16	-2,52	-2,51	-2,67	-2,79	-0,64	-1,12	-0,65	-0,66	-0,65	-0,65
	RMSE	8,85	8,77	13,48	13,48	14,11	14,14	8,92	9,01	8,91	8,96	8,90	8,93
	% dans fuseau	43	48	12	13	12	12	48	44	44	43	44	44
A8	Résidu max (lux)	60,75	62,02	54,17	80,66	68,80	56,86	59,17	69,22	55,69	54,75	55,36	56,02
	MBE	0,35	0,31	0,03	-1,95	-1,30	-0,45	-4,94	-4,23	0,04	-0,04	0,03	-0,02
	RMSE	6,72	6,73	6,79	11,87	9,49	7,11	13,60	13,56	6,77	6,78	6,77	6,78
	% dans fuseau	55	56	56	19	30	52	14	15	47	48	48	48

Nous concluons que le conduit de lumière a tendance à diffuser la lumière au sein de la pièce, malgré l'impact notable de l'éclairement direct. En effet, en comparaison à l'éclairement de la zone éclairée par des taches solaires engendrées par une ouverture verticale (supérieur à 10 klux), l'éclairement direct transmis par le conduit n'est que peu supérieur à 1200 lux. Le modèle d'émission associé à BMD 2 ne permet donc pas de constater une amélioration notable des résultats. Ce qui est valable pour ce conduit de lumière, équipé d'un diffuseur prismatique, ne l'est probablement pas pour un dispositif associé à un diffuseur translucide où la forme du modèle BMD 2 serait probablement la plus efficace.

Compte tenu des résultats de notre analyse, et pour être en adéquation avec notre matériel, nous poursuivrons avec le modèle BMD 1 qui utilise le même mode de diffusion pour l'éclairement direct et diffus. Nous le soumettons à notre base de données de validation.

3.4. **Modèles tropicalisés**

Nous récupérons les coefficients ajustés pour le point de mesure A0 (sous diffuseur) du fait de la variabilité importante de son évolution horaire.

3.4.1. Modèle BMD 1

Nous avons constaté en section 3.3.4 que la forme du modèle BMD 1 était statistiquement la plus fiable sur des jours de différents types et de différentes saisons.

L'optimisation effectuée dans la même section, pour le point de mesure sous diffuseur et avec un pas de temps de 10 minutes, a permis d'obtenir les coefficients empiriques suivants pour BMD 1 (Numéro de séquence 1) :

Tableau 27 : Coefficients ajustés du modèle BMD 1

a(1)	a(2)	a(3)	a(4)	a(5)	a(6)	a(7)	a(8)
900	-875,939	0,997	284,115	630,250	783,073	249,267	0,99999

En appliquant ces coefficients à notre modèle, nous obtenons :

$$E_{(x,y,z)} = \left(\tau_{dir\,TDGS}.E_{b,h} + \tau_{diff\,TDGS}.E_{d,h}\right).\frac{\pi.R^2.(\cos\theta_{(x,y,z)})^4}{2\pi.H^2} \quad (187)$$

$$\tau_{diff\,TDGS} = 900.e^{-576.89\,.\,A_p}\,.\,\chi_{skyview}\cdot\chi_{coude_{diff}} \quad (188)$$

$$\chi_{coude_{diff}} = 0{,}00265 \quad (189)$$

$$\tau_{dir\,TDGS} = (284{,}115 + 630{,}250.H_s + 783{,}073.\beta + 249{,}267.H_s.\beta).\rho^{\frac{4.L.\tan v}{\pi.D_{diam}}}.\chi_{coude_{dir}} \quad (190)$$

$$\chi_{coude_{dir}} = 7{,}2133E-07 \quad (191)$$

Nous voyons que la part des facteurs de perte liés au direct et au diffus est faible ($\chi_{coude_{diff}}$ et $\chi_{coude_{dir}}$). Ce constat semble logique puisque le conduit de lumière que nous utilisons est courbe mais ne dispose pas de longueur de courbure : chaque partie est droite, dans son plan. Cette forme de BMD 1 n'est valable que dans la configuration de notre étude et pour notre climat.

3.4.2. Modèle de Zhang tropicalisé

Concernant le modèle de Zhang tropicalisé, l'ajustement des coefficients donne les résultats à la suite, pour un pas de temps de 10 minutes et un ajustement par rapport aux données sous le diffuseur (Numéro de séquence 1) :

Tableau 28 : Coefficients ajustés du modèle Zhang « tropicalisé »

a(1)	a(2)	a(3)	a(4)	a(5)	a(6)	a(7)	a(8)	a(9)	a(10)
900	131,672	-491,383	-16,572	411,188	163,281	29,395	0,082	0,331	2,108

Appliqués à son modèle, nous obtenons la forme suivante :

$$E_{(x,y,z)} = \tau_{TDGS}.E_{G,h}.\frac{R^2.cos(\theta_{(x,y,z)})^{2,108}}{D^2} \quad (192)$$

$$\begin{aligned}&\tau_{TDGS}\\&= (900 + 131{,}672.k_t\\&- 491{,}383.H_s).\rho_{LP}{}^{-16{,}572+\ 411{,}188.A_{pe}\ +\ 163{,}281.cot\ H_s\ +\ 29{,}395.A_{pe}.cot\ H_s}.\chi_{coude_{dir}}\end{aligned} \quad (193)$$

$$\chi_{coude_{dir}} = (1 - \ 0{,}082)^{N_{coude}} \quad (194)$$

$$\tau_{dir\ TDGS} = (284{,}115 + \ 630{,}250.H_s + 783{,}073.\beta\ + 249{,}267.H_s.\beta\ ).\rho^{\frac{4.L\ .\tan\upsilon}{\pi.D_{diam}}}.\ \chi_{coude_{dir}} \quad (195)$$

$$A_{pe} = \frac{L + 0{,}331.L_b}{2R} \quad (196)$$

Nous constatons que le paramètre m décrit comme étant le coefficient a(10) vaut 2,108 tandis que Zhang préconise de prendre 1,3 (Chapitre II, section 1.1.1.2). Les paramètres f_{len} et $f_{loss,courbe}$ du modèle de Zhang valent dans l'étude de l'auteur, 0,65 et 0,20 respectivement. Pour notre étude, nous obtenons :

$$f_{len} = a(9) = 0{,}331 \cong 0{,}33$$

$$f_{loss,courbe} = a(8) = 0{,}082 \cong 0{,}08$$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

3.5. **Validation partielle du modèle tropicalisé**

Nous cherchons à vérifier que les coefficients empiriques, déterminés par l'algorithme génétique en section 3.3.4, offrent des résultats corrects. Pour ce faire, nous effectuons une validation comparative préliminaire sur notre cas de référence pour une journée différente de celles présentent dans la base de données d'apprentissage. Nous choisissons une journée de la période fin hivernale pour un pas de temps de 10 minutes.

La journée du 30 septembre 2014 est une journée de type ciel clair avec un éclairement global extérieur avoisinant les 130 klux. Nous nous intéressons au profil de l'éclairement intérieur sous diffuseur, zone très sujette à l'apparition de taches solaires. Nous constatons, sur la Figure 113, la présence de pics d'éclairement à 11h00 (467 lux), 11h40 (460 lux) et 12h50 (547 lux).

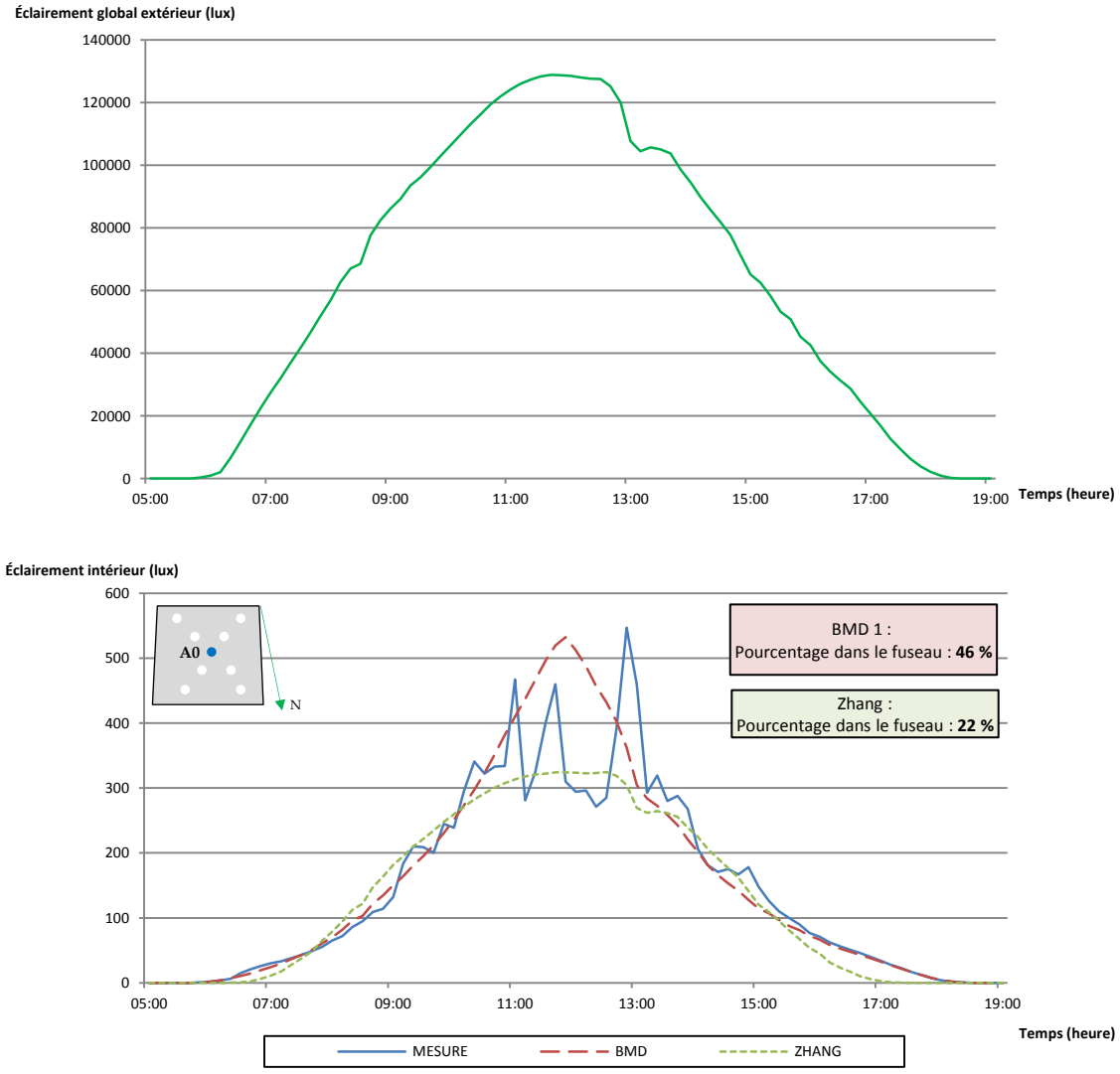


Figure 113 : Comparaison des modèles en ciel clair (ΔT = 10 min)

Ces événements proviennent probablement de taches solaires. Nous remarquons que le modèle BMD 1 suit la tendance générale de l'éclairement mesuré en modelant la courbe de l'éclairement intérieur sur ses maximums. A contrario, le modèle de Zhang sous-estime l'éclairement mesuré, en ajustant sa tendance sur les minimas des éclairements mesurés. Pour cette journée, le modèle de Zhang est fiable à 22 % contre 46 % pour BMD 1. Ces premiers résultats nous permettent d'éprouver cette phase de validation introductive. Nous poursuivrons la validation du modèle développé au chapitre suivant, en le confrontant à plusieurs configurations expérimentales ou numériques.

Nous avons développé notre modèle à partir du cas de référence expérimental, à savoir, la cellule LGI équipée de parois noires. Cette configuration nous a permis de faire abstraction de la part de l'éclairement intérieur réfléchi par les parois. De façon à pouvoir traiter des cas où les parois ne seraient pas sombres, nous proposons à la suite une méthode simplifiée pour évaluer la part de cet éclairement.

4. Intégration d'un modèle simplifié pour la réflexion interne

La méthode proposée à la suite a été intégrée à HEMERA afin d'évaluer, de façon simplifiée, la part de l'éclairement réfléchi par les parois internes de la zone.

Nous souhaitons évaluer la contribution de la réflexion de la lumière sur les parois verticales. Cette approche se limite à l'évaluation de la première réflexion. Ainsi, la réflexion du sol ne sera pas prise en compte, car celui-ci renvoie la lumière vers les parois qui, elles-mêmes, pourraient renvoyer ensuite vers le sol, et dans ce cas nous constaterions une seconde réflexion.

Nous décomposons la méthode en 2 phases :

- **Phase 1** : Réflexion et atténuation du flux lumineux provenant du conduit

Nous disposons du flux lumineux en sortie du conduit.

$$\Phi_{LP,out} = \tau_{TDGS} . \pi . R^2 . E_{G,h} \quad (197)$$

Ce flux lumineux va impacter chacune des parois de l'enceinte et fait intervenir les facteurs de forme entre le diffuseur et les parois. L'hypothèse la plus simple est celle d'une émission par une source ponctuelle, au sein d'une enceinte sphérique (Figure 114). Dans ce cas, le flux va alors se répartir sur les surfaces intérieures, proportionnellement aux surfaces. Pour épurer le modèle, nous allons considérer la cellule constituée de 2 surfaces, d'une part le sol et d'autre part l'ensemble des autres surfaces, comme ci-dessous :

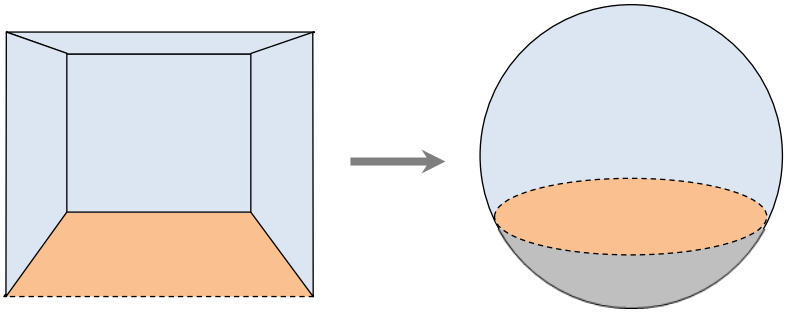


Figure 114 : Approximation sphérique

Cette approximation sphérique permet de calculer simplement les facteurs de forme entre ces parois.

Nous pouvons calculer le coefficient moyen de réflexion des parois verticales (PV) de la zone à partir de la surface et du coefficient de réflexion de chaque paroi.

$$\rho_{PV,moyen} = \frac{\sum \rho_{PV,i} \cdot S_{PV,i}}{S_{PV,tot}} \tag{198}$$

En multipliant ce dernier par le flux lumineux, nous obtenons le flux résultant de la réflexion interne.

$$\Phi_{PV,int} = \rho_{PV,moyen} \cdot \Phi_{LP,out} \tag{199}$$

- **Phase 2 :** Évaluation de la part du flux perçu par le sol

Pour voir son impact sur le plan utile, nous considèrerons que, parmi les surfaces qui reçoivent le flux lumineux réfléchi (sous l'hypothèse que le plafond ne participe pas aux échanges compte tenu de la forme du bulbe isométrique, cf. mesures de SOLATUBE), le sol en reçoit une partie au prorata de la surface totale S_{TOT} (comprenant les parois verticales et le sol). La part de l'éclairement réfléchi interne sur le plan utile (plan au sol) est alors :

$$E_{Reflec,PV} = \Phi_{PV,int} \cdot \frac{S_{sol}}{S_{TOT}} \tag{200}$$

Avec,

$$S_{TOT} = S_{sol} + \sum S_{PV,i} \tag{201}$$

Cette méthode, imparfaite par rapport à celle des radiosités (méthode des exitances), est cependant cohérente pour les coefficients de réflexion faibles, ce qui est le cas pour le scénario expérimental mené.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

5. Synthèse du Chapitre IV

Dans ce quatrième chapitre, l'innovation apportée s'est inscrite sur deux axes : le générateur de modèle, appelé HEMERA, offrant une réponse concrète à la généralisation des modèles semi-empiriques quels qu'ils soient ; la nouvelle forme du modèle physique permettant de prédire le comportement du conduit de lumière avec une précision accrue.

La première section de ce chapitre nous a permis de mieux comprendre les approches physiques employées par les différents auteurs recensées au chapitre II. Sur la base de notre constat expérimental, nous avons pu proposer deux nouvelles formes de modèle basées sur la décomposition de l'éclairement global extérieur en éclairement diffus et direct. Cette différentiation se faisait préalablement en utilisant l'indice de clarté du ciel k_t. À cela, nous avons présenté une nouvelle forme de modèle d'émission en fonction de l'éclairement extérieur : pour de l'éclairement diffus, le modèle utilise une loi de Lambert ; pour l'éclairement direct, nous proposons de prendre en considération l'inclinaison du collecteur (impactant notablement l'accès à l'éclairement directionnel) ainsi que l'angle zénithal et l'azimut solaire.

L'utilisation d'un algorithme d'optimisation, et l'ajustement associé aux données expérimentales ne permet de répondre efficacement qu'à un seul cas d'étude et pour une météorologie donnée. Nous avons cherché à généraliser le protocole de génération du modèle semi-empirique, assurant une efficacité accrue dans l'approche modélisatrice du comportement du conduit de lumière. Cette volonté a donné naissance à HEMERA. Il associe les capacités d'un code de calcul en éclairagisme à la force des algorithmes génétiques lui conférant la capacité d'ajuster par optimisation des paramètres d'un modèle semi-empirique, ou plus simplement d'utiliser des modèles de la bibliographie. Nous y avons intégré les modèles développés dans le cadre de ces travaux.

Souhaitant évaluer le niveau de précision des formes de nos équations, tant sur leurs capacités à converger rapidement vers les valeurs mesurées qu'à appréhender les variations spatio-temporelles, nous avons proposé une nouvelle méthodologie. Il s'agit d'utiliser l'algorithme génétique dans un objectif d'ajustement, et non d'optimisation à proprement dit, en comparant les formes que nous avons développées à la forme du modèle de Zhang ajustée à nos données. De cette façon, l'outil cherche à associer des valeurs aux coefficients empiriques de chaque modèle, en ayant les mêmes paramètres d'optimisation. En recherchant la forme la mieux adaptée, nous démontrons l'efficacité d'HEMERA et l'innovation qu'il offre dans la génération de modèles. Nous nous sommes basés sur une période de mesure correspondante à l'intersaison hiver/été. Les résultats associés en sont évidemment impactés au vu de la saisonnalité de l'éclairement à l'île de La Réunion. Cependant, cela permet d'apporter une information sur la qualité de l'outil développé et du modèle associé.

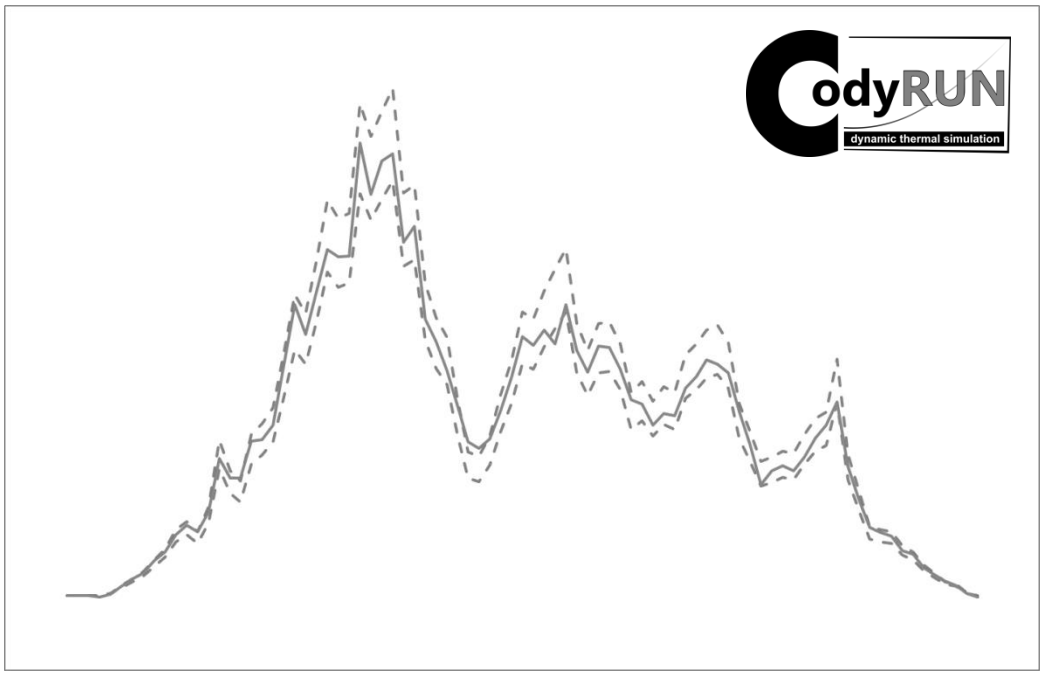
Au final, nous avons identifié la forme du modèle la plus statistiquement fiable pour notre cas d'étude. Celle-ci démontre que nos choix d'amélioration permettent d'accroître considérablement la précision de la prédiction du comportement du conduit de lumière en comparaison au modèle de référence (Zhang « tropicalisé »). Le modèle utilisant deux approches pour décrire l'émission au sein de la pièce n'a pas été le plus fiable, même si les résultats associés ont été très proches du modèle choisi. Nous préconisons l'utilisation de ce modèle dans le cas de diffuseurs translucides où l'éclairement direct aurait un impact plus important.

Les conclusions de notre première validation permettent de dire que notre modèle semble plus fiable que le modèle de Zhang, et ce, avec moins de paramètres à optimiser que la référence.

Notre ajustement par optimisation a utilisé une séquence expérimentale dont les parois de la cellule étaient noires. Nous avons considéré que la composante réfléchie interne pouvait être négligée, la mesure relevant uniquement la contribution du conduit de lumière. Afin de comptabiliser cette réflexion interne, nous avons développé une approche simplifiée permettant de prendre en considération l'éclairement réfléchi par les parois verticales intérieures et perçu par le plan utile.

À l'issue de ce quatrième chapitre, nous présentons la validation photométrique globale de notre modèle intégré au code de calcul CODYRUN, élaboré au sein du laboratoire capitalisant les travaux de recherches de plus de vingt ans. Sur la base d'une méthodologie élaborée au sein de l'équipe de recherche, et conformément aux validations rencontrées dans la bibliographie, nous chercherons à approuver notre modèle.

Validation photométrique globale & Application



« La lumière montre l'ombre et la vérité le mystère. »

Proverbe latin médiéval

Résumé du Chapitre **V**

Nous nous intéressons maintenant aux prédictions du modèle développé présenté dans le chapitre IV et intégré au code de calcul CODYRUN. L'objectif est d'évaluer la méthodologie élaborée en déterminant la validité des résultats de simulation, en fonction de critères d'évaluation donnés. Nous verrons que cet objectif nécessite une démarche scientifique adaptée, basée sur les travaux de la communauté scientifique en matière de validation globale, i.e. du code de calcul et du modèle.

À ce titre, nous présentons les différentes méthodes de validation des modèles de prédiction utilisées dans la littérature.

La validation habituelle reste la validation expérimentale où la prédiction des modèles est comparée aux valeurs mesurées sur site ou en laboratoire. La validation à l'aide d'outils de simulation offre couramment des possibilités en analyse comparative interlogicielle. Une troisième forme de validation est la validation intermodèle par le biais d'outils statistiques. Nous appliquons ces trois approches à notre problématique.

Nous achèverons ce chapitre sur une partie applicative. Dans ce cadre, nous utiliserons le modèle établi et validé afin de déterminer une équivalence lumineuse entre le dispositif de lumière naturelle et des systèmes artificiels fréquemment installés dans les bâtiments. Nous évaluerons également le potentiel de sauvegarde énergétique engendré par l'utilisation des conduits de lumière naturelle.

1. Validation photométrique globale

Dans cette section, nous proposons une démarche de validation du modèle développé et intégré au code de calcul CODYRUN. Cette procédure s'inspire de la démarche générale de validation appliquée au sein de l'équipe (Miranville 2002; Bigot 2011; Guichard 2013) et de la méthodologie appliquée à la problématique de la photométrie par Fakra (Fakra 2009). Nous compléterons notre démarche en relevant ce qui a été utilisé dans la littérature.

1.1. **Démarche du groupe thématique PhyBÂT**

En 2002, Miranville a appliqué une procédure de validation au code de calcul ISOLAB spécialisé dans l'analyse des phénomènes thermiques appliqués aux enveloppes (reprise dans la thèse de Guichard (Guichard 2013)). Celle-ci consistait en la vérification de l'implémentation du code de calcul et de l'évaluation de la cohérence des prédictions du modèle global selon des critères prédéfinis. À ceci s'ajoute la concordance des résultats lors de la comparaison avec les données expérimentales. Ces différentes étapes sont également utilisées par d'autres équipes de recherches afin de valider la convergence des différentes méthodes utilisées. Elles se synthétisent notamment par l'application de la démarche menée par le N.R.E.L.[27] aux États-Unis décomposée en trois parties :

- Vérification analytique ;
- Comparaison interlogicielle ;
- Validation expérimentale.

L'approche relevée par Bigot (Bigot 2011) est sensiblement différente, car elle s'intéresse à la validation d'un modèle numérique et non d'un code de calcul. Celle-ci inclut les deux étapes suivantes :

- La confrontation à d'autres modèles numériques déjà validés ;
- La confrontation à des données expérimentales en environnement contrôlé ou réel.

En 2009, Fakra a cherché à valider l'intégration du module photométrique du code de calcul CODYRUN. Il a appliqué une procédure s'appuyant principalement sur des recommandations émises par (Maamari 2004), mais aussi sur différents travaux issus de plusieurs laboratoires de recherche ou organismes scientifiques de par le monde. Il a donc comparé les résultats du logiciel à partir :

- de cas tests avec références analytiques ;
- de résultats d'autres codes de calcul déjà validés (comparaison interlogicielle) ;
- de cas tests avec références expérimentales.

[27] *National Renewable Energy Laboratory*

1.2. **Procédure de validation appliquée au conduit de lumière dans la littérature**

La littérature révèle que les modèles des conduits de lumière ont été validés essentiellement par le biais d'analyses comparatives expérimentales utilisant les outils statistiques comme référence.

L'analyse comparative intermodèle semble moins utilisée. La comparaison interlogicielle n'a pas été utilisée dans l'objectif de valider les modèles développés, mais de comprendre le comportement des DGLT.

1.2.1. Bilan de la littérature sur la validation expérimentale

Dans sa thèse, Zhang (Zhang 2002) valide le modèle DPF à l'aide de comparaisons avec des données expérimentales, en confrontant les valeurs d'éclairement fournies par le modèle et les mesures effectuées dans une cellule expérimentale à Merchiston (Royaume-Uni). Les outils statistiques MBE (*Mean Bias Error*), RMSE (*Root Mean Square Error*) et PAD (*Percentage Average Deviation*) ont été utilisés pour comparer les données. Plus de 22 270 points de mesure ont été relevés dans cette pièce pour des conduits droits dans 7 configurations sous tous types de ciel. Ces configurations sont les suivantes :

- Case 1: Conduit de lumière de 21 cm de diamètre et 0,60 m de longueur ;
- Case 2: Conduit de lumière de 21 cm de diamètre et 1,20 m de longueur ;
- Case 3: Conduit de lumière de 33 cm de diamètre et 0,60 m de longueur ;
- Case 4: Conduit de lumière de 33 cm de diamètre et 1,20 m de longueur ;
- Case 5: Conduit de lumière de 45 cm de diamètre et 0,60 m de longueur ;
- Case 6: Conduit de lumière de 45 cm de diamètre et 1,20 m de longueur ;
- Case 7 : Conduit de lumière de 53 cm de diamètre et 0,60 m de longueur.

Le modèle de Zhang utilise l'éclairement global extérieur, les données ont donc été divisées en deux groupes en fonction de l'indice de clarté du ciel k_t :

- Cas où $k_t > 0{,}2$: évaluation du modèle DPF en ciel non couvert ;
- Cas où $k_t \leq 0{,}2$: évaluation du modèle DPF en ciel couvert.

La multitude des configurations testées offre une base de données intéressante pour comprendre l'impact du rapport des dimensions du conduit de lumière sur l'éclairement à l'intérieur de la zone d'étude. Zhang a validé son approche en ciel couvert puis en ciel clair.

En 2005, Jenkins (Jenkins, Muneer, and Kubie 2005) applique la même méthodologie que Zhang en comparant les résultats de son modèle à une séquence choisie dans ses données expérimentales (2 jours), pour une configuration particulière (conduit courbe de diamètre 53 cm et de 1,20 m de longueur).

En 2012, Su (Su et al. 2012) présente son étude expérimentale sur plusieurs tailles commerciales de conduits de lumière montés sur un toit incliné. L'objectif de son étude est de comparer simultanément les performances des conduits de différentes géométries et de fournir des données pour établir une équation de prédiction des performances. La boîte élaborée par le BRE (P. Littlefair and Ticleanu 2012) est utilisée ici pour évaluer l'éclairement des conduits sous des conditions de ciel réelles (Figure 115).

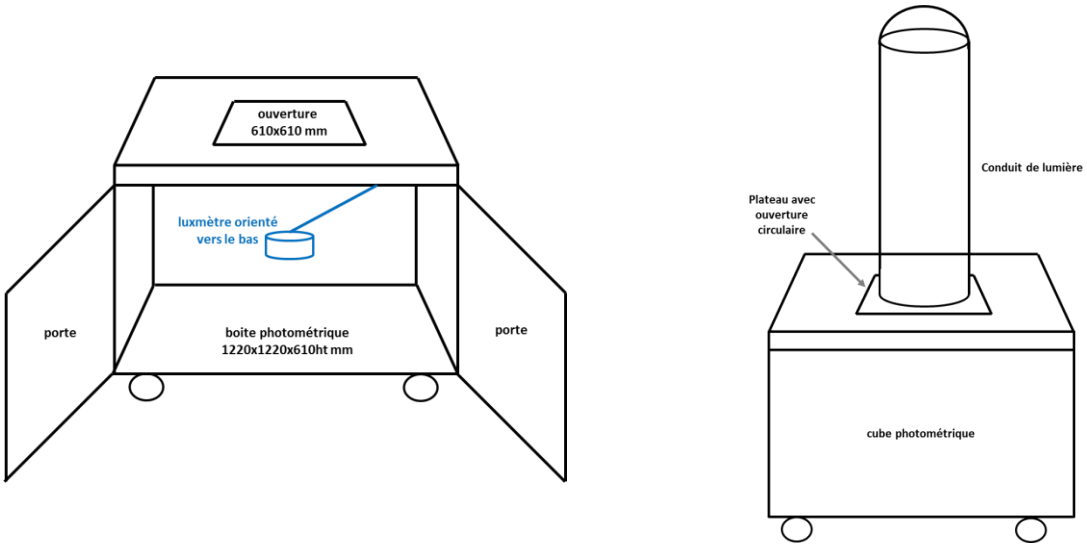


Figure 115 : Schéma de la boite photométrique
(Littlefair and Ticleanu 2012)

Quatre types de conduit sont utilisés ici : un conduit droit de diamètre 53 cm, un conduit courbe de même diamètre (avec entrée inclinée), un conduit courbe de 45 cm de diamètre et un autre conduit courbe de 23 cm de diamètre (Figure 116).

Figure 116 : Expérimentation de Su
(Su et al. 2012)

Le détail de l'expérimentation est fourni dans sa publication (Su et al. 2012). Les résultats sont fournis sous forme de graphiques exprimant l'éclairement extérieur en fonction du flux lumineux intérieur. Il est important de noter qu'à l'aide de son expérimentation, Su peut constater les performances du conduit de lumière, mais ne peut pas analyser la distribution lumineuse au sein d'un espace plus grand.

Su utilise ces valeurs afin d'ajuster les coefficients empiriques de son modèle par le biais d'une régression. Il valide son modèle en garantissant la présence des données prédites dans un fuseau de tolérance de ±20% des valeurs mesurées.

La même année, Shin (Shin, Yun, and Tai Kim 2011; Shin, Yun, and Kim 2012) étudie et mesure les performances de conduits de lumière en conditions climatiques coréenne. Ces données lui permettent de valider le modèle alors développé.

1.2.2. Bilan de la littérature sur la validation comparative intermodèle

En 2005, Jenkins (Jenkins et al. 2005) présente son modèle de prédiction et le compare au modèle de Zhang. Il conclut que les deux modèles offrent des performances raisonnablement acceptables par rapport aux différentes données expérimentales.

En 2012, Shin (Shin et al. 2012) compare ses données expérimentales et les résultats de son modèle aux modèles de Zhang, de Jenkins et de Yun et Kim sur la base du MBE et du RMSE.

1.3. **Bilan sur la méthodologie à utiliser**

Globalement, nous avons constaté que les modèles associés aux conduits de lumière ont été validés sur la base d'une comparaison avec des données expérimentales obtenues dans les zones géographiques où les coefficients (associés aux modèles) ont été ajustés. Certains auteurs ont également comparé les résultats de leur approche à d'autres, pour des zones géographiques différentes, mais des conditions d'ensoleillement proches (Royaume-Uni, Corée du Sud).

Nous choisissons de coupler la démarche de notre équipe de recherche à celle de la littérature, nous validerons alors notre modèle selon les trois étapes suivantes :

- Validation comparative expérimentale ;
- Validation comparative intermodèle ;
- Validation comparative interlogicielle.

Notre modèle semi-empirique, valable pour notre configuration d'étude est intégré à CODYRUN, code de calcul développé au sein du laboratoire. L'intérêt est de placer notre modèle de conduit de lumière dans un environnement permettant de le coupler avec d'autres sources (éclairement naturel par rapport aux vitrages, éclairage artificiel, …) ainsi que d'autres phénomènes (thermique, besoins en climatisations, masques solaires, …).

