



**HAL**  
open science

# INTEGRATION DE MODELES D'ECLAIRAGE A UN CODE DE CALCUL EN PHYSIQUE DU BÂTIMENT : MODELISATION, VALIDATION ET APPLICATIONS

Ali Hamada Fakra

► **To cite this version:**

Ali Hamada Fakra. INTEGRATION DE MODELES D'ECLAIRAGE A UN CODE DE CALCUL EN PHYSIQUE DU BÂTIMENT : MODELISATION, VALIDATION ET APPLICATIONS. Optique / photonique. Université de la Réunion, 2009. Français. NNT : . tel-03207227

**HAL Id: tel-03207227**

**<https://hal.science/tel-03207227>**

Submitted on 24 Apr 2021

**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.

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/283713181>

# Intégration de modèles d'éclairage à un code de calcul en physique du bâtiment : modélisation, validation et applications

Thesis · June 2009

CITATIONS

9

READS

684

1 author:



**Damien Ali Hamada Fakra**  
University of La Réunion

43 PUBLICATIONS 175 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Daylighting in high solar potential climates [View project](#)



With one PhD student, we're working on smart windows integration. It begins with Thermochromic windows, from numerical and experiential point of view. [View project](#)

---

**THESE**

Présentée devant

**L'UNIVERSITE DE LA REUNION**

Pour obtenir le

**GRADE DE DOCTEUR**

**Spécialité : "Physique du Bâtiment"**

Par

**Ali Hamada FAKRA**

Ingénieur d'application de la F.S.T Moulay Ismaël (Maroc)

**INTEGRATION DE MODELES D'ECLAIRAGE A UN CODE DE  
CALCUL EN PHYSIQUE DU BÂTIMENT : MODELISATION,  
VALIDATION ET APPLICATIONS**

Soutenu le 15 juin 2009, devant la commission d'examen composée de :

<u>Directeur de Thèse</u> :	Harry BOYER	<i>Professeur, Université de La Réunion</i>
<u>Rapporteurs</u> :	Olivier SERO GUILLAUME Christophe MENEZO	<i>Directeur de recherches, CNRS Professeur, Université de Savoie, URM CNRS</i>
<u>Examineurs</u> :	Philippe LAURET Fawaz MAAMARI Frédéric MIRANVILLE Ibrahim MOHAMED RACHADI	<i>Maitre de Conférences HDR, Université de La Réunion Docteur-Ingénieur, Soft Energy Consulting Maitre de Conférences HDR, Université de La Réunion Maître de Conférences, Université Des Comores</i>



## Avant propos

**“Ne laisse jamais personne te dire que tu ne mérites pas ce pourquoi tu te bats”. Citation d’un vieux sage comorien**

*J’exprime mes profonds remerciements à mon Directeur de thèse, le Professeur et Vice-président de l’Université de La Réunion, Monsieur **Harry BOYER**, pour avoir éclairé mon chemin après une longue période de doute, pour l’aide compétente qu’il m’a apportée, pour sa patience, sa disponibilité permanente et son encouragement à finir un travail commencé il y a longtemps. Son œil critique m’a été très précieux pour structurer le travail et pour améliorer la qualité des différentes sections. Cela fut un plaisir et un honneur d’avoir été encadré par une personne telle que vous.*

*Je tiens à remercier également mon copilote, grand ami (pour ne pas dire grand frère) et membre de Jury, Monsieur **Frédéric MIRANVILLE**, Maître de Conférences à l’Université de La Réunion et Responsable du pôle “Physique du Bâtiment” de notre laboratoire (Je ne citerai que ces titres pour faire plus court), pour la confiance qu’il m’a accordée et les conseils qu’il a su me transmettre tout au long de mes trois dernières années de thèse. C’est vraiment agréable et enrichissant de travailler avec des personnes de ton calibre, ayant une vision aussi objective de la recherche, sans préjugé aucun. Merci de m’avoir donné l’opportunité de me découvrir moi-même. J’espère un jour te ressembler et pouvoir transmettre les mêmes ondes positives à mon entourage.*

*Un grand merci au Professeur et membre de Jury, Monsieur **Jean Claude GATINA** qui fut le catalyseur majeur de cette aventure merveilleuse. En effet, il a été à l’origine de mon cursus universitaire à La Réunion et m’a énormément aidé au sens large du terme afin que je puisse aboutir à mon rêve ultime de chercheur. Puisse-t-il retrouver dans ce rapport les résultats de sa contribution à l’aboutissement de cet objectif intellectuel.*

*Ma pensée va aussi vers ma grande famille, en particulier ma mère, **Mariama YAHAYA** (première dame dans mon cœur et pour toujours) pour l’amour et le soutien qu’elle m’a toujours apporté : “YE CHIYO CHINO CHA HAHO BO MAMA. MARAHABA MINDJI”.*

*J'exprime aussi ma gratitude à toute l'équipe du L.P.B.S. qui est un peu ma deuxième famille maintenant, vu le nombre d'heures passées au laboratoire, pour toute la vision qu'elle a su me transmettre de ce monde difficile mais merveilleux que sont la recherche et l'enseignement. Avec vous tous, j'ai eu des moments de complicité, de bonheur, de tristesse et de réussite qui me marqueront à jamais. Je ne citerai pas de noms ici, pour ne pas en oublier certains.*

*Mes études en thèse ont été soutenues financièrement par la **Région Réunion**. Cela s'est concrétisé par une bourse doctorale de trois ans et des financements sur les dispositifs expérimentaux liés à mon travail. Je leur suis donc reconnaissant pour toute l'aide apportée afin de faire avancer, dans de bonnes conditions, mes travaux.*

*Je remercie vivement monsieur le Professeur **Olivier SERO-GUILLAUME**, directeur de recherches CNRS au LEMTA, INPL, pour avoir accepté de rapporter ce travail et de participer au jury de thèse.*

*J'y associe Monsieur **Fawaz MAAMARI**, Expert en Eclairagisme, Président du Comité Technique de la Tâche TC-3-33 de la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E), basée en Europe. Ses nombreux travaux de recherche sur les cas tests dédiés à la simulation numérique de l'éclairage intérieur et les échanges que nous avons eus durant cette période d'étude m'ont permis de répondre à plusieurs réflexions qui m'ont été posées. Comme dirait mon entourage familial, vos travaux de recherche ont été du "Pain Béni" pour la validation de CODYRUN.*

*Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur **Ibrahim MOHAMED RACHADI**, Président de l'Université Des Comores, pour m'avoir honoré de sa présence en tant qu'Examinateur. Les nombreux entretiens que vous m'aviez accordés durant cette période m'ont appris énormément. Vous ne pouvez être qu'un exemple à suivre pour les futurs chercheurs comoriens.*

*J'adresse également mes remerciements à Monsieur **Christophe MENEZO**, Professeur à l'Université de Savoie et deuxième rapporteur, qui a accepté de prendre part à mes jurys.*

*Merci à Monsieur **Philippe LAURET**, H.D.R. et Co - Directeur du Laboratoire L.P.B.S., qui a bien voulu faire partie de mon jury de thèse. Vos conseils sur la structuration de mon rapport ont été d'une très grande utilité.*

*Pour finir, je remercie **toutes les personnes** qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce rapport. Encore merci pour avoir consacré votre précieux temps à corriger mon écriture scientifique.*

## Résumé

“..le siècle de Louis XIV, le plus éclairé qui fut jamais”. Voltaire

Ce rapport de thèse propose un outil informatique pour simuler l'éclairage naturel et/ou artificiel à l'intérieur d'un bâtiment. Il s'agit du code de calcul numérique CODYRUN, développé au laboratoire LPBS de l'université de la Réunion.

Initialement dédié à la simulation thermo-aéraulique des bâtiments, il a été complété dans le cadre de cette thèse, d'un module de calcul de l'éclairage artificiel et naturel à l'intérieur d'un bâtiment.

Il a de plus été soumis à une série de cas tests analytiques, expérimentaux et comparatifs (comparaisons inter-logiciels), afin de s'assurer de la précision des modèles et algorithmes qui y ont été introduits.

De même, une campagne de mesures expérimentales en environnement réel, menée localement, a servi de référence pour des comparaisons mesures/prédictions en régime dynamique. Durant cette expérimentation, certaines caractéristiques photométriques, liées au gisement solaire lumineux, ont été mises en évidence. Il s'agit des constantes des efficacités lumineuses diffuse et globale locales, encore méconnues à la Réunion.

L'objectif final est non seulement de développer des outils de recherche et d'analyses pour améliorer le confort visuel et faire des économies d'énergie, mais également de pouvoir transférer ces connaissances à travers ces outils d'aide, à la décision, dédiés au monde de l'entreprise et aux décideurs de demain.

**Mots clés:** CODYRUN, éclairage intérieur artificiel, éclairage intérieur naturel, bâtiment, modélisation, expérimentation, validation, application.



## Abstract

“My most beautiful day is the one which lights me” A. Désaugiers

This thesis report presents a new version building numerical simulation tools developed by the LPBS laboratory of the University of Reunion Island. The software is called CODYRUN.

Initially dedicated to the thermo-aeraulic simulation of buildings, it was improved within the framework of these works, with the development of a specific module of calculation daylighting and lighting inside a building.

CODYRUN was subjected to a series of analytical, experimental and comparative (including comparison between software) test cases to assess the accuracy of lighting computer programs.

Moreover, a sequence of experimental measurements was conducted on site, to constitute a reference data for dynamic comparisons with the predictions of the calculation program. This experimentation enables us to determine the constant diffuse and global luminous efficacies in the locality at Saint-Pierre (Reunion Island).

The final objective, in this work, is not only to develop research tasks and analyses to improve visual comfort and to reduce energy consumption in building, but also to be able to transfer this knowledge through accurate tools dedicated to professionals and politicians.

**Keywords:** CODYRUN, Daylighting, Lighting, Building simulation, Modeling, Experimentation, Validation code, Application.



# SOMMAIRE GENERAL

## Introduction

<b>1. THEMATIQUE DE LA RECHERCHE.....</b>	<b>16</b>
<b>2. CONTEXTE GENERAL DE LA PROBLEMATIQUE.....</b>	<b>17</b>
<b>3. CONTEXTE SCIENTIFIQUE DE LA PROBLEMATIQUE.....</b>	<b>17</b>
<b>4. OBJECTIF, ORIENTATION ET ENVIRONNEMENT D'ETUDE.....</b>	<b>18</b>

## Chapitre I

<b>I.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>22</b>
I.1.1. Démarche bibliographique.....	22
I.1.2. Modélisation de l'éclairage naturel intérieur.....	23
I.1.3. Modélisation de l'éclairage artificiel intérieur.....	24
I.1.4. Modélisation du gisement solaire (éclairage naturel extérieur).....	24
I.1.5. Logiciel de simulation d'éclairage : atouts et limites.....	25
<b>I.2. ETAT DE L'ART DE L'ECLAIRAGE INTERIEUR (NATUREL ET ARTIFICIE).....</b>	<b>26</b>
I.2.1. Résumé.....	26
I.2.2. Eclairage naturel.....	26
I.2.3. Eclairage artificiel.....	33
I.2.4. Contribution à une amélioration des modèles simplifiés pour l'éclairage naturel	36
<b>I.3. MODELISATION DU POTENTIEL ENERGETIQUE LUMINEUX EXTERIEUR.....</b>	<b>43</b>
I.3.1. Pourquoi une base de données météorologiques dans l'étude d'éclairage ?.....	43
I.3.2. Résumé de notre démarche d'étude.....	43
I.3.3. Généralisation du type de ciel.....	44
I.3.4. Evaluation de l'éclairage lumineux extérieur (gisement solaire).....	51
I.3.5. Contribution à l'étude du gisement solaire lumineux à la Réunion.....	54
<b>I.4. SYNTHÈSE DE NOTRE RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>61</b>

## **Chapitre II**

<b>II.1. DEMARCHE PROPOSEE.....</b>	<b>67</b>
II.1.1. Méthodologie utilisée.....	67
II.1.2. Rappel de quelques limitations des modèles.....	67
II.1.3. Sélection des cas tests de Maamari applicables au logiciel CODYRUN.....	68
II.1.4. Compléments des cas tests.....	70
<b>II.2. CAS TESTS AVEC REFERENCES ANALYTIQUES.....</b>	<b>71</b>
II.2.1. Introduction des cas tests utilisés.....	71
II.2.2. Description architecturale et hypothèses de simulation des locaux de référence...	71
II.2.3. Cas tests avec références analytiques pour la lumière naturelle.....	71
II.2.4. Cas tests avec références analytiques pour la lumière artificielle.....	78
II.2.5. Conclusion sur les cas tests analytiques.....	91
<b>II.3. COMPARAISON INTER-LOGICIEL (VALIDATION COMPARATIVE).....</b>	<b>92</b>
II.3.1. Logiciels utilisés.....	92
II.3.2. Simulation d'éclairage naturel avec la référence du CSTB.....	92
II.3.3. Simulation de l'éclairage artificiel : DIALUX 4.4, LIGHTSCAPE 3.2 et CODYRUN..	95
II.3.4. Conclusion sur la comparaison inter-logiciels.....	97
<b>II.4. CAS TEST AVEC REFERENCES EXPERIMENTALES.....</b>	<b>98</b>
II.4.1. Introduction.....	98
II.4.2. Calcul d'erreurs.....	98
II.4.3. Références expérimentales pour l'éclairage naturel.....	99
II.4.4. Références expérimentales pour l'éclairage artificiel.....	107
II.4.5. Etude dynamique de l'éclairage naturel local : cas de la cellule LGI.....	112
II.4.6. Conclusion sur les cas tests expérimentaux.....	125
<b>II.5. CONCLUSION SUR LES RESULTATS DES CAS TESTS.....</b>	<b>126</b>

## **Chapitre III**

<b>III.1. OBJECTIF DU PROJET D'ETUDE D'ECLAIRAGE (INGENIERIE).....</b>	<b>132</b>
<b>III.2. DESCRIPTION DU BÄTIMENT.....</b>	<b>132</b>
III.2.1. Localité.....	132
III.2.2. Architecture du bâtiment.....	132
III.2.3. Dimensions et caractéristiques du local.....	134
III.2.4. Etude des obstacles.....	134
<b>III. 3. MODELISATION SOUS CODYRUN.....</b>	<b>136</b>
III.3.1. Présentation et utilisation de l'outil pour l'éclairage.....	136
III.3.2. Modélisation du bâtiment et de l'ambiance intérieure.....	138
III.3.3. Hypothèses de simulation.....	138
<b>III. 4. EXPLOITATION DES RESULTATS DE SIMULATION.....</b>	<b>138</b>
III.4.1. Etude de l'éclairement naturel.....	139
III.4.2. Etude de l'éclairage artificiel : respect de la norme NF/EN/ 12464-1.....	147
III.4.3. Amélioration des conditions de confort visuel et optimisation énergétique.....	148
<b>III. 4. CONCLUSION DE L'ETUDE DE LA SALLE TD2.....</b>	<b>149</b>
<b><u>Conclusions et perspectives</u>.....</b>	<b>151</b>
<b><u>Bibliographie</u>.....</b>	<b>157</b>
<b><u>Annexes</u> .....</b>	<b>167</b>



# INTRODUCTION GENERALE



Résumé

## Problématique et contexte de notre étude

Ce chapitre situe la thématique de notre étude, ainsi que la problématique générale et scientifique de nos travaux de recherche. Les démarches entreprises seront résumées et l'utilité de ***l'éclairage*** au quotidien ainsi que les outils qui permettent de répondre aux besoins liés à l'étude de la lumière seront également présentés.



## Tables des matières

1. THEMATIQUE DE LA RECHERCHE.....	16
2. CONTEXTE GENERAL DE LA PROBLEMATIQUE.....	17
3. CONTEXTE SCIENTIFIQUE DE LA PROBLEMATIQUE .....	17
4. OBJECTIF, ORIENTATION ET ENVIRONNEMENT D'ETUDE .....	18

## 1. Thématique de la recherche

De nos jours, optimiser la consommation énergétique d'un bâtiment tout en respectant le confort humain et l'environnement devient nécessaire. Aussi, de nombreux outils et techniques sont conçus de par le monde afin de répondre à ce besoin. Notre étude repose essentiellement sur ce triple souci.

En effet, de nombreuses pistes (outils experts, modèles, etc.) restent inexploitées. La technologie actuelle et les nombreuses avancées dans ce domaine font que nous sommes tenus de coupler les différents éléments qui répondent à ce besoin afin d'améliorer et d'optimiser leur fonctionnement. Nous pouvons par exemple citer le cas des conceptions faisant intervenir des systèmes à énergie renouvelable, tels que le photovoltaïque ou l'éolien, appliqués aux bâtiments pour la production d'énergie électrique ou encore l'optimisation de l'éclairage naturel aux dépens de l'éclairage artificiel à l'intérieur d'un local afin de minimiser la consommation d'électricité.

Plusieurs pistes d'étude peuvent être envisagées si on souhaite répondre globalement à ces besoins. Cela passe forcément par l'étude de la conception architecturale de l'habitat, les systèmes de production énergétique installés, voire les matériaux de construction utilisés. Aussi larges que soient les possibilités d'étude pour répondre à ces besoins, nous nous focaliserons essentiellement sur les facteurs qui influencent la consommation électrique d'un bâtiment. Ceci nous a ramenés à l'étude de l'éclairage. La raison de ce choix est que, jusqu'à présent, notre laboratoire n'avait pas encore exploité cette piste pour la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment. Or, l'éclairage artificiel peut représenter environ 1/3 de la consommation électrique d'un bâtiment [Multon et al., 2004]. De plus, la particularité de notre région insulaire, très ensoleillée, nous conduit à nous intéresser de très près à cette variable. Cette thèse s'inscrit donc dans une approche thématique que le laboratoire développe depuis fort longtemps, à savoir la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment. Le travail présenté a pour objectifs :

- D'apporter une évaluation réaliste des consommations électrique et de leur variation en fonction des solutions architecturale est une réponse idéale aux besoins des concepteurs;
- d'apporter des améliorations sur la caractérisation des phénomènes physiques liés à l'éclairagisme et plus particulièrement l'éclairage naturel intérieur et extérieur;
- mais également de dégager des pistes de recherche pour permettre le développement des systèmes et concepts d'éclairage naturel au sein d'un bâtiment.

Il existe une longue bibliographie scientifique sur la conception des bâtiments et spécifiquement sur les économies d'énergie tout en garantissant des conditions de vie satisfaisantes. Pour atteindre ces objectifs, des éléments indispensables qui se réfèrent à des principes de base d'architecture, bioclimatique tels que l'optimisation de l'éclairage à l'intérieur d'un bâtiment, sont mis en œuvre. En effet, maîtriser le projet architectural, c'est être en mesure de contrôler tous les effets de l'ensoleillement, à travers les formes générales et les détails de conception de l'enveloppe du bâtiment. De nombreux architectes ont mis en œuvre des formes et objets architecturaux destinés à contrôler l'ensoleillement. Contrôler l'éclairage à l'intérieur d'un local, c'est donc se donner un minimum de moyens pour vérifier que le rendu réaliste sur des dessins architecturaux correspond bien à l'effet réel souhaité : cela vaut pour toutes les catégories d'ouvertures (auvents, balcons, petite ouverture, grande ouverture, puits de lumière, etc.) et pour tous les écrans solaires (lames horizontales, claustras, etc.). Ces moyens reposent sur deux techniques : la simulation numérique d'une part, et la représentation du phénomène par des lois physiques d'autre part.

## 2. Contexte général de la problématique

En un siècle, la population mondiale a été multipliée par 6 [Liébard & al., 2005]. Cette augmentation a engendré des problèmes d'occupation des sols (logement), de santé, de confort et surtout d'énergie. En effet, le développement de la population et les progrès de la technologie ont considérablement augmenté les besoins au quotidien en énergie (fossile, nucléaire, etc.). Certaines de ces énergies sont épuisables ou encore dangereuses pour notre environnement, donc nuisibles à notre santé. Dans notre étude, nous nous sommes focalisés sur cette problématique et avons orienté nos travaux vers l'un des éléments majeurs responsables de cette consommation énergétique : l'éclairage. L'éclairage artificiel dans les bâtiments (tertiaire ou habitat individuel) représente environ 10% de la consommation nationale d'énergie électrique en France [Angioletti, 2001]. Sachant qu'au niveau mondial l'électricité représente 30% de la consommation primaire [Multon et al., 2004] et que le tiers de cette consommation est dû uniquement à l'éclairage artificiel, y compris celui utilisé dans les locaux, une bonne gestion de la lumière naturelle dans la journée pourrait nous permettre de réaliser 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'éclairage naturel. Son utilisation judicieuse est un atout majeur pour développer les qualités architecturales, énergétiques et environnementales d'un bâtiment. A cela s'ajoute le lien étroit qui existe entre l'homme et la lumière. En effet, l'homme ne pourrait vivre sans lumière (générateur de vie sur terre). Elle représente une partie incontournable de notre vécu quotidien et nous influence d'un point de vue physiologique et psychologique. Comprendre les principes qui la gouvernent (la lumière) et maîtriser son fonctionnement dans le bâtiment ne peut être que bénéfique pour nous. La lumière naturelle se révèle donc être l'éclairage d'ambiance par excellence.

## 3. Contexte scientifique de la problématique

Sur le plan scientifique, nous avons donc à répondre principalement aux problématiques suivantes :

- i. L'absence totale d'informations concernant le gisement solaire (éclairage naturel) dans notre région insulaire (zone océan Indien). Cette méconnaissance est un handicap majeur dans l'étude du confort visuel et de la maîtrise de l'énergie à l'intérieur d'un bâtiment. Il n'existe pas de station météorologique à la Réunion ni sur les îles voisines qui mesure l'éclairage naturel extérieur (gisement solaire). Sans cette information, nous ne pourrions améliorer le confort visuel lors de l'avant-projet de conception d'un bâtiment ni avoir une idée sur l'optimisation de la consommation via l'éclairage.
- ii. Le manque d'outils (experts) d'étude en éclairagisme fiables et adaptés à nos régions. Parmi les outils (informatiques ou autres) existants, peu d'entre eux ont réellement fait l'objet d'une validation. Il n'est donc pas possible de connaître avec précision le degré de fiabilité de ces outils. L'exemple des logiciels de simulation d'éclairage (artificiel et/ou naturel) illustre bien nos propos. En effet, il existe beaucoup de logiciels commerciaux qui n'ont pas été validés et qui continuent d'être utilisés en éclairagisme. Ces logiciels sous-estiment ou surestiment l'éclairage naturel et/ou artificiel. Une étude basée sur ces résultats ne peut qu'entraîner des conséquences hasardeuses sur le niveau de la consommation électrique et le confort visuel.
- iii. Et enfin, des modèles d'éclairage naturel pas du tout adaptés à notre région. Citons l'exemple des modèles empiriques d'éclairage naturel mis en place dans de nombreux pays et dont l'application se limite uniquement à ces localités [Dumortier, 1995]. Il nous faut donc améliorer ces modèles ou en trouver d'autres plus performants.

Toutes ces réflexions nous amènent à penser que des études restent encore à faire dans ce domaine. Nos travaux ont été motivés par ces constatations.

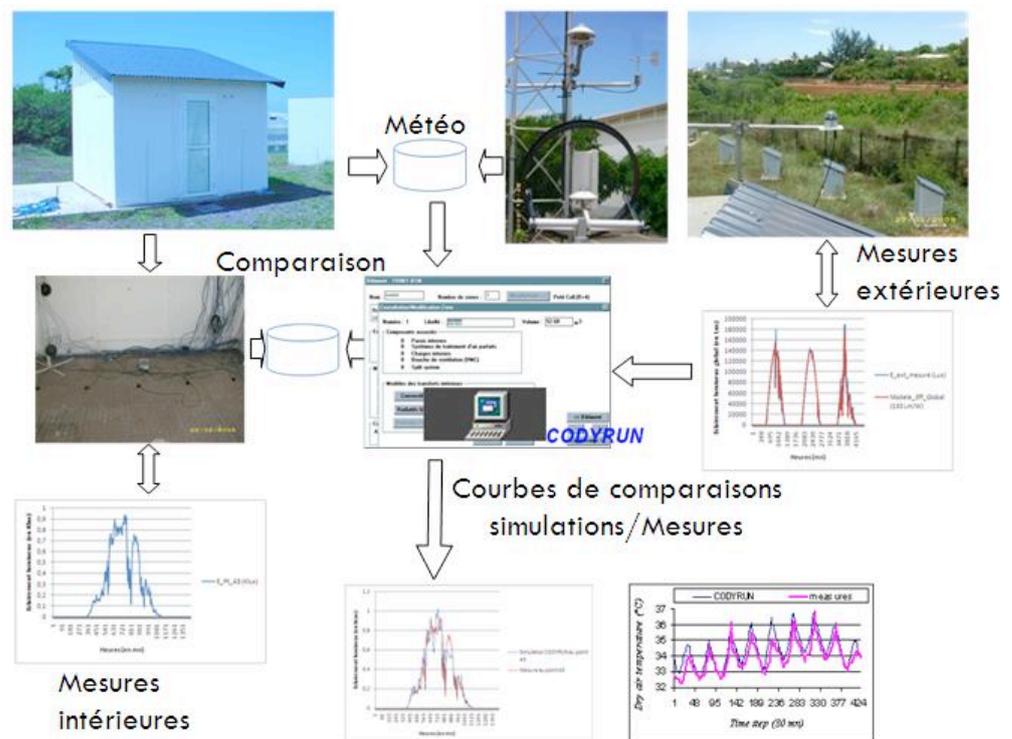
#### 4. Objectif, orientation et environnement d'étude

D'une façon générale, nous résumerons notre problématique de deux manières. Nous avons, d'une part, la nécessité de répondre à un besoin de la population : nous nous intéressons à l'éclairage intérieur dans le souci de répondre aux exigences de confort visuel, d'assurer une meilleure santé et bien-être, en plus d'une bonne liaison entre le monde extérieur et l'occupant. Mais aussi, cela nous permet de prédire l'éclairement et d'optimiser la performance visuelle, souligner l'architecture des lieux et réduire la consommation énergétique du bâtiment. D'autre part, nous souhaitons améliorer les études déjà faites dans le domaine de l'éclairagisme, qui sont limitées ou peu adaptées : des modèles limités, des calculs numériques trop longs à réaliser, des pistes de recherche non encore exploitées, des outils non adaptés à certaines régions, etc. En effet, de nombreux modèles (simplifiés, numériques, voire empiriques) en éclairage naturel existent de nos jours. L'inconvénient est que ces modèles ne s'appliquent, pour la plupart des cas, que dans des régions où les conditions climatiques sont loin de ressembler à celles des régions insulaires. Un travail doit donc être mené pour valider ces modèles dans ces zones. Ainsi, la mise en place d'une plate-forme expérimentale pour l'élaboration d'une base de données en éclairage naturel à l'intérieur d'un local pourrait s'avérer très utile dans la zone océan Indien (Réunion, Madagascar, Comores, Seychelles, Maurice, etc.). Un autre point important est l'étude par simulation numérique, qui permettra de prédire l'éclairement au sein d'un local quelconque, ce qui fait gagner du temps et de l'argent lors des conceptions et réalisations de projets d'habitations.

C'est ce deuxième constat qui nous amène à nous intéresser au logiciel de simulation CODYRUN du laboratoire L.P.B.S. [Boyer, 1993]. En effet, pour répondre à cette problématique, nous avons ajouté, en plus des fonctions dont dispose déjà le logiciel, des modules de calcul qui permettent à ce dernier de donner les informations nécessaires sur l'éclairage (artificiel et naturel) à l'intérieur d'un local. Une présentation des modèles existants dans le domaine et introduits dans le logiciel sera faite dans le **Chapitre I**. Ensuite, une étude sera menée dans le **Chapitre II** pour apporter des éléments de validation (analytique, expérimentale et par des comparaisons inter-logiciels) des modèles préalablement choisis et insérés dans le logiciel de simulation. Et enfin, une étude de cas en éclairage sera menée dans le **Chapitre III** afin de montrer les nombreuses possibilités offertes par un tel logiciel.

Nous finirons notre étude par une conclusion générale, les pistes entreprises et les résultats obtenus par rapport aux objectifs fixés.

# MODELISATION DE L'ECLAIRAGE



## Chapitre I

## Gisement solaire lumineux extérieur, éclairage naturel et artificiel intérieur

Nous allons présenter ici l'inventaire des modèles existants dans le domaine de l'éclairage (naturel et artificiel). La bibliographie portera essentiellement sur l'éclairage intérieur. Le choix des modèles introduits dans CODYRUN ainsi que les améliorations apportées seront également explicités.



## Table des matières

<b>I.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>22</b>
I.1.1. Démarche bibliographique .....	22
I.1.2. Modélisation de l'éclairement naturel intérieur .....	23
I.1.3. Modélisation de l'éclairage artificiel intérieur .....	24
I.1.4. Modélisation du gisement solaire (éclairage naturel extérieur) .....	24
I.1.5. Logiciel de simulation d'éclairage : atouts et limites .....	25
I.1.5.1. Inventaire .....	25
I.1.5.2. Amélioration du logiciel CODYRUN : simulation numérique de l'éclairage .....	25
<b>I.2. ETAT DE L'ART DE L'ECLAIRAGE INTERIEUR (NATUREL ET ARTIFICIEL) .....</b>	<b>26</b>
I.2.1. Résumé .....	26
I.2.2. Eclairage naturel .....	26
I.2.2.1. Historique .....	27
I.2.2.2. Modèles simplifiés .....	28
I.2.2.3. Modèles numériques (ou complexes) .....	31
I.2.2.4. Modèles expérimentaux (maquettes réduites et bâtiment réels) .....	32
I.2.3. Eclairage artificiel .....	33
I.2.3.1. Hypothèses .....	34
I.2.3.2. Cas du direct intérieur .....	34
I.2.3.3. Cas du diffus intérieur .....	35
I.2.3.4. Cas du global intérieur .....	35
I.2.4. Contribution à une amélioration des modèles simplifiés pour l'éclairement naturel ..	36
I.2.4.1. Méthode Lumen améliorée .....	36
I.2.4.2. Méthode simplifiée de calcul d'éclairement naturel (direct du soleil) .....	37
I.2.4.3. Outils de calcul de l'éclairage sous CODYRUN .....	39
<b>I.3. MODELISATION DU POTENTIEL ENERGETIQUE LUMINEUX EXTERIEUR .....</b>	<b>43</b>
I.3.1. Pourquoi une base de données météorologique dans l'étude d'éclairage ? .....	43
I.3.2. Résumé de notre démarche d'étude .....	43
I.3.3. Généralisation du type de ciel .....	44
I.3.3.1. Hypothèses .....	44
I.3.3.2. Indices de caractérisation du type de ciel .....	45
I.3.3.3. Choix du modèle de caractérisation d'une journée type .....	48
I.3.4. Evaluation de l'éclairement lumineux extérieur (gisement solaire) .....	51
I.3.4.1. Inventaire des modèles simplifiés pour tout type de ciel .....	51
I.3.4.2. Inventaire des modèles basés sur le type de ciel .....	52
I.3.5. Contribution à l'étude du gisement solaire lumineux à la Réunion .....	54
I.3.5.1. Quelques rappels .....	55
I.3.5.2. Dispositif expérimental .....	56
I.3.5.3. Evaluation de la constante d'efficacité lumineuse diffuse ( $E_{ff,dif}$ ) .....	57
I.3.5.4. Evaluation de la constante d'efficacité lumineuse globale ( $E_{ff,global}$ ) .....	58
I.3.5.5. Conclusions et perspectives futures .....	60
<b>I.4. SYNTHÈSE DE NOTRE RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>61</b>

## I.1. Introduction

Avant d'aborder notre étude, nous allons présenter ici la littérature scientifique sur l'éclairage naturel et artificiel et les choix formulés dans notre démarche.

En ce qui concerne l'éclairage naturel, nous distinguons deux catégories d'étude photométrique :

- D'une part, nous étudierons les phénomènes liés uniquement à *l'éclairage naturel extérieur* (gisement solaire lumineux).
- D'autre part, nous verrons comment modéliser *l'éclairage naturel à l'intérieur* d'un bâtiment.

Même si le paramètre essentiel ici reste la variable liée à la photométrie, les précédentes études dans le domaine [Bernard, 1999] ont montré qu'il est nécessaire de distinguer la modélisation de l'éclairage naturel extérieur de l'éclairage naturel à l'intérieur d'un local. La raison invoquée est que les intensités lumineuses de ces deux types d'éclairage ne sont pas du même ordre de grandeur. En effet, l'éclairage naturel intérieur est environ 18 fois plus petit que l'éclairage naturel extérieur. La différence est due à la conception architecturale des bâtiments (vitrage, auvents, etc.) qui empêche ou atténue, pour la plupart, la pénétration de la lumière dans les locaux. De plus, nous verrons dans ce chapitre que les phénomènes photométriques observés à l'intérieur d'un bâtiment sont beaucoup plus complexes que ceux qui se produisent à l'extérieur. Les modèles utilisés pour le gisement solaire sont donc mis en échec lorsqu'il s'agit de décrire la répartition lumineuse à l'intérieur d'un local.

Dans le cas d'une étude à l'intérieur d'un local, il est important de distinguer *l'éclairage artificiel* (provenant des luminaires : lampes, ballastes, etc.) de *l'éclairage lumineux naturel* (provenant directement ou indirectement du soleil).

### I.1.1. Démarche bibliographique

Notre étude bibliographique s'organise autour de deux parcours distincts : d'une part, nous avons eu le souci de travailler sur la modélisation de l'éclairage (artificiel et naturel) à l'intérieur des locaux. Une étude des caractéristiques du gisement solaire (éclairage naturel extérieur) a aussi été nécessaire. Cette étude met en évidence un paramètre photométrique souvent utilisé et très important, qui est l'efficacité lumineuse [Dumortier, 1995] et que nous verrons en détail dans le paragraphe (I.3.5). D'autre part, nous avons jugé utile de nous intéresser aux logiciels de simulation numérique d'éclairage (artificiel et naturel) existants à nos jours. En effet, la connaissance des atouts et limites de ces derniers peut nous donner une idée des améliorations à apporter dans le domaine. De plus, nous savons pertinemment qu'un support informatique est nécessaire pour entreprendre l'étude que nous souhaitons mener. Cela allègera considérablement le temps de calcul et nous permettra de comparer les résultats obtenus avec d'autres supports existants.

Dans la plupart des cas, ce sont des logiciels de simulation numérique qui nous servent d'environnement d'étude. Il était donc logique de poursuivre dans cette optique. Le laboratoire L.P.B.S. dispose d'un logiciel de ce genre, mais qui ne traite que des aspects thermo-aérauliques. Il s'agit de CODYRUN (que nous verrons plus en détail plus loin). C'est sur cette plate-forme que nous mettrons en place nos modèles d'éclairage. La raison d'un tel choix est que c'est un logiciel de recherche développé depuis fort longtemps au sein du laboratoire. Contribuer à son évolution et à sa diversité (ajout d'un outil d'aide à la décision, par exemple le confort visuel) est donc plus intéressant.

De plus, l'accès aux codes sources du logiciel (contrairement aux autres logiciels des autres laboratoires de recherche) laisse libre cours aux modifications. Il nous a donc paru logique de nous appuyer sur cet environnement de simulation pour réaliser nos travaux et apporter notre contribution en y introduisant des modèles d'éclairagisme.

L'idée sur laquelle nous nous sommes basés a alors été d'introduire, sous CODYRUN, des modèles connus ou mis en place (durant l'étude) d'éclairage (artificiel et naturel) afin de pouvoir simuler et diagnostiquer la lumière à l'intérieur des bâtiments.

La démarche de notre étude bibliographique sur l'éclairage a donc été de répertorier tous les logiciels de simulation numérique existants et d'identifier les atouts et limites de chacun d'eux afin de nous faire une idée sur des pistes probables de ce que CODYRUN pourrait apporter d'original dans le domaine. Il s'agissait ensuite de faire l'inventaire des modèles existants et de sélectionner ceux qui seront introduits dans le logiciel. Et enfin, de mettre en place les algorithmes et codes de calculs appropriés à la simulation de l'éclairage intérieur sous CODYRUN.

### 1.1.2. Modélisation de l'éclairage naturel intérieur

Caractériser l'éclairage lumineux naturel est très complexe. Plusieurs paramètres entrent en jeu (facteur de forme, taille des ouvertures, profondeur des locaux, etc.). Nous avons en général trois catégories de modèles d'éclairage naturel intérieur, qui sont les suivantes (Figure 1.1) : les modèles dits simplifiés (Lumen, Split flux, etc.), les modèles numériques (radiosité, tracé de rayons) et les modèles dits expérimentaux (maquettes réduites, in situ, etc.).

Les modèles expérimentaux demandent beaucoup de moyens financiers (reconstitution de la voûte céleste artificielle dans le cas d'étude d'éclairage naturel intérieur à partir d'une maquette réduite, par exemple) et une parfaite maîtrise des maquettes à échelle réduite ou de l'expérimentation in situ. Dans le cas expérimental, la période pour retrouver des valeurs exploitables est relativement longue et dépend fortement des contraintes climatiques du lieu. S'agissant des maquettes réduites, on augmente considérablement les erreurs sur les résultats obtenus lorsque l'on cherche à mettre en place un modèle à partir de cette méthode. Nous avons donc renoncé à ces démarches.

S'agissant des modèles numériques, leur temps de calcul numérique est élevé. Ils sont en général beaucoup plus utilisés dans l'étude qualitative (rendu réaliste en 3D) et donc peu adaptés à notre étude plutôt quantitative de la variable lumineuse que nous cherchons à caractériser.

Et enfin, pour ce qui est des modèles simplifiés, l'inconvénient majeur est qu'ils ne sont applicables que sous certaines conditions (type de ciel, limités à quelques points uniquement, etc.). Toutefois, ils présentent énormément d'avantages : faciles à comprendre et à mettre en place, calculs plus rapides et simples, résultats acceptables, etc. De tels modèles s'inscrivent dans la logique même d'un logiciel tel que CODYRUN : convivialité, simplicité, temps de simulation très courts, etc. En effet, le logiciel sur lequel nous nous sommes appuyés pour réaliser nos travaux, est conçu avec des modèles, pour la plupart, semi-détaillés. Ces modèles ont été validés à partir de nombreuses démarches scientifiques et font l'œuvre de plusieurs publications, lui donnant ainsi une crédibilité et servant aussi bien de plate forme de recherche que d'outil dédié aux bureaux d'étude. Nous sommes donc restés dans cette logique et avons opté pour les modèles de type simplifiés.

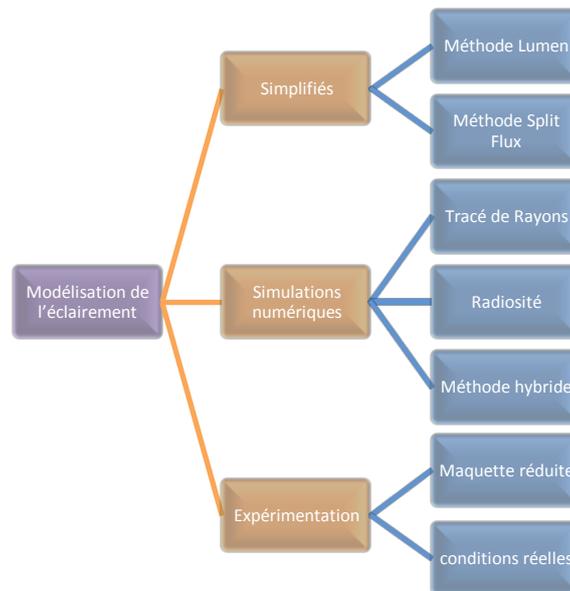


FIGURE I.1. LES TROIS CATEGORIES DE MODELES POUR L'ECLAIREMENT NATUREL INTERIEUR

### 1.1.3. Modélisation de l'éclairage artificiel intérieur

Quantifier l'éclairage artificiel à l'intérieur d'un local, sous certaines conditions, est relativement simple. Ceci s'explique par le fait que la source lumineuse (lampes, néon, etc.) diffuse une lumière dont on connaît d'avance les propriétés physiques (données par le constructeur). Lors de notre étude bibliographique, nous nous sommes rendu compte que la méthodologie de calcul d'éclairage en un point quelconque du local était souvent la même : on détermine une partie directe de cette valeur à partir de la loi de Lambert et une partie diffuse (souvent simplifiée) qui tient compte du facteur de forme des parois internes du local. Les parties directe et diffuse de cet éclairage sont calculées indépendamment. Au final, nous obtenons la répartition lumineuse de l'éclairage artificiel intérieur en sommant ces valeurs distinctes. Nous resterons donc dans cette même démarche pour modéliser les flux provenant des sources lumineuses artificielles. Une étude faite auparavant [Cropper, 2001] montre que cette méthode se prête facilement à la programmation informatique et donne de très bons résultats au niveau de la simulation. Nous n'aurons donc pas de souci majeur pour introduire ces modèles dans CODYRUN.

### 1.1.4. Modélisation du gisement solaire (éclairage naturel extérieur)

Utiliser un logiciel de simulation numérique d'éclairage naturel intérieur nécessite, au préalable, la connaissance d'informations sur le gisement solaire lumineux (éclairage naturel extérieur). En général, cela est fourni par des fichiers météorologiques du site à étudier. En effet, cette variable est aléatoire et fonction du climat. Sachant qu'à la Réunion en particulier et dans la zone océan Indien en général nous manquons considérablement de données photométriques (valeurs d'éclairage en lux par exemple), il nous est donc impossible de simuler l'éclairage naturel intérieur dans cette zone. Nous avons donc été contraints de trouver une solution afin de pouvoir réaliser nos simulations sous CODYRUN. Durant notre recherche bibliographique, nous avons trouvé un paramètre qui pouvait résoudre le problème. Il s'agit de l'efficacité lumineuse. En effet, grâce à ce paramètre, nous pouvons déduire l'éclairage lumineux (en lux), connaissant l'irradiation (en  $W.m^{-2}$ ). Or, l'irradiation est une valeur qui est souvent mesurée partout dans la zone. De nombreux modèles d'efficacité lumineuse, que nous verrons plus loin, existent dans la bibliographie scientifique [Dumortier, 1995].

### 1.1.5. Logiciel de simulation d'éclairage : atouts et limites

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 que l'on cherche à caractériser. Nous discuterons sur les avantages et inconvénients de chacun d'eux. Au final, nous tenterons de combiner ces deux aspects au sein du même code, CODYRUN. Cette étude nous permet aussi de nous situer dans le domaine et de nous efforcer d'apporter des améliorations.

#### 1.1.5.1. Inventaire

Cet inventaire a été réalisé par le laboratoire LBNL en Californie [William, 1999]. Nous nous sommes appuyés sur ces travaux et avons rajouté d'autres logiciels pour compléter l'étude. Nous distinguons les logiciels payants de ceux non payants. Nous avons aussi dressé, sauf si les informations ne sont pas données, la liste des modèles d'éclairage utilisés dans chaque logiciel. Il nous a aussi semblé important de mentionner si le logiciel répertorié simule l'éclairage artificiel et /ou naturel. Dans le cadre de la tâche 21 de l'IEA [William, 1999], un inventaire des logiciels de recherche élaborés par différents laboratoires et traitant de la simulation de l'éclairage (artificiel et/ou naturel) a été réalisé. Les logiciels les plus souvent cités dans le domaine sont : RADIANCE, HELIOS, DOE-2, LESO-DIAL, ADELINÉ et SUPERLITE. Ce recensement nous a permis de constater que la plupart de ces logiciels ne prenaient pas en compte l'effet du second jour [Liébard, 2005]. Ceux qui le faisaient, excepté RADIANCE, ne considéraient que l'aspect purement réaliste (rendu visuel) de la répartition lumineuse sans se soucier des valeurs d'éclairement en chaque point intérieur du local considéré. Une autre remarque importante est que les logiciels de recherche nécessitent beaucoup de données d'entrée. La plupart de ces informations (exemple des effets bidirectionnels des protections solaires et des matériaux complexes) ne sont pas disponibles, ce qui peut rendre difficiles les simulations numériques.

Concernant les logiciels commerciaux, leur principal défaut est qu'ils surestiment ou sous-estiment les valeurs des flux lumineux. Ceci s'explique par le fait que beaucoup de ces logiciels n'ont pas fait l'objet d'une validation. Il nous paraissait donc prudent de ne pas se fier à ces derniers.

Au final, ce travail nous a permis de voir les limites des logiciels existants. La question sous-jacente à notre étude est donc la suivante : est-il possible de trouver un logiciel de simulation numérique d'éclairage (artificiel et naturel) intérieur à la fois convivial et précis dans les calculs qui puisse satisfaire tout autant le monde de la recherche que celui des professionnels du domaine ?

#### 1.1.5.2. Amélioration du logiciel CODYRUN : simulation numérique de l'éclairage

Notre contribution a été, tout d'abord, d'étendre les possibilités offertes par CODYRUN. En effet, auparavant, le logiciel traitait principalement des aspects thermique, aérodynamique et hydrique dans les bâtiments. Nous avons introduit des modèles d'éclairage (naturel et artificiel) qui fournissent principalement les valeurs d'éclairement en un point d'un plan utile quelconque. Il est important de souligner que cette étude n'est faite que sur un plan utile (le cas de l'éclairement sur des plans verticaux n'est pas considéré). Nous nous sommes aussi attardés à répondre à plusieurs exigences de simulations liées à l'éclairement naturel intérieur, qui s'avèrent être complexes. Il s'agit par exemple de la représentation dans l'espace cartésien des points éclairés. Des algorithmes de couplage de modèles ont aussi été établis, pour le calcul de ces éclaircissements. De surcroît, des constantes d'efficacité lumineuse locale ont été introduites (grâce à des travaux expérimentaux).

## I.2. Etat de l'art de l'éclairage intérieur (naturel et artificiel)

### I.2.1. Résumé

La bibliographie générale sur l'éclairage intérieur (artificiel et naturel) sera exposée. Nous présenterons également les différentes contributions que nous avons apportées dans le domaine. Il s'agit notamment :

- D'une amélioration de la méthode Lumen (modèle simplifié de calcul d'éclairement naturel intérieur) ;
- De la conception d'un nouveau modèle simplifié de calcul d'éclairement naturel direct. Ce modèle répond parfaitement aux exigences des algorithmes de simulation numérique à introduire dans CODYRUN ;
- De la mise en place d'un algorithme sous CODYRUN pour la simulation complète de l'éclairage intérieur (naturel et artificiel) dans l'étude de la consommation électrique;
- De la prise en compte du flux lumineux direct provenant du soleil et traversant un second jour dans la simulation informatique du logiciel CODYRUN à partir de modèles simplifiés. Il faut souligner que, jusqu'à présent, seuls des modèles numériques très avancés (radiosité, tracé de rayon, etc.) pouvaient prétendre à résoudre ce problème de second jour. Le second jour est par définition l'apport de lumière à une pièce au travers d'une autre pièce. Nous avons donc abordé d'autres formes de modèles, moins coûteux en temps de calcul et plus simples à mettre en place. Cette méthode développée possède aussi la particularité de pouvoir prendre en compte les taches solaires.

### I.2.2. Eclairement naturel

Nous distinguons trois catégories de modélisation pour la qualité lumineuse naturelle. Il s'agit de la modélisation dite : simplifiée, numérique et enfin expérimentale. Chacune de ces catégories de modélisation découle de travaux menés au préalable par de nombreux laboratoires de recherche et conduit à des résultats assez proches de la réalité [William, 1999]. Dans notre étude, nous nous intéresserons uniquement aux modèles dits simplifiés. Pour cette raison, nous nous attarderons davantage sur cette partie bibliographique.

Trois dispositions des fenêtres sont rencontrées. Il s'agit des fenêtres latérales, zénithales et horizontales. Dans les trois cas énoncés auparavant, nous avons trois types d'éclairement naturel possibles qui traversent le vitrage et qui pénètrent le local : on a l'éclairement traversant un vitrage unilatérale (ou multilatérales), l'éclairement provenant des puits de lumière et, enfin, du second jour.

Toute notre étude portera sur la lumière naturelle qui traverse un simple vitrage latéral et qui pénètre un local de manière unilatérale (ou multilatérale), ainsi que la partie liée directement au second jour. Les paramètres qui caractérisent l'éclairage naturel moyen dans un local sont classiquement : l'orientation de la vitre, le ratio fenêtre / mur, le type de fenêtre (qui nous donne la réflectance et la transmittance de la vitre considérée), le jour de l'année, l'heure du jour et les conditions de ciel.

### I.2.2.1. Historique

L'histoire de l'évolution et des découvertes dans le domaine de l'évaluation quantitative de la lumière naturelle dans le bâtiment fut d'abord marquée par J. B. Collins [Collin, 1984]. En effet, dans son article paru en 1984, il vient nous rappeler que les premières traces d'études quantitatives de la lumière naturelle remontent à 1865. L'étude était faite à l'époque à partir d'une approche graphique, pour être utilisée dans des espaces et avec des fenêtres rectangulaires, hors cas complexes.

A partir de 1914, différents types de ciels artificiels sont introduits dans le but de simuler la lumière naturelle à l'intérieur de maquettes [Kittler, 1960]. Des systèmes d'éclairage naturel plus complexes ont pu être étudiés, sous des conditions lumineuses extérieures normalisées.

Compte tenu des enjeux associés à l'éclairage, la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) voit le jour en 1928. Elle a pour but de développer des normes ainsi que des procédures de mesure dans le domaine de l'éclairage. Elle est reconnue par l'ISO et par les organismes internationaux de standardisation grâce à son savoir-faire et son expertise dans le domaine de l'éclairage (artificiel et/ou naturel).

En 1970 [CIE, 1970], la CIE propose, dans sa publication "Daylight", une méthodologie pour évaluer la lumière naturelle à l'intérieur des bâtiments à partir du Facteur de Lumière du Jour (F.L.J. ou Daylight Factor, i.e. D.F). Plus d'une cinquantaine d'autres méthodes sont répertoriées dans ce même ouvrage.

L'année 1970 voit aussi apparaître une nouvelle ère de calcul numérique en éclairage naturel grâce, notamment, aux progrès de l'informatique en particulier et aux développements des logiciels de simulation en général.

P. R. Tregenza et I. M. Waters [Tregenza, 1983] introduisent la notion de coefficient de lumière du jour (Daylight coefficient) en 1983.

En 1991, à la session de Melbourne, le comité technique 3-07 de la CIE lance un programme international de mesures lumineuses sous le nom d'IDMP (International Daylight Measurement Program). Il a pour objectif de mieux connaître le gisement lumineux solaire dont dispose le ciel réel.

La méthode IDC (Integration of Directional Coefficients) mise en place par K. Kapamichael et L. Beltran en 1993 [Kapamichael, 1993] permet de simuler les performances lumineuses des systèmes d'éclairage naturel pour n'importe quel type de ciel et d'environnement extérieur. C'est l'approche dite hybride qui a permis une telle étude. En effet, ils ont pu, à partir de modèles empiriques provenant de l'expérimentation sur des maquettes, reconstituer par simulation numérique les performances lumineuses pour tout type de ciel.

En 1995, les travaux de Dumortier [Dumortier, 1995] viennent compléter les informations sur le gisement solaire lumineux extérieur et valider les modèles empiriques existants. En effet, dans sa thèse, il a étudié, à travers des stations météorologiques réparties de part et d'autre dans le monde, les phénomènes photométriques du soleil. Il étudia la relation qui existe entre le gisement solaire énergétique (en  $W.m^{-2}$ ) et le gisement solaire lumineux (en lux) pour des spectres donnés. L'étude fut donc faite sur l'efficacité lumineuse, que nous verrons plus en détail dans nos travaux. Un inventaire de modèles existants ainsi qu'une comparaison inter-modèles lui ont permis de caractériser avec plus de rigueur l'éclairement naturel extérieur. Durant ses travaux, une station météorologique, encore opérationnelle, a vu le jour. Ses travaux rentrent dans le cadre du projet IDMP du CIE.

En 1998, J. A. Clarke et M. Janak ont mis en place une méthode qui permet de déterminer l'éclairage naturel intérieur à partir du coefficient de lumière du jour en utilisant deux grands logiciels scientifiques de simulation numérique dans le domaine de l'éclairagisme : RADIANCE et ESP-r. [Clarke, 1998].

En 1999, L. Michel [Michel, 1999] introduit la notion de Facteur de Lumière du Jour Partiel (FLJP) pour l'étude de l'éclairage naturel au sein d'un local appliqué à la simulation expérimentale.

Dans cette même année, B. Paule [Bernard, 1999] met en place un outil numérique d'aide à la décision pour l'étude de l'éclairage naturel et artificiel à l'intérieur d'un local. Le logiciel DIAL voit le jour. La particularité de ce logiciel est qu'il permet à la fois de faire un diagnostic d'avant-projet d'éclairage à l'intérieur d'un bâtiment tout en utilisant des modèles très simplifiés (gains en temps de calcul) et précis.

En 2004, Maamari [Maamari, 2004] établit une série de cas tests sur les logiciels de simulation d'éclairage (artificiel et naturel). Ces tests permettent d'apprécier le degré de fiabilité des logiciels de calcul en éclairage.

De nos jours, d'autres études sont en cours de par le monde pour améliorer davantage les outils de simulation numérique d'éclairage et récolter le maximum de données expérimentales sur des maquettes grandeur nature ainsi que sur les gisements lumineux terrestres. C'est notamment le cas par exemple de la tâche 31 de l'IEA [IEA, 2007].

### 1.2.2.2. Modèles simplifiés

Il existe un grand nombre de méthodes simplifiées permettant, à l'aide d'abaques ou de tables, de prévoir la pénétration de l'éclairage naturel dans un local en fonction des caractéristiques de l'ouverture (forme, dimension, position) et de l'éloignement par rapport à cette dernière. L'Agence Internationale de l'Energie (I.E.A), dans sa tâche 21, a dressé une liste des méthodes existantes [Boer, 1998]. Nous citerons notamment le "Lumen Method" ou encore le " Split-Flux Method", connu sous le nom de "méthode de coefficient de la lumière du jour". Ces deux méthodes seront décrites ci-après.

#### 1.2.2.2.1. "LUMEN METHOD"

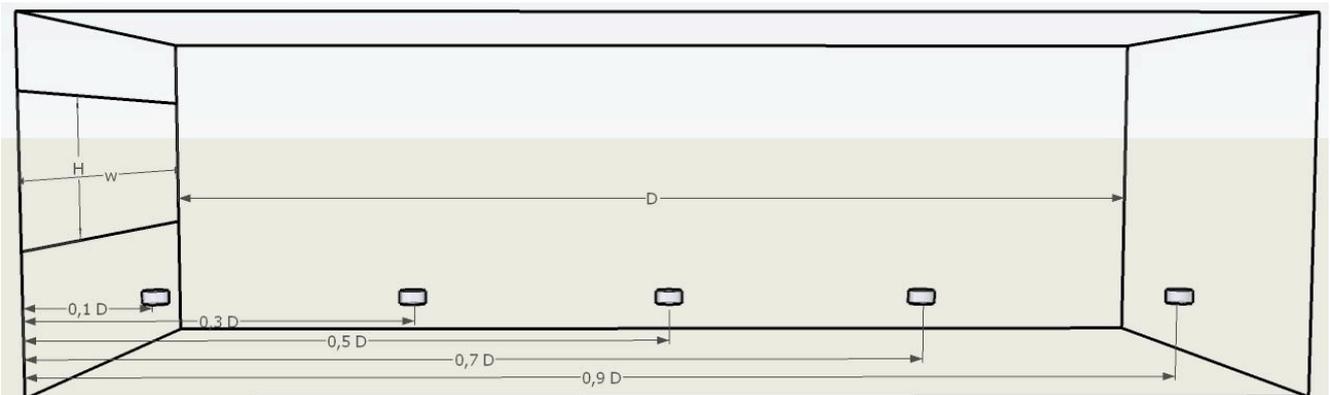


FIGURE I.2.POSITIONNEMENT DES POINTS DE CALCUL DE LA METHODE "LUMEN"

Ce modèle géométrique utilisé dans la méthode Lumen pour l'éclairage en façade [IES, 1989] est le plus répandu aux Etats-Unis. Il consiste à évaluer l'éclairage naturel provenant des ouvertures en façade et en toiture. Cette méthode tient compte de la date et de l'heure considérée, de la localisation (latitude et longitude), ainsi que des conditions météorologiques (ciel clair, intermédiaire et couvert). Elle s'applique donc pour tous les types de ciel.

La démarche pour prédire l'éclairement dû à des ouvertures en façade (appelé couramment "Lumen Method for Sidelighting") est décrite dans [IESNA, 1984] et [IES, 1989].

L'inconvénient d'une telle méthode est que l'on ne peut calculer les valeurs d'éclairement que sur les cinq points décrits par la Figure 1.2., ce qui limite l'étude. Nous verrons comment améliorer le modèle afin de calculer les valeurs d'éclairement en n'importe quel point de l'axe perpendiculaire au plan du vitrage.

#### 1.2.2.2.2. SPLIT FLUX SYSTEM (FACTEUR DE LUMIERE DU JOUR)

Il s'agit d'une méthode élaborée par le Building Research Establishment [BRE, 1986] et publiée par la CIBSE [CIBSE, 1987]. Elle permet de calculer, pour un ciel couvert CIE [CIE, 1970], le facteur de lumière du jour (FLJ en français ou DC ou encore DF en anglais qui signifie Daylight Factor) en un point quelconque d'un local au moyen de formules et d'abaques. Nous décomposons notre éclairement intérieur en trois sources (composantes) : composante directe  $FLJ_{direct}$  (due à l'éclairement provenant directement du ciel par ciel couvert), composante réfléchie externe  $FLJ_{ref,ext}$  (provenant des obstacles extérieurs) et enfin la composante réfléchie interne  $FLJ_{ref,int}$  (due à la quantité de lumière naturelle réfléchie par les parois intérieures d'un local). L'étude est faite uniquement pour des types de ciel couvert (norme CIE). En additionnant ces FLJ (direct, réfléchi externe et réfléchi interne) et en multipliant la somme par l'éclairement horizontal extérieur au local et par certains coefficients pondérateurs, nous pouvons tirer l'éclairement horizontal à l'intérieur du local.

$$FLJ = \frac{E_{int}}{E_{ext}} \quad \text{EQ 1.1}$$

Les expressions de  $FLJ_{direct}$ ,  $FLJ_{ref,ext}$  et  $FLJ_{ref,int}$ , sont données ci-dessous :

#### Calcul de la composante Directe ( $FLJ_{direct}$ )

La valeur de cette composante est fortement liée à l'architecture et la position du vitrage (ou fenêtre) par rapport au point éclairé à l'intérieur du local. Une formule analytique [Hopkinson, 1963] nous permet de retrouver cette valeur. Pour plus de détails sur les calculs, le lecteur est invité à se reporter à la thèse de B. Paule [Bernard, 1999].

Le calcul du  $FLJ_{direct}$  diffère suivant les types d'ouvertures des vitrages (horizontaux, verticaux ou zénithaux). Dans notre étude nous ne traiterons que du cas d'ouvertures verticales (Figure 1.2). D'autres calculs sont faits lorsqu'il s'agit d'étudier les ouvertures horizontales et zénithales, mais que nous n'aborderons pas. Il est à souligner que les méthodes que nous avons décrites jusqu'à présent ne permettent pas d'analyser des situations complexes, ni d'étudier une stratégie lumineuse complète telle que les "clerestory" (bandeau lumineux, défini comme étant des fenêtres dont le seuil d'ouverture se trouve au dessus du niveau de l'œil) ou encore les "lightshelves" (dispositifs ou auvents dont les surfaces extérieures sont très réfléchissantes et qui permettent de rediriger la lumière du naturel qui pénètre un local vers le plafond).

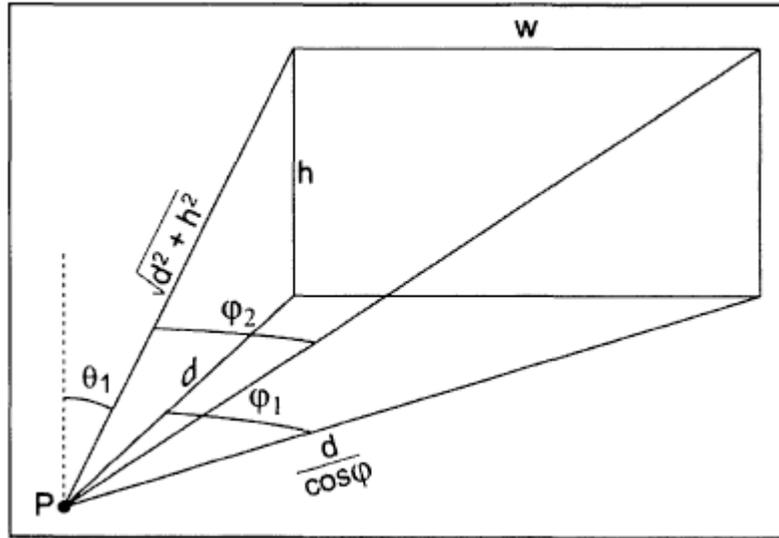


FIGURE I.3 POSITIONNEMENT D'UN POINT INTERIEUR VIS A VIS D'UNE OUVERTURE LATÉRALE (OU VERTICALE)

$$\begin{aligned}
 FLJ_{direct} = \frac{3}{14\pi} \arctan\left(\frac{w}{d}\right) - \frac{3}{14\pi} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{h}{d}\right)^2 + 1}} \arctan\left(\frac{\frac{w}{d}}{\sqrt{\left(\frac{h}{d}\right)^2 + 1}}\right) + \frac{2}{7\pi} \arcsin\left(\frac{\frac{w}{d} \times \frac{h}{d}}{\sqrt{\left(\frac{w}{d}\right)^2 + 1} \times \sqrt{\left(\frac{h}{d}\right)^2 + 1}}\right) - \\
 \frac{2}{7\pi} \left(\frac{\frac{w}{d} \times \frac{h}{d}}{\left(\left(\frac{h}{d}\right)^2 + 1\right) \times \sqrt{\left(\frac{h}{d}\right)^2 + \left(\frac{w}{d}\right)^2 + 1}}\right) \quad \text{EQ I.2}
 \end{aligned}$$

Le rapport  $h/d$  correspond à  $\tan(\omega_1)$  et  $w/d$  à  $\tan(\omega_1)$  égal aussi à  $\tan(\omega_2)$ .

#### Calcul de la composante réfléchie extérieure $FLJ_{ref,ext}$

Une fois connu le  $FLJ_{direct}$ , nous pouvons déduire facilement le  $FLJ_{ref,ext}$ . En effet, ce dernier se calcule comme la composante directe pondérée d'un facteur de réflexion moyen de l'obstacle extérieur (masque).

$$FLJ_{ref,ext} = FLJ_{direct} \times \rho_{Obs} \quad \text{EQ I.3}$$

$\rho_{Obs}$  : Facteur moyen de réflexion de l'obstacle (masques lointains ou obstruction de la lumière naturelle)

#### Calcul de la composante réfléchie intérieure $FLJ_{ref,int}$

La quantité de lumière réfléchie par les parois intérieures d'un local diminue en fonction de l'éloignement par rapport à l'ouverture. Nous pouvons retrouver une valeur moyenne de la composante réfléchie interne sur pratiquement tout le local grâce au  $FLJ_{ref,int}$ . L'équation est la suivante :

$$FLJ_{ref,int} = \frac{(0.85 \times A_w) \times (C \times RF_w \times RC_w)}{A \times (1-R)} \quad \text{EQ I.4}$$

Avec :

- $A_w$  : Surface de la fenêtre ( $m^2$ )
- $C$  : Coefficient dépendant des obstructions extérieures (pour une obstruction continue avec une hauteur angulaire  $w$  au-dessus de l'horizon (mesurée au centre du vitrage),

$$C = 40 - \frac{w}{2} \quad \text{EQ I. 5}$$

- $RF_w$  : Facteur de réflexion moyen pondéré du sol et des surfaces de mur situées en dessous du centre de l'ouverture (à l'exclusion du mur contenant l'ouverture).
- $RC_w$  : Facteur de réflexion moyen pondéré du plafond et des surfaces de mur situées au dessus du centre de l'ouverture (à l'exclusion du mur contenant l'ouverture)
- $A$  : Surface totale des parois intérieures (sol, murs et plafond, y compris les ouvertures) en  $m^2$
- $R$  : Facteur de réflexion moyen pondéré des surfaces internes de parois (sol, murs et plafond y compris les ouvertures)

Pour les portions du local les plus éloignées de l'ouverture, la valeur moyenne de la composante réfléchie interne calculée est pondérée par un facteur de correction. Le tableau (Tableau I.1) nous indique les valeurs de pondération en fonction du facteur de réflexion moyen  $R$  [BRE, 1986].

Réflexions moyennes (R)	Facteur de correction
0.3	0.54
0.4	0.67
0.5	0.78
0.6	0.85

TABLEAU I.1. COEFFICIENTS CORRECTEURS PONDERES DE LA COMPOSANTE REFLECHIE INTERNE

D'autres facteurs de correction sont appliqués sur les résultats du  $FLJ_{ref,int}$  pour tenir compte du type de vitrage, de la salissure des vitres, de l'importance des menuiseries ainsi que du vieillissement des revêtements internes.

Une fois connues ces trois composantes, nous pouvons déduire l'éclairement naturel intérieur en tout point P du local.

Il est à noter que ces méthodes ne permettent pas d'analyser des situations complexes, ni d'étudier une stratégie lumineuse complète. Cependant, nous allons voir par la suite comment contourner cet obstacle, en combinant différentes méthodes de calcul.

### I.2.2.3. Modèles numériques (ou complexes)

La caractérisation de la propagation de la lumière dans les locaux peut être réalisée par le biais d'outils informatiques en passant par des techniques d'imagerie numérique. Ces méthodes sont plus adaptées pour les rendus réalistes de scènes lumineuses que pour la quantification de cette lumière. On peut par exemple citer le cas de la conception virtuelle de la répartition lumineuse à travers une scène en 3D. Deux techniques numériques sont rencontrées principalement : la RADIOSITE et le TRACE DE RAYONS [William, 1999]. A cela s'ajoutent les techniques dites HYBRIDES (ou photon mapping, plus réalistes d'un point de vue rendu en 3D) qui sont la combinaison des deux premières (Radiosité et Tracé de rayons) sous un même code de calcul informatique.

1. Technique de la Radiosité : Elle consiste à caractériser les échanges radiatifs entre les différentes surfaces d'un local sur la base de facteur de forme (fraction du rayonnement hémisphérique émis par une surface source, atteignant la surface réceptrice) [Mark, 2000]. Le logiciel Superlite [Bellia, 2000] utilise cette méthode pour simuler l'éclairage. Cette technique qui fut développée, à la base, par des thermiciens pour les calculs d'échanges radiatifs a été transposée aux échanges lumineux. Les temps de calculs numériques, nécessaires à l'utilisation de ces méthodes, sont encore assez élevés malgré les progrès en matériels informatiques réalisés de nos jours. Les résultats de simulation sont donnés sous forme de courbes iso-facteur de lumière du jour ou iso-éclairage, sur le plan de travail. Les calculs sont principalement basés sur une résolution analytique et sont totalement indépendants de la position et du point de vue de l'observateur. Cela implique une visualisation de la répartition lumineuse dans l'espace depuis n'importe quel point de vue. Afin de pouvoir appliquer une telle méthode, on suppose que toutes les parois sont parfaitement diffusantes (les surfaces spéculaires ou brillantes ne sont pas prises en compte lors de la simulation), ce qui rend la qualité des images relativement moins bonne contrairement, par exemple, aux images de synthèse produites par des logiciels d'imagerie numérique tels que AccuRender®, Katie®, etc.
2. Technique du Tracé (ou Lancé) de Rayons : Le principe est de reconstituer le trajet des rayons lumineux entre la ou les sources et l'œil de l'observateur. A chaque fois qu'un rayon rencontre une surface, un calcul probabilistique, basé sur une méthode de Monte-Carlo, permet de déterminer la direction de ré-émission, en fonction de l'angle incident du rayon lumineux et de la photométrie du matériau. C'est une méthode qui permet de calculer des champs de luminance et de créer ainsi des images de synthèse de la scène étudiée. L'information est liée à la position de l'observateur et à sa direction d'observation. On a notamment l'exemple des logiciels tels que Radiance ([War, 1993] et [Ward, 1994]), Adeline [Erhorn et al., 1997] ou encore Genelux [Mitanchey, 1988] qui sont spécialisés dans le domaine de l'éclairage et qui utilisent cette technique. L'avantage des logiciels employant cette méthode est que les applications sont en théorie illimitées en termes de complexité géométrique et photométrique. L'inconvénient est le temps de simulation qui est beaucoup plus élevé que ceux employant la technique de Radiosité.

Nous ne nous intéresserons pas à toutes ces méthodes de calculs numériques dans notre étude pour différentes raisons. D'abord, ils sont lourds à mettre en place et demandent beaucoup de temps de calcul. De plus, nous disposons dans la bibliographie de modèles plus simples et donnant des résultats satisfaisants, voire semblables. Enfin, nous nous intéressons plus précisément à l'aspect quantitatif de la lumière en un point donné (valeurs de l'éclairage lumineux obtenu en un point) et non au rendu visuel informatique des scènes de cette dernière.

#### **1.2.2.4. Modèles expérimentaux (maquettes réduites et bâtiment réels)**

Les mécanismes d'inter-réflexions de la lumière restent insensibles aux phénomènes d'échelle. Cela implique que l'on peut parfaitement connaître la distribution de cette dernière dans un local en construisant une maquette à échelle réduite, à condition de respecter la photométrie des matériaux devant être mis en œuvre [Lau, 1972]. Le problème rencontré dans une telle étude réside essentiellement dans la reproduction de la source de lumière naturelle (position, direction et intensité). En effet, lorsqu'il s'agit par exemple de mesures extérieures, la solution est simple. La lumière diffuse peut être évaluée à partir des facteurs de lumière du jour, en plaçant la maquette à l'extérieur (milieu in situ) dans des conditions de ciel couvert. La visualisation de la pénétration solaire directe peut se faire, quant à elle, à partir d'un cadran solaire polaire sur la maquette [Lam, 1986].

Par contre, lorsque les mesures doivent se faire sous ciel artificiel (simulateur de lumière diffuse représentant la voûte céleste), les conditions d'expérimentation sont tout autres. Nous distinguons trois types de ciels artificiels possibles :

- i. Le ciel à Dôme : c'est un dispositif visant à reconstituer la voûte céleste à l'aide d'une multitude de lampes. C'est l'un des premiers prototypes de ciel artificiel conçu et réalisé pour l'étude d'éclairage naturel sur une maquette réduite. L'inconvénient d'un tel système est que l'on se trouve confronté à des problèmes de calibration et à un dégagement de chaleur important dû au nombre élevé de lampes (plusieurs centaines) utilisées.
- ii. Le ciel à miroir : il correspond à une enceinte dont le plafond est équipé d'une multitude de tubes fluorescents, placés derrière des panneaux diffusants, de façon à reproduire une luminance uniforme. Les parois de l'enceinte sont tapissées de miroirs afin d'augmenter la réflexion de cette lumière artificielle représentant la voûte céleste et de la prolonger ainsi jusqu'à l'horizon. La distribution des luminances est proche de celle du ciel couvert standard défini par le CIE. La maquette est ainsi placée au centre du dispositif.
- iii. Le ciel à balayage : Ce dispositif reconstitue virtuellement, à l'aide de 145 disques lumineux, un hémisphère de 5 m de diamètre [Michel, 1995]. Seul un sixième de l'ensemble de la voûte céleste est physiquement reconstruit (25 disques lumineux). Simuler l'ensemble de la voûte revient à faire des rotations successives de la maquette placée au centre du simulateur (l'angle de rotation pouvant aller jusqu'à 60 degrés). L'intensité de chaque source lumineuse pouvant être contrôlée indépendamment, le simulateur permet de reproduire une grande variété de ciels différents, définis par le CIE (couvert, isotrope, statistique, etc.). De plus, l'ensemble de la procédure expérimentale étant entièrement automatisé, l'utilisation de l'appareil (simulateur) est relativement aisée.

D'autres études sont menées sur des bâtiments à échelle réelle. C'est notamment le cas de notre étude sur la cellule LGI par exemple, que nous verrons par la suite.

Des exemples de modèles basés sur des maquettes ou bâtiments réels expérimentaux sont donnés par : "Méthode LT" ; "Méthode BRE PROTRACTORS" ou encore "Software ADELINÉ".

D'une manière plus générale, les nombreux laboratoires de recherche spécialisés dans l'éclairagisme préfèrent étudier la lumière à travers des maquettes (miniaturisées) expérimentales. Cela leur permet de contrôler la lumière (pénétration solaire directe, répartition des luminances dans un local, etc.) et de concevoir des expérimentations dans des conditions extrêmes. Mais aussi, ils gagnent en temps et en argent. Les résultats obtenus témoignent de l'efficacité de ces maquettes ([CIE, 1970] ou [Bodart, 2002] ).

### 1.2.3. Eclairage artificiel

De nombreuses études ont été menées pour quantifier l'éclairage artificiel à l'intérieur d'un local [RAVEL, 1993]. La catégorie des modèles numériques tels que la radiosité ou le lancer de rayon peut aussi s'appliquer dans le cadre d'études qualitatives d'éclairage artificiel. Cependant, toujours dans l'optique de mettre en place des modèles simplifiés, fiables et procurant des résultats quantitatifs avec des temps de calcul réduits sous CODYRUN, nous nous sommes tournés vers des techniques de calcul d'éclairage utilisées dans des logiciels de simulation tels que CALCULUX ou encore DIALUX. Le choix de cette orientation repose essentiellement sur le fait que les modèles d'éclairage artificiel utilisés dans ce dernier ont été validés et commettent des erreurs moyennes de l'ordre de 1%. Les méthodes que nous présenterons ici dans le cas de l'éclairage artificiel sont plus simples et plus générales que dans le cas de l'éclairage naturel.

### 1.2.3.1. Hypothèses

Nous allons détailler le modèle qui permet de donner l'éclairage provenant d'une source artificielle sur un point quelconque à l'intérieur d'un local. Nous avons fait les hypothèses suivantes : la diffusion de la lumière est Lambertienne (elle se propage de manière uniforme suivant toutes les directions possibles) ; l'intensité maximale de la source (donnée par un fichier photométrique) est fournie par le constructeur. La position de la source dans l'espace est connue à partir des coordonnées cartésiennes de son centre de gravité S. Tous les luminaires (sources) de grande surface ou autres, à savoir ponctuel (ou plan), cylindrique et sphérique, seront ramenés à un point (centre de gravité de la source). On supposera de plus qu'aucun obstacle ne se trouve entre le point et la source.

### 1.2.3.2. Cas du direct intérieur

Les calculs d'éclairage direct provenant d'un luminaire dépendent fortement de la structure morphologique (forme) de la source lumineuse considérée et de l'angle solide par rapport à un observateur décrit dans une position donnée.

Le problème est celui de la répartition de l'éclairage au sol provenant d'une source installée sur le plafond. L'intensité maximale de la source (en Candela ou Cd), à une portée R définie par le constructeur qui correspond à un angle  $\alpha$  d'éclairage au sol égal à zéro, sera toujours connue.

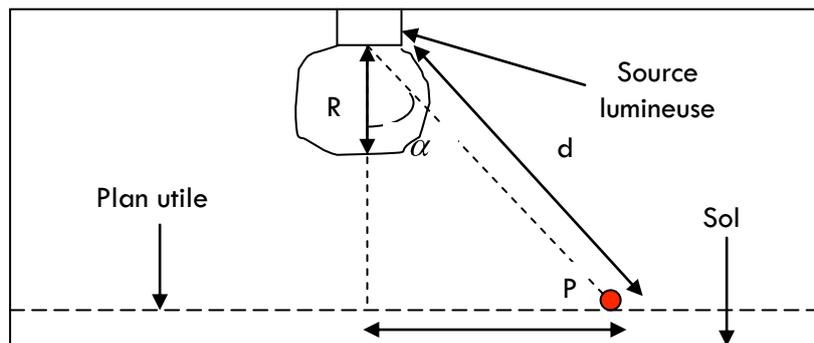


FIGURE I.4. LOCAL (VUE DE PROFIL)

Nous pouvons donc connaître l'intensité (en Cd) en n'importe quel point P du local et donc déduire l'éclairage en un point donné. En effet, 1 lux équivaut à 1 Cd.Sr/m<sup>2</sup>. La valeur numérique d'éclairage  $E_p$  reçu par un point P quelconque (orienté par sa normale  $\vec{n}$ ) par rapport à une source S de lumière artificielle dont la surface est plane est donnée par :

$$E_p = \frac{I_p}{d^2} \times \cos \alpha \quad \text{EQ I.6}$$

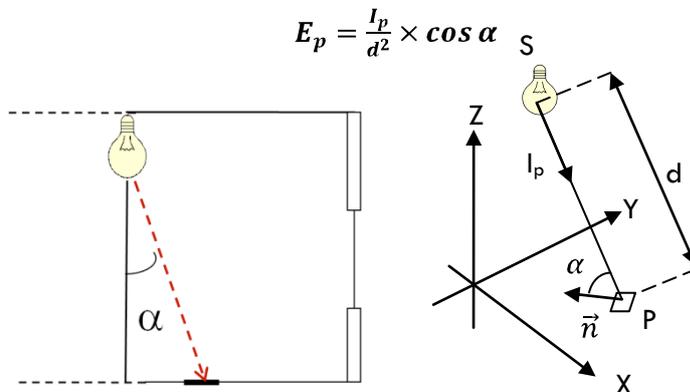


FIGURE I.5. APERÇU DANS L'ESPACE DE LA SOURCE ET DU POINT ECLAIRE

- $E_p$  : Eclairage lumineux au point éclairé P par la source S (lux)
- $I_p$  : Intensité lumineuse de la source S dans la direction du point éclairé P (Cd)
- $d$  : distance entre la source S et le point éclairé P (m)
- $\alpha$  : Angle entre la normale  $\vec{n}$  du plan contenant le point éclairé P et le rayon lumineux provenant de la source S (en degrés). Dans le cas où notre plan serait un plan utile, cet angle serait égal à l'angle entre le vecteur suivant le flux  $I_p$  et le plan perpendiculaire au plan utile.

Nous considérons toujours que la source S est représentée par un point. Même dans le cas des luminaires de forme rectangulaire ou autre (ballasts, etc.). Dans notre étude, nous ne prenons que les plans utiles, ce qui implique des points éclairés  $P_i$  ayant des normales parallèles à la direction (OZ) de notre repère cartésien.

### 1.2.3.3. Cas du diffus intérieur

La méthode pour laquelle nous avons opté est celle qui tient compte du coefficient de réflexion moyen du système fermé (le local). En effet, il est possible de connaître l'éclairage diffus provenant des inter-réflexions intérieures en utilisant les valeurs moyennes de ce coefficient.

Cette méthode est la plus utilisée, car elle donne des résultats acceptables et l'algorithme est très simple à mettre en œuvre. Nous avons opté pour cette démarche de calcul. Pour cela, nous nous sommes inspirés d'une méthode simplifiée, basée sur les facteurs de formes, représentés par des rapports de surfaces (éclairées et non éclairées) pour retrouver ces valeurs d'éclairage diffus. Une explication détaillée de cette méthode sera présentée par la suite dans l'étude du diffus provenant des taches solaires. C'est cette méthode de calcul qui a été introduite dans CODYRUN.

### 1.2.3.4. Cas du global intérieur

L'éclairage global est alors la somme des deux éclairages diffus et direct. La Figure 1.6 suivante illustre ce que nous venons d'énoncer. Nous appliquerons cette méthode sous CODYRUN.

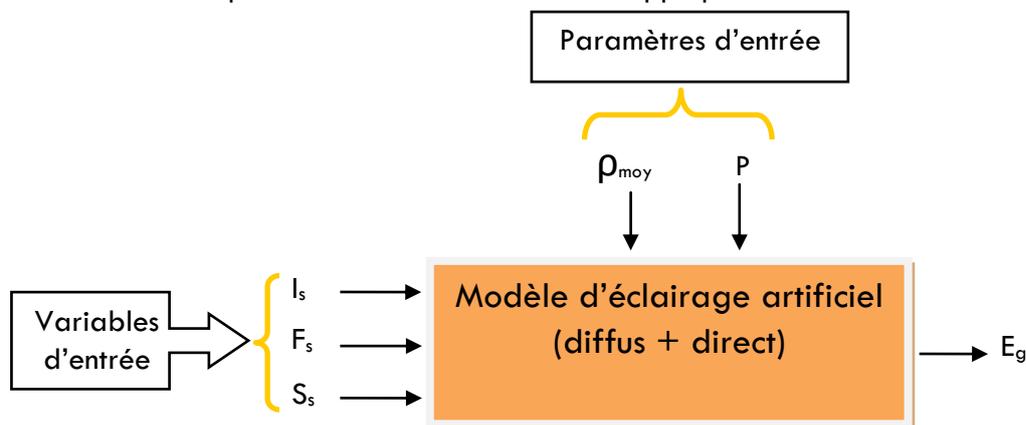


FIGURE 1.6. MODELISATION EN BLOC DE L'ECLAIRAGE GLOBAL ARTIFICIEL

Avec :

- ✓  $I_L$  : Intensité lumineuse de la source S (Cd)
- ✓  $F_s$  : Flux lumineux de la source S (lm)
- ✓  $S_s$  : Coordonnées de la source
- ✓  $P$  : Coordonnées du point éclairé P
- ✓  $E_g$  : Eclairage lumineux au point P (lx)
- ✓  $\rho_{moy}$  : Coefficient de réflexion moyen des surfaces internes des parois.

## 1.2.4. Contribution à une amélioration des modèles simplifiés pour l'éclairage naturel

### 1.2.4.1. Méthode Lumen améliorée

Nous avons vu dans le paragraphe (1.2.2.1) que l'inconvénient de cette méthode est que nous ne pouvons connaître l'éclairage que pour des positions bien définies du local (à 0.1 ; 0.3 ; 0.5 ; 0.7 et 0.9 fois la profondeur du local et suivant l'axe qui partage l'ouverture en deux). Ceci limite notre champ d'action. Afin de contourner cet obstacle, nous avons pensé à un principe tout simple qui consiste à imaginer un mur virtuel mobile se trouvant à l'intérieur du local [Fakra et al., 2007]. Ce dernier permettrait de calculer l'éclairage en n'importe quel point du local en utilisant la méthode "Lumen". En effet, à partir de notre mur virtuel, nous pouvons recalculer, grâce à la méthode lumen, l'éclairage en 5 autres points du local en gardant le même principe de calcul que dans la méthode d'origine. La seule différence notable résidera dans les nouveaux points de calcul qui diffèrent de ceux donnés par la profondeur réelle du local. Prenons comme exemple le cas où nous voulons connaître la valeur d'éclairage en un point qui se trouve à une distance de 3 m par rapport à l'axe perpendiculaire de la fenêtre pour un local de 6m de profondeur par rapport à la perpendiculaire de la fenêtre. Le calcul direct de la méthode Lumen à partir de la profondeur réelle du local ne nous donnera pas la valeur d'éclairage en ce point. Il suffit donc de prendre une profondeur virtuelle,  $D_{virtuel} = \frac{3}{0.9}$  par exemple (on pouvait aussi choisir  $D_{virtuel} = \frac{3}{0.7}$  ou encore diviser par 0.5 ou 0.3 ou 0.1 suivant le besoin), et de faire les calculs, si l'on cherche à avoir la valeur approximative en ce point (distant de 3m). Nous aurions la valeur de l'éclairage à la distance souhaitée (c.-à-d. 3 m). Notons que dans ce cas de figure, nous avons fait comme si le mur avait une profondeur de 3.33 m au lieu de la profondeur réelle (de 6 m).

Ce qui se passe au-delà de 3.33 m ne nous intéresse pas dans cet exemple. Tant que  $D_{virtuel} \leq D_{réel}$  (ce qui sera toujours le cas puisque nous ne voulons connaître l'éclairage qu'à l'intérieur du local).

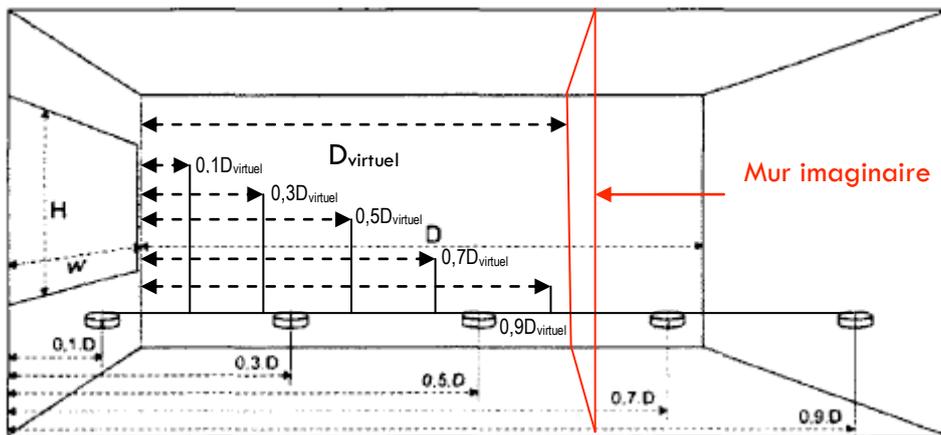


FIGURE I.7. METHODE LUMEN AMELIOREE : MUR IMAGINAIRE (OU VIRTUEL)

Cette méthode donne des valeurs d'éclairage plus intéressantes lorsque l'on s'éloigne d'une profondeur d'environ 2 fois la hauteur de la fenêtre. Dans l'ensemble, nous constatons que le profil d'éclairage obtenu à partir de la méthode Lumen améliorée, le long de l'axe, suit une logique physique qui consiste à dire que plus nous nous éloignons de la source (ouverture) plus l'intensité lumineuse diminue. A travers notre étude, nous avons aussi mis en évidence l'influence considérable de la profondeur du local et des inter-réflexions entre les parois internes.

Cependant, la méthode Lumen améliorée semble avoir des défauts pour les calculs d'éclairément à des positions très proches de l'ouverture (les erreurs sont trop élevées). Nous avons ensuite vérifié certaines autres études faites dans d'autres laboratoires de recherche [Syurapong, 2001] et nous avons constaté que la méthode Lumen commettait des erreurs allant jusqu'à 40 % par rapport aux mesures, en particulier sur les points proches de l'ouverture. Ceci s'expliquerait sûrement par le fait que nous n'avons pas tenu compte de l'épaisseur de notre ouverture dans les calculs numériques. En effet, cette épaisseur influencerait considérablement la valeur d'éclairément au point situé dans cette zone. La négligée augmente donc les erreurs. N'ayant pas d'information sur la longueur exacte de ce dernier, nous avons donc considéré le mur et le vitrage comme étant de même épaisseur. Toutefois, la complexité d'interprétation des phénomènes photométriques à l'intérieur d'un bâtiment et la simplicité des méthodes que nous étudions font que de telles erreurs sont tolérées.

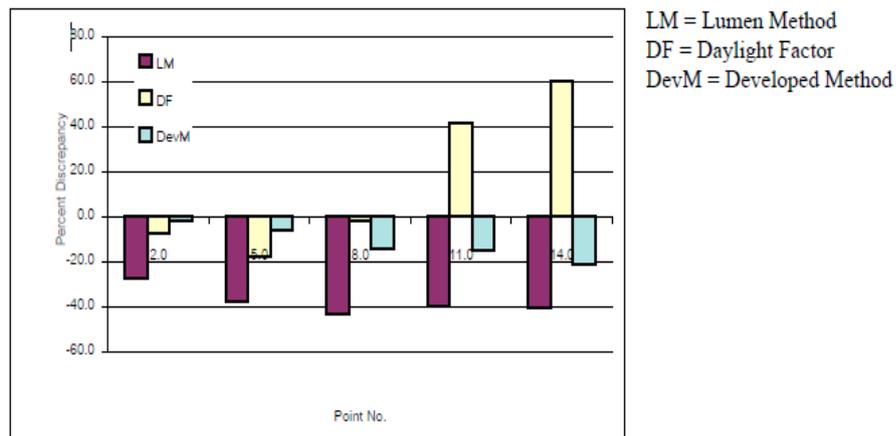


FIGURE I.8.POURCENTAGE D'ERREURS MODELES / MESURES POUR DIFFERENTS MODELES [SURAPONG, 2001]

#### 1.2.4.2. Méthode simplifiée de calcul d'éclairément naturel (direct du soleil)

Nous nous sommes intéressés à la simplification des algorithmes de calcul numérique dans l'éclairage. En effet, la simulation informatique de l'éclairage nécessite que l'on connaisse la position dans l'espace du bâtiment ainsi que des points où l'on souhaite faire les calculs. Or, cette représentation en coordonnées cartésiennes ou cylindriques ou même sphériques n'est souvent pas prise en compte par les modèles simplifiés d'éclairément naturel. Un algorithme adéquat doit être mis en place en amont pour permettre de coder de tels modèles et de les introduire dans des logiciels de calcul numérique. Dans ce paragraphe, nous avons élaboré un modèle simplifié de calcul du direct qui prend en compte, dès le début, des coordonnées de la source d'éclairément (position du centre de l'ouverture) et des coordonnées géométriques du point éclairé.

Nous sommes partis de la relation EQ .1.6 pour tenter de mettre en place cette relation. Considérons un local ayant une ouverture (avec vitrage) et un point P quelconque se trouvant sur le plan de travail. L'expression de la luminance  $L_{p,direct}$  au point P éclairé s'obtient par la relation suivante :

$$L_{p,direct} = L_{direct} \times \rho_{moy} \times \tau \times \frac{\left(\frac{z_p}{z_n}\right)}{\sqrt{(x_n-x_p)^2 + (y_n-y_p)^2 + (z_n-z_p)^2}} \quad \text{EQ I. 7}$$

Avec :

- $L_{direct}$  : La luminance provenant directement du soleil et arrivant sur le plan vertical de la fenêtre.
- $\tau$  : la transmittance de l'éclairement à travers la vitre.
- $\vec{n}(x_n, y_n, z_n)$  : le vecteur normal à la fenêtre
- P : le point intérieur au local de coordonnées,  $\vec{OP}(x_p, y_p, z_p)$  où est cherché l'éclairement direct provenant de la vitre.
- $\rho_{moy}$  : la valeur moyenne du coefficient de réflexion à l'intérieur du local (sol, murs et plafond).

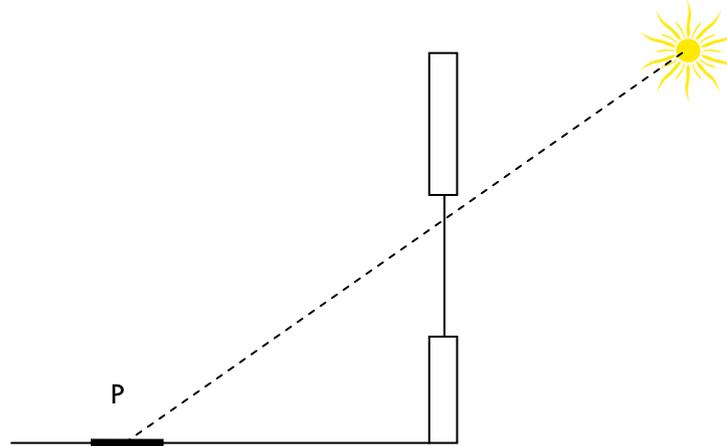


FIGURE I.9. RAYON LUMINEUX DIRECT PROVENANT DU SOLEIL ET ATTEIGNANT UN POINT P DU PLAN UTILE

Les conditions d'application d'une telle relation sont les suivantes :

- Le modèle est limité uniquement aux plans de travail (environ 0.72 m +/- 0.15 m suivant la norme européenne de référence EN 527-1) et est strictement inférieur à l'ouverture.
- L'ouverture doit être latérale (en façade) et rectangulaire.
- Les calculs ne peuvent se faire que dans un local ayant une forme architecturale classique (murs horizontaux, sol et plafond verticaux, fenêtre en façade, etc.). Dans le cas des locaux à géométrie complexe (dômes, murs inclinés, etc.), le modèle n'est pas valable.
- On considère qu'il n'y a pas d'obstacle extérieur (masque lointain) et intérieur (masque proche) à la pénétration de la lumière à travers l'ouverture.

Le Tableau I.2 nous donne une idée des inconvénients et avantages de tels modèles.

Inconvénients	Avantages
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modèle limité au plan de travail strictement inférieur à la hauteur de la fenêtre.</li> <li>• Modèle valable uniquement pour les points qui sont alignés sur l'axe central de la fenêtre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facile à mettre en place dans un code de calcul informatique.</li> <li>• Donne un aperçu sur l'allure de la pénétration de l'éclairement à l'intérieur d'un local.</li> <li>• S'applique pour tous les types de ciel.</li> </ul>

TABLEAU I.2. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU NOUVEAU MODELE SIMPLIFIE D'ECLAIREMENT NATUREL DIRECT

Bellia [Bellia et al., 2000] a comparé les valeurs de simulation de l'éclairage naturel direct (provenant du soleil) de différents logiciels de recherche (De-Light, Lumen micro 7.1 et Superlite 2.0) sous un ciel clair (plus de 100 000 Lux). Pour cela, elle a imaginé un dispositif fictif constitué d'un local rectangulaire de dimension (4x4x3 m) avec une ouverture latérale (de 2x2 m) située sur la paroi sud du local. L'éclairage est donné sur un plan utile d'une hauteur de 0.9 m par rapport au sol. Les valeurs d'éclairage ont été données par les trois logiciels le long de l'axe médian du local, perpendiculaire à la surface de la vitre et divisant la vitre en deux parties égales. Nous avons comparé ces résultats avec ceux du "modèle simple" décrit auparavant (dans les mêmes conditions de simulation) dans l'équation EQ I.7 et avons obtenu la Figure I.10 .

Les résultats obtenus montrent clairement que le "modèle simple" d'éclairage direct suit la tendance de l'allure des courbes d'éclairage que donnent les autres logiciels de simulation à partir de 2 m de profondeur (qui correspond à 2 fois la hauteur de l'allège du vitrage). Sur les points les plus proches de notre ouverture (environ entre 0.4 et 1.5 m de profondeur), le modèle a tendance à donner une allure moins similaire aux autres logiciels, mais restant tout de même dans l'intervalle des courbes de tendance (sauf au point se trouvant à 1.25 m où l'éclairage calculé par le modèle est sous-estimé, ainsi qu'au point se trouvant à 0.7 m où cette fois-ci le modèle surestime les valeurs. Nous sommes une fois encore confrontés aux problèmes rencontrés par de nombreux modèles simplifiés. En effet, la plupart de ces modèles ont du mal à donner correctement les valeurs d'éclairage sur les positions très proches de l'ouverture et sous l'allège.

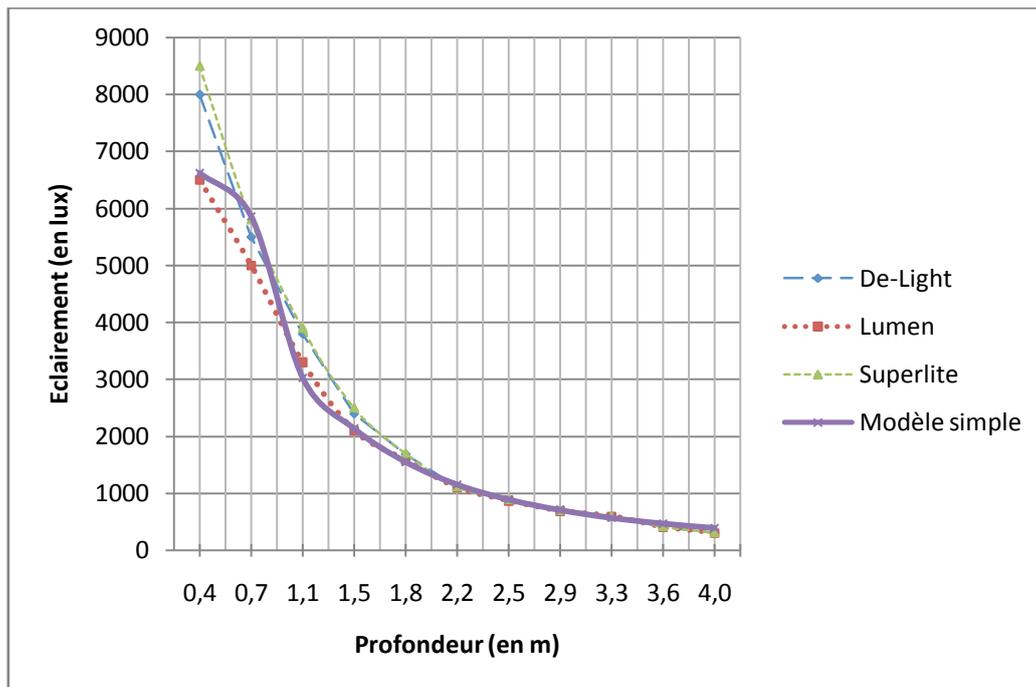


FIGURE I.10.COMPARAISON INTER – MODELES DE L'ECLAIREMENT NATUREL DIRECT DU SOLEIL (CIEL CLAIR)

#### I.2.4.3. Outils de calcul de l'éclairage sous CODYRUN

Toute notre étude portera uniquement sur l'éclairage (artificiel et/ou naturel) d'un plan utile (à une hauteur quelconque, par rapport au sol). L'éclairage sur les parois verticales (murs ou autres) ne rentre pas dans le cadre de nos simulations. De nombreux logiciels de simulation d'éclairage ne tiennent pas compte de la quantité de lumière naturelle provenant du second jour (source secondaire provenant d'une deuxième ouverture placée sur la paroi interne séparant deux locaux).

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à cette problématique et avons développé un code de calcul qui nous donne les taches solaires sur un plan utile aussi bien dans un local ayant une ouverture dirigée vers l'environnement extérieur que s'agissant d'une ouverture de second jour. Pour illustrer nos propos, nous allons étudier un cas de figure bizonne sous CODYRUN, avec ouvertures latérales situées sur la paroi interne séparant les deux zones, et présenter les résultats obtenus. Nous montrerons, au passage, les méthodes mises en place pour calculer l'éclairage aussi bien artificiel que naturel intérieur en n'importe quel point d'un plan utile.

#### 1.2.4.3.1. BUT RECHERCHE DANS LA SIMULATION

Soit un bâtiment bizonne constitué de deux locaux ( $Z_1$  et  $Z_2$ ) séparés par une paroi interne comportant une ouverture latérale en son milieu (Figure I.11). La zone  $Z_1$  dispose d'une autre ouverture latérale en plus de celle se trouvant sur la paroi de séparation (paroi interne). Supposons également que les deux zones possèdent chacune un luminaire au plafond. L'éclairage naturel provenant de l'extérieur (diffus et/ou direct) pénètre dans la zone  $Z_1$  à travers l'ouverture extérieure et dans la zone  $Z_2$  à partir de l'ouverture intérieure. En présence d'un ciel clair ou intermédiaire et suivant la course du soleil (donnée par la hauteur et l'azimut du soleil), il est possible que des faisceaux lumineux provenant directement du soleil pénètrent dans le local ( $Z_1$  et/ou  $Z_2$ ) formant ainsi des taches solaires (Figure I.12) sur la surface du plan utile. La lumière naturelle qui pénètre dans la zone  $Z_2$  est ainsi appelée second jour du fait qu'elle provient d'une ouverture secondaire.

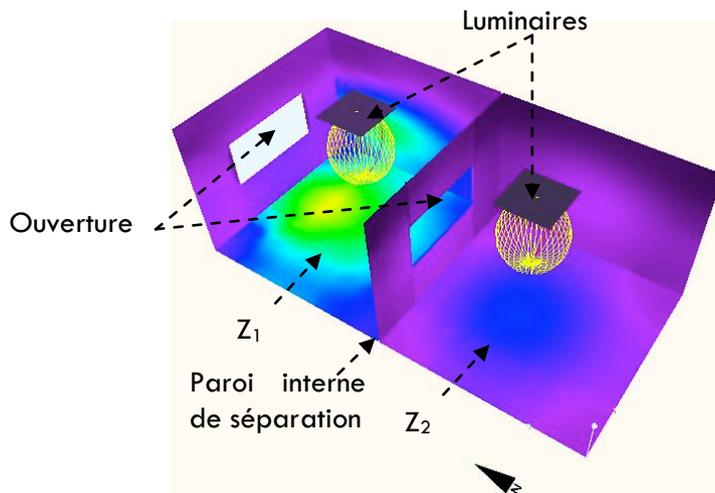


FIGURE I.11. SCHEMATISATION DU BUT A ATTEINDRE DANS LA SIMULATION SOUS CODYRUN

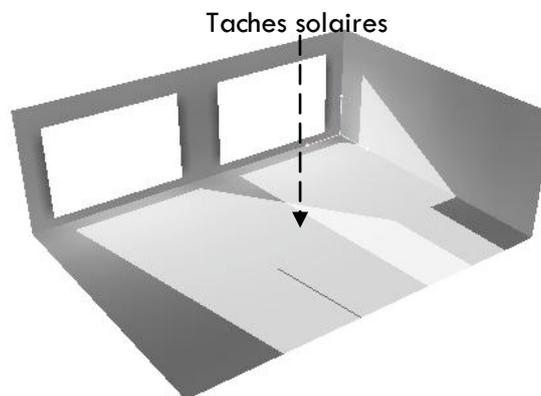


FIGURE I.12. ILLUSTRATION DE TACHES SOLAIRES

Nous attendons de notre code d'être en mesure de fournir les valeurs d'éclairage (artificiel et/ou naturel) en un point quelconque d'un plan utile donné arbitrairement et, ceci, quelle que soit la zone considérée et les types de ciels (couvert, intermédiaire ou clair).

D'un point de vue géométrique, cela revient à créer une grille surfacique de notre plan utile et mailler cette grille afin de pouvoir faire des calculs d'éclairage en chaque nœud (points d'intersection de nos mailles) du maillage (Figure I.13).

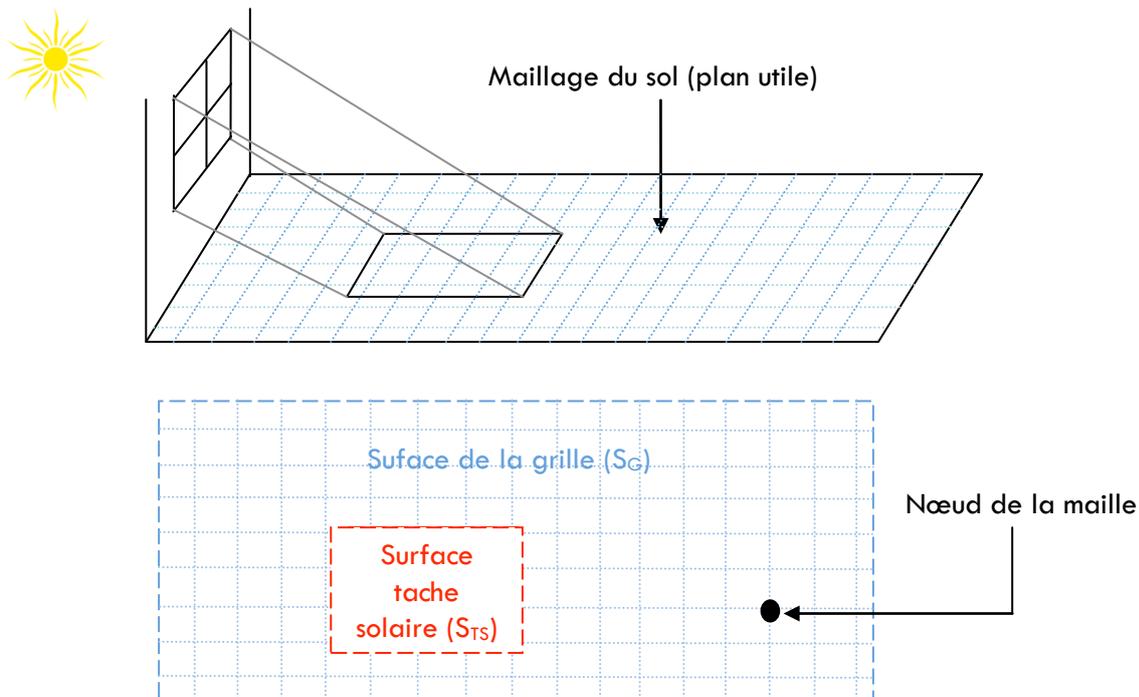


FIGURE I.13. REPRESENTATION D'UNE GRILLE SURFACIQUE : MAILLAGE ET NŒUDS (VUE EN PERSPECTIVE ET EN PLAN)

#### I.2.4.3.2. ALGORITHME DE CALCUL SOUS CODYRUN

L'originalité de notre algorithme de calcul se situe dans le cas d'un ciel de type intermédiaire ou clair. En effet, dans cette situation, nous avons combiné à la fois le FLJ (pour le calcul du diffus provenant de la voûte céleste, du milieu extérieur et des parois internes diffusantes) et le modèle d'éclairage direct simple (pour le calcul du direct provenant du soleil) vu auparavant. Deux cas de figure se présentent :

1. Pour un ciel couvert : la méthode Split Flux décrite dans le paragraphe (I.2.2.2.2) permet à elle seule de retrouver les valeurs d'éclairages globaux en un point à l'intérieur d'un local donné.
2. Pour un ciel intermédiaire ou clair : il est possible que des faisceaux lumineux provenant directement du soleil puissent pénétrer à l'intérieur du local à travers l'ouverture et créer des taches solaires. Ainsi, ces taches peuvent engendrer des éclairages diffus par inter-réflexions à l'intérieur du système fermé (le local). C'est pour cette raison que la partie diffuse est recalculée en sommant les résultats obtenus à partir de la méthode Split Flux avec ceux du diffus créé par une éventuelle tache solaire. Il est ainsi possible de trouver, à partir de cette démarche de combinaison, l'éclairage global en un point donné du local. Les protections solaires (masques proches) ne sont pas prises en compte dans les calculs. Cela augmente les erreurs de simulation de l'éclairage naturelle intérieur.

S'agissant de l'éclairage artificiel, la méthode de calcul est celle présentée dans le paragraphe (I.2.3) C.-à-d. que l'on calcule la partie directe provenant des luminaires, que l'on somme avec la partie diffuse. Les modifications apportées au logiciel CODYRUN ainsi que les algorithmes de calculs introduits dans le code sont donnés en Annexe ?

#### I.2.4.3.3. CALCUL DE LA TACHE SOLAIRE

La valeur de l'éclairement global reçu en un point localisé à l'intérieur d'une tache solaire est la somme de l'éclairement direct arrivant sur ce point avec celle de l'éclairement diffus issu de son voisinage.

Dans cette situation, le diffus se déduit de la valeur obtenue à partir de la méthode Split Flux et de celle engendrée par la tache solaire. Concernant la détermination du diffus provenant de cette tache, une méthode très simple et très rapide est proposée :

$$E_{P,Dif-TS} = E_{Dir,S} \times \rho_{Sol} \times \left( \frac{S_{TS}}{S_G} \right) \quad \text{EQ I. 8}$$

Ou encore :

$$E_{P,Dif-TS} = E_{Dir,S} \times \rho_{Sol} \times \left( \frac{N_{TS}}{N_G} \right) \quad \text{EQ I. 9}$$

avec ,

- $E_{P,Dif-TS}$  : Eclairement lumineux réfléchi dans la salle et provenant de la tache solaire intérieure (lux)
- $E_{Dir,S}$  : Eclairement lumineux direct reçu sur la surface de la tache solaire traversant l'ouverture et provenant du soleil (lux)
- $\rho_{Sol}$  : Coefficient de réflexion moyen du plancher
- $S_{TS}$  : Surface de la tache solaire dans la grille du plan utile (en m<sup>2</sup>)
- $S_G$  : Surface de la grille du plan utile (en m<sup>2</sup>)
- $N_{TS}$  : Nombre de nœuds (ou points) éclairés directement dans la grille surfacique de notre plan utile
- $N_G$  : Nombre total de points de la grille surfacique

Plusieurs études ont été réalisées pour caractériser la tache solaire à l'intérieur d'un local. Il s'agit, par exemple, de l'étude menée par Houpert [Houpert, 2003] ou encore celle, beaucoup plus numérique, réalisée par Damez [Damez, 2001]. Il est important de savoir que certains travaux de recherche se focalisent sur l'étude de l'ombre et pénombre d'une surface éclairée à l'intérieur d'un local, alors que d'autres s'intéressent plutôt à l'aspect éblouissement du phénomène et donc uniquement sur la partie éclairée directement par le soleil. C'est notamment le cas de notre étude.

S'agissant du direct provenant du soleil, nous nous sommes inspirés des travaux de Siret [Siret, 1997]. L'auteur met en évidence des algorithmes pour déterminer s'il y a intersection entre une droite (connaissant un point et un vecteur directeur) représentant un faisceau de lumière quelconque et un polygone convexe symbolisant les plans utiles ou surfaces constituant le local. Cette méthode est aussi appliquée dans les calculs d'éclairement direct du second jour.

### 1.3. Modélisation du potentiel énergétique lumineux extérieur

La quantité de lumière naturelle reçue en un lieu varie suivant le jour et l'heure considérée. Elle est également influencée par les conditions météorologiques et le niveau de pollution de l'air. Cette lumière naturelle disponible influe sur l'utilisation de l'éclairage artificiel. Ces deux composantes de flux lumineux sont étroitement liées au climat et en particulier à l'ensoleillement. Une étude sur l'éclairage doit donc tenir compte des données météorologiques.

La connaissance du type de ciel (couvert, intermédiaire et clair) est primordiale dans cette étude. Une bibliographie sera menée sur les modèles existants qui caractérisent le type de ciel dans une région donnée. L'objet de l'étude sera de modéliser l'éclairement lumineux associé à chaque type de ciel. Ceci nous amènera finalement à prendre en compte l'efficacité lumineuse et à nous intéresser de plus près à un modèle spécifique à la Réunion ainsi qu'à sa mise en place sous CODYRUN.

#### 1.3.1. Pourquoi une base de données météorologique dans l'étude d'éclairage ?

Un logiciel de simulation numérique d'éclairage (comme la plupart des logiciels de simulation) nécessite d'avoir des informations sur l'état de l'environnement. C'est le cas pour CODYRUN. En effet, afin de pouvoir utiliser les modèles introduits dans ce logiciel, il est indispensable de connaître les données (variables) d'entrée et les paramètres spécifiques à ces derniers. Plus particulièrement, la connaissance des valeurs d'éclairement naturel extérieur, couramment appelé gisement lumineux solaire, est un atout majeur pour connaître la quantité de flux lumineux pénétrant dans un local à travers une ouverture. Cette variable est souvent renseignée dans une base de données météorologique et pourra être ensuite exploitée par CODYRUN pour simuler l'éclairement naturel intérieur.

#### 1.3.2. Résumé de notre démarche d'étude

Le facteur prédominant qui influence le plus ce gisement est le type de ciel (couvert, intermédiaire ou clair). Nous nous sommes donc intéressés aux modèles qui permettent de caractériser le type de ciel. Nous en avons choisis 4 parmi d'autres parce qu'ils répondent bien aux conditions de journées types que nous nous sommes fixées. Après comparaison entre ces modèles préalablement choisis et appliqués sur des données locales, nous nous sommes rendu compte que le modèle qui satisfait assez bien nos conditions de journée type était celui défini récemment par Pattanasethanon [Pattanasethanon et al., 2007].

S'agissant des modèles qui caractérisent le gisement solaire, nous les avons classés en deux catégories : il y a d'une part les modèles qui tiennent compte du type de ciel et qui sont plus performants. Ces types de modèles nous incitent à avoir des indices qui permettent de classer les types de ciels. C'est l'étude que nous mènerons par la suite dans ce chapitre. D'autre part, il y a les modèles qui simulent le gisement solaire en l'absence de toute information, donc moins précis. On a, par exemple, le modèle de Tregenza, qui fait partie de cette catégorie et qui sera utilisé en l'absence de toute information sur l'environnement.

Après une recherche bibliographique sur ces modèles de gisement lumineux solaire, nous avons choisi de nous orienter vers les modèles basés sur l'efficacité lumineuse, plus particulièrement les constantes d'efficacité lumineuse globale et diffuse. Ce choix est dû en partie au fait que nous disposons de suffisamment de renseignements locaux (environ 60 années de données) sur l'éclairage énergétique (irradiation en  $W.m^{-2}$ ), mais pas de données sur l'éclairage lumineux extérieur.

De là, un dispositif expérimental a été réalisé pour retrouver ces constantes d'efficacité lumineuse (globale et diffuse). Les résultats sur les valeurs obtenus sont satisfaisants et les constantes ont été introduites dans le logiciel de simulation CODYRUN. Ainsi, le logiciel peut simuler le gisement solaire en ne connaissant que les valeurs d'irradiation. Mieux encore, en l'absence de données météorologiques, le logiciel va pouvoir calculer les valeurs moyennes de l'éclairage lumineux extérieur à partir du modèle de Tregenza.

### 1.3.3. Généralisation du type de ciel

La connaissance du type de ciel peut s'avérer très utile dans certains cas de figure où le but est de déterminer l'éclairage lumineux extérieur. En effet, la plupart des modèles qui caractérisent ce gisement solaire sont donnés en fonction du type de ciel [Dumortier, 1995].

Afin de pouvoir obtenir suffisamment de valeurs dans une journée, nous travaillerons au pas de temps de la minute. Ceci amène à ne considérer que trois types de ciels (couvert, intermédiaire et clair) au lieu de 5 voire 6 types de ciels (ciel serein, intermédiaire couvert, etc.) si l'on se réfère à la bibliographie. Cette hypothèse ne nous permet peut-être pas de mieux caractériser l'état réel du ciel lorsque l'on se trouve à un instant où le ciel est intermédiaire avec plus ou moins de nuages, mais donne une indication assez acceptable du phénomène produit.

#### 1.3.3.1. Hypothèses

Tout d'abord, notons que, durant notre étude, nous ne caractériserons que trois types de couvertures nuageuses. Nos journées types seront définies suivant la Figure 1.14 .

Dans la bibliographie, il est plutôt question de type de ciel (couvert, intermédiaire et clair) à un instant donné. La différence notable entre les deux est que dans une des journées types définies précédemment, nous pouvons avoir plusieurs types de ciels qui se succèdent. Cette remarque est importante pour comprendre la démarche de notre étude. En effet, nous ne nous intéresserons qu'aux journées types et non pas aux types de ciels.

Beaucoup d'études ont été réalisées pour caractériser le type de ciel [Dumortier, 1995], mais peu ont été faites pour les journées types. L'objet de notre étude est donc de pouvoir caractériser de façon très simplifiée, une journée type à partir de modèles de type de ciel. En effet, sachant que l'éclairage énergétique est intimement lié à l'éclairage lumineux, il nous a semblé plus judicieux de s'intéresser à cette variable énergétique. Cela, d'une part parce que de nombreux modèles de caractérisation du type de ciel ont été élaborés à partir de cette donnée, mais aussi parce que c'est la variable la plus mesurée dans nos régions ainsi que dans beaucoup d'autres, donc disponible et facilement exploitable pour la reconstitution du gisement lumineux.

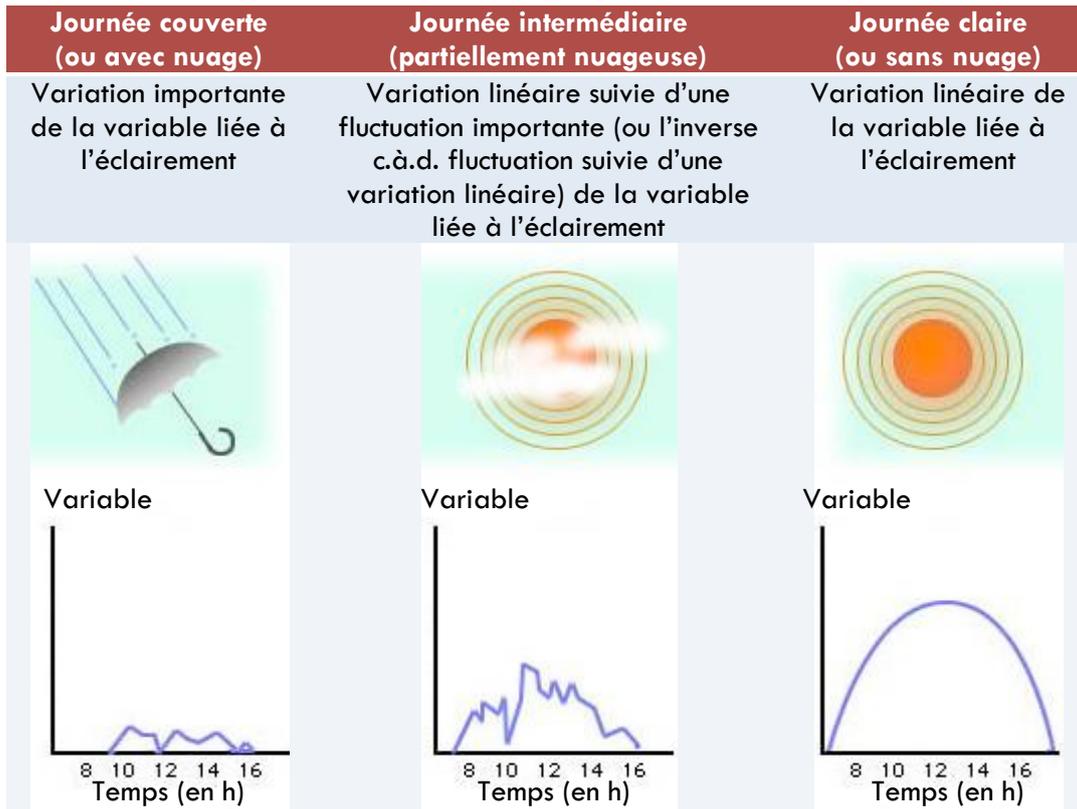


FIGURE I.14. CARACTERISATION DES JOURNEES TYPES

Parmi les modèles de la bibliographie, nous n'en avons retenu que 5 pour les raisons suivantes :

Il y a le modèle de Kittler [Kittler, 1986] parce qu'il ne caractérise que trois types de ciels principaux (couvert, intermédiaire et clair), comme indiqué pour les journées types. S'agissant des modèles de Perez [Perez et al., 1992], Perraudeau [Perraudeau, 1988], Dumortier [Dumortier, 1995] et simplifié [Pattanasetanon et al., 2007], nous les avons préférés aux autres modèles parce que ce sont des modèles qui sont liés directement à l'éclairage énergétique ( $W.m^{-2}$ ) et qu'ils sont simples à retrouver à partir des données météorologiques de notre site expérimental.

### I.3.3.2. Indices de caractérisation du type de ciel

Dans les années 70, le CIE [CIE, 1970] a recensé une série de modèles qui caractérisent les types de ciels. Depuis, beaucoup d'études ont été menées afin de pouvoir reconnaître les types de ciels d'une journée donnée [Aydinli, 1981].