2. CODYRUN : intégration du modèle dans un environnement dédié

2.1. **Présentation de COde de calcul en régime DYnamique Réunion (CODYRUN)**

À l'origine, CODYRUN était un logiciel de simulation numérique en thermique du bâtiment (Boyer 1993). Ses multiples utilisations dans le domaine d'étude du confort thermique et de la consommation énergétique en ont fait un outil à la fois de recherches avancées et d'applications apprécié à La Réunion. En effet, de par sa simplicité d'utilisation, divers bureaux d'études et architectes l'utilisent pour ses modèles en thermique, aéraulique et hydrique issus de nombreux travaux de thèse et de publication (Adelard et al. 2000; Adelard et al. 1998; Boyer et al. 1999; Lucas et al. 2002; Lauret et al. 2001; Lauret et al. 2005; Fakra, Boyer, et al. 2011b; Boyer et al. 1996; Boyer et al. 1998; Fakra, Miranville, et al. 2011). En 2000, CODYRUN (Soubdhan et al. 2000) a passé la procédure IEA BESTEST Task 12 (cas monozones, séries 600 et 900). La procédure prévoit plus d'une centaine de simulations et sur les cas traités, le code de calcul affichait des résultats compatibles avec la majorité des programmes de référence, excepté pour quelques-uns ayant permis de corriger des erreurs. D'autres benchmarks de l'IEA ont aussi été passés (aéraulique, …).

En 2009, un travail de thèse, réalisé par Fakra (Fakra et al. 2011), a été l'occasion de compléter ce logiciel en y intégrant un outil de simulation d'éclairement naturel et d'éclairage artificiel intérieur. Basée sur une combinaison de modèles simplifiés, la plateforme « éclairage » a permis à CODYRUN de faire un nouveau bond en avant lui permettant d'appréhender de nouveaux problèmes en physique du bâtiment). Le travail initié par Fakra consistait en la mise en place de l'algorithme de calcul permettant de prédire l'éclairement naturel au sein d'un local provenant d'une ouverture verticale sur un plan utile horizontal, mais également de l'éclairage artificiel assimilé à une source ponctuelle. Les résultats fournis sont plus que corrects, même si ces limitations ne permettent pas d'établir l'impact de solutions techniques ou architecturales complexes.

Notons que CODYRUN a été l'outil d'aide à la conception utilisé pour mettre en place le label ECODOM (Garde et al. 1998; Garde et al. 2000). Ce label permettait de faire un transfert de connaissance vers les milieux professionnels, en établissant des prescriptions destinées aux concepteurs. Celles-ci permettaient d'éviter la climatisation artificielle (usuellement à l'aide de climatiseurs individuels) et les dérives énergétiques dans l'habitat, tout en apportant un confort thermique optimal. Ce label définissait les grandes lignes de la climatisation naturelle (i.e. bioclimatisation) basée sur la ventilation naturelle, l'isolation et sur l'optimisation des protections solaires.

2.2. **Aspect multi-modèles de l'application**

CODYRUN contient une bibliothèque de modèles élémentaires interchangeables. Pour assurer un bon compromis entre précision et temps de calcul, le logiciel permet, pour certains des phénomènes (ou systèmes), une application sélective des modèles. Cette démarche sera poursuivie dans le cadre des études sur les conduits de lumière.

Concernant la description d'un bâtiment, elle se fait au travers d'éléments classiques : le bâtiment, les zones, les séparations entre zones (nommées interambiances) et enfin les composants. La Figure 117 ci-dessous illustre les informations principales de la description d'un bâtiment.

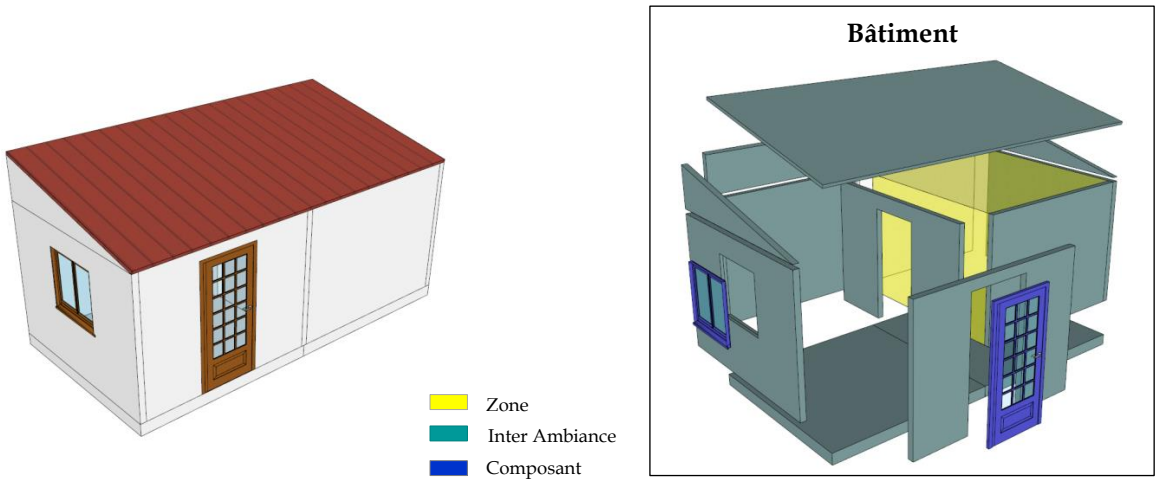


Figure 117 : Décomposition du bâtiment sous CODYRUN

Les sections à la suite permettent de rappeler ce qui a été fait au sein de CODYRUN avant l'intégration des conduits de lumière.

2.2.1. Éclairement naturel par un vitrage vertical

L'éclairement naturel par le biais d'un vitrage nécessite la prise en compte de l'éclairement diffus provenant de la voûte céleste, de l'éclairement direct (qui engendre les taches solaires) et l'éclairement diffus liés à la réflexion de la tache solaire.

L'éclairement diffus est calculé à partir de la méthode « Split flux » élaborée par le BRE[28] (BRE 1986) et publiée par la CIBSE (CIBSE 1987). Elle se base sur la détermination des trois composantes du Facteur de Lumière du Jour (FLJ) : la composante due à l'éclairement provenant directement du ciel par ciel couvert, la composante provenant des obstacles extérieurs et la composante due à la quantité de lumière naturelle réfléchie par les parois intérieures du local (Figure 118).

[28] *Building Research Establishment*

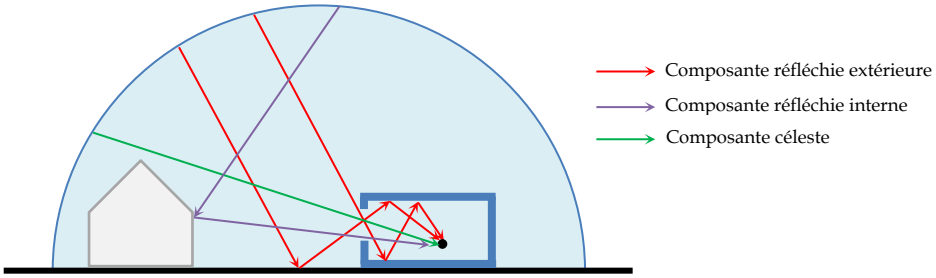


Figure 118 : Schématisation de la méthode « Split flux »

L'éclairement direct consiste à calculer l'impact de la tache solaire dans le local. La méthode s'apparente à du lancer de rayon : le plan utile est décomposé en une multitude de points qui sont éclairés ou éteints en fonction de la projection de la droite ayant pour vecteur directeur le rayon solaire direct passant par le vitrage. Ainsi, l'algorithme de détermination de la tache solaire cherche s'il existe un chemin direct (ne rencontrant pas de parois opaques) entre la source (Soleil) et le point considéré du plan utile.

S'il y a tache solaire, l'éclairement diffus lié à la réflexion de celle –ci au sein de la pièce consiste à utiliser le coefficient de réflexion du plancher et estimer l'impact global sur le plan utile (PU) de cet éclairement diffus (Figure 119).

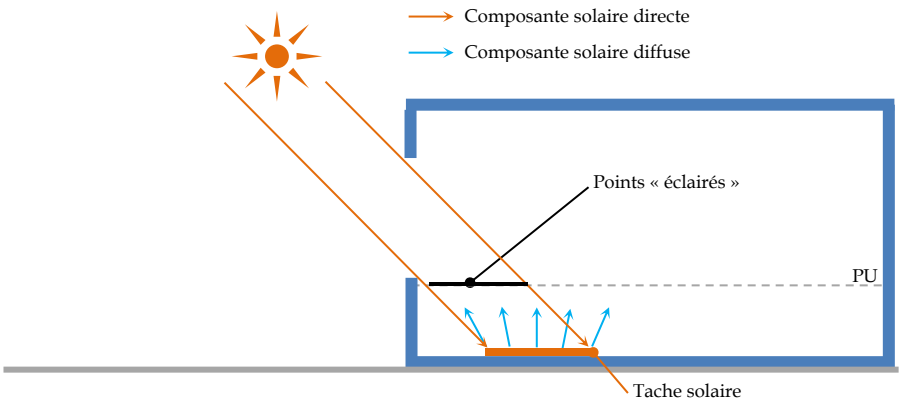


Figure 119 : Schématisation de la prise en compte de l'éclairement direct

2.2.2. Éclairage artificiel

Le module « éclairage artificiel » permet de simuler une source lumineuse ponctuelle. À partir de l'intensité lumineuse maximale de la source (en Candela ou Cd), nous pouvons déterminer l'intensité en n'importe quel point P du local et donc déduire la composante directe en un point donné (Figure 120).

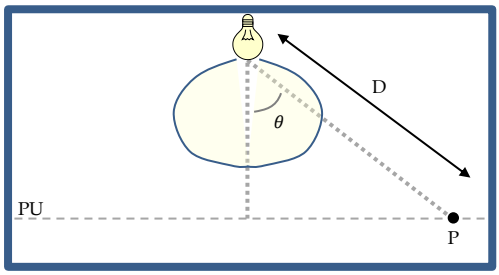


Figure 120 : Schématisation de la prise en compte de l'éclairage artificiel

Pour ce qui est de la composante diffuse de l'éclairage, la méthode se base sur le coefficient moyen des parois intérieures pour évaluer l'impact des interréflexions intérieures. L'éclairement global est alors la somme des deux éclairements diffus et direct (Figure 121).

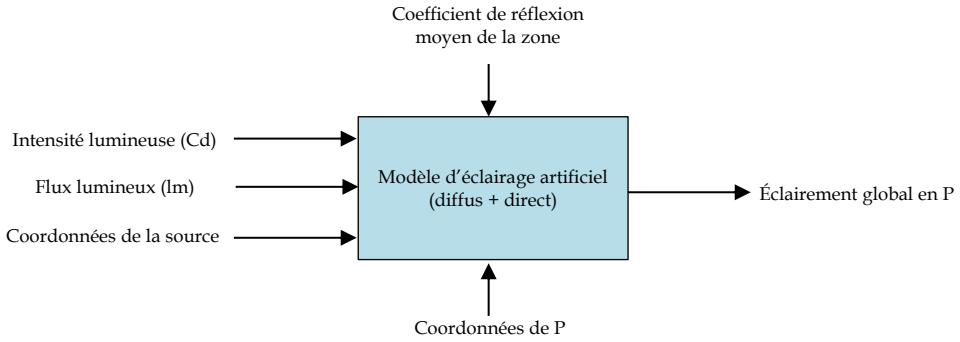


Figure 121 : Modélisation de l'éclairage artificiel
(Fakra 2009)

2.2.3. Validation des modèles existants

Fakra (Fakra 2009) a également validé les modèles d'éclairement naturel et d'éclairage artificiel en utilisant une méthodologie s'appuyant principalement sur des recommandations émises par Maamari (Maamari 2004). Il s'est également inspiré des différents travaux issus de plusieurs laboratoires de recherche ou organismes scientifiques de par le monde.

Ses conclusions permettent, sur les cas tests analytiques modélisés avec CODYRUN, de donner une idée de la fiabilité du logiciel à simuler non seulement l'éclairage (naturel et artificiel) intérieur, mais aussi le gisement solaire à la Réunion via des constantes d'efficacité lumineuse. La phase suivante a été de positionner CODYRUN par rapport aux codes de calcul existants. En effectuant une comparaison interlogicielle, Fakra montra que ce logiciel offre des résultats de simulation compris dans la plage des valeurs fournies par d'autres programmes (RADIANCE, GENELUX, BuilOpt, SUPERLITE). La validation s'est poursuivie en utilisant des cas tests expérimentaux. Les résultats de comparaison simulation / mesures ont montré que, dans l'ensemble, CODYRUN simulait de manière cohérente le profil sur un plan utile de l'éclairement naturel et artificiel intérieur.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2.2.4. Intégration des conduits de lumière à CODYRUN

2.2.4.1. Définition d'un nouveau composant

Dans le cadre de ces travaux de recherche, nous avons ajouté le composant « Light pipe » aux types de composants déjà proposés dans CODYRUN. Une fenêtre spécifique y a été associée afin de paramétrer le dispositif au sein de la zone (Figure 122). À la différence d'HEMERA, CODYRUN permet de traiter des cas comprenant plusieurs zones, éventuellement équipées d'un à plusieurs conduits de lumière. De plus, pour chaque dispositif, le code de calcul permet de choisir un modèle de calcul associé, parmi les modèles intégrés.

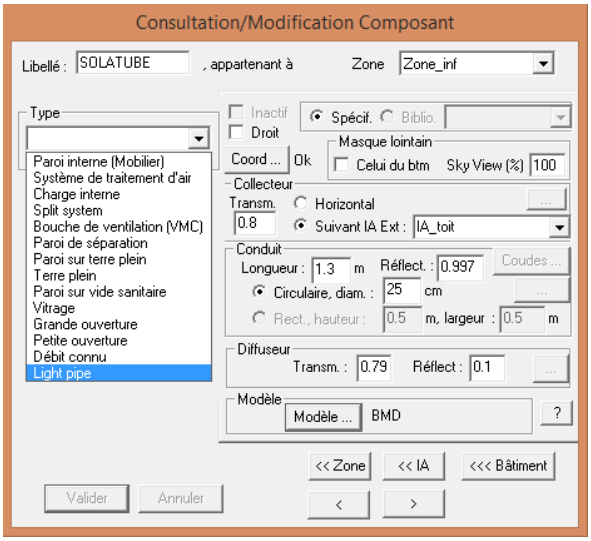


Figure 122 : Fenêtre de configuration du conduit de lumière sous CODYRUN

Les champs de saisie sont ceux de la zone d'appartenance (la pièce où est localisé le diffuseur) et de ceux des éléments constitutifs du conduit de lumière, à savoir le collecteur, le conduit et le diffuseur.

2.2.4.2. Approche multimodèle

Tout comme HEMERA, CODYRUN permet de choisir le modèle de calcul des conduits de lumière. Son architecture lui confère la possibilité d'associer à un conduit un modèle. Ces approches sont regroupées en trois catégories : les approches linéaires, semi-empiriques et théoriques. Pour le moment, nous ne nous intéresserons qu'aux méthodes semi-empiriques (Figure 123).

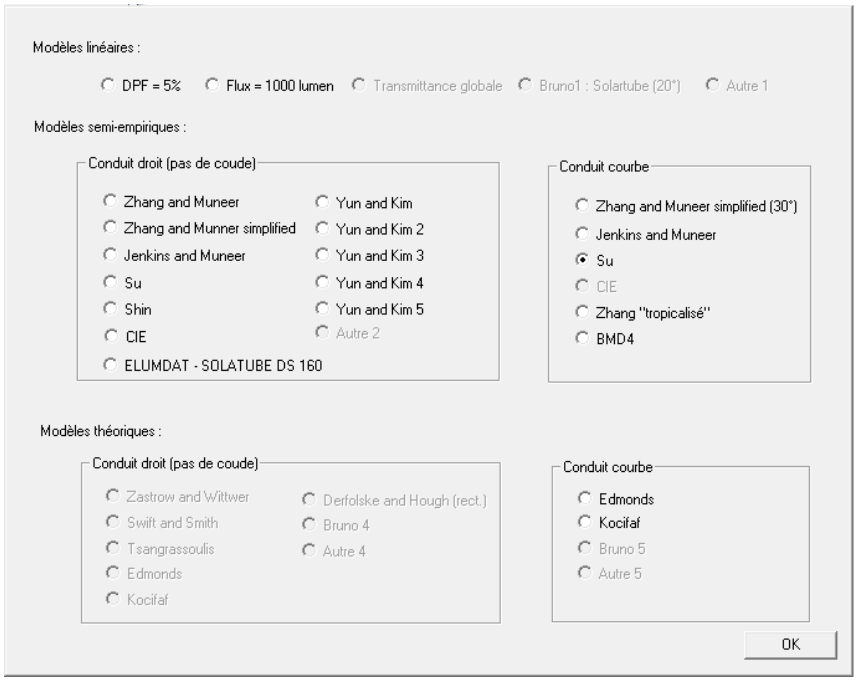


Figure 123 : Fenêtre de choix du modèle de calcul pour les conduits de lumière sous CODYRUN

Les modèles dont il a été question dans les chapitres précédents sont sélectionnables (sauf ceux grisés, non codés à ce jour).

Parmi les modèles intégrés, celui nommé « ELUMDAT - SOLATUBE DS 160 » utilise les résultats des mesures effectuées par SOLATUBE aux Pays-Bas pour approcher la forme du bulbe d'intensité lumineuse engendrée par un conduit de lumière de référence SOLATUBE DS 160 droit. À la différence de l'utilisation classique du fichier isométrique, CODYRUN se base sur la forme de la distribution de l'éclairement. Une description plus complète est réalisée en section 5.1.1 de ce chapitre.

Associé à ces modèles de calcul de l'éclairement incident dû au conduit de lumière, CODYRUN permet de calculer les éclairements internes réfléchis par les parois de la zone d'étude en utilisant la méthode modifiée (et simplifiée) des radiosités appliquée à la problématique de la photométrie (Boyer et al. 2012).

2.2.4.3. Prise en compte des masques environnants

CODYRUN permet de prendre en compte l'impact des masques environnants sur l'éclairement diffus extérieur, mais aussi sur l'éclairement direct extérieur.

Pour l'éclairement diffus, tout comme HEMERA, il applique le facteur $\chi_{skyview}$ au calcul du facteur de transmission du DGLT.

Pour l'éclairement direct, il calcule la trajectoire des rayons émanant directement du soleil. Si ce rayon rencontre le masque, le collecteur du conduit ne reçoit pas d'éclairement direct. Les masques lointains sont définis par 36 hauteurs angulaires (de 0 à 90°) dans 36 secteurs et l'effet

du masque est obtenu en comparant, dans le secteur occupé par le soleil (A_s), la hauteur solaire H_s et celle du masque.

Pour déterminer la hauteur angulaire des masques présents dans le champ de vision du conduit de lumière utilisé dans notre expérimentation, nous utiliserons la photographie prise par le TSI[29], présentée en Chapitre III (section 2.3.2). Un masque ayant un impact total doit présenter une hauteur angulaire de 90°. Nous pouvons déduire la hauteur du masque « i » :

$$H_{masque,i} = \frac{R_{masque,i} \cdot 90}{R_{masque,max}} \tag{202}$$

Si nous appliquons cette méthode à notre cas, nous obtenons l'ensemble des hauteurs angulaires des masques environnants (Figure 124).

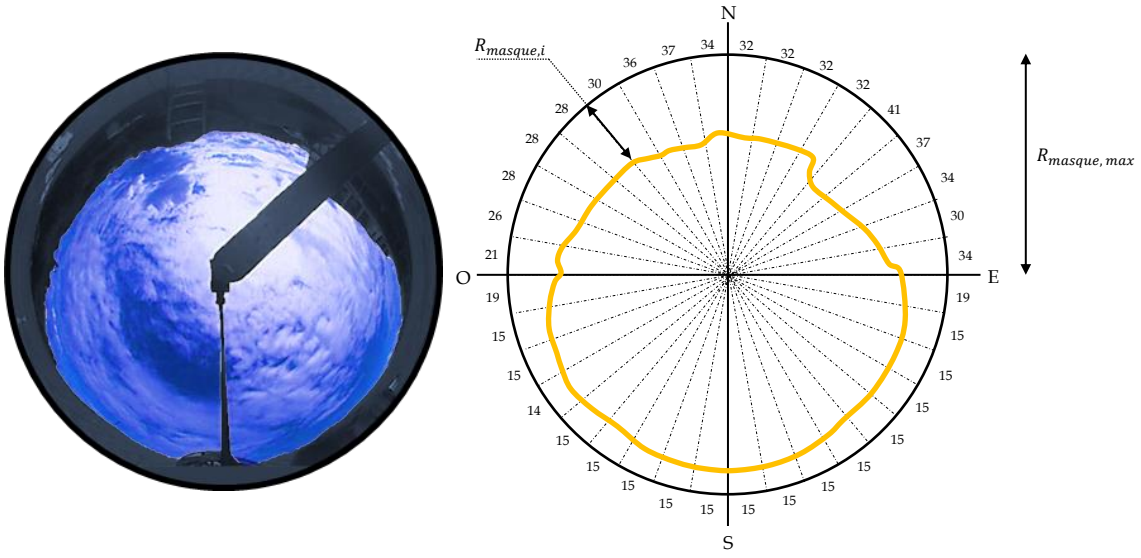


Figure 124 : Caractérisation des masques environnants du conduit étudié selon leurs hauteurs angulaires

Sous CODYRUN, la fenêtre « Masque lointain » permet d'intégrer le profil calculé préalablement. La Figure 125 illustre la prise en compte de l'environnement de notre conduit de lumière.

[29] *Total Sky Imager*

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

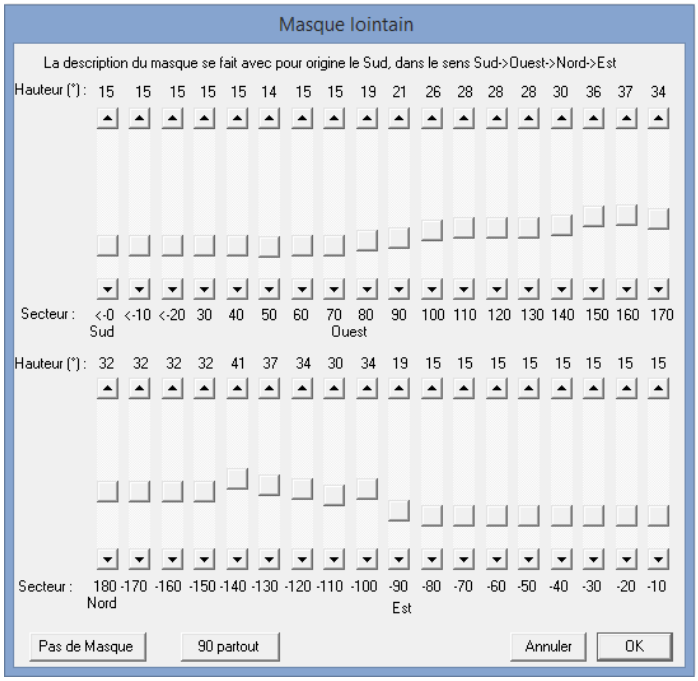


Figure 125 : Configuration des masques environnants sous CODYRUN

2.2.5. Validation de l'intégration du modèle à CODYRUN

Le modèle BMD (appelé « BMD 1 »), développé au chapitre précédent, a été tout d'abord intégré à CODYRUN. Nous cherchons à valider son intégration en comparant les résultats d'HEMERA à ceux de CODYRUN. L'équation étant la même, nous devrions obtenir des résultats similaires.

La configuration utilisée est celle utilisée en section 3.2 du chapitre IV, i.e. la cellule LGI équipée d'un conduit de lumière SOLATUBE courbe de diamètre 25 cm et de longueur totale 1,26 m. Le collecteur est incliné à 20° (pente de la toiture) et l'azimut est de 171° (écart de 9° par rapport au Nord, l'azimut résultant est de 171°). Les parois de la cellule sont noires, dont le coefficient de réflexion est estimé à 0,05.

La période de simulation correspond aux journées du 27 et 28 novembre 2014 pour lesquelles les conditions d'éclairement extérieur sont représentées en Figure 126. La première journée est de type intermédiaire, et la seconde est un ciel clair.

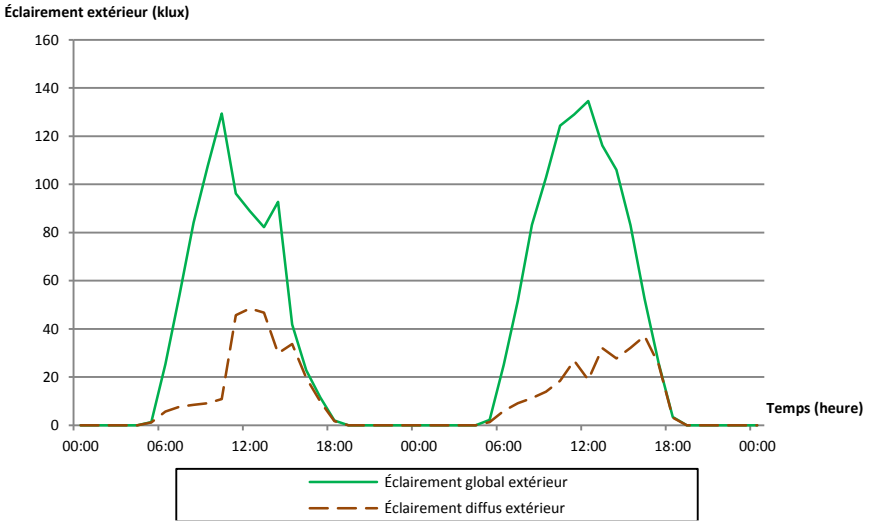


Figure 126 : Éclairements extérieurs globaux et diffus du 27/11/2014 et 28/11/2014

Après simulation, nous obtenons les résultats présentés en Figure 127. Nous constatons que CODYRUN présente exactement les mêmes résultats que notre code de calcul HEMERA. Cette corroboration nous permet d'assurer la concordance des résultats entre le code de développement de notre modèle et le code utilisé pour la validation.

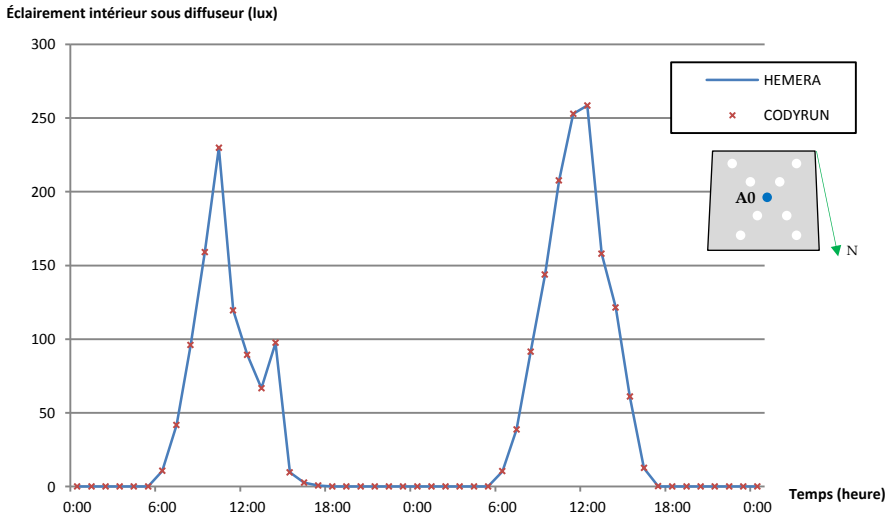


Figure 127 : Comparaison des résultats d'HEMERA et de CODYRUN pour les 27/11/2014 et 28/11/2014 (ΔT=60 min)

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

3. Validation comparative intermodèle

3.1. **Modèles semi-empiriques comparables**

Au chapitre II, nous avons recensé dans la littérature plusieurs modèles permettant de prédire le comportement des DGLT-R. Nous les avons distingués selon leur nature théorique, semi-empirique ou linéaire. Pour être conformes à une approche rigoureuse, nous allons confronter les modèles semi-empiriques entre eux, afin de valider l'approche que nous avons développée. Le modèle BMD étant ajusté pour un conduit courbe, nous le comparerons aux modèles de la littérature adaptés aux mêmes cas, à savoir :

- Modèle de Zhang (équation (14)) ;
- Modèle de Su (équation (40)) ;
- Modèle du CIE (équation (96)) ;
- Modèle de Jenkins (équation (25)) ;
- Modèle de Zhang « tropicalisé » (équation (195)).

3.2. **Analyse comparative intermodèle**

3.2.1. Cellule LGI

3.2.1.1. Description du cas

Nous confrontons nos modèles à partir de notre cas de référence, référencé comme « Cas N°1 » dans le chapitre III. Pour rappel, le bâtiment d'étude est la cellule LGI dont les faces intérieures sont noires (Figure 128).

L'indice du local (RI[30]) de la cellule est de 0,68 (calculé à partir de l'équation (97) de la section 1.3 du chapitre II), ce qui engendre un facteur d'utilisation de l'ordre de 0,304 (déduit à partir du Tableau 6 de la section 1.3 du chapitre II). La transmittance du collecteur est de 0,80, et celle du diffuseur est de 0,79 selon les mesures du CSTB (CSTB 2011).

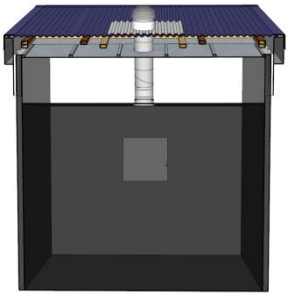


Figure 128 : Cas test N°1 : Cellule LGI avec parois noires

[30] *Room Index*

Nous comparons les différents modèles à partir de nos mesures afin d'avoir une information quant à la fiabilité des approches. Compte tenu de la configuration expérimentale retenue (parois noires), de l'absence d'information sur le traitement de la composante réfléchie par les autres modèles, pour cette partie, le modèle de calcul de l'éclairement réfléchi est désactivé.

3.2.1.2. Résultats associés au pas de temps horaire

Nous comparons nos modèles sur des jours de la période estivale (journée du 28 novembre, 29 novembre, 1er décembre et 2 décembre 2014) pour un pas de temps horaire (Figure 129).

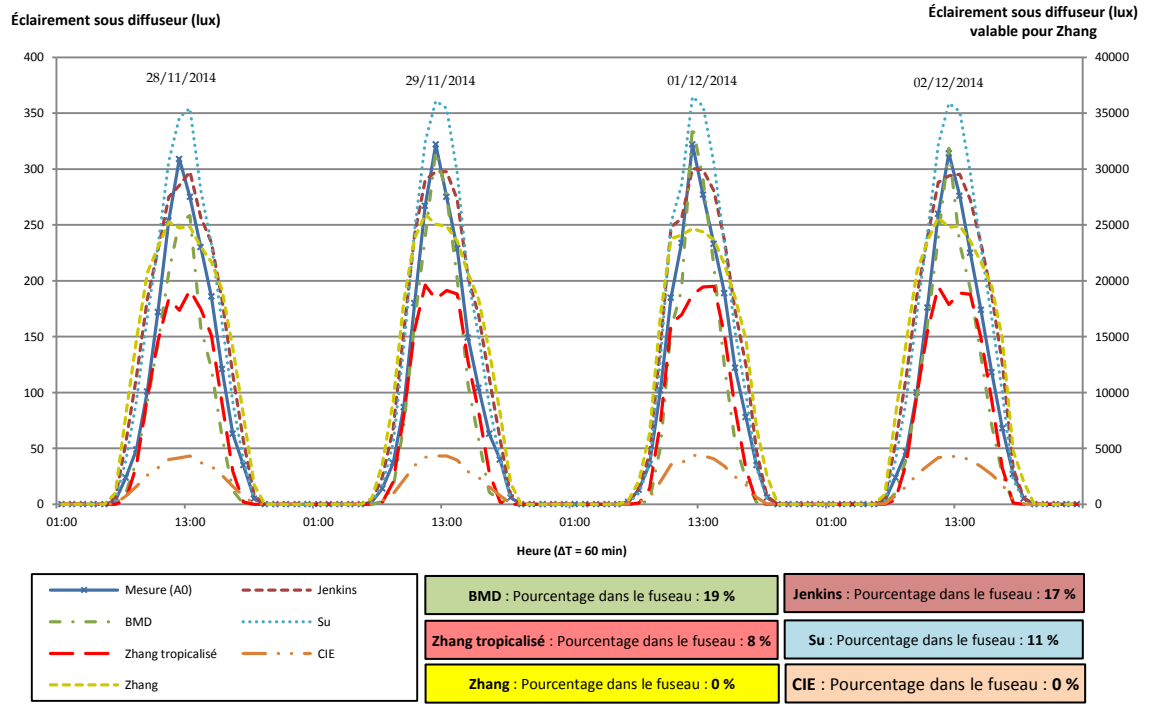


Figure 129 : Confrontation intermodèle en climat réunionnais au pas de temps horaire

Pour rappel, le fuseau correspond à la marge d'erreur associée à la mesure (plage de ±10% autour de la valeur nominale issue des erreurs de mesure). Nous constatons que les modèles BMD et Jenkins offrent une fiabilité accrue par rapport aux autres modèles. Les modèles de Zhang tropicalisé et de Su assurent un pourcentage dans le fuseau de tolérance des mesures proche de ±10%. Le modèle CIE sous-estime largement l'éclairement sous le diffuseur. Le modèle de Zhang (équation pour forme courbe) ne permet pas d'atteindre des valeurs convenables. Il surestime très largement l'éclairement à l'intérieur de la cellule. Nous relevons un facteur de près de 10 entre les mesures et les résultats de ce dernier. Nous avons cherché à comprendre la raison de ces valeurs. Ce travail a fait l'objet d'une publication (Malet-Damour, Boyer, Guichard, and Fakra 2014) et avons montré que l'équation de Zhang ne fonctionnait que pour des valeurs de réflectivité similaires à celles utilisées pour l'ajustement de ses coefficients empiriques.

3.2.1.3. Résultats associés au pas de temps de 10 min

À présent, nous confrontons nos modèles sur des jours de la période estivale pour un pas de temps de 10 minutes (pour des raisons de lisibilité, seules deux journées ont été choisies : le 6 et 16 décembre 2014). Il s'agit pour cette séquence de comparer les modèles sur leur capacité à prédire les aléas.