Les travaux les plus récents réalisés en Europe dans le domaine sont ceux de Dumortier [Dumortier, 1995]. L'auteur explique que, pour des modèles utilisant la durée d'ensoleillement, il est difficile (mais pas impossible) de caractériser avec exactitude le type de ciel. De même, la piste de l'indice de nébulosité énergétique modifiée qu'il a élaboré lors de ses travaux de thèse est à proscrire car nous ne disposons pas d'informations (mesures) sur certaines valeurs atmosphériques nécessaires à l'utilisation de son modèle, notamment les valeurs journalières des facteurs de Trouble.

L'auteur a démontré également que la nébulosité et le genre des nuages ne peuvent pas suffire à déterminer avec suffisamment de précision les éclairissements lumineux. Il a aussi montré comment, à partir de données de mesures d'éclairissements énergétiques horizontaux, il a été possible de caractériser plus finement l'aspect du ciel et sa capacité à transmettre et à diffuser le rayonnement solaire. Son étude se base principalement sur des indices qui sont capables de représenter les conditions atmosphériques indépendamment d'autres critères tels que la hauteur du soleil. Il a su mettre en évidence par exemple que, pour un ciel clair avec soleil, la répartition lumineuse variait fortement d'une heure à l'autre et d'un point à un autre du local.

Après analyse de toute cette bibliographie, nous avons renoncé aux modèles de Dumortier et avons repris les indices de nébulosité et de clarté donnés respectivement par Perraudau [Perraudau, 1988] et Perez [Perez et al., 1992]. Nous verrons également l'indice  $K_T$  de Kittler et l'indice simplifié SR utilisé plus récemment par certains chercheurs.

#### 1.3.3.2.1. INDICE DE CLARTE DU CIEL $\epsilon$ (MODELE DE PEREZ)

Il s'agit du modèle le plus complet, le plus simple à mettre en place et le plus utilisé dans beaucoup de pays. Il consiste à calculer l'expression de l'indice de clarté  $\epsilon$ , donnée par :

$$\epsilon = \frac{\left(\frac{G_h}{d_h}\right) + 1,041 \times Z^3}{1 + 1,041 \times Z^3} \quad \text{EQ I.10}$$

avec,

- $Z$  : angle zénithal du soleil (équivalent à 90 degrés moins la hauteur du soleil)
- $G_h$  : éclairissement énergétique global horizontal ( $W.m^{-2}$ )
- $d_h$  : éclairissement énergétique diffus horizontal ( $W.m^{-2}$ )

Si  $\epsilon$  tend vers 0, il s'agit d'un ciel couvert. S'il tend vers des valeurs assez grandes, nous avons un ciel clair. Dans notre cas de figure, nous définissons les limites de cet indice à partir d'observations sur des bases de données de types de ciels différents que nous connaissons. Nous avons pris pour cela 3 journées typiques en février 2008 (le 08, 09 et le 10 du mois), qui caractérisent très bien nos trois types de ciels dans une journée. Il faut savoir que le mois de février à la Réunion est un mois où les journées sont très variables et que nous sommes en mesure de retrouver les trois ciels définis auparavant, ce dans une séquence de quelques jours seulement. Les valeurs de  $\epsilon$  qui nous semblent appropriées dans le cas de la Réunion sont celles modifiées par Pattanasethanon [Pattanasethanon et al., 2007] et qui donnent les résultats représentés par le tableau (Tableau I.3) ci-dessous :

Classe	Type de ciel	$\epsilon$
1	Couvert	$\epsilon \leq 1.23$
2	Intermédiaire couvert	$1.23 < \epsilon < 4.5$
3	Clair	$\epsilon \geq 4.5$

TABLEAU I.3. CARACTERISATION DU TYPE DE CIEL A PARTIR DE L'INDICE DE CLARTE DE PEREZ

I.3.3.2.2. INDICE DE NEBULOSITE  $I_N$  DU CIEL (MODELE DE PERRAUDEAU)

L'auteur utilise l'indice de nébulosité énergétique relative  $I_N$  défini par :

$$I_N = \frac{1-K}{1-K_0} \quad \text{EQ I.11}$$

$$K = \frac{d_h}{G_h} \quad \text{EQ I.12}$$

$$K_0 = 0.12037 \times \frac{1}{(\sin \gamma)^{0.82}} \quad \text{EQ I.13}$$

$\gamma$  : Hauteur angulaire du soleil ( $^\circ$ )

$G_h$  : éclairement énergétique global horizontal ( $W.m^{-2}$ )

$d_h$  : éclairement énergétique diffus horizontal ( $W.m^{-2}$ )

Classe	Type de ciel	$I_N$
1	Couvert	$0 \leq I_N < 0.05$
2	Intermédiaire couvert	$0.05 \leq I_N < 0.20$
3	Intermédiaire moyen	$0.20 \leq I_N < 0.70$
4	Intermédiaire bleu	$0.70 \leq I_N < 0.90$
5	Serein bleu	$0.90 \leq I_N < 1$

TABLEAU I.4. CARACTERISATION DU TYPE DE CIEL A PARTIR DE L'INDICE DE NEBULOSITE (PERRAUDEAU)

Dans notre étude, nous supposons les classes 2, 3 et 4 comme étant communes. Ceci revient à dire que pour un ciel intermédiaire, nous aurons un  $I_N$  compris entre 0.05 et 0.90.

I.3.3.2.3. INDICE  $K_T$  (MODÈLE DE KITTLER)

Le rapport  $K_T$  défini par [Kittler et al., 1992]:

$$K_T = \frac{G_h}{G_o} \quad \text{EQ I.14}$$

La constante solaire (souvent notée  $G_o$ ) représente l'irradiation extraterrestre et est égale à 1367  $W.m^{-2}$ .  $G_h$  étant, bien attendu, l'éclairement énergétique global horizontal ( $W.m^{-2}$ ) et  $d_h$  l'éclairement énergétique diffus horizontal ( $W.m^{-2}$ ). On a les hypothèses suivantes :

Classe	Type de ciel	$K_T$
1	Couvert	$0 < K_T \leq 0.3$
2	Intermédiaire couvert	$0.3 < K_T \leq 0.65$
3	Clair	$K_T > 0.65$

TABLEAU I.5. CARACTERISATION DU TYPE DE CIEL A PARTIR DE L'INDICE  $K_T$  (KITTLER)

#### I.3.3.2.4. INDICE SR (MODELE SIMPLIFIE)

Nous utilisons le rapport :

$$SR = \frac{d_h}{G_h} \quad \text{EQ I. 15}$$

Avec :

- $G_h$  : éclairage énergétique global horizontal ( $W.m^{-2}$ )
- $d_h$  : éclairage énergétique diffus horizontal ( $W.m^{-2}$ )

Nous tenterons de faire correspondre des valeurs maximale et minimale de SR en fonction du type de ciel que nous aurons au cours de la journée tel que nous l'avons défini. Le rapport peut aisément être fait à partir des données mesurées sur le site expérimental. Cette démarche s'inspire d'une étude menée récemment en Thaïlande par Pattanasethanon [Pattanasethanon et al., 2007]. En effet, en plus d'utiliser l'indice de clarté défini par Perez, il a aussi étudié la variation de **SR** en fonction du type de ciel et a obtenu les valeurs suivantes :

Type de journée	SR
Clair	$SR \leq 0.3$
Intermédiaire	$0.3 < SR < 0.8$
Couvert	$SR \geq 0.8$

TABLEAU I.6. CARACTERISATION DU TYPE DE CIEL A PARTIR DE L'INDICE SR DE PATTANASETHANON

#### I.3.3.3. Choix du modèle de caractérisation d'une journée type

Afin de pouvoir choisir le modèle qui conviendrait le mieux dans nos régions, nous avons testé ces indices sur trois journées types données (couverte, claire et intermédiaire). Les résultats obtenus seront commentés dans ce paragraphe pour finalement convenir du modèle le mieux adapté à nos hypothèses de type de ciel.

I.3.3.3.1. TRAITEMENT DE LA BASE DE DONNEES METEOROLOGIQUE

Les données que nous allons traiter sont celles de trois journées allant du 08/02/08 au 10/02/08. La journée ayant un ciel intermédiaire est celle du 08/02/08 (jour 1), celle de ciel clair est le 09/02/08 (jour 2) et enfin la dernière journée correspondant à celle qui forme un ciel couvert est celle du 10/02/08 (jour 3).

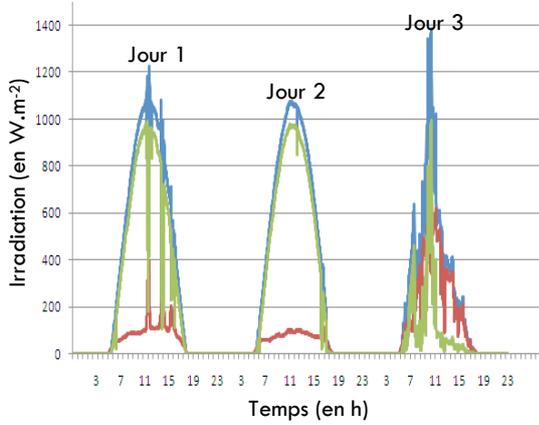


FIGURE I.15. TROIS JOURNEES TYPES

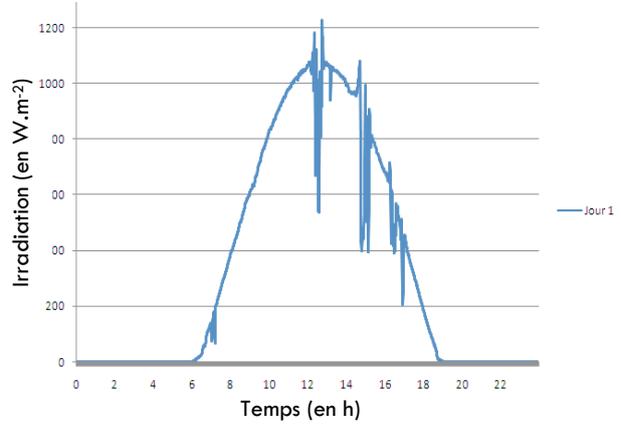


FIGURE I.16. JOURNEE TYPE CIEL INTERMEDIAIRE

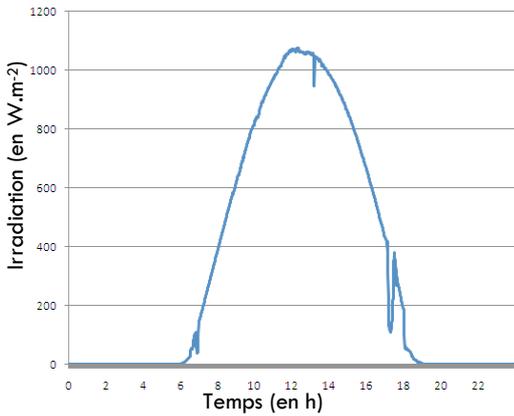


FIGURE I.17. JOURNEE TYPE CIEL CLAIR

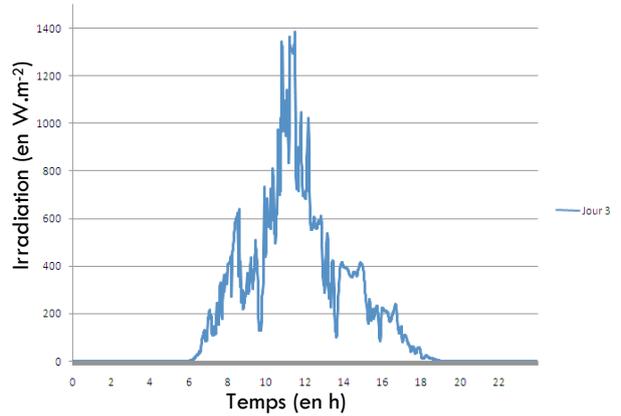
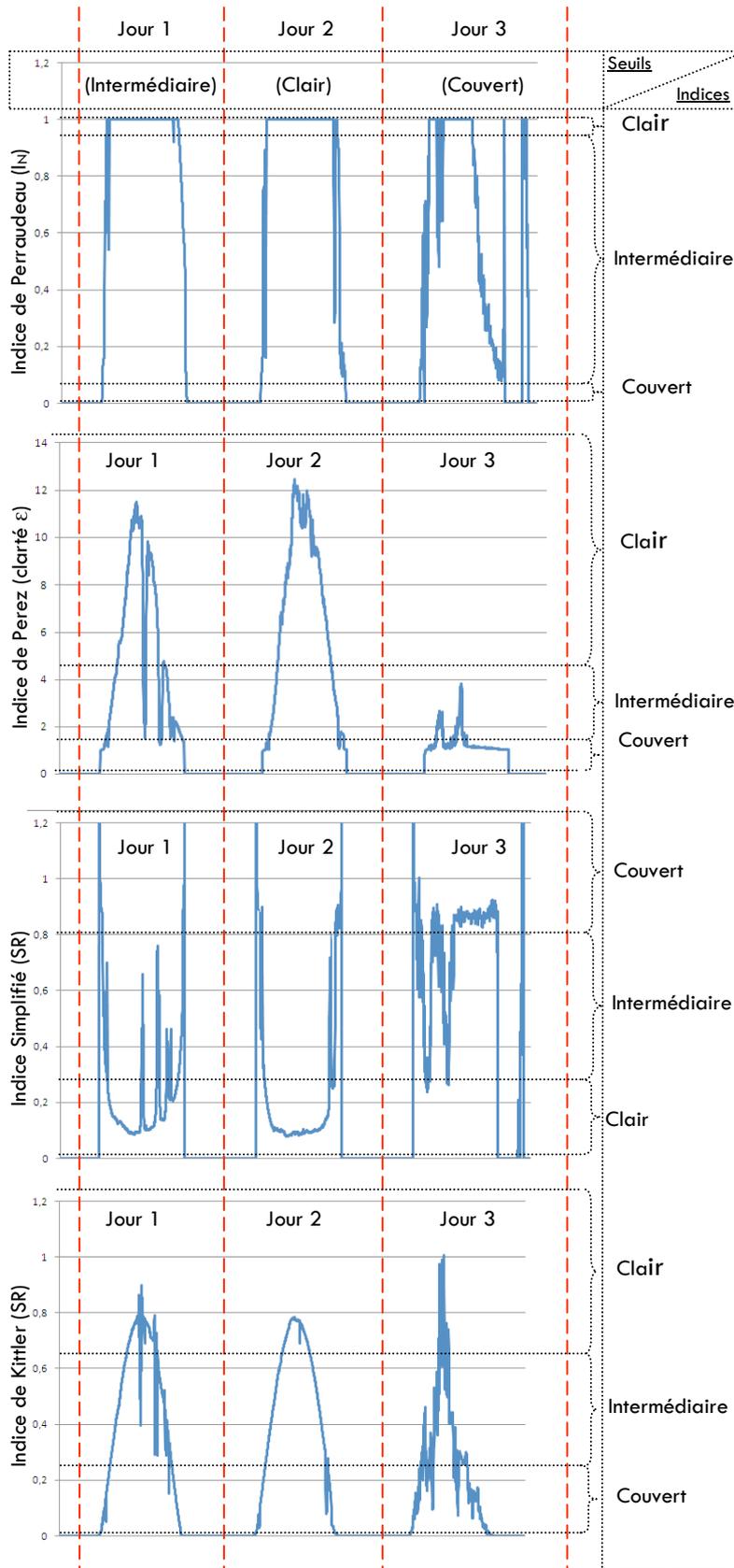


FIGURE I.18. JOURNEE TYPE CIEL COUVERT

1.3.3.3.2. COMPARAISON DES INDICES DE CARACTERISATION

Résultats visuels de simulations des indices de caractérisation  
des trois journées types

Interprétations :



Le modèle a du mal à différencier une journée type ciel intermédiaire de celle d'une journée type claire. Dans le cas d'une journée couverte, les valeurs de l'indice de Perraudeau ne correspondent pas.

Le modèle de Perez donne des valeurs acceptables pour caractériser les deux types de journées à ciel couvert et clair. Par contre, s'agissant de la journée de type ciel intermédiaire, le modèle a du mal à caractériser le type de journée. Nous avons des valeurs d'indice de Perez qui fluctuent de 1 à 11 (valeurs trop élevées pour l'indice de référence caractérisant le ciel intermédiaire).

En dehors du lever et du coucher du soleil pour chaque journée, nous voyons que le modèle caractérise assez bien, dans l'ensemble, les types de journées définis. En effet, s'agissant par exemple d'une journée claire (Jour 2), nous avons en moyenne 95 % de coïncidence. Pour les journées respectives intermédiaire et couverte nous obtenons 57% et 86 % de coïncidence.

Aucune des journées types n'est prise en compte dans ce modèle s'agissant de la Réunion. Il ne fait que retracer l'allure de l'éclairement (énergétique) de la journée à une échelle plus petite. Le modèle semble ne pas être adapté pour ces régions.

Des quatre modèles sélectionnés, seuls le modèle de Perez et le modèle simplifié semblent se rapprocher de la réalité. Lorsque ces deux modèles sont comparés, celui de Perez est beaucoup plus défaillant lorsqu'il s'agit de caractériser une journée de type intermédiaire. Le modèle simplifié semble s'adapter aux trois types de journées que nous avons définis. Nous pouvons expliquer ces erreurs par le fait qu'il est très compliqué de définir une journée type. En effet, le climat étant vraiment aléatoire, les journées que nous avons définies ne sont qu'idéales. Dans la réalité, il est impossible de retrouver exactement des journées comme indiqué dans les hypothèses que nous avons avancées.

### 1.3.4. Evaluation de l'éclairement lumineux extérieur (gisement solaire)

Il arrive que nous ne disposions pas de renseignements sur le gisement solaire dans une base de données ou une région. Cela complique considérablement la prédiction d'éclairement naturel intérieur. Pour résoudre ce problème, des modèles ont été conçus de par le monde [Dumortier, 1995].

Nous distinguons deux catégories de modèles de gisement solaire : ceux qui tiennent compte du type de ciel et ceux utilisés quel que soit le type de ciel. Dans ce paragraphe, nous allons illustrer ces modèles et choisir ceux qui seront introduits dans CODYRUN.

#### 1.3.4.1. Inventaire des modèles simplifiés pour tout type de ciel

Les modèles qui ne tiennent pas compte du type de ciel existent et sont souvent employés. Il s'agit par exemple du modèle de Dumortier, Kittler, Perraudeau, Perez (il en existe deux, le modèle dit de Perez-ASRC et le modèle expérimental ou empirique), etc. Tout ces modèles sont répertoriés dans la thèse de Dumortier [Dumortier, 1995].

Nous allons décrire le modèle de Tregenza [Tregenza, 1986] qui semble être le plus simple à mettre en œuvre. En effet, en l'absence totale de données météorologiques, nous pouvons utiliser le modèle de conception simplifié de Tregenza. Ce modèle donne une idée de la valeur moyenne de l'éclairement dû au ciel. Nous pouvons donc déterminer l'éclairement dû au rayonnement diffus du ciel plus simplement quel que soit le type de ciel. En effet, d'après des études menées par Tregenza, le paramètre qui influence considérablement l'éclairement global provenant du ciel est la latitude du lieu (ou altitude du soleil par rapport au sol). Une étude statistique a été entreprise durant plusieurs années afin de donner des niveaux d'éclairement.

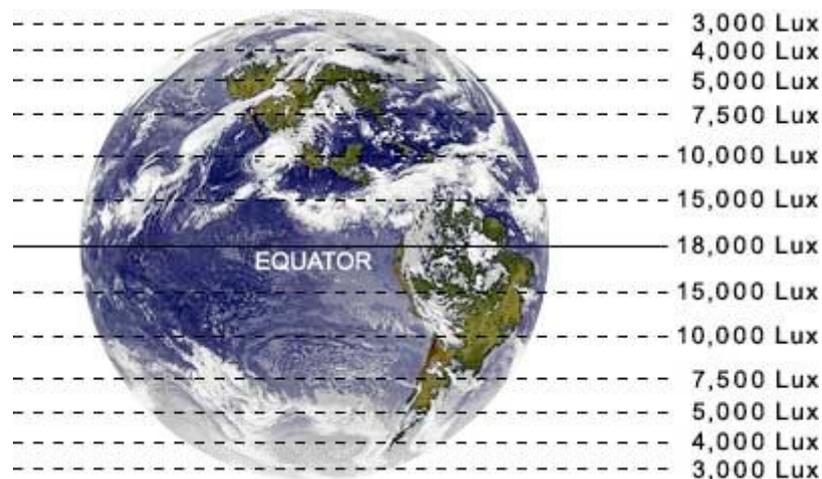


FIGURE I.19. VALEURS OBTENUES A PARTIR DE LA FORMULE DE TREGENZA ([HTTP://SQUI.ORG](http://squi.org))

$$E = \begin{cases} 0.0105 \times (\gamma + 5)^{2.5} & \text{si } -5^\circ < \gamma \leq 5^\circ \\ 48.8 \times \sin \gamma^{1.105} & \text{si } 5 < \gamma \leq 60^\circ \end{cases} \quad \text{EQ I. 16}$$

$\gamma$  : Hauteur du soleil

L'inconvénient de tels modèles est le non respect du phénomène aléatoire des nuages et donc de l'éclairement naturel dans une région donnée. Nous ne tiendrons compte de ce type de modèle qu'en l'absence de toute information sur le climat environnant.

### 1.3.4.2. Inventaire des modèles basés sur le type de ciel

Les méthodes peuvent être classées en deux catégories : d'une part les modèles expérimentaux de détermination de la luminance basés sur des données météorologiques et d'autre part les modèles empiriques souvent utilisés en l'absence de certaines données météorologiques. En fonction du type de ciel, nous avons des modèles qui permettent de retrouver la valeur de la luminance en un point donné sur la terre. Les plus connus d'entre eux sont les suivants :

#### 1.3.4.2.1. MODELE DE MOON AND SPENCER (CIE) POUR LE CIEL COUVERT

Il s'agit d'un modèle adopté par la CIE (ciel standardisé par la CIE) en 1955 et qui a été proposé par Moon et Spencer [Spencer, 1942] pour calculer l'éclairement lumineux du ciel standard :

$$L_p(\omega) = L_Z \times \frac{1+2 \times \sin \omega}{3} \quad \text{EQ I. 17}$$

avec,

- $\omega$ : Hauteur angulaire du point P au dessus de l'horizon
- $L_p(\omega)$  : Luminance du point P (cd.m<sup>-2</sup>)
- $L_Z$  : Luminance du zénith (cd.m<sup>-2</sup>)

Cette formule s'applique bien dans les zones tempérées. Ce ciel a été adopté par la CIE comme ciel couvert standard.

#### 1.3.4.2.2. MODELE DE KITTLER (CIE) POUR LE CIEL CLAIR

Pour un ciel serein, le modèle proposé par Kittler qui a été adopté par la CIE en 1973 [CIE, 1973] est donné selon la relation suivante :

$$L_p(\mu, \alpha) = L_Z \times \frac{f(\gamma) \times \varphi(\mu)}{f(Z_s) \times \varphi(0)} \quad \text{EQ I. 18}$$

$$f(\gamma) = \begin{cases} 0.91 + 10 \times e^{-3 \times \gamma} + 0.45 \times \cos^2 \gamma & \text{Zone moins polluée} \\ 0.856 + 16 \times e^{-3 \times \gamma} + 0.3 \times \cos^2 \gamma & \text{Zone très polluée} \end{cases} \quad \text{EQ I. 19}$$

$f(\gamma)$  définit l'indicatrice de diffusion pour des conditions atmosphériques. Sa forme est différente en fonction du degré de pollution de l'atmosphère de la zone étudiée. Ainsi, les campagnes et villages sont considérés par exemple comme des zones moins (ou non) polluées tandis que les grandes villes et zones industrielles sont quant à elles considérées comme polluées.

$$\varphi(\mu) = 1 - e^{\left(\frac{-0.32}{\sin(\mu)}\right)} \quad \text{EQ I. 20}$$

avec,

- $L_p(\mu, \alpha)$  : Luminance du point P (cd.m<sup>-2</sup>)
- $L_Z$  : Luminance au zénith (cd.m<sup>-2</sup>)
- $Z_s$  : Distance angulaire zénithale du soleil (degré)
- $\mu$  : Distance angulaire zénithale du point P (degré)
- $\alpha$  : Angle azimutal du point P (degré)
- $\gamma$  : Distance angulaire entre le point P et le soleil (degré)

#### 1.3.4.2.3. MODELE DE MATSUURA POUR LE CIEL INTERMEDIAIRE

Matsuura [CIE, 1994] a proposé un modèle qui a également fait l'objet de validation et d'adoption par la CIE (en 1999) et qui s'écrit de la sorte :

$$L_p(\mu, \alpha) = L_Z \times \frac{a(Z_s, \mu) \cdot e^{\gamma \times b(Z_s, \mu)}}{a(Z_s, 0) \cdot e^{\gamma \times b(Z_s, 0)}} \quad \text{EQ I. 21}$$

Avec :

$$a(Z_s, \mu) = \frac{(1.35 \times \sin(5.631 - (3.59 \times \mu) + 3.12)) \times \sin(4.396 - (2.6 \times Z_s)) + 6.37 - \mu}{2.336} \quad \text{EQ I. 22}$$

et

$$b(Z_s, \mu) = -0.563 \times ((2.629 - \mu) \times (1.562 - Z_s) + 0.812) \quad \text{EQ I. 23}$$

$\gamma$  est lié à  $\mu$ ,  $\alpha$  et  $Z_s$  par la relation suivante :

$$\cos \gamma = \cos(Z_s) \times \cos(\mu) + \sin(Z_s) \times \sin(\mu) \times \cos(\alpha) \quad \text{EQ I. 24}$$

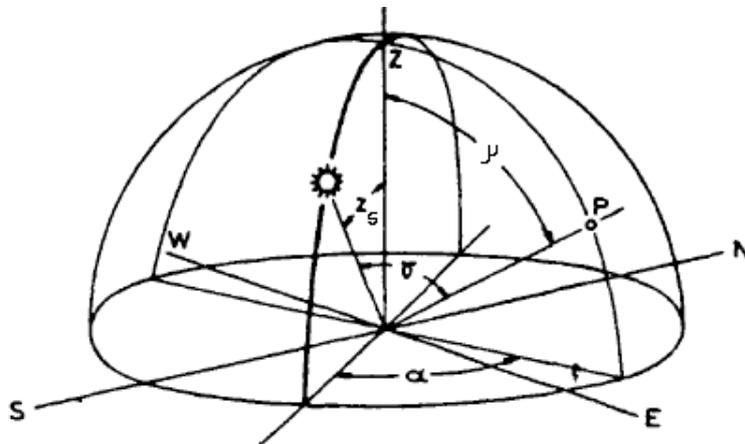


FIGURE I.20. POSITION GEOPHYSIQUE DU SOLEIL : AZIMUT ET HAUTEUR DU SOLEIL

#### 1.3.4.2.4. MODELE DU "BRITISH RESEARCH ESTABLISHMENT" POUR LE CIEL MOYEN

Ce modèle est le plus appliqué en Europe. Il s'écrit généralement :

$$L_p = a \times e^{\frac{-k}{40}} + b \left[ \frac{5 - (2 \times \sin Z)}{3} \right] \quad \text{EQ I. 25}$$

Les résultats obtenus à partir de cette relation sont en  $\text{kcd.m}^{-2}$ , avec :

$$a = 0.1 + (0.42 \times Z_s) - 0.7 \times \sin(7.2 \times Z_s) \quad \text{EQ I. 26}$$

$$b = \frac{9 \times (0.3 + (0.434 \times Z_s) - (0.0042 \times Z_s^2))}{(11 \times \pi)} \quad \text{EQ I. 27}$$

$k$  est la distance angulaire (en radians) entre le point P et le soleil et  $Z$  l'angle zénithal du point P.

Tous ces modèles ne correspondent pas vraiment à notre problématique. En effet, nous ne disposons pas de données météorologiques, dans la zone océan Indien, indispensables à l'utilisation de ces modèles. De plus, ce sont des modèles spécifiques aux types de ciels. Or, nous avons vu qu'il nous était difficile de caractériser les journées types que nous avons définies à partir des modèles types de ciels. Il est donc prudent de ne pas utiliser ces relations, car cela pourrait accroître les erreurs de calcul de luminance.

#### 1.3.4.2.5. MODELES BASES SUR L'EFFICACITE LUMINEUSE

La plupart des données accessibles de nos jours dans nos régions sont l'ensoleillement en  $\text{W.m}^{-2}$ . Nous avons donc recherché des modèles qui utilisent ces irradiations pour retrouver les valeurs d'éclairement lumineux. Nos recherches ont abouti à l'étude de l'efficacité lumineuse ( $E_{ff}$ ). En 1985, Dogniaux [Dogniaux, 1985] a défini l'efficacité lumineuse par les relations suivantes :

- Pour un ciel dégagé (clair) :  $E_{ff} = 106.67 \text{ (lm/W)}$
- Pour un ciel moyen ou variable :  $E_{ff} = 126.08 - (51.38 \times \sigma_h) + 32.27 \times \sigma_h^2 \text{ (lm/W)}$
- Pour un ciel couvert :  $E_{ff} = 126.08 \text{ (lm/W)}$

avec  $\sigma_h$ : Ensoleillement horaire moyen.

A partir de ces expressions et connaissant le type de ciel ainsi que les valeurs d'ensoleillement, nous pouvons donner la luminance en lumen (lm) à chaque instant.

L'étude de l'efficacité lumineuse semble la mieux appropriée pour répondre à notre problématique de caractérisation du gisement lumineux solaire. Pour cette raison, une expérimentation a été menée afin de vérifier les valeurs de ces paramètres à la Réunion ou éventuellement déterminer les valeurs pour cette localité s'il en était besoin. Nous verrons plus en détail tout cela dans le paragraphe qui va suivre.

### 1.3.5. Contribution à l'étude du gisement solaire lumineux à la Réunion

Une étude d'éclairage ne peut être complète si nous ne disposons pas d'informations suffisantes sur la qualité et la quantité de gisement solaire lumineux (in situ). Sachant qu'aucune station météorologique à la Réunion ne donne de telles informations, nous avons été amenés à rechercher des modèles expérimentaux qui nous permettraient de retracer les valeurs d'éclairement lumineux extérieur (en klux) à partir de données mesurées d'éclairement énergétique (en  $\text{W.m}^{-2}$ ). En effet, dans cette zone océan Indien, nous disposons de bases de données assez considérables, sur au moins 60 années de mesures à des pas de temps allant de la minute à l'heure. Notre laboratoire dispose aussi d'un générateur (simulateur) de climat typique à la région. Cependant, ce générateur de climat ne simule pas encore l'éclairement lumineux.

Les efficacités lumineuses peuvent être sous deux formes différentes : soit sous la forme d'un modèle physique (empirique) nécessitant plusieurs paramètres d'entrée pour être utilisé, soit sous la forme de constantes propres à une région, certes cela est moins précis et beaucoup plus restreint que le cas précédent, mais très efficace pour étudier le gisement solaire spécifique à une région.

Sachant qu'aucune étude d'efficacité lumineuse n'a été réalisée à la Réunion, il nous a semblé plus judicieux de commencer par mettre en place des constantes d'efficacité lumineuse spécifiques à la région. Un dispositif expérimental est nécessaire pour déterminer empiriquement ces valeurs (ou constantes). Les variables mesurées, pour définir nos constantes d'efficacité lumineuses, sont l'éclairement énergétique (en  $W.m^{-2}$ ) et l'éclairement lumineux (en klux). Ces variables sont fonction du temps. Les valeurs de mesure d'éclairement énergétiques ont été fournies par la station météorologique disponible sur le site expérimental de l'IUT du LPBS. Durant cette étude, nous avons ajouté des luxmètres (pour la mesure d'éclairement lumineux) et avons synchronisé le tout afin d'avoir des données énergétiques et lumineuses au pas de temps de la minute.

L'étude se répartira donc de la sorte :

- Un résumé détaillé de la bibliographie sur l'efficacité lumineuse, plus particulièrement sur les constantes d'efficacité lumineuse de par le monde ;
- La présentation de notre dispositif expérimental qui nous a permis de caractériser les constantes l'efficacité lumineuse à la Réunion;
- Les résultats obtenus à la Réunion.

#### **I.3.5.1. Quelques rappels**

Par définition, l'efficacité lumineuse, souvent notée "Eff", d'une source de lumière est le rapport de son flux lumineux et de son flux énergétique. C'est donc le rapport entre l'éclairement lumineux sur une surface et l'éclairement énergétique sur la même surface. Cette expression dépend de la façon dont son rayonnement est partagé entre le domaine visible et le reste du spectre solaire. Le rayonnement solaire direct, lors de sa traversée dans l'atmosphère, se trouve privé d'une partie de son rayonnement ultraviolet et visible. Ce dernier se retrouve dans le rayonnement émis par la voûte céleste (source de rayonnement diffus). C'est pour cette raison que l'efficacité lumineuse diffuse et directe sera considérée différemment. Les données énergétiques disponibles sont essentiellement des éclairagements énergétiques horizontaux. Aussi, les efficacités lumineuses que nous étudierons seront calculées pour des surfaces horizontales et les mesures prises toutes les secondes seront moyennées au pas de temps de la minute.

La performance des modèles d'efficacité lumineuse est généralement appréciée à partir de l'écart moyen et de l'écart type entre le modèle et les mesures utilisées pour la validation (Annexe B). Nous avons observé et comparé la performance de ces modèles pour les trois types de ciels (couvert, intermédiaire et clair) journaliers.

Nous distinguons trois efficacités lumineuses : une liée à l'éclairement global, une autre liée à l'éclairement diffus et enfin une dernière liée au direct. Dans notre étude, nous ne nous sommes intéressés qu'aux deux premières. La raison est qu'une fois connues les efficacités lumineuses globale et diffuse, il est possible de connaître la valeur des éclairagements lumineux globaux et diffus et donc de tirer de ces deux valeurs l'éclairement lumineux direct. De plus, les éclairagements globaux et diffus sont faciles à mesurer, contrairement au direct.

Selon la bibliographie, chaque région dispose de ses propres valeurs d'efficacité lumineuse. Ceci s'explique par le fait que c'est une variable qui dépend fortement du climat (pluie, température, etc.), de la géographie (latitude, longitude, altitude, etc.), du lieu et des phénomènes géologiques qui s'y produisent (cyclone, volcan, etc.). La valeur moyenne d'efficacité lumineuse globale la plus élevée se trouve en Norvège (environ 180 lm/W) alors que la moins élevée se situe au Japon (environ 98 lm/w) [Dumortier, 1995].

Une idée des valeurs de références mondiales sur les efficacités lumineuses est donnée par l'article de Darula [Darula et al., 2005]. Les travaux les plus récents réalisés dans ce domaine sont ceux de Cucumo [Cucumo et al., 2008] et Ana [Ana et al., 2007].

### 1.3.5.2. Dispositif expérimental

L'étude sur les efficacités lumineuses a été menée sur le site expérimental du L.P.B.S situé à l'I.U.T de Saint-Pierre (altitude : 21°19' Sud et Longitude : 55°28' Est). La ville est au sud de l'île.

L'emplacement alloué à la recherche par l'IUT étant limité (650 m<sup>2</sup>), la disposition des supports expérimentaux a été réalisée en tenant compte de la course du soleil et en favorisant une orientation sans obstacles au vent. Les supports expérimentaux installés sont de deux types : des supports à échelle réduite (environ 1:3), au nombre de quatre, et un support à échelle 1 (appelé couramment cellule LGI), destiné à représenter de manière plus réaliste un habitat.

En outre, la plate-forme est équipée d'une station météorologique permettant de recueillir les conditions climatiques détaillées du site. Un local technique est également présent et sert à la fois de salle de contrôle des chaînes d'acquisition et de dépôt de maintenance.

Les données météorologiques mesurées sur le site à partir de la station sont : le rayonnement solaire global, le rayonnement solaire diffus, le rayonnement solaire direct, la vitesse et la direction du vent, la température et l'humidité de l'air, le rayonnement de grande longueur d'onde provenant de la voûte céleste.

La chaîne d'acquisition (capteur de mesure et centrale d'acquisition) est de type Campbell. Nous mesurons le gisement lumineux solaire à partir d'appareils de type AHLBORN possédant leur propre centrale d'acquisition. Nous avons synchronisé les deux centrales afin de pouvoir exploiter les résultats des mesures. Pour des raisons de commodité, nous avons placé notre luxmètre sur la toiture de la cellule LGI. Nous mesurons l'éclairement lumineux global et diffus extérieur. D'autres mesures d'éclairement lumineux à l'intérieur de la cellule sont prises simultanément et les informations obtenues sur le gisement lumineux vont être utilisées pour simuler l'éclairement intérieur du local expérimental. Tous les appareils ont été calibrés chez le constructeur.



FIGURE I.21. SITE EXPERIMENTAL DU LPBS



FIGURE I.22. STATION METEOROLOGIQUE LOCALE



FIGURE I.23. LUXMETRE (CAPTEUR DE MESURE D'ECLAIREMENT LUMINEUX GLOBAL) EXTERIEUR



FIGURE I.24. APPAREIL DE MESURE DE LA LUMIERE DIFFUSE EXTERIEURE

### I.3.5.3. Evaluation de la constante d'efficacité lumineuse diffuse ( $E_{ff,dif}$ )

L'efficacité lumineuse diffuse est pratiquement constante dans tout le ciel, sauf près du soleil et à l'horizon où sa valeur diminue pour se rapprocher de celle du direct. Cette valeur varie donc en fonction de la hauteur du soleil. De nombreux modèles ont été mis en place pour retrouver cette expression. Dans notre étude, nous avons pris 5 journées (du 17/02/08 au 20/02/08).

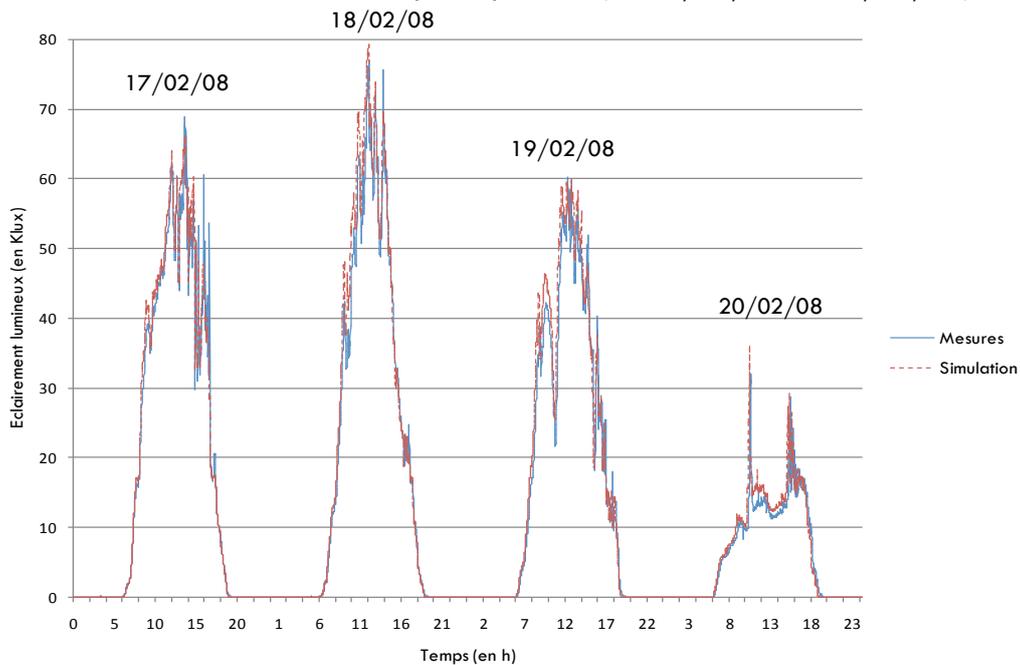


FIGURE I.25. MESURE/MODELE ECLAIREMENT DIFFUS (140 LM/W) DU 17/02/08 AU 20/02/08

Le tableau qui suit donne les valeurs de différentes erreurs commises entre les valeurs simulées à partir de la constante d'efficacité lumineuse (140 lm/W) et les mesures obtenues du 17 au 20 février 2008 (voir Annexe B pour les calculs d'erreurs).

Erreur Modèle /mesure sur l'étude du diffus (du 17/02/08 au 20/02/08)		
RMSD (en %)	MBD (en %)	R <sup>2</sup> (en %)
5.04	0.16	0.75

TABLEAU I.7. ERREURS SUR L'ETUDE DE L'ECLAIREMENT EXTERIEUR DU DIFFUS (17/02/08 AU 20/02/08)

En général, cette valeur varie en fonction de la hauteur du soleil. C'est pour cette raison que nous obtenons des erreurs élevées lorsque nous la prenons comme constante. Nous pourrions essayer de mettre en place un modèle empirique d'efficacité lumineuse qui serait fonction uniquement de cette hauteur, mais cela ne serait sûrement pas cohérent, en raison du peu de données dont nous disposons.

Nous pouvons cependant nous limiter à une constante car d'après la bibliographie, [Dumortier, 1995], cette valeur ne varie pas tellement pour une région donnée.

Nous avons ensuite étudié l'évolution de l'efficacité lumineuse diffuse mesurée le 17/02/08 en fonction de la hauteur du soleil. Le graphe (Figure I.25) nous indique que cette valeur est relativement indépendante de la position du soleil.

Les erreurs entre le modèle basé sur l'efficacité lumineuse diffuse et les mesures ce jour-là sont données par le Tableau I.8.

Erreur Modèle /mesure sur l'étude du diffus (17/02/08)		
RMSD (en %)	MBD (en %)	R <sup>2</sup> (en %)
2.79	0.09	9.88x10 <sup>-5</sup>

TABLEAU I.8. ERREURS COMMISES SUR L'ETUDE DE L'ECLAIREMENT EXTERIEUR DU DIFFUS (17/02/08)

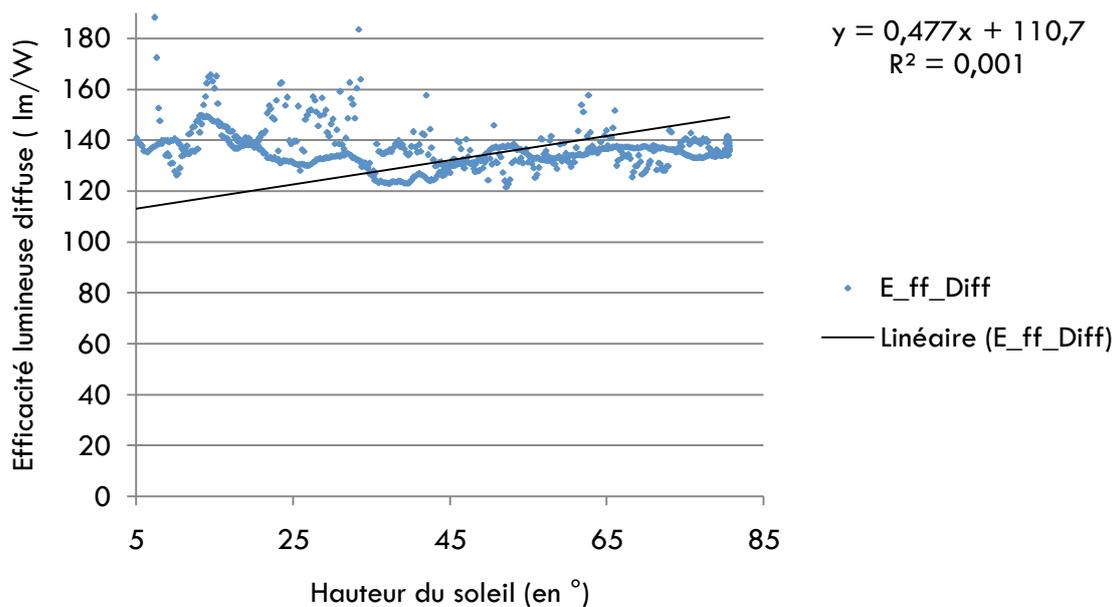


FIGURE I.26. EFFICACITE LUMINEUSE DIFFUSE EN FONCTION DE LA HAUTEUR DU SOLEIL (17/02/08)

#### I.3.5.4. Evaluation de la constante d'efficacité lumineuse globale (E<sub>ff,global</sub>)

Selon les études faites pour retrouver la valeur de l'efficacité lumineuse globale, certaines affirment que c'est une constante qui varie selon la région où l'on se trouve. La valeur moyenne de l'efficacité lumineuse globale est de 110 lm/W et ne varie pas dans la journée. Ceci s'explique par le fait que l'efficacité lumineuse directe augmente avec la hauteur du soleil alors que l'efficacité lumineuse diffuse du ciel sans nuages (donc clair) diminue avec la hauteur du soleil dans des proportions qui dépendent du contenu en aérosols de l'atmosphère.

Les deux phénomènes ont donc tendance à s'équilibrer. Les variations importantes de l'efficacité lumineuse globale que l'on note aux faibles hauteurs de soleil résultent plus de l'influence de la quantité d'eau contenue dans l'atmosphère que de la quantité d'aérosols. Un exemple de la constante d'efficacité lumineuse globale obtenue en Angleterre est de 112 lm/W [Secker, 1983] ou encore 109 lm/W [Littlefair, 1988]. Avec le modèle de Perez, l'efficacité lumineuse globale est comprise en 105 et 110 lm/W [Dumortier, 1995].

Les modèles qui utilisent une constante d'efficacité lumineuse globale ne tiennent compte ni des variations de la couverture nuageuse, ni des variations de la hauteur du soleil et encore moins de celles de la teneur en aérosols. Cependant, les résultats obtenus à partir de ces constantes sont cohérents. En effet, prenons par exemple trois journées types (ciel clair, couvert et intermédiaire), du 08/02/08 au 10/02/08, et étudions le rapport entre éclairement lumineux global et éclairement énergétique global sur le site expérimental de la cellule LGI. Nous avons obtenu expérimentalement une valeur d'efficacité lumineuse égale à environ 130 lm/W. Nous avons ensuite multiplié cette valeur avec les données d'éclairement énergétique. Et enfin, nous avons comparé les valeurs obtenues avec celles des mesures des éclairements lumineux globaux horizontaux extérieurs. Les courbes suivantes (Figure I.27) sont obtenues :

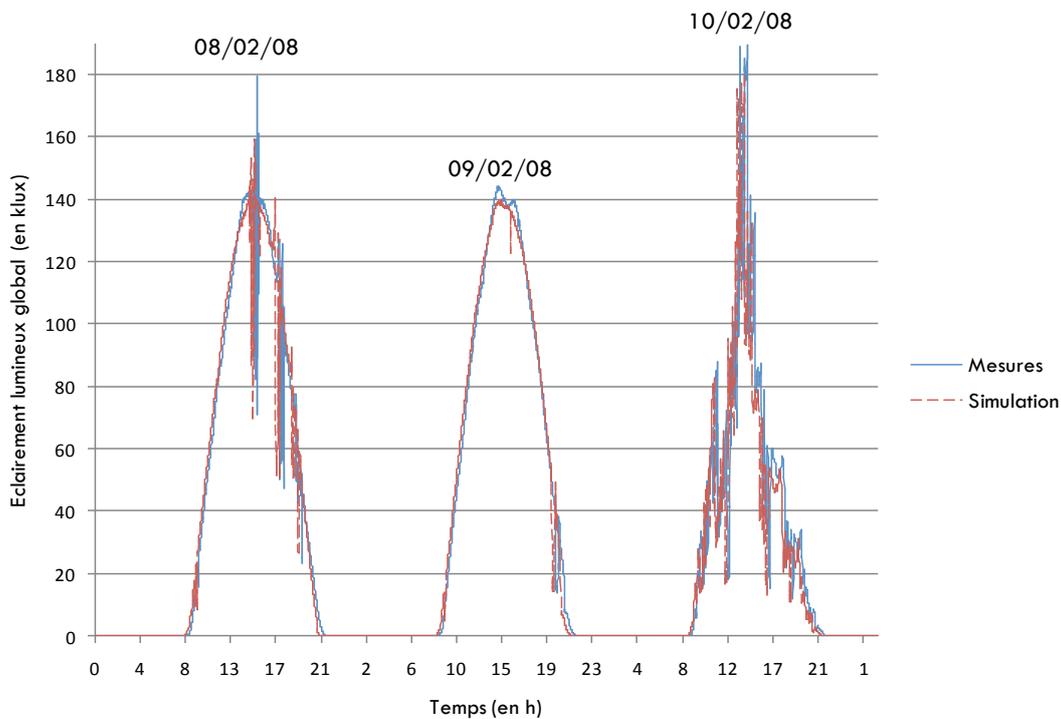


FIGURE I.27. MESURE/MODELE ECLAIREMENT GLOBAL (130 LM/W) DU 08/02/08 AU 10/02/08

**Erreur Modèle /mesure sur l'étude du diffus (du 08/02/08 au 10/02/08)**

RMSD (en %)	MBD (en %)	R <sup>2</sup> (en %)
5.30	-1.45	0.74

TABLEAU I.9. ERREURS SUR L'ETUDE DE L'ECLAIREMENT EXTERIEUR DU GLOBAL (08/02/08 AU 10/02/08)

L'erreur est très faible et ceci dans l'ensemble des journées types (couverte, claire et intermédiaire). Pour une autre journée (le 14/02/08 par exemple), la constante permet d'obtenir les comparaisons suivantes (Figure I.28) :

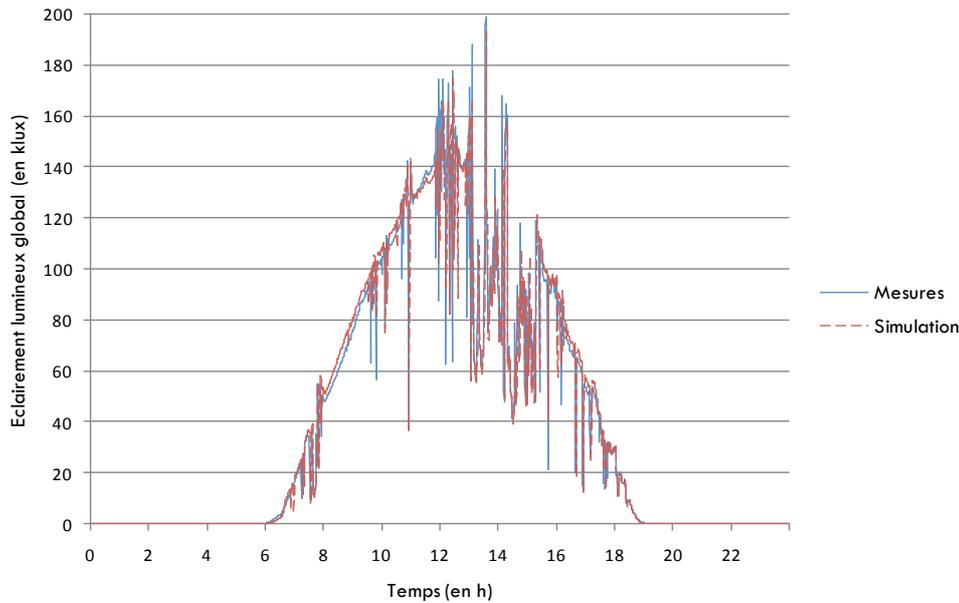


FIGURE I.28. MESURE/MODELE ECLAIREMENT GLOBAL (130 LM/W) DU 14/02/08

Erreur Modèle /mesure sur l'étude du diffus (14/02/08)		
RMSD (en %)	MBD (en %)	R <sup>2</sup> (en %)
0.01	0.01	0.77

TABLEAU I.10. ERREURS SUR L'ETUDE DE L'ECLAIREMENT EXTERIEUR DU GLOBAL (14/02/08)

Une fois encore, nous constatons que les erreurs moyennes commises par la constante d'efficacité lumineuse globale de 130 lm/W sont très faibles pour une journée donnée.

### I.3.5.5. Conclusions et perspectives futures

L'expérimentation que nous avons menée s'inscrit dans une logique à long terme. En effet, cette étude n'a démarré qu'à partir de 2008. Nous comptons réaliser une base de données suffisamment étendue dans le temps afin d'améliorer nos modèles d'efficacité lumineuse. Pour l'instant, nous ne nous appuyons que sur des données journalières qui caractérisent les trois types de ciels classiques (couvert, intermédiaire et clair). Dans un premier temps, nous avons mis en place des modèles assez simplifiés de constante d'efficacité lumineuse basés sur ces données journalières pour tous types de ciel. L'étude nous a révélé une constante d'efficacité lumineuse globale égale à 121.5 (+/- 7.5) lm/W et une constante d'efficacité lumineuse diffuse aux alentours de 140 (+/- 40) lm/W (beaucoup plus variable) à la Réunion. Cette étude n'est qu'une première approche des modèles d'efficacité lumineuse. En effet, nous ne disposons pas pour le moment de suffisamment de données météorologiques pour affiner nos modèles d'efficacité. Cependant, nous avons vu que les constantes retrouvées répondent assez correctement à nos attentes. Il ne faut pas perdre de vue que le but de notre étude n'est pas de caractériser le gisement solaire extérieur, mais plutôt de mettre en place des modèles d'éclairage naturel intérieur.

Sachant que ces modèles sont de type simplifié et qu'ils sous-estiment le gisement extérieur, nous pouvons alors nous permettre de simuler ce gisement à partir de modèles (ou constantes). Il est à noter que ces constantes se rapprochent plus ou moins des valeurs obtenues dans la bibliographie.

Afin de pouvoir obtenir suffisamment de valeurs dans une journée, nous avons travaillé au pas de temps de la minute. Nous n'avons aussi considéré que trois types de ciels (couvert, intermédiaire et clair) au lieu de 5 voire 6 types (ciel serein, intermédiaire couvert, etc.).

Cette hypothèse ne nous permet peut-être pas de mieux caractériser l'état réel du ciel lorsque l'on se trouve à un instant où le ciel est intermédiaire avec plus de nuages ou moins de nuages, mais nous donne une indication assez acceptable du phénomène produit.

## I.4. Synthèse de notre recherche bibliographique

Notre chapitre I a porté, dans un premier temps, sur l'étude bibliographique de tous les aspects en rapport avec l'éclairage intérieur aussi bien artificiel que naturel. L'étude de la simulation numérique de ces phénomènes a aussi fait l'objet de notre travail.

Nous avons ensuite établi l'état de l'art de l'éclairage intérieur naturel et artificiel : modèles connus, limites, atouts, etc. C'est dans ce contexte que nous avons constaté que les difficultés rencontrées se situent plus au niveau de l'éclairage naturel de par sa répartition lumineuse aléatoire, et que nous avons cherché à améliorer le modèle Lumen. Nous avons aussi mis en place un nouveau modèle de type simplifié pour le calcul d'éclairage naturel direct (intérieur).

Toujours dans le souci d'apporter des notions nouvelles dans le domaine, nous avons également développé un algorithme de calcul d'éclairage (naturel et artificiel) sous CODYRUN. Cette méthode permet non seulement de faire simplement et rapidement des calculs numériques d'éclairage, mais aussi de traiter les phénomènes de la tâche solaire et du direct lié au second jour. L'algorithme est donné par l'organigramme de la Figure I.29. Les deux modèles simplifiés, que nous avons établis à partir de combinaison, utilisés pour calculer l'éclairage naturel intérieur en tout point P d'un plan utile sont données par les relations suivantes :

- Dans le cas de l'éclairage naturel au point P :

$$E_{glo,P} = \underbrace{(FLJ_p \times E_{P,ext})}_{\text{Diffus du FLJ}} + \underbrace{\left( E_{Dir,s} \times \rho_{sol} \times \frac{N_{TS}}{N_G} \right)}_{\text{Diffus Tâche solaire}} + \underbrace{\left( E_{Dir,s} \times \tau_{vitre} \right)}_{\text{Direct du soleil}} \quad \text{EQ I. 28}$$

- $E_{glo,P}$  : Eclairage lumineux global au point P (en lux);
- $FLJ_p$  : Facteur de Lumière du Jour au point P (en %);
- $E_{P,ext}$  : Eclairage lumineux horizontal extérieur au point P (en lux);
- $E_{Dir,s}$  : Eclairage lumineux direct provenant du soleil (en lux);
- $\rho_{sol}$  : Coefficient de réflexion au sol (en %);
- $\tau_{vitre}$  : Coefficient de transmission de l'ouverture (égal à 1 si pas de vitrage. En %);
- $N_{TS}$  : Nombre de nœuds (ou points) éclairés directement par le soleil dans la grille surfacique du plan utile (adimensionnel);
- $N_G$  : Nombre total de points de la grille surfacique du plan utile (adimensionnel).

- Dans le cas de l'éclairage artificiel au point P :

$$E_{glo,P} = \overbrace{\left(\frac{I_P}{d^2} \times \cos \alpha \times \rho_{moy}\right)}^{\text{Diffus alentours}} + \overbrace{\left(\frac{I_P}{d^2} \times \cos \alpha\right)}^{\text{Direct source (luminaire)}} = \left(\frac{I_P}{d^2} \times \cos \alpha\right) (1 + \rho_{moy}) \quad \text{EQ I. 29}$$

- $E_{glo,P}$  : Eclairage artificiel global au point P (en lux);
- $I_p$  : Intensité lumineuse de la source S (luminaire) dans la direction du point P (en Cd);
- $d$  : Distance entre la source S et le point P (en m);
- $\alpha$  : Angle entre la normale du plan contenant le point et le rayon lumineux provenant de la source S (en °);
- $\rho_{moy}$  : Valeurs moyenne des coefficients de réflexion des parois internes (en %).

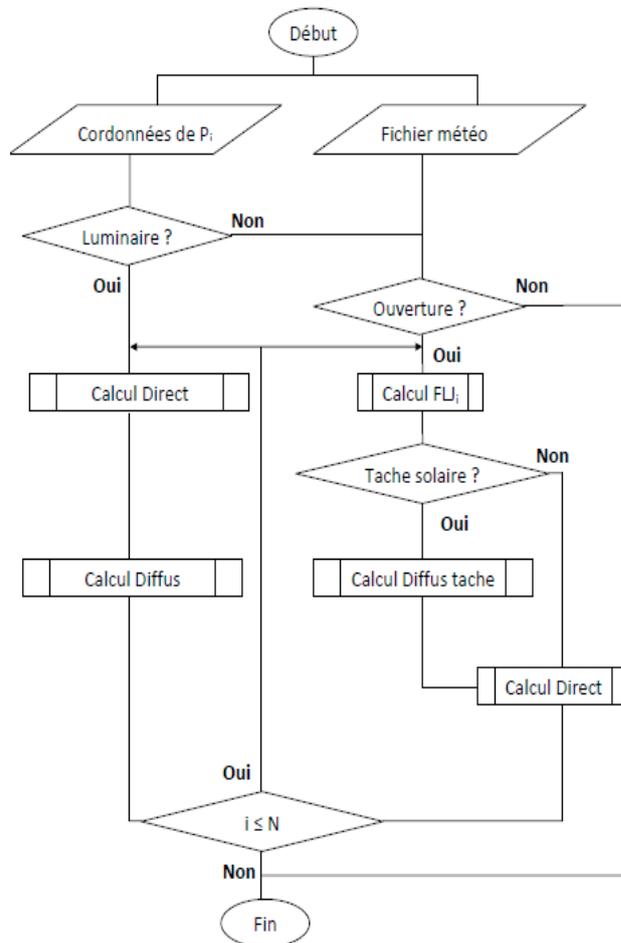
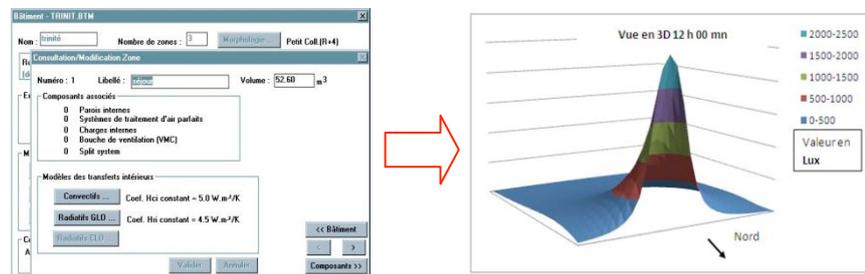


FIGURE I.29. ALGORITHME DE CALCUL DE L'ECLAIRAGE (ARTIFICIEL ET NATUREL) SOUS CODYRUN

Sachant qu'on ne pouvait étudier l'éclairage naturel intérieur sans connaître le gisement lumineux solaire et qu'on ne dispose d'aucune information (base de données) de ce gisement à la Réunion, nous avons donc consacré un paragraphe entier à cette variable. C'est ainsi qu'après une recherche bibliographique nous avons opté pour l'étude de modèles d'efficacité lumineuse. Nous avons trouvé des constantes d'efficacité lumineuse globale et diffuse respectivement égales à 121.5 +/- 7.5 lm/W et 140 +/- 40 lm/W pour tout type de ciel.

# ELEMENTS DE VALIDATION



## Chapitre II

## Élément de validation sous CODYRUN

Après avoir présenté les modèles d'éclairage (artificiel et naturel) intégrés dans CODYRUN, nous proposons dans ce chapitre une démarche (comparaison inter-logiciels, cas tests, etc.) permettant d'en apprécier le degré de validité.



## Table des matières

<b>II.1. DEMARCHE PROPOSEE.....</b>	<b>67</b>
II.1.1.    Méthodologie utilisée.....	67
II.1.2.    Rappel de quelques limitations des modèles.....	67
II.1.3.    Sélection des cas tests de Maamari applicables au logiciel CODYRUN .....	68
II.1.4.    Compléments des cas tests .....	70
<b>II.2. CAS TESTS AVEC REFERENCES ANALYTIQUES .....</b>	<b>71</b>
II.2.1.    Introduction des cas tests utilisés.....	71
II.2.2.    Description architecturale et hypothèses de simulation des locaux de référence ...	71
II.2.3.    Cas tests avec références analytiques pour la lumière naturelle.....	71
II.2.3.1.  Les références (II.10) et (II.11) de Maamari.....	71
II.2.3.2.  La référence (II.14.4) de Maamari.....	75
II.2.3.3.  La référence (II.14.9) de Maamari.....	76
II.2.4.    Cas tests avec références analytiques pour la lumière artificielle.....	78
II.2.4.1.  La référence (II.1) de Maamari.....	79
II.2.4.2.  La référence (II.2) de Maamari.....	81
II.2.4.3.  Calcul du diffus artificiel (référence (II.7) de Maamari) .....	83
II.2.4.4.  Tests supplémentaires.....	84
II.2.5.    Conclusion sur les cas tests analytiques.....	91
<b>II.3. COMPARAISON INTER – LOGICIELS (VALIDATION COMPARATIVE).....</b>	<b>92</b>
II.3.1.    Logiciels utilisés.....	92
II.3.2.    Simulation d'éclairage naturel avec la référence du CSTB.....	92
II.3.2.1.  Maquette réduite du CSTB .....	92
II.3.2.2.  Simulations de références .....	93
II.3.2.3.  Hypothèse de simulations sous CODURUN .....	93
II.3.2.4.  Résultats et comparaisons .....	93
II.3.2.5.  Conclusions.....	95
II.3.3.    Simulation de l'éclairage artificiel : DIALX 4.4, LIGHTSCAPE 3.2 et CODYRUN ....	95
II.3.3.1.  Choix des logiciels de comparaison .....	96
II.3.3.2.  Résultats des simulations.....	96
II.3.3.3.  Conclusions.....	97
II.3.4.    Conclusion sur la comparaison inter - logiciels.....	97
<b>II.4. CAS TESTS AVEC REFERENCES EXPERIMENTALES .....</b>	<b>98</b>
II.4.1.    Introduction.....	98
II.4.2.    Calcul d'erreurs .....	98
II.4.3.    Références expérimentales pour l'éclairage naturel.....	99
II.4.3.1.  Comparaison maquette – simulation pour des scénarios de ciel artificiel.....	99
II.4.3.2.  Modèle réduit de l'EPFL (Tâche 21 de l'IEA).....	102
II.4.3.3.  Cas test HUT à échelle réelle en Finlande (Tâche 21 de l'IEA).....	106
II.4.4.    Références expérimentales pour l'éclairage artificiel.....	107
II.4.4.1.  Géométrie du local dans un repère cartésien.....	108
II.4.4.2.  Scénario 1 de la tâche TC3-33 du CIE .....	110
II.4.4.3.  Le scénario 3 de la tâche TC-3-33 (référence (IV.1.4) de Maamari).....	111

II.4.5.	Etude dynamique de l'éclairage naturel local : cas de la cellule LGI.....	112
II.4.5.1.	Protocole expérimental.....	112
II.4.5.2.	La Cellule LGI pour l'étude de l'éclairage naturel.....	113
II.4.5.3.	Hypothèse de simulation.....	117
II.4.5.4.	Résultats et comparaisons.....	117
II.4.5.5.	Conclusions du régime dynamique.....	124
II.4.6.	Conclusion sur les cas tests expérimentaux.....	125
<b>II.5.</b>	<b>CONCLUSION SUR LES RESULTATS DES CAS TESTS.....</b>	<b>126</b>

## II.1. Démarche proposée

Nous proposons, dans cette section, une démarche de validation du code de calcul d'éclairage (naturel et artificiel) intégré à CODYRUN. Cette procédure s'appuie principalement sur des recommandations émises par Maamari [Maamari, 2004], mais aussi sur différents travaux issus de plusieurs laboratoires de recherche ou organismes scientifiques de par le monde.

### II.1.1. Méthodologie utilisée

Quel que soit le logiciel utilisé, il est important de connaître le niveau de précision des résultats des simulations réalisées par ce dernier. Cela n'est possible qu'à travers une validation rigoureuse et transparente du logiciel. Les démarches de validation d'un logiciel de simulation de l'éclairage sont des tâches immenses et d'une complexité non négligeable. Il été donc indispensable de nous appuyer sur des travaux réalisés rigoureusement par d'autres laboratoires et servant de références mondiales, afin de s'assurer de la légitimité des démarches à entreprendre et des résultats obtenus pour répondre à cette exigence de validation. Il existe peu de documents sur les procédures à suivre pour tester la fiabilité d'un logiciel qui simule l'éclairage ([Khodulev, 1996], [Slater, 2002] et [Maamari, 2004]). Dans la plupart des cas, chaque laboratoire de recherche se contente de mettre en place un protocole et des dispositifs expérimentaux particuliers (in situ ou maquettes réduites) afin de récolter des données pouvant leur servir de comparaison avec les modèles ou logiciels qui traitent de ce phénomène. L'étude réalisée par Maamari semble répondre, de manière complète, à nos attentes de validation. En effet, le sujet de sa thèse a porté justement sur la mise en place d'un protocole pour tester la fiabilité d'un logiciel de simulation d'éclairage (artificiel et naturel) ainsi que des cas tests de référence aussi bien analytiques qu'expérimentaux. L'auteur préfère parler d'éléments de validation permettant de donner un pourcentage sur la crédibilité des logiciels de simulation que de validation proprement dite. De plus, le CIE [CIE, 1970] s'est basé essentiellement sur ces travaux pour rédiger le rapport TC3-33 [CIE, 2005] servant de référence pour tester la fiabilité d'un logiciel d'éclairage au niveau européen en particulier et mondial en général. C'est pour toutes ces raisons que nous allons appliquer les recommandations de Maamari et suivre les démarches de cas tests qu'il a développées. Nous ajouterons quelques autres cas tests cités dans la bibliographie. Une comparaison inter-logiciels (validation comparative) sera aussi traitée. Enfin, nous nous assurerons de la performance du logiciel à traiter des cas réels locaux en nous basant sur le dispositif expérimental mis en place au sein de notre laboratoire.

### II.1.2. Rappel de quelques limitations des modèles

CODYRUN ne traite que de l'éclairage (artificiel et naturel) à l'intérieur d'un local et ce uniquement sur des plans utiles (surfaces horizontales) de notre bâtiment. Aucune valeur d'éclairement ne pourra donc être donnée sur les parois verticales telles que des murs.

Dans le cas de l'éclairement naturel, le logiciel ne traite que des sources provenant des ouvertures multilatérales telles que les vitrages classiques (ouvertures sur les parois des murs constituant le local). Les ouvertures zénithales ne sont donc pas simulables.

S'agissant de l'éclairage artificiel, seuls les cas de luminaires situés au plafond sont simulés. En effet, les lampadaires internes ou les luminaires placés sur les surfaces des murs ne peuvent être étudiés par le logiciel.

De plus CODYRUN ne prend pas en compte les obstructions internes (chaise, individu, table, etc.) et les transmissions (ou réflexions) bidirectionnelles (BRDF) des matériaux ainsi que les phénomènes liés aux puits de lumière.

C'est pour toutes ces raisons que nous ne comparerons le logiciel qu'avec des références qui tiennent compte de ces hypothèses. Les cas tests ne répondant pas à ces conditions ne seront pas traités.

### II.1.3. Sélection des cas tests de Maamari applicables au logiciel CODYRUN

Maamari [Maamari, 2004] a mis en œuvre des scénarios pouvant servir de références pour des simulations d'éclairage. Il les a classés en deux catégories : les tests analytiques et expérimentaux. Dans chaque catégorie, il distingue l'étude de l'éclairage artificiel de celle de l'éclairage naturel. Il a aussi mentionné des scénarios déjà existants, provenant d'autres études, tels que les cas définis dans la tâche 21 de l'IEA [IEA, 2001] ou du CIBSE [CIBSE, 1987] que nous verrons plus en détail.

Dans les scénarios tests de Maamari, il existe des cas de figure spécifiques à la lumière artificielle ou naturelle. Certains de ces scénarios traitent des cas particuliers utilisés à la fois pour le naturel et l'artificiel. C'est notamment le cas, par exemple, du test spectral (référence du test II.1.4.7 dans le rapport de thèse de Maamari [Maamari, 2004]). Il est évident que nous ne pourrions pas faire tous les tests proposés en raison des limitations de CODYRUN. Les Tableau II.1 et Tableau II.2 résument tous les tests de Maamari, ainsi que ceux retenus. Nous expliquons également dans la colonne "observations" pourquoi nous n'avons pas pu réaliser certains d'entre eux.

Référence	Eclairage	Testé sur CODYRUN	Observations
(III.2.5) : Comparaison maquette – simulation pour des scénarios pour les scénarios du ciel réel (ouverture en façade et en toiture)	Nat	O	Uniquement pour l'ouverture en façade
(III.2.6) : Comparaison maquette – simulation pour des scénarios pour les scénarios du ciel artificiel (ouverture en façade et en toiture)	Nat	O	Uniquement pour l'ouverture en façade
(III.2.7) : Etude dynamique sous un ciel réel variable (ouverture en façade et en toiture)	Nat	O	Uniquement pour l'ouverture en façade
(III.3.1) : Eclairage intérieur sous une ouverture en toiture et un ciel extérieur nuageux	Nat	N	Pas d'ouverture en toiture sous CODYRUN
(III.3.2) : Simulation de la transmission bidirectionnelle des matériaux	Nat	N	Pas de transmission bidirectionnelle sous CODYRUN
(III.4) Exemple de cas tests en lumière artificielle	Art	O	Néant
(IV.1.4) Comparaison des résultats aux données de référence expérimentales des scénarios de lumière artificielle (CIBSE)	Art	O	Scénarios du CIBSE
(III.5.1) Transmission bidirectionnelle	Nat/Art	N	Transmission bidirectionnelle non prise en compte sous CODYRUN

(III.5.2) Réflexion bidirectionnelle	Nat/Art	N	Réflexion bidirectionnelle non prise en compte sous CODYRUN
(III.5.3) Qualité spectrale des sources	Nat/Art	N	Pas de rendu (couleur) spectral, ni de calcul sur les surfaces verticales sous CODYRUN
(III.5.4) Photo - réalisme (des images de synthèse)	Nat/Art	N	Pas de prise en compte d'image de synthèse sous CODYRUN
(III.5.5) Cartes de luminances	Nat/Art	N	CODYRUN ne crée pas de carte de luminance
(III.5.6) Scénarios de la tâche 21 de l'IEA	Nat/Art	O	Tâche 21 de l'IEA

TABLEAU II.1. CAS TESTS EXPERIMENTAUX DE REFERENCE (MAAMARI) UTILISES DANS CODYRUN

Référence	Eclairage	Testé sur CODYRUN	Observations
(II.1) : Simulation d'une source ponctuelle associée à un fichier photométrique	Art	O	Calcul éclairement direct
(II.2) : Simulation d'une source surfacique associée à un fichier photométrique	Art	O	Eclairement direct (source surfacique Lambertienne)
(II.3) : Conservation du flux entrant à travers une ouverture	Nat	N	CODYRUN ne calcule pas les flux sur les murs
(II.4) : Transmission directionnelle d'un vitrage normal	Nat	N	Pas d'ouverture en toiture sous CODYRUN
(II.5) : Réflexion de la lumière sur une surface de Lambert	Nat/Art	N	CODYRUN ne calcule pas les flux sur les murs
(II.6) : Réflexion diffuse avec présence d'obstructions internes	Nat/Art	N	CODYRUN ne tient pas compte des obstructions internes
(II.7) : Calcul de la composante réfléchie interne pour une géométrie avec des surfaces de Lambert	Nat	O	Calcul de la composante interne moyenne
(II.8) : Composante directe du FJ (FJD) pour une ouverture en toiture non vitrée (sous les 16 types du ciel général CIE)	Nat	N	Pas d'ouverture en toiture sous CODYRUN
(II.9) : FJD pour une ouverture en toiture avec vitrage normal	Nat	N	Pas d'ouverture en toiture sous CODYRUN
(II.10) : Composante directe et la composante réfléchie externe (sol extérieur) pour une ouverture en façade non vitrée	Nat	O	Calcul uniquement au sol intérieur
(II.11) : FJD + FRE (sol extérieur) pour une ouverture en façade avec vitrage normal	Nat	O	Calcul uniquement au sol intérieur
(II.12) : FJD+FRE (sol extérieur + masque horizontal) pour une ouverture en façade non vitrée	Nat	N	Pas de masques horizontaux pour l'éclairage sous CODYRUN

(II.1.3) : FJD+FRE (sol extérieur + masque vertical) pour une ouverture en façade non vitrée	Nat	N	Pas de masques verticaux pour l'éclairage sous CODYRUN
(II.1.4.1) : Conservation du flux des sources artificielles	Art	N	CODYRUN ne calcule pas les flux sur les murs
(II.1.4.2) : Taches solaires	Nat	O	Direct et diffus de la tache
(II.1.4.3) : Réflexion spéculaire	Nat/Art	N	Pas de calcul de flux sur les surfaces verticales sous CODYRUN
(II.1.4.4) : Transmission à travers un vitrage 100% diffusant	Nat	O	Calcul avec un vitrage 100% diffusant
(II.1.4.5) : Transmission à travers des matériaux bidirectionnels	Nat	N	Non prise en compte sous CODYRUN
(II.1.4.6) : Réflexion sur des matériaux bidirectionnels	Nat/Art	N	Non prise en compte sous CODYRUN
(II.1.4.7) : Calcul spectral	Nat/Art	N	Pas de rendu (couleur) spectral, ni de calcul sur les surfaces verticales sous CODYRUN
(II.1.4.8) : Calcul de l'éclairement extérieur	Nat	O	Etude locale (île de La Réunion)
(II.1.4.9) : Variation horaire et saisonnière de l'éclairement extérieur	Nat	O	Etude locale (île de La Réunion)
(II.1.4.10) : Fuite (ou puits) de lumière	Nat/Art	N	Pas de prise en compte d'ombre extérieure

TABLEAU II.2. CAS TESTS ANALYTIQUES DE REFERENCE (MAAMARI) UTILISES DANS CODYRUN

En résumé, nous n'avons pu prendre en compte que 39% des cas tests définis par Maamari. Il faut savoir que l'auteur n'oblige aucunement à faire passer la totalité des cas tests au logiciel dont on souhaite vérifier la fiabilité. Le plus important est de vérifier que les résultats de simulation obtenus sur les tests réalisables soient cohérents avec les valeurs de référence données par les cas tests sélectionnés.

#### II.1.4. Compléments des cas tests

Quelques autres cas tests analytiques et expérimentaux conçus en compléments de ceux déjà cités auparavant ont été formulés dans ce paragraphe. Il s'agit d'un cas test analytique sur l'éclairage artificiel (avec plusieurs luminaires) et des mesures récoltées expérimentalement sur la cellule test LGI décrite dans le paragraphe II.4.5.

## II.2. Cas tests avec références analytiques

Les tests analytiques de Maamari que nous exposerons par la suite tiennent compte du Facteur de lumière du jour (FLJ) et en particulier de la composante directe de ce FLJ.

Ce choix repose sur le fait que notre modèle d'éclairage est basé sur le FLJ et que nous travaillons sur des grilles surfaciques au sol à l'intérieur du bâtiment. En effet, le fait de ne chercher qu'à représenter au sol le FLJ nous amène à nous intéresser plus particulièrement à la composante directe du FLJ car c'est celle qui domine dans ce cas de figure.

### II.2.1. Introduction des cas tests utilisés

Le scénario de référence (II.14.2) de Maamari sera appliqué sur des études locales (étude du gisement solaire à la Réunion). Les cas analytiques de Maamari que nous traiterons sont ceux de référence (II.10), (II.11) (II.14.4) et (II.14.9) pour le cas de l'éclairage naturel et (II.1), (II.2) et (II.7) pour le cas de l'artificiel. Les tests supplémentaires que nous verrons sont ceux du cas à plusieurs luminaires (éclairage artificiel).

### II.2.2. Description architecturale et hypothèses de simulation des locaux de référence

Le local étudié sera un monozone ou bizona. Il possédera des ouvertures variables en façade (avec ou sans vitrage) ou des luminaires (sources ponctuelles ou surfaciques) au plafond. Le paramètre le plus étudié dans le cas de l'éclairage naturel sera le facteur de lumière du jour et ses composantes (diffuse externe, directe et diffuse interne) en particulier. L'étude des modèles de caractérisation de l'éclairage naturel, aussi bien intérieur qu'extérieur, sera également présentée.

### II.2.3. Cas tests avec références analytiques pour la lumière naturelle

Il s'agit des cas tests de Maamari de référence (II.10), (II.11), (II.14.4) et (II.14.9). Les résultats de simulation sous CODYRUN seront comparés aux valeurs analytiques.

#### II.2.3.1. Les références (II.10) et (II.11) de Maamari

Le but de ce cas test est de vérifier la capacité du logiciel CODYRUN à prendre en considération la contribution des luminances du ciel (à travers la composante directe  $D_c$  du FLJ) reçues sur le sol intérieur de la pièce.

##### II.2.3.1.1. DESCRIPTION DU CAS TEST DE REFERENCE (II.10) ET (II.11)

La géométrie du local étudié dans ce cas test est une pièce de dimension  $4m \times 4m \times 3m$  avec une ouverture en façade située au centre d'un des murs qui varie de  $2m \times 1m$  à  $4m \times 3m$ . Nous traiterons le cas d'ouverture avec vitrage clair de 6 mm d'épaisseur, puis le cas d'ouverture sans vitrage. Les points de référence sont positionnés comme indiqué sur la Figure II.1 . Nous ne traiterons que les cas des points au sol (G, H, I, J, K, L, M, N) pour le ciel de Type 16 (ciel couvert) défini par Maamari.

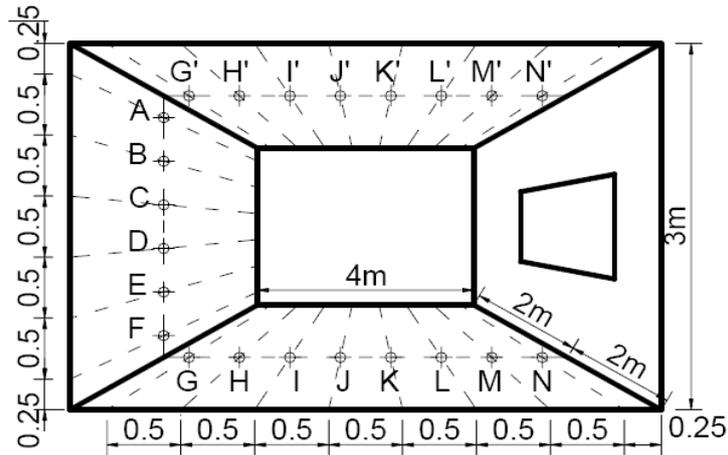


FIGURE II.1. LOCAL TEST POUR LE CAS DE REFERENCE (II.10) DE MAAMARI

Pour exemple, les valeurs de la composante directe  $D_c$  du FLJ (facteur de lumière du jour) obtenues analytiquement en fonction de la dimension de l'ouverture en façade sans vitrage sont données par le Tableau II.3.

Ciel Couvert	$D_c$ du FLJ au sol								
Position		G	H	I	J	K	L	M	N
Dimension ouverture	2m×1m	0.95	1.38	2.07	3.19	4.97	7.42	9.11	5.04
	4m×3m	4.5	6.15	8.53	12	16.97	23.91	33.08	44.43

TABLEAU II.3. REFERENCE ANALYTIQUE DU CAS TEST (II.10) SANS VITRAGE

#### II.2.3.1.2. HYPOTHESE DE SIMULATION SOUS CODYRUN

Nous calculerons la composante directe du FLJ pour une ouverture sans vitrage (coefficient de transmission égal à 0.99 sous CODYRUN). Dans le cas de figure avec vitrage, nous n'aurons qu'à multiplier les valeurs de la composante directe du FLJ, retrouvées précédemment, par le coefficient de transmission du vitrage clair (de l'ordre de 0.85). Le sol extérieur sera considéré comme infini (sol extérieur théorique caractérisé par un coefficient de réflexion donné par l'utilisateur de CODYRUN), ce qui implique une luminance diffuse uniforme. Dans notre étude, nous prendrons un coefficient de réflexion (albédo) extérieure égal à 0.3. Il est possible d'exprimer séparément les valeurs des composantes directe ( $D_c$ ), diffuse interne ( $D_i$ ) et diffuse externe ( $D_e$ ) sous CODYRUN connaissant les dimensions des ouvertures et les positions des points à étudier.

Nous avons pris 9x9 points sur la grille. Le décalage entre la grille surfacique et les murs verticaux est environ de 0.25 m.

#### II.2.3.1.3. COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION ET LES VALEURS DE REFERENCE

Nous avons subdivisé les résultats de simulation en deux parties : l'une correspond aux résultats de référence sans vitrage et l'autre aux résultats de référence avec vitrage. Le Tableau II.4 et La Figure II.2 donnent un exemple des résultats de comparaison obtenus ainsi que des erreurs commises pour une ouverture de 2mx1m dans le cas test sans vitrage.

Profondeur (en m) et point	Composante Directe (CODYRUN)	Composante Directe (Cas test)	erreur relative (en %)
0.25 (N)	4.18	5.04	17.1
0.75 (M)	8.43	9.11	7.4
1.25 (L)	7.14	7.42	3.7
1.75 (K)	4.87	4.97	2.0
2.25 (J)	3.15	3.19	1.2
2.75 (I)	2.06	2.07	0.4
3.25 (H)	1.37	1.38	0.7
3.75 (G)	0.95	0.95	0

TABLEAU II.4. CAS TEST (II.10) : OUVERTURE EN FAÇADE DE 2MX1M (SANS VITRE)

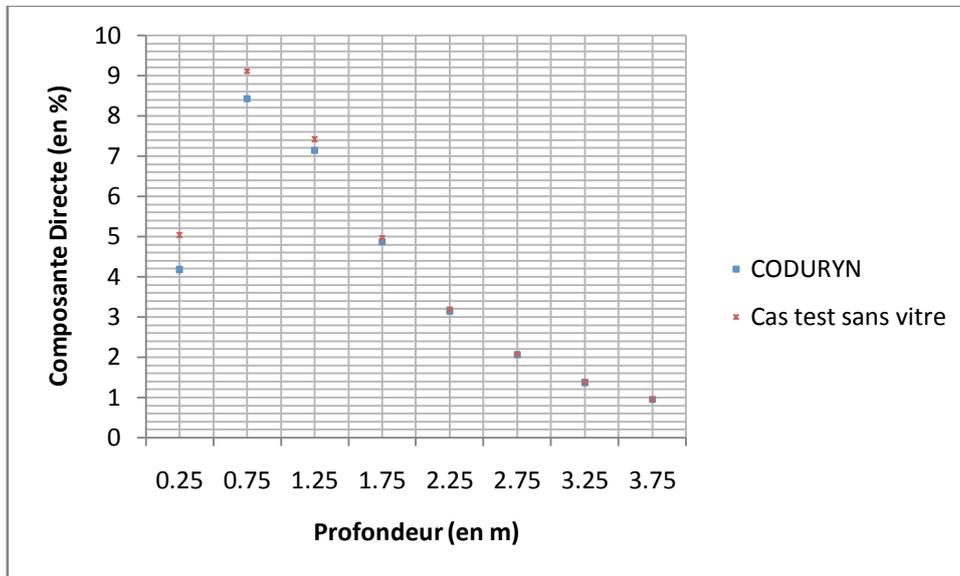


FIGURE II.2. COMPOSANTE DIRECTE POUR UNE OUVERTURE EN FAÇADE DE 2MX1M (SANS VITRE)

Ces résultats montrent clairement que le logiciel a tendance à sous-estimer les valeurs d'éclairage données aux points de référence analytique. Ceci s'explique probablement par le fait que le cas test proposé ne prend pas en considération l'épaisseur de l'ouverture, contrairement au logiciel. Une autre hypothèse qui expliquerait cette différence d'erreur serait que nous ne tenons pas compte des effets réfléchissants (bidirectionnels) des parois du vitrage dans la simulation. En effet, une partie de la lumière provenant du ciel pourrait être réfléchiée par le vitrage vers le milieu environnant et ne pénétrerait donc pas le local. Cette partie peut s'avérer importante si le coefficient de réflexion du vitrage est grand.

L'erreur est plus élevée (environ 17 %) au niveau du point N, qui est très proche de la fenêtre et tend à décroître en fonction de la profondeur du local. Elle est probablement liée au faible niveau d'éclairage ainsi qu'à l'angle rasant entre le point N et la surface de l'ouverture.

Toutefois, en multipliant la valeur simulée par un coefficient de pondération, nous pouvons nous rapprocher de la valeur analytique. Ces valeurs de pondération sont données par la CIE [CIE, 1970] en fonction de la profondeur du local par rapport à l'ouverture.

Dans le cas d'une ouverture de 3mx2m sans vitrage, l'erreur relative ne dépasse pas 2.6 %. Les mêmes remarques que précédemment sont observées dans ce cas de figure.

Enfin, dans le cas des ouvertures avec vitrage, le constat est tout autre. En effet, nous obtenons des maximums d'erreurs relatives très élevés (19.7 % pour une ouverture de 2mx1m au point N et 11.1 % pour une ouverture de 3mx2m au point M) pour une moyenne d'erreur de l'ordre de 5.1% (ouverture 2mx1m) à 3.9 % (ouverture 3mx2m). Il est important de savoir que les composantes du FLJ, dans le logiciel, ne dépendent que de la géométrie de l'ouverture et de la position du point à étudier. Les caractéristiques optiques de l'ouverture (coefficient de réflexion du vitrage par exemple) ne sont prises en compte qu'en aval lors de la détermination du FLJ total (somme de toutes les composantes pondérées de certains coefficients y compris celui de la transmission du vitrage). Etant donné que nous avons pris les valeurs brutes de la composante directe du FLJ, il n'est pas surprenant d'avoir des erreurs aussi élevées.

Dans tous les cas que nous venons de voir, nous constatons de manière générale que plus nous nous éloignons du vitrage, plus les valeurs données par CODYRUN se rapprochent davantage des valeurs du cas test.

#### II.2.3.1.4. INTERPRETATIONS ET CONCLUSIONS DU CAS TEST (II.10)

Il apparaît clairement que les résultats présentés auparavant montrent une bonne précision du logiciel dans le calcul du direct provenant du ciel sur les points de la grille du plan utile les plus éloignés de l'ouverture. Les résultats obtenus pour les autres cas tests sont donnés en Annexe D. Le Tableau II.5 récapitule les erreurs des tests de référence (II.10) et (II.11) de Maamari.

dimension	Erreur relative (en %)	Type d'ouverture	
		Avec vitrage	Sans vitrage
2mx1m	Max =	19.7	17.1
	Min =	2.1	0.4
	<b>Moyenne =</b>	<b>5.19</b>	<b>4.1</b>
3mx2m	Max =	10.9	2.6
	Min =	0.1	0.1
	<b>Moyenne =</b>	<b>3.9</b>	<b>2.1</b>

TABLEAU II.5. RESUME DES ERREURS RELATIVES DU CAS TEST DE REFERENCE (II.10) DE MAAMARI

Dans l'ensemble des tests, la fiabilité moyenne du logiciel à calculer le direct provenant du ciel est de 69.79 % (voir Annexe B pour le calcul de fiabilité). Nous concluons que notre modèle répond au test du direct en éclairage naturel dans le cas de ciel couvert. Cependant, sur les positions les plus rapprochées de l'ouverture, l'erreur commise est plus élevée (pouvant atteindre jusqu'à 19.7 %) lorsque l'on considère la valeur brute de la composante directe simulée par le logiciel. Il faut aussi souligner que la plupart des logiciels qui traitent de l'éclairage naturel intérieur commettent des erreurs très importantes lorsqu'il s'agit de simuler la lumière à ces positions, même avec des méthodes plus complexes telles que la radiosité ou le tracé de rayon. Dans notre cas, une telle erreur est causée par le facteur de forme utilisé dans notre modèle. En effet, les coefficients de pondération qui ont été mis en place par le BRE et qui sont utilisés dans les calculs du facteur de lumière du jour (FLJ), proviennent de ces facteurs de formes non négligeables lorsqu'il s'agit

d'étudier un point très éloigné de l'ouverture. Il est donc évident que l'application de ces coefficients ne peut qu'améliorer les résultats de nos simulations. De plus, les valeurs de ces coefficients sont purement empirique (résultats provenant d'expérience menées à l'époque par le BRE) et très approximatives. Lorsque l'on cherche à étudier un point se situant dans une zone où le diffus (lié fortement à ces paramètres de pondération) prédomine sur le direct, nous obtiendrons forcément des valeurs d'éclairage beaucoup plus approximatives qu'ailleurs. C'est le cas pour les points très éloigné de l'ouverture.

### II.2.3.2. La référence (II.14.4) de Maamari

Ce cas test traite de la validité d'un logiciel à simuler un vitrage parfaitement diffusant. L'auteur nous laisse le choix de la description du bâtiment à prendre, mais nous conseille de comparer les résultats de simulation obtenus avec ceux de la référence analytique en utilisant la formule du facteur de forme qu'il a donnée dans son rapport de thèse. Le but sera donc de retrouver la valeur d'éclairage diffus intérieur sur une surface d'un plan utile et provenant de la paroi interne (verticale) du vitrage à partir de la simulation sous CODYRUN. Nous comparerons ensuite la valeur de simulation obtenue avec celle de la formule du facteur de forme.

#### II.2.3.2.1. DESCRIPTION DU CAS TEST DE REFERENCE (II.14.4)

Il s'agit du cas du bâtiment décrit dans la référence (II.10), avec cependant une ouverture de 1 mètre de hauteur sur 2 mètres de largeur.

Ce cas est basé sur le calcul analytique de la valeur d'éclairage réfléchi provenant d'un vitrage parfaitement diffusant et parvenant sur un plan utile. Soit P un point éclairé et se trouvant à une profondeur h (égale à 1.5 m) par rapport à la vitre.

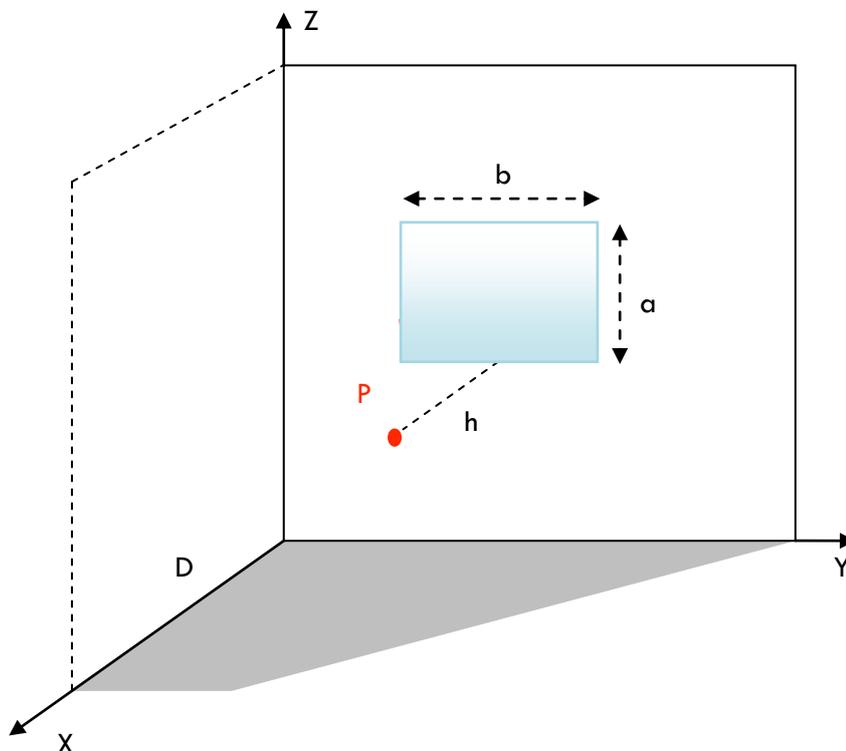


FIGURE II.3. ECLAIREMENT DIFFUS INTERNE PROVENANT DE LA VITRE

Le calcul du facteur de forme entre le point P et la surface du vitrage est donné par la formule suivante [Maamari, 2004]:

$$F_{12} = \frac{1}{2\pi} \operatorname{atan}\left(\frac{b}{h}\right) \times \frac{1}{\sqrt{\left(1-\left(\frac{a}{h}\right)^2\right)}} \operatorname{atan}\left(\frac{\frac{b}{h}}{\sqrt{\left(1-\left(\frac{a}{h}\right)^2\right)}}\right) \quad \text{EQ. II. 1}$$

Avec les valeurs numériques suivantes : a = 1, b = 2 et h = 1.5 m.

Nous allons supposer que l'éclairement global provenant du vitrage et arrivant sur le point P est de 1000 lx. La partie diffuse parvenant au point P est alors égale à :

$E_{\text{diffus,vitrage,P,Theorique}} = 0.2254 \times 1000 = 225.47$  lx. L'éclairement reçu en P est donc de 225.47 lx.

#### II.2.3.2.2. DESCRIPTION ET COMPARAISON

Nous avons reproduit le cas cité auparavant sous CODYRUN. Le plan utile est à la même hauteur que l'allège du vitrage. Notre point P aura pour coordonnées dans l'espace P (2, 1.50, 1). CODYRUN fournit la valeur de la composante diffuse interne (provenant de toutes les surfaces des parois internes comme égale à 0.23 partout sur le plan utile. Sachant que la valeur théorique d'éclairement provenant de la surface du vitrage est de 1000 lx, on obtient alors :  $E_{\text{diffus,vitrage,P,CODYRUN}} = 0.23 \times 1000 = 230$  lx.

Dans ce cas test, nous obtenons une erreur relative entre la simulation sous CODYRUN et la valeur théorique basée sur le facteur de forme égale à 2 %. Cependant, en fonction de la position du point, le facteur de forme change, alors qu'au niveau du modèle de calcul de la composante réfléchie interne du FLJ tel que intégré à CODYRUN cette valeur reste la même valeur partout.

#### II.2.3.3. La référence (II.14.9) de Maamari

Ce cas test traite de la capacité à simuler le gisement lumineux solaire (ou éclairement lumineux extérieur). Le chapitre I nous a montré que CODYRUN pouvait simuler cette variable par le biais de l'efficacité lumineuse définie expérimentalement lorsque les données d'irradiation solaire sont connues. L'étude que nous allons mener est un complément du chapitre I (Constante d'efficacité lumineuse à la Réunion)

##### II.2.3.3.1. DESCRIPTION DU CAS TEST DE REFERENCE (II.14.9)

Pour cette étude, deux cas de figure de références se présentent :

- Dans un premier temps nous ferons une étude comparative entre les simulations du logiciel et d'autres résultats provenant d'autres modèles (SkyFit21.xls par exemple);
- Dans un deuxième temps nous procéderons à une étude avec référence expérimentale. Il s'agit de mesures menées le 13/02/08 à l'IUT de Saint – Pierre.

S'agissant de la référence comparative, nous avons choisi et simulé une journée avec un pas de temps horaire (il s'agit du 1<sup>er</sup> janvier 1990, à la Réunion) à partir du générateur de climat dont dispose le laboratoire [David, 2005] et qui nous donne un fichier d'extension MTO. Il faut rappeler que les fichiers MTO ne disposent pas d'informations sur le gisement lumineux, mais que CODYRUN est en mesure de simuler ce gisement à partir seulement de données d'irradiation contenues dans ces types de fichiers. Nous avons donc généré le gisement lumineux sous CODYRUN à partir du fichier météorologique MTO qui provient lui-même d'une simulation.

Cela a permis d'obtenir les valeurs des éclairagements lumineux globaux extérieurs simulés par le logiciel. Afin de pouvoir faire une étude comparative, nous avons également simulé, en parallèle et sous les mêmes conditions, les deux journées (simulée le 1<sup>er</sup> Janvier 1990 et mesurée le 13/02/08) décrites auparavant, dans un programme développé par un laboratoire de recherche en Californie et dénommé "SkyFit21" ([www.h-m-g](http://www.h-m-g.com)). Ce programme simule l'éclairage global lumineux à partir des données d'entrées suivantes : latitude, longitude, heure en temps solaire vrai, mois, jour, et type de ciel.

Nous avons par ailleurs simulé ces conditions en utilisant la formule empirique de Tregenza [Tregenza, 1986] donnée par la relation suivante :

$$E = \begin{cases} 0,0105 \times (H_s + 5)^{2,5}; & \text{Si } -5^\circ < H_s \leq 5^\circ \\ 48,8 \times (\sin H_s)^{1,105}; & \text{Si } 5^\circ < H_s \leq 60^\circ \end{cases} \quad \text{EQ. II. 2}$$

Avec  $H_z$  (hauteur du soleil en degrés) et E (éclairage lumineux global en klx).

Pour ce qui est de l'étude expérimentale, nous avons travaillé sur un fichier d'extension MTX (éclairage global mesuré au pas de temps horaire le 13/02/08). Nous disposons également d'un fichier MTO pour la même journée. Nous ferons donc la comparaison entre ces deux fichiers. Pour la même journée, nous verrons également ce que donnent SkyFit21.xls et le modèle de Tregenza comme résultats de simulation.

#### II.2.3.3.2. COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION ET LES VALEURS DE REFERENCE

Dans le cas des références simulées, nous avons obtenu la Figure II.4 . On constate aisément que les modèles ne concordent pas. En effet, les résultats de simulation des modèles de Tregenza et SkyFit (couvert et intermédiaire) suivent une allure parabolique parfaite (avec des amplitudes différentes dues en partie aux modèles utilisés par rapport aux types de ciel) alors que CODYRUN tient compte vraiment du régime dynamique du lieu en donnant une allure parabolique moins parfaite (fluctuation importante entre 11h et 15h par exemple).

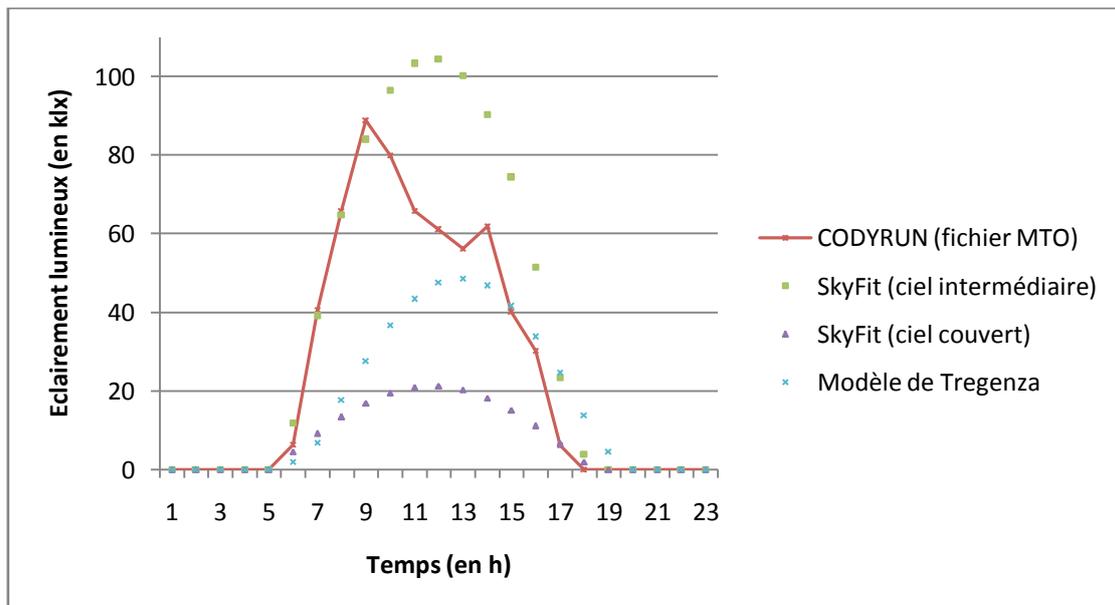


FIGURE II.4. COMPARAISON SUR LES MODELES D'ECLAIREMENT GLOBAL AVEC REFERENCE SIMULEE

Par contre, en utilisant des données de références expérimentales de la Réunion (Figure II.5), les résultats de simulation nous montrent que le modèle d'efficacité lumineuse mis en place simule assez bien le gisement lumineux solaire de la zone par rapport aux autres modèles.

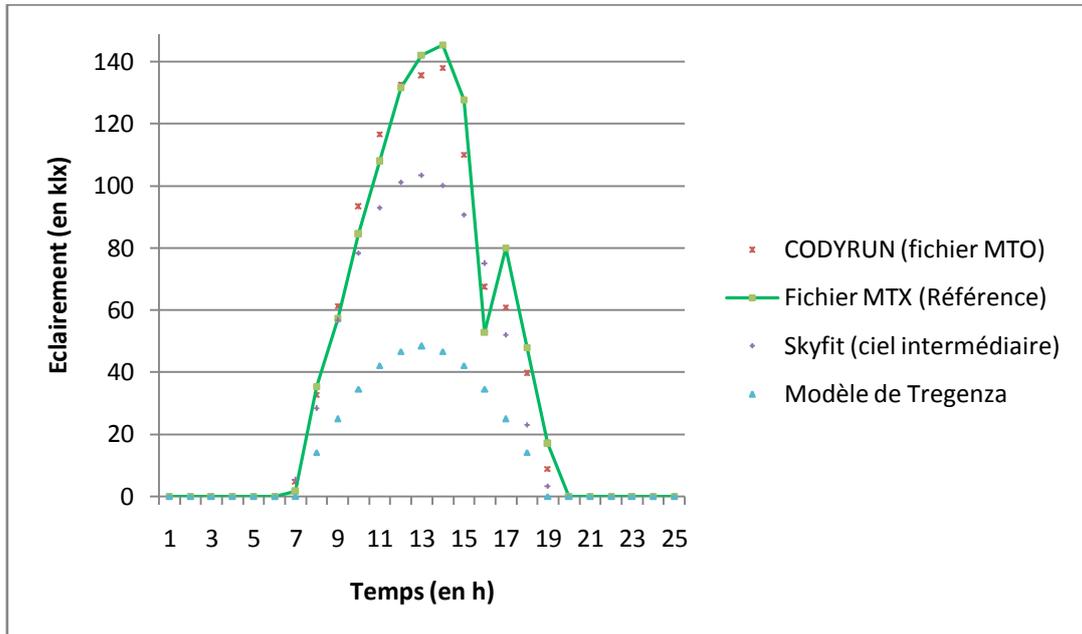


FIGURE II.5. COMPARAISON A LA MESURE DES MODELES D'ECLAIREMENT GLOBAL A LA REUNION

CODYRUN prend mieux en compte les phénomènes aléatoires (fluctuations importantes des nuages, changement brusque de l'environnement climatique à des instants données, etc.) de la journée alors que les autres modèles donnent plutôt une allure empirique idéale de cette même journée

#### II.2.3.3. INTERPRETATIONS ET CONCLUSIONS DU CAS TEST (II.1.4.9)

Les modèles empiriques ont du mal à caractériser le gisement lumineux en général et à la Réunion en particulier. Ceci est dû au fait que ce sont des modèles qui ne tiennent pas compte des paramètres aléatoires du climat (variation brusque de la couverture nuageuse, etc.). La seule façon efficace de reconstituer le gisement lumineux solaire est d'utiliser des modèles d'efficacité lumineuse spécifiques à chaque région. Dans notre cas, nous avons déterminé dans le chapitre I ces constantes d'efficacité lumineuse à la Réunion. Étant donné que nous avons utilisé des bases de données locales, il est évident que notre modèle prédit mieux le gisement lumineux solaire par rapport aux autres modèles empiriques. En conclusion, nous pouvons avancer que CODYRUN simule relativement bien l'éclairage extérieur à la Réunion. La fiabilité du logiciel à simuler le gisement lumineux solaire local est de 84 % pour ce cas test.

#### II.2.4. Cas tests avec références analytiques pour la lumière artificielle

Cette partie a pour objet de tester l'éclairage artificiel en appliquant les cas de références analytiques (II.1), (II.2), (II.7) de Maamari sur CODYRUN. Nous rajouterons également un cas supplémentaire d'étude à plusieurs luminaires pour vérifier la fiabilité du logiciel.

**II.2.4.1. La référence (II.1) de Maamari**

L'objectif du cas test proposé est de tester la capacité d'un logiciel à faire une interpolation correcte dans le cas d'une photométrie lisse et de calculer les éclairagements directs qui en résultent. Un luminaire de source ponctuelle ayant une photométrie théorique et simplifiée sera utilisé.

**II.2.4.1.1. DESCRIPTION DU CAS TEST**

La géométrie utilisée est une surface  $A = 16 \text{ m}^2$  horizontale de dimension  $(4\text{m} \times 4\text{m})$  avec une source lumineuse ponctuelle à 3 m de la hauteur au-dessus du centre de la surface. La source lumineuse est supposée posséder une photométrie diffuse Lambertienne. L'intensité maximale  $I_0$  est de 1000 Cd (pour  $\theta = 0^\circ$ ). Le flux total émis  $\Phi$  par la source est égal à 3142 lm ( $\Phi = \pi \times I_0$ )

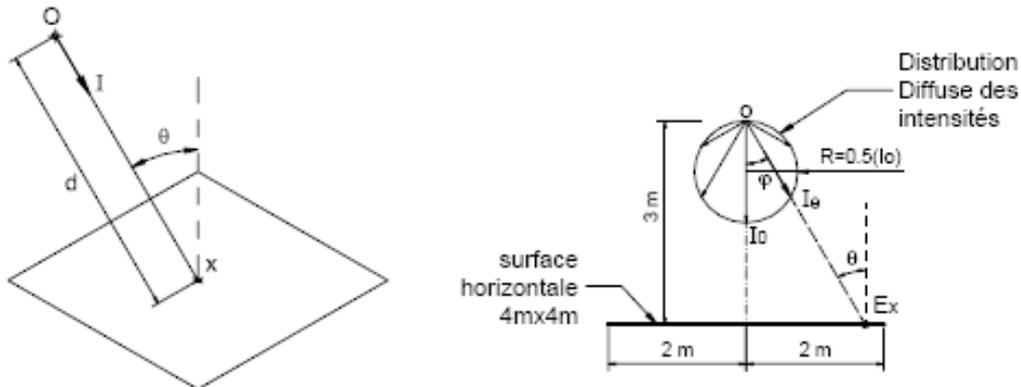


FIGURE II.6. CALCUL DE L'ECLAIREMENT DIRECT SOUS UNE SOURCE PONCTUELLE [MAAMARI, 2004]

Les valeurs d'éclairage sont calculées selon les positions (A à J) décrites sur le schéma qui suit :

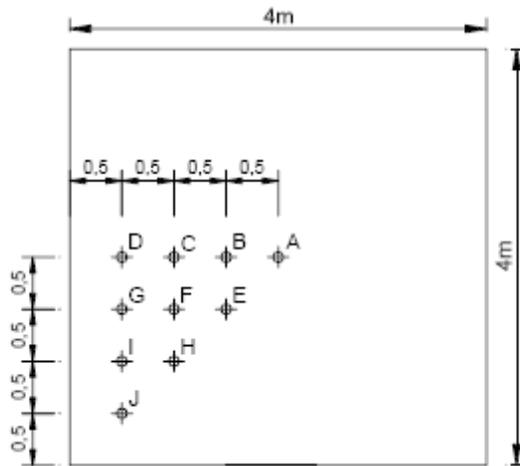


FIGURE II.7. EMPLACEMENT DES POINTS DE REFERENCE POUR LE CAS TEST DES SOURCES PONCTUELLES

**II.2.4.1.2. HYPOTHESES DE SIMULATIONS SOUS CODYRUN**

Etant donné que nous allons simuler l'éclairage artificiel direct, nous ne nous sommes pas intéressés aux valeurs des coefficients de réflexion des parois. Le bâtiment (test) monozone avec source artificielle est décrit dans CODYRUN. Une grille surfacique au niveau du sol a été considérée avec des mailles de 0.1 m.

II.2.4.1.3. COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION ET LES SOLUTIONS DE REFERENCE

Le

Tableau II.6-dessous résume les différentes valeurs obtenues ainsi que les erreurs relatives commises :

Points	d (m)	$\theta$ (°)	I (Cd)	Valeur analytique (en lx)	CODYRUN (en lx)	Erreur (%)
A	3	0	1000	111.11	111	0.1
B	3.041	9.46	986	105.21	105	0.2
C	3.162	18.43	949	90.02	90	0.1
D	3.354	26.57	894	71.11	71	0.2
E	3.082	13.26	973	99.73	100	-0.3
F	3.202	20.44	937	85.64	86	-0,4
G	3.391	27.79	885	68.06	68	0.1
H	3.317	25.24	905	74.36	74	0.5
I	3.5	31	857	59.98	60	-0.1
J	3.674	35.26	817	49.39	49	0.8

TABLEAU II.6. COMPARAISON VALEUR ANALYTIQUE ET CODYRUN (1 LUMINAIRE)

La comparaison entre la simulation et les valeurs de référence est donnée dans la Figure II.8 et les erreurs relatives associées sont fournies par le graphe (Figure II.9).

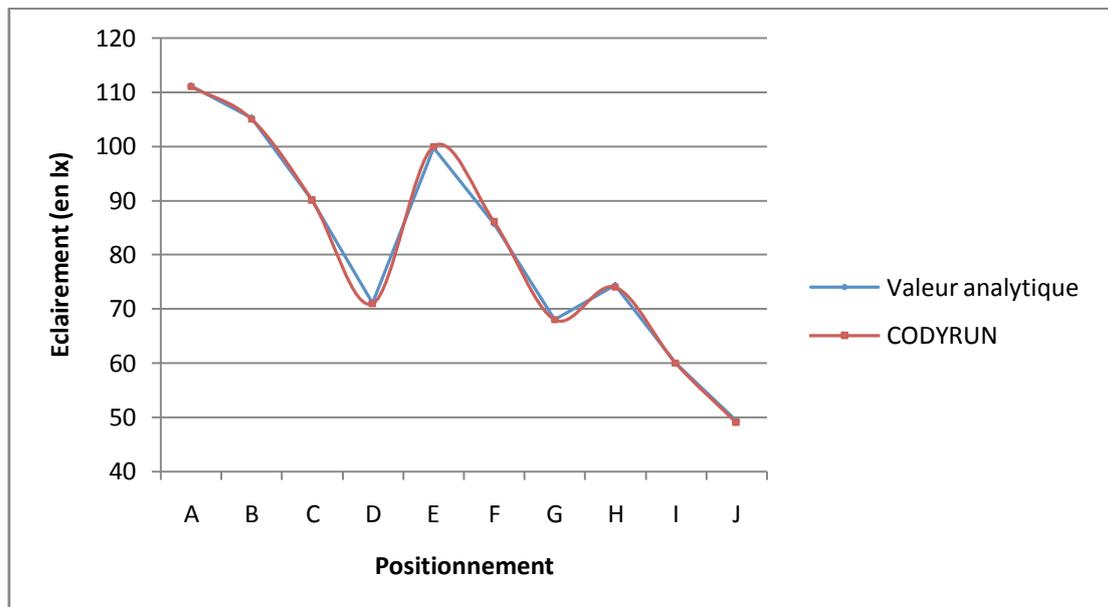


FIGURE II.8. COURBE DE COMPARAISON : TEST (II.1) DE MAAMARI / CODYRUN (1 LUMINAIRE)

Les erreurs commises sont en grande partie dues au fait que CODYRUN donne des valeurs absolues (sans virgule) alors que les valeurs analytiques de référence sont approchées à deux chiffres après la virgule. La raison qui nous a poussé à considérer des résultats de simulations, du logiciel, en valeurs absolues (aux lieux d'avoir des valeurs approchées) est que lors de la programmation, nous avons préféré acquérir beaucoup plus d'espace mémoire (au niveau des octets et des bits) en privilégiant un affichage non arrondi de type entier naturel (integer) de ces résultats à la place des variables de type flottantes (arrondies ou réelle ou encore float). Nous gagnons ainsi en temps de calculs.

Dans l'ensemble, nous concluons que les résultats de simulation sont en parfaite cohérence avec ceux analytiques. Les erreurs commises ne dépassent pas 1%.

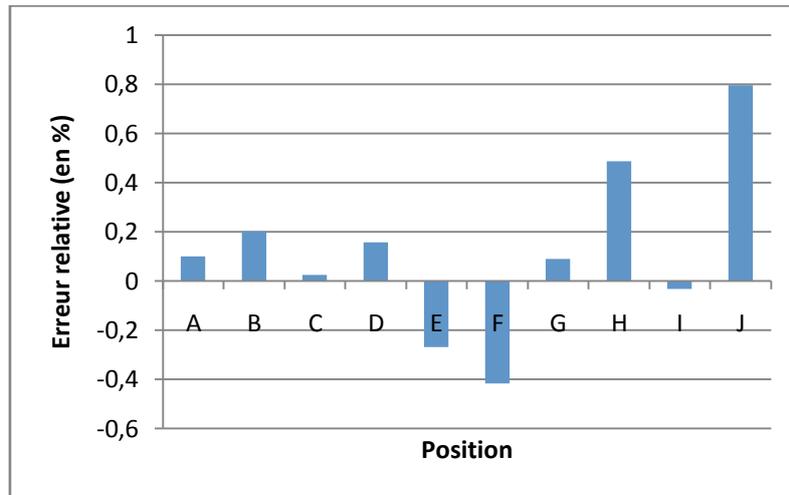


FIGURE II.9. ERREUR RELATIVE : TEST DE REFERENCE (II.1) ET SIMULATION SOUS CODYRUN (1 LUMINAIRE)

### II.2.4.2. La référence (II.2) de Maamari

Ce cas test est similaire aux cas tests énoncés au paragraphe (II.2.4.1). La seule différence est que la source ponctuelle est remplacée par une source surfacique (luminaire de forme rectangulaire par exemple).

#### II.2.4.2.1. DESCRIPTION DU CAS TEST

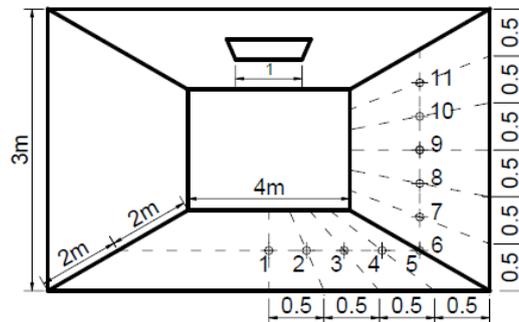


FIGURE II.10. DESCRIPTION GEOMETRIQUE ET POINTS DE REFERENCE : CAS D'UNE SOURCE SURFACIQUE

Nous avons un local de 4mx4mx3m de dimension, avec un luminaire de surface 1mx1m situé au centre du plafond. Nous ne traiterons que du cas au sol. Le Tableau ci-dessous résume les valeurs de référence du test.

Positionnement (N°)	1	2	3	4	5
Eclairement (en lx)	34.11	32.41	27.99	22.36	16.91

TABLEAU II.7. DONNEES DE REFERENCE POUR L'ETUDE DE LA SOURCE LUMINEUSE SURFACIQUE (LUMINAIRE)

II.2.4.2.2. HYPOTHESE DE SIMULATION SOUS CODYRUN ET COMPARAISON

Nous ne simulerons que l'éclairage au sol (hauteur du plan utile nul par rapport au sol). Les nœuds de notre grille sont équidistants de 0.25 m. L'intensité du luminaire est égale à 318.31 Cd.

Les graphes Figure II.11 et Figure II.12 nous donnent respectivement les courbes des valeurs de référence et de la simulation sous CODYRUN d'une part, puis les erreurs relatives d'autre part.

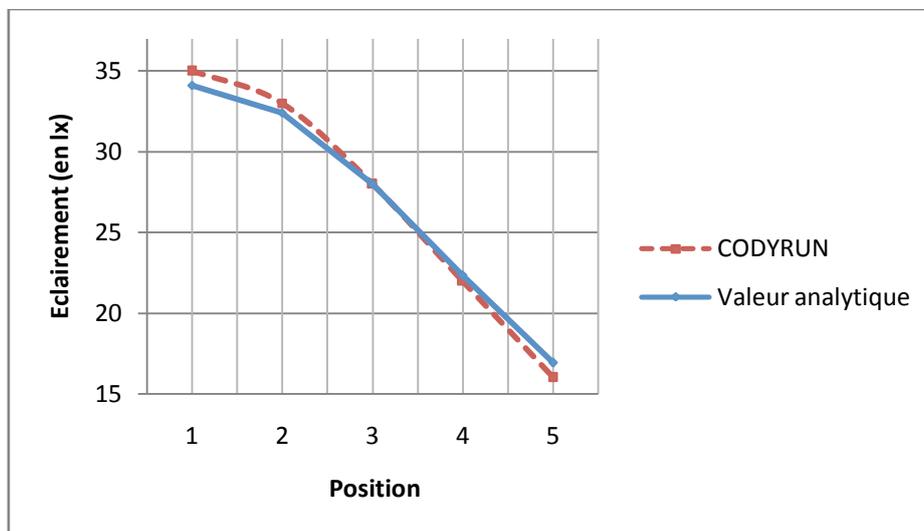


FIGURE II.11. COMPARAISON VALEUR DE REFERENCE/ SIMULATION POUR UNE SOURCE SURFACIQUE (LUMINAIRE)

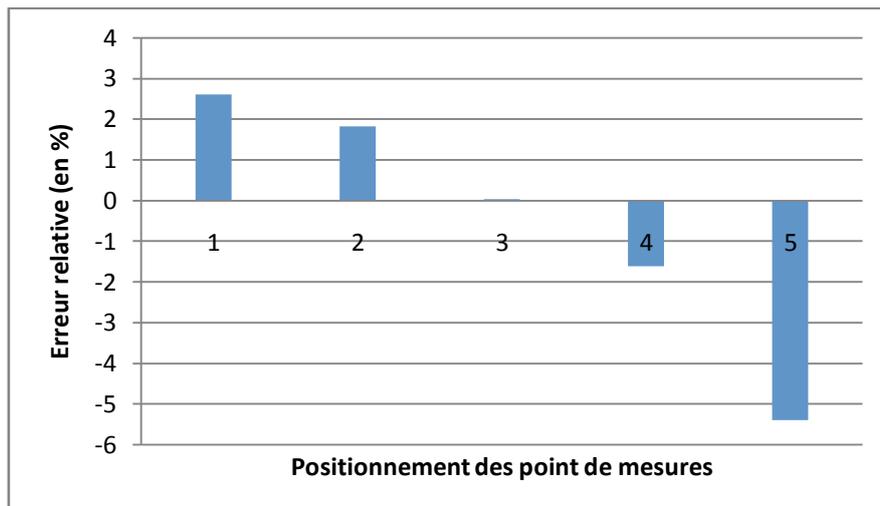


FIGURE II.12. ERREUR RELATIVE SUR LE CAS TEST AVEC SOURCE SURFACIQUE (LUMINAIRE)

Les erreurs les plus importantes sont rencontrées sur les points de référence les plus éloignés de la source. Le fait d'avoir assimilé notre source surfacique à une source ponctuelle, représentée sous CODYRUN par son centre de gravité, explique sûrement ces erreurs. Toutefois, les erreurs ne dépassent pas 6 % et le logiciel obtient une fiabilité de 86 %.