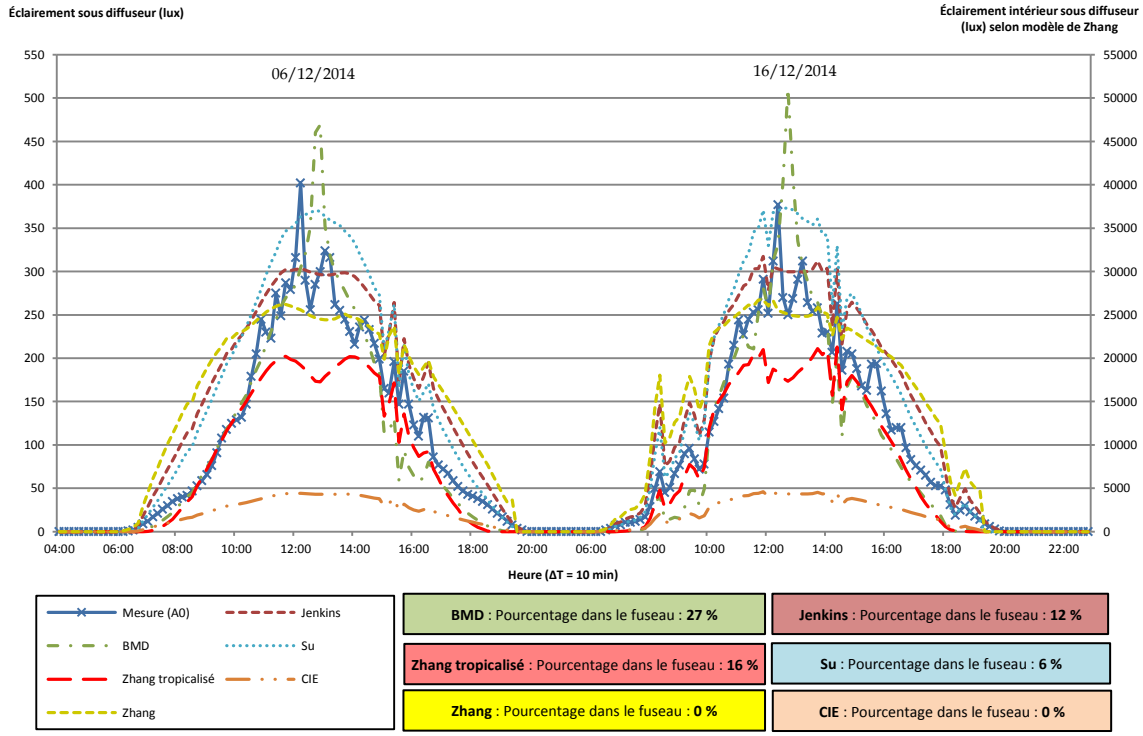


Figure 130 : Confrontation intermodèle en climat réunionnais au pas de temps de 10 min

L'approche du CIE s'éloigne totalement des autres modèles. Le modèle de Zhang tropicalisé semble fournir des résultats corrects en début et en fin de journée avec une fiabilité à hauteur de 16%. A contrario, le modèle de Jenkins s'écarte des données expérimentales, principalement en début et en fin de journée en surestimant l'éclairement à l'intérieur. Le modèle de Zhang semble fiable dans la retranscription du profil d'éclairement journalier, mais diverge d'un facteur 100 par rapport aux mesures. Le modèle de Su a tendance à surestimer généralement l'éclairement, tandis que le modèle BMD est le plus fiable avec une justesse de près de 27 %. Cependant à midi solaire, BMD prédit un pic d'éclairement non visible dans les mesures.

Notons que Yun et Kim constataient également que les modèles de Zhang et de Jenkins s'éloignaient des valeurs mesurées lorsqu'ils n'étaient pas utilisés dans leurs conditions météorologiques respectives d'établissement (Yun, Hwang, and Kim 2010b).

3.2.2. Bâtiment BESTEST

3.2.2.1. Description du cas

Nous utilisons un cas référence : le bâtiment BESTEST[31]. Ce projet a été porté par l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA[32]) et développé par le NREL depuis 1981. Il consiste en une procédure basée sur des données dont l'objectif est la mise en œuvre pratique d'une méthodologie de validation globale. Un bâtiment de type monozone à deux vitrages verticaux en façade a été la référence permettant de valider de nombreux codes de calcul en thermoaéraulique.

Nous confrontons nos modèles sur une révision inspirée de ce standard afin d'éprouver notre modèle lors d'une variation de la configuration d'étude.

L'indice du local RI est de 0,37 (calculé à partir de l'équation (97) de la section 1.3 du chapitre II). Les parois intérieures auront un coefficient de réflexion de 0,05. Le facteur d'utilisation résultant est de l'ordre de 0,34 (déduit à partir du Tableau 6 de la section 1.3 du chapitre II). Nous supprimons les deux vitrages en façade, et ajoutons un conduit de lumière courbe au centre de la zone d'étude (angle 20°). Ce conduit aura une longueur de 1,8 m et un diamètre de 35 cm, ce qui correspond au modèle Kit 290 DS de la marque SOLATUBE. La transmittance du collecteur sera de 0,80 et celle du diffuseur est de 0,79 (CSTB 2011).

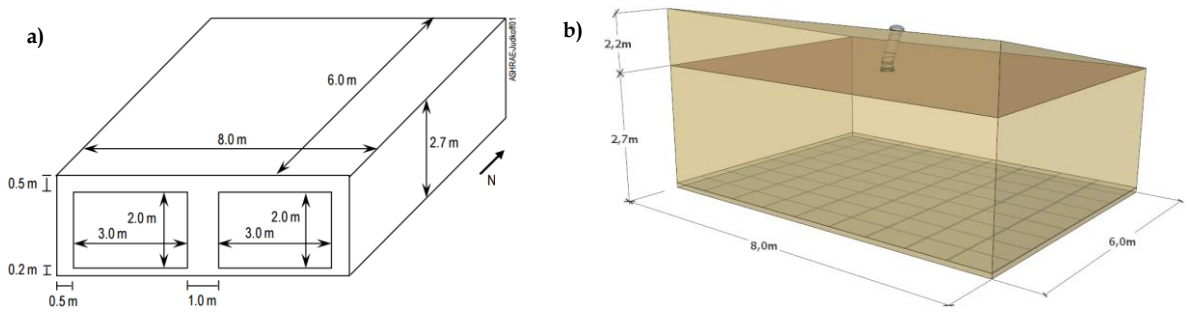


Figure 131 : a) Bâtiment BESTEST initial b) Bâtiment BESTEST* étudié

3.2.2.2. Résultats associés

À l'image du premier cas test, nous comparons nos modèles sur des jours de la période estivale en climat réunionnais (journée du 28 novembre, 29 novembre, 1er décembre et 2 décembre 2014).

[31] *Building Evaluation Simulation Test*
[32] *International Energy Agency*

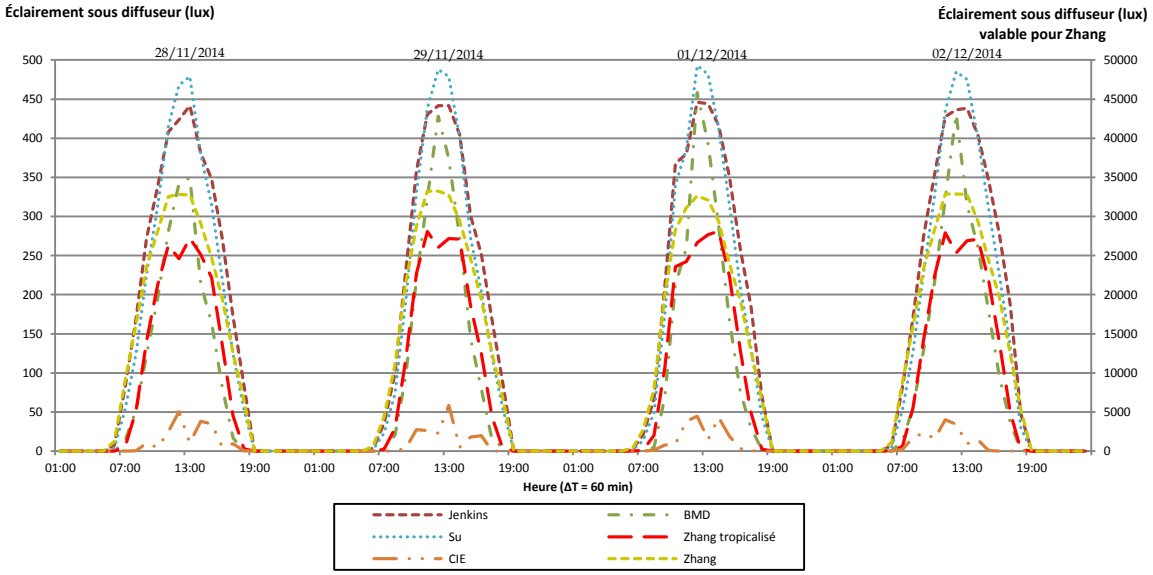


Figure 132 : Éclairement intérieur sous diffuseur - Cas BESTEST*

Sur les mêmes jours, pour une configuration de cellule et de conduit de lumière différente, nous remarquons que le modèle BMD semble offrir des résultats dans la moyenne des autres modèles (Figure 132). Il rapproche des prédictions des modèles de Su et de Jenkins en ayant un écart moyen de 50 lux et de 57 lux, respectivement. Les modèles de Su et de Jenkins prédisent un comportement très proche sur l'ensemble de la période de simulation. L'écart moyen entre ces deux approches s'élève à près de 8 lux. Ce constat est logique compte tenu qu'elles ont été développées et ajustées dans les mêmes conditions climatiques (Royaume-Uni). Le modèle BMD semble s'éloigner de ces approches lors de la première journée (28 novembre 2014) avec un écart maximal de 103 lux avec Su. Le modèle de Zhang dans sa version initiale continue à surestimer très largement l'éclairement sous diffuseur, pour atteindre un éclairement intérieur maximal irréaliste de l'ordre de 33 klux. En revanche, il semble retranscrire convenablement le comportement, à un facteur près. Le modèle de Zhang tropicalisé semble, quant à lui, sous-estimer l'éclairement sous diffuseur avec une chute à midi solaire (jour 1, 2 et 4), non retranscrit par les autres approches (écart maximal par rapport à BMD de près de 192 lux le jour 3). Cette chute doit provenir de la cotangente de la hauteur solaire dans l'équation de Zhang, qui tend vers zéro lorsque H_s est à son maximum. Le modèle du CIE n'offre pas de résultats acceptables tant dans le profil d'éclairement prédit que dans le niveau d'éclairement en s'éloignant en moyenne de 70 lux du modèle le plus proche, Zhang tropicalisé).

3.2.3. Synthèse sur la validation comparative intermodèle

Nous avons confronté les modèles de la littérature permettant de prédire le comportement de conduit courbe. Nous avons confronté les résultats des modèles dans notre configuration expérimentale, puis nous avons étudié une autre configuration d'étude. Dans chacun des cas, le modèle BMD offrait des résultats meilleurs, voire équivalents aux approches testées.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

4. Validation comparative expérimentale

La validation expérimentale permet d'éprouver le modèle développé en le confrontant aux données dites « réelles ». Nous effectuerons cette analyse pour deux configurations d'étude :

- Cas d'étude N°1 : les parois verticales de la zone sont toutes noires.
- Cas d'étude N°2 : les parois verticales de la zone sont toutes blanches.

Nous utiliserons les mêmes outils statistiques qu'au chapitre précédent à savoir : Résidu maximal, MBE, RMSE et le pourcentage dans le fuseau de tolérance (voir section 3.3.3 du chapitre IV). De plus, nous verrons les limites de l'ajustement du modèle BMD.

4.1. Cas d'étude N°1 : parois verticales noires

4.1.1. Base de données de validation

La première base de données de validation comprend la période d'expérimentation où la configuration étudiée correspondait au cas où les parois de la cellule expérimentale LGI étaient noires. Elle est constituée d'une séquence de 10 jours d'intersaison et d'une autre de 16 jours d'été.

Tableau 29 : Base de données de validation pour le cas N°1

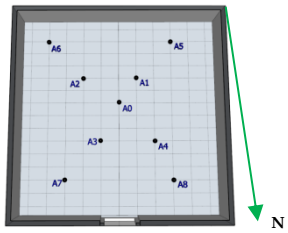
Période	Date	Éclairement global extérieur (klux)	Éclairement diffus extérieur (klux)	Éclairement direct extérieur (klux)
Intersaison Hiver-Été	19/09/2014	120	50	70
	20/09/2014	159	60	100
	21/09/2014	132	38	94
	24/09/2014	142	43	100
	25/09/2014	152	53	100
	26/09/2014	167	56	111
	27/09/2014	131	27	104
	30/09/2014	130	27	102
	01/10/2014	170	55	115
	02/10/2014	157	57	100
Début Été	27/11/2014	182	60	122
	28/11/2014	163	49	114
	29/11/2014	147	53	93
	01/12/2014	156	41	115
	02/12/2014	163	53	110
	03/12/2014	172	58	113
	04/12/2014	180	70	110
	05/12/2014	180	67	113
	06/12/2014	138	40	98
	08/12/2014	190	61	129
	09/12/2014	147	42	105
	11/12/2014	170	57	112
	13/12/2014	168	46	122
	14/12/2014	183	57	127
	15/12/2014	175	62	113
	16/12/2014	163	42	121

Nous sélectionnons des jours de la période correspondante au scénario de référence de notre protocole expérimental (scénario N°1 : parois noires). Cette période de 26 jours s'étend de la fin de l'hiver (octobre) au début de la période estivale. L'intersaison étant mise en avant, il est important de noter que cette base de données est plus proche des conditions climatiques estivales qu'hivernales. L'éclairement global extérieur maximal est ainsi en moyenne égal à 160 klux, avec des niveaux plus élevés enregistrés en été (Tableau 29). À l'aide du module « Simulation » d'HEMERA, de la forme du modèle BMD et de ses coefficients ajustés, nous évaluons ses performances en comparaison au modèle de Zhang tropicalisé.

4.1.2. Période complète

En première partie, nous nous intéressons à la période dans sa globalité. Nous relevons les résultats comparatifs dans le Tableau 30.

Tableau 30 : Résultats statistiques des modèles sélectionnés sur la période complète (ΔT = 10 min)

		Résidu max		RMSE		MBE		% dans le fuseau	
		BMD	Zhang*	BMD	Zhang*	BMD	Zhang*	BMD	Zhang*
	**A0**	375,72	429,24	23,83	33,95	2,43	4,34	50%	19%
	A1	418,30	451,11	32,42	42,69	9,11	10,65	20%	13%
	A2	310,53	402,87	34,44	44,94	12,48	13,74	18%	8%
	A3	229,08	145,84	36,27	39,24	15,80	17,10	11%	7%
	A4	297,54	148,38	32,78	32,72	11,20	12,25	24%	10%
	A5	366,10	380,99	27,40	27,58	5,57	5,93	24%	15%
	A6	216,65	278,03	20,72	22,62	4,10	4,25	24%	12%
	A7	159,11	92,16	22,07	19,94	6,69	6,87	20%	12%
	A8	192,05	99,11	24,04	21,77	6,85	7,03	17%	8%
Moyenne :		**285,01**	**269,75**	**28,22**	**31,72**	**8,25**	**9,13**	**23%**	**12%**

** Zhang tropicalisé*

Nous constatons que pour la zone Sud-Est/Sud/Sud-Ouest de la cellule expérimentale (capteur de A0 à A6), le modèle BMD est plus performant vis-à-vis des résidus maximaux. Notons que ces résidus ont des valeurs différentes de ceux présentés en Figure 133, le pas de temps de 10 minutes étant la cause. En effet, la variabilité de l'éclairement n'est alors pas lissée.

Les écarts-types des deux modèles sont inférieurs à 50 lux, seuil de détection de la variabilité de l'éclairement par l'œil. Le modèle de Zhang semble offrir une dispersion des erreurs moyennes sensiblement moins importante que BMD pour les capteurs positionnés dans la zone Nord-Est/Nord/Nord-Ouest (A4, A7 et A8). L'erreur moyenne (MBE) commise par le modèle BMD est plus faible que pour l'approche de référence (Zhang tropicalisé), avec un résidu moyen maximal de 15,80 lux en A3 contre 17,10 lux pour Zhang. Le dernier indicateur révèle que ce dernier

s'écarte considérablement de la mesure en étant le plus souvent proche en A0 à hauteur de 19 % des points contre 50 % pour BMD.

Sur la période dans son ensemble, nous constatons que le modèle BMD est plus fiable que le modèle de référence.

Globalement, les résultats sont cohérents compte tenu que les deux modèles ont utilisé l'éclairement intérieur sous diffuseur comme base de données d'apprentissage.

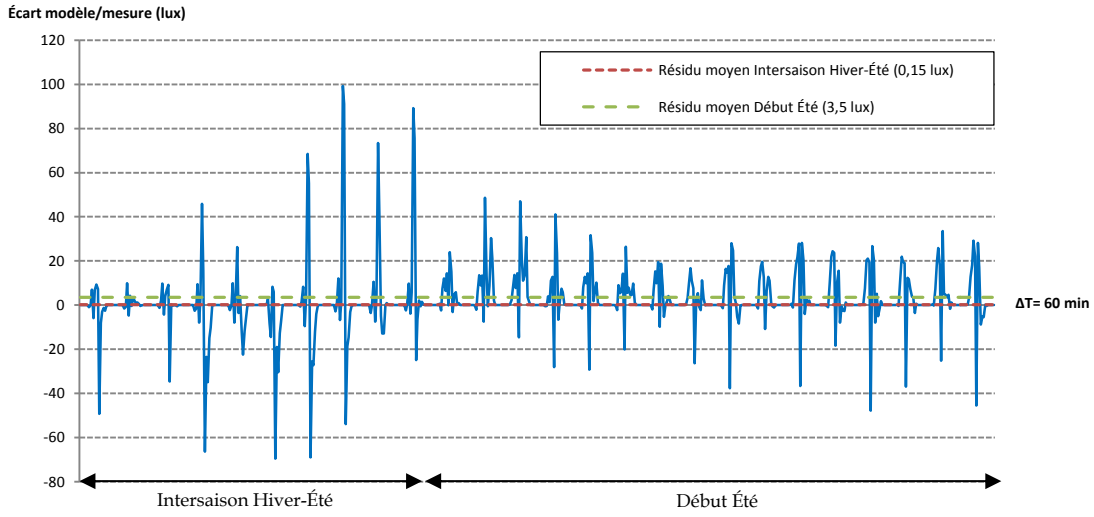


Figure 133 : Écart entre le modèle BMD et les mesures sous diffuseur - Cas N°1

L'évolution présentée en Figure 133 sur l'ensemble de la période montre globalement que le modèle BMD assure un résidu moyen inférieur à 50 lux au pas de temps horaire. Cependant, nous constatons que durant l'intersaison l'écart modèle/mesure a tendance à présenter des valeurs maximales. Ce constat corrobore l'hypothèse de la présence de taches solaires. Le modèle a tendance à sous-estimer l'éclairement intérieur en début d'intersaison, et à surestimer ensuite. Pour le début de la période estivale, l'approche BMD offre une stabilité plus marquée dans la prédiction. Le modèle a tendance à sous-estimer en matinée pour inverser la tendance à partir de midi.

4.1.3. Analyse sur une journée en ciel intermédiaire en A6

La journée du 19 septembre 2014 est une journée de type intermédiaire. Le début de journée a une tendance ciel clair, avec un éclairement maximal atteint de 120 klux. L'après-midi, le ciel se couvre pour laisser place à un ciel couvert. L'éclairement intérieur en position A6 semble marqué par un événement à 11h50 où celui-ci atteint 350 lux (Figure 135). Il semble qu'en termes de tendance que le modèle BMD tente de rattraper cet écart sans pour autant y parvenir : c'est là la limite du modèle (comme précisé en début du chapitre IV). Notre interprétation est que cet évènement en A6 à 11h50 est une tache solaire, et que BMD n'a appris que partiellement ces taches.

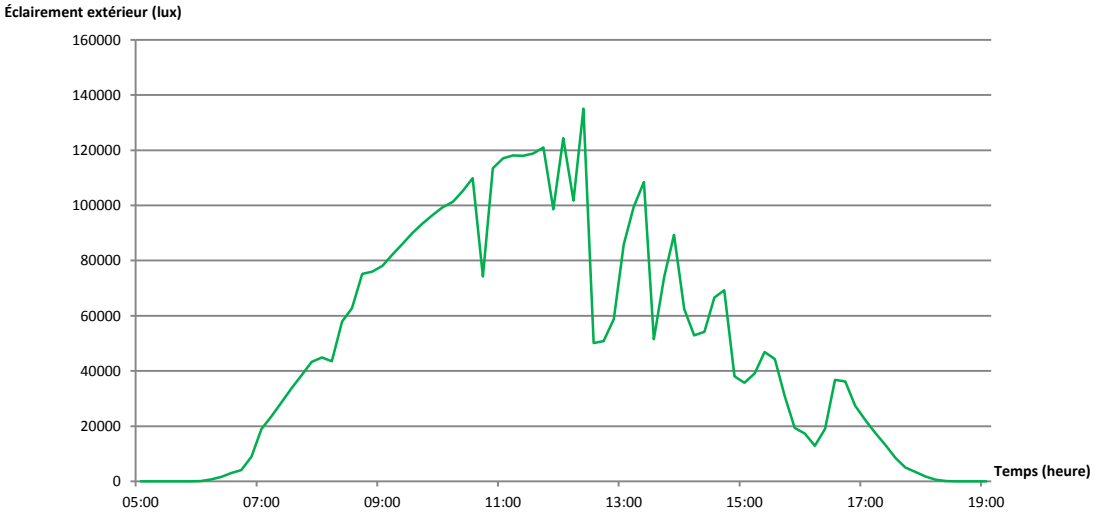


Figure 134 : Éclairement global extérieur pour la journée du 19/09/2014

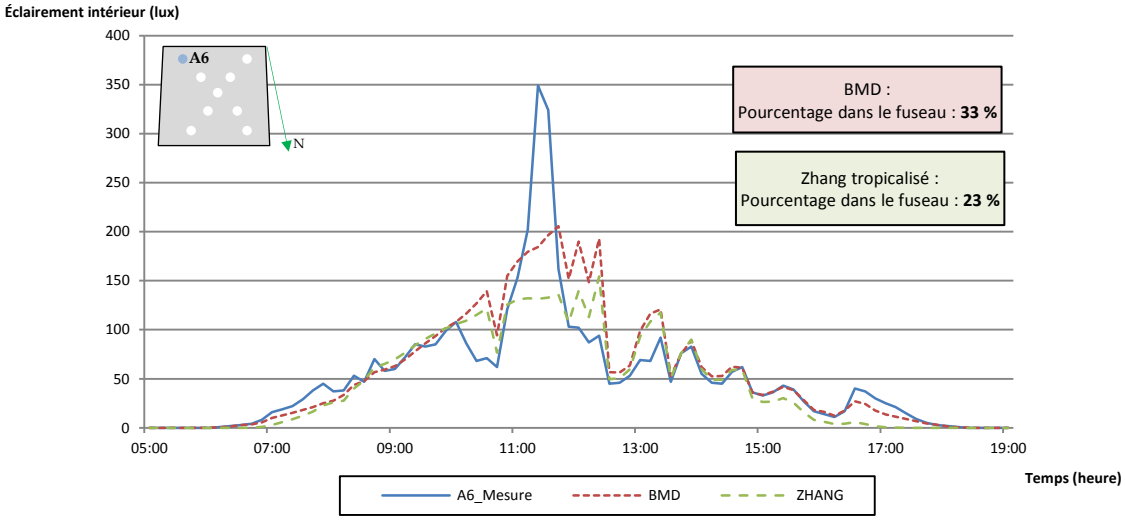


Figure 135 : Comparaison des modèles en ciel intermédiaire (ΔT = 10 min)

En dehors de la période temporelle 10h00-14h00 où les modèles concordent bien avec les mesures (résidus inférieurs à 100 lux), le modèle de Zhang tropicalisé semble sous-estimer sensiblement l'éclairement et présente une fiabilité de 23 %, comparativement à BMD qui est fiable à hauteur de 33 %. Les deux modèles ne sont en particulier pas fidèles dans la retranscription de l'évènement de 10h30. Le pic d'éclairement enregistré à midi n'est pas non plus repris par les modèles. Nous voyons tout de même que BMD s'en approche plus.

4.1.4. Analyse sur une journée en ciel intermédiaire en A0

Nous cherchons à constater les performances du modèle BMD pour un ciel intermédiaire et pour la position A0 (sous diffuseur). Nous sélectionnons la journée du 21 septembre 2014 (Figure 137).

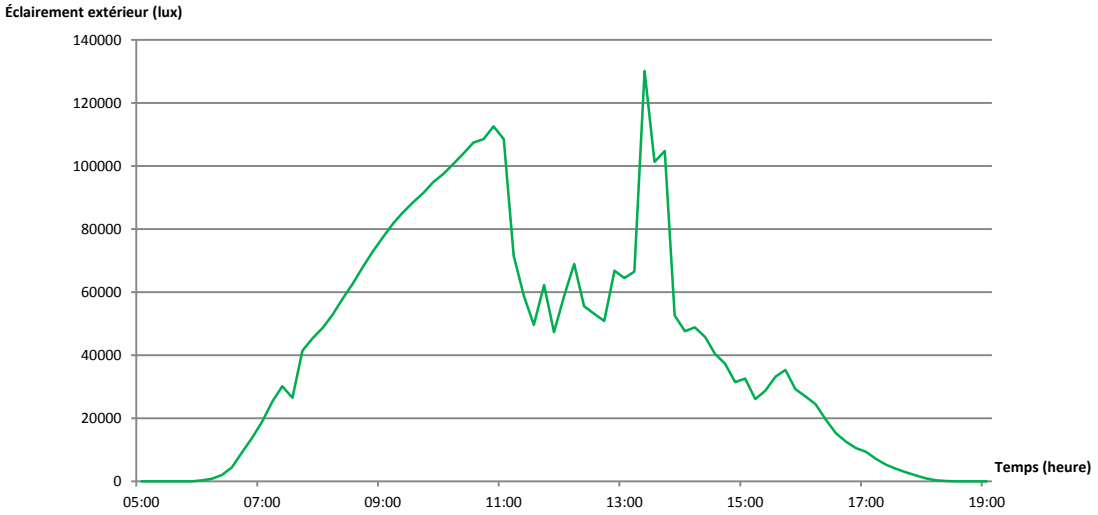


Figure 136 : Éclairement global extérieur pour la journée du 21/09/2014

Les résultats révèlent que les modèles BMD et Zhang prédisent correctement l'éclairement à l'intérieur de la pièce, avec un avantage pour le modèle BMD. Nous constatons que ce dernier est fiable à hauteur de 58 % contre 32 % pour Zhang. Sous diffuseur et pour ce type de ciel, l'éclairement n'est qu'une fraction de celui du global extérieur, ce qui n'était pas le cas pour A6. Notons que les modèles sont relativement performants dans la mesure où l'éclairement global extérieur n'est pas exclusivement de l'éclairement direct. Par ailleurs, le point en dessous du diffuseur (i.e. A0) étant celui ayant servi à l'apprentissage de chacun des deux modèles, ils sont placés dans des conditions optimales.

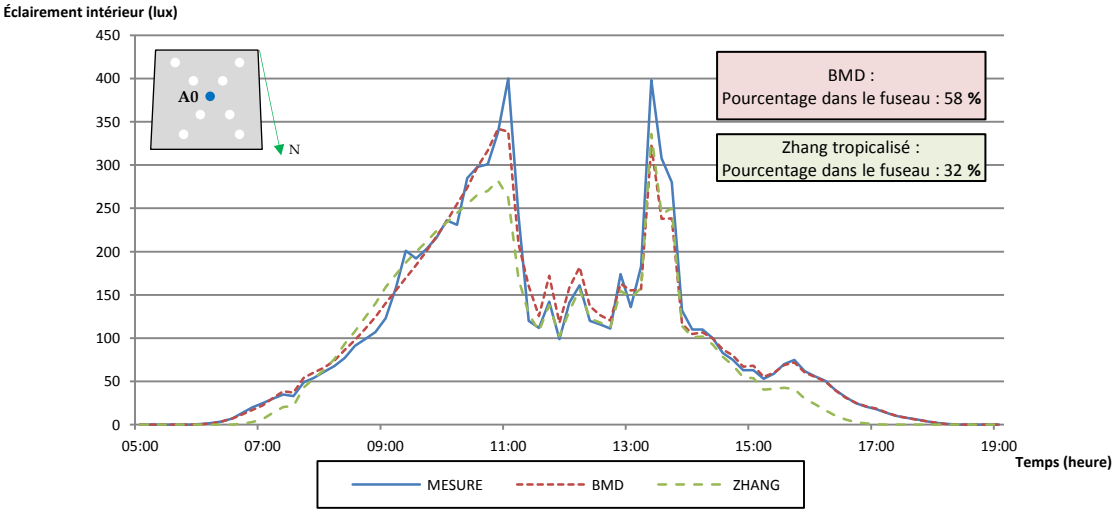


Figure 137 : Comparaison des modèles en ciel intermédiaire (ΔT = 10 min)

En zoomant sur la partie de la courbe, le modèle de Zhang assure une concordance des résultats modèle/mesure intéressante aux heures où le soleil est à son zénith (écart moyen de 12h00 à 13h00 de l'ordre de 5 lux par rapport à la mesure). Cette même période horaire est marquée par une chute de l'éclairement extérieur, avec un éclairement diffus proche de l'éclairement global

(ciel couvert). Physiquement, ce constat d'une concordance supérieure (aux incertitudes près) est compréhensible par le fait que l'équation de Zhang utilise l'éclairement extérieur global. Les coefficients ont alors été ajustés suivant la variabilité de ce dernier.

La forme du modèle BMD accorde tout autant de poids à l'éclairement direct que diffus. Dans ce cadre, les coefficients liés à la part du direct et ceux associés à la part du diffus sont différents. Le jeu des valeurs permet de trouver le meilleur compromis pour assurer une fiabilité en termes de fréquence (fiabilité globale) plutôt qu'une fiabilité localisée.

Le modèle BMD offre un écart modèle/mesure maximal de 3 lux du lever du soleil (6h00) jusqu'en milieu de matinée.

Globalement, le modèle de Zhang, même après ajustement semble plus performant sur les journées de ciel couvert tandis que le modèle BMD offre des résultats plus fréquemment fiables sous tout type de ciel.

Pour la suite, nous souhaitons évaluer notre modèle dans le cas où les parois verticales ne seraient pas sombres. Pour ce faire, nous utiliserons le modèle simplifié présenté en section 4 au chapitre IV pour prendre en compte la part de l'éclairement réfléchi par les parois.

4.2. **Cas d'étude N°2 : parois verticales blanches**

4.2.1. Base de données de validation

La seconde base de données de validation comprend la période d'expérimentation où la configuration étudiée correspondait au cas où les parois verticales de la cellule expérimentale LGI étaient blanches. Disposant d'une base de données mieux répartie entre été et hiver (28 jours) par rapport aux 26 jours en parois noires, nous avons incorporé des jours en pleine période d'été (janvier) et d'hiver (juillet).

Tableau 31 : Base de données de validation pour le cas N°2

Période	Date	Éclairement global extérieur (klux)	Éclairement diffus extérieur (klux)	Éclairement direct extérieur (klux)
Hiver	16/07/2014	130	48	82
	17/07/2014	124	60	64
	18/07/2014	113	47	66
	19/07/2014	92	25	66
	20/07/2014	99	37	62
	21/07/2014	100	41	59
	22/07/2014	109	54	55
	23/07/2014	123	58	64
	24/07/2014	111	33	78
	25/07/2014	108	29	79
	26/07/2014	107	33	74
	27/07/2014	115	43	72
	28/07/2014	104	44	60

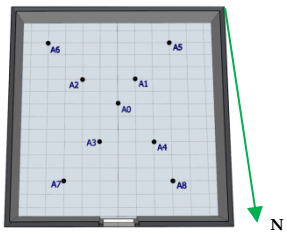
	09/01/2014	193	78	115
	10/01/2014	166	69	98
	11/01/2014	148	39	109
	12/01/2014	168	56	112
	13/01/2014	172	49	123
	14/01/2014	137	21	116
	15/01/2014	168	55	113
Été	16/01/2014	186	71	115
	17/01/2014	168	47	120
	18/01/2014	186	57	129
	19/01/2014	137	20	117
	20/01/2014	155	54	102
	21/01/2014	137	28	109
	22/01/2014	138	29	109
	23/01/2014	161	48	114

L'hiver est marqué par un éclairement global maximum moyen de l'ordre de 110 klux, avec des valeurs d'éclairement diffus relativement importantes par rapport à celles en direct. Le soleil étant bas dans le ciel, la contribution de la voûte céleste est prépondérante. En été, l'éclairement direct atteint des valeurs élevées avec une moyenne sur la période de près de 115 klux, contre 60 klux pour l'éclairement diffus. La durée d'ensoleillement et la course solaire font de l'été une saison au fort gisement solaire et donc lumineux.

4.2.2. Période complète

En première partie, nous nous intéressons à la période de validation dans sa globalité. Dans un premier temps, nous relevons les résultats comparatifs pour la période hivernale dans le Tableau 32.

Tableau 32 : Résultats statistiques des modèles sélectionnés sur la période hivernale (ΔT = 10 min)

		Résidu max		RMSE		MBE		% dans le fuseau	
		BMD	Zhang*	BMD	Zhang*	BMD	Zhang*	BMD	Zhang*
	**A0**	617,66	159,58	159,58	-85,22	-85,22	3,72	0%	0%
	A1	452,72	117,37	117,37	-63,92	-63,92	2,73	0%	0%
	A2	344,55	98,31	98,31	-54,45	-54,45	2,29	0%	0%
	A3	299,45	94,03	94,03	-52,42	-52,42	2,19	0%	0%
	A4	315,30	98,04	98,04	-54,69	-54,69	2,28	0%	0%
	A5	225,08	78,65	78,65	-44,82	-44,82	1,83	0%	0%
	A6	268,85	74,00	74,00	-42,27	-42,27	1,72	0%	0%
	A7	174,37	66,94	66,94	-38,71	-38,71	1,56	0%	0%
	A8	189,76	68,12	68,12	-39,67	-39,67	1,59	0%	0%
Moyenne :		**320,86**	**95,00**	**95,00**	**-52,91**	**-52,91**	**2,21**	**0%**	**0%**

** Zhang tropicalisé*

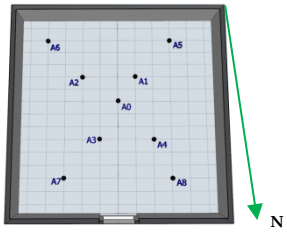
Le modèle BMD ainsi que le modèle de référence n'offrent guère de résultats comparables aux mesures. L'exigence sur l'erreur moyenne de l'ordre de 50 lux n'est pas assurée. Le modèle BMD

ayant été ajusté pour des conditions plus proches de l'été que de l'hiver, l'éclairement extérieur étant plus faible, BMD sous-estime largement l'éclairement à l'intérieur de la cellule.

Nous comprenons que ces approches ne peuvent pas être fiables dans ces conditions et qu'une dépendance forte existe entre les conditions d'établissement des modèles et celle de leur utilisation potentielle.

Dans une seconde partie, nous notons ensuite les résultats comparatifs pour la période estivale dans le Tableau 33.