### II.2.4.3. Calcul du diffus artificiel (référence (II.7) de Maamari)

Le cas que nous allons aborder teste la fiabilité d'un logiciel à simuler la composante réfléchie interne pour une géométrie avec surface de Lambert. La géométrie utilisée pour ce cas test est celle d'une pièce cubique de dimension 4m x 4m x 4m avec une surface totale des parois internes  $S_T$  de 96 m<sup>2</sup>. Ces dernières sont parfaitement diffusantes et spectralement neutres. Une source lumineuse ponctuelle est située au centre de la pièce avec un flux lumineux de 10000 lm. Le facteur de réflexion  $\rho$  des surfaces intérieures varie de 0 à 1.

La variation de l'éclairage indirect moyen à l'intérieur de la pièce, calculé analytiquement à l'aide de la relation (EQ .II.1), est présentée dans le tableau suivant :

$\rho$	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	1
$E_{\text{moy}} \text{ (lx)}$	0	5.48	11.6	26	44.6	69.4	104	156	243	417	937	1979	

TABLEAU II.8. REFERENCE POUR LE CALCUL DU DIFFUS ARTIFICIEL (REFERENCE II.7 DE MAAMARI).

Les conditions de simulation sont les mêmes que pour le cas du paragraphe (II.2.4.2.2). Nous prendrons une valeur de luminosité, du luminaire, égale à 10000 Cd.m<sup>-2</sup>. Les graphes suivants (Figure II.13 et Figure II.14) donnent respectivement les courbes de comparaison entre les valeurs simulées et les valeurs de référence d'une part, puis les erreurs relatives commises d'autre part.

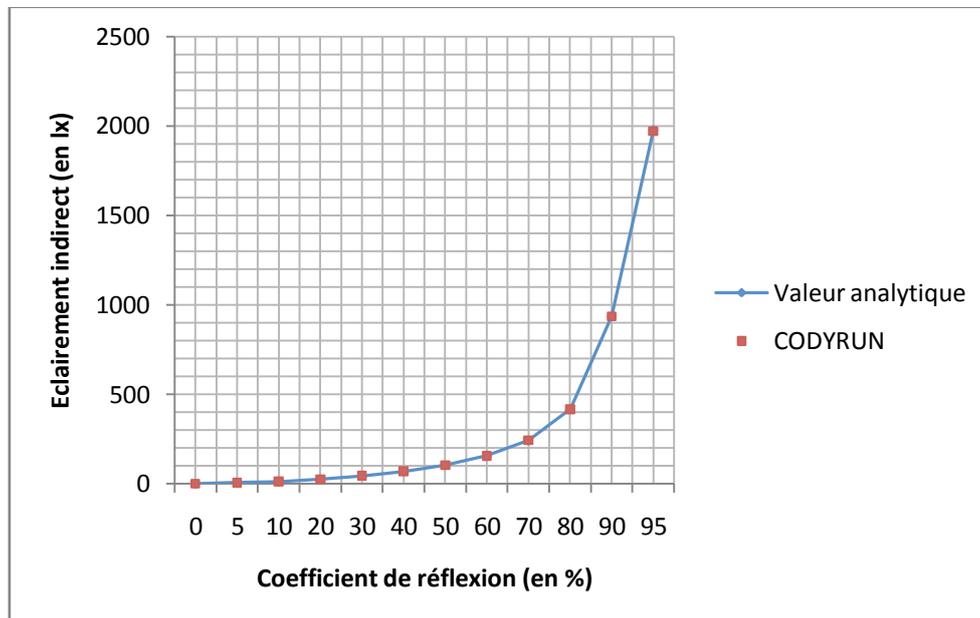


FIGURE II.13. COMPARAISON SUR LE CAS TEST AVEC CALCUL DU DIFFUS DE L'ECLAIRAGE ARTIFICIEL

L'erreur rencontrée ne dépasse pas 0.5 %. L'éclairage artificiel est très bien pris en compte dans ce scénario. La fiabilité du logiciel est de l'ordre de 95 % pour ce cas test. L'explication plausible

d'une telle précision vient sûrement du fait que le modèle diffus intégré dans CODYRUN admet la même hypothèse que celle du test de l'auteur à savoir des surfaces Lambertiennes.

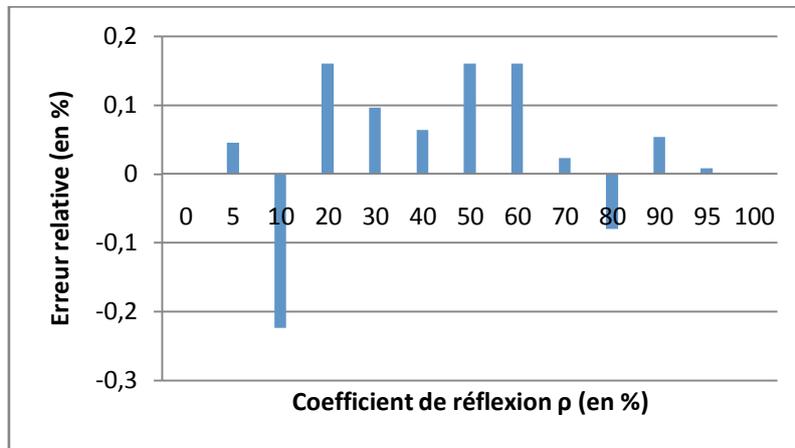


FIGURE II.14. ERREUR RELATIVE DU CAS TEST DE L'ECLAIRAGE DIFFUS ARTIFICIEL

#### II.2.4.4. Tests supplémentaires

Cette partie est consacrée aux tests complémentaires pour les éléments de validation de l'éclairage sous CODYRUN. Il s'agit d'un test sur plusieurs luminaires, puis sur du diffus provenant de la tache solaire et enfin sur la visualisation 2D du direct lié au second jour.

##### II.2.4.4.1. ETUDE DE CAS A PLUSIEURS LUMINAIRES

N'ayant pas trouvé de cas tests de sources lumineuses avec plusieurs luminaires, nous avons conçu des cas analytiques afin de faire les tests.

##### II.2.4.4.1.1. Description du cas test

Reconsidérons le même cas que dans le paragraphe (II.2.4.1), à la différence près qu'au lieu d'une source centrée au milieu du local nous allons imaginer 4 sources artificielles de même intensité (1000 Cd), réparties aux quatre coins du plafond (Figure II.15).

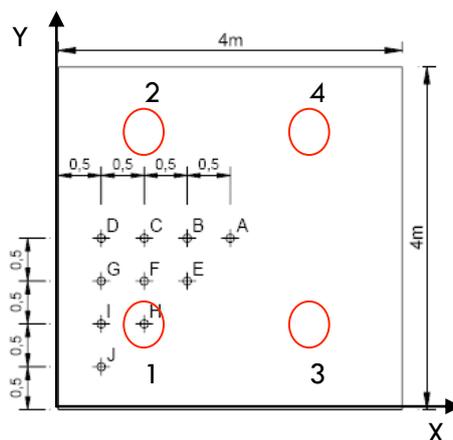


FIGURE II.15. CAS TEST ANALYTIQUE D'ECLAIRAGE ARTIFICIEL (PLUSIEURS LUMINAIRES)

##### II.2.4.4.1.2. Hypothèses de simulations sous CODYRUN et comparaison

Nous conservons les mêmes hypothèses que dans le paragraphe (II.2.4.1.2). Les coordonnées des 4 lampes sont respectivement 1 (1, 1, 3), 2 (1, 3, 3), 3 (3, 1, 3) et 4 (3, 3, 3). Nous avons recalculé analytiquement les valeurs obtenues aux points A, B,...et J pour cette fois-ci 4 luminaires (au lieu d'un seul). Les résultats des simulations sont donnés par la Figure II.16 .

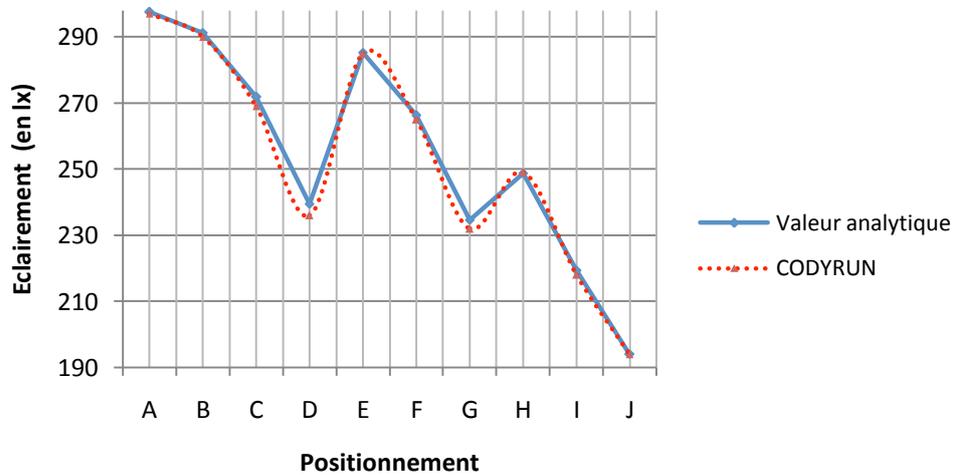


FIGURE II.16. SIMULATION (4 LUMINAIRES)

Les erreurs relatives sont données par la figure suivante :

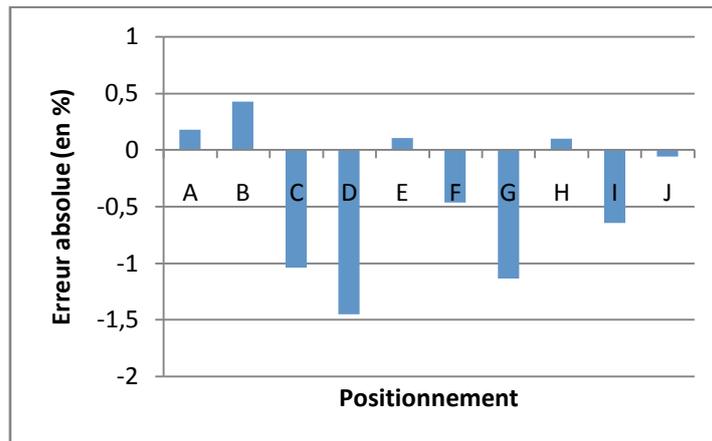


FIGURE II.17. ERREUR RELATIVES : TEST AVEC PLUSIEURS LUMINAIRES

On constate une accumulation des erreurs. En effet, plus le nombre de luminaires augmente plus nous avons des erreurs de simulation qui sont élevées. Ces erreurs sont d'autant plus élevées lorsque le point de référence se situe pour la plupart à équidistance entre les luminaires. Le cas des résultats de simulation avec plusieurs luminaires sous CODYRUN est donc à prendre avec prudence et retenue.

### II.2.4.4.1.3. Interprétations et conclusions pour 4 luminaires

Nous voyons ici que les résultats de simulation concordent bien avec ceux des calculs analytiques d'éclairage direct. Le fait que nous obtenons des erreurs maximales allant jusqu'à 1.45 % s'explique par le cumul d'erreurs de chaque source lumineuse lors de la simulation.

II.2.4.4.2. CALCUL DU DIFFUS PROVENANT DE LA TACHE SOLAIRE

L'objectif de ce test est de vérifier dans CODYRUN les calculs de l'éclairage diffus provenant d'une tache solaire sur un plan utile. Soit une tache solaire de surface  $S_{TS}$  sur un plan utile de surface  $S_G$ . Une partie de l'éclairage direct incident sur cette tache sera réfléchi de façon diffuse à l'intérieur du local, et donc reçue sur le plan utile.

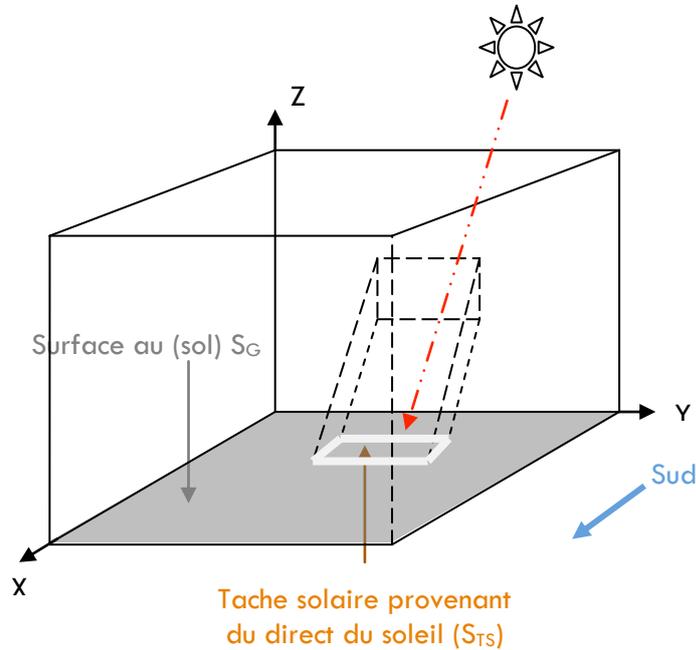


FIGURE II.18. LA TACHE SOLAIRE POUR LE CALCUL DU DIFFUS

Le bâtiment utilisé est un monozone avec une ouverture en façade située sur la paroi nord (cas 1) ou deux ouvertures sur la même paroi (cas 2). Les nœuds du maillage de la grille sont équidistants de 0.1 m. Nous avons établi des calculs analytiques qui nous donnent le nombre de points éclairés ainsi que l'éclairage direct sur la tache solaire. Nous avons ensuite effectué une comparaison avec ceux donnés par CODYRUN. Les deux cas de références analytiques liées à ce type de bâtiment sont donnés par :

Dans le cas 1 :

L'éclairage direct reçu au niveau de la tache solaire est de 55165 lx. La surface au sol ( $S_G$ ) est de 16 m<sup>2</sup> et 116 points sont éclairés sur notre grille surfacique. Ce qui revient à dire que nous avons la tache solaire qui a une surface de  $S_{TS} = 116 \times 0.1 \times 0.1 = 1.16$  m<sup>2</sup>. Le coefficient de réflexion du sol est de 0.6. Si l'on applique le principe du facteur de forme simplifié (rapport des surfaces utilisées en thermique) défini dans le chapitre I, nous obtiendrons que la valeur du diffus provenant de cette tache et répartie uniformément en tout point éclairé du maillage de notre plan utile (y compris la surface de la tache elle-même) sera donnée par:

$$E_{P,Dif-TS} = 55165 \times \left(\frac{1.16}{16}\right) \times 0.6 = 2399.67 \text{ lx} \quad \text{EQ. II. 3}$$

Dans le cas 2 :

L'éclairement direct reçu sur la tache solaire est de 55165 lx. On a une surface au sol ( $S_G$ ) de 16 m<sup>2</sup> et 165 nœuds éclairés (deux taches solaires que nous sommes : l'une de 110 et l'autre de 55 nœuds éclairés). Ce qui revient à dire que nous avons la tache solaire qui a une surface de  $S_{TS} = 165 \times 0.1 \times 0.1 = 1.65$  m<sup>2</sup>. Le coefficient de réflexion au sol est de 80%. Le même principe de calculs, que dans le cas 1, nous donne :

$$E_{P,Dif-TS} = 55165 \times \left(\frac{1.65}{16}\right) \times 0.8 = 4551.11 \text{ lx} \quad \text{EQ .II. 4}$$

Les résultats obtenus dans CODYRUN concordent parfaitement (erreur ne dépassant pas 0.01%) avec les calculs analytiques et ceci pour une ou deux ouvertures.

Nous avons reconstitué ces deux cas tests sous CODYRUN et les résultats de simulations obtenus concordent parfaitement (erreur ne dépassant pas 0.01%) avec les calculs analytiques et ceci pour une ou deux ouvertures.

Les caractéristiques géométriques sont les suivantes :

	Dimensions (en m)						Coefficients intérieur (en %)								
	Local			Vitrage			Réflexion			Transmission			Absorption		
	Largeur	Profondeur	Hauteur	Hauteur	Largeur	Mur	Plafond	Sol	Mur	Plafond	Sol	Mur	Plafond	Sol	
Cas 1	4	4	3	1	1	70	70	60	0	0	0	30	30	40	
Case 2	4	4	3	1	1	70	70	80	0	0	0	30	30	20	

TABLEAU II.9. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DU TEST ANALYTIQUE POUR LA TACHE SOLAIRE

Le tableau qui suit résume les différents résultats obtenus et fait une comparaison avec les résultats obtenus dans CODYRUN. Nous sommerons ainsi la valeur moyenne du diffus provenant de cette tâche solaire avec celle calculée à partir du FLJ, pour tous les points situés à l'extérieur de la tâche du plan utile.

	Résultats simulations			Calculs analytiques		
	Hauteur plan utile (en m)	Direct reçu sur la tache solaire (lx)	Diffus provenant de la tache solaire (lx)	Direct reçu sur la tache solaire (lx)	Diffus provenant de la tache solaire (lx)	Erreur relative (%)
Cas 1	0.2	55165	2400	55165	2399.6	0.013
Cas 2	0.1	55165	4551	55165	4551.1	2.4x10 <sup>-5</sup>

TABLEAU II.10. COMPARAISON TEST ANALYTIQUE / CALCUL NUMERIQUE DE LA TACHE SOLAIRE

II.2.4.4.3. VISUALISATION 2D DE LA TACHE SOLAIRE ET DU DIRECT DU SECOND JOUR  
Plusieurs cas tests ont été réalisés (monozone, bizona, une ouverture, plusieurs ouvertures, etc.) avec succès. Nous présenterons ici les résultats d'un des cas parmi d'autres. C'est le cas d'un bizona avec 3 ouvertures (1 sur la paroi nord et 2 ouvertures sur la paroi interne de séparation). Le choix de ce cas test repose sur le fait qu'il est possible d'observer aussi bien le phénomène des taches solaires que de vérifier les aspects physiques liés à l'éclairage direct du soleil entrant par une ouverture de second jour.

Les dimensions du local sont 8x4x3 m. Une ouverture est située sur la paroi nord du local et les deux autres sur la paroi interne de séparation des deux zones. Les dimensions des ouvertures sont identiques pour les vitrages positionnés sur la paroi interne de séparation. Afin de s'assurer de la pénétration lumineuse du second jour, nous avons pris les dimensions de l'ouverture située sur la paroi nord égales aux dimensions de la paroi elle-même.

Notre bâtiment test a donc les caractéristiques suivantes :

- Nombre de zones : 02;
- Dimensions du bâtiment : Longueur = 8 m ; Largeur = 4 m et Hauteur = 3 m;
- Dimension des vitrages (ouvertures) situés sur la paroi interne : 1mx1m
- Dimension de la vitre située sur la paroi nord : 4mx3m

Pour notre simulation, nous prendrons l'épaisseur des parois (murs, sol et plafond) de 5 cm. L'épaisseur des vitrages sera de 6 mm. Au niveau du vitrage situé sur la paroi interne de séparation, notre allège est supposée à 1 m.

Nous considérerons la cote du plan utile à 0.2 m du sol. Afin de disposer de résultats détaillés, nous prendrons une grille surfacique de calcul ayant des nœuds équidistants de 0.2 m avec un décalage de part et d'autre de la grille, par rapport aux parois verticales (murs), nuls.

Pour cette étude, nous avons créé des fichiers météorologiques (MTO) spécifiques afin de pouvoir observer le comportement du code vis-à-vis de la position du soleil par rapport au bâtiment et à la position du vitrage. Ainsi, pour observer la tache solaire à l'intérieur du bâtiment, nous prendrons un azimuth du soleil constant et égal à 180° (nord). Pour simplifier les calculs, nous considérerons que chaque paroi est orientée selon le repère direct fixe de CODYRUN (aucun décalage d'angle azimuthal entre le repère fixe défini dans CODYRUN et les parois).

CODYRUN peut informer sur l'état (éclairé ou pas par le direct) des points de la grille se situant de part et d'autres des zones considérées (Figure II.19).

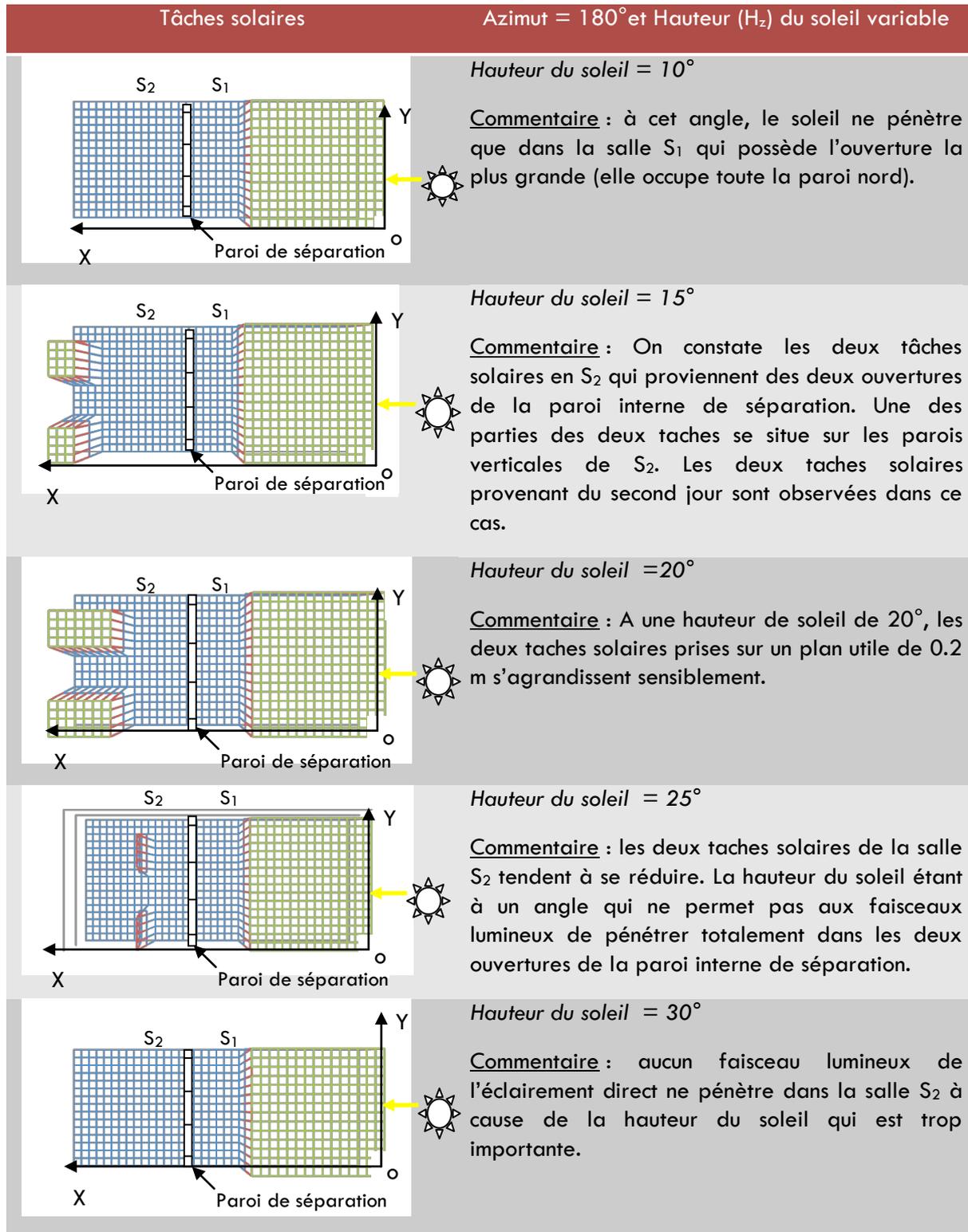


FIGURE II.19. DEPLACEMENT DES TACHES SOLAIRES DANS LE CAS DU SECOND JOUR

### II.2.5. Conclusion sur les cas tests analytiques

Afin de résumer les travaux dans ce paragraphe, nous allons dresser un tableau récapitulatif des moyennes d'erreurs commises par le logiciel lors des cas tests qui lui ont été appliqués. Le cas test où l'erreur a été la plus élevée est celui de l'étude du gisement solaire (référence (II.14.9)) donc de l'éclairage naturel extérieur. Ce qui est tout à fait normal. En effet, nous savons que le gisement solaire est beaucoup plus compliqué à prendre en compte du fait des caractéristiques aléatoires du climat ; ceci augmente les erreurs de simulation. Pour ce qui est des cas d'éclairage (artificiel et naturel) intérieur, nous voyons que les erreurs moyennes ponctuelles ne dépassent pas 4.5 % dans l'ensemble. D'un point de vue photométrique, ces erreurs sont acceptables vu la complexité du phénomène. En conclusion, nous dirons que les cas tests analytiques appliqués sous CODYRUN nous ont donné une idée sur 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.

	Référence Cas tests	Erreur moyenne(en %)
Eclairage Naturel	II.10	3.1
	II.11	4.5
	II.14.4	1.96
	II.14.9	15.61
Eclairage artificiel	II.1	0.25
	II.2	2.33
	II.7	1.39
	Complément	0.55
<b>Minimum =</b>		<b>0.25</b>
<b>Maximum =</b>		<b>15.6</b>
<b>Moyenne erreur =</b>		<b>3.71</b>

TABEAU II.11. ERREURS RELATIVES DE CODYRUN PAR RAPPORT AUX CAS TESTS ANALYTIQUES

Cependant, vu les erreurs que commet le logiciel par rapport aux valeurs de référence analytiques et sachant que beaucoup d'autres logiciels de ce type (développés dans d'autres laboratoires de recherche) existent, nous avons été amenés à nous poser la question suivante : où se situe CODYRUN d'un point de vue fiabilité par rapport à ces logiciels ?

Pour le savoir, nous devrions confronter le logiciel avec d'autres logiciels qui simulent l'éclairage intérieur. C'est l'objet du paragraphe suivant.

## II.3. Comparaison inter – logiciels (validation comparative)

### II.3.1. Logiciels utilisés

Maamari a mené des études de validation (analytique et expérimentale) sur le logiciel LIGHTSCAPE en éclairage artificiel et naturel. Dans la même période, des tests expérimentaux de fiabilité sur RADIANCE ont été menés. Nous avons utilisé ces cas tests pour CODYRUN. Il nous a donc paru logique de comparer les résultats obtenus par le logiciel CODYRUN avec ceux de LIGHTSCAPE et RADIANCE. Pour la comparaison inter-logiciels de la simulation de l'éclairage naturel, nous utiliserons le cas test de référence du CSTB [Wetter et al., 2004]. Le bâtiment test sera modélisé sous CODYRUN et les résultats de la simulation numérique obtenue seront comparés à ceux fournis par GENELUX, BuildOpt, RADIANCE et SUPERLITE. S'agissant de l'éclairage artificiel, nous utiliserons 2 logiciels (DIALUX et LIGHTSCAPE) et nous nous baserons sur l'étude de la Tâche TC3-33 du CIE [CIE, 2005].

### II.3.2. Simulation d'éclairage naturel avec la référence du CSTB

#### II.3.2.1. Maquette réduite du CSTB

Il s'agit d'une étude menée par Michael Wetter pour valider le logiciel BuildOpt [Wetter et al., 2004]. L'environnement de travail utilisé est celui de la maquette réduite (appelée ECAD) du CSTB décrite ci-dessous, présentant respectivement la vue en plan et celle en face (côté où se trouve l'ouverture) du bâtiment test.

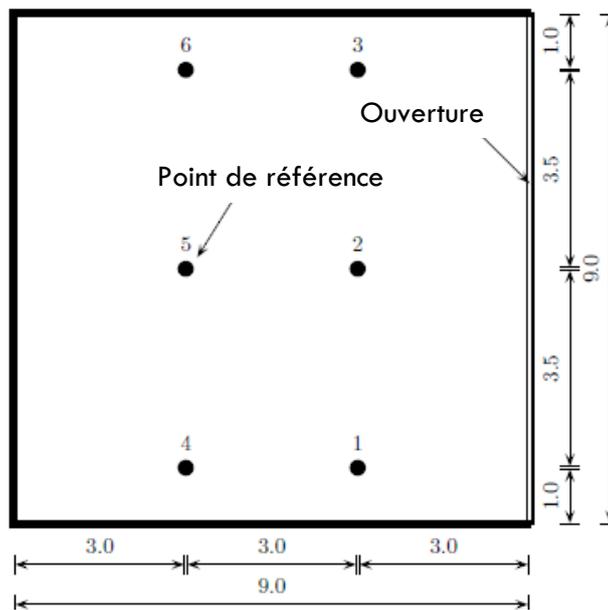


FIGURE II.20. BATIMENT TEST DU CSTB : VUE EN PERSPECTIVE DU BATIMENT

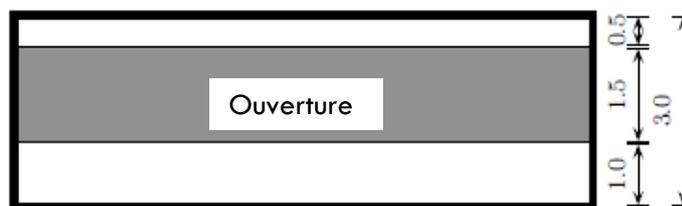


FIGURE II.21. BATIMENT TEST DU CSTB : VUE DE FACE COTE OUVERTURE

### II.3.2.2. Simulations de références

4 cas de figure ont été expérimentés sur cette maquette. Il s'agit des cas (a) et (b) (Tableau II.12) et des cas (c) et (d) (Tableau II.13)

		Cas (a)	Cas (b)
Coefficient de réflexion	Hauteur du plan utile (en m)	0	0,8
	Plafond	0	0
	Mur	0	0
	Sol	0	0
	Albédo	0	0

TABLEAU II.12. COEFFICIENT DE REFLEXION DES PAROIS: CAS (A) ET (B)

		Cas (c)	Cas (d)
Coefficient de réflexion	Hauteur du plan utile (en m)	0	0.8
	Plafond	0.70	0.70
	Mur	0.50	0.50
	Sol	0.30	0.30
	Albédo	0.30	0.30

TABLEAU II.13. COEFFICIENT DE REFLEXION DES PAROIS : CAS (C) ET (D)

### II.3.2.3. Hypothèse de simulations sous CODURUN

Le coefficient de transmission de la vitre est égal à 0.85. Le local est décalé de 0.05 m par rapport aux axes du repère. Les épaisseurs des parois (murs, plafond, sol ainsi que vitrages) sont toutes de 0.05 m. La grille surfacique constituant le plan utile aura des nœuds équidistants de 0.5m. La hauteur du plan utile sera de 0.05 m par rapport au sol pour le cas (a) et (c) ; puis de 0.85 m pour le cas (b) et (d). Deux formes de modèles analytiques ont été mise en place par le CSTB pour retrouver ces valeurs de FLJ. Il s'agit de la forme analytique de numéro 1 dans le cas (a) et 2 dans le cas (b).

### II.3.2.4. Résultats et comparaisons

L'ensemble des comparaisons porte sur le Facteur de Lumière du Jour. Les résultats du cas (a) sont donnés par la Figure II.22. L'erreur moyenne est de 5.2 % et la fiabilité de 69.3% (voir annexe B).

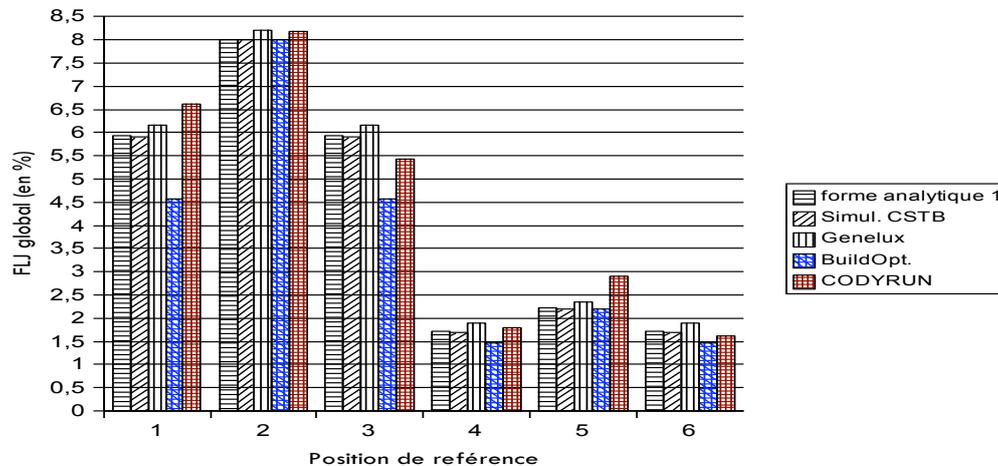


FIGURE II.22. .RESULTATS TEST DE CSTB : CAS (A)

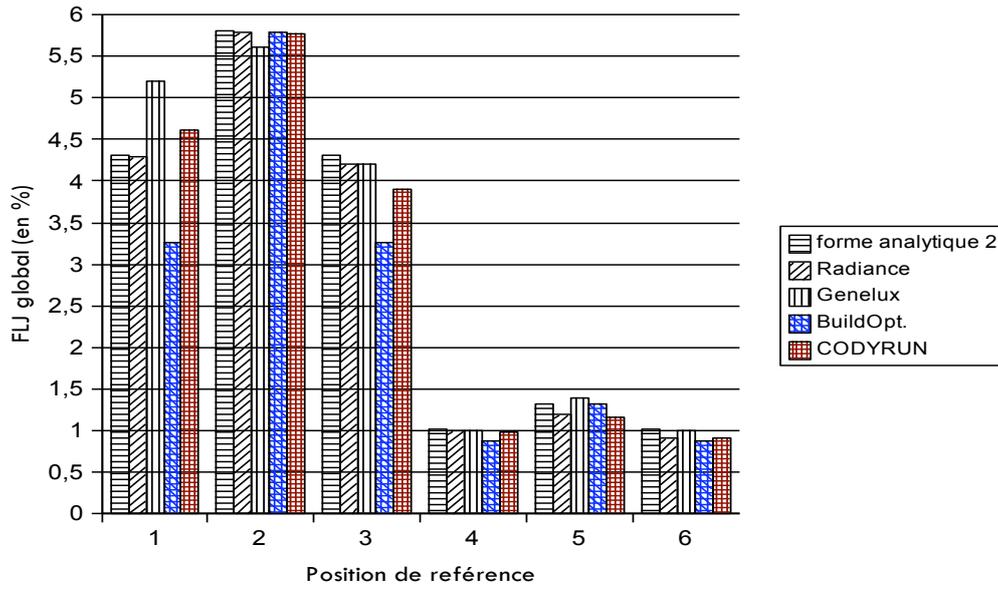


FIGURE II.23. RESULTATS DE SIMULATION DU TEST DE CSTB : CAS (B)

Le cas (c) est donné par la Figure II.24. Pour ce cas, la moyenne d'erreur est de 6.1 % et la fiabilité obtenue est de 63.4 %.

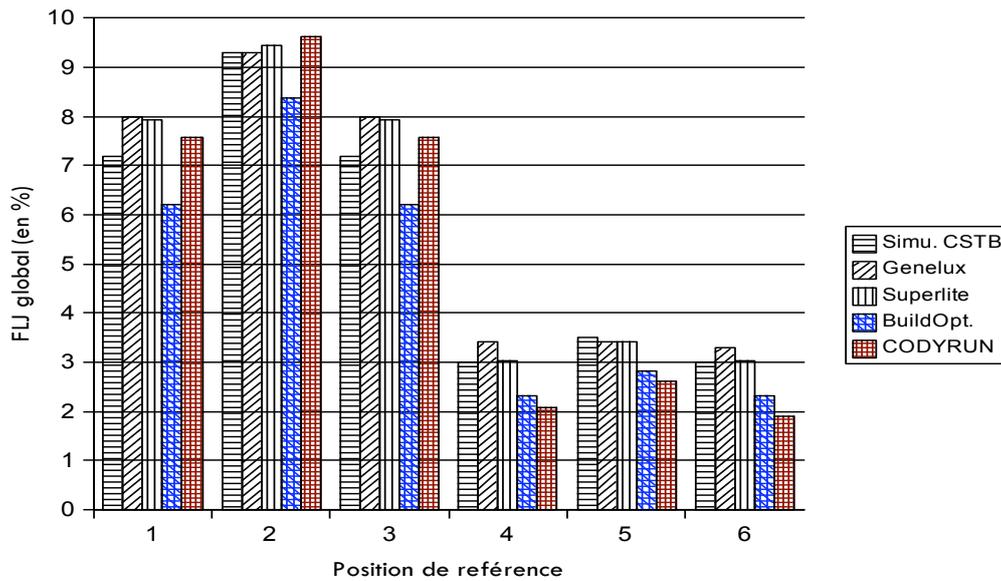


FIGURE II.24. RESULTATS DE SIMULATION DU TEST DE CSTB : CAS (C)

Et enfin, le cas (d) est donné par la Figure II.25 avec une moyenne d'erreurs de 8.4 % et une fiabilité de 49.6 %

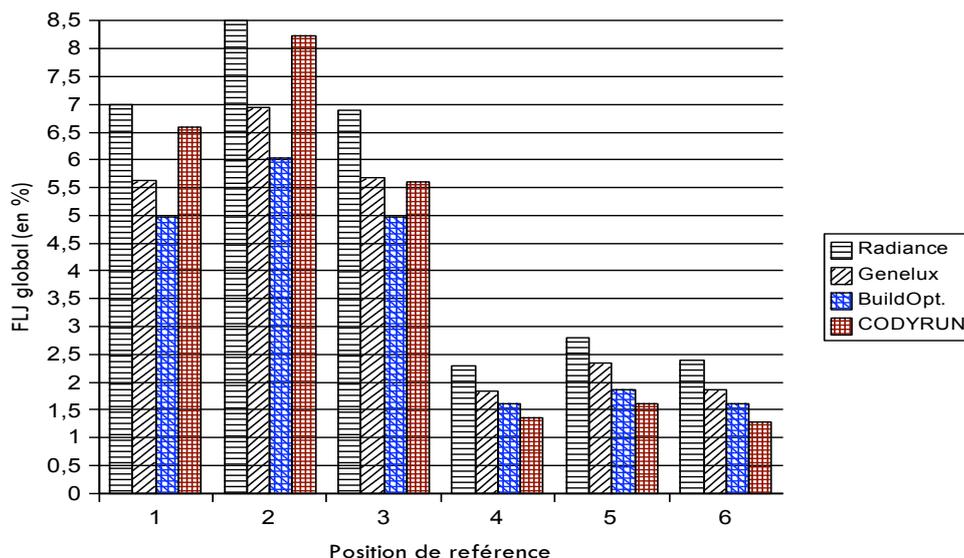


FIGURE II.25. RESULTATS DE SIMULATION DU TEST DE CSTB : CAS (D)

### II.3.2.5. Conclusions

5.9 % d'erreur moyenne sont obtenus par rapport aux valeurs de la forme analytique 1 et 2 proposées par le CSTB dans le cas (a) et (b). S'agissant toujours du cas (a), on a 4 positions sur 6 où les valeurs simulées par CODYRUN sont comprises entre les valeurs obtenues par les autres logiciels. Dans le cas (b) nous en avons 5/6. Les cas (c) et (d) ont respectivement 2/6 et 3/6. Concernant le cas (c), les résultats obtenus sont largement en dessous de la moyenne par rapport aux autres logiciels. Le coefficient multiplicateur FR (dépendant du type de cadre de notre vitrage) pourrait être à l'origine de nos erreurs. En effet, le CSTB ne nous donne pas vraiment des informations sur ce coefficient. Or, notre modèle a besoin de cette valeur pour pouvoir simuler le flux lumineux intérieur. Par définition, le coefficient FR est le coefficient d'ombrage du châssis qui constitue le vitrage. Ce coefficient est normalement multiplié par la somme des composantes direct, diffus interne et diffus externe pour donner le FLJ en un point. Durant nos travaux, nous avons supposé des valeurs de coefficients FR égales à 0.8 (fenêtre métallique). Une autre explication serait que nous n'avons pas pris en compte les erreurs dues à la simulation de chaque logiciel de comparaison et plus particulièrement celles causées par la grille surfacique de notre plan utile et la déclaration de notre bâtiment. En effet, un décalage de 0.05 m par rapport au point de référence exact, aussi bien horizontalement que verticalement, pourrait causer une erreur de simulation d'environ 1%. De plus, les valeurs arrondies des résultats de simulation peuvent aussi entraîner des erreurs.

Nous pouvons conclure que les résultats de simulation de CODYRUN restent compris dans la plage des valeurs fournies par les autres logiciels (RADIANCE, GENELUX, BuilOpt., SUPERLITE) ainsi que des formes analytiques proposées par le CSTB.

### II.3.3. Simulation de l'éclairage artificiel : DIALX 4.4, LIGHTSCAPE 3.2 et CODYRUN

Dans cette partie, nous allons confronter les deux logiciels de simulation (DIALUX 4.4 et LIGHTSCAPE 3.2) à CODYRUN. Le choix de sélection de nos logiciels de comparaison est effectué puis, après un rappel du test, nous présenterons les résultats de simulation obtenus et leur comparaison.

### II.3.3.1. Choix des logiciels de comparaison

Notre étude bibliographique, sur la comparaison inter-logiciels, nous a conduits à considérer deux logiciels de simulation pour l'éclairage artificiel. Il s'agit notamment de : DIALUX 4.4 et LIGHTSCAPE3.2.

La raison principale de ce choix est qu'ils ont passé avec succès les tests de la tâche TC3.33 du CIE [CIE, 2005]. En effet, s'agissant de LIGHTSCAPE, Maamari a appliqué tous les cas tests mis en place lors de ses travaux de thèse et servant de référence dans le rapport technique du CIE.

Pour ce qui est de DIALUX, plusieurs études de validation ont été menées, notamment par application de la tâche TC3.33 du CIE aussi bien en éclairage artificiel [DIAL, 2005] que naturel [Fakra et al., 2008]. Nous pouvons affirmer que les résultats obtenus, après les tests, sont acceptables. De plus, c'est un logiciel libre qui présente une interface conviviale et qui a été développé par de nombreux experts du monde entier (laboratoires de recherche, particuliers, bureaux d'études, etc.). Sa popularité s'accroît d'année en année et, grâce aux tests rigoureux de fiabilité qui lui sont appliqués, DIALUX devient une valeur sûre dans le domaine aussi bien pour le monde professionnel que pour la recherche.

Nous ne traiterons ici que le cas simple d'une source surfacique associée à un fichier photométrique défini auparavant dans le paragraphe (II.2.4.2) de la page 81 et qui correspond à la référence (II.2) de Maamari.

### II.3.3.2. Résultats des simulations

En reprenant les résultats de simulation de CODYRUN et de LIGHTSCAPE, puis en rajoutant la simulation sous DIALX du même cas test [Fakra, 2007], nous obtenons le graphe suivant :

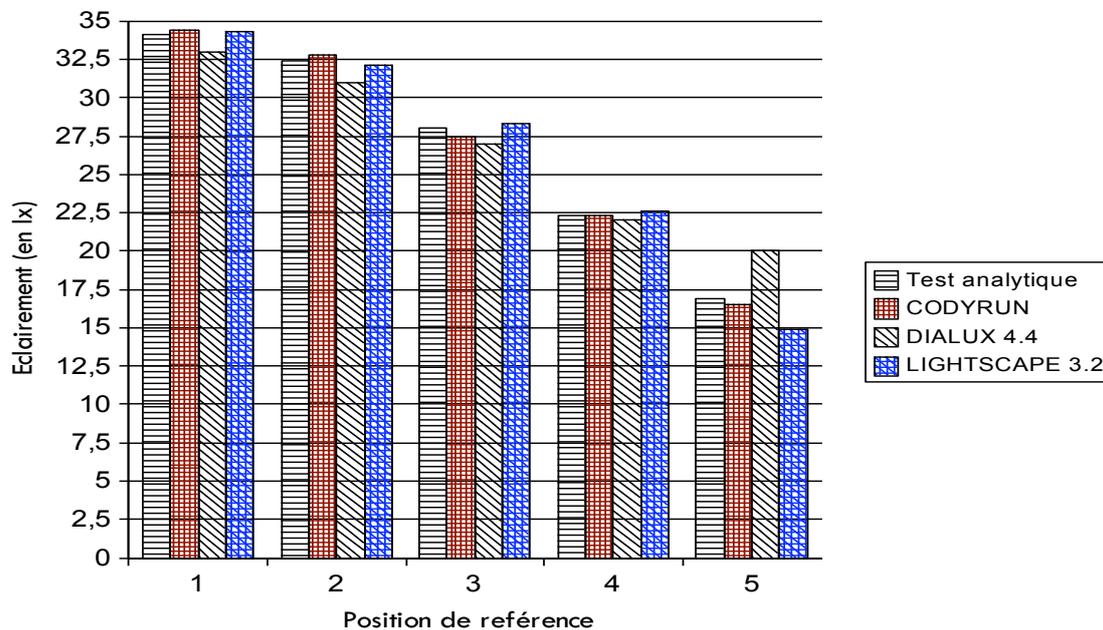


FIGURE II.26. COMPARAISON INTER-LOGICIELS : ECLAIRAGE ARTIFICIEL (AVEC REFERENCE ANALYTIQUE)

Les erreurs relatives associées à ces simulations par rapport aux valeurs de référence sont données par la Figure II.27.

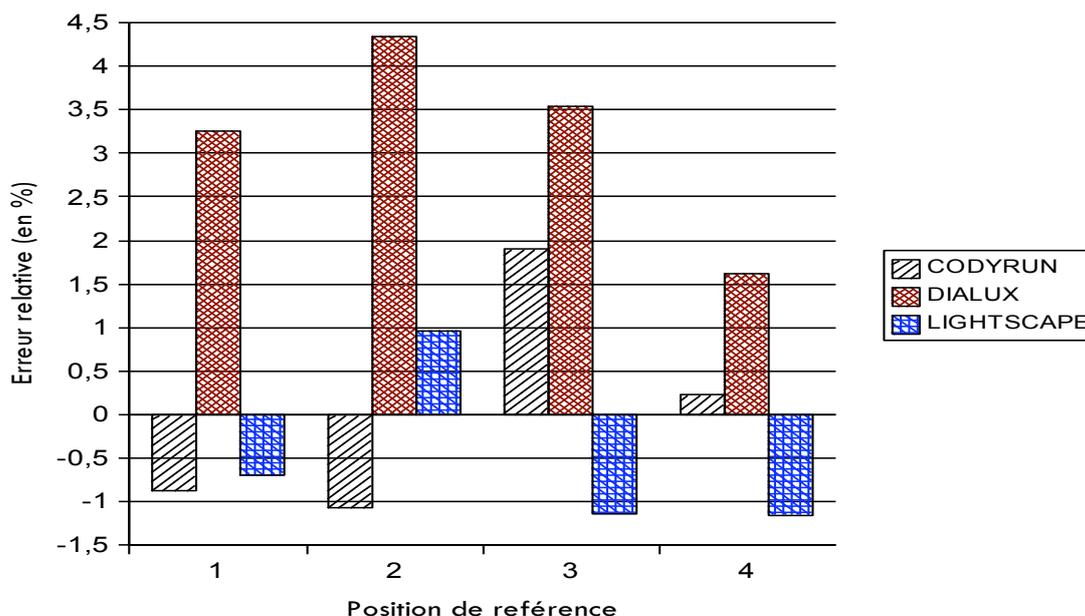


FIGURE II.27. ERREURS RELATIVES DES LOGICIELS PAR RAPPORT AUX VALEURS DE REFERENCE ANALYTIQUES

### II.3.3.3. Conclusions

Nous voyons une fois encore, que CODYRUN présente des résultats de simulation qui sont compris entre les valeurs que fournissent les deux autres logiciels. L'erreur moyenne de CODYRUN par rapport au test de référence est de 3.18 %.

### II.3.4. Conclusion sur la comparaison inter - logiciels

Nous venons de comparer les simulations numériques de l'éclairage naturel intérieur sous CODYRUN avec celles de RADIANCE, SUPERLITE, BuildOpt et enfin GENELUX. Le protocole test utilisé est celui du CSTB. Les résultats obtenus nous montrent que notre logiciel rentre bien dans le cadre des logiciels de simulation numérique et de recherche scientifique développés autour de l'éclairage naturel intérieur.

Nous avons ensuite comparé notre logiciel avec DIALUX 5.0 et LIGHTSCAPE pour l'étude de l'éclairage artificiel intérieur. Pour cela nous nous sommes inspirés des résultats obtenus à partir du cas test d'éclairage artificiel, avec source surfacique, défini par Maamari. Le constat est le même : CODYRUN simule relativement bien l'éclairage artificiel à l'intérieur d'un local.

Les résultats de comparaison inter-logiciels obtenus indiquent que CODYRUN simule aussi bien l'éclairage artificiel que l'éclairage naturel intérieur.

Il nous a paru intéressant d'observer alors la capacité de ce logiciel à simuler des phénomènes photométriques réels (nous ne perdons pas de vue que CODYRUN n'est pas en mesure de prendre en compte le fichier photométrique de la source souvent fourni par l'IES ou autres organisme spécialisé car il utilise des modèles simplifiés). Pour cela, une comparaison entre les valeurs fournies par le logiciel et celles obtenues à partir de cas expérimentaux est nécessaire. C'est l'objet de notre prochaine partie.

## II.4. Cas tests avec références expérimentales

Il faut savoir qu'il est difficile de mettre en place des valeurs de référence expérimentale [Maamari, 2004]. En effet, les erreurs de mesure et d'appréciation sont élevées dans ces cas de figure. De plus, les contraintes liées à l'aspect purement protocolaire du dispositif expérimental et du positionnement des appareils de mesure photométrique peuvent augmenter les risques d'obtenir des données de mesure non réalistes. Cependant, il faut noter qu'il existe beaucoup de cas de référence dans la bibliographie. Dans ce paragraphe, nous n'utiliserons que quelques-uns d'entre eux. La plupart de ces cas ont été mis en place par Maamari et font l'objet de la tâche TC-3-33 du CIE. Nous traiterons également d'un cas test en Finlande (laboratoire test HUT), issu du rapport de la tâche 21 de l'IEA. D'autres études menées dans un laboratoire de recherche en Thaïlande feront l'objet de référence test. Afin de mieux appréhender la fiabilité du logiciel à simuler des cas réels locaux en régime dynamique, nous utiliserons des séries temporelles de mesure d'éclairage naturel intérieur provenant de la cellule LGI que nous comparerons avec celles de simulation sous CODYRUN.

### II.4.1. Introduction

Il paraissait nécessaire de présenter des cas tests avec référence expérimentale afin de couvrir tous les aspects réels de la propagation de la lumière. Cependant, l'utilisation de ce type de référence pour la validation n'est pas sans problèmes et nécessite beaucoup de précautions. L'un des problèmes majeurs liés à l'utilisation des mesures expérimentales en tant que référence de validation est l'incertitude de la description des scénarios (point de mesure, dispositions particulières, etc.) ; des sources lumineuses (luminaire, goniophotométrie, ciel artificiel, ciel réel, etc.) et de la description des surfaces. Toutes ces erreurs mènent à des travaux de validation peu concluants, à cause de la marge d'incertitude trop importante et difficilement quantifiable. A cela vient s'ajouter l'interaction entre différentes sources d'erreurs dans les scénarios à multiples paramètres où l'identification des points de faiblesse d'un logiciel devient presque impossible. Nous avons aussi le coût élevé pour la mise en place d'un dispositif expérimental de cette nature, qui empêche la plupart des laboratoires de recherche de s'y aventurer. C'est pour toutes ces raisons que nous serons amenés à rester prudents lors de la création et/ou la sélection de références expérimentales destinées à la validation du logiciel CODYRUN. Nous respecterons donc les recommandations proposées par Maamari dans ses travaux de recherche pour minimiser les incertitudes d'une référence expérimentale. Il s'agit notamment de choix liés à la géométrie (prendre des configurations simples), aux types de matériaux, aux sources de lumières (naturelle et artificielle), ainsi qu'aux points de mesure. Nous simulerons également des cas de figure assez simples.

### II.4.2. Calcul d'erreurs

Quelle que soit la précision du protocole expérimental, il existe toujours un nombre de sources d'erreurs potentielles dans les valeurs physiques collectées. Ces erreurs sont en général classées en deux catégories :

- Les erreurs dites "objectives" (dues aux limites des instruments de mesure)
- Les erreurs dites "subjectives" (liées au protocole expérimental).

Ces erreurs sont liées à la fois à la mesure de la valeur de référence et à celle simulée. Maamari propose une démarche pour présenter les données de référence et faire une comparaison avec celles simulées par le logiciel. En effet, il conseille de présenter les valeurs de données de référence sous la forme de marge(s) de valeurs acceptables pour les résultats de simulation.

Ces marges sont déterminées par la valeur mesurée plus ou moins l'erreur totale (objective et subjective) estimée avec ou sans les erreurs liées à la simulation. C'est ce que nous ferons tout au long de notre étude.

### II.4.3. Références expérimentales pour l'éclairage naturel

Au niveau de l'éclairage naturel, nous travaillerons sur 3 bâtiments tests. Il s'agit de la maquette utilisée par Maamari [Maamari, 2004] en ciel artificiel et de celle de l'EPFL [Michel, 1998] en Suisse. Enfin, nous travaillerons sur le bâtiment HUT (en Finlande) à grandeur réelle. Ces deux derniers bâtiments tests sont cités comme référence dans la tâche 21 de l'IEA [IEA, 2001] alors que celui de Maamari est cité dans la tâche TC-3-33 du CIE[CIE, 2005].

#### II.4.3.1. Comparaison maquette – simulation pour des scénarios de ciel artificiel

Pour cette étude, nous allons considérer la maquette de l'ENTPE qui a servi de plate-forme expérimentale dans la tâche TC-3-33 du CIE.

##### II.4.3.1.1. MAQUETTE REDUITE DE L'ENTPE (ETUDE D'ECLAIREMENT NATUREL)

Cette maquette a été redéfinie par Maamari dans son mémoire de thèse et a fait office de version expérimentale pour la mise en place des cas tests de référence dans la tâche TC-3-33. Il s'agit d'une maquette en bois qui représente une pièce carrée de 4m x 4m x 3m à échelle 1/4 [Michel, 1998]. Elle est composée d'une partie fixe comprenant le sol et les 3 murs intérieurs (côté est, nord et ouest), et d'une série de façades (côté sud) et de toitures avec des ouvertures de différentes dimensions et toujours centrées par rapport à la surface intérieure de la façade ou de la toiture. La maquette offre également la possibilité de garder une ouverture complète en façade ou bien en toiture. Une seule ouverture est utilisable à la fois. Nous ne considérerons que les ouvertures en façade (mur sud) avec une toiture fixe et opaque. Les configurations possibles d'ouvertures en façades sont les suivantes :

- Ouverture en façade de 40cm x 20cm (représentant une ouverture de 2m x 1m à l'échelle réelle). Les dimensions intérieures sont 80cm x 80cm au sol et 60 cm de hauteur. L'épaisseur de l'ouverture est de 36 mm (18cm à échelle réelle).

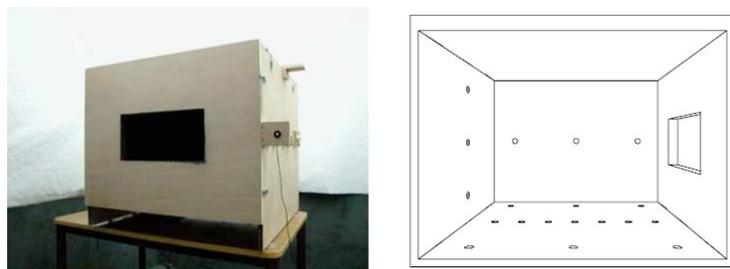


FIGURE II.28. MAQUETTE DE L'ENTPE AVEC OUVERTURE EN FAÇADE DE 40CM X 20CM

- Ouverture en façade de 60cm x 40cm (3m x 2m). Les dimensions intérieures sont 80cm x 80cm au sol et 60 cm de hauteur. L'épaisseur de l'ouverture est de 36 mm.

- Ouverture totale en façade de 80cmx60cm (4mx3m). Les dimensions intérieures sont 80cmx81.8cm au sol et 60cm de hauteur. La dimension 81.8 cm est entre l'ouverture et le mur de fond (nord).

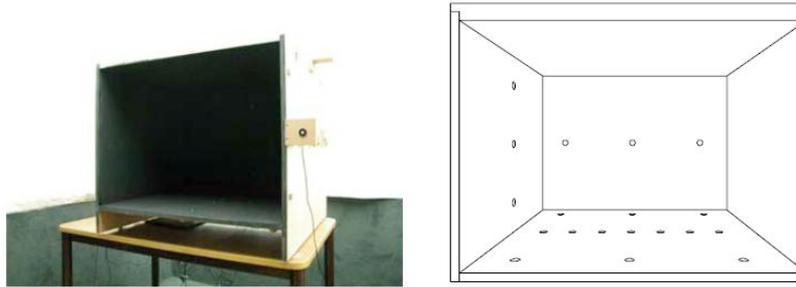


FIGURE II.29. MAQUETTE AVEC OUVERTURE EN FAÇADE DE 80CMX80CM

Le bois utilisé est du "contreplaqué" d'une épaisseur de 18 mm. Toutes les surfaces intérieures de la maquette ainsi que l'épaisseur des ouvertures sont couvertes d'une peinture noire à aspect mat. La valeur moyenne du coefficient de réflexion est de 0.045 +/- 0.01.

Les emplacements possibles des capteurs intérieurs de mesure au sol sont montrés sur la figure suivante (Figure II.30) :

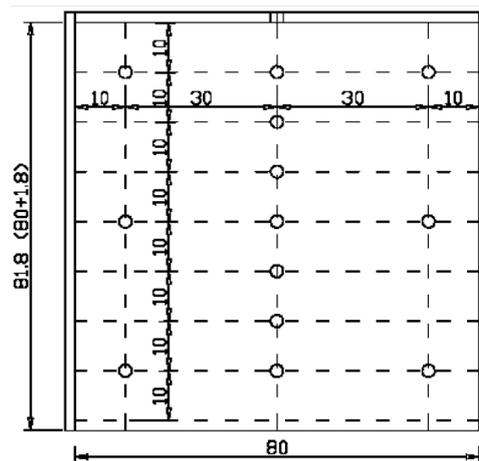


FIGURE II.30. EMBLEMES POSSIBLES ET DIMENSIONS INTERIEURES DE LA MAQUETTE DU L'ENTPE

Les positions au sol des points de mesure (A1, A2, A3 et A4) sont données ci-dessous :

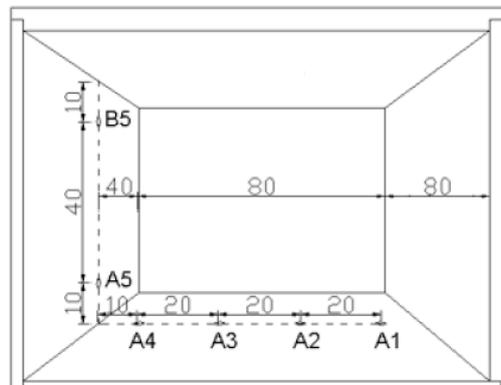


FIGURE II.31. POSITION DES CAPTEURS A L'INTERIEUR DE LA MAQUETTE DE L'ENTPE

S'agissant du gisement lumineux solaire, des appareils de photographie numérique, étalonnés avec le logiciel Photolux, ont été utilisés (Figure II.32).

Le cas que nous allons traiter est celui de l'expérience menée sous un ciel artificiel : le dispositif utilisé permet une position verticale de l'objectif (appareil photo numérique spécialisé pour ce type d'étude) qui est centré perpendiculairement à la surface de l'ouverture. Il permet également un déplacement vertical du Fish-eyes entre -25 cm et + 25 cm par rapport au centre de l'ouverture, ce qui permet d'observer la variation du champ des luminances externes à l'ouverture avec la hauteur du point de vue.

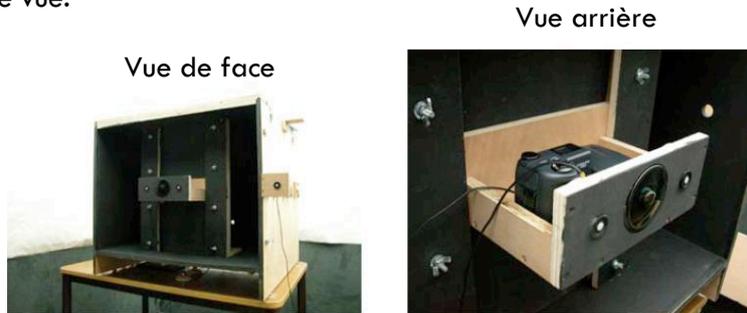


FIGURE II.32. DISPOSITIF DE POSITIONNEMENT DE L'APPAREIL PHOTO EN FAÇADE DANS LE CIEL ARTIFICIEL

#### II.4.3.1.2. DESCRIPTION DU CAS TEST

La maquette réduite définie dans le paragraphe précédent est installée dans une pièce de l'ENTPE (plus particulièrement au centre de la pièce, avec la partie supérieure de la toiture à une hauteur de 145 cm) carrée, de 2mx2m et de 2.1 m de hauteur. Cette pièce a la capacité de simuler un ciel artificiel. Le sol et la partie inférieure des parois verticales (jusqu'à 80 cm du sol) sont couverts d'une moquette verte avec un facteur de réflexion d'environ 10 % avec, en dessous, un diffuseur qui permet d'obtenir une meilleure uniformité des luminances du plafond. La partie supérieure des quatre parois verticales est couverte de miroirs qui permettent, par réflexion, d'étendre à l'infini la surface du plafond. Ainsi, ce dispositif permet de simuler un ciel continu avec un champ de luminance continu et une distribution proche du ciel CIE couvert. Un variateur haute fréquence permet de faire varier le flux des lampes de façon à fournir différentes gammes de luminances au plafond (entre 2000 et 8000 Cd.m<sup>-2</sup>) et un éclairage horizontal (à 80 cm du sol) variant entre 4000 et 16000 lx.

#### II.4.3.1.3. HYPOTHESE DE SIMULATION SOUS CODYRUN

En général, la couleur verte a un coefficient de réflexion qui varie de 30% à 60%. La moquette verte utilisée dans le ciel artificiel comme verdure extérieure devrait donc avoir un coefficient de réflexion variant de la sorte. Nous avons simulé sous CODYRUN les cas tests en fonction de la variation des coefficients correctifs MF, GR et FR (voir chapitre II sur le Facteur de lumière du jour) qui sont utilisés très souvent en calcul de FLJ (Tableau II.14).

Ouvertures	Albédo (%)	Eclairage extérieur (lx)	Coefficient MF (%)	Coefficient GR (%)	Coefficient FR (%)
1mx2m	20	15 000	90	70	80
2mx3m	20	16 000	90	80	80
3mx4m	20	16 000	90	80	80

TABLEAU II.14. HYPOTHESE DE SIMULATION SOUS CODYRUN POUR LE CAS TEST AVEC CIEL ARTIFICIEL

Nous ne présenterons que les résultats de simulation au sol, c'est-à-dire pour les points A<sub>1</sub> A<sub>2</sub> A<sub>3</sub> et A<sub>4</sub>. Nous avons décrit le bâtiment sous CODYRUN avec les dimensions réelles.

#### II.4.3.1.4. COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION ET LES VALEURS DE REFERENCE

Nous ne présentons ici que les résultats du cas d'une ouverture de 1mx2m (Figure II.33).

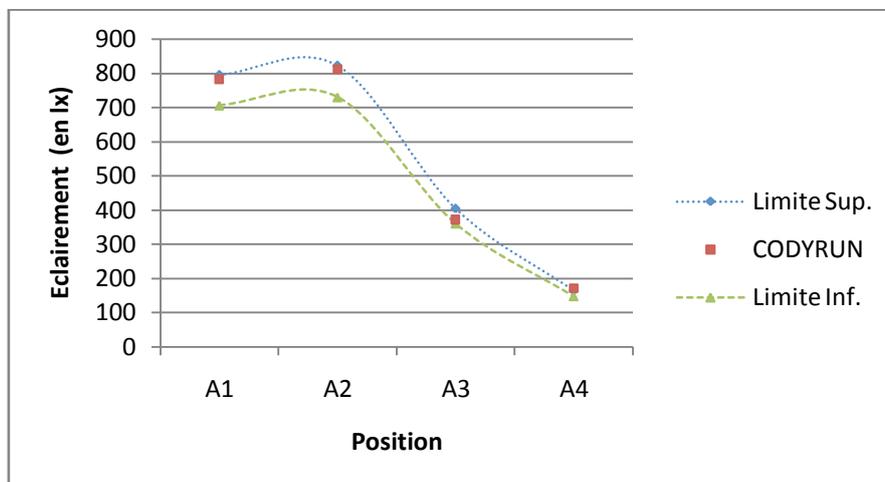


FIGURE II.33. TEST EXPERIMENTAL AVEC CIEL ARTIFICIEL (OUVERTURE DE 1MX2M)

S'agissant des autres cas (ouverture de 2mx3m et 3mx4m), nous avons obtenu 3 points de simulation sur 4 qui sont compris entre les valeurs inférieures et supérieures de référence. On a par exemple la position A<sub>1</sub> du cas à une ouverture de 2mx3m qui est largement inférieure aux deux bornes de valeurs de référence (Limite Inf. et Limite Sup.). L'erreur relative pour ce point par rapport à la valeur bornée de référence la plus proche est de 16.17 %. Le même problème surgit lorsque l'on traite du cas avec une ouverture de 3mx4m. En effet, c'est une fois encore à la position A<sub>1</sub> que la valeur simulée par CODYRUN n'est pas comprise entre les valeurs bornées de référence. L'erreur relative en ce point, pour ce cas de figure, est de 3.34 %. Les erreurs relatives moyennes des trois cas (ouvertures 1mx2m, 2mx3m et 3mx4m) sont respectivement de 0 %, 4.04 % et 0.83 %.

#### II.4.3.1.5. INTERPRETATIONS ET CONCLUSIONS DU CAS TEST

Les erreurs sont plus élevées au niveau du point A<sub>1</sub> (le plus proche de l'ouverture). L'erreur relative maximale est celle du cas à une ouverture de 2mx3m. Elle est égale à 16.17 %. L'erreur minimale se situe dans le cas d'ouverture de 1mx2m, qui est pratiquement nulle. La moyenne d'erreur des trois cas de figure est de 3.38 %. La fiabilité du logiciel à simuler ces cas tests est d'environ 100 % (valeur des 4 points simulés comprise entre les marges supérieure "Limite Sup." et inférieure "Limite Inf."). Pour le cas d'une ouverture de 1mx2m, elle est de 67% (3 points de valeur sur 4 sont compris entre "Limite Sup." et "Limite Inf."). Pour le cas des ouvertures 2mx3m et 3mx4m, une fois encore, l'explication de l'erreur au point A<sub>1</sub> est la même que lorsque l'on a testé le logiciel dans le cas de références analytiques et comparatives (comparaison inter-logiciels). CODYRUN sous-estimé l'éclairage naturel en ces points, très proches ou très éloignés de l'ouverture quelles que soient les dimensions de l'ouverture en façade. Cependant, nous voyons bien ici que, dans l'ensemble, les valeurs de CODYRUN restent cohérentes avec les valeurs de référence.

#### II.4.3.2. Modèle réduit de l'EPFL (Tâche 21 de l'IEA)

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la tâche 21 de l'IEA par l'EPFL [Michel, 1998]. Il s'agit des mesures de FLJ prises à partir d'une maquette réduite 1:10, placée sous un ciel artificiel.

II.4.3.2.1. DESCRIPTION DU CAS TEST

La géométrie à grandeur réelle (dimension intérieure) de la maquette est donnée par la Figure II.34 .

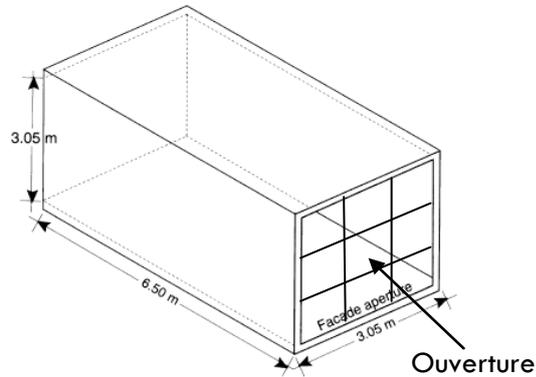


FIGURE II.34. DIMENSIONS DE LA MAQUETTE DE L'EPFL

La maquette est fixée à 30 mm au centre du diamètre circulaire du simulateur de ciel. Toutes les surfaces sont mates. Les coefficients de réflexion des différentes parois sont pour : le plafond 0.83; murs et cadre de l'ouverture 0.60; sol intérieur 0.28 et sol extérieur 0.30. La fenêtre de type double vitrage est constituée de deux films plastiques transparents distants de 0.7 mm. Les épaisseurs des plastiques sont de 0.7 mm. Ceci donne une épaisseur globale de vitrage de 2.1 mm. Le coefficient de transmission est de 0.85. Les dimensions (réduites) des "vitrages" composant la fenêtre sont de 94 mm de largeur sur 94 mm de hauteur. Nous avons 6 "vitrages" équidistants de 5 mm et décalés de 6.5 mm des bordures des murs. La disposition des ouvertures est répartie selon le schéma ci-dessous (Figure II.35).

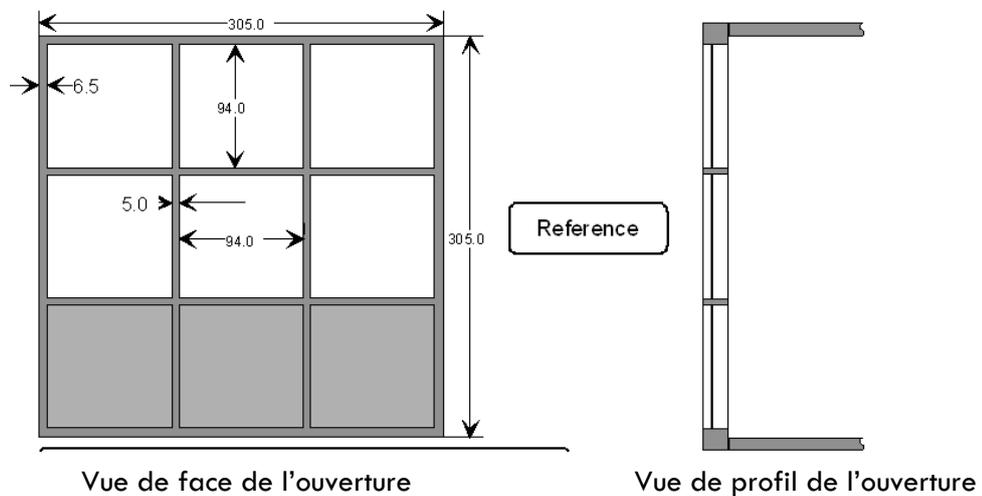


FIGURE II.35. POSITIONNEMENT ET DIMENSIONS (EN MM) DES OUVERTURES DE LA MAQUETTE EXPERIMENTALE DE L'EPFL

Les capteurs de mesure d'éclairage intérieur sont positionnés comme indiqué ci-dessous (Figure II.36).

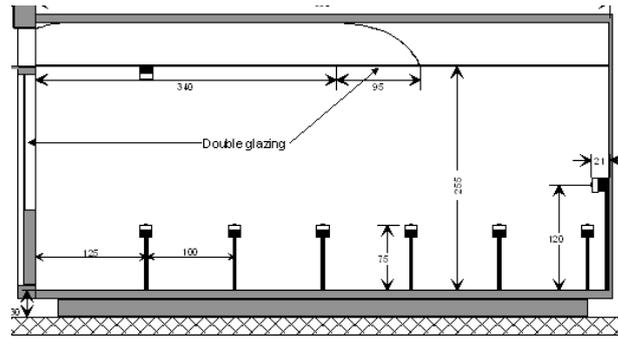


FIGURE II.36. POSITIONNEMENT DES CAPTEURS DE MESURE DE LA MAQUETTE REDUITE DE L'EPFL

Les erreurs de mesure (objectives et subjectives) sont estimées par les auteurs de l'étude à 5 %. Deux mesures ont été menées : l'une dans un ciel isotrope et l'autre dans un ciel standard, définis tous deux par le CIE.

Profondeur (en m)	1.25	2.25	3.25	4.25	5.25	6.25
Valeur du FLJ (référence)	13.5%	7.8%	5.4%	3.6%	3.0%	2.6%

TABLEAU II.15. FLJ MESURE (POUR UN CIEL COUVERT ISOTROPE) DE LA MAQUETTE EPFL

Profondeur (en m):	1.25	2.25	3.25	4.25	5.25	6.25
Valeur du FLJ (référence)	11.4%	6.0%	4.0%	2.5%	2.0%	1.7%

TABLEAU II.16. FLJ MESURE (POUR UN CIEL COUVERT STANDARD) DE LA MAQUETTE EPFL

Nous avons décrit le bâtiment de la tâche 21 de l'IEA sous CODYRUN. Nous avons simulé le FLJ global sur le plan utile défini par le protocole expérimental (c.à.d. 0.75 m de hauteur dans la réalité). Le maillage est de 0.5x0.5m.

#### II.4.3.2.2. COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION ET LES VALEURS DE REFERENCE

Nous avons comparé les résultats de FLJ obtenus par CODYRUN et ceux des mesures prises en ciel standard et isotrope (Figure II.37). Nous avons conclu que les FLJ donnés par le logiciel se rapprochent beaucoup plus des résultats de référence dans le cas du ciel standard. Nous avons ensuite appliqué les limites des valeurs acceptables (+/- 5% d'erreur sur les mesures) sur ce type de ciel et avons obtenu la courbe (Figure II.38).

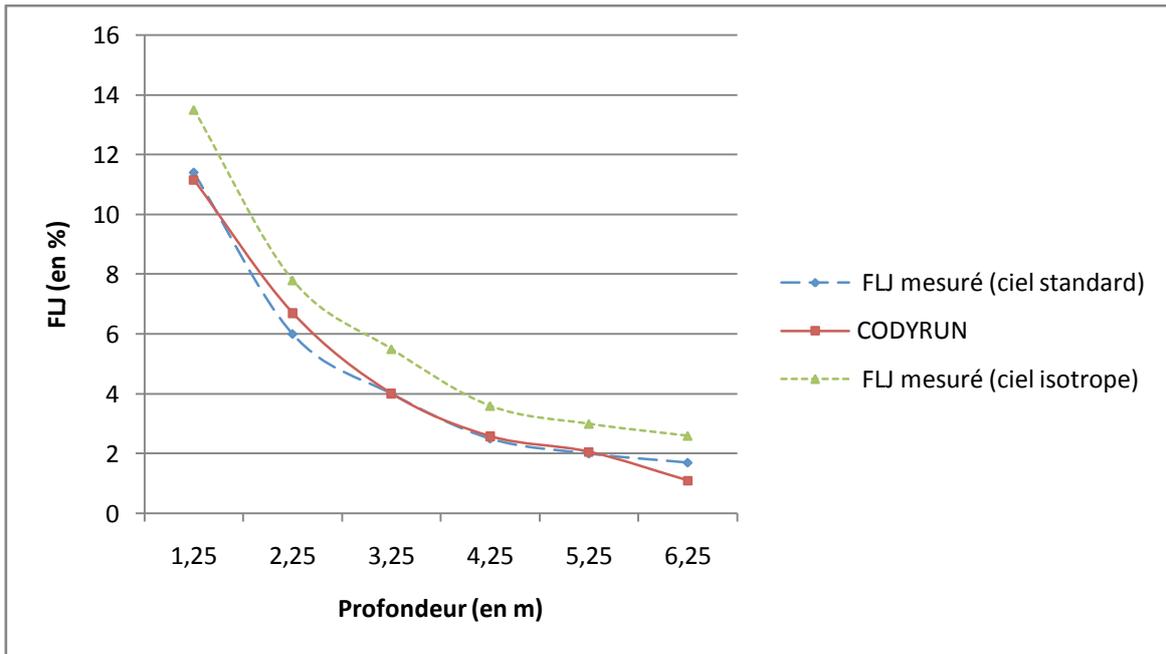


FIGURE II.37. COMPARAISON SIMULATION / REFERENCE EXPERIMENTALE (MAQUETTE REDUITE DE L'EPFL)

La moyenne d'erreur relative obtenue est de 6.37 % et la fiabilité est de 74.46 %.

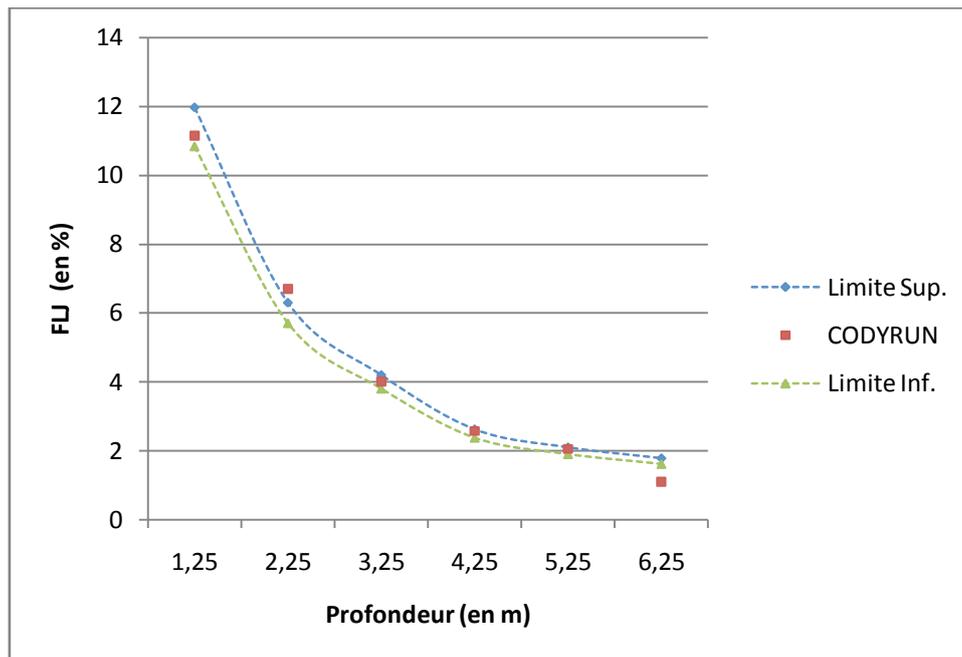


FIGURE II.38. FIABILITE DE CODYRUN DANS LE CAS TEST DE LA MAQUETTE REDUITE DE L'EPFL

#### II.4.3.2.3. INTERPRETATIONS ET CONCLUSIONS DU CAS TEST DE LA MAQUETTE EXPERIMENTALE

S'agissant du ciel isotrope, l'erreur moyenne est de 9.31 %. L'erreur relative maximale se situe au niveau du point le plus éloigné de l'ouverture et est égale à 38.7 %. L'erreur minimale est de 17.54 %. 4 valeurs de simulation sur 6 sont comprises entre Limite Sup. et Limite Inf. (valeur limite de référence). Nous pouvons conclure que le logiciel a une fiabilité de 74.46 %, ce qui est acceptable en termes de simulation d'éclairage naturel.

### II.4.3.3. Cas test HUT à échelle réelle en Finlande (Tâche 21 de l'IEA)

Nous allons refaire pratiquement la même étude que celle du paragraphe (II.4.3.2) appliquée cette fois-ci à un bâtiment réel. Nous travaillerons sur le facteur de lumière du jour.

II.4.3.3.1. BATIMENT TEST REEL HUT DE L'IEA POUR L'ETUDE D'ECLAIREMENT NATUREL  
L'étude a été menée en Finlande, dans les années 90, sur un bâtiment monozone à échelle réelle de dimensions suivantes : une longueur (ou profondeur) du local égale à 4 m, une largeur égale à 2.4 m et une hauteur égale à 2.7 m.



FIGURE II.39. LOCAL TEST HUT DE L'IEA (ECLAIREMENT NATUREL)

L'ouverture est formée d'un double vitrage de 1.33 m de hauteur sur 1.53 m de largeur.

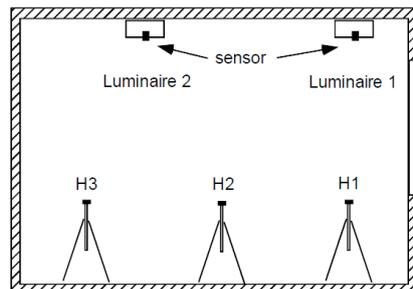


FIGURE II.40. POSITIONNEMENT DES CAPTEURS DANS LA CELLULE TEST HUT DE L'IEA (ECLAIREMENT NATUREL)

Trois capteurs de mesure d'éclairage (H1, H2 et H3) ont été placés à des distances par rapport à l'ouverture de 0.71 m (pour H1), 1.95 m (pour H2) et 3.24 m (pour H3), l'ensemble à une hauteur de 0.70 m par rapport au sol. L'intérieur est peint en blanc. Nous n'avons pas d'indications sur les erreurs de mesure. Nous déterminerons donc directement l'erreur relative entre les mesures et la simulation. Faute d'informations nous avons pris l'albédo (coefficient de réflexion du sol extérieur) à 0.2. Vu la couleur blanchâtre (blanc uniforme neuf clair plus exactement) des parois, on a supposé que les coefficients de réflexion de chaque paroi sont d'environ 0.9. Le bâtiment a été modélisé sous CODYRUN.

### II.4.3.3.2. COMPARAISON, INTERPRETATIONS ET CONCLUSIONS DU CAS HUT

La figure ci-dessous compare les résultats de simulation de CODYRUN et les valeurs mesurées de référence au point H1, H2 et H3.

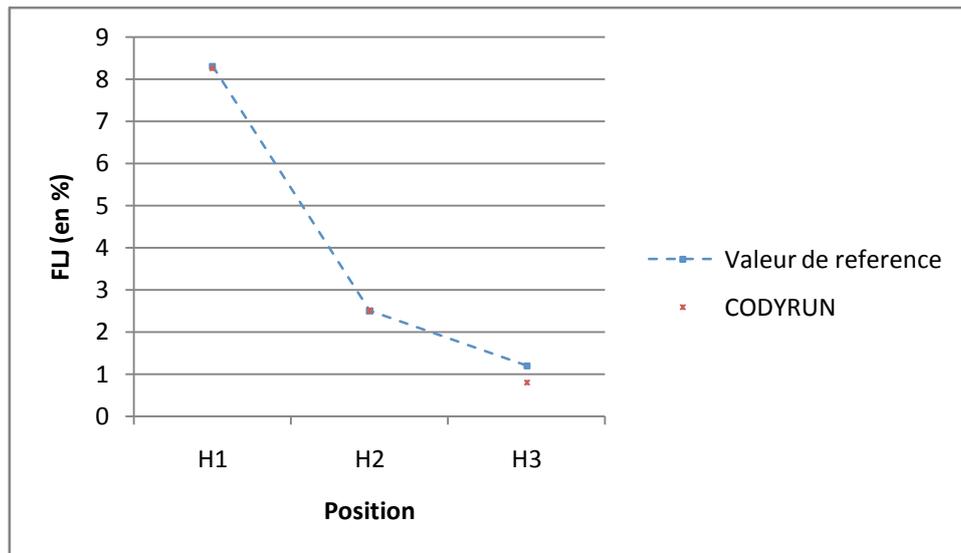


FIGURE II.41. RESULTATS DE SIMULATION DU CAS TEST HUT DE L'IEA SOUS CODYRUN

La comparaison entre la simulation et les valeurs de références montre une erreur beaucoup trop élevée au point H3 (de l'ordre de 33 %). Soulignons, cependant, que ces valeurs de références sont purement expérimentales. Cela nous amène à considérer les erreurs de mesures subjectives et objectives (non fournies par le laboratoire à l'époque) comme l'a indiqué le C.I.E. De même que nous n'avons aucune informations sur le type de ciel lors de cet expérimentation et que nous avons considéré le cas d'un ciel couvert lors de la simulation.

Nous avons vue également qu'il été très difficile de caractériser par des simulations, le flux lumineux en un point très éloigné de l'ouverture à partir du modèle simplifié du Facteur de Lumière du Jour et de ces coefficient de pondération car ce modèle considéré de manière très approximative l'éclairage diffus provenant des inter-réflexions (engendrées par les facteurs de formes) des parois internes. CODYRUN a tendance à sous estimer les valeurs du Facteur de Lumière du Jour au niveau des positions très éloignées de l'ouverture.

#### II.4.3.3. INTERPRETATIONS ET CONCLUSIONS DU CAS TEST HUT

Le tableau ci-dessous montre clairement que 2 valeurs simulées par CODYRUN sur 3 commettent une erreur relative inférieure ou égale à 0.6 %. Le degré de fiabilité du logiciel est de 88.68 %.

Position	H1	H2	H3
Erreur relative (en %)	0.6	0	33.3

TABLEAU II. 17. ERREUR RELATIVE DANS LA COMPARAISON CODYRUN / CAS HUT

Nous pouvons à nouveau avancer que CODYRUN a passé le test avec succès, mais que des améliorations restent à faire, notamment au niveau de la simulation des points les plus éloignés de l'ouverture.

#### II.4.4. Références expérimentales pour l'éclairage artificiel

L'étude que nous réaliserons dans cette partie sera consacrée à l'éclairage artificiel. Nous nous efforcerons d'appliquer, sous CODYRUN, les cas de scénario 1 et 3 de la tâche TC3-33 du CIE. Le bâtiment test utilisé dans cette tâche (pour les deux scénarios) est celui du CIBSE (En Angleterre).

### II.4.4.1. Géométrie du local dans un repère cartésien

La pièce testée est de forme rectangulaire de dimensions de 6 m 78 (suivant l'axe Ox du repère choisi) par 6 m 72 (suivant l'axe Oy). La hauteur du plafond est de 3 m 24 (suivant Oz).

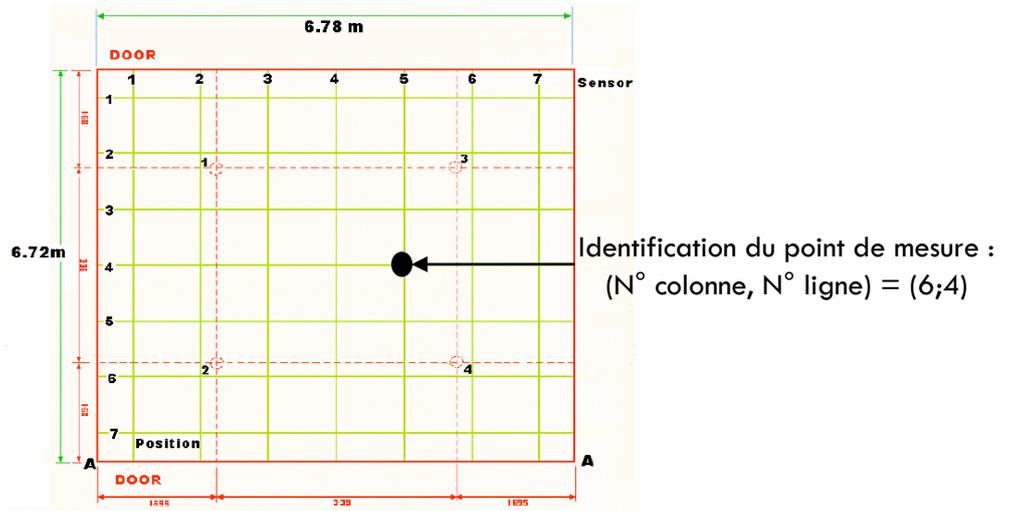


FIGURE II.42. DIMENSIONS AU SOL DU BATIMENT TEST CIBSE (ECLAIRAGE ARTIFICIEL)

#### II.4.4.1.1. PHOTOMETRIE DES LUMINAIRES

Les luminaires utilisés dans l'expérience menée par le CISBE sont différents de ceux utilisés par la tâche TC-3-33 du CIE. Nous n'allons traiter que deux scénarios : il s'agit du scénario 1 (éclairage artificiel ; CFL ou Compact Fluorescent Lights; mur gris) et du scénario 3 (éclairage artificiel ; réflexion lumineuse semi-spéculaire ; mur gris). Pour ce qui est des scénarios 1 et 3, nous disposons de 4 luminaires fluorescents de type Phillips répartis comme indiqué sur la figure ci-dessus aux quatre points 1, 2, 3 et 4 du plafond. Ces luminaires ont respectivement les coordonnées et caractéristiques du tableau.

- scénarios 1 (CFL, mur gris):

Luminaires	Coordonnées (en m)	Flux Lumineux (en lm)	Intensité lumineuse (en Cd)
1	(1.695 ; 1.680 ; 3.14)	2182	694,55
2	(1.695 ; 5.040 ; 3.14)	2196	699,1
3	(5.085 ; 1.680 ; 3.14)	2203	701,236
4	(5.085 ; 5.040 ; 3.14)	2182	694,55

TABEAU II.18. PHOTOMETRIE DES LUMINAIRES POUR LE SCENARIO 1 DE LA TACHE TC3-33 DU CIE

Les coefficients de réflexion des parois internes sont tous égaux à 52 % +/- 0.02 % et la cote des luminaires est à 3.14 m.

- Scénarios 3 (réflexion semi-spéculaire ; mur gris) :

Luminaire	Flux Lumineux (en lm)	Intensité lumineuse (en Cd)
1	4087.7	1301
2	4174.7	1328
3	4135.0	1316
4	4114.3	1309

TABLEAU II.19. PHOTOMETRIE DES LUMINAIRES POUR LE SCENARIO 3 DE LA TACHE TC3-33 DU CIE

Les coefficients de réflexion des parois internes sont cette fois de 41 % +/- 0.02 % pour le scénario 1 et de 52 % +/- 0.02 % pour le scénario 3.

Les propriétés des coefficients de réflexion sont décrites dans le ci-dessous :

Parois	Coefficient de Réflexion	Coefficient d'absorption
Plafond	0.70	0.30
Sol	0.06	0.94
Mur	0.41 ou 0.52	0.59 ou 0.48

TABLEAU II.20. COEFFICIENT DE REFLEXION DES PAROIS INTERNES : SCENARIOS DE LA TACHE TC3-33 DU CIE.

Le plan utile de la grille surfacique de mesure est à 0.8 m du sol. La grille surfacique contient 7x7 points, distants chacun de 0.9 m. Le décalage entre la grille surfacique et les murs constituant le local est de 0.48 m.

#### II.4.4.1.2. MESURES DE REFERENCE

Deux valeurs d'erreurs ( $E_m$  et  $E_g$ ) ont été fournies par le CIBSE. L'une concerne les erreurs dues aux mesures, notés  $E_m$  et l'autre, notée  $E_g$ , est due à l'ensemble des erreurs (de mesure et de simulation) tolérables. Pour chacun de ces deux types d'erreurs, nous distinguerons aussi les erreurs liées aux éclairagements en un point et celles moyennes dans la salle. En résumé, nous avons 4 types d'erreurs :

Erreur	Type	
	Ponctuelle	Moyenne
Erreur moyenne ( $E_m$ )	+/- 3.8%	+/- 6.3%
Erreur globale ( $E_g$ )	+/- 6.7%	+/- 10.5%

TABLEAU II.21. ERREURS DES SCENARIOS 1 ET 3 DE LA TACHE TC3-33 DU CIE

Les valeurs de simulation seront comparées à celles des limites inférieure et supérieure des mesures obtenues (c.à.d. mesures +/- erreur moyenne puis, mesures +/- erreur globale) d'éclairagement en un point. La moyenne d'éclairagement dans la salle sera, quant à elle, bornée par les mesures +/- les erreurs globales.

**II.4.4.2. Scénario 1 de la tâche TC3-33 du CIE**

Il est très important de souligner que les mesures effectuées ne prennent pas en compte l'aspect bidirectionnel du flux lumineux. Cela implique la non prise en compte de la partie indirecte de l'éclairage transmis à l'intérieur par la composante diffus interne lors de la simulation sous CODYRUN. Nous ne présenterons ici qu'un cas de figure parmi les 6 tableaux de valeurs de simulation réalisées. Il s'agit du cas de référence de la première ligne de nos points de mesure (Figure II.43). Les points de référence considérés seront représentés par (1;1) jusqu'à (1;7) (voir Figure II.42 pour l'exemple d'identification d'un point de mesure du test). Les courbes LS-Eg et LI-Eg sont respectivement la marge supérieure et inférieure des valeurs de référence globales (valeurs mesurées + erreurs de mesure + erreurs de simulation). Tandis que les courbes LS-Em et LI-Em représentent respectivement les limites Supérieure et Inférieure des valeurs de référence moyennes (valeurs mesurées+erreurs de mesure).

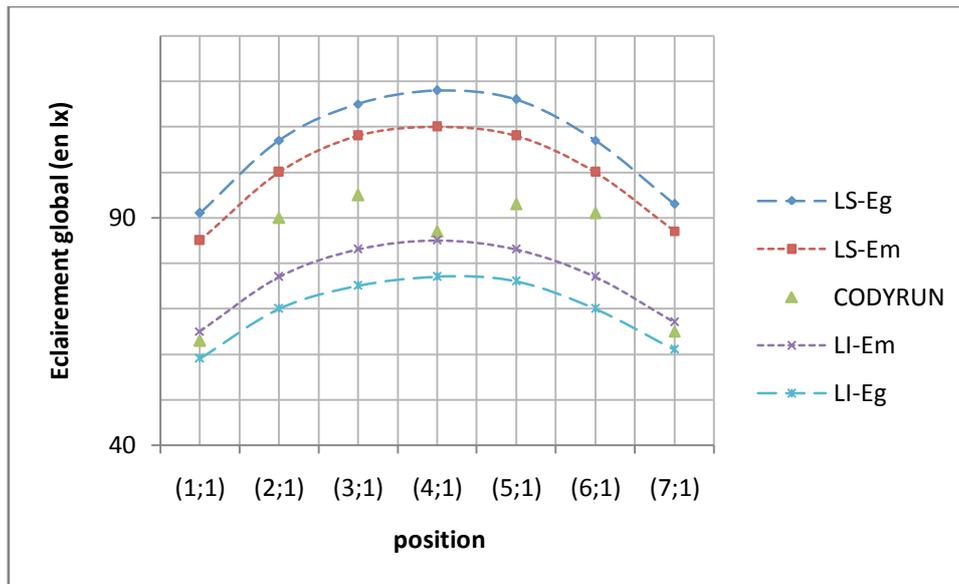


FIGURE II.43. SCENARIO 1 DE TACHE TC3-33 DU CIE : ECLAIREMENT AUX POINTS DE MESURE

L'éclairage moyen est donné par le tableau ci-dessous :

Eclairage moyen (en lx)	
Limite supérieure	112
CODYRUN	112
Limite inférieure	88

TABLEAU II.22. VALEUR DE REFERENCE DU SCENARIO 1 DE LA TACHE TC3-33 DU CIE : ECLAIREMENT MOYEN

**II.4.4.2.1. INTERPRETATIONS ET CONCLUSIONS DU SCENARIO 1 (TC3-33 DU CIE)**

L'ensemble des résultats de comparaison entre les simulations du logiciel et les références du scénario 1 obtenus sont donnés en Annexe E. L'erreur maximale est commise au point (6;6) (voir Annexe E) et est égale à environ 15.44 % par rapport à la limite globale supérieure de référence (LS\_Eg). L'erreur minimale est d'environ 0.71 % (à la position (3;3)) par rapport à la limite supérieure de référence (LS\_Eg). La moyenne des erreurs relatives est de 6.1 %.

Les simulations sous CODYRUN montrent que 29 points sur 49 ont des valeurs comprises entre les limites supérieures (LS<sub>E<sub>m</sub></sub>) et inférieure (LI<sub>E<sub>m</sub></sub>) de référence, alors que 34 points sur 49 ont des valeurs entre les deux marges des limites globales (supérieur (LS<sub>E<sub>g</sub></sub>) et inférieur (LI<sub>E<sub>g</sub></sub>)). Dans les deux cas, nous voyons qu'il y a plus de points à l'intérieur des courbes de limites que de points en dehors. Ceci nous donne une indication sur la fiabilité du logiciel à simuler l'éclairage artificiel intérieur.

CODYRUN a un degré de fiabilité d'environ 69 % dans ce cas de figure (pour indication, Dialux 4.0 a obtenu une fiabilité de 75 % pour le même cas test). Le Tableau II.23 nous donne les valeurs d'erreur relative en chaque position pour les valeurs de référence de la ligne 1. Lorsque l'erreur est nulle, cela signifie que la valeur simulée en ce point est bien comprise entre les bornes de référence du même point (LS<sub>E<sub>g</sub></sub>, LI<sub>E<sub>g</sub></sub>, LS<sub>E<sub>m</sub></sub> et LI<sub>E<sub>m</sub></sub>).

Limite des marges	Erreurs relatives (en %)				
	LS <sub>E<sub>g</sub></sub>	LS <sub>E<sub>m</sub></sub>	LI <sub>E<sub>m</sub></sub>	LI <sub>E<sub>g</sub></sub>	
Positionnement	(1;1)	0	0	3.09	0
	(1;2)	0	0	0	0
	(1;3)	0	0	0	0
	(1;4)	0	0	A	0
	(1;5)	0	0	0	0
	(1;6)	0	0	0	0
	(1;7)	0	0	2.98	0

TABLEAU II.23. ERREUR PAR RAPPORT AUX LIMITES DE REFERENCE : COLONNE 1 DE LA GRILLE SURFACIQUE

#### II.4.4.3. Le scénario 3 de la tâche TC-3-33 (référence (IV.1.4) de Maamari)

Nous allons décrire le scénario 3 de la tâche TC-3-33 du CIE et nous présenterons les résultats de simulation obtenus.

##### II.4.4.3.1. DESCRIPTION DU CAS TEST ET HYPOTHESES

Le bâtiment est celui du CIBSE. Pour ce cas de figure, nous ne disposons que de valeurs d'éclairage mesurées à la position 1 et de la valeur moyenne. L'éclairage diffus et direct est simulé sous CODYRUN et les résultats du global sont donnés en chaque point des positions décrites par la Figure II.42. Le plan utile est à 0.8 m du sol. Les nœuds du maillage de notre plan surfacique (plan utile) sont équidistants de 0.48 m.

##### II.4.4.3.2. COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION ET LES VALEURS DE REFERENCE

Les résultats obtenus pour les points de mesure alignés à la ligne 1 sont donnés par la Figure II.44 .

La valeur moyenne de simulation est donnée dans le tableau ci-dessous :

	Eclairage moyen (en lx)
Limite Sup. CODYRUN	254.2
Limite Inf.	199.8

TABLEAU II. 24.RESULTATS SCENARIO 3 DE TACHE TC3-33 DU CIE : ECLAIREMENT MOYEN

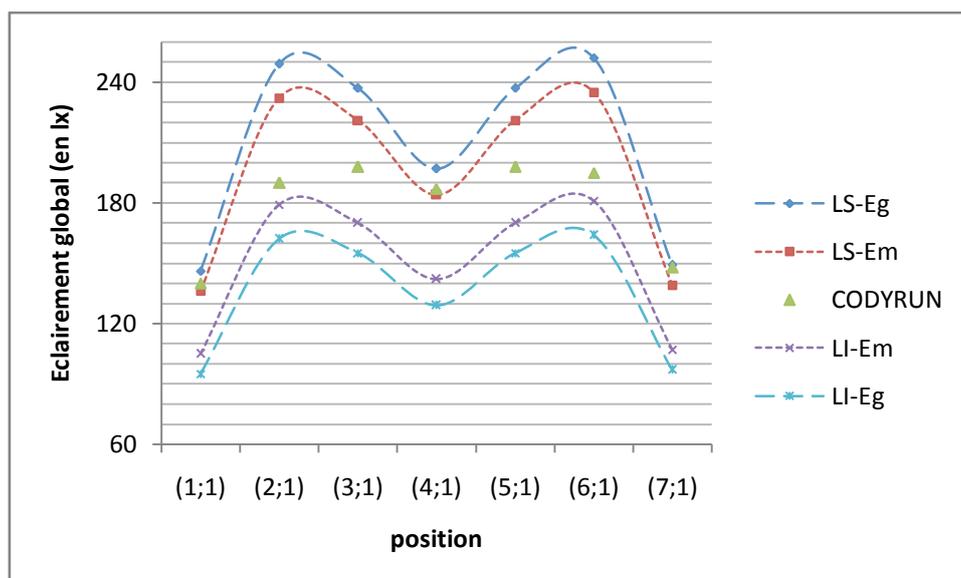


FIGURE II.44. SCENARIO 3 DE TACHE TC3-33 DU CIE : ECLAIREMENT AUX POINTS DE MESURE DE LA POSITION 1

#### II.4.4.3.3. INTERPRETATIONS ET CONCLUSIONS DU SCENARIO 3 (TC3-33 DU CIE)

La valeur moyenne d'éclairage naturel simulée sous CODYRUN rentre parfaitement dans l'intervalle des valeurs de référence (LS\_Em et LI\_Em). Pour ce qui est des valeurs en chaque position, CODYRUN commet une erreur par rapport à ces limites au niveau des points 1, 4 et 7 respectivement de 2.94 %, 1.63 % et 6.47 %. La valeur moyenne des erreurs par rapport à (LS\_Em) et (LI\_Em) sur les 7 positions est de 1.57 %. Par contre, lorsque l'on considère les marges d'erreurs globales, les valeurs simulées par le logiciel restent toutes comprises (quelle que soit la position) entre les valeurs maximales et minimales de référence. Nous pouvons donc déduire que le logiciel a passé le test avec succès (avec un degré de fiabilité d'environ 89 %).

#### II.4.5. Etude dynamique de l'éclairage naturel local : cas de la cellule LGI

Nous allons maintenant vérifier la capacité du logiciel à simuler des situations expérimentales d'éclairage naturel intérieur à la Réunion. Il s'agira du cas d'une étude en régime dynamique. En effet, peu de logiciels arrivent à simuler les régimes dynamiques de la quantité de lumière naturelle pénétrant un local. Il est important de confronter les simulations sous CODYRUN avec des références qui prennent en compte ces phénomènes.

Pour cela, nous nous baserons sur l'étude réalisée sur la cellule expérimentale LGI décrite dans le chapitre I. Nous simulerons sous CODYRUN les trois journées types rencontrées (couverte, intermédiaire et claire) et nous ferons une comparaison avec les valeurs de mesures de référence de ces types de journées.

##### II.4.5.1. Protocole expérimental

Nous avons mis en place trois bases de données (journée type claire, couverte et intermédiaire) de mesures d'éclairage naturel global intérieur (en cinq points alignés, comme indiqué dans le paragraphe (II.4.5.2) qui va suivre), et extérieur simultanément sur 24 h. Les valeurs de mesure du gisement lumineux solaire (global extérieur) ont été enregistrées dans des fichiers météorologiques d'extension MTX spécifiques au logiciel CODYRUN. Nous avons ensuite mesuré le gisement solaire extérieur et l'éclairage intérieur du local puis modélisé la cellule LGI sous CODYRUN. Les résultats de simulation obtenus ont été confrontés à ceux des mesures de référence.

Sachant que pour des références expérimentales les erreurs de mesure peuvent être élevées, nous nous en sommes tenus à respecter le protocole mis en place par Maamari et avons étudié les erreurs subjectives et objectives liées à notre expérimentation. L'objectif final est de fournir des limites supérieures et inférieures globales relatives à chaque mesure effectuée. Nous avons obtenu des valeurs moyennes d'erreurs (dues aux mesures uniquement) de 13.22 % et d'erreurs globales (dues à la fois aux mesures et aux hypothèses de simulation du logiciel) de 15 %.

#### II.4.5.2. La Cellule LGI pour l'étude de l'éclairage naturel

Une cellule expérimentale de laboratoire, baptisée cellule LGI [Miranville, 2002], a été réalisée pour valider expérimentalement les modèles physiques inclus dans CODYRUN et ISOLAB. En plus des dispositifs expérimentaux déjà installés par les différents membres du laboratoire, nous avons mis en place un protocole expérimental et réalisé des mesures d'éclairage naturel extérieur (éclairage global) et intérieur (éclairage en cinq points dont les positions seront définies par la suite) à la cellule.

La plate-forme expérimentale du LPBS, située à l'IUT de Saint-Pierre, a été conçue de sorte que l'ensemble des supports expérimentaux bénéficient des mêmes conditions expérimentales.

L'emplacement alloué étant limité (650 m<sup>2</sup>), 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. Cette dernière est illustrée sur la Figure II.45.

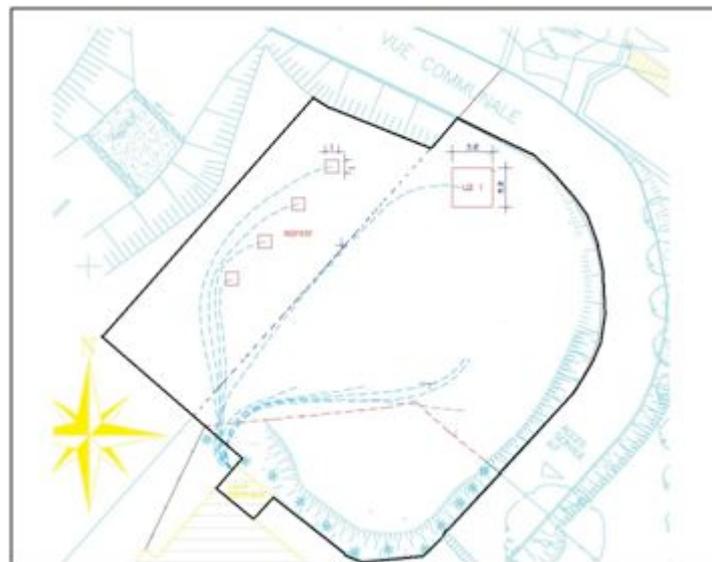


FIGURE II.45. PLAN DU SITE EXPERIMENTAL (IUT SAINT-PIERRE)

La plate-forme est équipée d'une station météorologique, permettant de recueillir les conditions climatiques détaillées du site. Un local technique est également présent et sert à la fois de salle de contrôle des chaînes d'acquisition et de dépôt de maintenance.

##### II.4.5.2.1. DESCRIPTION ARCHITECTURALE

Toutes les parois (internes et externes) ont été peintes en blanc. L'absorptivité de toutes les faces intérieures est de 0.6, liée au fibrociment pour les parois intérieures (gris clair). La toiture est constituée d'un complexe tôle/lame d'air/produit mince réfléchissant/lame d'air/Placoplatre. Cette composition correspond à une étude en cours sur l'isolation réfléchissante dans le cadre d'une autre thèse.



FIGURE 1. CELLULE LGI (IUT SAINT-PIERRE)

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, de mousse polyuréthane 6 cm et fibrociment de 5 mm.

Le plancher est constitué de dalles en béton de 4 cm d'épaisseur et de plaques de polystyrène de 5 cm. La surface au sol est de 9 m<sup>2</sup>. L'ensemble de la cellule repose sur une dalle flottante en béton lourd de 20 cm destinée à recevoir ce genre d'expérimentations.

La cellule expérimentale LGI est une structure modulaire conçue pour le test en environnement réel de composants d'enveloppe de bâtiments. Elle dispose d'un volume intérieur de 28.8 m<sup>3</sup> et s'apparente de ce fait 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.

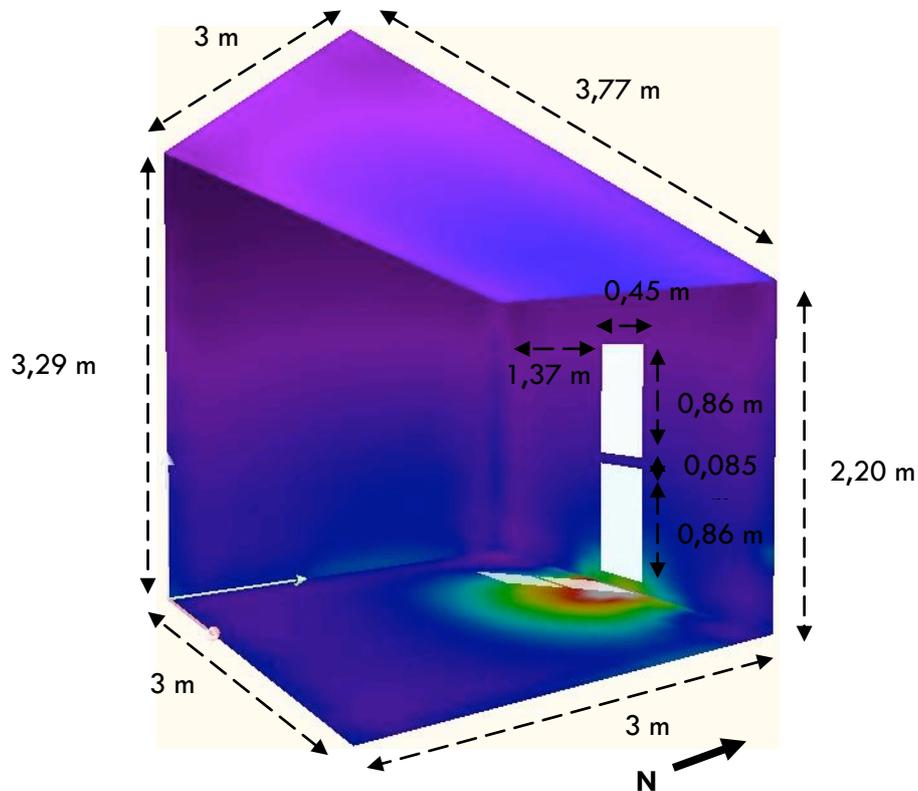


FIGURE II.46. VUE EN 3D ET DIMENSION DE LA CELLULE EXPERIMENTALE LGI

#### II.4.5.2.2. INSTRUMENTATION

La station météorologique installée sur le site mesure au pas de temps de la minute l'ensemble des données climatiques du site ; les mesures effectuées concernent l'ensoleillement (global, direct et diffus), le vent (vitesse et direction mesurées à une hauteur de 2 m et 10 m), des données liées à l'air (température et humidité) et le rayonnement de grande longueur d'onde.

Les capteurs sont connectés à une centrale qui assure la fréquence des prises de mesures, le stockage des données, ainsi que le transfert des données automatiquement vers un poste informatique dédié. Ces données alimentent par ailleurs une base de données, accessible en ligne en permanence depuis le site internet du LPBS : <http://lpbs.univ-reunion.fr>.

Le volume des données à traiter est important puisque pas moins de 14000 mesures sont collectées par jour.

La chaîne d'acquisition (capteur de mesure et centrale d'acquisition) est de type Campbell. Les mesures liées à notre travail telles que l'éclairement naturel extérieur et intérieur sont collectées à partir d'appareils de type AHLBORN possédant leur propre centrale d'acquisition. Nous avons synchronisé les deux centrales d'acquisition afin de pouvoir exploiter les résultats des mesures.

Pour des raisons de commodité, nous avons placé notre luxmètre extérieur sur la toiture de la cellule LGI et les luxmètres intérieurs ont été alignés à l'intérieur, suivant la disposition de la Figure II.48. Ces derniers sont équidistants entre eux de 0.5 m. La distance entre le capteur A<sub>1</sub> et l'ouverture (porte en plexiglass) est de 0.23 m. Le choix des emplacements des capteurs intérieurs est lié au fait que la répartition lumineuse s'observe, à l'intérieur, de façon graduel à partir de l'ouverture. Ces positions, le long de l'axe du vitrage, nous permettent ainsi de suivre l'évolution de ce flux lumineux sur un plan utile et d'avoir une idée sur les valeurs d'éclairement à des emplacements aussi bien éloignées que proche de notre source (ouverture vitrée). Nous aurons aussi une forte probabilité de pouvoir mesurer l'éclairement provenant directement du soleil à des instants donnés grâce à ces positionnements et ainsi obtenir des valeurs de référence pour l'étude de journée type claire ou intermédiaire.



Site expérimental du LPBS



Luxmètres intérieurs



Station météorologique



Luxmètre extérieur

FIGURE II. 47. VUE D'ENSEMBLE DE L'EXPERIMENTATION POUR L'ETUDE DE L'ECLAIREMENT NATUREL INTERIEUR

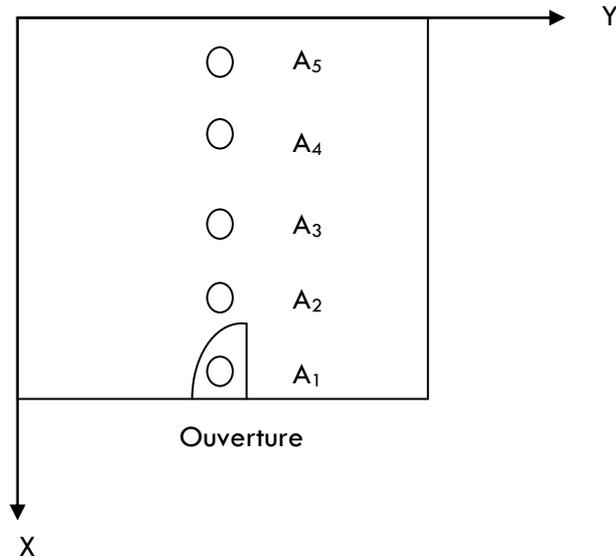


FIGURE II.48. POSITION DES POINTS DE MESURE D'ÉCLAIREMENT NATUREL INTERIEUR DE LA CELLULE LGI

#### II.4.5.2.3. MESURES DE REFERENCE

Nous avons mesuré simultanément l'éclairage naturel global intérieur aux positions (A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>, et A<sub>5</sub>) comme indiqué sur la Figure II.48 et le gisement solaire global extérieur pour plusieurs journées types. Les Figure II.49 et Figure II.50 donnent un exemple d'allure de ces courbes pour une journée intermédiaire à un pas de temps de la minute. Globalement, nous prendrons trois catégories de journées comme référence expérimentale : il s'agit de la journée du 08/02/08 (journée type intermédiaire), du 09/02/08 (journée type clair) et du 10/02/08 (journée type couvert).

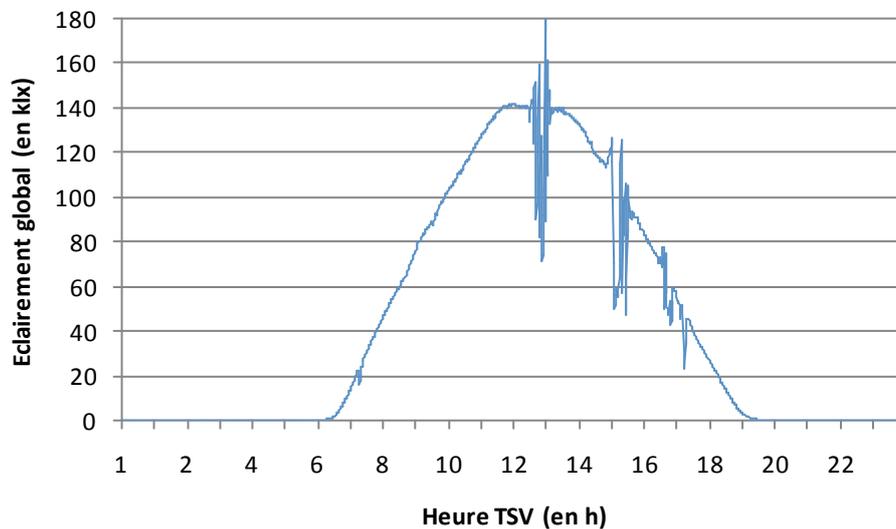


FIGURE II.49. GISEMENT LUMINEUX SOLAIRE (JOURNEE TYPE INTERMEDIAIRE)

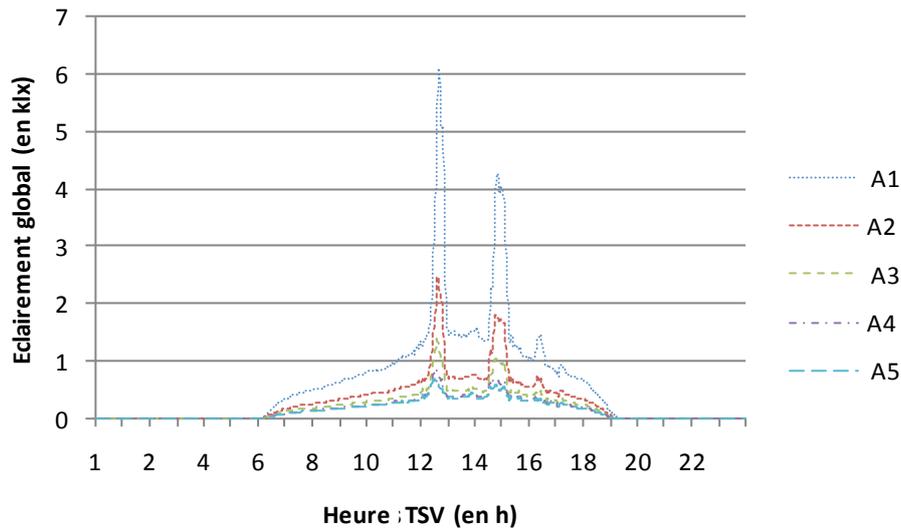


FIGURE II.50. ECLAIREMENT LUMINEUX INTERIEUR (JOURNEE TYPE INTERMEDIAIRE)

Erreur	identifications	Valeur d'erreur (en %)
Objective	Précision des capteurs	1 (intérieur) + 0.03 (centrale) + 9.9 (extérieur)
	Correction cosinus	2.9 (intérieur) + 2,9 (extérieur)
	Sensitivité spectrale	1 (intérieur) + 7 (extérieur)
Subjective	Effet de masque des instruments de mesure	inconnue
	Précision sur les positions et orientation des points de mesure	3

TABLEAU II.25. ERREUR DE MESURE SUR LA CELLULE LGI

Les erreurs de mesure subjectives et objectives sont données par le Tableau II.25 . L'erreur totale liée aux mesures est de 13.22 % et l'erreur globale est de 15 %.