Tableau 33 : Résultats statistiques des modèles sélectionnés sur la période estivale (ΔT = 10 min)

		Résidu max		RMSE		MBE		% dans le fuseau	
		BMD	Zhang*	BMD	Zhang*	BMD	Zhang*	BMD	Zhang*
	**A0**	455,47	369,90	72,36	89,14	-38,11	-54,36	16%	0%
	A1	297,99	162,20	50,23	53,76	-18,16	-34,39	19%	1%
	A2	356,16	147,80	46,57	41,34	-9,81	-26,01	13%	7%
	A3	274,35	246,63	47,60	53,04	-15,02	-31,23	15%	5%
	A4	289,08	181,70	43,55	49,19	-14,95	-31,13	20%	3%
	A5	228,94	137,36	41,78	42,51	-11,92	-27,92	13%	0%
	A6	283,11	133,44	41,93	44,73	-13,87	-29,79	13%	0%
	A7	249,05	138,11	43,46	44,81	-13,19	-29,12	7%	1%
	A8	237,05	143,53	42,25	46,94	-15,18	-31,11	7%	0%
Moyenne :		**296,80**	**184,52**	**47,75**	**51,72**	**-16,69**	**-32,78**	**14%**	**2%**

** Zhang tropicalisé*

Comme nous l'avons noté en section 4.2.1, la part de l'éclairement direct par rapport à l'éclairement diffus est grande. Ainsi, la distinction de ces deux grandeurs dans la prédiction permet de mieux saisir le comportement du conduit de lumière. Nous le confirmons par la fiabilité du modèle BMD (atteignant 20 % en A4 par exemple) contre les faibles résultats du modèle de Zhang. Hormis sous le diffuseur et en A1, les écarts-types par rapport à la moyenne sont inférieurs à 50 lux. Le modèle de Zhang semble toutefois plus performant vis-à-vis des résidus maximaux, notamment dans les zones éloignées de la source lumineuse (où l'éclairement est plus faible).

L'erreur moyenne (MBE) commise par le modèle BMD est plus faible que pour l'approche de référence, avec un résidu moyen maximal de -38 lux en A0 contre -54 lux pour Zhang. Le signe de ces erreurs moyennes nous révèle que les modèles sous-estiment systématiquement l'éclairement.

À l'image du cas N°1 (LGI avec parois noires), nous constatons que le modèle BMD est plus fiable que le modèle de référence.

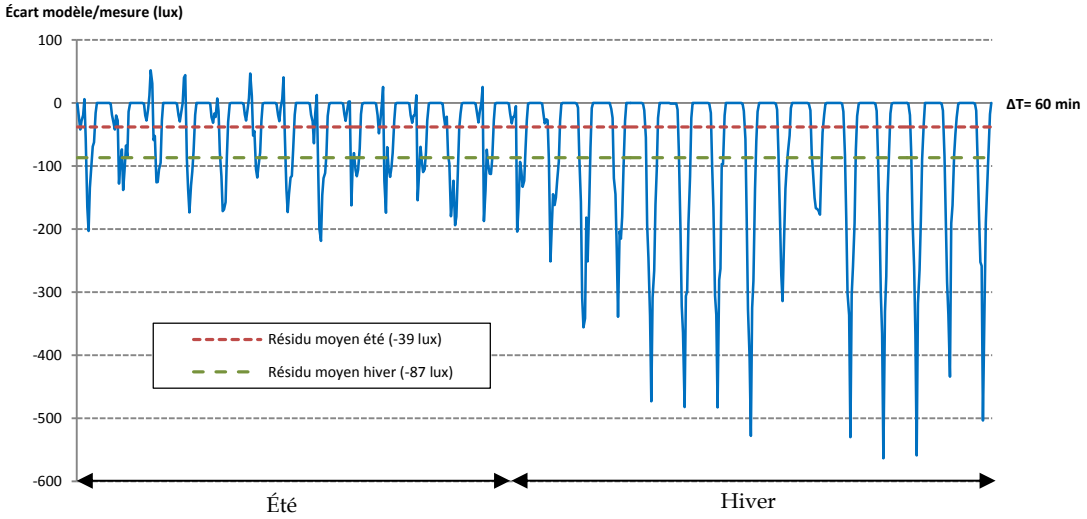


Figure 138 : Écart entre le modèle BMD et les mesures sous diffuseur – Cas N°2

Nous traçons l'évolution de l'écart modèle/mesure pour l'ensemble des jours de la base de données de validation en seconde configuration (parois blanches) sous le diffuseur (Figure 138) au pas de temps de l'heure. Pour la période estivale, l'approche BMD assure un résidu moyen inférieur à 50 lux. Le signe du résidu montre qu'il a tendance à sous-estimer l'éclairement intérieur. En hiver, comme nous avons pu le constater globalement au cours de la dernière analyse (Tableau 32 et Tableau 33), l'approche développée ne permet plus de prédire le comportement du dispositif. Le résidu moyen vaut -87 lux. Nous tenons à souligner le comportement saisonnier du modèle, plus précisément de l'ajustement algorithmique de ses coefficients empiriques. Parmi les variables du modèle, seul l'éclairement subit une variation notable, impactant la fiabilité du modèle.

4.2.3. Analyse sur deux journées en ciel clair en A4

Nous sélectionnons les journées estivales en ciel clair du 18 et 19 janvier 2014. L'éclairement global extérieur avoisine 140 klux (Figure 139).

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

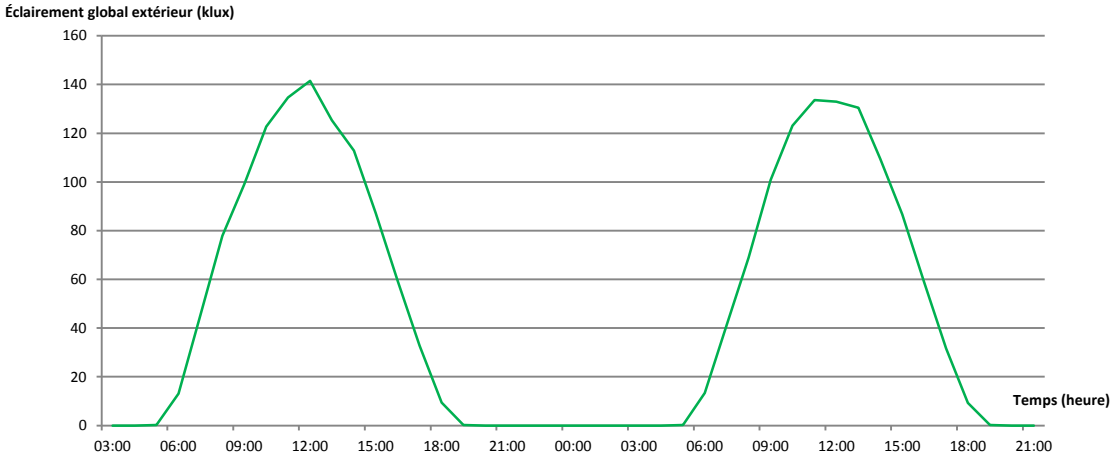


Figure 139 : Éclairements globaux extérieurs pour les 18/01/2014 et 19/01/2014

Le modèle BMD est très proche des mesures en atteignant une fiabilité accrue par rapport au modèle de Zhang. Celle-ci semble limitée en fin de journée (à partir de 15h30), où l'éclairement mesuré tend à s'atténuer de façon plus lente que ce qui peut être prédit par les modèles (Figure 140).

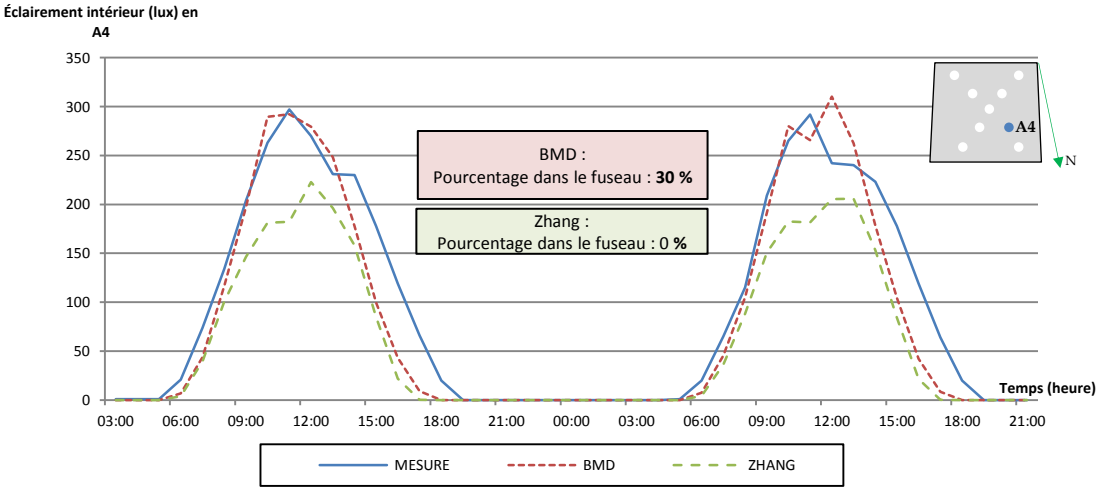


Figure 140 : Comparaison des modèles en ciel clair pour les 18/01/2014 et 19/01/2014 (ΔT = 60 min)

4.2.4. Analyse sur deux journées estivales en A0

Nous sélectionnons les journées des 14 et 15 janvier 2014. L'éclairement global extérieur atteint 140 klux (Figure 141). La première journée est de type clair, tandis que la journée du 15 janvier correspond au profil intermédiaire.

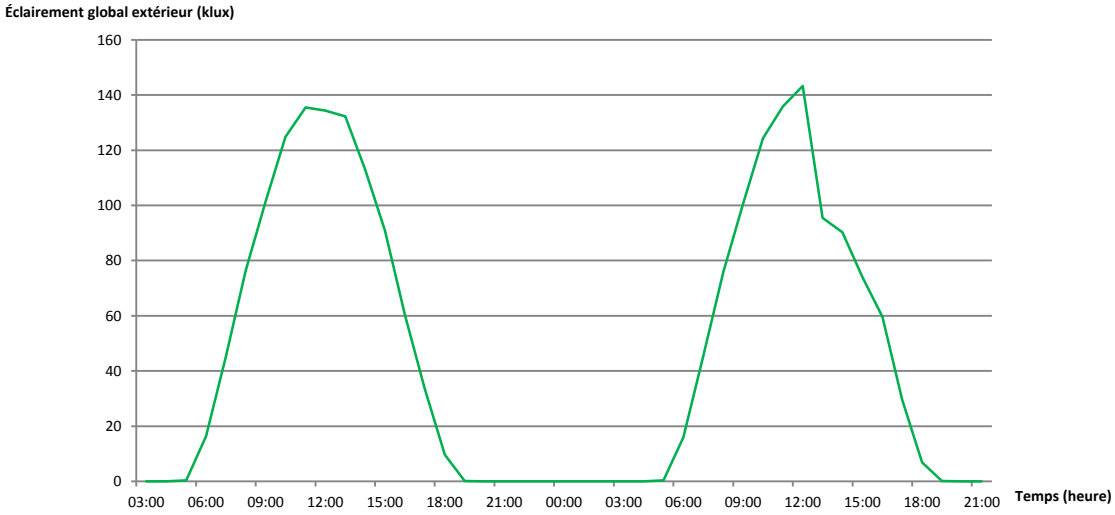


Figure 141 : Éclairements globaux extérieurs pour les 14/01/2014 et 15/01/2014

Sous le diffuseur, le constat reste le même que précédemment. Le modèle BMD semble fiable la première journée en ciel clair, mais moins performant durant la journée de ciel intermédiaire. Toutefois, il assure un pourcentage de données prédites dans le fuseau de tolérance des mesures à hauteur de 17 % (Figure 142).

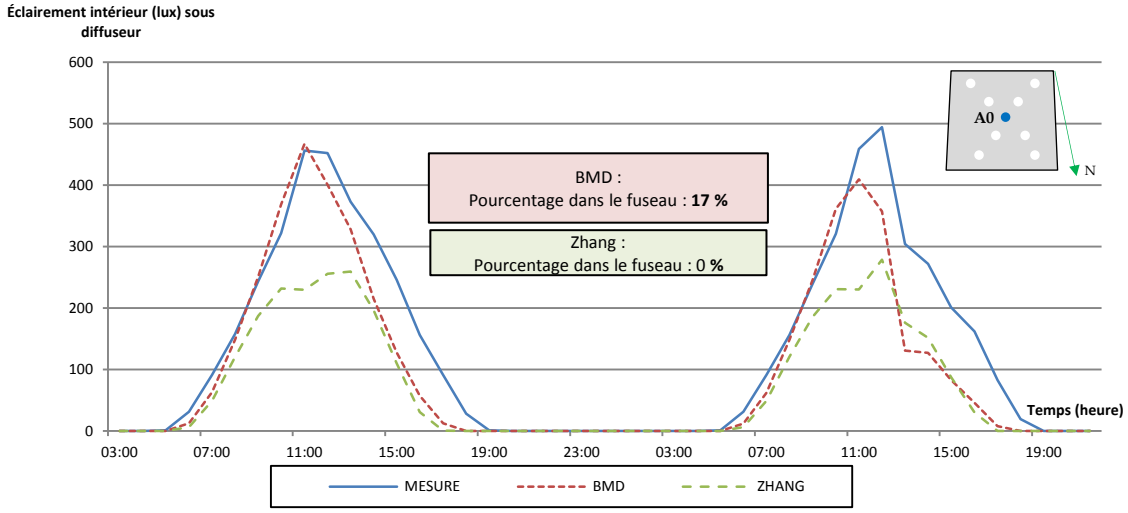


Figure 142 : Comparaison des modèles pour le 14/01/2014 et 15/01/2014 (ΔT = 60 min)

4.3. **Synthèse de l'analyse comparative expérimentale**

Nous avons effectué une analyse comparative expérimentale entre deux configurations d'étude et pour des types de jour et des pas de temps différents. Dans chacun des cas, le modèle BMD a marqué une fiabilité correcte compte tenu des exigences fixées, mais aussi en comparaison avec le modèle de référence.

5. Validation comparative interlogicielle

5.1. **Recensement des codes de calcul concernés**

5.1.1. Méthodologie

Nous procédons à un inventaire à l'échelle internationale basé sur les travaux du laboratoire LBNL [33] en Californie (William 1999) et sur la contribution apportée par Fakra (Fakra 2009) afin de lister de la façon la plus exhaustive possible les logiciels de simulation dynamique en éclairement naturel prenant en compte les systèmes complexes tubulaires, ce avant notre contribution HEMERA/CODYRUN. Cet inventaire a été support d'une étude proposée et validée (Malet-Damour, Boyer, Fakra, and Bojic 2014).

Pour ce recensement, nous distinguons deux catégories de logiciels de simulation en éclairage : d'une part ceux dits commerciaux utilisés dans les bureaux d'études (la plupart de ces logiciels n'ont pas fait l'objet de validation), et d'autre part ceux considérés comme des logiciels de recherche. Les premiers servent à évaluer de façon rapide des phénomènes sans trop de rigueur. Les seconds sont plus orientés vers l'aspect scientifique du phénomène, et donc se rapprochent beaucoup plus de la réalité et de nos préoccupations.

De plus, nous distinguons les logiciels payants de ceux non payants. Nous avons aussi tenté de dresser, sauf si les informations ne sont pas accessibles, la liste des modèles ou approches utilisés dans chaque logiciel.

Sur les 38 logiciels en simulation dynamique d'éclairage recensés (inventaire disponible en annexe 3), seul 5 permettent de modéliser les dispositifs tubulaires. Le Tableau 34 à la suite récapitule ces différents programmes répondant au critère.

Tableau 34 : Synthèse de l'inventaire des codes de calcul recensés

Software	Type d'utilisation	Reference	Modèle utilisé
ECOTECT	Payant	www.usa.autodesk.com/ECOTECT-analysis (U.S.A.)	(Radiosité, Tracé de rayon, *Lumen method*, Split-Flux)
PHOTOPIA	Payant	www.ltioptics.com/Photopia/overview.html	Monte-Carlo method combined with ray-tracing
ENERGYPLUS (Radiance)	Gratuit	www.radiance-online.org (U.S.A)	Legacy Open Studio (using Radiance) Radiosité, Tracé de rayon (modèle de Swift et Smith)
HOLIGILM	Gratuit	www.HOLIGILM.info (Slovaquie)	Monte-Carlo method combined with ray-tracing
DIALux	Gratuit	www.dialux.com (Allemagne)	Utilisation de fichier photométrique de SOLATUBE® (fichier EULUMDAT établie à partir de mesure faite au Pays-Bas)

[33] *Lawrence Berkeley National Laboratory*

Un des cinq programmes est apte à être utilisé dans le cadre de nos travaux : ENERGYPLUS. C'est un logiciel internationalement reconnu qui a déjà subi de nombreuses validations. En plus d'être gratuit, il est le seul à proposer l'utilisation de fichiers météorologiques permettant une simulation dynamique de l'éclairement naturel au sein de la zone d'étude, et dont la structure et le fonctionnement sont comparables à CODYRUN.

HOLIGILM est un programme qui est capable de calculer l'éclairement d'une pièce rectangulaire utilisant des dispositifs de guides de lumière en tant que source lumineuse. Le nom HOLIGILM est un acronyme de *HOllow LIght Guide Interior iLlumination Method*. Ce programme est essentiellement utilisé dans le milieu de la recherche, principalement par son auteur Kocifaj. Il ne permet pas d'utiliser un fichier météorologique, mais propose différents types de ciel standardisé par la CIE (15 types de ciel différents, dont 10 uniquement disponibles dans la version PRO de HOLIGILM). Le nombre maximal de conduits de lumière autorisés est limité à 10. La transparence de la coupole du dôme formant le collecteur peut être ajustée. De même, les propriétés (diamètre, longueur et coefficient de réflexion) du tube circulaire peuvent être modifiées. Trois types de diffuseur peuvent être associés au conduit de lumière : diffus, transparent ou combiné dont les propriétés peuvent également être ajustées.

La méthode de modélisation développée est basée sur une solution analytique décrite par son auteur, Kocifaj dans (Kocifaj, Darula, and Kittler 2008).

L'inconvénient est qu'il ne prend pas en compte des fichiers météorologiques du lieu d'étude et ne se base que sur des calculs théoriques de la position solaire. De plus, il ne simule que des conduits de lumière circulaires droits et équipés d'un diffuseur Lambertien ou transparent. Compte tenu de ces limites, nous ne l'utiliserons pas pour notre étude comparative.

DIALux a été développé par DIAL GmbH. Il permet de faire de calcul en éclairement naturel et éclairage artificiel à l'intérieur comme à l'extérieur. Pour simuler les conduits de lumière dans DIALux, SOLATUBE® a créé un fichier photométrique IES (fichier ELUMDAT) avec une luminance constante (dépendante des dimensions du conduit). Le fichier ELUMDAT contient un ensemble de coupes transversales. Ce sont des plans méridiens, paramétrés par un angle gamma. On parle de plans C-Gamma. La Figure 143 n'en présente que deux, à savoir un C-Gamma pour tous les gamma entre 0° et 180° (courbe enveloppe bleue) et l'autre, rouge, pour les gamma entre 90° et 270°. Ces données sont issues d'une étude expérimentale sur un conduit SOLATUBE DS 160 droit, pour les conditions météorologiques des Pays-Bas. Vu la forme du « bulbe » (Figure 143), et compte tenu de nos constatations expérimentales faites en chapitre III, ces résultats ont été obtenus en ciel couvert. La CIE classe cette forme de répartition lumineuse comme « direct intensif » (Vandeplanque 2005). Dans cette approche, le dispositif est considéré comme un éclairage artificiel sans faire appel aux paramètres liés à l'éclairement naturel (date, course solaire, type de ciel).

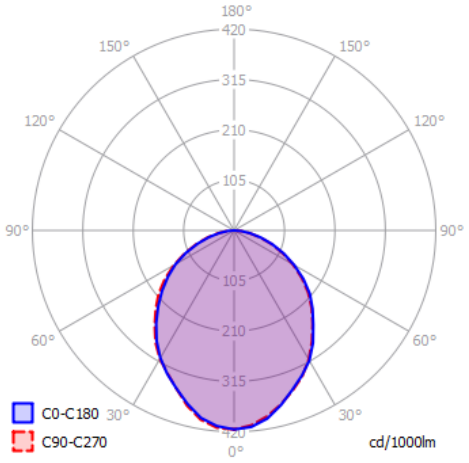


Figure 143 : Données du fichier ELUMDAT[34] pour le SOLATUBE DS 160 pour les conditions météorologiques des Pays-Bas

Pour notre étude comparative à la suite, compte tenu de cette limitation, nous n'utiliserons pas ce programme, les résultats ne pouvant être comparés aux autres logiciels.

Pour ce qui est d'ECOTECT, les performances de ce programme pour la prédiction des performances de conduit de lumière ne permettent pas de justifier son utilisation en vue de la validation du modèle développé. En effet, en 2006, Chella et al. (Chella, Zazzini, and Carta 2006) effectuent une analyse comparative interlogicielle et expérimentale. Les auteurs constatent que Radiance/ENERGYPLUS et ECOTECT sous-estiment la composante réfléchie au sein du local, mais s'accordent sur les résultats en ciel couvert. Cependant, et contrairement à ECOTECT, Radiance/ENERGYPLUS fournit des résultats acceptables aussi bien en ciel clair qu'en ciel couvert.

La même année, Zazzini et al. (Zazzini, Chella, and Scarduzio 2006) effectuent une étude des performances des conduits de lumière droits (8,0 m de longueur avec un diamètre de 25 cm) sur la base de simulations numériques à l'aide à ENERGYPLUS et ECOTECT et à l'aide de deux expérimentations (échelle et conditions climatiques réelles, et échelle réduite avec ciel artificiel). Les résultats ont permis de montrer la précision des deux codes de calcul. En effet, ENERGYPLUS sous-estime les éclairements sous les diffuseurs et surestime loin d'eux. Les valeurs numériques obtenues avec ECOTECT sont sous-estimées dans toutes les positions de mesure. Ces différences proviendraient, selon les auteurs, de la contribution de la part d'éclairement réfléchie au sein de la pièce pour le logiciel ECOTECT, et probablement de l'algorithme de calcul utilisé dans ENERGYPLUS. L'auteur précise tout de même que les résultats peuvent être jugés acceptables.

PHOTOPIA n'est pas un logiciel dédié à la simulation des conduits de lumière ou tout autre dispositif naturel. C'est un logiciel de conception d'éclairage, généralement utilisée pour prédire

[34] Fichier ELUMDAT téléchargeable sur : www.solatube.be

la performance des appareils d'éclairage artificiel. Ce programme permet d'effectuer tout type de simulation en tracé de rayon à partir d'un fichier CAD importé depuis un logiciel dédié. Il utilise la méthode Monte-Carlo pour résoudre les équations couplant intégrales et différentielles utilisées pour calculer les distributions d'éclairement dans les modèles 3D. En 2014, Luz et al. (Luz, Monteiro, and Aluccia 2014) présentent la validation de leur modèle mathématique permettant de prédire l'efficacité lumineuse des conduits de lumière basée sur les angles solides. Pour ce faire, l'auteur a utilisé le logiciel de lancer de rayon PHOTOPIA pour simuler le conduit dans des conditions de ciel réelles.

5.1.2. Présentation d'ENERGYPLUS

ENERGYPLUS est un outil développé sur les bases des outils DOE-2 destiné principalement au milieu de l'ingénierie. Il intègre des capacités innovantes de simulation telles que l'utilisation de pas de temps inférieurs à l'heure. ENERGYPLUS a été évalué dans le cadre des tests BESTests élaborés par l'Agence Internationale de l'Énergie (IAE [35]).

Pour les simulations en éclairement naturel, ENERGYPLUS utilise DElight (Guglielmetti, Macumber, and Long 2011; Guglielmetti, and Scheib 2012). La méthode utilisée dans ENERGYPLUS diffère de la méthode DOE-2 de par le fait que la course solaire et les conditions de ciel sont utilisées pour interpoler les facteurs de lumière du jour, améliorer la précision du calcul.

Dans sa publication, Ellis (Ellis, Strand, and Baumgartner 2004) présente le concept et les algorithmes implémentés dans ENERGYPLUS pour calculer les performances des conduits de lumière et des étagères de lumière.

Plus en détail, ENERGYPLUS calcule la transmittance du conduit à partir de l'équation de Swift et Smith (décrite au chapitre II, section 1.2.3). Ainsi, par le biais d'un algorithme de lancer de rayon, il détermine l'évolution d'un rayon lumineux au sein du tube. La transmittance du dôme est évaluée comme une fenêtre normale, le programme ne prend pas en compte la réfraction engendrée par la courbure du collecteur. La lumière sortant du tube n'est pas obligatoirement isotrope, elle est tout de même considérée comme diffuse lors de son passage dans le diffuseur. Le diffuseur est considéré comme une vitre horizontale illuminée par le ciel, le soleil et la réflexion du sol. Le modèle convertit toute la lumière transmise en lumière diffuse. Le collecteur et le diffuseur doivent être de forme rectangulaire. Cela pose donc la contrainte de devoir effectuer un rapport des dimensions pour obtenir la surface d'ouverture équivalente du tube.

Notons qu'il améliore le DOE-2.1E en utilisant quatre types de ciel (Richard Perez et al. 1990) contre seulement deux dans DOE-2.1E. De plus, les FLJ sont calculés au pas de temps horaire.

[35] *International Agency of Energy*

Ellis présente également les modèles thermiques de gain d'énergie solaire, conductifs et convectifs engendrés par l'utilisation d'un conduit de lumière.

5.2. **Configuration des codes de calcul**

5.2.1. Configuration d'ENERGYPLUS

Sous ENERGYPLUS, le dôme, le conduit et le diffuseur doivent être de même taille (à ±2% près) pour assurer le bon déroulement de la simulation (EnergyPlus 2012).

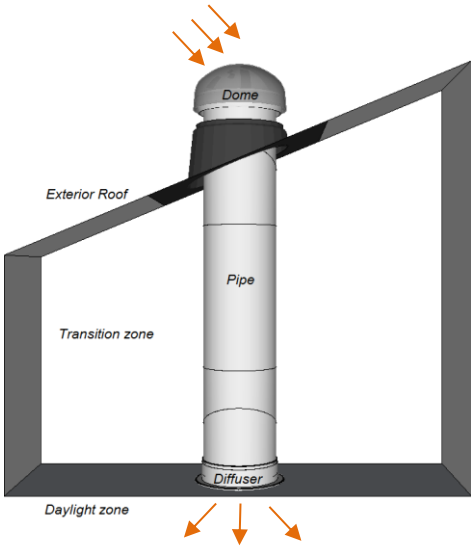


Figure 144 : Modélisation des conduits de lumière sous ENERGYPLUS

ENERGYPLUS simplifie la procédure en traitant le dôme et le diffuseur comme des surfaces vitrées spéciales. Ensemble, le dôme et le diffuseur deviennent « récepteur » et « émetteur », i.e. le rayonnement entrant dans le dôme finit par quitter le diffuseur. Le conduit quant à lui, est simulé par un module de calcul différent.

Tableau 35 : Paramètres pour les simulations sous ENERGYPLUS

Bâtiment	Géométrie générale	Longueur : 3,06 m Largeur : 3,06 m Hauteur : 2,26 m
	Coefficients de réflexion des parois	Parois verticales : 0,05 Plancher : 0,05 Plafond : 0,05
	Plan utile	Hauteur : 0,10 m
Conduit de lumière	Dôme et diffuseur	Rectangulaire (25x25 cm) Facteur de transmission du dôme : 80 % (CSTB 2011) Facteur de transmission du diffuseur Lambertien : 79 % (CSTB 2011) Position diffuseur : (1,53 m ; 1,33 m)
	Tube	Réflectivité : 99,7 % (CSTB 2011) Longueur : 1,26 m Diamètre : 0,25 m

La méthodologie générale utilisée consiste à créer une zone de transition contenant le conduit de lumière (Figure 144).

Pour notre cas d'étude, nous présentons dans le Tableau 35 les paramètres de notre simulation ainsi qu'une vue du modèle créé dans Legacy Openstudio (Figure 145).

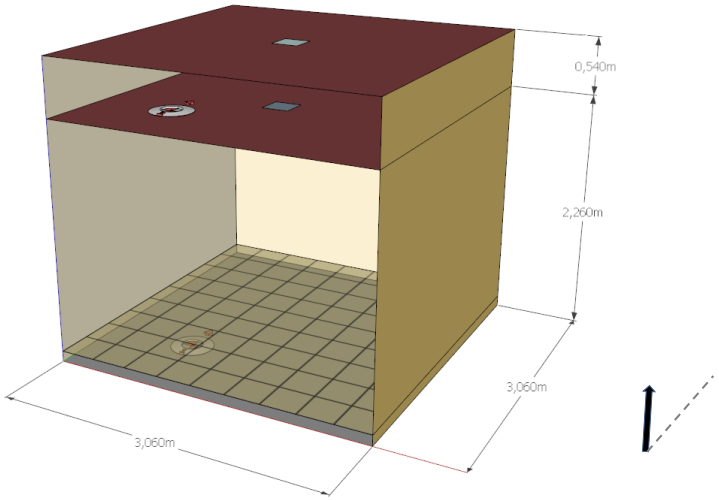


Figure 145 : Simulation de la cellule LGI sous ENERGYPLUS

5.2.2. Configuration de CODYRUN

Sous CODYRUN, la cellule LGI est décomposée en deux zones (la zone d'étude et les combles). Nous retrouvons également 10 interambiances, comprenant 12 composants, dont le conduit de lumière SOLATUBE (Figure 146).

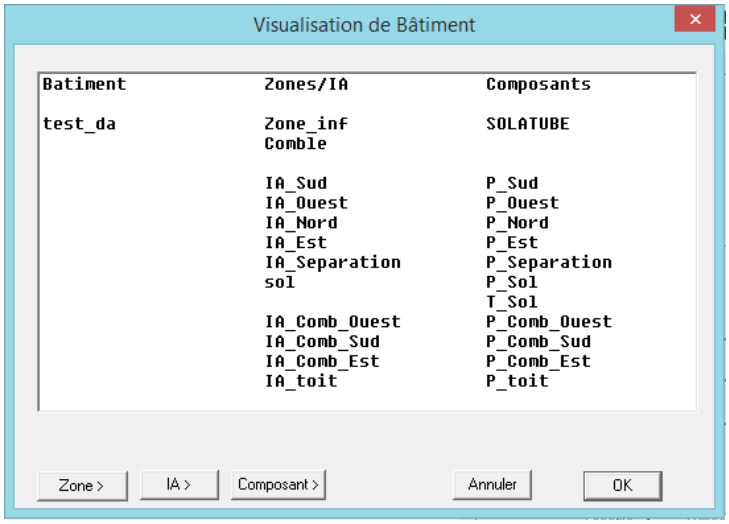


Figure 146 : Visualisation du bâtiment sous CODYRUN

Le diffuseur est physiquement positionné au niveau de la paroi horizontale séparant la zone d'étude et les combles. Le collecteur suit l'inclinaison de l'interambiance « IA_toit » (20°). La

cellule est orientée à 9° Nord/Nord-Est. Le maillage du plan utile est similaire à celui choisi pour la phase expérimentale.

5.3. **Analyse comparative interlogicielle**

Pour ce comparatif, nous utiliserons la configuration relative à notre cas de référence (cellule LGI avec les parois intérieures noires) mais pour différents climats. En première partie, nous confronterons les résultats des deux codes de calcul pour le climat de l'île de La Réunion. Ensuite, nous projetterons la cellule expérimentale dans la ville de Phoenix (Arizona) et d'Olympia (Washington).

5.3.1. Climat réunionnais : Saint Pierre (La Réunion)

Nous utilisons le convertisseur HEMERA MT-Maker afin de modifier le format de nos fichiers de données expérimentales de La Réunion au format accepté par ENERGYPLUS : EPW.

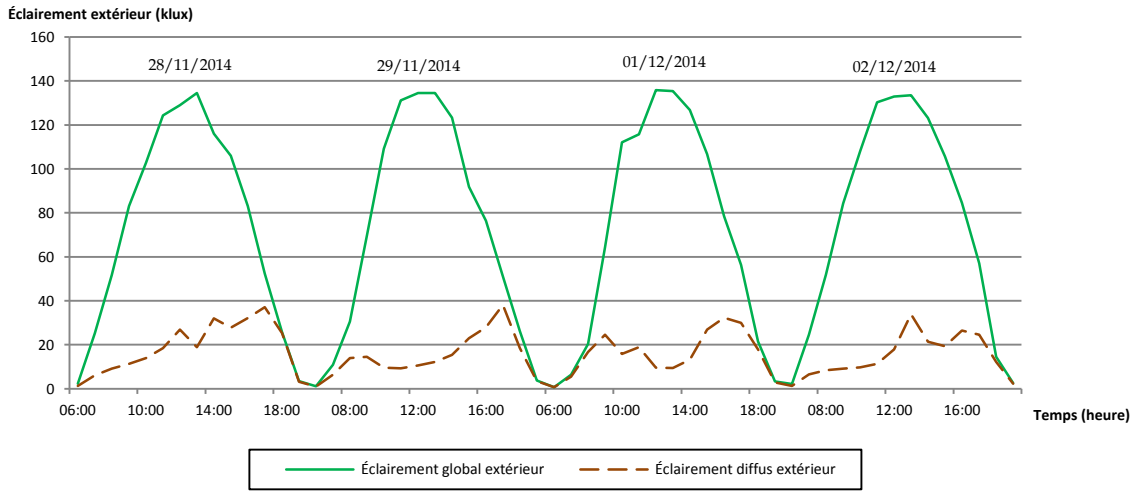


Figure 147 : Éclairement extérieur en climat réunionnais

Nous constatons que CODYRUN et ENERGYPLUS sont cohérents avec la prédiction du profil d'éclairement sous le diffuseur (Figure 148). Sur la base des mesures sous le diffuseur, ENERGYPLUS retranscrit avec plus de justesse le comportement physique du conduit. Cependant ce dernier surestime très largement le niveau d'éclairement en présentant un facteur 20 entre les prédictions et la mesure. CODYRUN, quant à lui, sous-estime légèrement l'éclairement, tout en restant dans l'exigence de 50 lux d'écart entre le code de calcul et les mesures. En effet, le résidu moyen sur la période entre les résultats de CODYRUN et les mesures est de l'ordre de 19 lux.