### II.4.5.3. Hypothèse de simulation

Les conditions dans lesquelles nous avons simulé l'éclairage naturel à l'intérieur de la cellule LGI sont les suivantes :

- Albédo = 0.70
- Coefficient de réflexion des murs et du plafond (de couleur blanche) = 0.80
- Coefficient de réflexion du sol (dalle de couleur grise) = 0.20
- Cote du plan utile égale à 0.01 m (dimension verticale des capteurs lumineux intérieurs)
- Dimension de la grille surfacique : 0.1m x 0.1m.
- Coefficients multiplicateurs pour le FLJ: MG = FR = 0.8 et MF =0.9

### II.4.5.4. Résultats et comparaisons

Nous allons présenter les résultats de simulation obtenus pour les trois journées types en chaque point de mesure intérieure de l'éclairage naturel.

II.4.5.4.1. JOURNEE TYPE CLAIRE

Quelques résultats de simulation sont donnés par la Figure II. 51. Il s'agit de la comparaison du point A3. L'allure aux points A1, A2, A4 et A5 est pratiquement la même. Les erreurs par rapport aux mesures sont très élevées. Le degré de fiabilité dans l'ensemble est inférieur à 50 %. Ceci signifie que le logiciel a du mal à simuler l'éclairage intérieur dynamique.

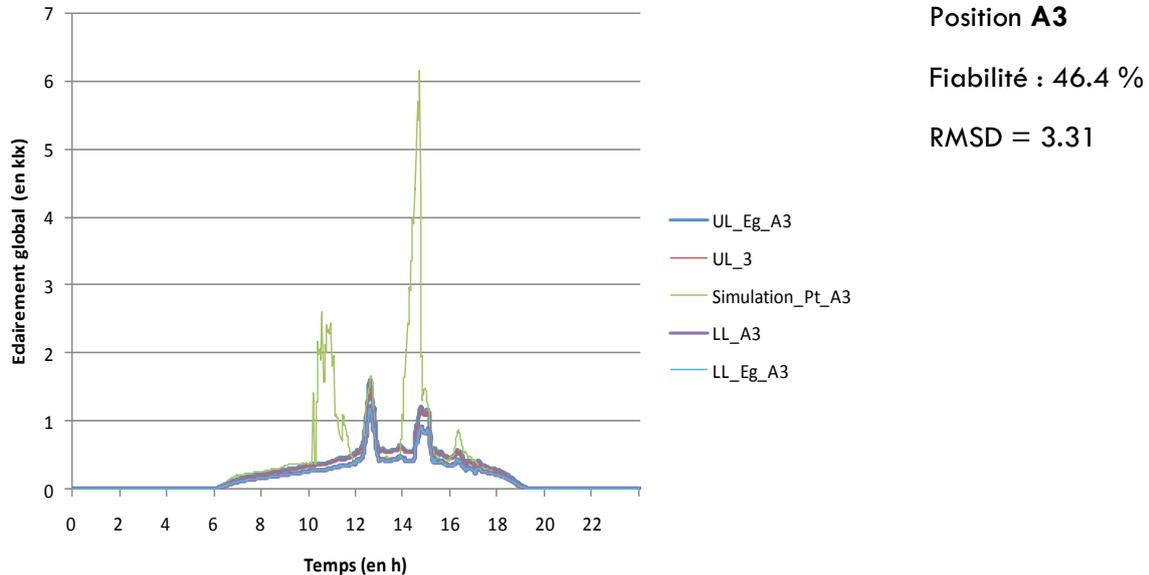


FIGURE II. 51. ECLAIREMENT INTERIEUR : JOURNEE TYPE CLAIRE AVEC DIRECT PROVENANT DU SOLEIL (PAS DE TEMPS DE LA MINUTE))

Notre premier constat est que, pour des valeurs d'éclairage naturel intérieur inférieures à 2 klx, les courbes de simulation ont tendance à se rapprocher des valeurs de référence, mais que, pour des valeurs élevées d'éclairage, les erreurs sont considérables. La seule variable à pouvoir nous donner des éclairages aussi élevés à l'intérieur de notre local est le direct provenant du soleil. Nous avons donc vérifié cette hypothèse en comparant les valeurs du global sans le direct avec les valeurs de référence. En effet, CODYRUN est capable de séparer l'éclairage direct simulé de l'éclairage diffus et global. Nous avons donc retracé les valeurs d'éclairage intérieur global (sans le direct provenant du soleil) en chaque point de mesure et comparé avec les valeurs mesurées. Les résultats de simulation sont donnés par la Figure II.52. Nous obtenons une fiabilité du logiciel à simuler l'éclairage naturel en chaque point supérieure à 50 %.

Les résultats montrent donc une précision du logiciel nettement mieux qu'auparavant. Nous concluons qu'à chaque fois qu'un point de mesure est éclairé par le direct provenant du soleil, les erreurs entre la simulation et les valeurs de référence aux points considérés sont trop grandes. Ceci est dû probablement au fait que la plage de mesure de nos capteurs intérieurs ne peut excéder 12 000 lx (voir Annexe C pour les caractéristiques des capteurs). Cette valeur seuil est bien au-dessous des valeurs mesurables provenant du direct du soleil.

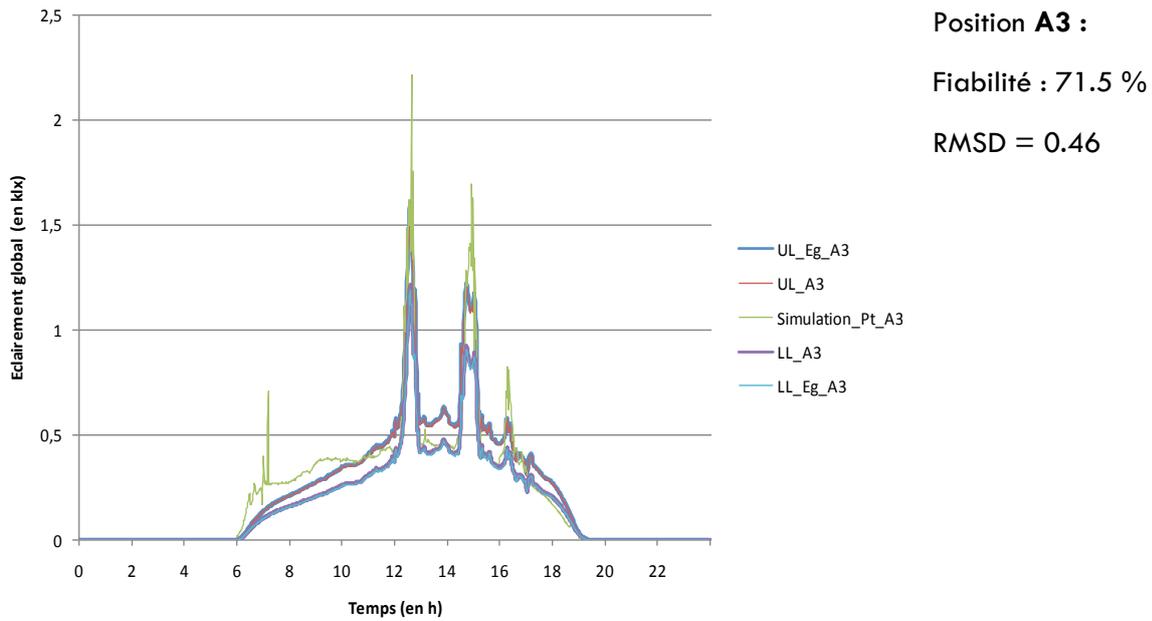


FIGURE II.52. ECLAIREMENT INTERIEUR : JOURNEE TYPE CLAIRE SANS DIRECT PROVENANT DU SOLEIL (PAS DE TEMPS DE LA MINUTE)

Les phénomènes photométriques n'ont pas d'inertie. Ils se produisent plutôt instantanément et varient brusquement d'un instant à un autre. C'est d'ailleurs l'une des raisons qui nous a poussés à prendre des pas de temps de mesure à la minute. L'inconvénient d'avoir pris de tels pas de temps est que cela accroît les erreurs lors de la comparaison avec les résultats de simulation. Pour le prouver, nous avons simulé, au pas de temps horaire, la même situation qu'auparavant et avons obtenu la figure qui suit (pour le même point, A3, de référence que précédemment) :

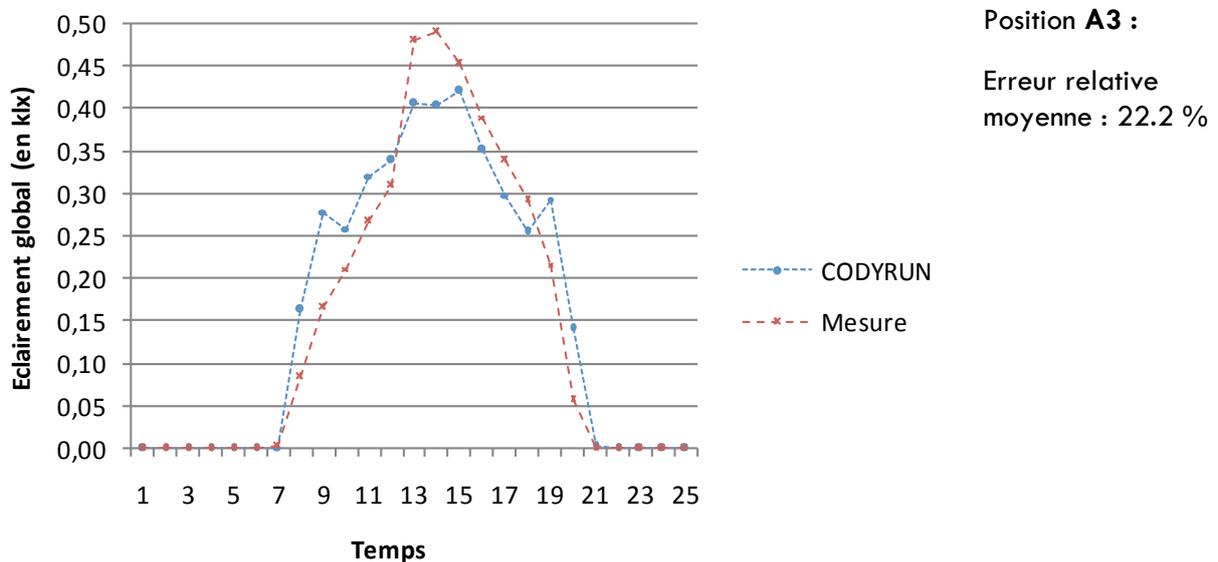


FIGURE II. 53 ECLAIREMENT GLOBAL (AVEC DIRECT) INTERIEUR : JOURNEE TYPE CLAIRE (PAS DE TEMPS HORAIRE)

Il apparaît clairement que les valeurs de référence ainsi que celles obtenues à partir de la simulation ont complètement changés. La moyenne des valeurs au pas de temps horaire est loin de caractériser le phénomène réel qui s'est produit, à chaque instant, comme illustré dans la Figure II.52. Cependant, on constate qu'il y a une nette cohérence entre les résultats de simulation et les valeurs mesurées, contrairement à la comparaison précédente où les valeurs du direct provenant du soleil ont engendrés des erreurs beaucoup élevées.

II.4.5.4.2. JOURNEE TYPE INTERMEDIAIRE

Nous ne montrerons ici que le cas du point de référence à la position A1. La Figure II.54 nous montre un exemple des résultats de comparaison entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées des éclairagements. Les résultats obtenus sur les autres positions sont pratiquement semblables et le constat est pratiquement le même que pour l'étude d'une journée type claire. CODYRUN présente une fiabilité de 61.7 %.

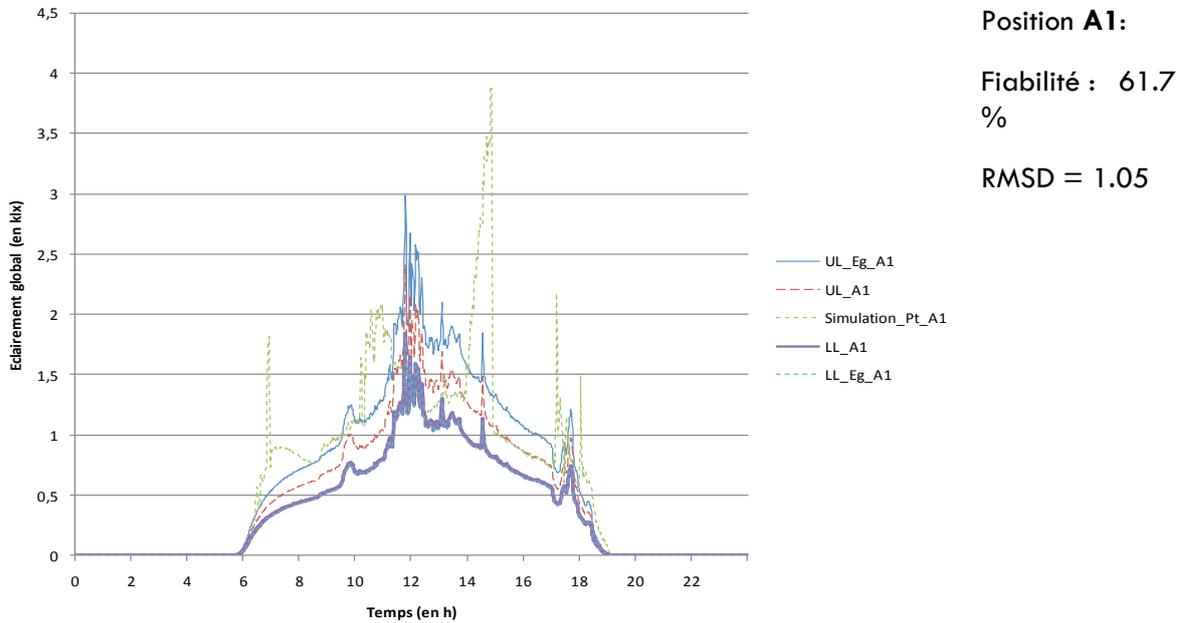


FIGURE II.54. ECLAIREMENT INTERIEUR : JOURNEE INTERMEDIAIRE AVEC DIRECT DU SOLEIL

Une fois encore, le direct provenant du soleil a faussé les mesures. Pour le prouver nous n'avons pris que le global simulé (sans le direct du soleil) de la journée considérée. Les résultats de simulation nous sont donnés par la Figure II.55 .

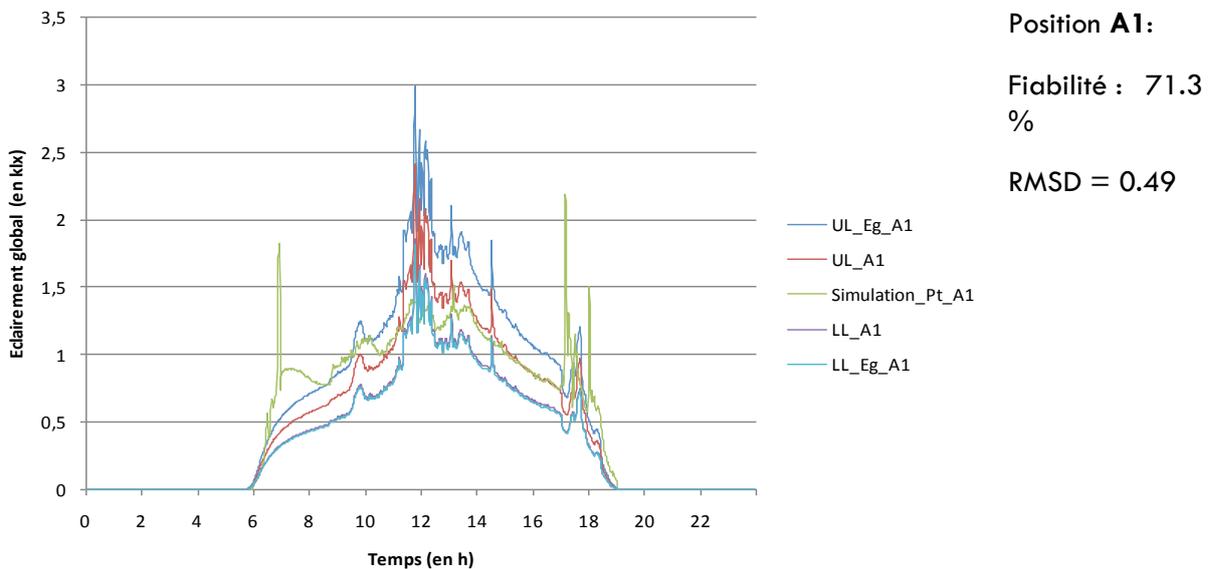


FIGURE II.55. ECLAIREMENT INTERIEUR : JOURNEE TYPE INTERMEDIAIRE SANS DIRECT DU SOLEIL

Nous avons obtenu une fiabilité supérieure à 61 %. Ce qui signifie que les simulations sont assez cohérentes par rapport à la réalité et nettement mieux. La Figure II. 56 compare les valeurs de simulation avec celles de référence au pas de temps horaire sur le même point A1.

Ce jour-là, le temps était plutôt clair le matin et nuageux l'autre moitié de la journée. Ceci explique pourquoi le logiciel a du mal à reconstituer la répartition lumineuse globale la matinée, et qu'au contraire, les valeurs de simulation de la fin d'après-midi concordent mieux avec celles des mesures.

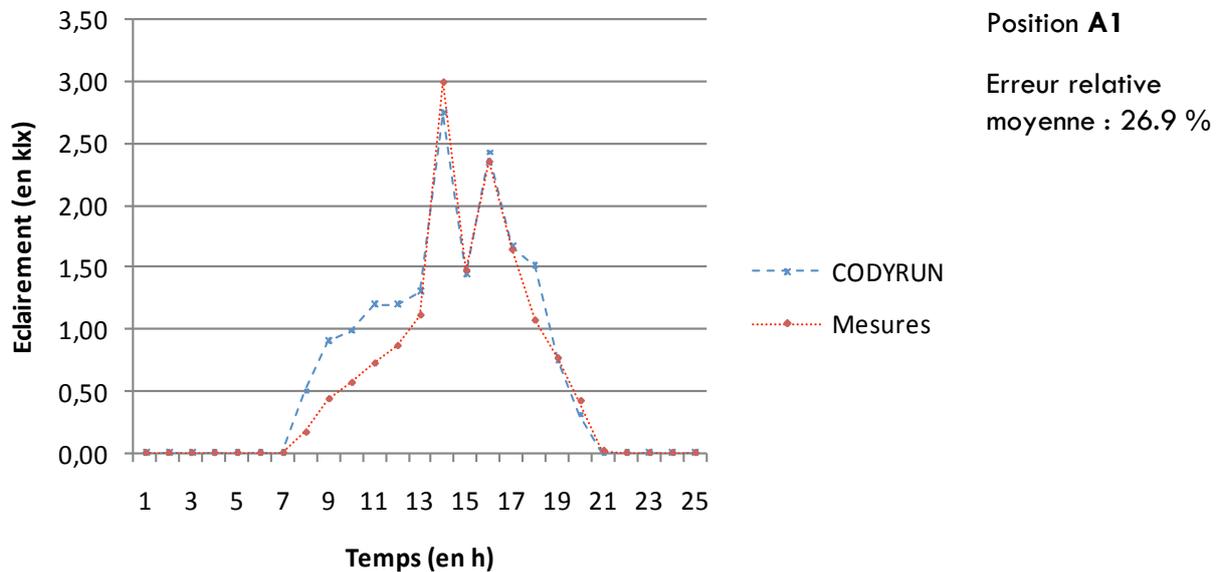


FIGURE II. 56 ECLAIREMENT GLOBAL INTERIEUR : JOURNEE TYPE INTERMEDIAIRE AU PAS DE TEMPS DE L'HEURE

#### II.4.5.4.3. JOURNEE TYPE COUVERTE

Comme précédemment, nous allons commenter les résultats de simulation obtenus, cette fois-ci, sur trois points de mesure (A1, A3 et A5). Les résultats de simulation sont donnés par la Figure II.57 .

Dans la plupart des cas, c'est entre 10 h 30 mn et 12 h 45 mn que les valeurs de simulation sous CODYRUN sont les plus élevées par rapport aux valeurs de mesure (correspondant par exemple, à l'encadrement R<sub>2</sub> pour le cas de la position de référence A3). Ceci s'explique par le fait que la cellule LGI dispose d'un auvent (masque proche) du côté nord qui empêche une partie de l'éclairage diffus provenant de la voûte céleste de pénétrer à l'intérieur. Cette condition n'est pas encore prise en compte par le logiciel pour l'instant.

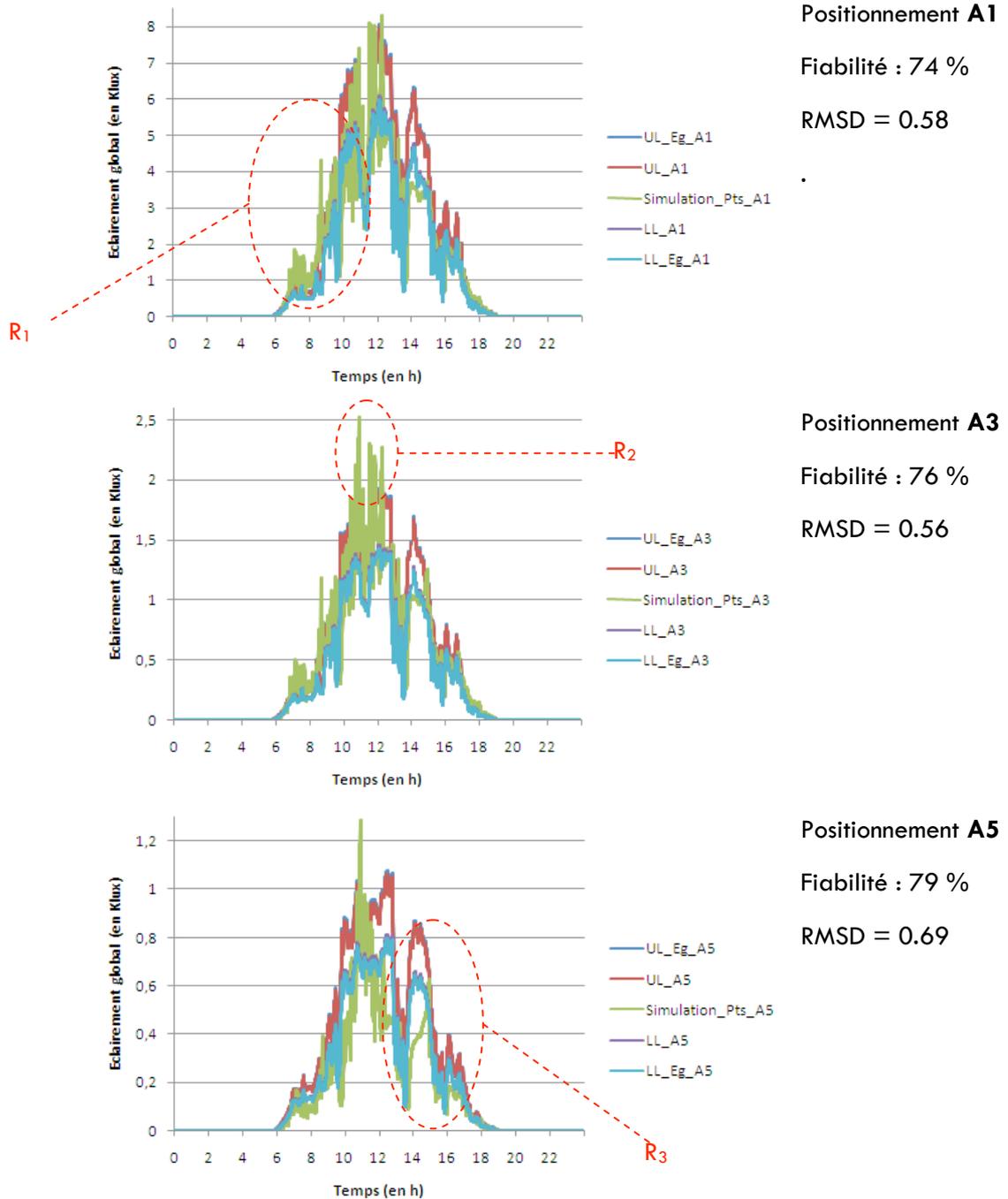


FIGURE II.57. ECLAIREMENT INTERIEUR : JOURNEE TYPE COUVERTE (CELLULE LGI)

Nous constatons aussi (pour les 5 points de mesure) une différence notable entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées la matinée par rapport à l'après-midi :

- En effet, du lever du soleil jusqu'à 12 h 00 mn, qui correspond à R<sub>1</sub> par exemple dans le cas du point de référence A1, CODYRUN prend mieux en compte l'éclairage intérieur. Ceci est dû certainement à la déclaration de nos obstacles (bâtiments voisins) au voisinage des parois nord – est (côté où se lève le soleil) et qui sont pris en compte dans les calculs d'éclairage naturel intérieur par le logiciel. Des calculs de coefficients diffus provenant des parois de ces obstacles (masques lointains) sont ainsi faits lors de la simulation.

- Pour ce qui est de l'après-midi, nous voyons par exemple, à partir de R<sub>3</sub> au niveau du point A5, que les valeurs données par la simulation sont a priori beaucoup moins élevées que celles données par les mesures, mais restent cependant dans l'ensemble proches de ces derniers. Le fait que les parois sud et ouest soient opaques et que l'auvent situé du côté nord et est n'influence pas vraiment le diffus provenant de la voûte céleste à ces heures de la journée fait que nous obtenons des valeurs de simulation moins élevées, mais plus cohérentes par rapport aux valeurs de mesure.

Comme précédemment, nous nous sommes intéressés à la comparaison de ces mêmes valeurs de référence avec celles de la simulation, mais au pas de temps horaire. Les résultats présentés montrent, dans l'ensemble, une bonne précision du logiciel dans le calcul de l'éclairage global intérieur. Exception faite aux points les plus reculés par rapport à l'ouverture, mais également ceux situés juste au-dessus.

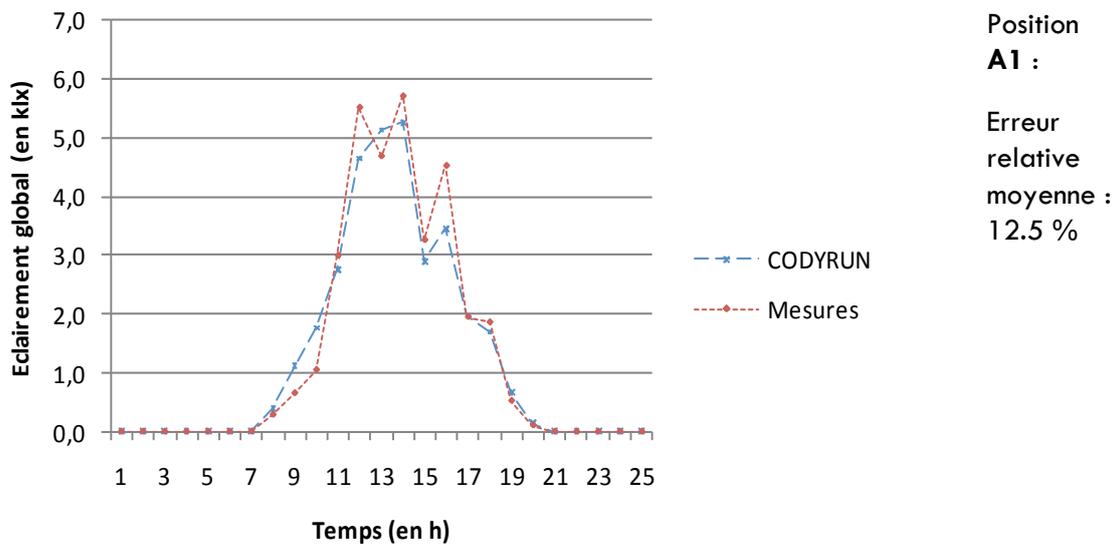


FIGURE II. 58 ECLAIREMENT GLOBAL INTERIEUR : JOURNEE TYPE COUVERTE AU PAS DE TEMPS DE L'HEURE (A1)

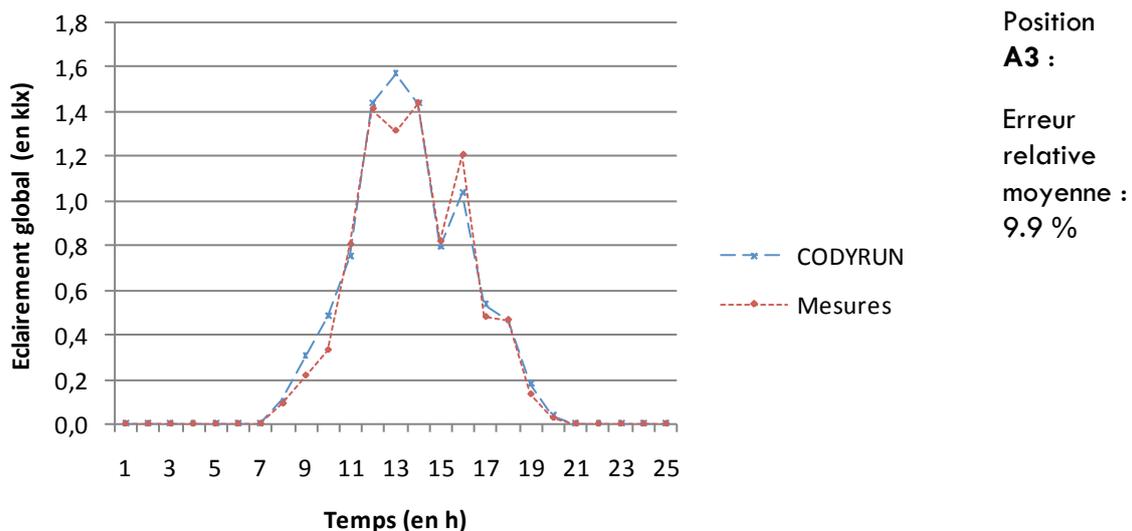


FIGURE II. 59 ECLAIREMENT GLOBAL INTERIEUR : JOURNEE TYPE AU PAS DE TEMPS DE L'HEURE (A3)

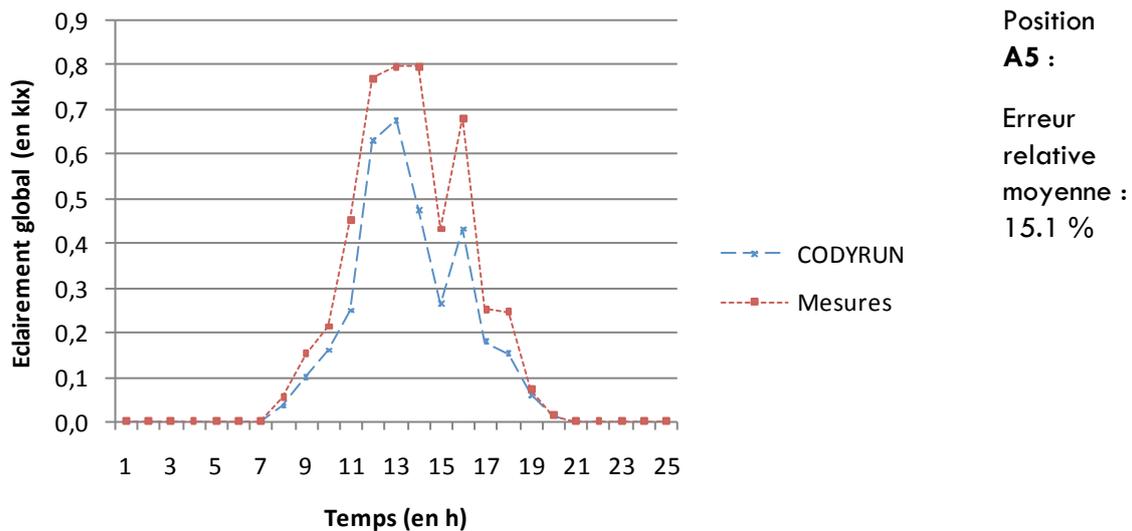


FIGURE II. 60 ECLAIREMENT GLOBAL INTERIEUR : JOURNEE TYPE AU PAS DE TEMPS DE L'HEURE (A5)

Pour conclure, nous dirons que dans le cas d'une journée type couverte, le direct provenant du soleil n'intervient pas. C'est pour cela que nous obtenons des valeurs assez proches de la réalité avec une fiabilité supérieure ou égale à 68 %. Globalement, CODYRUN a tendance à sous-estimer les valeurs d'éclairage naturel intérieur. C'est sur la position la plus exposée à la lumière (point de référence A2) que le logiciel commet la plus grande erreur (environ 0.66 de RMSD et 68 % de fiabilité). Cela est dû sûrement au fait que c'est la position où le masque proche est le plus influent.

#### II.4.5.5. Conclusions du régime dynamique

Nous avons simulé l'éclairage naturel intérieur pour une journée type claire et nous avons constaté que le logiciel commettait des erreurs assez grossières. Le problème rencontré est que la plage de mesure de nos capteurs ne dépasse pas 12 000 lx, ce qui est largement au-dessous de la valeur obtenue en un point intérieur éclairé par le direct du soleil (lieu des taches solaires par exemple).

Pour en avoir la certitude, nous avons comparé ces valeurs mesurées avec celles simulées par le logiciel sans tenir compte du direct provenant de soleil. Les résultats nous ont prouvé que dans ce dernier cas de figure, les valeurs simulées se rapprochent beaucoup plus des valeurs de référence (mesurées).

La même situation s'est présentée lors de l'étude d'une journée type intermédiaire et le constat a été similaire.

Nous avons ensuite simulé le cas d'une journée type couverte. Les erreurs commises par le logiciel sont causées par les masques proches (auvents) que CODYRUN ne prend pas en charge pour le moment.

Un autre constat, qu'on avait déjà mis en relief dans les cas tests analytiques et comparatifs, est que les erreurs commises par le logiciel en éclairage naturel sont pour la plupart plus élevées aux points les plus éloignés de l'ouverture ou très proches de cette dernière.

L'écart quadratique moyen (RMSD) de l'ensemble des simulations réalisées ici (tous les types de journées compris) est d'environ 0.61 %. En considérant les erreurs relatives de ces mêmes simulations au pas de temps horaire, on obtient une moyenne d'erreurs de 32.7 %

### II.4.6. Conclusion sur les cas tests expérimentaux

Nous avons présenté des résultats de simulations et de confrontations entre le logiciel CODYRUN et les cas tests avec références expérimentales, aussi bien en éclairage naturel qu'artificiel.

Concernant l'éclairage naturel, nous nous sommes appuyés sur trois cas tests : la maquette expérimentale avec ciel artificiel, étudiée par Maamari, les références tests du modèle réduit de l'EPFL et le cas réel de bâtiment test de l'IEA (le bâtiment HUT en Finlande). Les résultats obtenus nous ont permis de mieux évaluer encore le logiciel sur sa capacité à simuler l'éclairage naturel intérieur.

S'agissant de l'éclairage artificiel, nous avons utilisé les deux scénarios de référence de la tâche TC-3-33 du CIE. Cela a fourni un aperçu de la capacité du logiciel et ses limites à pouvoir calculer l'éclairage intérieur en un point donné.

Et enfin, nous avons étudié l'éclairage naturel intérieur à travers un cas réel local en régime dynamique suivant trois types de journées. Les expériences ont été menées sur la cellule expérimentale du laboratoire.

Le Tableau II.26 résume les erreurs commises pour tous les cas tests expérimentaux et la moyenne des erreurs de l'ensemble. C'est dans les cas tests expérimentaux que les erreurs les plus élevées et les plus nombreuses ont été observées. Les causes principales des erreurs commises par le logiciel sont le positionnement des points de référence sur des endroits où les phénomènes photométriques sont complexes et mal retraduits par des modèles simplifiés, mais aussi la non prise en charge de certains facteurs externes au bâtiment tels que les masques proches qui influencent beaucoup les calculs d'éclairage intérieur.

	Référence Cas tests	Erreur moyenne(en %)
Eclairage Naturel	III.2.5	3.38
	Modèle réduit EPFL (IEA)	9.31
	Modèle réel HUT (IEA)	11.31
	Cellule LGI	32.7
Eclairage artificiel	Scénario 1 (TC-3-33)	6.1
	Scénario 3 (TC-3-33)	1.57
<b>Minimum =</b>		<b>1.5</b>
<b>Maximum =</b>		<b>32.7</b>
<b>Moyenne erreur =</b>		<b>17.1</b>

TABLEAU II.26. MOYENNE D'ERREURS DE SIMULATION DES CAS TESTS EXPERIMENTAUX SELECTIONNES

## II.5. Conclusion sur les résultats des cas tests

Le Tableau II.27 résume tous les cas tests que nous avons fait subir à CODYRUN ainsi que les erreurs commises pour chaque cas.

Le logiciel a passé avec succès certains cas tests sélectionnés par rapport à d'autres où les erreurs commises ont été non négligeables mais acceptables. Globalement, c'est dans la catégorie des tests de comparaison inter-logiciels que CODYRUN a donné les résultats les plus probants. Ceci s'explique sûrement par le fait que les logiciels de simulation d'éclairage (naturel et artificiel) ayant déjà été validés et utilisés lors de notre étude connaissent pratiquement tous les mêmes problèmes et ont en majorité le même degré de fiabilité. Les outils mis en place de nos jours pour caractériser les phénomènes photométriques ont tous du mal, par exemple, à simuler correctement l'éclairage (artificiel ou et/ou naturel) reçu par les points les plus éloignés de l'ouverture latérale ou encore les plus proches de cette dernière.

Viennent ensuite les tests analytiques. En effet, ces tests nous ont à nouveau prouvé que le logiciel était en mesure de caractériser aussi bien l'éclairage naturel intérieur que le gisement lumineux solaire (éclairage naturel extérieur). Les erreurs commises dans ces cas de figure sont dues pour la plupart à la différence entre les multiples choix des modèles de référence utilisés et ceux introduits dans le logiciel et qui ne donnent donc pas tout à fait les mêmes résultats par rapport aux calculs analytiques.

Et enfin, soulignons que les tests expérimentaux sont beaucoup plus compliqués à mettre en œuvre et nécessitent beaucoup de moyens matériels, financiers et techniques. En effet, les démarches pour mettre en place des mesures de référence deviennent très minutieuses et demandent une rigueur sans faille : le positionnement des capteurs de mesure, les obstacles pouvant influencer les mesures, l'assurance d'un matériel répondant parfaitement aux attentes expérimentales sont les maîtres mots d'une telle étude. Les valeurs de mesure doivent être bornées (limites supérieure et inférieure) à partir des erreurs objectives et subjectives de mesure et la vérification entre les références expérimentales et la simulation doit être effectuée non pas entre la mesure et la simulation mais plutôt entre les limites (supérieure et inférieure) et nos valeurs de simulation. Nous nous sommes heurtés à ces problèmes lors de l'étude en régime dynamique de l'éclairage naturel intérieur. Toutefois, les résultats de comparaison simulation / mesures nous ont montré que dans l'ensemble, le logiciel simulait de manière cohérente et assez bien le profil sur un plan utile de l'éclairage naturel et artificiel intérieur.

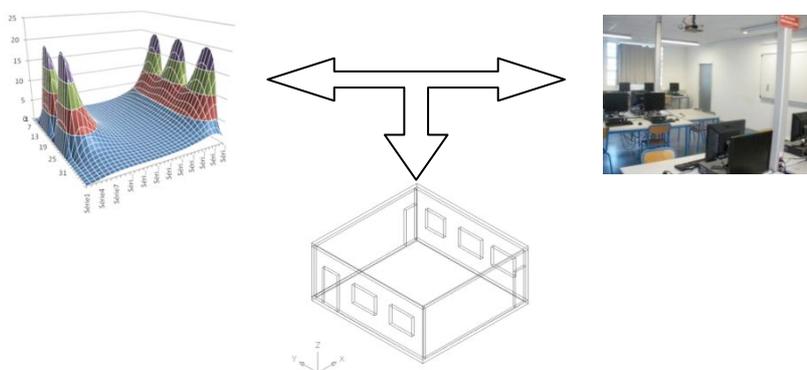
En conclusion, nous venons de voir que le logiciel CODYRUN a passé avec succès la totalité des tests que nous lui avons soumis. Certes, des améliorations restent encore à faire, notamment pour le calcul des points les plus éloignés des ouvertures ou bien ceux plus proches.

Type de test	lumière	Cas test	Erreur relative (%)	Fiabilité (%)	Etat du test
analytique	Naturel	II.10	3.87	91.44	Ouverture latérale
	Naturel	II.11	4.54	93.65	Différents Types de ciels CIE
	Naturel	II.14.4	1.96	98.04	Diffus (facteur de forme)
	Naturel	II.14.9	15.61	84.34	Gisement solaire
	Artificiel	II.1	0.25	99	Source ponctuelle
	Artificiel	II.2	2.33	86	Source surfacique
	Artificiel	II.7	1.39	95	Facteur de réflexion
	Artificiel	Complément	0.55	89	Multi-source
Comparatif	Naturel	CSTB	5.92	95	FLJ
	Artificiel	TC-3-33	3.18	90	Source surfacique
expérimental	Naturel	III.2.5	3.38	93.49	Ciel artificiel
	Naturel	(IEA)	9.31	74.46	Modèle réduit EPFL
	Naturel	(IEA)	11.31	70.92	Modèle réel HUT
	Naturel	Cellule LGI	32	88.95	Régime dynamique
	Artificiel	Scénario 1	6.1	69.38	TC-3-33
	Artificiel	Scénario 3	1.57	60.53	TC-3-33
		<b>Minimum =</b>	<b>0.01</b>	<b>60.53</b>	
		<b>Maximum =</b>	<b>32</b>	<b>98.04</b>	
		<b>Moyenne =</b>	<b>7.81</b>	<b>86.59</b>	

TABLEAU II.27. RECAPITULATIF : DEGRE DE FIABILITE DU LOGICIEL DE SIMULATION D'ECLAIRAGE CODYRUN



# APPLICATION AL'ETUDE D'UNE SALLE DE CLASSE



## Chapitre III

## Application du logiciel en ingénierie

Ce chapitre décrit un exemple type de la simulation de l'éclairage (artificiel et/ou naturel) à l'aide de CODYRUN afin d'expliciter son utilisation. Notre objet d'étude est une salle de travaux pratiques de l'IUT de Saint-Pierre (Université de la Réunion). Nous montrons comment, à partir de l'outil informatique, il est possible d'étudier la répartition lumineuse intérieure, le confort visuel, mais aussi de rechercher des solutions architecturales afin d'améliorer les conditions d'ambiance de l'enveloppe étudiée.



## Tables des matières

<b>III.1.OBJECTIF DU PROJET D'ETUDE D'ECLAIRAGE (INGENIERIE)</b> .....	<b>132</b>
<b>III.2.DESCRPTION DU BATIMENT</b> .....	<b>132</b>
III.2.1. Localité .....	132
III.2.2. Architecture du bâtiment .....	132
III.2.3. Dimensions et caractéristiques du local.....	134
III.2.4. Etude des obstacles.....	134
<b>III.3.MODELISATION SOUS CODYRUN</b> .....	<b>136</b>
III.3.1. Présentation et utilisation de l'outil pour l'éclairage.....	136
III.3.2. Modélisation du bâtiment et de l'ambiance intérieure.....	138
III.3.3. Hypothèses de simulation .....	138
<b>III.4.EXPLOITATION DES RESULTATS DE SIMULATION</b> .....	<b>138</b>
III.4.1. Etude de l'éclairement naturel .....	139
III.4.1.1. Détermination et étude du Facteur de Lumière du Jour (FLJ) .....	139
III.4.1.2. Fréquence d'éclairement lumineux moyen .....	140
III.4.1.3. Etude de l'éclairement global intérieur pour des journées types.....	143
III.4.1.4. Fréquence de la tache solaire.....	145
III.4.1.5. Eclairement lumineux global intérieur dans l'année .....	146
III.4.2. Etude de l'éclairage artificiel : respect de la norme NF/EN/ 12464-1 .....	147
III.4.3. Amélioration des conditions de confort visuel et optimisation énergétique .....	148
<b>III.5.CONCLUSIONS DE L'ETUDE DE LA SALLE TD2</b> .....	<b>149</b>

### III.1. Objectif du projet d'étude d'éclairage (ingénierie)

Après avoir introduit des éléments de validation sur les modèles et algorithmes conçus pour l'éclairage artificiel et naturel, nous avons jugé utile de présenter l'outil et ses possibilités d'applications.

Dans un premier temps, l'enveloppe du bâtiment étudié est décrite. Puis, à titre d'illustration, une description détaillée des étapes de simulation sous CODYRUN est présentée. Nous ferons alors un diagnostic complet de l'éclairage naturel et de l'éclairage artificiel à l'intérieur de la salle. Concernant l'éclairage naturel, le but est d'étudier les périodes (horaires ou mensuelles) d'autonomie en éclairage de la salle. L'autonomie en éclairage d'un bâtiment est par définition la capacité de ce dernier à tirer profit de la lumière naturelle pour éclairer convenablement l'intérieur durant une période donnée. Cette optimisation réduit l'utilisation de l'éclairage artificiel. Les études sont menées sur trois journées types (couverte, intermédiaire et claire) au pas de temps horaire, puis sur une année type (avec une analyse mensuelle). Pour l'éclairage artificiel, nous nous intéressons à la conformité de la salle aux normes européennes en matière d'éclairage.

Nous verrons enfin comment exploiter les résultats de simulation obtenus, dans le but non seulement d'améliorer les conditions de confort visuel, mais aussi de réduire la consommation électrique. En effet, à partir des simulations, il est possible de faire des propositions d'amélioration du bâtiment.

### III.2. Description du bâtiment

#### III.2.1. Localité

Le bâtiment étudié se situe à Saint-Pierre (sud de l'île) à une latitude de 21°19' Sud et une longitude de 55°28' Est, à une altitude d'environ 68 m. Le climat est de type tropical humide.

#### III.2.2. Architecture du bâtiment

La salle, dénommée TD2 dans le reste de ce chapitre, est située dans le département de Génie civil de l'Institut Universitaire de Technologie de Terre – Sainte (Figure III.2). Elle est entourée par la salle TD1 au nord et TD3 au sud (Figure III.3). Au-dessus se trouve également la salle TD4.

Étant donné que ces locaux adjacents n'ont aucune incidence sur l'éclairage intérieur de la salle étudiée, il ne sera donc pas utile de les prendre en considération dans la modélisation.

Chaque constituant (ou polygone) de notre local est représenté par des points dans l'espace cartésien. Par exemple, la paroi externe de la porte située au nord (Figure III.2) est formée de 4 points ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  et  $P_4$ ) de coordonnées respectives  $P_1$  (5.4, 7.56, 0.16),  $P_2$  (5.4, 7.56, 2.26),  $P_3$  (6.4, 7.56, 2.26) et  $P_4$  (6.4, 7.56, 0.16).



FIGURE III.1. SALLE DE TD2 DE L'IUT DE SAINT-PIERRE

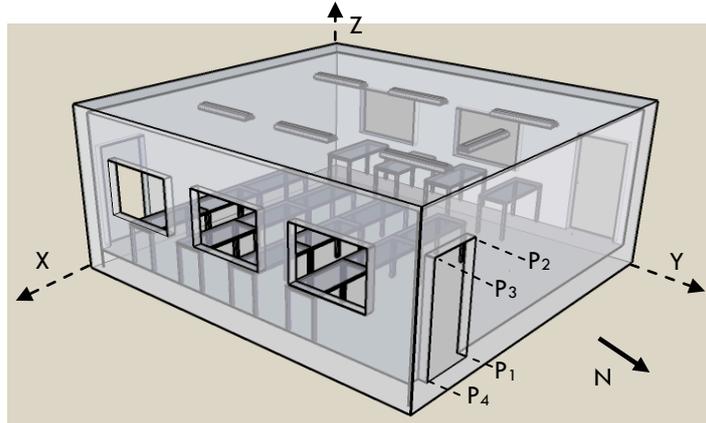


FIGURE III.2. LA SALLE TD2 EN PERSPECTIVE

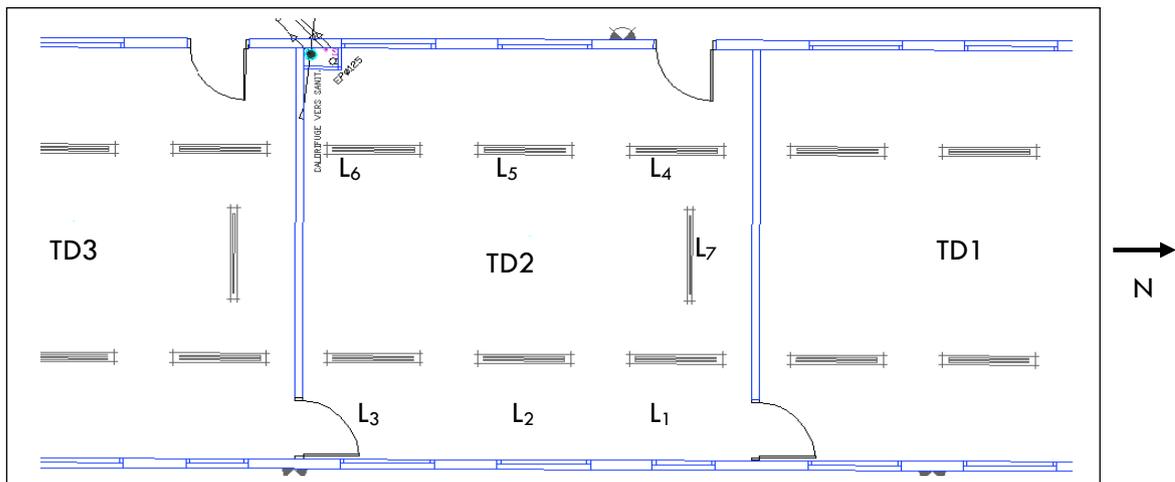


FIGURE III.3. PLAN DES SALLES

Les coordonnées ainsi que les intensités mesurées des luminaires sont données par le tableau ci-dessous :

Luminaires	Coordonnées	Intensité (Candela)
L <sub>1</sub>	(1.94 ; 2.10 ; 2.90)	1290
L <sub>2</sub>	(1.94 ; 3.60 ; 2.90)	1370
L <sub>3</sub>	(1.94 ; 5.10 ; 2.90)	1350
L <sub>4</sub>	(4.94 ; 2.10 ; 2.90)	1148
L <sub>5</sub>	(4.94 ; 3.60 ; 2.90)	1164
L <sub>6</sub>	(4.94 ; 5.10 ; 2.90)	1372
L <sub>7</sub>	(3.37 ; 0.05 ; 2.60)	955

TABLEAU .III.1. COORDONNES DANS L'ESPACE ET INTENSITE DES LUMINAIRES

### III.2.3. Dimensionset caractéristiques du local

La salle TD2 a les dimensions suivantes : 7.2 m de longueur, 6.74 m de largeur et 3 m de hauteur, soit environ 145 m<sup>3</sup>. Deux vitrages sont situés sur la façade ouest (grande ouverture) et trois autres sur la façade est (une petite ouverture et deux grandes ouvertures).

Les dimensions des grandes ouvertures sont de 1.10 m de hauteur sur 1.50 m de largeur, tandis que celles de la petite fenêtre sont de 1.10 m de hauteur sur 1.20 m de largeur. Les portes font 2.1 m de hauteur sur 1 m de largeur chacune. Elles sont au nombre de trois et sont positionnées respectivement au sud, au nord et à l'ouest.

Les coefficients de réflexion des murs, plafond et sol sont estimés, suivant leur couleur, respectivement à 80 %, 70 % et 60 %. Les coefficients de transmission de chaque vitrage (simple) sont de 85 %. Les coefficients de réflexion de chaque porte sont estimés à 70 %.

### III.2.4. Etude des obstacles

Les façades est et ouest sont exposées au soleil. Cependant, la présence d'obstacles extérieurs tels que les bâtiments voisins, modifie considérablement la pénétration lumineuse à l'intérieur de la salle TD2. Nous devons donc tenir compte de ces masques lointains.

Le facteur solaire est le pourcentage de surface (n'excédant donc pas 100 %) à l'ombre d'un obstacle extérieur. Le calcul du facteur solaire (FS) est réalisé à partir de la relation suivante (EQ III.1), si l'on considère comme infinie la dimension latérale du masque :

$$FS = \left( \frac{S_{tot} - S_o}{S_{tot}} \right) \times 100 \quad \text{EQ III. 1}$$

Où  $S_{tot}$  est la surface totale de la façade étudiée et  $S_o$  la surface ombragée due au masque. Cette relation conduit aussi à :

$$FS = \left( \frac{d_{tot} - d_o}{d_{tot}} \right) \times 100 \quad \text{EQ III. 2}$$

$d_{tot}$  et  $d_o$  sont respectivement les hauteurs de la façade étudiée et de celle ombragée.  $d_o$  dépend de  $H_s$  (hauteur angulaire du soleil) et de  $A_z$  (azimut du soleil). Ces derniers s'obtiennent, par exemple, grâce au diagramme solaire de la Réunion et à l'orientation de la façade.

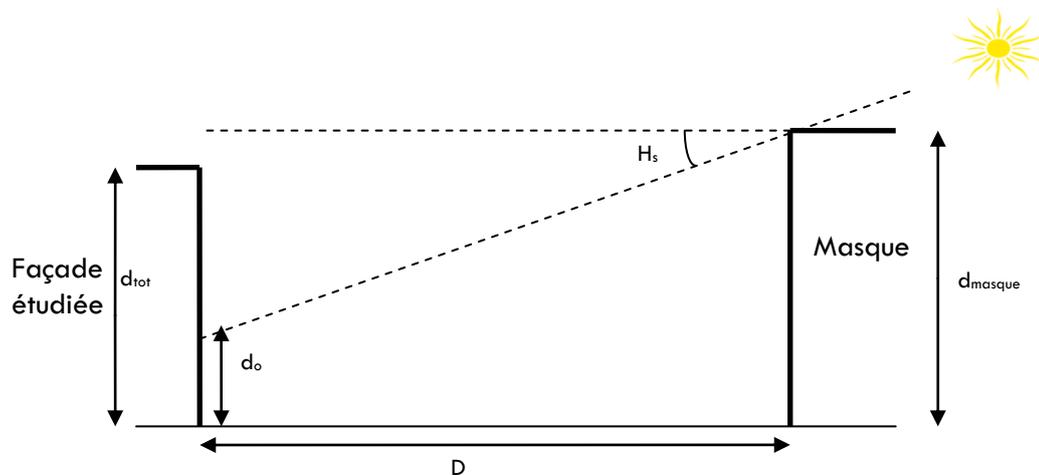


FIGURE .III.4. SCHEMATISATION DES MASQUES LOINTAINS

<b>Façade est</b>	$d_{tot}$ (m)	3	
	$d_{masque}$ (m)	3.2	
	D (m)	12.3	
	heure(TSV)	$H_z$ (en °)	FS (en %)
	6	0	0
	7	10.5	69
	8	20.8	100
	9	40	100
	10	55	100
	11	60.5	100
	12	70	100
	13		0
	14		0
	15		0
	16		0
	17		0
18		0	

TABLEAU III.2. FACTEUR SOLAIRE DE LA FAÇADE EST DE LA SALLE TD2

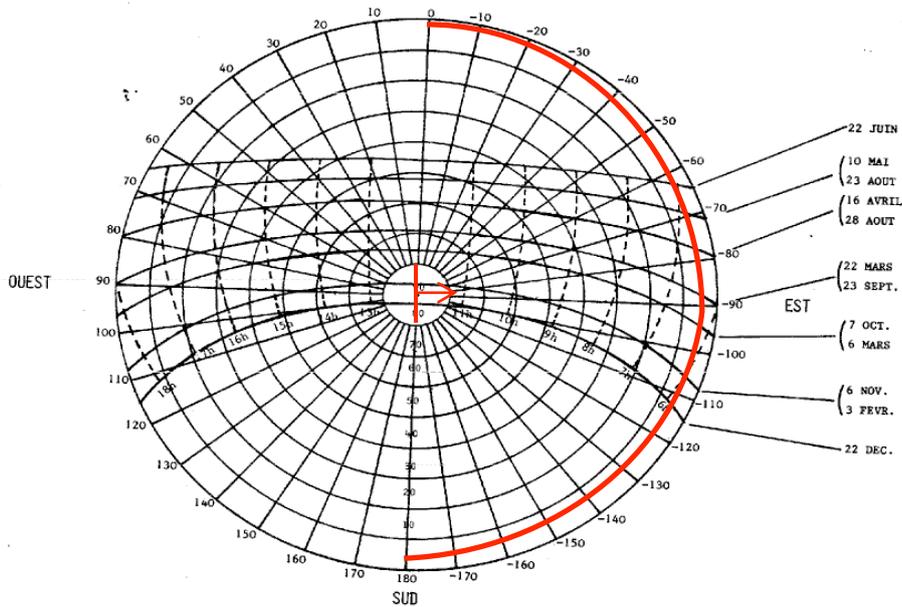


FIGURE III. 5. DIAGRAMME SOLAIRE DE LA REUNION : EXEMPLE D'ETUDE DES MASQUES LOINTAINS SUR LA PAROI EST

### III.3. Modélisation sous CODYRUN

#### III.3.1. Présentation et utilisation de l'outil pour l'éclairage

A l'origine, CODYRUN est 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 font 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. Ce travail de thèse a été l'occasion de compléter ce logiciel en y intégrant un outil de simulation des éclairagements. Il est intéressant de noter qu'à notre connaissance il s'agit du premier logiciel français traitant à la fois de l'éclairage (artificiel et naturel), du comportement thermo-aéraulique et des transferts hydriques à l'intérieur d'un bâtiment.

L'étude de l'éclairage se fait sur un plan utile, à une cote donnée, de l'ensemble des zones concernées par cette cote. La surface de ce plan utile est discrétisée en un nombre variable de points (ou nœuds) qui constituent la "grille surfacique". A la fin de la simulation, CODYRUN stocke, dans un fichier dédié aux résultats, l'évolution temporelle et spatiale des valeurs d'éclairage en chaque point de la "grille surfacique".

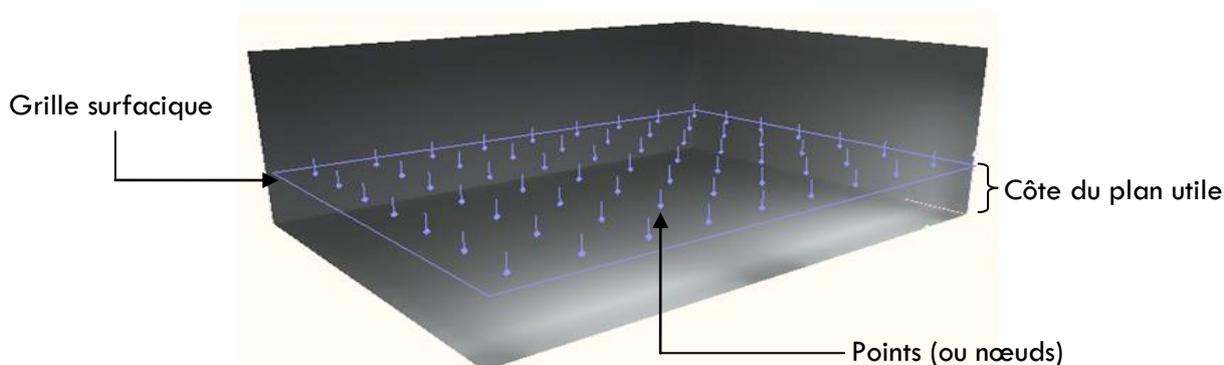


FIGURE III. 6. EXEMPLE D'UNE GRILLE SURFACIQUE DU PLAN UTILE : POINTS (OU NŒUDS) DE CALCUL D'ECLAIREMENT

Des améliorations au niveau de l'interface et des codes de calcul ont été apportées au logiciel afin de lui permettre de réaliser l'étude sur l'éclairage. Les modifications faites ont été les suivantes :

1. Gestion des fichiers météorologiques d'extension MTX. Ces fichiers sont au même format que ceux utilisés précédemment par l'application (i.e. MTO, en "héritage" à CODYBA, logiciel de simulation numérique en thermique du bâtiment, conçu à l'INSA de Lyon). La seule différence réside dans l'ajout d'une colonne qui correspond aux valeurs horaires ou sub-horaires (par exemple mesurées) d'éclairage global horizontal extérieur (en lux). La Figure III.7 illustre ce que nous venons d'énoncer;
2. Prise en compte des coordonnées dans l'espace des points délimitant les parois, vitrages et ouvertures constituant le bâtiment (Figure III.8). Il en résulte qu'il est possible d'obtenir une visualisation en 3D de la répartition du flux lumineux;
3. Définition d'un plan utile surfacique et de son maillage;
4. Amélioration du fichier résultat. Ce fichier fournit les valeurs d'éclairage (en klux) direct, diffus et global en chaque nœud du maillage de notre grille surfacique;
5. Création d'un fichier résultat spécifique appelé 'FLJ.fic' permettant d'afficher les valeurs temporelles et spatiales suivantes, dans les grilles surfaciques (définies en 3.) : facteur de lumière du jour (FLJ), éclairage global, direct et diffus provenant de la tache solaire intérieure et du ciel en chaque point de la grille (Figure III.9).