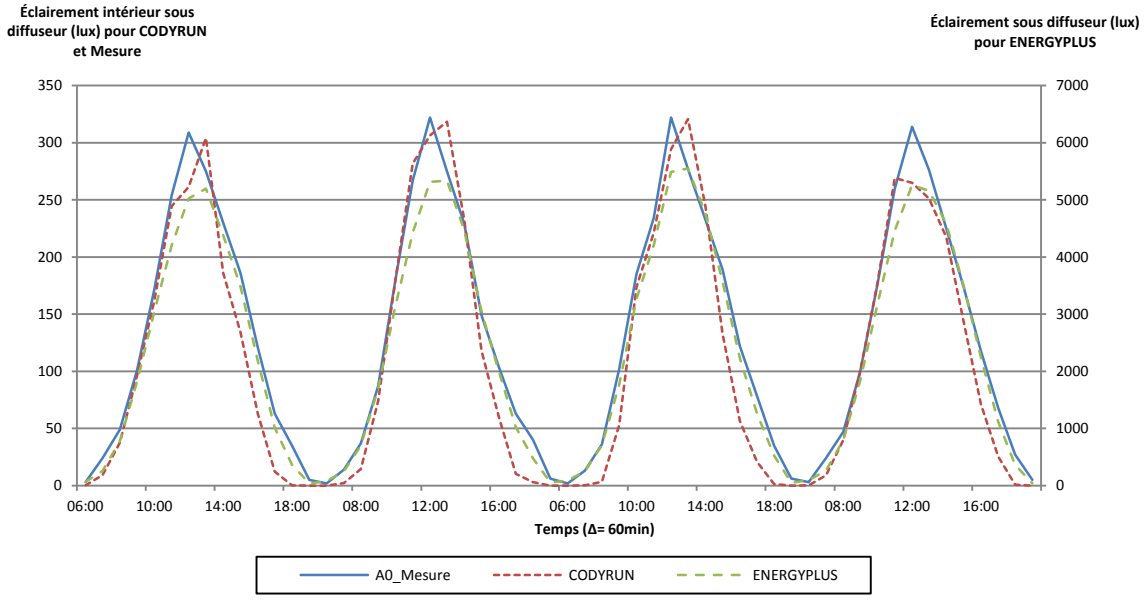


Figure 148 : Confrontation interlogicielle de l'éclairement prédit sous diffuseur pour la ville de Saint Pierre (La Réunion)

Pour les débuts et fins de journée, ENERGYPLUS semble fidèle aux phénomènes réels, à la différence de CODYRUN qui sous-estime l'éclairement (écart maximal de près de 52 lux le troisième jour en fin de journée). Cela est probablement dû au fait que le modèle développé a été ajusté sur une base de données composée de plusieurs types de jours, avec des éclairements pouvant être largement supérieurs aux éclairements de début et fin de journée. Dans ce cas, l'algorithme génétique a tendance à faire converger le maximum de valeurs selon un critère de minimisation des erreurs moyennes.

CODYRUN offre des résultats totalement acceptables étant donné qu'il se base sur un modèle semi-empirique, contrairement à ENERGYPLUS muni des techniques de tracé de rayon. Il est possible que certaines spécificités du conduit de lumière SOLATUBE le rendent impropres à une simulation en tracé de rayons.

5.3.2. Climat américain : Phoenix (Arizona)

Phoenix est la capitale et la plus grande ville de l'État de l'Arizona, aux États-Unis. La ville est située dans le nord-est du désert de Sonora. Elle est influencée par un climat désertique chaud. Elle possède des étés longs, extrêmement chauds et des hivers courts. Avec Las Vegas (Nevada), Phoenix fait partie des villes les plus ensoleillées des États-Unis. Les niveaux d'ensoleillement atteints sont proches de ceux enregistrés lors de l'intersaison réunionnaise.

Nous choisissons quatre journées durant la période de fort ensoleillement de la ville. L'éclairement global extérieur avoisine les 110 klux, avec un éclairement diffus inférieur à 20 klux, ce qui est représentatif d'une période de ciel dégagé.

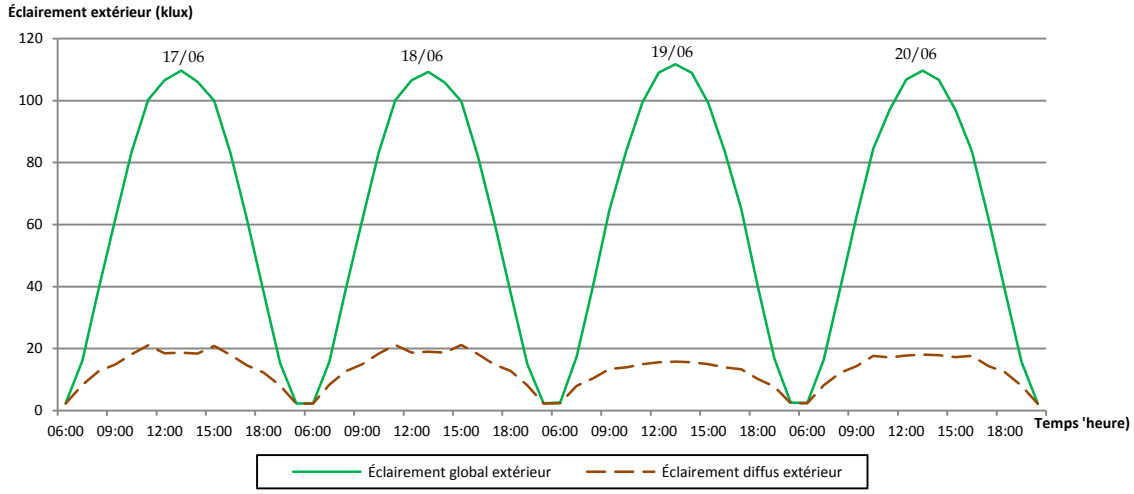


Figure 149 : Éclairement extérieur pour la ville de Phoenix (Arizona)

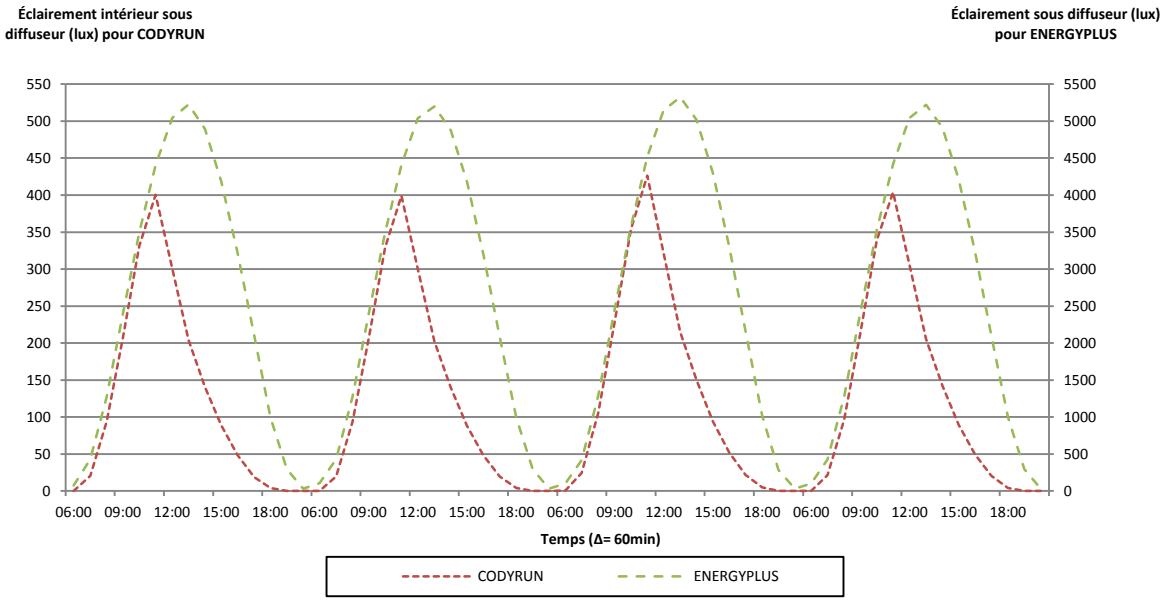


Figure 150 : Confrontation interlogicielle de l'éclairement prédit sous diffuseur pour la ville de Phoenix (Arizona)

Nous comparons les résultats de CODYRUN et d'ENERGYPLUS pour la période du 17 au 21 juin (Figure 150). À l'image du constat relevé pour le climat réunionnais, et si l'on se réfère à nos constats expérimentaux, ENERGYPLUS présente des niveaux d'éclairement bien au-delà de ce que pourrait fournir un conduit de lumière. CODYRUN semble plus cohérent en présentant un éclairement intérieur maximal sous diffuseur de l'ordre de 380 lux à midi solaire, tandis que le second code atteint un éclairement maximal 13 fois plus important à 14h00.

L'évolution horaire de l'éclairement diffère également d'un code à un autre. ENERGYPLUS et CODYRUN prédisent le même profil de comportement du conduit jusqu'à midi. L'après-midi, les deux codes diffèrent complètement. La forme liée à notre code de calcul est probablement en lien avec la base d'apprentissage du modèle BMD. En effet, celle-ci comporte des journées de ciel clair

dont l'éclairement direct engendre des pics d'éclairement dans le profil journalier. Le modèle a appris une forme de comportement face à des éclairements globaux de cet ordre de grandeur, d'où la forme pointue du profil d'éclairement.

5.3.3. Climat américain : Olympia (Washington)

Olympia est une ville des États-Unis, capitale de l'État de Washington. Le climat est de type océanique. Nous avons choisi ce lieu compte tenu de son faible gisement solaire durant une période de l'année. Nous souhaitons mettre en avant les limites du modèle BMD, et plus largement, les limites des modèles semi-empiriques cadrés par leur climat d'origine.

Nous présentons à la suite la période du 1er au 3 décembre.

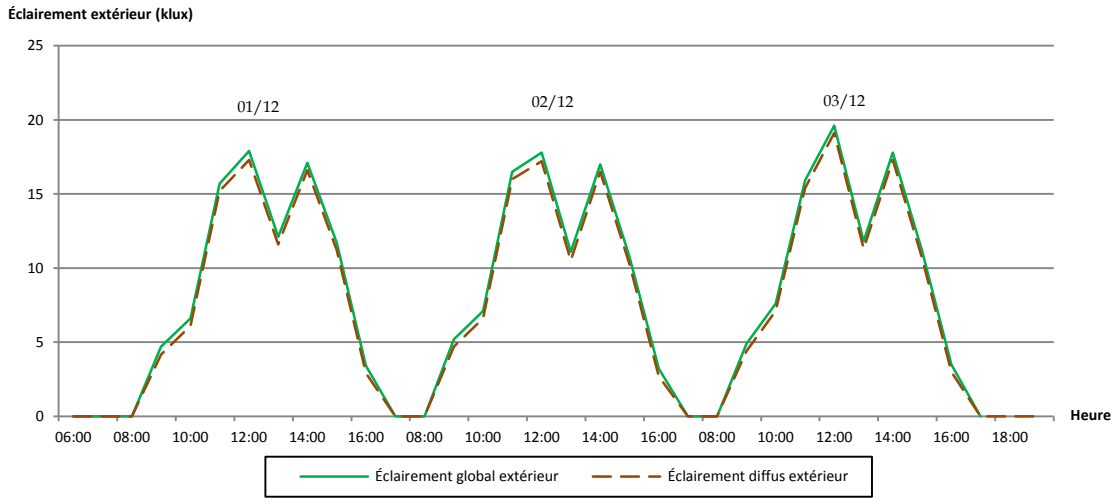


Figure 151 : Éclairement extérieur pour la ville d'Olympia (Washington)

La Figure 151 montre que la ville atteint des éclairements global et diffus similaires. Cela signifie que ces trois jours sont des journées de type ciel couvert. L'éclairement maximal y est de 17 klux, soit 4 fois moindre par rapport à une journée du même type à La Réunion.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

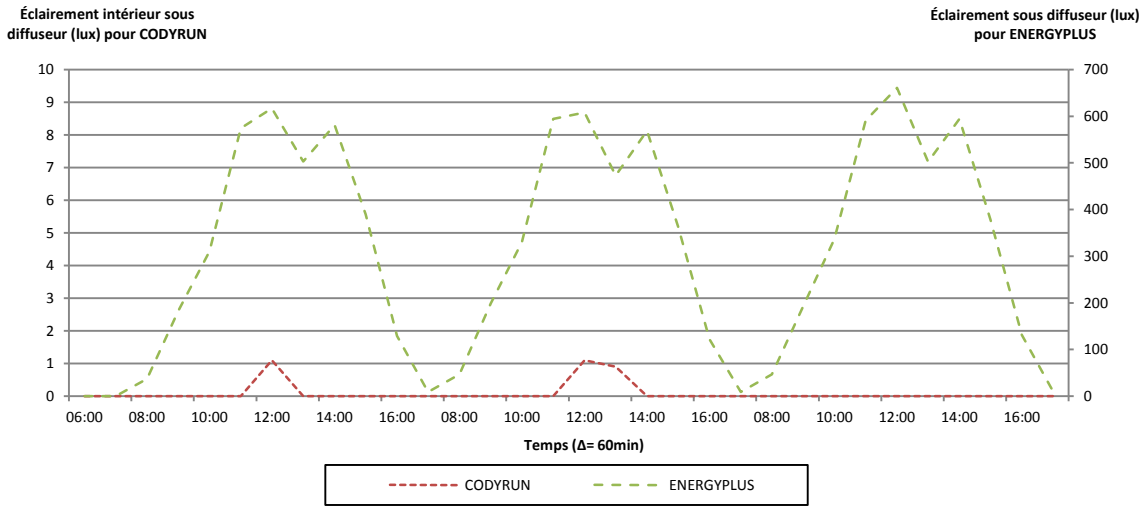


Figure 152 : Confrontation interlogicielle de l'éclairement prédit sous diffuseur pour la ville d'Olympia (Washington)

L'éclairement extérieur étant très éloigné des conditions d'ensoleillement d'ajustement des coefficients empiriques du modèle BMD, CODYRUN offre des résultats que nous jugeons en dessous de ce que pourrait fournir un dispositif tubulaire sous ce type de ciel. Selon nos données expérimentales, un éclairement global extérieur de 15 klux devrait générer un éclairement intérieur sous diffuseur de l'ordre de 30 lux. ENERGYPLUS présente des niveaux d'éclairement cohérent avec ce que pourrait délivrer un conduit de lumière en climat réunionnais. Cependant, compte tenu de la situation climatique d'étude, il surestime une nouvelle fois l'éclairement sous diffuseur, avec un facteur équivalent aux études précédentes.

5.4. **Synthèse de l'analyse comparative interlogicielle**

Nous avons souhaité comparer CODYRUN et ENERGYPLUS à la fois pour le climat dans lequel nous avons développé le modèle BMD mais aussi dans un climat de l'hémisphère nord proche de la zone géographique de développement du code de calcul américain. Nous constatons que ce dernier surestime largement les niveaux d'éclairement à l'intérieur de la zone d'étude, contrairement à CODYRUN qui offre des valeurs cohérentes avec les rendements que nous connaissons. ENERGYPLUS semble tout de même plus fidèle que CODYRUN dans la prédiction de la forme du profil d'éclairement journalier.

Les résultats diffèrent de ceux présentés par Chella et Zazzini (Zazzini, Chella, and Scarduzio 2006; Chella, Zazzini, and Carta 2006). Ces auteurs ont mené une analyse comparative entre les résultats de simulation d'ENERGYPLUS et les données expérimentales à échelles réelle et réduite. Ils avaient constaté que le code de calcul américain prédisait des éclairements en adéquation avec les constatations expérimentales. Il est nécessaire de noter que sous un ciel artificiel, l'éclairement global extérieur équivalent est faible, et incomparable avec les niveaux d'éclairement que nous rencontrons en conditions météorologiques réelles. De plus, les conditions météorologiques de

l'étude expérimentale à échelle réelle étaient celles de journées de ciel couvert dont l'éclairement global extérieur variait entre 6,5 klux et 11,5 klux. Comme nous l'avons montré, pour ces niveaux, les données de prédiction d'ENERGYPLUS semblent cohérentes.

Dans ce cadre, nous concluons que CODYRUN offre des résultats convenables tant sur le territoire réunionnais qu'américain. Bien évidemment, il est évident que ce dernier ne permettra pas d'atteindre une fiabilité acceptable dans des conditions d'éclairement faibles, le modèle BMD ayant été ajusté pour un climat à fort ensoleillement. De ce fait, HEMERA prend tout son sens en permettant d'offrir une solution à tout climat en générant des modèles adaptés.

6. Nouveau concept : les Coefficients Empiriques Climatiques

Tout au long de ce manuscrit, nous avons constaté que la fiabilité de la modélisation empirique était limitée par le climat dans lequel l'approche avait été ajustée. Par climat, nous entendons plus précisément des gammes de niveaux maximaux d'éclairement. Nous avons pu valider le modèle BMD pour différentes configurations d'étude et pour différents types de gisement lumineux. Lorsque nous sommes en présence d'un profil d'éclairement proche de celui dans lequel le modèle a été ajusté, les résultats de prédiction sont fiables.

Dans cette logique, nous modelons un nouveau concept novateur dans l'étude des DGLT : les Coefficients Empiriques Climatiques. Ils correspondent aux valeurs optimales à utiliser (coefficients empiriques du modèle) pour assurer une fiabilité du code de calcul dans le climat d'utilisation. Au chapitre IV, validées par le présent chapitre, nous avons développé les Coefficients Empiriques Climatiques valables pour certaines conditions climatiques. Nous utiliserons l'appellation :

$$CEC \quad E_{limit,basse} - E_{limit,haute}$$

Avec, $E_{limit,basse}$: limite inférieure de l'éclairement global extérieur maximal (klux)

$E_{limit,haute}$: limite supérieure éclairement global extérieur maximal (klux)

Si nous synthétisons cela à partir d'une carte d'ensoleillement, cela signifie que les coefficients empiriques en section 3.4.1 du chapitre IV sont valables pour les zones géographiques dont l'ensoleillement est proche ou similaire à La Réunion (Figure 153).

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

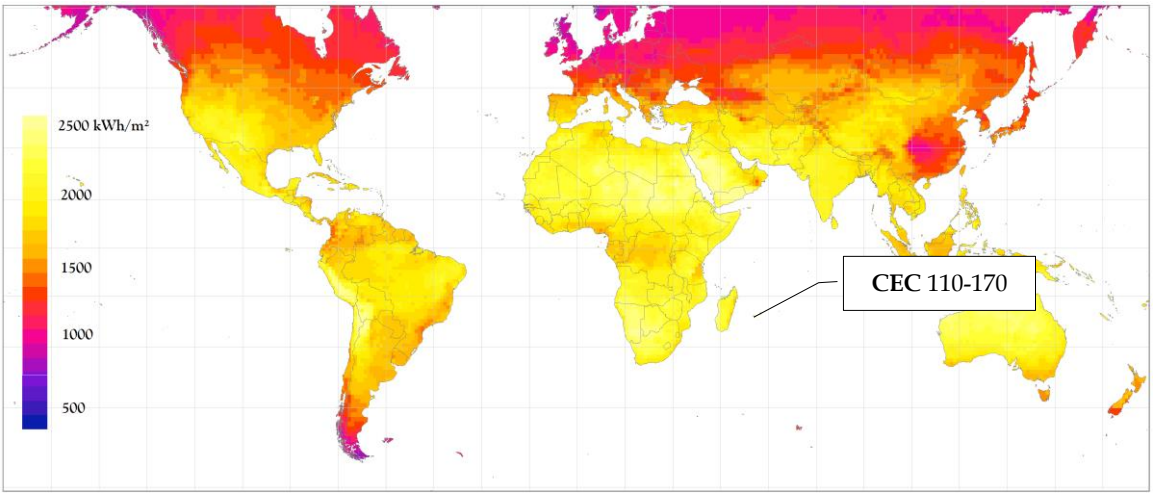


Figure 153 : Carte ensoleillement et Coefficients Empiriques Climatiques pour la gamme CEC 110-170

Comme nous l'ont confirmé les études en section 5.3.1 et 5.3.2, les **CEC 110-170** doivent être valables pour toutes zones géographiques dont les éclairements globaux maximaux extérieurs se situent entre 110 klux et 170 klux. Des études supplémentaires doivent être menées pour confirmer ces résultats. La carte d'ensoleillement étant conçue pour le rayonnement solaire, il serait judicieux de pouvoir obtenir les mêmes données pour l'éclairement lumineux.

Ce concept ouvre de nouvelles perspectives aux modèles semi-empiriques dédiés aux DGLT-R dont l'outil de génération de modèle (HEMERA), i.e. de génération des Coefficients Empiriques Climatiques, pourra en assurer l'établissement et la pérennisation.

7. Application : potentiel énergétique des DGLT-R

Dans le cadre du programme « Bâtiment l'horizon 2010 », l'ADEME a missionné la société Ingélux pour éditer un guide dans le cadre de l'étude des conduits de lumière naturelle. Les résultats ont permis notamment de présenter l'équivalence entre l'éclairage artificiel et l'éclairement naturel apporté par un DGLT-R pour les conditions météorologiques de la ville de Lyon (France) (ADEME 2010).

Nous cherchons à étudier la même équivalence pour les conditions climatiques réunionnaises dont le gisement solaire en fait une terre d'excellence pour l'utilisation de systèmes innovants en lumière naturelle.

Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle développé dans le cadre de ces travaux, nommé BMD. Ce dernier nous permet de déduire le flux lumineux en sortie du conduit de lumière utilisé pour différents types de jour.

$$\Phi_{LP,out} = \left(\tau_{dir\,TDGS}.E_{b,h} + \tau_{diff\,TDGS}.E_{d,h}\right).\boldsymbol{\pi}.\boldsymbol{R}^2.\boldsymbol{cos}\,\boldsymbol{\theta}_{(x,y,z)} \quad (203)$$

Nous évaluons le flux lumineux sous le diffuseur pour 3 journées caractéristiques (Figure 154). L'éclairement global extérieur du premier jour (24/11/2014) est proche de 140 klux, pour une contribution de la voûte céleste de l'ordre de 22 klux. La journée 08/09/2014, de type intermédiaire, présente un éclairement global de 82 klux. Le dernier jour est un jour couvert dont l'éclairement global est très proche de l'éclairement diffus avec un niveau avoisinant 50 klux.

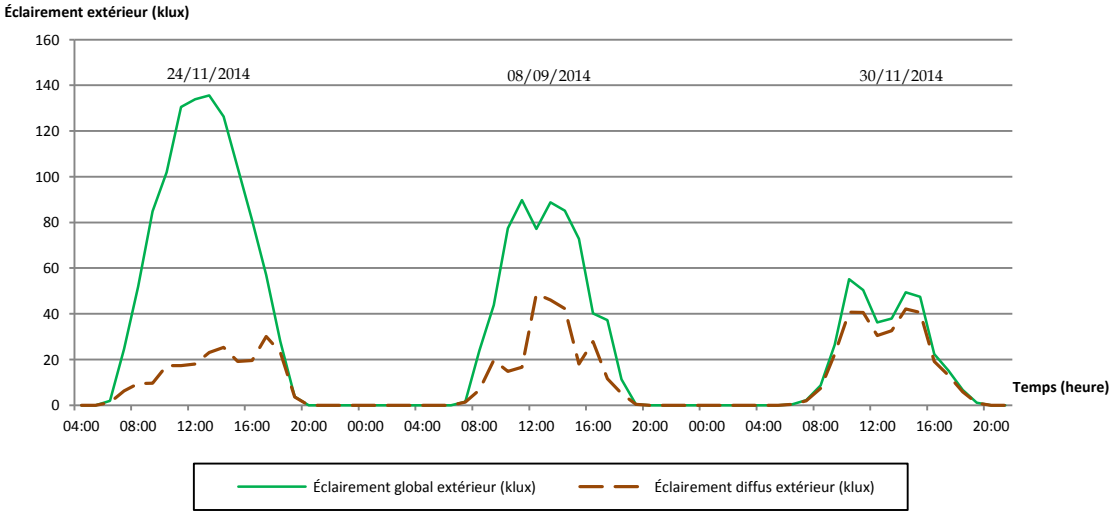


Figure 154 : Éclairement extérieur pour 3 journées type

La Figure 155 compare le flux lumineux en sortie du diffuseur par rapport aux flux délivrés par plusieurs dispositifs d'éclairage artificiel couramment utilisés dans le bâtiment. La variabilité de l'éclairement naturel fait que le conduit de lumière est très efficace les jours de ciel clair, mais

moins en ciel intermédiaire ou couvert. La prépondérance de l'éclairement direct par rapport à l'éclairement de la voûte céleste en est certainement la cause.

Ainsi, en ciel clair le flux lumineux atteint 6800 lm, ce qui est largement supérieur à un tube fluorescent de 56W qui ne délivre pas moins de 3400 lm. Nous voyons alors que l'apport lumineux du conduit de lumière est supérieur à ce dispositif d'éclairage artificiel de 10h00 à 16h00. En ciel intermédiaire, le DGLT-R a tendance à générer un flux lumineux identique à une ampoule halogène de 70W (1200 lm) pendant 1 heure le matin, ou à une ampoule à incandescence de 60W (710 lm) pendant pas moins de 6 heures. En ciel couvert, le dispositif d'éclairement naturel assure une heure de fonctionnement le matin équivalent à une ampoule à incandescence. Sur chaque jour, le conduit de lumière offre un flux lumineux largement supérieur à ce que pourrait fournir un luminaire à LED.

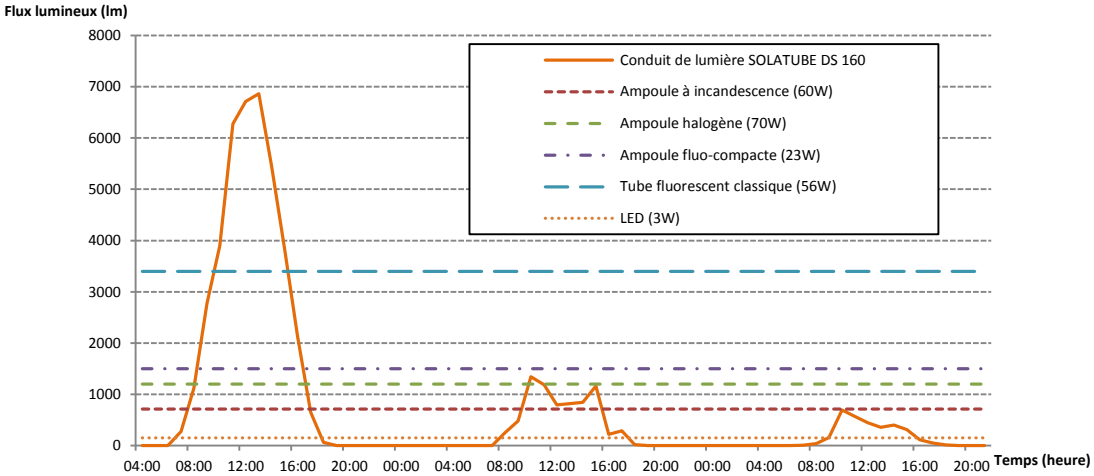


Figure 155 : Flux lumineux en sortie de conduit de lumière et flux équivalent en éclairage artificiel

Si nous nous intéressons à l'équivalence en puissance installée, nous pouvons évaluer le nombre de luminaire équivalent au conduit de lumière au sein de la pièce d'un bâtiment (Figure 156).

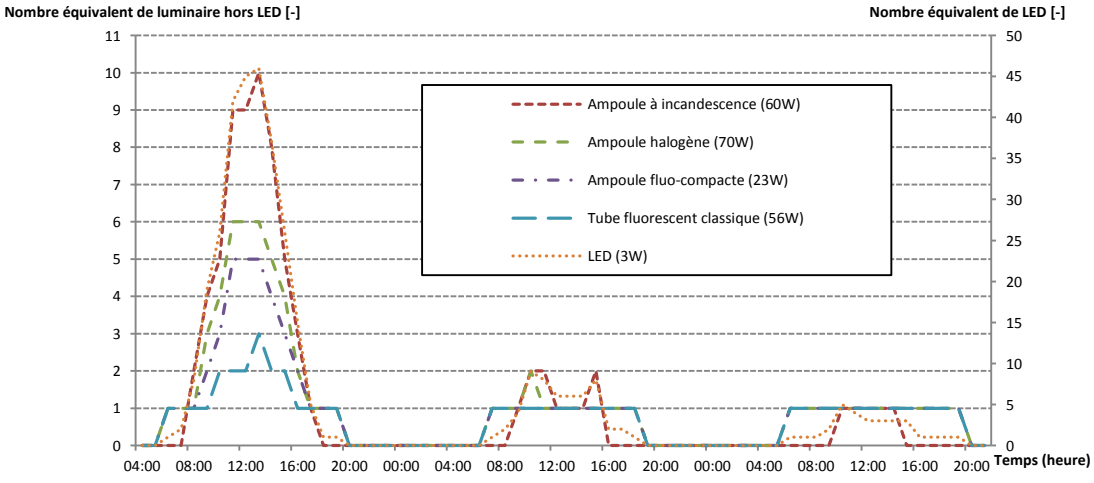


Figure 156 : Nombre de luminaire équivalent au conduit de lumière

Ainsi, sur une journée en ciel clair, le conduit de lumière est similaire à l'utilisation d'un tube fluorescent. Sur une période horaire fixe (6h00 à 19h00), cela représente 57 % du temps où l'éclairage artificiel est nécessaire ce qui permet une sauvegarde énergétique le reste du temps (près de 336 Wh) (Tableau 36). Le flux lumineux maximal en sortie du diffuseur est équivalent à 10 ampoules à incandescence allumées, ou 5 ampoules fluo-compactes (Figure 156). De même, le conduit de lumière assure une sauvegarde énergétique de 560 Wh, où l'éclairage artificielle ne serait utilisé que 43 % du temps (pour une ampoule halogène de 70 W). En ciel intermédiaire, l'appoint d'un luminaire est conseillé, notamment si nous souhaitons atteindre un flux lumineux équivalent à une ampoule halogène. La consommation électrique évitée n'est alors que de 70 Wh, contre 360 Wh pour atteindre un flux équivalent à une ampoule à incandescence (710 lm). En ciel couvert, l'association d'un luminaire au conduit de lumière est nécessaire, le dispositif de lumière naturelle étant équivalent à 5 LED allumés (Figure 156).

Tableau 36 : Occurrence d'utilisation de l'éclairage artificiel (période journalière de 6h00 à 19h00)

			Éclairage artificiel				
	Type de ciel	Critères	Ampoule à incandescence (710 lm - 60W)	Ampoule halogène (1200 lm - 70W)	Ampoule fluo-compacte (1500 lm - 23W)	Tube fluorescent classique (3400 lm - 56W)	LED (150 lm - 3W)
Éclairement naturel	Clair	% temps où $\Phi_{LP,out} < \Phi_{Luminaire}$	36%	43%	43%	57%	21%
		Consommation électrique évitée (Wh)	540	560	184	336	33
	Intermédiaire	% temps où $\Phi_{LP,out} < \Phi_{Luminaire}$	57%	93%	100%	100%	29%
		Consommation électrique évitée (Wh)	360	70	0	0	30
	Couvert	% temps où $\Phi_{LP,out} < \Phi_{Luminaire}$	100%	100%	100%	100%	50%
		Consommation électrique évitée (Wh)	0	0	0	0	21

L'utilisation de l'éclairage artificiel est un besoin absolu, mais non nécessaire lorsque la ressource solaire peut offrir une équivalence. Hormis l'apport bénéfique sur la psychologie et la physiologie humaine, la lumière naturelle peut générer des économies d'énergie remarquables dans un secteur énergivore comme le bâtiment. Zissis (Zissis 2006) précise que plus le niveau de vie de la société augmente, plus elle sera demandeuse de lumière artificielle. Le Certificat d'Économie d'Énergie attribué au conduit de lumière naturelle (BAT-EQ-131) montre que les dispositifs passifs peuvent être une réponse à cette tendance mondiale.

L'étude menée dans cette section montre, par exemple, qu'en ciel clair, le conduit de lumière permet d'éviter une consommation électrique à hauteur de 560 Wh, soit pas moins de 64 % du temps sur une journée où le soleil est présent (6h00 à 19h00). En ciel couvert, l'association de la technologie passive à celle active permet de créer une ambiance lumineuse de qualité. En effet,

l'éclairage artificiel, en fonction du luminaire utilisé, aura tendance à supprimer la production de mélatonine assurant un accroissement de la vigilance et donc une amélioration de la performance au travail. L'apport en lumière naturelle pourra ainsi équilibrer cette tendance, en assurant un espace de qualités tant dans la production que dans le bien-être de l'occupant (Damelincourt et al. 2010).

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

8. Synthèse du Chapitre V

Le cinquième chapitre nous a permis de valider la forme du modèle développé dans le cadre de ces travaux et ajustés par notre générateur de modèle, HEMERA.

L'approche BMD a été implémentée dans le code de calcul CODYRUN qui a servi de support pour les phases de validation menées.

Conformément à la méthodologie relevée à la fois dans la littérature, mais également conformément à la démarche du laboratoire, nous avons entrepris la validation suivant trois aspects :

- Analyse comparative intermodèle ;
- Analyse comparative expérimentale ;
- Analyse comparative interlogicielle.

Ces trois méthodes de validation ont permis d'approuver le modèle BMD pour les conditions climatiques proches ou similaires au profil d'éclairement ayant servi à l'ajustement des coefficients empiriques. Dans ce cadre, nous avons fait varier les conditions d'ensoleillement et les configurations d'étude.

Cette validation a permis de donner naissance à un nouveau concept, confirmé par les résultats des chapitres précédents : les Coefficients Empiriques Climatiques. Ils correspondent au jeu de valeurs associées aux coefficients empiriques ajustés par HEMERA. Ces CEC sont valables pour les zones dont les niveaux d'éclairement se situent dans la gamme associée. Ces travaux de thèse initient les premiers « CEC », référencés CEC 110-170.

Pour conclure ce dernier chapitre, nous nous sommes intéressés à l'équivalence lumineuse entre le conduit de lumière étudié et des luminaires en éclairage artificiel couramment installés dans les bâtiments. Sur la base de trois types de jour, nous avons montré qu'au mieux, le conduit de lumière apportait un flux lumineux au moins équivalent à 10 ampoules à incandescence. La sauvegarde énergétique associée permet d'approuver l'efficacité d'un tel dispositif d'autant plus s'il est associé à un éclairage artificiel de qualité.

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Conclusion générale & Perspectives

« Quand le passé n'éclaire plus l'avenir,
l'esprit marche dans les ténèbres. »

Alexis de Tocqueville

1. Conclusion générale

Ces travaux ont eu pour objet l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires (DGLT) appliqués au Bâtiment. Ils assurent trois fonctions à la fois : collecter la lumière naturelle extérieure, la transporter par le biais d'un tube, et la diffuser au sein de la pièce cible.

Au départ d'une synthèse bibliographique généraliste sur ces procédés innovants, nous nous sommes intéressés au DGLT-Réfléchissant, plus connu sous le nom de « conduit de lumière réfléchissant ». Le procédé associe un collecteur passif (dôme translucide), un conduit aux parois hautement réfléchissantes et un diffuseur prismatique. Ce choix a été guidé par l'intérêt scientifique international associé, la popularité commerciale et la présence de ce procédé sur l'île de La Réunion.

En s'intéressant aux avancées et aux verrous scientifiques liés à la modélisation du comportement du conduit de lumière, nous avons en premier lieu proposé une synthèse de la littérature sur les travaux de la communauté scientifique internationale. Nous avons pu constater que l'étude des DGLT-R a fait l'objet de nombreuses attentions, notamment dans la caractérisation de leurs performances (par le biais de modèles semi-empiriques ou théoriques). Dans certaines conditions, la littérature a également révélé que les approches empiriques offraient des résultats similaires aux modèles théoriques. Souhaitant nous inscrire dans une approche simplifiée assurant un transfert de connaissance efficace vers les applications en ingénierie, nous nous sommes naturellement intéressés à ces modèles. Une problématique simple en ressort : l'ensemble des approches recensées a été développé dans deux zones géographiques du globe où le gisement lumineux est faible. Les coefficients empiriques intrinsèques sont ajustés pour les conditions météorologiques bien définies. Ainsi, ces approches sont inapplicables dans d'autres climats, tels que celui de l'île de La Réunion où la ressource solaire est importante, sous peine de surestimer ou sous-estimer l'éclairement intérieur.

Pour corroborer ces hypothèses et observer le comportement photométrique du conduit de lumière réfléchissant, nous avons mené une expérimentation pluri-scénarios en condition météorologique réunionnaise sur une cellule expérimentale à échelle réelle. Contrairement à d'autres auteurs, nous n'avons étudié qu'un seul type de conduit de lumière dans une configuration géométrique fixe. Nous avons préféré nous orienter vers diverses configurations en lien avec la zone d'étude ou avec des technologies additives au DGLT-R. Il s'agissait ici d'apporter des éléments supplémentaires ou complémentaires à l'analyse expérimentale entamée depuis plusieurs années à l'internationale.

Nous avons constaté que la distribution lumineuse au sein de la pièce était fortement liée au type de ciel. En ciel couvert, le diffuseur se comporte comme une source orthotrope dont la diffusion suit une loi de Lambert. Le conduit de lumière réagit alors comme une boite noire, où le profil de

l'éclairement intérieur est similaire au profil de l'éclairement global extérieur. En ciel clair, l'éclairement intérieur devient directionnel (lié à la position du Soleil) et la loi de Lambert n'est alors plus valable.

Nous avons également pu comprendre l'impact photométrique de certains paramètres. Par exemple, nous avons remarqué que l'accroissement du coefficient de réflexion moyen pouvait engendrer une augmentation considérable de l'éclairement moyen intérieur. Ainsi, le passage d'une pièce sombre à claire permettait d'éviter pas moins de 37 % du temps l'utilisation d'une source lumineuse artificielle.

Fort de nos constats bibliographiques et expérimentaux, nous avons compris qu'il ne s'agissait pas de réutiliser le cheminement poursuivi par les auteurs de ces dernières décennies qui ne permettait d'offrir qu'une solution locale à un problème local. Ainsi, ces travaux ont permis de contribuer au lever des verrous scientifiques identifiés préalablement, par le biais :

- De la généralisation du protocole permettant d'obtenir le modèle semi-empirique. Cette volonté a donné naissance à HEMERA. Il associe les capacités d'un code de calcul en éclairagisme à la force des algorithmes génétiques lui conférant la capacité de générer des modèles en ajustant par optimisation des coefficients d'un modèle semi-empirique ;
- Du développement de deux nouvelles formes de modèle physique permettant de prédire le comportement du conduit de lumière. L'innovation s'inscrit dans la distinction des éclairements diffus et direct, et dans la proposition d'un nouveau modèle de diffusion de l'éclairement direct au sein de la pièce.

Nous avons poursuivi ces travaux sur la validation d'une des deux nouvelles formes développés compte tenu de son adaptabilité à nos conditions d'étude (conduit de lumière équipé d'un diffuseur prismatique). Celle-ci a été intégrée au code de calcul CODYRUN, ce dernier assurant une prise en compte plus globale des phénomènes physiques au sein d'un bâtiment. Conformément à la méthodologie relevée dans la littérature ainsi qu'à la démarche du laboratoire, nous avons entrepris notre analyse suivant trois aspects : comparaisons intermodèles, expérimentales et interlogicielles.

Ces trois méthodes de validation ont permis d'approuver le modèle développé et nommé « BMD » pour les conditions climatiques proches ou similaires au profil d'éclairement ayant servi à l'ajustement des coefficients empiriques.

Les observations bibliographiques, expérimentales et numériques ont permis de donner naissance à un nouveau concept : les Coefficients Empiriques Climatiques. Ils correspondent à la combinaison des coefficients empiriques ajustés par HEMERA. Ces CEC sont valables pour les zones dont les niveaux d'éclairement se situent dans la gamme associée. Ces travaux de thèse initient les premiers « CEC », référencés CEC 110-170.

Nous avons achevé ces travaux par une étude applicative s'intéressant à l'équivalence lumineuse entre le conduit de lumière étudié et des luminaires en éclairage artificiel couramment installés dans les bâtiments. La consommation électrique sauvegardée par ce dispositif innovant permet d'approuver l'efficacité du DGLT d'autant plus s'il est associé à un éclairage artificiel de qualité.

Nous concluons en précisant que la méthode utilisée ici pourrait être appliquée pour décrire de manière semi-empirique d'autres types de composants d'éclairement naturels appliqués au bâtiment.

Nous achevons ce mémoire en donnant les perspectives potentielles à la suite de ces travaux.

2. Perspectives

2.1. **Innovations technologiques**

Nous avons constaté que la collecte de la lumière était la fonction du conduit de lumière à optimiser. Dans ce cadre, nous sommes en train d'élaborer une nouvelle forme de collecteur assurant une captation plus importante de l'éclairement global extérieur.

Étant sensibles aux problématiques de développement durable, nous souhaiterions inscrire les DGLT-R dans un programme de réutilisation des déchets de collecte. Pour se faire, nous envisagerons d'identifier les matériaux recyclés aptes à offrir une réponse satisfaisante dans l'apport de lumière au sein de l'habitat.

2.2. **HEMERA et protocole de généralisation du modèle semi-empirique**

Nous intégrerons à HEMERA les modèles théoriques associés aux conduits de lumière. Une comparaison entre les modèles théoriques et semi-empiriques pourra être menée.

Nous souhaiterions améliorer le code de calcul développé en l'étendant à d'autres dispositifs innovants en éclairement naturel appliqués au bâtiment. Il s'agira alors de permettre à HEMERA de prendre compte les éléments suivants :

- Vitrages horizontaux et verticaux, simples ou innovants (avec approche multimodèle et multizone) ;
- Lanterneaux (avec approche multimodèle et multizone) ;
- Éclairage artificiel (avec proposition d'association à des dispositifs d'éclairement naturel).

Souhaitant rendre autonome notre code de calcul, nous envisageons de développer une méthode d'optimisation algorithmique et de la comparer à celle actuellement présente dans HEMERA.

Enfin, nous désirons appliquer la méthodologie semi-empirique appliquée dans le cadre de ces travaux à d'autres dispositifs en éclairement naturel.

2.3. **Modélisation des conduits de lumière et CEC**

Dans une problématique de modélisation photométrique, l'ensemble des approches recensées de la littérature et basées sur un facteur de transmission ne sera performant qu'en ciel couvert. En ciel clair, l'approche semi-empirique n'est pas juste. Pour se faire, nous comptons développés un modèle hybride en couplant les techniques de lancer de rayon (pour l'éclairement direct) et semi-empiriques pour l'éclairement diffus.

L'ensemble des modèles prend en compte une réflectivité du conduit « nominale ». Or, Edmonds (Edmonds 2010) a démontré par le biais d'une expérience que ce paramètre évoluait en fonction de l'angle d'incidence (voir chapitre II). Nous avons mené une expérience en laboratoire qui corrobore ces constatations. Nous souhaitons affiner notre modèle BMD en proposant une approche empirique des phénomènes de réflexion bidirectionnelle (loi retour-inverse) modifiée par l'état de surface. Pour la rendre applicable, nous la considérons comme un facteur de perte engendré par l'angle d'incidence.

Un autre paramètre a été ciblé par la CIE, mais n'a pas été prise en compte dans notre modèle compte tenu du manque d'information : le vieillissement de la technologie en condition d'ensoleillement accrue. Le facteur de transmission du dôme s'en verra forcément modifié en fonction du matériau qui le composera.

Les résultats de nos travaux ont notamment donné naissance aux Coefficients Empiriques Climatiques. Nous aimerions étendre ce concept à l'échelle internationale à la fois pour confirmer la nécessité de cette nouvelle approche, mais également afin de répondre plus globalement à la problématique de la modélisation des conduits de lumière. Une solution pourrait être d'appliquer une étude de similarité climatique à l'échelle internationale comme réalisée dans la publication (Malet-Damour et al. 2011).

Pour pouvoir considérer la dynamique annuelle de l'éclairement (été, intersaison, hiver, intersaison), nous souhaitons affiner nos CEC en travaillant sur une période expérimentale plus longue.

2.4. **Thermique de l'enveloppe**

Ce mémoire aurait dû comporter une étude thermique simplifiée du dispositif étudié, basée sur la prise de clichés par une caméra thermique. À la suite d'un défaut matériel, nous n'avons pas pu mener à bien notre investigation. Les mesures de l'émissivité de chacun des composants ayant été faites, nous souhaitons poursuivre cette analyse. Cette approche permettra également d'initier l'analyse thermophotométrique du DGLT-R en vue de la prise en compte de l'impact thermique du procédé dans la thermique de l'habitat.

2.5. **Dispositif expérimental**

Dans le cadre de notre étude expérimentale, nous avons conçu et fabriqué un anneau d'ombrage « low-cost » pour les mesures en éclairement diffus extérieur. La maintenance associée étant notable, nous souhaitons automatiser le dispositif. Une réflexion sur la nouvelle version de SHADECO est déjà en cours.

2.6. **Modèle d'efficacités lumineuses**

Comme nous l'avons ciblé au cours de ce mémoire, l'application du modèle BMD en l'état doit se faire par le biais des mesures décomposées de l'éclairement extérieur. Afin de pallier à un manque éventuel de données, nous souhaitons faire suite aux travaux initiés par (Fakra, Boyer, et al. 2011a), et d'établir une procédure simple de modélisation de l'efficacité lumineuse directe et diffuse. Le couplage d'HEMERA à un algorithme d'optimisation en fait un outil utilisable pour répondre à cette problématique.

Table des figures

Table des figures

FIGURE 1 : MODELE SIMPLIFIE DE LA DISTINCTION ENTRE ECLAIRAGE ARTIFICIEL ET ECLAIREMENT NATUREL 24
FIGURE 2 : CONSOMMATION D'ELECTRICITE SPECIFIQUE PAR USAGE DANS LE RESIDENTIEL 26
FIGURE 3 : ANNEE INTERNATIONALE DE LA LUMIERE ET DES TECHNIQUES UTILISANT LA LUMIERE 28
FIGURE 4 : SYNTHESE DES PROCEDES DE COLLECTE, TRANSPORT ET D'EMISSION 36
FIGURE 5 : PLAFOND ANIDOLIQUE 37
FIGURE 6 : CONCENTRATEUR ANIDOLIQUE COUPLE A UN CONDUIT CIRCULAIRE 38
FIGURE 7 : SOLAR CANOPY ILLUMINATION SYSTEM 38
FIGURE 8 : *LUMINESCENT SOLAR CONTRACTORS (LSC)* 39
FIGURE 9 : COLLECTEUR REFLECTIF 40
FIGURE 10 : DISPOSITIF DE DUC HIEN ET CHIRARATTANANON 40
FIGURE 11 : LASER CUT PANELS (LCP) 41
FIGURE 12 : COLLECTEURS LCP ETUDIES PAR HANSEN 42
FIGURE 13 : COLLECTEUR SKYVAULT DE SOLATUBE® 42
FIGURE 14 : DIFFERENTES FORMES DE DOME 43
FIGURE 15 : COLLECTEUR REFLECTIF DU PROJET ARTHELIO 44
FIGURE 16 : CONCENTRATEUR LUMINEUX ACTIF DU PROJET ARTHELIO 44
FIGURE 17 : A) SYSTEME PARANS B) SYSTEME HIMAWARI 45
FIGURE 18 : COLLECTEUR HSL 45
FIGURE 19 : DIFFERENTES METHODES DE TRANSMISSION DES RAYONS LUMINEUX FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE DES RAYONS 46
FIGURE 20 : SCHEMA CONDUIT PRISMATIQUE 46
FIGURE 21 : CONDUIT PRISMATIQUE UTILISE POUR TRANSPORTER ET DISTRIBUER LA LUMIERE 47
FIGURE 22 : TRANSPORT PAR SUPERPOSITION DE LENTILLES CONVERGENTES ET DIVERGENTES 48
FIGURE 23 : SYSTEME HIMAWARI 49
FIGURE 24 : TIGE DE LUMIERE – LIGHT RODS 49
FIGURE 25 : CONDUIT DE LUMIERE REFLECHISSANT EQUIPE D'UN DOME TRANSLUCIDE – SYSTEME SOLATUBE 50
FIGURE 26 : DISPOSITIF DE CONDUIT HORIZONTAL PROPOSE PAR CANZIANI 51
FIGURE 27 : ASSOCIATION CONCENTRATEUR ANIDOLIQUE / CONDUIT HORIZONTAL REFLECHISSANT 51
FIGURE 28 : CONFIGURATION D'INCLINAISON POSSIBLE PAR RAPPORT AU TOIT POUR LES CONDUITS DE LUMIERE 52
FIGURE 29 : PRINCIPE DE L'EXTRACTION LUMINEUSE SELON EDMONDS 53
FIGURE 30 : *DOUBLE LIGHT PIPE* – DLP 54
FIGURE 31 : A) *SOLAR LIGHT FLUX EMITTER* B) SYSTEME PARANS 54
FIGURE 32 : UTILISATION DE LA TECHNOLOGIE LCP EN TANT QUE DIFFUSEUR 55
FIGURE 33 : DIFFERENTES SURFACES DE DIFFUSION 55
FIGURE 34 : DISPOSITIFS D'APPORT DE LUMIERE NATURELLE SUIVANT LE CONCEPT EGYPTIEN 56
FIGURE 35 : TEMPLE D'ABOU SIMBEL 57

FIGURE 36 : TEMPLE DE SETHI IER A ABYDOS (VALLEE DES ROIS, EGYPTE) 57
FIGURE 37 : ARTICLE DE PRESSE SUR L'INNOVATION DE CHAPPUIS 57
FIGURE 38 : ÉVOLUTION DU DOME AU COURS DES 30 DERNIERES ANNEES 58
FIGURE 39 : MODELE DE CONDUIT DE LUMIERE CYLINDRIQUE AVEC DES COORDONNEES RECTANGULAIRE 78
FIGURE 40 : PROPAGATION D'UN RAYON DANS UN COUDE 80
FIGURE 41 : HEURES CUMULEES ANNUELLES EN FONCTION DU FLUX LUMINEUX EN SORTIE D'UN CONDUIT DROIT ET COURBE 94
FIGURE 42 : ÉVOLUTION DES PARAMETRES SOUS L'ECLAIREMENT DIRECT 96
FIGURE 43 : ÉVOLUTION DES PARAMETRES SOUS L'ECLAIREMENT DIFFUS 97
FIGURE 44 : COMPARAISON DES TRANSMISSIONS DES CONDUITS DE LUMIERE EN FONCTION DU PARAMETRE *AP* 98
FIGURE 45 : PROPAGATION DU RAYON EN FONCTION DE LA HAUTEUR SOLAIRE (ANGLE D'INCIDENCE) 101
FIGURE 46 : REFLECTIVITE DE CONDUITS RECTANGULAIRE ET TRIANGULAIRE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE 102
FIGURE 47 : TRANSMITTANCE DU CONDUIT EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE DES RAYONS ENTRANTS 102
FIGURE 48 : ENSOLEILLEMENT GLOBAL ANNUEL ET REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES MODELES SEMI-EMPIRIQUES 105
FIGURE 49 : ILE DE LA REUNION ET SES 4 ZONES CLIMATIQUES 111
FIGURE 50 : DISTRIBUTION HORAIRE DE L'ECLAIREMENT GLOBAL EXTERIEUR DE LA VILLE DE SAINT PIERRE 112
FIGURE 51 : PLATEFORME EXPERIMENTALE - IUT SAINT PIERRE (LA REUNION) 114
FIGURE 52 : CELLULE LGI - VUES EXTERIEURES AVANT MODIFICATION 114
FIGURE 53 : CELLULE LGI - VUES INTERIEURES AVANT MODIFICATION 115
FIGURE 54 : ORIENTATION DE LA LGI 115
FIGURE 55 : MODIFICATION DE LA CELLULE LGI 116
FIGURE 56 : A) SOLIN ADAPTE AUX TOLES ONDULEES B) COUPOLE, AVEC LE SYSTEME LIGHT TRACKER™ 118
FIGURE 57 : A) ZONE D'ETUDE B) COUPE SCHEMATIQUE TRANSVERSALE DE LA ZONE « COMBLE » EQUIPEE DU CONDUIT 118
FIGURE 58 : A) VUE EN COUPE DE LA CELLULE LGI B) VUE DE DESSOUS DE LA LGI 120
FIGURE 59 : COMPARATIF MODELE 3D/REALITE POUR LA JOURNEE DU 20 MAI 2013 A 8H55. 121
FIGURE 60 : LE TSI POSITIONNE DANS L'AXE DU COLLECTEUR 122
FIGURE 61 : CLICHE DU TSI DANS LE PLAN DU COLLECTEUR 122
FIGURE 62 : POSITION DES LUXMETRES A L'INTERIEUR DE LA PIECE 124
FIGURE 63 : LUXMETRES EXTERIEURS POUR LES ECLAIREMENTS DIFFUS ET GLOBAL 125
FIGURE 64 : ÉVOLUTION DE L'ECLAIREMENT GLOBAL ET LIMITE DU LUXMETRE EXTERIEUR 126
FIGURE 65 : FONCTIONNEMENT DE L'ANNEAU D'OMBRAGE DANS LE REPERE GLOBAL 128
FIGURE 66 : FONCTIONNEMENT DE L'ANNEAU D'OMBRAGE DANS LE REPERE LOCAL 129
FIGURE 67 : COURSE DU SOLEIL DANS L'HEMISPHERE SUD 129
FIGURE 68 : ANNEAU DE DRUMMOND 130
FIGURE 69 : ANNEAU DE ROBINSON 131
FIGURE 70 : ANNEAU CM121B 131

FIGURE 71 : ANNEAU DE BROOKS 132
FIGURE 72 : ANNEAU MDD 132
FIGURE 73 : TETE DE MESURE D'ECLAIREMENT LUMINEUX TYPE FLA 613 VLM 133
FIGURE 74 : DECOMPOSITION TERMINOLOGIQUE DU CAPTEUR 133
FIGURE 75 : IMPACT DE LA HAUTEUR SOLAIRE SUR L'OMBRE 134
FIGURE 76 : REGLAGE DE L'HORIZONTALITE DU CAPTEUR 136
FIGURE 77 : A) PIECE USINEE SELON LA LATITUDE DU LIEU B) BANDE U DE RAYON 30 CM 137
FIGURE 78 : A) MODELISATION 3D DE SHADECO B) SHADECO REALISE 137
FIGURE 79 : VUE DE LA BANDE DANS LA POSITION DU CAPTEUR 138
FIGURE 80 : CAS D'ETUDE N°1 147
FIGURE 81 : ÉVOLUTION HORAIRE DES ECLAIREMENTS EXTERIEUR ET INTERIEUR POUR UNE JOURNEE DE CIEL CLAIR 149
FIGURE 82 : DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE DE L'ECLAIREMENT INTERIEUR AU SEIN DE LA PIECE EN CIEL CLAIR 150
FIGURE 83 : A) TACHE SOLAIRE AVEC DIFFUSEUR B) TACHE SOLAIRE SANS DIFFUSEUR 151
FIGURE 84 : ÉVOLUTION HORAIRE DES ECLAIREMENTS EXTERIEUR ET INTERIEUR POUR UNE JOURNEE DE CIEL COUVERT 153
FIGURE 85 : DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE DE L'ECLAIREMENT INTERIEUR AU SEIN DE LA PIECE EN CIEL COUVERT 154
FIGURE 86 : SCHEMATISATION DE LA CONSTATATION EXPERIMENTALE 155
FIGURE 87 : VARIATION DU COEFFICIENT DE REFLEXION MOYEN DE LA ZONE 156
FIGURE 88 : ÉVOLUTION DES ECLAIREMENTS GLOBAUX EXTERIEURS ET RATIO D'ÉCLAIREMENT INTÉRIEUR MOYEN HORAIRE DE 1 ET 10 158
FIGURE 89 : ÉVOLUTION DES ECLAIREMENTS GLOBAUX EXTERIEURS ET RATIO D'ECLAIREMENT INTERIEUR MOYEN HORAIRE DE 7 ET 10 159
FIGURE 90 : ÉVOLUTION DES ECLAIREMENTS GLOBAUX EXTERIEURS ET RATIO D'ECLAIREMENT INTERIEUR MOYEN HORAIRE DE 8 ET 10 160
FIGURE 91 : ÉVOLUTION DES ECLAIREMENTS GLOBAUX EXTERIEURS ET RATIO D'ECLAIREMENT INTERIEUR MOYEN HORAIRE DE 9 ET 10 161
FIGURE 92 : ÉVOLUTION DE L'ECLAIREMENT INTERIEUR EN FONCTION DU COEFFICIENT DE REFLEXION MOYEN DE LA ZONE 162
FIGURE 93 : SOUS DOME ANTICYCLONIQUE 163
FIGURE 94 : SCHEMATISATION DE LA LOI DE BOUGUER 169
FIGURE 95 : ÉVOLUTION DE LA SURFACE APPARENTE DE LA SOURCE 170
FIGURE 96 : TRAJECTOIRE THEORIQUE D'UN RAYON DANS LE TUBE (DANS L'AXE DU CONDUIT) 173
FIGURE 97 : TRAJECTOIRE THEORIQUE D'UN RAYON DANS LE TUBE (EXCENTRE DE L'AXE DU CONDUIT) 173
FIGURE 98 : TRAJECTOIRE EXPERIMENTAL D'UN RAYON DANS LE TUBE (EXCENTRE DE L'AXE DU CONDUIT) 174
FIGURE 99 : SCHEMA DE PRISE EN COMPTE DE L'ANGLE AZIMUTALE N 177
FIGURE 100 : SCHEMA DE PRISE EN COMPTE DE L'INCLINAISON DU COLLECTEUR 177
FIGURE 101 : ILLUSTRATION DE L'APPROCHE CHOISIE 181
FIGURE 102 : FENETRE PRINCIPALE D'HEMERA 183
FIGURE 103 : FENETRE DE DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE 183
FIGURE 104 : FENETRE DE DESCRIPTION DU CONDUIT DE LUMIERE ET CHOIX DU MODELE ASSOCIE 184
FIGURE 105 : SYNOPTIQUE FONCTIONNELLE D'HEMERA 186

FIGURE 106 : SYNOPTIQUE FONCTIONNEL DE L'ALGORITHME GENETIQUE 188
FIGURE 107 : GENERATEUR DE FICHIER METEOROLOGIQUE 192
FIGURE 108 : EXEMPLE D'EVALUATION DES TYPES DE JOUR SUR LA BASE DE L'INDICE SR 197
FIGURE 109 : JOURS DEDIES A LA BASE D'APPRENTISSAGE EN ETE (ΔT = 10 MIN) 198
FIGURE 110 : JOURS DEDIES A LA BASE D'APPRENTISSAGE EN HIVER (ΔT = 10 MIN) 199
FIGURE 111 : COMPARAISON DES RESULTATS DU MODELE BMD 1 PAR RAPPORT AUX MESURES EN A6 205
FIGURE 112 : COMPARAISON DES RESULTATS DU MODELE BMD 2 PAR RAPPORT AUX MESURES EN A4 207
FIGURE 113 : COMPARAISON DES MODELES EN CIEL CLAIR (ΔT = 10 MIN) 211
FIGURE 114 : APPROXIMATION SPHERIQUE 213
FIGURE 115 : SCHEMA DE LA BOITE PHOTOMETRIQUE 221
FIGURE 116 : EXPERIMENTATION DE SU 221
FIGURE 117 : DECOMPOSITION DU BATIMENT SOUS CODYRUN 224
FIGURE 118 : SCHEMATISATION DE LA METHODE « SPLIT FLUX » 225
FIGURE 119 : SCHEMATISATION DE LA PRISE EN COMPTE DE L'ECLAIREMENT DIRECT 225
FIGURE 120 : SCHEMATISATION DE LA PRISE EN COMPTE DE L'ECLAIRAGE ARTIFICIEL 226
FIGURE 121 : MODELISATION DE L'ECLAIRAGE ARTIFICIEL 226
FIGURE 122 : FENETRE DE CONFIGURATION DU CONDUIT DE LUMIERE SOUS CODYRUN 227
FIGURE 123 : FENETRE DE CHOIX DU MODELE DE CALCUL POUR LES CONDUITS DE LUMIERE SOUS CODYRUN 228
FIGURE 124 : CARACTERISATION DES MASQUES ENVIRONNANTS DU CONDUIT ETUDIE SELON LEURS HAUTEURS ANGULAIRES 229
FIGURE 125 : CONFIGURATION DES MASQUES ENVIRONNANTS SOUS CODYRUN 230
FIGURE 126 : ÉCLAIREMENTS EXTERIEURS GLOBAUX ET DIFFUS DU 27/11/2014 ET 28/11/2014 231
FIGURE 127 : COMPARAISON DES RESULTATS D'HEMERA ET DE CODYRUN POUR LES 27/11/2014 ET 28/11/2014 (ΔT=60 MIN) 231
FIGURE 128 : CAS TEST N°1 : CELLULE LGI AVEC PAROIS NOIRES 232
FIGURE 129 : CONFRONTATION INTERMODELE EN CLIMAT REUNIONNAIS AU PAS DE TEMPS HORAIRE 233
FIGURE 130 : CONFRONTATION INTERMODELE EN CLIMAT REUNIONNAIS AU PAS DE TEMPS DE 10 MIN 234
FIGURE 131 : A) BATIMENT BESTEST INITIAL B) BATIMENT BESTEST* ETUDIE 235
FIGURE 132 : ÉCLAIREMENT INTERIEUR SOUS DIFFUSEUR - CAS BESTEST* 236
FIGURE 133 : ÉCART ENTRE LE MODELE BMD ET LES MESURES SOUS DIFFUSEUR - CAS N°1 239
FIGURE 134 : ÉCLAIREMENT GLOBAL EXTERIEUR POUR LA JOURNEE DU 19/09/2014 240
FIGURE 135 : COMPARAISON DES MODELES EN CIEL INTERMEDIAIRE (ΔT = 10 MIN) 240
FIGURE 136 : ÉCLAIREMENT GLOBAL EXTERIEUR POUR LA JOURNEE DU 21/09/2014 241
FIGURE 137 : COMPARAISON DES MODELES EN CIEL INTERMEDIAIRE (ΔT = 10 MIN) 241
FIGURE 138 : ÉCART ENTRE LE MODELE BMD ET LES MESURES SOUS DIFFUSEUR – CAS N°2 245
FIGURE 139 : ÉCLAIREMENTS GLOBAUX EXTERIEURS POUR LES 18/01/2014 ET 19/01/2014 246
FIGURE 140 : COMPARAISON DES MODELES EN CIEL CLAIR POUR LES 18/01/2014 ET 19/01/2014 (ΔT = 60 MIN) 246

FIGURE 141 : ÉCLAIREMENTS GLOBAUX EXTERIEURS POUR LES 14/01/2014 ET 15/01/2014 247

FIGURE 142 : COMPARAISON DES MODELES POUR LE 14/01/2014 ET 15/01/2014 (ΔT = 60 MIN) 247

FIGURE 143 : DONNEES DU FICHIER ELUMDAT POUR LE SOLATUBE DS 160 250

FIGURE 144 : MODELISATION DES CONDUITS DE LUMIERE SOUS ENERGYPLUS 252

FIGURE 145 : SIMULATION DE LA CELLULE LGI SOUS ENERGYPLUS 253

FIGURE 146 : VISUALISATION DU BATIMENT SOUS CODYRUN 253

FIGURE 147 : ÉCLAIREMENT EXTERIEUR EN CLIMAT REUNIONNAIS 254

FIGURE 148 : CONFRONTATION INTERLOGICIELLE DE L'ECLAIREMENT SOUS DIFFUSEUR POUR LA VILLE DE SAINT PIERRE (LA REUNION) 255

FIGURE 149 : ÉCLAIREMENT EXTERIEUR POUR LA VILLE DE PHOENIX (ARIZONA) 256

FIGURE 150 : CONFRONTATION INTERLOGICIELLE DE L'ECLAIREMENT SOUS DIFFUSEUR POUR LA VILLE DE PHOENIX (ARIZONA) 256

FIGURE 151 : ÉCLAIREMENT EXTERIEUR POUR LA VILLE D'OLYMPIA (WASHINGTON) 257

FIGURE 152 : CONFRONTATION INTERLOGICIELLE DE L'ECLAIREMENT SOUS DIFFUSEUR POUR LA VILLE D'OLYMPIA (WASHINGTON) 258

FIGURE 153 : CARTE ENSOLEILLEMENT ET COEFFICIENTS EMPIRIQUES CLIMATIQUES POUR LA GAMME CEC 110-170 260

FIGURE 154 : ÉCLAIREMENT EXTERIEUR POUR 3 JOURNEES TYPE 261

FIGURE 155 : FLUX LUMINEUX EN SORTIE DE CONDUIT DE LUMIERE ET FLUX EQUIVALENT EN ECLAIRAGE ARTIFICIEL 262

FIGURE 156 : NOMBRE DE LUMINAIRE EQUIVALENT AU CONDUIT DE LUMIERE 262

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : LES DGLT-R DANS L'INDUSTRIE 60
TABLEAU 2 : COEFFICIENTS EMPIRIQUES DU MODELE DE ZHANG 67
TABLEAU 3 : COEFFICIENTS EMPIRIQUES DU MODELE DE SU 76
TABLEAU 4 : VALEURS DE TTE POUR UN CONDUIT AVEC UNE REFLECTIVITE DE 90,5% 91
TABLEAU 5 : LONGUEUR EQUIVALENTE DE CONDUIT DROIT PRESENTANT DES PERTES OPTIQUES SIMILAIRES A UN CONDUIT COURBE 91
TABLEAU 6 : FACTEURS D'UTILISATION 92
TABLEAU 8 : CARACTERISTIQUES DU CONDUIT DE LUMIERE SOLATUBE 117
TABLEAU 9 : CARACTERISTIQUES DIMENSIONNELLES DE LA NOUVELLE LGI 119
TABLEAU 10 : SYNTHESE DES RESULTATS DES OMBRES PORTEES DU SOLVEUR SKETCHUP 121
TABLEAU 11 : CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS UTILISES 123
TABLEAU 12 : POSITION DES LUXMETRES INTERIEURS 124
TABLEAU 13 : ÉVOLUTION DE L'OMBRE MASQUANT LE CAPTEUR AU COURS DE L'ANNEE 138
TABLEAU 14 : SCENARIOS D'ETUDE EXPERIMENTALE 146
TABLEAU 15 : COEFFICIENT DE REFLEXION MOYEN 156
TABLEAU 16 : RESULTATS DE L'ETUDE SUR L'IMPACT DU DOME SUR LA TRANSMISSION LUMINEUSE 163
TABLEAU 17 : ERREURS SUR LES MESURES DES LUXMETRES 190
TABLEAU 18 : COMPOSITION DES FICHIERS METEOROLOGIQUES DE TYPE « MT » 191
TABLEAU 19 : SYNTHESE DES FORMES DE MODELE DEVELOPPEES A EVALUER 194
TABLEAU 22 : PARAMETRES DE L'ALGORITHME GENETIQUE POUR LA SECTION 3 200
TABLEAU 23 : RESULTATS STATISTIQUES SUR LA FIABILITE DES MODELES AU PAS DE TEMPS HORAIRE POUR LES POINTS A0 A A4 202
TABLEAU 24 : RESULTATS STATISTIQUES SUR LA FIABILITE DES MODELES AU PAS DE TEMPS HORAIRE POUR LES POINTS A5 A A8 204
TABLEAU 25 : RESULTATS STATISTIQUES SUR LA FIABILITE DES MODELES AU PAS DE TEMPS DE 10 MIN POUR LES POINTS A0 A A4 206
TABLEAU 26 : RESULTATS STATISTIQUES SUR LA FIABILITE DES MODELES AU PAS DE TEMPS DE 10 MIN POUR LES POINTS A5 A A8 208
TABLEAU 27 : COEFFICIENTS AJUSTES DU MODELE BMD 1 209
TABLEAU 28 : COEFFICIENTS AJUSTES DU MODELE ZHANG « TROPICALISE » 210
TABLEAU 29 : BASE DE DONNEES DE VALIDATION POUR LE CAS N°1 237
TABLEAU 30 : RESULTATS STATISTIQUES DES MODELES SELECTIONNES SUR LA PERIODE COMPLETE (ΔT = 10 MIN) 238
TABLEAU 31 : BASE DE DONNEES DE VALIDATION POUR LE CAS N°2 242
TABLEAU 32 : RESULTATS STATISTIQUES DES MODELES SELECTIONNES SUR LA PERIODE HIVERNALE (ΔT = 10 MIN) 243
TABLEAU 33 : RESULTATS STATISTIQUES DES MODELES SELECTIONNES SUR LA PERIODE ESTIVALE (ΔT = 10 MIN) 244
TABLEAU 34 : SYNTHESE DE L'INVENTAIRE DES CODES DE CALCUL RECENSES 248
TABLEAU 35 : PARAMETRES POUR LES SIMULATIONS SOUS ENERGYPLUS 252
TABLEAU 36 : OCCURRENCE D'UTILISATION DE L'ECLAIRAGE ARTIFICIEL (PERIODE JOURNALIERE DE 6H00 A 19H00) 263

Références bibliographiques

Adelard, L, H Boyer, F Garde, and J.-C Gatina. 2000. "**A Detailed Weather Data Generator for Building Simulations**." *Energy and Buildings* 31 (1): 75–88. doi:10.1016/S0378-7788(99)00009-2.

Adelard, L., F. Pignolet-Tardan, T. Mara, P. Lauret, F. Garde, and H. Boyer. 1998. "**Sky Temperature Modelisation and Applications in Building Simulation**." *Renewable Energy Energy Efficiency, Policy and the Environment*, 15 (1–4): 418–30. doi:10.1016/S0960-1481(98)00198-0.

ADEME. 2010. "**Guide de Dimensionnement Des Conduits de Lumière Naturelle**."

AITF. 2005. "**Eclairage Intérieur Guide Technique**." EDF

Al-Marwaee, Mohammed, and David Carter. 2006. "**Tubular Guidance Systems for Daylight: Achieved and Predicted Installation Performances.**" *Applied Energy* 83 (7): 774–88. doi:10.1016/j.apenergy.2005.08.001.

Amauri P. de Oliveira, João F. Escobedo. 2002. "**A New Shadow-Ring Device for Measuring Diffuse Solar Radiation at the Surface**." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19: 698–708.

ARER. 2010. "**Consommations énergétiques Des Ménages Réunionnais.**" ARER - OER.

Ayers, M. J., and D. J. Carter. 1995. "**Remote Source Electric Lighting Systems: A Review.**" *Lighting Research and Technology* 27 (1): 1–15. doi:10.1177/14771535950270010501.

Baroncini, C., O. Boccia, F. Chella, and P. Zazzini. 2010. "**Experimental Analysis on a 1:2 Scale Model of the Double Light Pipe, an Innovative Technological Device for Daylight Transmission.**" *Solar Energy* 84 (2): 296–307. doi:10.1016/j.solener.2009.11.011.

Basher, Reid E. 1984. "**The Correction of Diffuse Radiation Measurements Made with Shade Band Apparatus**". *New Zealand Meteorological Service.*

Battles, F. J., F. J. Olmo, and L. Alados-Arboledas. 1995. "**On Shadowband Correction Methods for Diffuse Irradiance Measurements.**" *Solar Energy* 54 (2): 105–14. doi:10.1016/0038-092X(94)00115-T.

Bertolo, Louis, and Bernard Bourges. 2014. "**Données climatiques utilisées dans le bâtiment**." *Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique* 3 (B2015): B2015.1–B2015.28. Accessed April 3.

Bigot, Dimitri. 2011. "**Contribution à l'étude du couplage énergétique enveloppe / système dans le cas de parois complexes photovoltaïques (PC - PV)**." Phd Thesis, Université de La Réunion.

Boyer, Harry. 1993. "**Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones.Proposition d'un outil à choix multiples.**" PhD Thesis, Lyon: Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon.

Boyer, Harry, Milorad Bojic, Habiba Ennamiri, Didier Calogine, and Stéphane Guichard. 2012. "**Interroom Radiative Couplings through Windows and Large Openings in Buildings: Proposal of a Simplified Model.**" *JP Journal of Heat and Mass Transfer* 6 (2): 191–211.

Boyer, H., J. P. Chabriat, B. Grondin-Perez, C. Tourrand, and J. Brau. 1996. "**Thermal Building Simulation and Computer Generation of Nodal Models**." *Building and Environment* 31 (3): 207–14. doi:10.1016/0360-1323(96)00001-7.

Boyer, H., F. Garde, J. C. Gatina, and J. Brau. 1998. "**A Multimodel Approach to Building Thermal Simulation for Design and Research Purposes**." *Energy and Buildings* 28 (1): 71–78. doi:10.1016/S0378-7788(97)00064-9.

Boyer, H., A.P. Lauret, L. Adelard, and T.A. Mara. 1999. "**Building Ventilation: A Pressure Airflow Model Computer Generation and Elements of Validation.**" *Energy and Buildings* 29 (3): 283–92. doi:10.1016/S0378-7788(98)00068-1.

BRE. 1986. "**Estimating Daylight in Building : Part 1 and 2 / Diggest 309 and 310.**" *Building Research Etablishment Digest.*

Brooks, Michael J. 2010. "**Performance Characteristics of a Perforated Shadow Band under Clear Sky Conditions**." *Solar Energy* 84 (12): 2179–94. doi:10.1016/j.solener.2010.08.010.

Burek, S. A. M., B. Norton, and S. D. Probert. 1988. "**Analytical and Experimental Methods for Shadow-Band Correction Factors for Solarimeters on Inclined Planes under Isotropically Diffuse and Overcast Skies.**" *Solar Energy* 40 (2): 151–60. doi:10.1016/0038-092X(88)90084-9.

Callow, Joel. 2003. "**Daylighting Using Tubular Light Guide Systems.**" PhD Thesis University of Nottingham.

Canziani, R., F. Peron, and G. Rossi. 2004. "**Daylight and Energy Performances of a New Type of Light Pipe.**" *Energy and Buildings* 36 (11): 1163–76. doi:10.1016/j.enbuild.2004.05.001.

Carter, D. J. 2002. "**The Measured and Predicted Performance of Passive Solar Light Pipe Systems.**" *Lighting Research and Technology* 34 (1): 39–51. doi:10.1191/1365782802li029oa.

Chella, Fabrizio, Paolo Zazzini, and Graziano Carta. 2006. "**Compared Numerical and Reduced Scale Experimental Analysis on Light Pipes Performances.**" In *Proceedings of the 5 Th International Conference on Sustainable Energy Technologies SET*. Vol. 30.

Chirarattananon, Surapong, Siriwat Chedsiri, and Liu Renshen. 2000. "**Daylighting through Light Pipes in the Tropics.**" *Solar Energy* 69 (4): 331–41. doi:10.1016/S0038-092X(00)00081-5.

Chirarattananon, S., V. D. Hien, P. Chaiwiwatworakul, and P. Chirarattananon. 2010. "**Simulation of Transmission of Daylight through Cylindrical Light Pipes.**" *Journal of Sustainable Energy & Environment* 1 (3): 97–103.

CIBSE. 1987. "**Window Design, Application Manual**." *Chartered Institution of Building Services Engineers.*

Clarke, J. A. 2001. "**Energy Simulation in Building Design 2**". *ed. Oxford: Butterworth-Heinemann*.

Courret, Gilles. 1999. "**Systèmes Anidoliques D'éclairage Naturel.**" PhD Thesis *EPFL*. doi:10.5075

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

Damelincourt, Jean-Jacques, Georges Zissis, Christian Corbé, and Bernard Paule. 2010. "**Éclairage D'intérieur et Ambiances Visuelles**". *TEC&DOC. Lavoisier.*

Darula, Stanislav, Richard Kittler, and Miroslav Kocifaj. 2010. "**Luminous Effectiveness of Tubular Light-Guides in Tropics.**" *Applied Energy* 87 (11): 3460–66. doi:10.1016/j.apenergy.2010.05.006.

Darula, Stanislav, Miroslav Kocifaj, Richard Kittler, and František Kundracik. 2010. "**Illumination of Interior Spaces by Bended Hollow Light Guides: Application of the Theoretical Light Propagation Method**." *Solar Energy* 84 (12): 2112–19. doi:10.1016/j.solener.2010.09.003.

Delétré, JJ. 2001. "**Données de Base Pour L'éclairage Des Bureaux.**" Laboratoire CRESSON - École d'Architecture de Grenoble.

Detrie, Antoine. 2007. "**Besoins et Consommations D'énergie Dans Les Bâtiments Synthèse Bibliographique Etudes de Cas.**" ESE/DE/PEB-2007.161T. CSTB.

Dobrre, Oana, and Gilbert Achard. 2005. "**Optical Simulation of Lighting by Hollow Light Pipes**." In , 263–70. Montréal, Canada.

Drummond, A. J. 1956. "**On the Measurement of Sky Radiation.**" *Archiv Für Meteorologie, Geophysik Und Bioklimatologie, Serie B* 7 (3-4): 413–36. doi:10.1007/BF02242969.

Drummond. 1964. "**Comments on 'Sky Radiation Measurement and Corrections.'**" *Journal of Applied Meteorology* 3 (6): 810–11. doi:10.1175/1520-0450(1964)0032.0.CO;2.

Duc Hien, Vu, and Surapong Chirarattananon. 2007. "**Daylighting through Light Pipe for Deep Interior Space of Buildings with Consideration of Heat Gain**" *Asian Journal on Energy and Environment edition*, sec. 08(01).

Dumortier, Dominique. 1995. "**Mesure, analyse et modélisation du gisement lumineux. Application a l'évaluation des performances de l'éclairage naturel des bâtiments.**" PhD Thesis -ING., France.

Dutton, S., and L. Shao. 2007. "Raytra**cing Simulation for Predicting Light Pipe Transmittance.**" *International Journal of Low-Carbon Technologies* 2 (4): 339–58. doi:10.1093/ijlct/2.4.339.

Edmonds, Ian. 2010. "**Transmission of Mirror Light Pipes with Triangular, Rectangular, Rhombic and Hexagonal Cross Section**." *Solar Energy* 84 (6): 928–38. doi:10.1016/j.solener.2010.03.001.

Edmonds, I. R., P. A. Jardine, and G. Rutledge. 1996. "**Daylighting with Angular-Selective Skylights: Predicted Performance**." *Lighting Research and Technology* 28 (3): 122–30. doi:10.1177/14771535960280030101.

Edmonds, I. R., G. I. Moore, G. B. Smith, and P. D. Swift. 1995. "**Daylighting Enhancement with Light Pipes Coupled to Laser-Cut Light-Deflecting Panels**." *Lighting Research and Technology* 27 (1): 27–35. doi:10.1177/14771535950270010101.

Edmonds, I. R., J. Reppel, and P. Jardine. 1997. "**Extractors and Emitters for Light Distribution from Hollow Light Guides**." *Lighting Research and Technology* 29 (1): 23–32. doi:10.1177/14771535970290010701.

Ellis, Peter, Richard Strand, and Kurt Baumgartner. 2004. "**Simulation of Tubular Daylighting Devices and Daylighting Shelves in EnergyPlus**." In . SimBuild, IBPSA-USA National Conference, Boulder, CO

EnergyPlus. 2012. "**Input Output Reference. The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output.**" Lawrence Berkeley National Laboratory.

Fakra, A.H., H. Boyer, F. Miranville, and D. Bigot. 2011a. "**A Simple Evaluation of Global and Diffuse Luminous Efficacy for All Sky Conditions in Tropical and Humid Climate.**" *Renewable Energy* 36 (1): 298–306. doi:10.1016/j.renene.2010.06.042.

Fakra, A.H., F. Miranville, H. Boyer, and S. Guichard. 2011. "**Development of a New Model to Predict Indoor Daylighting: Integration in CODYRUN Software and Validation**." *Energy Conversion and Management* 52 (7): 2724–34. doi:10.1016/j.enconman.2011.01.019.

Fakra, Ali Hamada. 2009. "**Intégration de modèles d'éclairage à un code de calcu en physique du bâtiment : Modélisation, Validation et Applications**." PhD Thesis, Université de La Réunion.

Fernandez-Balbuena, Antonio ALVAREZ, Daniel VAZQUEZ-MOLINÍ, Berta GARCÍA-FERNANDEZ, Lucas GARCÍA-RODRÍGUEZ, and Teresa GALÁN-CAÑESTRO. 2010.

"**Daylight Illumination System by Vertical Transparent Prismatic Lightguide for an Office Building**." In , 360–65.

Garcia Hansen, V., Edmonds, I., and Bell, J. M. 2009. "**Improving Daylighting Performance of Mirrored Light Pipes.**" In . Quebec City, Canada.

Garcia Hansen, Veronica, and Ian Edmonds. 2003. "**Natural Illumination of Deep-Plan Office Buildings : Light Pipe Strategies**." In *Faculty of Built Environment and Engineering; Faculty of Science and Technology; School of Design*. Göteborg, Sweden.

Garde, F., H. Boyer, and J. C. Gatina. 1998. "**Elaboration of Global Quality Standards for Natural and Low Energy Cooling in French Tropical Island Buildings**." *Building and Environment* 34 (1): 71–83. doi:10.1016/S0360-1323(97)00071-1.

Garde, F, T Mara, A. P Lauret, H Boyer, and R Celaire. 2001. "**Bringing Simulation to Implementation: Presentation of a Global Approach in the Design of Passive Solar Buildings under Humid Tropical Climates**." *Solar Energy* 71 (2): 109–20. doi:10.1016/S0038-092X(01)00031-7.

Guglielmetti, R., D. Macumber, and N. Long. 2011. "**OpenStudio: An Open Source Integrated Analysis Platform**." In . Sydney, Australia.

Guglielmetti, Rob, and Jennifer Scheib. 2012. "**Challenges To Integrated Daylighting And Electric Lighting Simulation Methods In A Whole-Building Energy Simulation Context**." In . Madison, Wisconsin.

Guichard, Stéphane. 2013. "**Contribution à l'Étude Des Parois Complexes Intégrant Des Matériaux à Changements de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de La Performance énergétique Globale.**" PhD Thesis, Université de la Réunion.

Gupta, A., J. Lee, and R. J. Koshel. 2001. "**Design of Efficient LightPipes for Illumination by an Analytical Approach**." *Applied Optics* 40 (22): 3640–48.

Hansen, Veronica Garcia. 2006. "**Innovative Daylighting Systems For Deep-Plan Commercial Buildings**." PhD Thesis, School of Design Queensland University of Technology.

Heschong, Lisa. 2002. "**Daylighting and Human Performance**." *ASHRAE Journal*, June, ASHRAE edition, sec. 6.

Hien, V. Duc, and S. Chirarattananon. 2009. "**An Experimental Study of a Facade Mounted Light Pipe.**" *Lighting Research and Technology* 41 (2): 123–42. doi:10.1177/1477153508096167.

IES. 2000. "**IESNA Lighting Handbook**". *Edited by Mark Stanley Rea and Illuminating Engineering Society of North America*. 9 edition. New York, NY: Illuminating Engineering.

Ineichen, P., J. M. Gremaud, O. Guisan, and A. Mermoud. 1983. "**Study of the Corrective Factor Involved When Measuring the Diffuse Solar Radiation by Use of the Ring Method**." *Solar Energy*, Solar Radiation Measurements in Developing Countries, 31 (1): 113–17. doi:10.1016/0038-092X(83)90041-5.

Iqbal, Muhammad. 2012. "**An Introduction To Solar Radiation**". *Elsevier*.

Jannot, Yves. 2011. "**Thermique Solaire**." In .

Jenkins, David, and Tariq Muneer. 2003. "**Modelling Light-Pipe Performances—a Natural Daylighting Solution**." *Building and Environment* 38 (7): 965–72. doi:10.1016/S0360-1323(03)00061-1.

Jenkins. 2004. "**Light-Pipe Prediction Methods**." *Applied Energy* 79 (1): 77–86. doi:10.1016/j.apenergy.2003.11.003.

Jenkins, David, Tariq Muneer, and Jorge Kubie. 2005. "**A Design Tool for Predicting the Performances of Light Pipes**." *Energy and Buildings* 37 (5): 485–92. doi:10.1016/j.enbuild.2004.09.014.

Jenkins, David, Xiaodong Zhang, and Tariq Muneer. 2005. "**Formulation of Semi-Empirical Models for Predicting the Illuminance of Light Pipes.**" *Energy Conversion and Management* 46 (13–14): 2288–2300. doi:10.1016/j.enconman.2004.10.018.

Kasten, F., K. Dehne, and Brettschneier. 1983. "**Improvement of Measurement of Diffuse Radiation**.," *Solar Radiation Data edition*.

Kim, Jeong Tai, and Gon Kim. 2010. "**Overview and New Developments in Optical Daylighting Systems for Building a Healthy Indoor Environment.**" *Building and Environment*, 1st International Symposium on Sustainable Healthy Buildings, 45 (2): 256–69. doi:10.1016/j.buildenv.2009.08.024.

Kipp & Zonen. n.d. "**CM 121 - Shadow Ring - Instruction Manual**."

Kittler, R. 1986. "**Luminance Models of Homogeneous Skies for Design and Energy Performance Prediction**." In *Proceedings of the 1 St, International Daylighting Conference*, 18–22.

Kittler, Richard, Miroslav Kocifaj, and Stanislav Darula. 2012. "**Daylight Science and Daylighting Technology**". New York, NY: *Springer New York*. doi:10.1007/978-1-4419-8816-4.

Kocifaj, M. 2009. "**Analytical Solution for Daylight Transmission via Hollow Light Pipes with a Transparent Glazing.**" *Solar Energy* 83 (2): 186–92. doi:10.1016/j.solener.2008.07.012.

Kocifaj, M., S. Darula, and R. Kittler. 2008. "**HOLIGILM: Hollow Light Guide Interior Illumination Method – An Analytic Calculation Approach for Cylindrical Light-Tubes.**" *Solar Energy* 82 (3): 247–59. doi:10.1016/j.solener.2007.07.003.

Kocifaj, Miroslav, František Kundracik, Stanislav Darula, and Richard Kittler. 2010. "**Theoretical Solution for Light Transmission of a Bended Hollow Light Guide.**" *Solar Energy* 84 (8): 1422–32. doi:10.1016/j.solener.2010.05.002.

Kocifaj, M., F. Kundracik, S. Darula, and R. Kittler. 2012. "**Availability of Luminous Flux below a Bended Light-Pipe: Design Modelling under Optimal Daylight Conditions**." *Solar Energy* 86 (9): 2753–61. doi:10.1016/j.solener.2012.06.017.

Kómar, Ladislav, and Stanislav Darula. 2012. "**Determination of the Light Tube Efficiency for Selected Overcast Sky Types**." *Solar Energy* 86 (1): 157–63. doi:10.1016/j.solener.2011.09.023.

Koshel, R. J., and Anurag Gupta. 2005. "**Characterization of Lightpipes for Efficient Transfer of Light**." In , edited by *Roland Winston and R. John Koshel*, 594205–594205 – 12. doi:10.1117/12.619894.

Kotti, M.C., A.A. Argiriou, and A. Kazantzidis. 2014. "**Estimation of Direct Normal Irradiance from Measured Global and Corrected Diffuse Horizontal Irradiance.**" *Energy* 70 (June): 382–92. doi:10.1016/j.energy.2014.04.012.

Kudish, A. I., and A. Ianetz. 1993. "**Analysis of Diffuse Radiation Data for Beer Sheva: Measured (shadow Ring) versus Calculated (global-Horizontal Beam) Values**." *Solar Energy* 51 (6): 495–503. doi:10.1016/0038-092X(93)90134-A.

Kudish, Avraham I., and Efim G. Evseev. 2008. "**The Assessment of Four Different Correction Models Applied to the Diffuse Radiation Measured with a Shadow Ring Using Global**

and Normal Beam Radiation Measurements for Beer Sheva, Israel." *Solar Energy* 82 (2): 144–56. doi:10.1016/j.solener.2007.06.006.

Kwok, Chun-man. 2011. "**A Study of Horizontal Light Pipe System for Interior Daylighting in a Dense Urban Environment.**" PhD Thesis, The Hong Kong Polytechnic University.

Kwok, C. M., and T. M. Chung. 2008. "**Computer Simulation Study of a Horizontal Light Pipe Integrated with Laser Cut Panels in a Dense Urban Environment.**" *Lighting Research and Technology* 40 (4): 287–305. doi:10.1177/1477153508094584.

Lauret, A. J. P., T. A. Mara, H. Boyer, L. Adelard, and F. Garde. 2001. "**A Validation Methodology Aid for Improving a Thermal Building Model: Case of Diffuse Radiation Accounting in a Tropical Climate**." *Energy and Buildings* 33 (7): 711–18. doi:10.1016/S0378-7788(00)00133-X.

Lauret, Philippe, Harry Boyer, Carine Riviere, and Alain Bastide. 2005. "**A Genetic Algorithm Applied to the Validation of Building Thermal Models.**" *Energy and Buildings* 37 (8): 858–66. doi:10.1016/j.enbuild.2004.11.006.

LeBaron, B. A., J. J. Michalsky, and R. Perez. 1990. "**A Simple Procedure for Correcting Shadowband Data for All Sky Conditions**." *Solar Energy* 44 (5): 249–56. doi:10.1016/0038-092X(90)90053-F.

Lee, Chia-Yen, Po-Cheng Chou, Che-Ming Chiang, and Chiu-Feng Lin. 2009. "**Sun Tracking Systems: A Review.**" *Sensors (Basel, Switzerland)* 9 (5): 3875–90. doi:10.3390/s90503875.

Li, Danny H.W., Ernest K.W. Tsang, K.L. Cheung, and C.O. Tam. 2010. "**An Analysis of Light-Pipe System via Full-Scale Measurements.**" *Applied Energy* 87 (3): 799–805. doi:10.1016/j.apenergy.2009.09.008.

Littlefair, Paul J. 1990. "**Review Paper: Innovative Daylighting: Review of Systems and Evaluation Methods**." *Lighting Research and Technology* 22 (1): 1–17. doi:10.1177/096032719002200101.

Littlefair, Paul, and Cosmin Ticleanu. 2012. "**Testing of Light Tubes**." *Test report* 280962. bre.

Loisos, George. 1999. "**Daylighting in Schools : An Investigation into the Relationship Between Daylighting and Human Performance.**" *Daylighting Initiative. Pacific Gas and Electric Company* - HESCHONG MAHONE GROUP.

López, G., T. Muneer, and R. Claywell. 2004. "**Assessment of Four Shadow Band Correction Models Using Beam Normal Irradiance Data from the United Kingdom and Israel**." *Energy Conversion and Management* 45 (13-14): 1963–79. doi:10.1016/j.enconman.2003.11.001.

Lo Verso, Valerio R. M., Anna Pellegrino, and Valentina Serra. 2011. "**Light Transmission Efficiency of Daylight Guidance Systems: An Assessment Approach Based on Simulations and Measurements in a Sun/sky Simulator.**" *Solar Energy* 85 (11): 2789–2801. doi:10.1016/j.solener.2011.08.017.

Lucas, Franck, Laetitia Adelard, François Garde, and Harry Boyer. 2002. "**Study of Moisture in Buildings for Hot Humid Climates.**" *Energy and Buildings* 34 (4): 345–55. doi:10.1016/S0378-7788(01)00115-3.

Luz, Bruna, Leonardo Monteiro, and Marcia Aluccia. 2014. "**Empirical and Software Verification of a Simplified Predictive Model of Luminous Efficiency of Light-Pipes**." In . *Ahmedabad*.

Maamari, Fawaz. 2004. "**La Simulation Numérique de L'éclairage : Atouts et Potentiels**." PhD Thesis, Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Malet-Damour, Bruno, François Garde, Déo Prasad, and Mathieu David. 2011. "**Impact of the Climate on the Design of Low-Energy Buildings for Australia and Reunion Island**." In IBPSA Word Congress. Sydney, Australia.

Malet-Damour, B., H. Boyer, A. H. Fakra, and M. Bojic. 2014. "**Light Pipes Performance Prediction: Inter Model and Experimental Confrontation on Vertical Circular Light-Guides**." *Energy Procedia*, 2013 ISES Solar World Congress, 57: 1977–86. doi:10.1016/j.egypro.2014.10.062.

Malet-Damour Bruno, Harry Boyer, Stéphane Guichard, and Ali Hamada Fakra. 2014. "**Les Conduits de Lumière de Type MLP : Confrontation Intermodèle et Exprimentale**." In , CIFEM 24–29. Moroni, Comores.

Malet-Damour Bruno, Harry Boyer, Stéphane Guichard, and Frédéric Miranville. 2014. "**Performance Testing of Light Pipes in Real Weather Conditions for a Confrontation with Hemera.**" In .ICRET Hong Kong - Chine.

Maňková, L., J. Hraška, and M. Janák. 2009. "**Simplified Determination Of Indoor Daylight Illumination By Light Pipes,**" *Slovak Journal of Civil Engineering edition*.

Mayhoub, M., and D. Carter. 2012. "**Hybrid Lighting Systems: Performance and Design**." *Lighting Research and Technology* 44 (3): 261–76. doi:10.1177/1477153511416324.

Mayhoub, M. S. 2014. "**Innovative Daylighting Systems' Challenges: A Critical Study**." *Energy and Buildings* 80: 394–405.

Miranville, Frédéric. 2002. "**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**." PhD Thesis - Université de La Réunion.

Mohelnikova, Jitka. 2008. "**Daylighting and Energy Savings with Tubular Light Guides**" *WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT edition*, sec. Issue 3, Volume 4.

Mohelnikova. 2009a. "**Tubular Light Guide Evaluation**." *Building and Environment* 44 (10): 2193–2200. doi:10.1016/j.buildenv.2009.03.015.

Muneer, Tariq. 1997. "**Solar Radiation and Daylight Models for the Energy Efficient Design of Buildings**". *Oxford: Architectural Press.*

Muneer. 2000. "**Windows in Buildings: Thermal, Acoustic, Visual, and Solar Performance**". *Architectural Press.*

Muneer, Tariq, C. Gueymard, and H. Kambezidis. 2004. "**Solar Radiation and Daylight Models: (with Software Available from Companion Web Site**". *Elsevier Butterworth Heinemann.*

Muneer, T., and X. Zhang. 2001. "**A New Method for Correcting Shadow Band Diffuse Irradiance Data**." *Journal of Solar Energy Engineering* 124 (1): 34–43. doi:10.1115/1.1435647.

Nair, M. G., A. R. Ganesan, and K. Ramamurthy. 2014. "**Daylight Enhancement Using Laser Cut Panels Integrated with a Profiled Fresnel Collector.**" *Lighting Research and Technology*, doi:10.1177/1477153514556524.

Nilsson, Annica M., Jacob C. Jonsson, and Arne Roos. 2014. "**Spectrophotometric Measurements and Ray Tracing Simulations of Mirror Light Pipes to Evaluate the Color of the Transmitted Light**." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 124 (May): 172–79. doi:10.1016/j.solmat.2014.01.049.

Oakley, G, S.B Riffat, and L Shao. 2000. "**Daylight Performance of Lightpipes**." *Solar Energy* 69 (2): 89–98. doi:10.1016/S0038-092X(00)00049-9.

Oh, Seung Jin, Wongee Chun, Saffa B. Riffat, Young Il Jeon, Spencer Dutton, and Hyun Joo Han. 2013. "**Computational Analysis on the Enhancement of Daylight Penetration into Dimly Lit Spaces: Light Tube vs. Fiber Optic Dish Concentrator**." *Building and Environment* 59 (January): 261–74. doi:10.1016/j.buildenv.2012.08.025.

Oliveira, Armando C., António R. Silva, Clito F. Afonso, and Szabolcs Varga. 2001. "**Experimental and Numerical Analysis of Natural Ventilation with Combined Light/vent Pipes**." *Applied Thermal Engineering* 21 (18): 1925–36. doi:10.1016/S1359-4311(01)00053-9.

Painter, H. E. 1981. "**The Shade Ring Correction for Diffuse Irradiance Measurements**." *Solar Energy* 26 (4): 361–63.

Pattanasethanon, Singthong, Charoenporn Lertsatitthanakorn, Surat Atthajariyakul, and Somchart Soponronnarit. 2007. "**All Sky Modeling Daylight Availability and Illuminance/irradiance on Horizontal Plane for Mahasarakham, Thailand**." *Energy Conversion and Management* 48 (5): 1601–14. doi:10.1016/j.enconman.2006.11.012.

Perez, Richard, Pierre Ineichen, Robert Seals, Joseph Michalsky, and Ronald Stewart. 1990. "**Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance.**" *Solar Energy* 44 (5): 271–89. doi:10.1016/0038-092X(90)90055-H.

Perez, R., J. Michalshy, and R. Seals. 1992. "**Modeling Sky Luminance Angular Distribution for Real Sky Conditions: Experimental Evaluation of Existing Algorithms.**" *Journal of the Illuminating Engineering Society* 21 (2): 84–92. doi:10.1080/00994480.1992.10748005.

Perraudeau, M. 1988. "**Luminance Models**." In , 291–92. Cambridge.

Robinson, N., and L. Stoch. 1964. "**Sky Radiation Measurement and Corrections.**" *Journal of Applied Meteorology* 3 (2): 179–81. doi:10.1175/1520-0450(1964)0032.0.CO;2.

Rosemann, A., and H. Kaase. 2005. "**Lightpipe Applications for Daylighting System**s." *Solar Energy* 78 (6): 772–80. doi:10.1016/j.solener.2004.09.002.

Rosemann, A., M. Mossman, and L. Whitehead. 2008. "**Development of a Cost-Effective Solar Illumination System to Bring Natural Light into the Building Core.**" *Solar Energy* 82 (4): 302–10. doi:10.1016/j.solener.2007.09.003.

Schou, Anders. 2012. "**Ivestigation of Light Pipe Simulation Algorithms**." Bachelor thesis [Industrial collaboration]. Technical University of Denmark, DTU Informatics, E-mail: reception@imm.dtu.dk.

Schuman, Francis Rubinstein, Konstantinos Papamichael, Liliana Beltran, Eleanor Lee, and Stephen Selkowitz. 1992. "**Technology Reviews: Daylighting Optical Systems**."

Shao, L, and J. M Callow. 2003. "**Daylighting Performance of Optical Rods.**" *Solar Energy* 75 (6): 439–45. doi:10.1016/j.solener.2003.09.015.

Shao, L., A. A. Elmualim, and I. Yohannes. 1998. "**Mirror Lightpipes : Daylighting Performance in Real Buildings.**" *Lighting Research and Technology* 30 (1): 37–44. doi:10.1177/096032719803000106.

Shao, L, S B Riffat, W Hicks, and I Yohannes. 1997. "**A Study of Performance of Light Pipes Under Cloudy and Sunny Conditions in the UK**" *RIGHT LIGHT edition.*

Shin, Ju Young, Geun Young Yun, and Jeong Tai Kim. 2012. "**Evaluation of Daylighting Effectiveness and Energy Saving Potentials of Light-Pipe Systems in Buildings**." *Indoor and Built Environment* 21 (1): 129–36. doi:10.1177/1420326X11420011.

Shin, Ju Young, Geun Young Yun, and Jeong Tai Kim. 2011. "**Daylighting and Energy Performance Prediction of a Light Pipe Used in Underground Parking Lots**." In , 277–81. Seoul, Korea.

Šikula, Ondřej, Jitka Mohelníková, and Josef Plášek. 2013. "**Thermal CFD Analysis of Tubular Light Guides.**" *Energies* 6 (12): 6304–21. doi:10.3390/en6126304.

Siren, K.E. 1987. "**The Shadow Band Correction for Diffuse Irradiation Based on a Two-Component Sky Radiance Mode**l." *Solar Energy*, Pergamon Journals edition.

Soubdhan, T., T.A. Mara, H. Boyer, and A. Younes. 2000. "**Chapter 376 - Use of Bestest Procedure to Improve A Building Thermal Simulation Program**." In *World Renewable Energy Congress VI*, edited by A.A.M. Sayigh, 1800–1803. *Oxford: Pergamon*.

Su, Yuehong, Naghman Khan, Saffa B. Riffat, and Oakley Gareth. 2012. "**Comparative Monitoring and Data Regression of Various Sized Commercial Lightpipes**." *Energy and Buildings* 50 (July): 308–14. doi:10.1016/j.enbuild.2012.03.053.

Swift, P.D. 2010. "**Splayed Mirror Light Pipes**." *Solar Energy* 84 (2): 160–65. doi:10.1016/j.solener.2009.10.008.

Swift, P. D., and G. B. Smith. 1995. "**Cylindrical Mirror Light Pipes**." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 36 (2): 159–68. doi:10.1016/0927-0248(94)00172-3.

Taengchum, Thanyalak, Surapong Chirarattananon, Robert H. B. Exell, and Pipat Chaiwiwatworakul. 2014. "**Tracing of Daylight through Circular Light Pipes with Anidolic Concentrators**." *Solar Energy* 110 (December): 818–29. doi:10.1016/j.solener.2014.09.046.

Teijido, Juan M., Hans Peter Herzig, Claude Fuhrer, and Pierre-Jean Erard. 1998. "**Design Methods for Illumination Light Pipes**." In , 3428:34–44. doi:10.1117/12.327967.

Todorovic, Marija S., and Jeong Tai Kim. 2012. "**Beyond the Science and Art of the Healthy Buildings Daylighting Dynamic Control's Performance Prediction and Validation.**" *Energy and Buildings*, Sustainable and healthy buildings, 46 (March): 159–66. doi:10.1016/j.enbuild.2011.10.033.

Toison, Marc La. 1982. "**Introduction à L'éclairagisme**". *Eyrolles*.

Vandeplanque, Patrick. 2005. "**L'éclairage: notions de base, projets d'installations, exercices corrigés**". *Ed. Tec et Doc.*

Van Derlofske, John F., and Thomas A. Hough. 2004. "**Analytical Model of Flux Propagation in Light-Pipe Systems**." *Optical Engineering* 43 (7): 1503–10. doi:10.1117/1.1753272.

Varga, Szabolcs, and Armando C. Oliveira. 2000. "**Ventilation Terminals for Use with Light Pipes in Buildings: A CFD Study**." *Applied Thermal Engineering* 20 (18): 1743–52. doi:10.1016/S1359-4311(00)00005-3.

Vartiainen, Eero. 1999. "**An Anisotropic Shadow Ring Correction Method for the Horizontal Diffuse Irradiance Measurements**." *Renewable Energy* 17 (3): 311–17.

Vazquez-Molini, Daniel, Antonio Alvarez, and Berta Garcia-Fernandez. 2012. "**Natural Lighting Systems Based on Dielectric Prismatic Film**." In *Dielectric Material*, edited by *Marius Alexandru Silaghi. InTech.*

Whitehead, L. A., R. A. Nodwell, and F. L. Curzon. 1982. "**New Efficient Light Guide for Interior Illumination.**" *Applied Optics* 21 (15): 2755–57. doi:10.1364/AO.21.002755.

William, L. Carrol. 1999. "**A Report of IEA; SHC Task21/ ECBCS**." Annexe 29. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.

Wittkopf, Stephen, Lars Oliver Grobe, David Geisler-Moroder, Raphaël Compagnon, Jérôme Kämpf, Friedrich Linhart, and Jean-Louis Scartezzini. 2010. "**Ray Tracing Study for Non-Imaging Daylight Collectors.**" *Solar Energy* 84 (6): 986–96. doi:10.1016/j.solener.2010.03.008.

World Bank Group, ed. 2014. "**World Development Indicators**." *http://wdi.worldbank.org*.

Wu, Yanpeng, Rendong Jin, Deying Li, Wenming Zhang, and Chongfang Ma. 2008. "**Experimental Investigation of Top Lighting and Side Lighting Solar Light Pipes under Sunny Conditions in Winter in Beijing**." In , *edited by Anbo Wang, YanBiao Liao, AiGuo Song, Yukihiro Ishii, and Xudong Fan*, 71571O – 71571O – 6. doi:10.1117/12.811992.

Yun, Geun Young, Taeyon Hwang, and Jeong Tai Kim. 2010a. "**Performance Prediction by Modelling of a Light-Pipe System Used under the Climate Conditions of Korea**." *Indoor and Built Environment* 19 (1): 137–44. doi:10.1177/1420326X09358008.

Zastrow, Armin, and Volker Wittwer. 1987. "**Daylighting with Mirror Light Pipes and with Fluorescent Planar Concentrators. First Results from the Demonstration Project Stuttgart-Hohenheim**." In , 0692:227–34. doi:10.1117/12.936710.

Zazzini, Paolo, Fabrizio Chella, and Angelo Scarduzio. 2006. "**Numerical and Experimental Analysis of Light Pipes' Performances: Comparison of the Obtained Results**." In *Proceedings of PLEA*, 219–24.

Zhang, T. Muneer. 2000. "**Mathematical Model for the Performance of Light Pipes**." *Lighting Research & Technology* 32 (3): 141–46. doi:10.1177/096032710003200306.

Zhang, Xiaodong. 2002. "**Daylighting Performance of Tubular Solar Light Pipes: Measurement, Modelling and Validation**". PhD Thesis Napier University of Edinburgh.

Zhang, X., T. Muneer, and J. Kubie. 2002. "**A Design Guide for Performance Assessment of Solar Light-Pipes**." *Lighting Research and Technology* 34 (2): 149–68. doi:10.1191/1365782802li041oa.

Zhu, Guangzhi, Xiao Zhu, and Changhong Zhu. 2013. "**Analytical Approach of Laser Beam Propagation in the Hollow Polygonal Light Pipe.**" *Applied Optics* 52 (23): 5619–30. doi:10.1364/AO.52.005619.

Ziorjen, Reginald. 2000. "**La clé du confort visuel et du bien-être**." SOLATUBE. www.solatube.ch.

Zissis, Georges. 2006. "**Lumière Artificielle : Développement Durable et Qualité de Vie**." *Techniques de L'ingénieur Optique Instrumentale* base documentaire : TIB449DUO. (ref. article : in42).

Annexes

Documentation du constructeur du luxmètre extérieur

MÉTÉOROLOGIE

10/2008 Toutes modifications techniques réservées

Sonde de rayonnement global type FLA613GS

Tête de mesure en boîtier aluminium anodisé à dôme plastique laissant passer les UV.

Système protégé contre la pluie et les projections d'eau, avec déshydratant pour éviter la condensation sur la paroi interne du dôme.

Convient particulièrement aux mesures en extérieur, p. ex. en recherche médicale, biologique ou climatique, dans les systèmes d'information et de prévisions météo, dans l'agriculture et pour l'information générale à la population.

Modèle (avec certificat de contrôle constructeur)

Tête de mesure tous temps pour l'acquisition du rayonnement global, avec câble 1.5 m et connecteur ALMEMO®

Référence : FLA613GS

Caractéristiques techniques:

Plage de mesure :	0 à env. 1 200 W/m2
Sensibilité spectrale :	400 nm à 1 100 nm
Sensibilité spectrale max. :	780 nm
Signal de sortie :	0 à 2 V
Alimentation :	+5 à +15 V
Fixation :	2 vis M4, dans le sode
Passage du câble :	par le bas
Boîtier :	aluminium anodisé
Diffuseur :	PTFE
Dôme :	PMMA
Correction cos :	erreur f2 < 3 %
Linéarité :	< 1%
Erreur absolue :	< 10 %
Tension résiduelle : (E= 0)	< 10 mV
Température nominale :	22°C±2°C
Température de fonctionnement :	-20°C à +60°C
Dimensions :	Boîtier : hauteur 55 mm Dôme hauteur 40 mm Diamètre : 80 mm
Masse :	env. 300 g

Tête de mesure d'éclairement énergétique type FLA613VLM

Tête de mesure en boîtier aluminium anodisé à dôme plastique perméable aux UV.

Système protégé contre la pluie et les projections d'eau, avec déshydratant pour éviter la condensation sur la paroi interne du dôme.

Convient particulièrement aux mesures en extérieur, p. ex. en recherche médicale, biologique ou climatique, dans les systèmes d'information et de prévisions météo, dans l'agriculture et pour l'information générale à la population.

La sensibilité spectrale du récepteur correspond approximativement à celle de l'oeil humain.

Modèle (avec certificat de contrôle constructeur)

Tête de mesure tous temps pour l'acquisition de l'éclairement énergétique, avec câble 1.5 m et connecteur ALMEMO®

Référence : FLA613VLM

Caractéristiques techniques :

Plage de mesure :	0 à 170 kLux (env. 250W/m2)
Sensibilité spectrale :	360 nm à 760 nm
Sensibilité spectrale max. :	550 nm
Signal de sortie :	0 à 2 V
Alimentation :	+5 à +15 V
Fixation :	2 vis M4, dans le sode
Passage du câble :	par le bas
Boîtier :	aluminium anodisé
Diffuseur :	PTFE
Dôme :	PMMA
Correction cos :	erreur f2 < 3 %
Linéarité :	< 1%
Erreur absolue :	< 10 %
Tension résiduelle :	(E= 0) < 10 mV
Température nominale :	22 °C± 2 °C
Température de fonctionnement :	-20 °C à +60 °C
Dimensions :	Boîtier : hauteur 55 mm Dôme hauteur 40 mm Diamètre : 80 mm
Masse : env. 300 g	

Documentation du constructeur du luxmètre intérieur

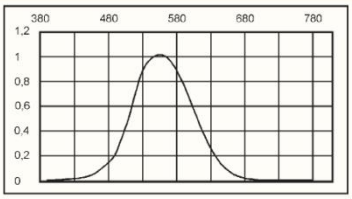
RAYONNEMENT OPTIQUE

Tête de mesure de l'éclairement
type FLA603VLx

Tête de mesure de grande qualité, pour la détermination de l'éclairement dans les études d'éclairage ou à la lumière solaire et partout où les normes recommandent d'utiliser un luxmètre de classe B.

Adaptation spectrale rapprochée de la fonction de valorisation photométrique V(λ) en vision de jour, classe B, supérieure à 5%.

Différents canaux de mesure à sensibilité différente.



Modèle:

Tête de mesure d'éclairement, DIN classe B avec câble de raccordement ALMEMO®, longueur 1.5 m, avec certificat d'étalonnage d'usine calibré en lx pour l'éclairement d'intérieur
(3 canaux de mesure) Référence : FLA603VL2

pour la lumière ambiante
(2 canaux de mesure) Référence : FLA603VL4

Caractéristiques techniques:

Plage d'indication :	FLA603VL2 : 0.05 lx à 12 500 lx FLA603VL4 : 1 lx à 250 000 lx
Plus petite résolution :	FLA603VL2 : 0.01 lx FLA603VL4 : 1 lx
Sensibilité :	env. 20 pA/lx
Sensibilité spectrale :	approximée à la fonction de valorisation photométrique V(λ) en vision de jour, classe B, supérieure à 5%
Correction cos max. :	Classe B, < 3%
Diffuseur cos :	Diamètre 7 mm
Température nominale :	24°C±2K
Température de fonctionnement/de stockage :	0 à 60 °C / -10 à +80 °C
Plage d'humidité :	10 à 90% (sans condensation)
Dimensions :	Ø 37 mm, hauteur 20 mm

10/2008 Toutes modifications techniques réservées

AHLBORN
www.ahlborn.fr

15.07

Géométrie solaire

1. Objectifs et principe

L'objectif est de déterminer les rayons solaires incidents sur une paroi d'inclinaison et d'orientation quelconque de manière à prendre en compte ou pas la part du direct (+diffus tache solaire) entrant par le biais de la fenêtre à l'intérieur de la pièce.

Pour se faire, il est important de déterminer si une paroi (*n*) est éclairée ou pas (« *Voit-elle le soleil* ? »).

Pour cela, il est nécessaire d'établir des conditions en fonction de la position du soleil à chaque instant.

La course solaire étant variable durant l'année, les rayons incidents le sont également. Il faut prendre en compte la course du soleil par l'intermédiaire de ses coordonnées horizontales (azimut et hauteur solaire) pour évaluer correctement les rayons intéressant une paroi donnée à un instant (*t)*.

La variabilité de la géométrie solaire est liée au temps solaire vrai (TSV), dont l'écart par rapport à l'heure légale peut être déterminé selon des équations présentes dans la littérature.

2. Méthode d'évaluation de la position du soleil à l'instant (t)

Les coordonnées horizontales du soleil sont des coordonnées rapportées au plan d'un observateur situé à la surface de la Terre. Elles assurent un repérage de la position du soleil dans la sphère céleste qui lui est apparente par l'intermédiaire de deux coordonnées

- Plan horizontal : azimut A_s
- Plan vertical : hauteur Hs

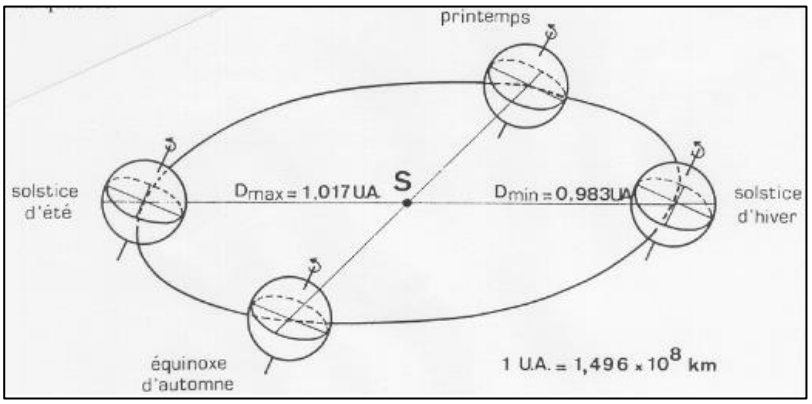
Avant de se ramener à ce repère local, il faut avant tout calculer les grandeurs relatives au plan écliptique[36] apparent du Soleil sur la Terre.

[36] Le plan écliptique est le plan de révolution du soleil autour de la Terre

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2.1. **Mouvement de la Terre**

2.1.1. Déclinaison solaire



La déclinaison solaire est l'angle entre le plan équatorial terrestre et le plan écliptique apparent. La déclinaison varie de -23°27′ au solstice d'hiver à +23°27′au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. Elle varie très faiblement à chaque instant de la journée. Ainsi, nous la considérerons constante pendant cette période.

Dans la littérature, de nombreuses approches permettent de calculer la déclinaison.

2.1.1.1. Approche décrite dans (Clarke 2001)

$$\delta = 23.45 \times \sin(280.1° + 0.9863° \times J)$$

Avec : J : numéro du jour julien dans l'année, allant de 0 à 365.

A l'intérieur de la parenthèse, nous devons avoir des degrés.

2.1.1.2. Approche décrite dans (Bertolo 1992)

$$\delta = 23.45 \times \sin(0.986° \times J - 80°)$$

Avec : J : numéro du jour julien dans l'année, allant de 0 à 365.

Cette équation approxime la déclinaison à 1° près. À l'intérieur de la parenthèse, nous devons avoir des degrés.

2.1.1.3. Approche décrite dans (Jannot 2011)

$$\delta = 23.45 \times \sin[0.980° \times (J + 284)]$$

Avec : J : numéro du jour julien dans l'année, allant de 0 à 365.

A l'intérieur de la parenthèse, nous devons avoir des degrés.

2.1.1.4. Approche de Boes décrite dans (Tariq Muneer, Gueymard, and Kambezidis 2004)

$$\delta = \text{asin}\{0.39795 \times \cos[0.98563 \times (J - 173)]\}$$

Avec : J : numéro du jour julien dans l'année, allant de 0 à 365.

Le terme en cosinus est exprimé en degré. Le « asin » est retourné en radians.

2.1.1.5. Approche décrite dans (Miranville 2002; Iqbal 2012)

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 * \cos \mathbf{\Gamma} + 0.070257 * \sin \mathbf{\Gamma} - 0.006758 * \cos 2\mathbf{\Gamma} + 0.000907 * \sin 2\mathbf{\Gamma} - 0.002697 * \cos 3\mathbf{\Gamma} + 0.00148 * \sin 3\mathbf{\Gamma})$$

Selon l'auteur, cette équation estime la déclinaison solaire avec une erreur maximale de 6.10^{-4} rad (soit 0.03°). À l'intérieur de la parenthèse on a du radian, le résultat final étant donc en radian.

Elle fait intervenir le « *Day angle* **Γ** », dont l'expression est la suivante (en radian) :

$$\mathbf{\Gamma} = \frac{2\pi * (J - 1)}{365}$$

Avec : J : numéro du jour julien dans l'année, allant de 0 à 365.

2.1.1.6. Approche décrite dans Kittler Darula et Kocifaj

La formule proposée par l'ouvrage de Kittler semble fausse (Richard Kittler, Kocifaj, and Darula 2012).

En effet :

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(\frac{2\pi}{365 * (J - 81)}\right)$$

Pour effectuer une rotation autour du soleil, soit 2π, il faut 365 jours.

Si l'on souhaite savoir où nous en sommes à 30 jours, il faut faire :

$$\frac{30ième\ jour\ \times 2\pi}{365}$$

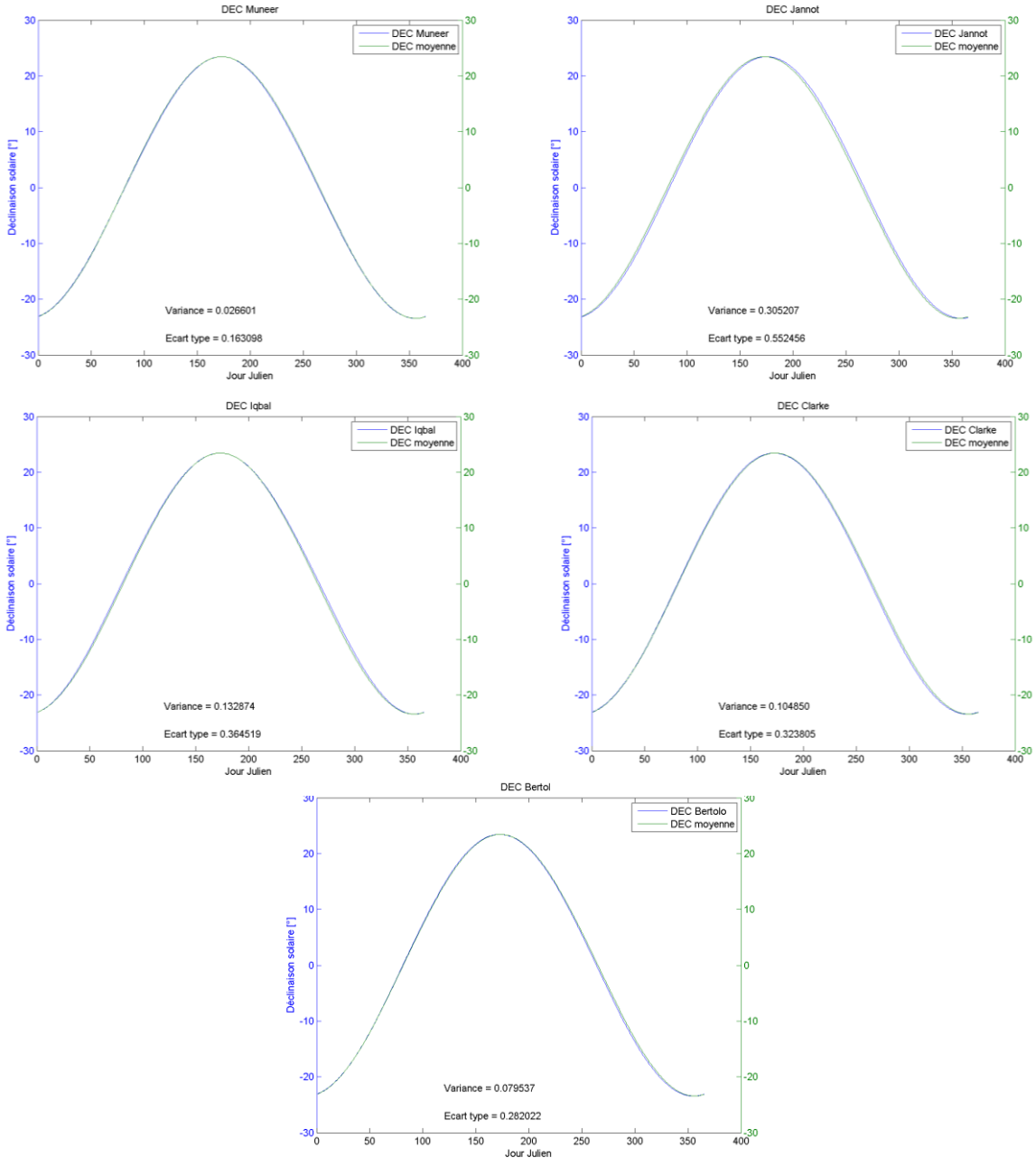
Le ratio $^{2\pi}/_{365}$ est égal à 0.0172 rad. Si on le met en degrés, nous obtenons : 0.9855°, ce qui ressemble beaucoup aux autres approches. La différence (ou l'erreur) réside dans le fait que la localisation dans l'année (donc le jour julien) se retrouve au dénominateur.

La forme correcte serait donc :

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(\frac{2\pi\ \times (J - 81)}{365}\right)$$

2.1.1.7. Choix de l'approche

Afin de sélectionner l'approche la plus représentative, nous calculons la valeur moyenne des déclinaisons provenant des approches.



Nous calculons les variances et les écarts types par rapport à la déclinaison moyenne :

	Clarke	Bertolo	Jannot	Muneer	Iqbal
Variance	0,10485	0,07953652	0,3052072	0,02660102	0,1328742
Ecart type	0,3238055	0,2820222	0,5524556	0,1630982	0,3645191

Il en ressort que l'approche de Muneer offre une variance faible par rapport aux autres modèles, avec une dispersion faible des résultats.

Pour la suite nous utiliserons la méthode décrite dans (Muneer, Gueymard, and Kambezidis 2004).

2.2. **Mouvement apparent du Soleil**

2.2.1. Equation du temps ET

La variation de la vitesse de la Terre sur sa trajectoire elliptique autour du Soleil introduit un terme correctif appelé équation du temps et noté ET.

2.2.1.1. Approche décrite dans (Jannot 2011) :

$$ET = -[0.0002 - 0.4797 \times \cos(\omega' \cdot J) + 3.2265 \times \cos(2\omega' \cdot J) + 0.0903 \times \cos(3\omega' \cdot J) + 7.3509 \times \sin(\omega' \cdot J) + 9.3912 \times \sin(2\omega' \cdot J) + 0.3361 \times \sin(3\omega' \cdot J)]$$

Avec : J, numéro de jour julien de l'année

$\omega' = 0.984$

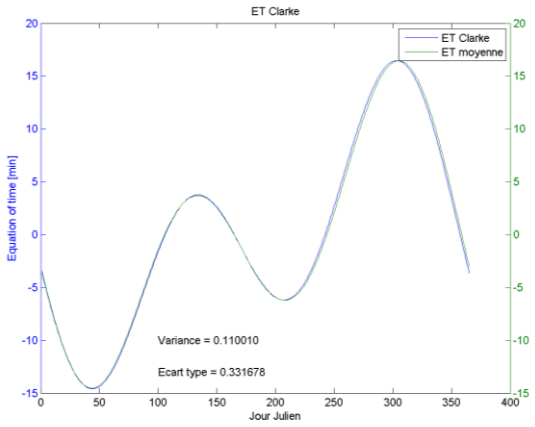
2.2.1.2. Approche décrite dans (Clarke 2001)

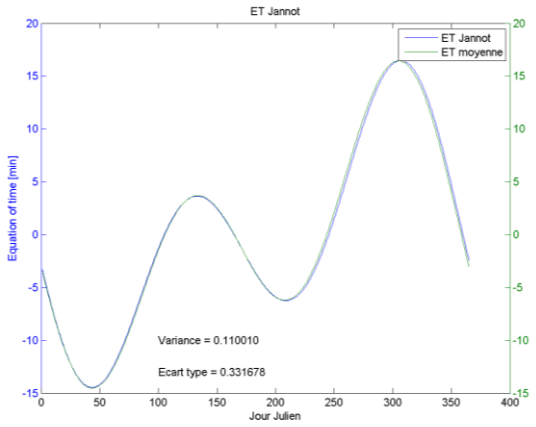
$ET = 9.87 \times \sin(1.978 \times J - 160.22) - 7.53 \times \cos(0.989 \times J - 80.11) - 1.5 \times \sin(0.989 \times J - 80.11)$

Avec : J, numéro de jour julien de l'année

2.2.1.3. Choix de l'approche

Les deux approches représentent la même variation au cours de l'année. Les variances et écarts types sont similaires. Nous choisissons arbitrairement la méthode de Clarke.





2.2.2. Relation entre temps légal et temps solaire

L'ensemble des relations se basant sur le mouvement du soleil utilise le temps solaire vrai TSV qui diffère généralement du temps légal TL (heure locale) du lieu considéré. Cet écart est lié au :

C : décalage horaire et changement d'heure administratif

ET : équation du temps représentant la variation de la vitesse de la Terre sur sa trajectoire autour du Soleil (voir section précédente).

Δl : différence de longitude ($l - l_{réf}$) entre le lieu considéré et le lieu servant de référence au temps légal. Celui-ci est en général le centre du fuseau (au méridien de Greenwich) :

$$\Delta l = (l_{réf} - l)$$

Avec,

$l_{réf}$, longitude de référence [°] : le méridien de Greenwich est courant choisi comme référence : $l_{réf} = 0°$

l, longitude du lieu [°]

NB : La longitude est positive à l'est et négative à l'ouest.

Le paramètre C représente la différence entre le temps universel TU et l'heure civile TCF. Il dépend lui-même de deux corrections : C_{admin} et C_{fuseau}

$$C = C_{fuseau} + C_{admin}$$

Le décalage administratif, noté C_{admin}, est la différence entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF du lieu considéré. Cette différence marque souvent la transition entre deux saisons (ou période de l'année). Ce paramètre, fixé par chaque pays, est couramment affecté au changement d'heure en été s'il y a lieu (pas à la Réunion) :

$$C_{admin} = TL - TCF$$

Avec :

TL : temps légal, correspond à l'heure des montres sans ajustement par rapport à l'heure d'été.

TCF : temps civil, correspondant à l'heure des montres. Il est égal à l'heure légale TL avec la correction liée au changement d'heure en été.

À La Réunion, l'heure légale TL et l'heure civile TCF sont égales, car il n'y a pas de changement d'heure en été ou en hiver :

$$TL = TCF$$

$$C_{admin} = 0$$

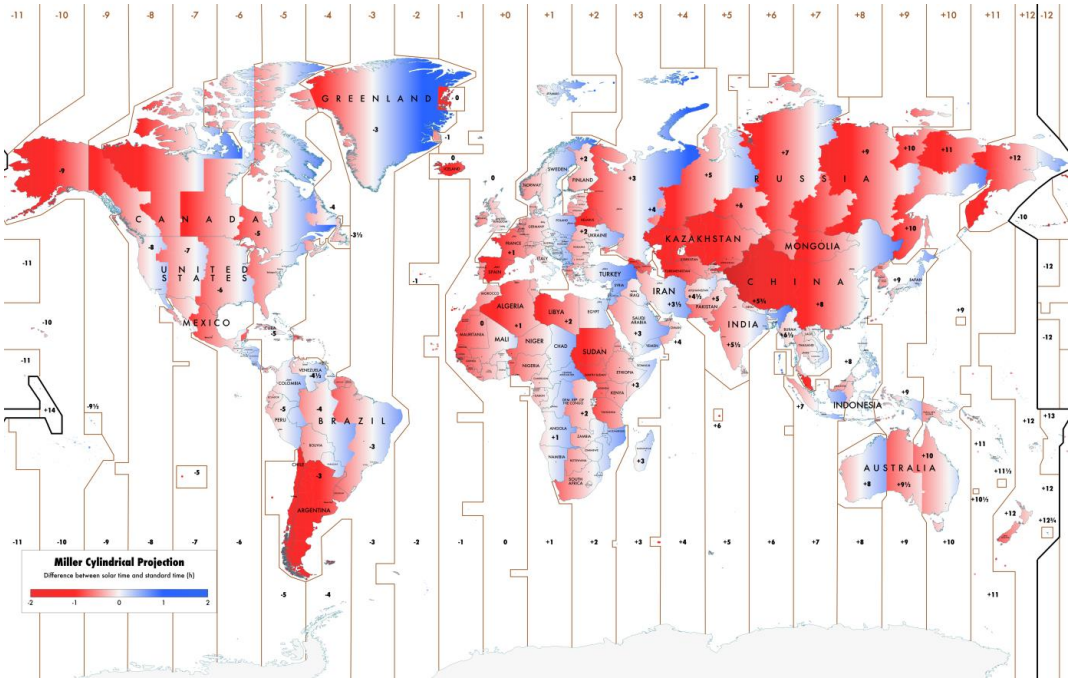
Le décalage horaire, noté C_{fuseau}, correspond à la différence entre le temps universel TU et le temps légal TL du lieu considéré. Le C_{fuseau} peut être lu sur la figure à la suite.

$$C_{fuseau} = TL - TU$$

Avec,

TU : temps universel, correspond à l'heure au méridien de Greenwich

NB : Nous trouvons souvent l'information sous la forme : GMT±C (*Greenwich Mean Time)*. Par exemple, pour la Réunion, nous avons : GMT+4, avec C=4.



Carte présentant les différents décalages horaires C_{fuseau}

Nous déduisons l'équation générale du temps solaire vrai TSV :

$$TSV = TL - \frac{\Delta l}{15} + \frac{ET}{60} - C$$

Avec : TL, temps légal en [heure]

Δl, différence entre la longitude de référence et la longitude du lieu [°]. On divise par 15 car on a 1h pour 15° de longitude.

ET, équation du temps [minute], ramené en heure par la division par 60

C, décalage horaire en [heure]

2.2.3. Hauteur et azimut solaire

La hauteur solaire Hs est mesurée entre l'horizon de l'observateur et la position du soleil dans le ciel. Cet angle est toujours positif et varie de 0 à 90°. Ainsi, les valeurs de Hs nulle marque

l'événement « nuit ». Pour déterminer ce paramètre géométrique, plusieurs variables doivent être étudiées.

L'azimut solaire *as* est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la Terre au Soleil. L'angle est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud, en utilisant les projections sur le plan horizontal du point d'observation. Il prend en compte la position altimétrique du Soleil et la position géographique du lieu, ainsi que le mouvement apparent de la Terre (par le biais de la déclinaison solaire)

2.2.3.1. Angle zénithal θz

Son complémentaire est appelé angle zénithal (angle entre le zénith local –à midi solaire – et la position du soleil dans le ciel), noté θ_z et s'évalue selon l'expression :

$$\cos\theta_z = \sin\delta * \sin\phi + \cos\delta * \cos\phi * \cos\omega$$

Avec : δ, déclinaison solaire, [rad]

ϕ, latitude du lieu considéré, [rad]

ω, angle horaire, [rad]

2.2.3.2. Angle horaire ω

L'angle horaire du soleil ω (encore noté AH) est déterminé par la rotation diurne de la Terre autour de son axe. Il est mesuré au pôle céleste entre le méridien de l'observateur et le méridien solaire. À La Réunion, il est évalué en fonction de l'heure solaire vraie (TSV) et son signe dépend du moment de la journée :

Matin : $\omega = 15 * (TSV - 12)$

Après-midi : $\omega = 15 * (12 - TSV)$

Avec : TSV, temps solaire vrai, [heure]

Ici ω est en degré, car il décrit un angle en fonction de l'heure variant entre 180 et -180°.

2.2.3.3. Hauteur solaire Hs

La hauteur solaire Hs vaut alors :

$$\theta_z = 90 - Hs$$
$$\sin Hs = \cos\theta_z$$

Par conséquent, $Hs = \text{asin}(\cos\theta_z)$

Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

2.2.3.4. Azimut solaire As

L'azimut solaire *as* s'obtient en fonction des grandeurs précédentes par l'expression :

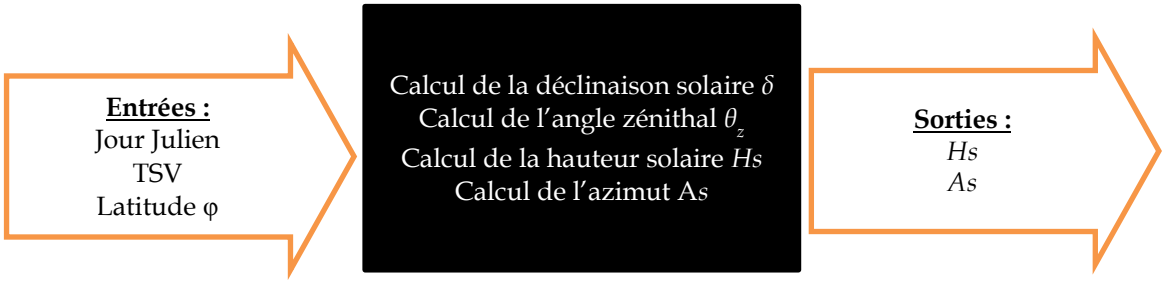
$$\cos As = \frac{(\sin Hs * \sin \phi - \sin \delta)}{\cos Hs * \cos \phi}$$

Les conventions pour As sont :

- $As < 0$, le matin ;
- $As > 0$, l'après-midi ;
- $As = 0$, à midi solaire (TSV = 12h00) ;
- $As = 0$, au nord géographique.

L'azimut varie donc de 0 à ±180°en fonction du moment de la journée.

2.2.4. Algorithme de calcul de la position du soleil



Thèse de B. Malet-Damour « Contribution à l'étude des Dispositifs de Guides Lumineux Tubulaires Appliqués au Bâtiment : Expérimentation, Modélisation et Validation »

Nom du logiciel	Prise en compte des conduits de lumière ?	Mode d'utilisation	Référence	Modèles utilisés
ADELINE	Plus disponible			
AGI 32	Non	Payant	http://www.agi32.com (U.S.A)	Radiosité, Tracer de Rayons
BSim 2002	Non	Payant	http://www.bsim.dk (Denmark)	Radiosité
Building Design Advisor	Non	Gratuit	http://gaia.lbl.gov/bda/bda31.htm	Néant
Daylight	Non	Gratuit	http://www.archiphysics.com (U.S.A)	Néant
Daysim	Non	Gratuit	http://daysim.ning.com/ (Anglais) - Canda	Néant
Deci	Non	Gratuit	http://www.cstb.fr/actualites/webzine/editions/decembre-2004/deci-un-nouvel-eclairage-	Néant
DesignBuilder	Néant	Payant	http://www.designbuilder.co.uk (Angleterre)	Radiance, FLJ
Dial+ lighting	Non	Payant	http://www.estia.ch/index.php (Français) - Suisse	Néant
DIALUX	Oui	Gratuit	http://www.dialux.com (Allemagne)	Fichier isométrique de SOLATUBE®
Ecasys	Non	Payant	http://www.fundamentalenergy.com (U.S.A)	Néant
EcoAdvisor	Non	Gratuit	http://www.ecoadvisor.com (U.S.A)	Néant
Eco Lumen	Non	Gratuit	http://www.walawalkar.com/info/EnergyManagement/EcoLumen/EcoLumen.htm (Inde)	Néant
ECOTECT	Oui	Payant	http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis (U.S.A.)	(Radiosité, Tracé de Rayons, Lumen, Flux Split)

EnergyPlus via Openstudio (moteur Radiance)	Oui	Gratuit	http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/index.cfm (U.S.A.) http://www.radiance-online.org/ (U.S.A)	Utilise le moteur Radiance via Openstudio : Radiosité, Tracé de rayon
Energy Profil Tool	Non	Payant	http://www.energyprofiletool.com (Canada)	Néant
ENVSTD and LTGSTD	Néant	Gratuit	http://www.energycodes.gov (U.S.A)	Néant
FlucsDL	Non	Payant	http://www.iesve.com (Angleterre)	FLJ
FlucsPro	Non	Payant	http://www.iesve.com (Angleterre)	Radiosité, FLJ
HELIOS	Néant	Gratuit	http://www.helios32.com (Canada)	Radiosité, Tracé de
HiLight	Non	Gratuit	http://www.eley.com (U.S.A)	Néant
HOLIGIM	Oui	Gratuit	http://www.holigilm.info/index.php?selected=news(Slovaquie)	*Monte-Carlo method combined with ray-tracing*
LESODIAL	Non	Payant	http://madd.epfl.ch/f/transfer_software_lesodial_f.html (Suisse)	Radiosité, FLJ
Light R	Non	Gratuit	*Concepteur : Bernard Kwok [Kwok, 1992] (Canada)*	Radiosité, lancer de rayon
Lightscape	Non	Payant	http://www.except.nl/lightwave/lslwtute/lightscapelightwave-4.htm (Pays Bas)	Néant
Lightworks	Non	Payant	http://www.lightworkdesign.com/ (Angleterre)	Néant
OptiMizer	Non	Gratuit	http://www.fdlabs.com/ (U.S.A)	Néant
Photopia	Oui	Payant	http://www.ltioptics.com/Photopia/overview.html	Ray tracing, basé sur des fichiers IES
Quick Calc	Non	Gratuit	http://www.ExceLine.com (U.S.A)	Néant
Quick Est	Non	Gratuit	http://www.genlytesupplydivision.com (U.S.A)	Néant

RadVis	Non	Payant	http://www.cs.cmu.edu/~radiosity/radvis.html (USA)	Radiosité
Relux	Non	Gratuit (Open source)	www.relux.biz (Français) – Suisse	Lancer de rayons
Render Park	Non	Gratuit	http://graphics.cs.kuleuven.be/renderpark/ / (Belgique)	Tracer de rayon et
SkyVision	Plus disponible			
Solene	Non	Payant	https://groupes.renater.fr/wiki/solenetb/ (France)	Néant
Sombrero 3.01	Non	Payant	http://nesa1.uni-siegen.de/ (Allemagne)	Néant
SPOT	Non	Gratuit	http://www.archenergy.com/SPOT/index.html (U.S.A)	Néant
Visual	Non	Gratuit	http://www.VisualLightingSoftware.com (Angleterre)	*Lumen method*