Eclairages lumineux extérieurs globaux (en lux)

```

080208.mtx - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
( 39 0 014 0 815198 0 9152 0 0 0119130
( 39 0 014 0 811213 0 9152 0 0 0120050
( 39 0 014 0 809228 0 9152 0 0 0121590
( 39 0 014 0 806246 0 9152 0 0 0122950
( 39 0 014 0 809263 0 9151 0 0 0124960
( 39 0 014 0 807273 0 9151 0 0 0127100
( 39 0 014 0 528270 0 9151 0 0 0116410
( 39 0 014 0 245276 0 9151 0 0 0070820
( 39 0 014 0 142286 0 9150 0 0 0056110
( 39 0 014 0 105293 0 9150 0 0 0050410
( 39 0 014 0 105299 0 9150 0 0 0050130
( 39 0 014 0 108307 0 9050 0 0 0051770
( 39 0 014 0 128317 0 9049 0 0 0056580
( 39 0 014 0 120324 0 9049 0 0 0058570
( 39 0 014 0 109330 0 9049 0 0 0056140
( 39 0 014 0 106338 0 9049 0 0 0053460
( 39 0 014 0 109346 0 9048 0 0 0057050
( 39 0 014 0 130352 0 9048 0 0 0058600
( 39 0 014 0 186353 0 9048 0 0 0064650
( 39 0 014 0 282349 0 9048 0 0 0072710
( 39 0 014 0 390344 0 9048 0 0 0110900
( 39 0 014 0 653341 0 9047 0 0 0114710
    
```

FIGURE III.7. EXEMPLE DE FICHIER MTX

FIGURE III.8. FENETRE PERMETTANT DE RENSEIGNER LES COORDONNES DE LA PORTE SITUÉE AU NORD DE LA SALLE TD2

```

FLJ.Fic: WordPad
Fichier Edition Format Insertion Format ?
-----
Mètre = 1.0
Cote plan utile = 0.200 m
Angle entre Ox et le Sud = 90.00°
Dimensions (X,Y) du plan utile : (2.950, 2.950) m
Maillage (X,Y) du plan utile en (14 x 14) points
Point (0,0) de la grille : x = 0.000,y = 0.000 ,z = 0.200
Point (0,1) de la grille : x = 0.000,y = 0.200 ,z = 0.200
Point (1,0) de la grille : x = 0.200,y = 0.000 ,z = 0.200
Point (1,1) de la grille : x = 0.200,y = 0.200 ,z = 0.200
Résolution en (X,Y) : (0.200, 0.200) m
FLJ ----->?
FLJ Total (Re+Im+Re)
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 5.59 5.62 5.65 5.67 5.69 5.71 5.72 5.72 5.71 5.69 5.67 5.64
0.00 5.66 5.69 5.73 5.77 5.80 5.82 5.83 5.84 5.83 5.82 5.79 5.76 5.73
0.00 5.73 5.78 5.84 5.88 5.93 5.96 5.98 5.99 5.98 5.94 5.93 5.89 5.83
0.00 5.82 5.89 5.96 6.04 6.10 6.15 6.18 6.19 6.18 6.15 6.10 6.03 5.96
0.00 5.93 6.02 6.12 6.22 6.32 6.39 6.44 6.46 6.44 6.39 6.31 6.23 6.12
0.00 6.42 6.78 6.89 7.04 7.18 7.30 7.37 7.40 7.37 7.29 7.17 7.03 6.80
0.00 6.74 6.92 7.12 7.33 7.54 7.73 7.85 7.90 7.85 7.72 7.53 7.32 7.11
0.00 6.86 7.10 7.37 7.69 8.01 8.31 8.53 8.59 8.51 8.29 8.00 7.67 7.36
0.00 6.96 7.27 7.65 8.10 8.60 9.08 9.43 9.56 9.42 9.06 8.58 8.08 7.63
0.00 7.02 7.39 7.89 8.54 9.32 10.12 10.74 10.90 10.72 10.08 9.27 8.31 7.87
0.00 6.99 7.42 8.04 8.92 10.09 11.46 12.85 13.12 13.60 11.39 10.02 8.87 8.00
0.00 6.85 7.28 7.94 9.03 10.71 13.06 15.49 16.52 15.39 12.93 10.61 8.97 7.92
0.00 6.56 6.95 7.51 8.58 10.40 14.45 19.95 22.74 19.69 14.10 10.47 8.51 7.47
FLJ moyen G
FLJ Composante De
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.16 0.17 0.18 0.19 0.20 0.21 0.21 0.21 0.21 0.21 0.20 0.19 0.18
0.00 0.19 0.20 0.22 0.23 0.24 0.25 0.24 0.24 0.24 0.24 0.23 0.22 0.22
0.00 0.22 0.24 0.26 0.28 0.30 0.31 0.32 0.32 0.32 0.31 0.30 0.29 0.26
0.00 0.25 0.28 0.31 0.34 0.37 0.39 0.40 0.41 0.40 0.39 0.37 0.34 0.31
0.00 0.30 0.34 0.38 0.42 0.46 0.49 0.51 0.52 0.51 0.49 0.46 0.42 0.38
0.00 0.34 0.40 0.46 0.52 0.58 0.62 0.64 0.67 0.65 0.62 0.57 0.51 0.45
0.00 0.39 0.47 0.55 0.64 0.73 0.80 0.85 0.87 0.85 0.80 0.72 0.63 0.55
0.00 0.44 0.54 0.66 0.79 0.92 1.04 1.15 1.15 1.12 1.03 0.91 0.78 0.65
Appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide
    
```

FIGURE III.9. EXEMPLE DE FICHIER FLJ.FIC

### III.3.2. Modélisation du bâtiment et de l'ambiance intérieure

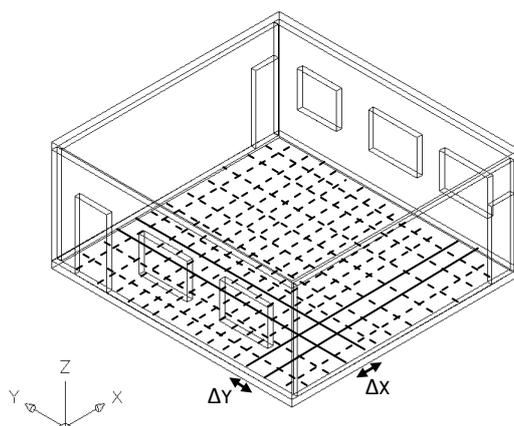


FIGURE .III.10. REPRESENTATION GEOMETRIQUE DE LA SALLE TD2

Nous sommes dans le cas d'une pièce monozone. Les composants associés à la zone sont les sept luminaires ( $L_1$  à  $L_7$ ). Au sens de CODYRUN, six inter-ambiances sont définies. Chacune d'entre elle doit être orientée selon un azimuth (définissant une direction) et possède une inclinaison (verticale, horizontale, etc.). Il convient ensuite de définir les composants pour chacune des inter-ambiances. Il s'agit, pour cela, de renseigner le logiciel sur les matériaux utilisés, les dimensions et les coordonnées de nos polygones (murs, sol, plafond et ouvertures). On peut également associer à chaque paroi verticale (y compris les vitrages) des masques proches et lointains. Cependant, il est utile de savoir que les modèles d'éclairage naturel intérieur intégrés sous CODYRUN ne prennent pas encore en compte les masques proches tels que des auvents ou autres. Toutefois, il est évident que ces masques peuvent considérablement modifier les résultats obtenus et donc influencer la répartition lumineuse à l'intérieur du local. Concernant les masques lointains (bâtiments aux alentours), CODYRUN prend en compte dans les calculs d'éclairage intérieur ces paramètres. Pour notre cas d'étude, nous associerons donc des protections solaires à l'est et à l'ouest grâce à des profils de facteur solaire.

### III.3.3. Hypothèses de simulation

Les simulations se feront sur un plan utile se trouvant à 0.85 m (plan de travail) du sol. Les sources artificielles (luminaires) sont considérées ponctuelles, isotropes et Lambertiennes. Les auvents et brise-soleil ne sont pas pris en compte dans les calculs. Le maillage de la grille surfacique de notre plan utile sera de 0.2x0.2 m (avec  $\Delta X = \Delta Y = 0.2$  m) tel qu'il a été décrit dans la Figure .III.10. Le périmètre de la grille surfacique coïncidant, quant à lui, avec celui du sol. Un repère fixe cartésien est formé à partir de l'intersection entre le mur ouest et le mur sud (mur de séparation entre TD2 et TD3). L'axe (OX) du repère est porté par le mur sud. Les portes seront considérées comme étant fermées. Afin de tenir compte du décalage de la salle par rapport au Sud géographique, nous avons fait subir au bâtiment, une rotation de  $-14^\circ$  autour de l'OZ par rapport à l'axe OX (le local est légèrement décalé de quelques degrés par rapport à l'orientation géographique du site).

## III.4. Exploitation des résultats de simulation

Toutes les données exploitées dans ce paragraphe proviennent des résultats de simulation sous CODYRUN. Le tracé des courbes a été obtenu à l'aide d'Excel® ou sous Matlab®.

### III.4.1. Etude de l'éclairage naturel

Cinq cas d'étude ont été réalisés et concernent :

- la répartition de l'éclairage naturel (lié aux ouvertures);
- le cas particulier de ciel couvert surtout l'année (condition la plus défavorable);
- les types de journées (couverte, intermédiaire et claire);
- la moyenne d'éclairage naturel global intérieur dans l'année, selon la position des points éclairés;
- la fréquence de présence de la tache solaire sur le plan utile (zone d'éblouissement ou d'inconfort visuel) au cours de l'année.

#### III.4.1.1. Détermination et étude du Facteur de Lumière du Jour (FLJ)

La première question soulevée lors de cette étude a été de connaître la répartition du flux lumineux sur le plan de travail de la salle. Cette répartition est fortement liée au positionnement, au nombre et aux dimensions des ouvertures. Le facteur le plus utilisé pour caractériser cette répartition est le FLJ (Facteur de Lumière du Jour). La Figure .III.11 présente les valeurs obtenues. Nous constatons évidemment que le flux lumineux est plus élevé aux alentours des fenêtres et tend à diminuer en se rapprochant du milieu de la salle.

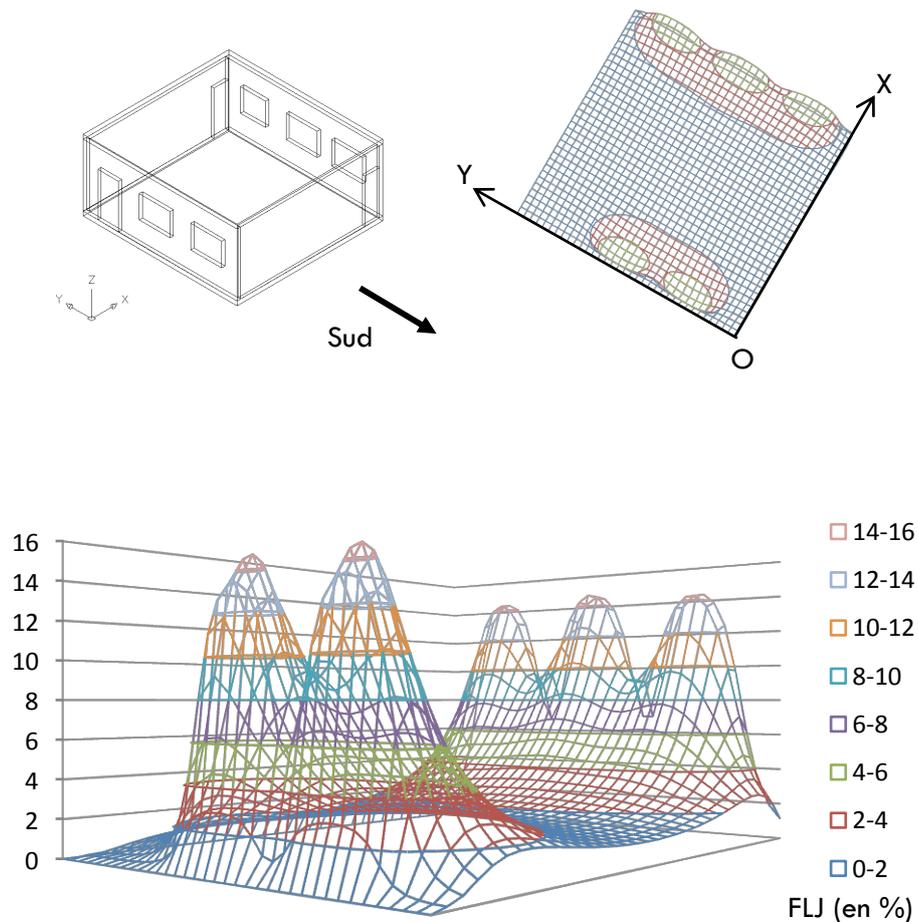


FIGURE .III.11. REPARTITION DU FACTEUR DE LUMIERE DU JOUR DANS LA SALLE TD2

La norme européenne recommande un FLJ moyen de 5 % (condition nécessaire pour avoir un éclairage horizontal intérieur à 500 lux dans le cas d'un ciel couvert d'éclairage horizontal extérieur égal à 10 000 lux, représentant la situation la plus défavorable au cours d'une journée). Nous avons obtenu une moyenne du FLJ de 4.34 % (avec un minimum de 0 % sur le périmètre de la surface de notre plan utile et un maximum 15.62 % tout près des ouvertures), ce qui est légèrement en dessous de la norme. Il convient de surcroît de minorer les valeurs obtenues, compte tenu de l'actuel non prise en compte des masques proches.

### III.4.1.2. Fréquence d'éclairage lumineux moyen

L'étape suivante de l'étude est de s'intéresser à l'éclairage lumineux global moyen de la salle tout au long de l'année. Ceci offre un aperçu de l'autonomie en éclairage du local étudié. Le Tableau III.3 donne la moyenne d'éclairage lumineux global extérieur pour chaque mois de l'année.

Eclairage lumineux global (en lux)	
Janvier	41667
Février	51474
Mars	49651
Avril	37316
Mai	40386
Juin	41232
Juillet	41357
Août	44650
Septembre	42713
Octobre	45575
Novembre	51791
Décembre	45246
<b><u>Moyenne</u></b> <b><u>Annuelle</u></b>	<b>44421</b>

TABLEAU III.3. ECLAIREMENT LUMINEUX MOYEN MENSUEL POUR UNE ANNEE TYPE (SAINT-PIERRE)

Les résultats de simulation de l'éclairage lumineux global moyen à l'intérieur de la salle sont donnés dans la figure ci-dessous :



FIGURE .III.12. ECLAIREMENT LUMINEUX INTERIEUR MOYEN MENSUEL

Le premier constat est que, pour une année type donnée, l'éclairage lumineux moyen à l'intérieur de la salle TD2 est de l'ordre de 1321 lux. C'est vers le mois de novembre que la salle est la plus éclairée (1541 lux). La période où la salle est la moins éclairée se situe vers le mois d'avril (1110 lux). Dans l'ensemble, la salle peut être éclairée par la lumière naturelle sans avoir recours à l'éclairage artificiel durant la journée. Cependant, cette courbe ne nous renseigne pas sur la durée d'autonomie en éclairage de la salle. En effet, nous ne pouvons conclure sur les heures de la journée pendant lesquelles cet éclairage lumineux suffit à la salle. Afin d'avoir une notion sur la disponibilité temporelle de cette quantité de lumière intérieure, nous avons observé son évolution journalière du 1<sup>er</sup> jour de chaque mois dans l'année. La Figure III.13 nous indique les courbes de niveau moyen (en klux) disponibles sur le site.

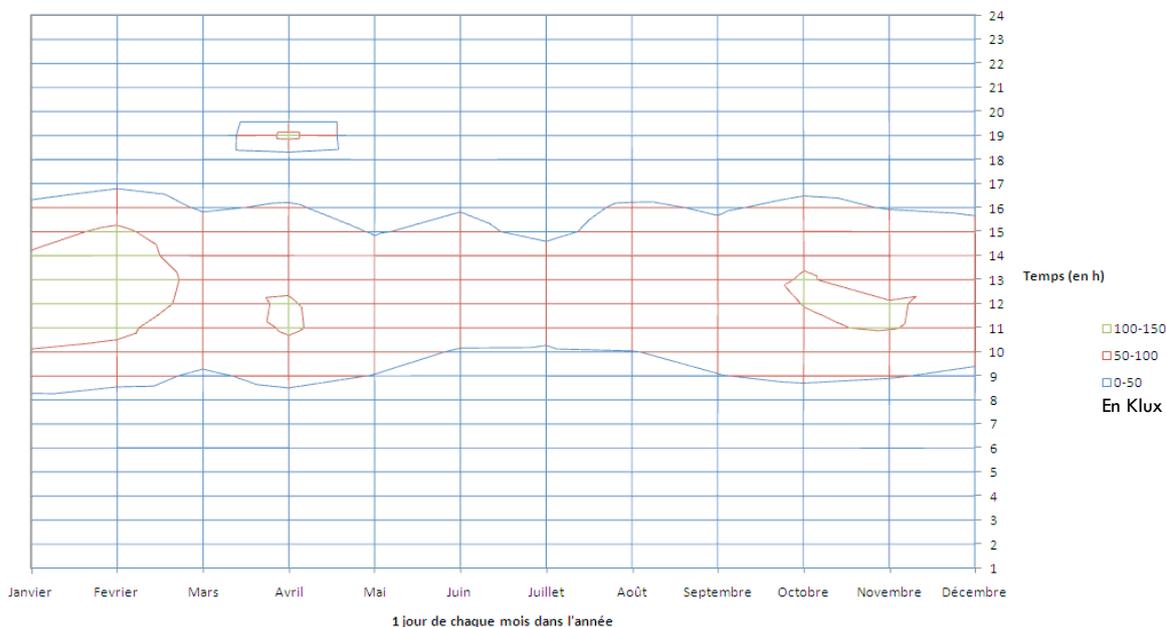


FIGURE III.13. ECLAIREMENT LUMINEUX GLOBAL MOYEN A L'EXTERIEUR DE LA SALLE TD2 DANS L'ANNEE

La présence régulière de gisement solaire lumineux est observée de 8 h à 17 h, tout au long de l'année. Le Tableau III.4 donne, quant à lui, les valeurs horaires des éclairages lumineux globaux moyens à l'intérieur de la salle, extraites du fichier résultats FLJ.fic de CODYRUN.

	Janvier	Fevrier	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 h	8	0	65	0	0	0	0	0	0	0	55	0
7 h	378	256	51	51	65	0	0	0	167	13	139	191
8 h	649	729	598	<u>214</u>	<u>373</u>	<u>0</u>	<u>102</u>	<u>139</u>	523	808	733	<u>371</u>
9 h	1000	<u>401</u>	1107	<u>378</u>	<u>289</u>	668	644	705	803	1065	1407	1299
10 h	579	537	1393	537	411	976	897	1051	1192	1089	1743	1767
11 h	700	649	1827	621	930	434	948	509	1112	1336	1481	1954
12 h	696	738	1949	616	1533	986	1070	532	1416	1598	1785	2089
13 h	1533	757	2010	1538	1687	916	1140	1243	1771	1552	2145	2061
14 h	1650	738	2061	1542	1584	462	1234	953	1725	1509	1963	2047
15 h	1739	644	1856	1575	1369	948	1206	1084	1556	1393	1762	1860
16 h	1603	1360	1458	1234	1000	551	925	<u>340</u>	1224	1215	1430	1421
17 h	944	1234	962	883	574	<u>200</u>	546	672	799	813	1000	794
18 h	0	471	326	125	116	158	65	214	317	167	509	125
19 h	0	0	191	69	0	0	0	0	0	125	69	200
20 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLEAU III.4. ECLAIREMENT LUMINEUX GLOBAL MOYEN (EN LUX) A L'INTERIEUR DE LA SALLE POUR LE 1<sup>IER</sup> JOURDE CHAQUE MOIS DANS L'ANNEE

Généralement, les horaires de travail à l'IUT sont compris entre 8 h et 17 h (période encadrée dans le Tableau III.4). Les valeurs d'éclairement lumineux surlignées et en italique dans le tableau précédent représentent tous les cas où l'éclairement moyen global est inférieur à la norme européenne (environ 500 lux) de confort visuel. La valeur maximale est de 2089 lux (à 12 h 00, le 1<sup>er</sup>Décembre).

D'après les résultats obtenus, nous pouvons déduire que la fréquence moyenne à laquelle la salle peut être éclairée par la lumière naturelle est de 90.8 % (seulement 9.2 % des heures de travail nécessitent que l'on utilise l'éclairage artificiel) dans l'année. Ceci se produit le plus souvent entre 8 h et 9 h du matin ou encore vers 16 h et 17 h. En considérant les périodes de vacances scolaires, l'autonomie en éclairage serait encore plus élevée. En effet, les vacances à l'IUT se situent entre mi- juillet et mi-août; puis entre mi-décembre et mi-janvier. En tenant compte de ces périodes de fermeture, l'autonomie en éclairage est alors de 94.16 %, soit 3.36 % de plus.

#### **III.4.1.3. Etude de l'éclairement global intérieur pour des journées types**

En analysant la répartition du flux lumineux dans l'espace à l'intérieur de la salle, nous observons les résultats des Figure III.14, Figure III.15 et Figure III.16, respectivement pour une journée type claire, intermédiaire et couverte. Les simulations ont été réalisées sur une journée à des pas de temps de la minute. Il s'agit des données météorologiques du 08/02/08 (journée intermédiaire), 09/02/08 (journée claire) et 10/02/08 (journée couverte), décrites dans le chapitre (page 51, Figure I.27).

Les journées types claires et intermédiaires présentent relativement les mêmes profils de répartition lumineuse. L'éclairement lumineux moyen en journée claire est de 1225 lux pour un maximum de 107 klux (dû au direct provenant du soleil) et un minimum nul. Pour une journée intermédiaire, nous avons une moyenne de 1303 lux avec un maximum atteignant 105 klux. L'éclairement se trouve donc plus élevé en journée intermédiaire que pour une journée claire. Ceci s'explique par le fait qu'en journée intermédiaire, il y a plus de nuages donc un diffus plus élevé qui vient s'ajouter au direct, contrairement à une journée claire où le ciel est dégagé et donc un diffus de la voûte céleste presque négligeable. Nous constatons également que la lumière provenant du soleil ne pénètre que par les trois ouvertures de la façade est (partie haute de la figure), du moins pour ces jours. Les deux ouvertures de la façade ouest sont en effet, suffisamment ombragées par les masques lointains.

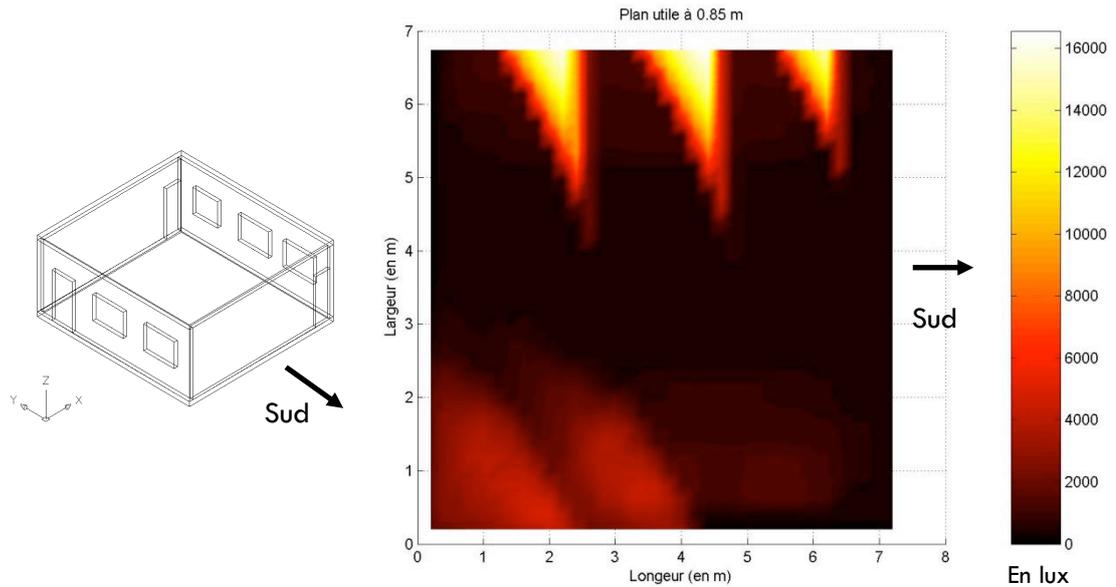


FIGURE III.14. ECLAIREMENT LUMINEUX GLOBAL JOURNEE TYPE CLAIRE.

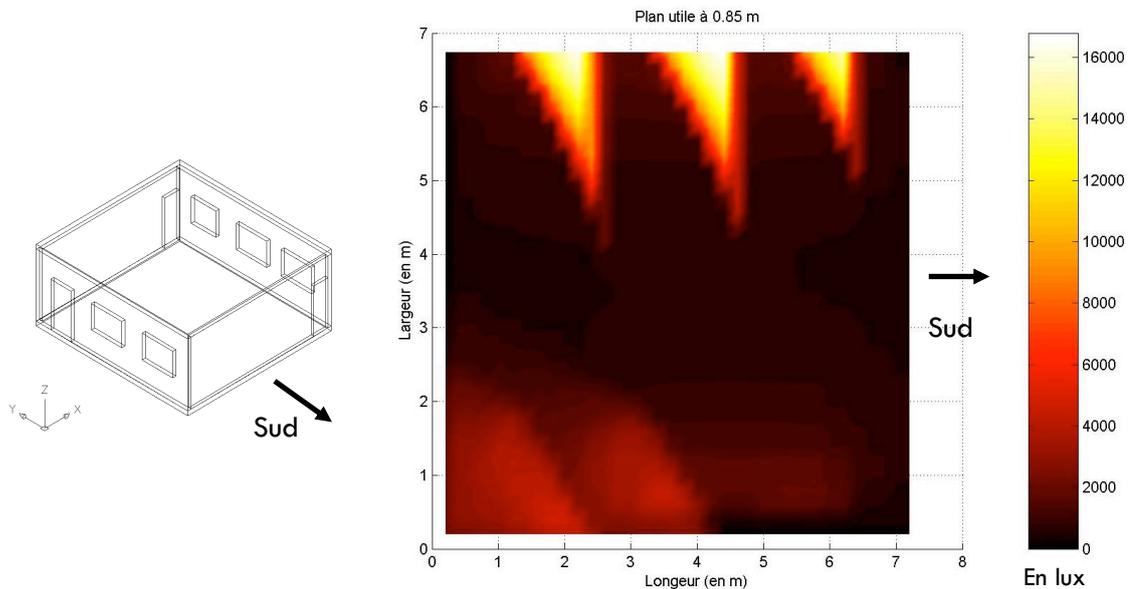


FIGURE III.15. ECLAIREMENT LUMINEUX GLOBAL: JOURNEE INTERMEDIAIRE.

S'agissant de la journée couverte (Figure III.16), l'éclairage lumineux moyen est de 851 lux. La valeur maximale obtenue sur le plan de travail est 9840 lux. Dans ce cas, nous voyons apparaître les zones d'influence de nos 5 ouvertures sur le plan de travail. Ainsi, le diffus provenant de la voûte céleste accède à l'intérieur du local à travers toutes les ouvertures, mais beaucoup plus du côté des ouvertures se situant à l'est (le matin) que du côté des ouvertures se situant à l'ouest (l'après-midi). Une fois encore, les masques lointains jouent un rôle capital sur la lumière intérieure provenant de ces ouvertures.

De cette étude, nous concluons que, pour éviter les éblouissements à l'intérieur de la salle durant les journées claires et intermédiaires, il est nécessaire de prévoir des masques proches (auvents, brise-soleil, etc.) sur les ouvertures de la façade est qui sont beaucoup plus exposées au direct le matin, ou encore de rester éloigné de la paroi est d'une distance supérieure ou égale à 0.15 m.

Dans la réalité, une cursive se situe déjà sur la façade est et des masques translucides liés aux panneaux photovoltaïques sont installés sur ce même côté.

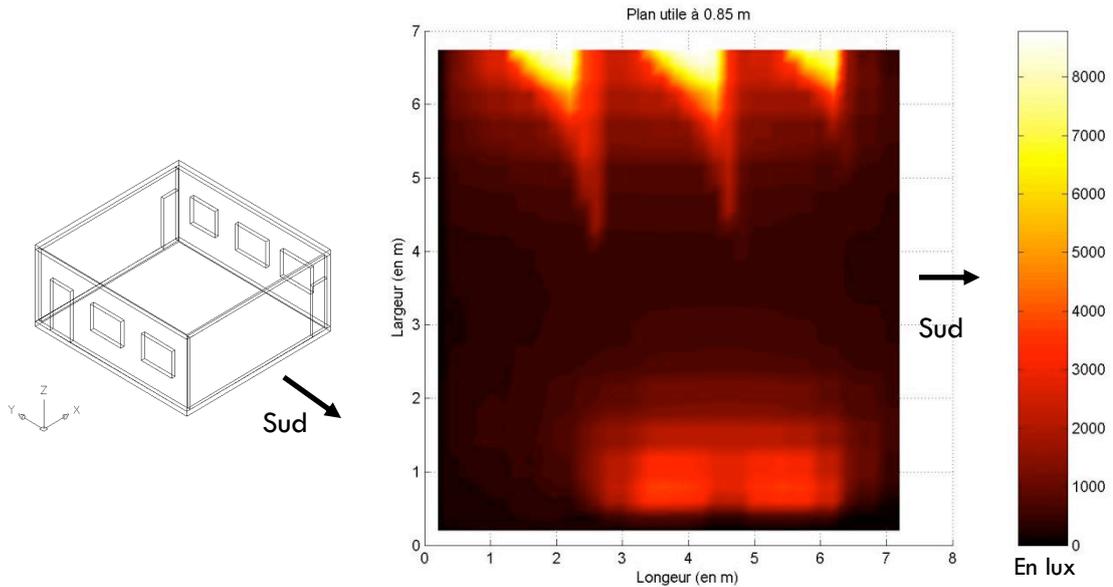


FIGURE III.16. ÉCLAIREMENT GLOBAL: JOURNÉE COUVERTE.

#### III.4.1.4. Fréquence de la tache solaire

Les taches solaires sont généralement les causes principales d'éblouissement à l'intérieur d'un local. Nous avons vu que, pour une journée type claire ou intermédiaire, il est important d'éviter que le direct ne pénètre la salle à travers les ouvertures de la façade est. Le but du travail qui va suivre est d'essayer de comprendre comment évolue cette tache solaire au cours de l'année.

Pour cela, nous avons procédé à l'étude de la fréquence de présence de l'éclairage lumineux naturel direct (du soleil) dans l'année. Cette fréquence ne peut excéder 50 % du fait que les résultats de simulation proviennent de données y incluant les nuits (éclairage toujours nul si l'on ne considère pas les pleines lunes). Nous dirons donc que 50 % de présence de la tache solaire dans l'année correspond à un éclairage lumineux direct permanent dans la salle durant toutes les journées.

La simulation a été réalisée sur une année complète, au départ d'un fichier météorologique au pas de temps horaire. La Figure .III.17 nous donne l'occurrence de cette tache dans l'année.

Le premier constat est que la fréquence moyenne de présence est strictement inférieure à 1 % sur l'année, ce qui est très négligeable. Les taches sont localisées généralement vers le côté est (au voisinage de nos trois grandes ouvertures) de notre plan de travail. Elles sont plus fréquentes sur des surfaces du plan dont la somme est d'environ 0.36 m<sup>2</sup>. Il aurait été judicieux de prévoir des masques proches sur ces vitrages afin de réduire ces taches nuisibles au confort visuel, si l'on avait retrouvé les mêmes résultats de simulation en tenant compte des masques proches. Ce qui n'est pas le cas. En effet, les deux parois éclairées (est et ouest) sont normalement ombragées par des masques lointains et proches. Pour rappel, les masques proches ne sont pas pris en compte dans nos simulations.

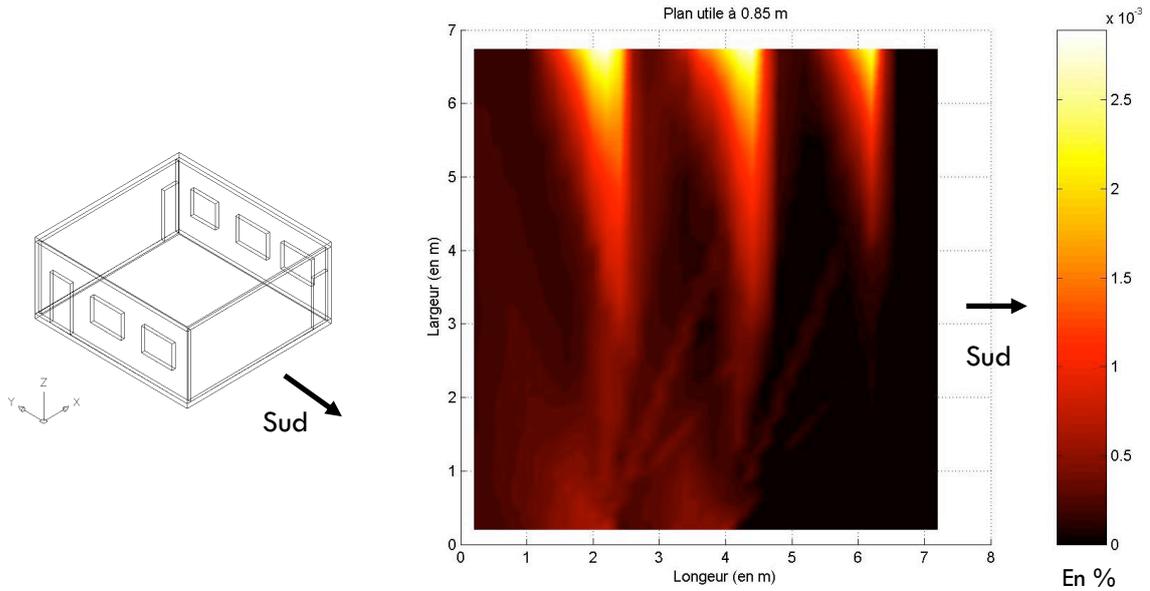


FIGURE .III.17. FREQUENCE DE PRESENCE DE LA TACHE SOLAIRE DANS L'ANNEE A L'INTERIEUR DE LA SALLE TD2.

### III.4.1.5. Eclairage lumineux global intérieur dans l'année

Le but de cette étude est d'avoir une vue d'ensemble de l'éclairage lumineux naturel dans la salle, tout au long de l'année et, ceci, quelque soit le type de journée. La démarche appliquée et les hypothèses de simulation sont les mêmes que précédemment. Nous avons, cependant, travaillé sur des résultats d'éclairages lumineux globaux, contrairement à l'étude postérieure où les résultats exploités sont ceux des valeurs d'éclairage lumineux provenant directement du soleil. La Figure III.18 donne la valeur moyenne de ces éclairages lumineux dans l'année.

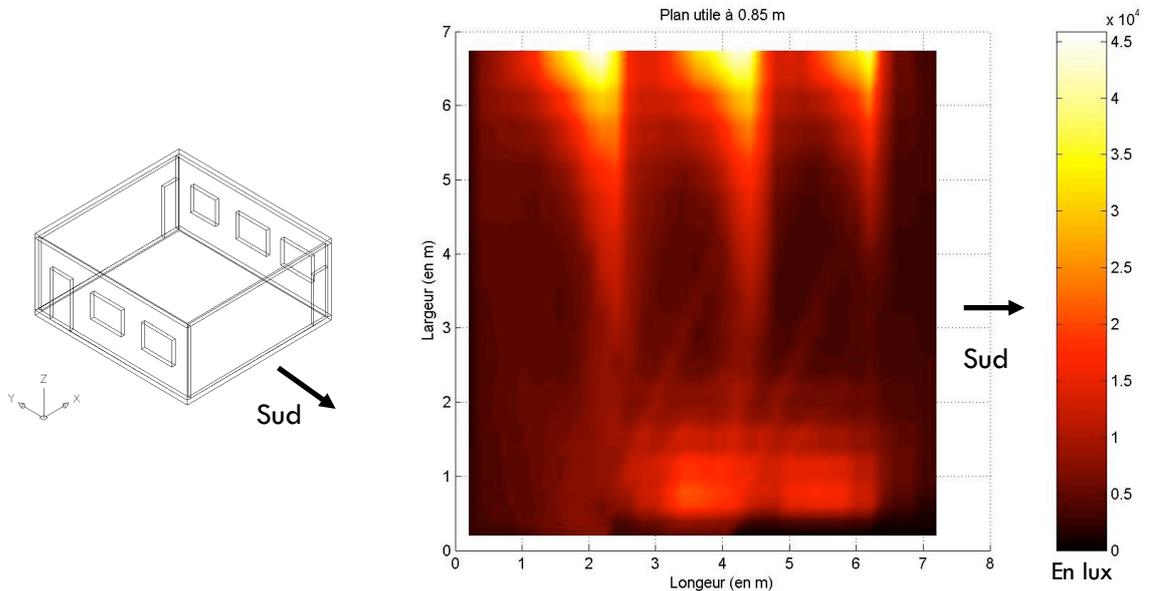


FIGURE III.18. ECLAIREMENT GLOBAL MOYEN DANS L'ANNEE A L'INTERIEUR DE LA SALLE TD2.

Nous observons un éclairage lumineux moyen de 1000 lux dans la salle. La valeur maximale est de 111 klux (en journée claire). Les zones les plus couramment éclairées sont celles situées près des vitrages. Celles qui sont les moins éclairées se trouvent généralement au nord de notre plan de travail, sur une surface d'environ 0.28 m<sup>2</sup>, puis au sud sur une surface de 0.21 m<sup>2</sup>.

De cette étude, nous concluons que nous disposons de suffisamment de potentiel lumineux pour éclairer le plan de travail de la salle dans l'année. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que la valeur moyenne obtenue à partir de la simulation doit être revue à la baisse à cause des masques proches (qui n'ont pas été considérés lors de la simulation). Sachant qu'en moyenne il nous faut 500 lux sur le plan utile, il est clair que nous sommes bien au-dessus de la valeur recommandée.

### III.4.2. Etude de l'éclairage artificiel : respect de la norme NF/EN/ 12464-1

Cette simulation suppose qu'aucun faisceau lumineux provenant directement ou indirectement du soleil ne rentre dans le local.

La Figure III.19 illustre les résultats obtenus. L'éclairage artificiel moyen de la salle est de 433 lux avec un maximum de 794 lux vers le milieu de la salle et un minimum de 66 lux en bordure de notre plan utile de travail. Environ 50 % de la surface de ce plan (au voisinage du centre de la salle) a un éclairage strictement supérieur à 500 lux, correspondant à la valeur moyenne d'éclairage requise dans la norme européenne NF/EN/ 12464-1 (appliquée aussi en France) pour un plan de travail, tandis que 5 % de cette même surface est éclairée avec moins de 300 lux (éclairage aux bordures de la salle). Cela représente environ 55 % de la surface du plan de travail pour laquelle les conditions de confort visuel ne sont pas respectées.

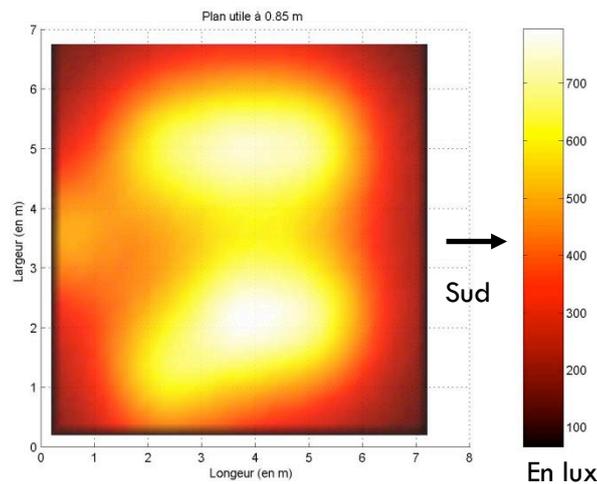


FIGURE III.19. ECLAIREMENT LUMINEUX ARTIFICIEL DANS LA SALLE TD2

Le positionnement des luminaires a entraîné une répartition non uniforme du flux lumineux sur le plan de travail, engendrant ainsi des zones d'inconfort visuel (trop ou pas assez de lumière).

### III.4.3. Amélioration des conditions de confort visuel et optimisation énergétique

Les études d'éclairage menées sur la salle TD2 ont montré que le local était autonome en éclairage durant pratiquement toute l'année scolaire. Cependant, les rares cas où l'éclairage artificiel est utilisé nous ont également montré que le flux de lumière provenant des luminaires était mal réparti sur le plan de travail. Nous avons donc recherché une solution à ce problème. Plusieurs méthodes de dimensionnement existent. Afin de pouvoir faire une comparaison, nous avons préféré une approche plus orientée sur l'existant. En effet, nous avons d'abord imaginé l'addition des intensités provenant des luminaires installés (soit 15916.775 lm). Ensuite, nous avons cherché à répartir cette intensité sur des lampes toutes identiques. Cela nous a amenés à équiper le local de 9 luminaires ( $N_1$  jusqu'à  $N_9$ ) délivrant une intensité semblable de 1766.69 lm chacun et positionnés selon la Figure .III.20. Cette disposition nous permet de diminuer la quantité lumineuse de 16.565 lm par rapport à la précédente. La Figure .III.21 donne les résultats de simulation sur la répartition lumineuse obtenus pour cette configuration.

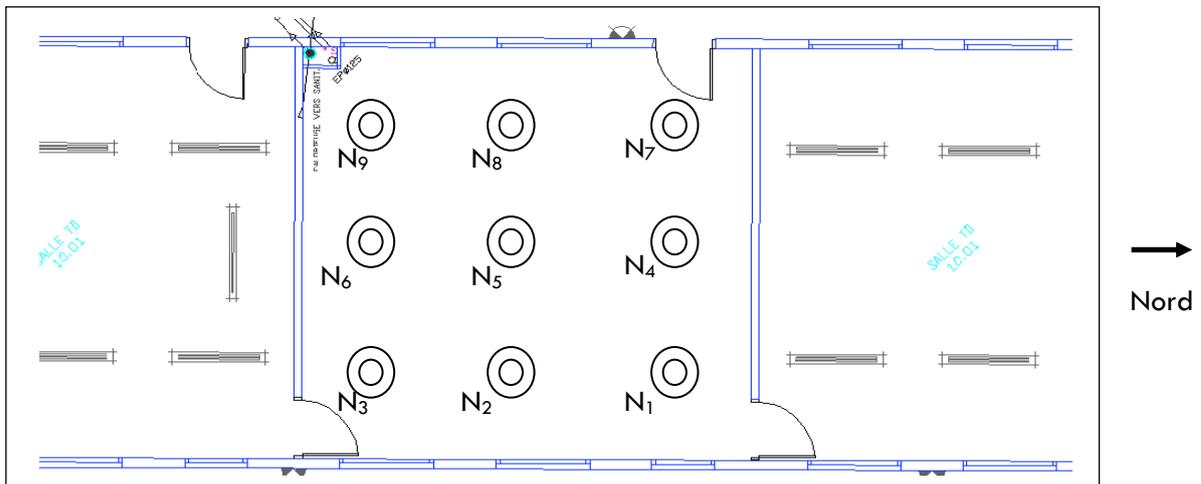


FIGURE .III.20. PROPOSITION DE LA DISPOSITION DES NOUVEAUX LUMINAIRES ( $N_1$  A  $N_9$ )

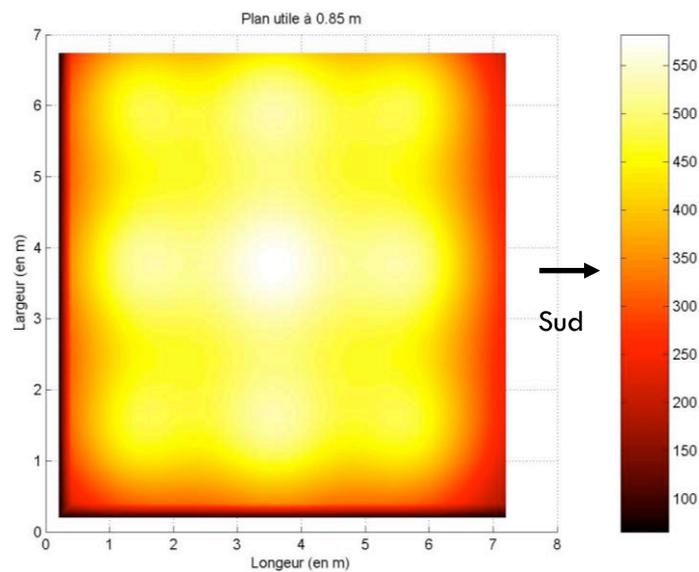


FIGURE .III.21. ECLAIRAGE OBTENU SUITE A LA DISPOSITION DES LUMINAIRES

Il en ressort que la répartition de la lumière est beaucoup plus uniforme et que nous avons des valeurs d'éclairement moyen voisines de la valeur recommandée (500 lux) sur pratiquement tout le plan de travail. De plus, nous avons réduit de 16.565 lm le flux lumineux total.

### III.5. Conclusions de l'étude de la Salle TD2

CODYRUN nous a permis de réaliser un diagnostic sur l'éclairage dans la salle TD2. Des propositions d'amélioration du confort visuel et d'optimisation ont également été présentées. Durant cette étude, nous avons pu observer que les journées types intermédiaires éclairaient plus la salle, puis viennent les journées types claires et enfin les couvertes. Cette étude nous a aussi permis de vérifier l'autonomie en éclairage de la salle. En effet, compte tenu de la position géographique de l'île, nous avons pu mettre en relief la présence permanente d'éclairement à l'intérieur de la salle pendant des horaires de travail.

Sachant que le logiciel dispose déjà d'un code de simulation en thermique du bâtiment qui a été validé, nous pouvons donc effectuer simultanément des études de confort ou/et d'optimisation à la fois énergétique, thermique et visuel d'un bâtiment donné.

En effet, le logiciel est capable de nous renseigner sur des variables d'entrées pouvant servir aisément à des outils d'optimisation énergétique, par exemple. Pour illustrer nos propos, nous citerons, le cas de la méthode LT (abréviation de Thermal and Lighting method) développé en Angleterre dans les années 99 qui donne l'allure simultanément (sur une même courbes) des courbes de température, d'intensité lumineuse, de la consommation énergétique et du ratio entre les surfaces ouvertes et pleines de nos parois. Maintenant que nous avons rendu la simulation d'éclairage possible sous CODYRUN, nous sommes en mesure de fournir toutes ces informations nécessaires à l'application et au tracé des courbes de cette méthode.



# CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions  
générales

Réalisations et perspectives futures du  
logiciel pour la simulation de l'éclairage

La conclusion de notre travail sera présentée. L'apport que représente cet ouvrage vis-à-vis de l'évolution du logiciel CODYRUN ainsi que les résultats d'études réalisées sur l'éclairage intérieur à la Réunion seront montrés. Nous ne manquerons pas également de décrire les perspectives qui pourraient compléter ou améliorer ce travail.



## .1. Conclusions

Le soleil est une source d'énergie renouvelable dont l'une des exploitations est l'éclairage naturel des locaux. Il a été montré que l'abondance des techniques nouvelles et les innovations architecturales permettent à l'éclairage naturel et à l'éclairage mixte de devenir plus efficaces pour lutter contre la consommation énergétique d'un bâtiment.

S'agissant de l'évaluation des niveaux d'éclairage lumineux dans les espaces intérieurs, il a été montré également que les connaissances actuelles ne sont pas totalement satisfaisantes pour les besoins de zones telles que les nôtres, où le ciel est le plus souvent clair et ensoleillé.

Par ailleurs, avec le développement des outils d'évaluation de l'éclairage lumineux naturel, l'intégration de l'éclairage provenant directement ou indirectement du soleil dans l'espace intérieur des locaux est une donnée de plus en plus prise en compte. Cependant, ces outils demeurent encore non satisfaisants pour les architectes ou bureaux d'études. Selon eux, un outil ne peut se limiter à quantifier la lumière intérieure. Il faudrait aussi penser à développer et à élaborer des règles expertes facilement exploitables. Le but de ce travail a été d'amener des éléments de réponse à ces attentes.

Au niveau national, nous avons participé au développement d'un premier logiciel de simulation numérique français dédié, en partie, à la recherche et capable de traiter à la fois différents aspects liés à l'environnement intérieur d'un bâtiment (éclairage artificiel et/ou naturel, thermique, hydrique, aérodynamique, etc.).

Au niveau international, nous sommes en mesure de fournir, grâce à l'étude expérimentale menée depuis le début de nos travaux, des informations importantes sur les caractéristiques du gisement solaire lumineux à la Réunion et, en particulier, sur la constante d'efficacité lumineuse globale et diffuse de la région. Ces informations peuvent servir à la communauté scientifique internationale pour des études futures en météorologie ou autres.

Si nous nous plaçons à l'échelon du laboratoire, cette thèse est la première à traiter de l'éclairage en général (artificiel et/ou naturel) et de son application à l'intérieur des bâtiments. Cette étude a été aussi l'occasion d'apporter notre contribution à l'amélioration et la valorisation des outils de recherche développés au sein du laboratoire. Il s'agit notamment de la station météorologique du LPBS et de son simulateur de climat, de la plate-forme expérimentale du LPBS (cellule LGI) et également du logiciel CODYRUN. Ces outils ont été les supports fondamentaux de nos travaux.

S'agissant du logiciel de simulation de climat, il est actuellement en mesure de prédire le gisement solaire lumineux grâce aux constantes d'efficacité lumineuse (globale et diffuse) déterminées lors de notre étude. Pour ce qui est de la cellule LGI, nous avons pu mettre en place une base de données pouvant servir de référence à tout logiciel, lorsque l'on souhaite tester son degré de précision pour la simulation de l'éclairage naturel intérieur local quelque soit le type de journée. L'amélioration de l'outil CODYRUN a été au cœur de nos travaux. En effet, nous avons pu contribuer au développement du logiciel du laboratoire, reconnu par des publications scientifiques internationales en y incluant : la prise en compte des coordonnées cartésiennes dans l'espace; l'introduction des modèles de l'éclairage (artificiel et naturel) intérieur; la prise en compte de multiples formats de fichiers météorologiques (TMY en particulier) ; etc.

La principale originalité apportée à CODYRUN, dans ce travail, par rapport aux autres logiciels de recherches, a été d'intégrer des modèles simplifiés soigneusement combinés et dédiés à la simulation numérique de l'éclairage (artificiel et naturel) intérieur. Ces méthodes de combinaisons des modèles simplifiés permettent d'informer sur la quantité lumineuse disponible en un point quelconque d'un plan utile quel que soit le type de ciel (couvert, clair et intermédiaire) et à des durées de simulations relativement très courtes. En effet, l'étude de la répartition lumineuse à partir de modèles simplifiés classique aurait été très difficile car ces derniers sont très limités dans leurs champs d'applications respectifs. Les combinaisons de modèles proposés ont ainsi permis de contourner ces limites d'utilisation. On citera notamment l'exemple du FLJ qui a pu être utilisé, dans notre code, pour les calculs du diffus et ce quel que soit le type de ciel alors qu'à l'origine, cette méthode est appliquée uniquement dans le cas de ciel couvert. Toute notre étude donc portée sur la mise en place de combinaisons de modèles semi détaillés capables de fournir pratiquement les mêmes résultats de simulations que ceux utilisés dans des nombreux autres logiciels et beaucoup plus complexe, tels que la radiosité ou le tracé de rayon.

Comme tout logiciel, l'utilisation de CODYRUN dans la simulation de l'éclairage artificiel et/ou naturel présente certains avantages et inconvénients.

Concernant les points forts du logiciel, on peut citer :

- ✓ Temps de calculs très réduit: le logiciel met, par exemple, 2 minutes pour simuler l'éclairage sur un plan utile de maillage 32x35 nœuds à l'intérieur d'un bâtiment et pour des pas de temps de la minute sur une année;
- ✓ Logiciel très simple à utiliser et convivial, qui s'adapte parfaitement aux bureaux d'études et aux particuliers;
- ✓ Logiciel de recherche appliquée. Des éléments de validation (analytiques, expérimentaux et comparatifs) ont été apportés sur l'éclairage artificiel et naturel. Dans l'ensemble, les résultats ont montré que le logiciel était fiable à 86.25 %;
- ✓ Possibilité de reconstituer le gisement solaire lumineux extérieur (en lux) à partir d'un fichier météo ne disposant que d'informations sur l'irradiation (en  $W.m^{-2}$ );
- ✓ Possibilité de simuler l'éclairement naturel intérieur quel que soit le type de journée (couverte, intermédiaire, claire) et en tout point d'un plan utile;
- ✓ Possibilité de simuler les effets liés au direct provenant du soleil à travers un second jour;
- ✓ Possibilité de suivre une tache solaire sur un plan utile;
- ✓ Possibilité d'obtenir séparément les résultats de simulation d'éclairement direct, diffus ou global artificiel ou naturel;
- ✓ Etude dynamique possible (quel que soit le pas de temps de la simulation ou le maillage).

Les limitations du modèle d'éclairage sont les suivantes:

- ✓ Non prise en compte des masques proches dans les calculs d'éclairement;
- ✓ Pas de calcul du diffus provenant d'un second jour;
- ✓ Non prise en compte de la géométrie des luminaires et des photométries complexes telles que les puits de lumière, atrium, etc.;
- ✓ Ne donne pas les valeurs d'éclairement sur les plans verticaux (murs, vitrages, etc.) ou quelconques;
- ✓ Les coordonnées du bâtiment dans l'espace sont à remplir manuellement. Ce qui rend la modélisation du bâtiment très longue ;
- ✓ Pas d'interface graphique, de visualisation en 3D du bâtiment ou du rendu visuel;
- ✓ Les modèles utilisés sont de type simplifié, donc pas applicable dans les situations architecturales très complexes;

- ✓ Pas de prise en compte des charges ou obstacles internes au local (bureau, personnes, muret interne, etc.) lors de la simulation de l'éclairage;
- ✓ Les luminaires doivent être horizontaux (le cas, par exemple, des lampadaires n'est pas modélisable sous CODYRUN);
- ✓ Les ouvertures doivent être uniquement en façade (verticales).

Les cas où le code de calcul peut être utilisé dans l'étude de l'éclairage artificiel et/ou naturel sont ceux des systèmes (ou sous-systèmes) fermés (bâtiment monozone ou bizone, voiture, etc.), simples (dont les volumes sont cubiques, rectangulaires, triangulaires ou en L), alors que l'étude des systèmes ou sous-systèmes complexes (bâtiment à murs inclinés par exemple) sont à proscrire. D'autres cas particuliers ne sont pas encore intégrés dans les calculs d'éclairage intérieur : les masques proches, l'épaisseur des ouvertures (plus de 10 cm en général), les luminaires qui ne sont pas des sources ponctuelles, etc.

## .2. Perspectives

Nous pouvons citer les perspectives en trois catégories. Il s'agit de :

- ✓ L'amélioration des modèles d'éclairage:
  - Améliorer les modèles d'éclairage utilisés dans le code : nous avons vu que le facteur de forme influencé énormément sur les valeurs d'éclairement aux points les plus éloignés de l'ouverture (dans le cas d'éclairement naturel). Une étude plus détaillée sur ces facteurs de formes et leur caractérisation permettrait d'améliorer considérablement nos coefficients de pondérations utilisés dans le calcul du diffus à partir du FLJ (Facteur de Lumière du Jour).
  - Mettre en place un modèle plus détaillé d'efficacité lumineuse spécifique à nos régions : le manque d'informations (météorologique) sur le gisement solaire lumineux local nous a amenée à établir les valeurs de constantes d'efficacité lumineuse globale et diffuse à La Réunion. Ces valeurs ont servi à reconstituer ce gisement à partir de la connaissance de l'éclairement énergétique. Cette première approche nous a permis de nous faire une idée sur le potentiel solaire lumineux disponible localement. Il est important de continuer notre étude dans cette même optique et de mettre en place des modèles beaucoup plus détaillés de ces valeurs d'efficacité lumineuse afin de pouvoir exploiter aux mieux ces données.
  - Introduire des modèles plus complexes (radiosité, tracé de rayon, etc.) sous CODYRUN : ainsi l'utilisateur du logiciel pourra avoir le choix entre des modèles simplifiés combinés et des modèles plus complexe lors de la simulation.
  - Travailler sur un modèle de couplage thermo – photométrique pour l'optimisation ou/et le confort humain : en effet, maintenant que CODYRUN est en mesure de simuler à la fois la quantité de lumière et la température à l'intérieur d'un bâtiment, il serait judicieux de commencer à nous intéresser à des modèles ou méthodes de couplage possible entre ces différentes variables pour l'étude de l'optimisation énergétique ou/et du confort (visuel et thermique).
- ✓ Le complément des éléments de validation : compléter les bases de données de références expérimentales de la cellule LGI par d'autres scénarios probables. Par exemple, considérer les cas où le local serait éclairé par deux sources différentes (artificielle et naturelle) et mettre en place les valeurs de référence associées à ce cas test;

- ✓ L'amélioration du logiciel CODYRUN (d'un point de vue informatique) :
  - Pouvoir simuler l'éclairage artificiel et naturel quelque soit le plan éclairé (horizontal, vertical voire quelconque);
  - Pouvoir visualiser le bâtiment et le rendu visuel à l'intérieur en 3D;
  - Pouvoir prendre en compte les simulations des systèmes complexes tels que les puits de lumière et autres;
  - Mettre en place des règles expertes dédiées à l'étude de l'éclairage dans le bâtiment et ainsi répondre aux attentes des bureaux d'études et des décideurs. Ceci pourrait se réaliser dans le cadre de l'outil PERENE ou ECODOM en complément des recommandations. On y ajouterait des suggestions sur l'éclairage intérieur à La Réunion et dans les DOM par exemple.
  - Permettre au logiciel de pouvoir échanger des données importantes telles que des fichiers DXF (sous Autocad par exemple) pour la déclaration du bâtiment ou encore des fichiers météorologiques de formats autres que MTO, MTX ou TMY. En d'autres termes, trouver des liens qui permettent de coupler le logiciel avec d'autres applications extérieures à son environnement propre.

Des travaux restent encore à mener dans le domaine, tant pour les aspects quantitatifs que qualitatifs. Tout les acteurs intervenant dans le cadre du bâti (universitaires, chercheurs, praticiens, etc.) doivent donc coordonner leur efforts en vue d'acquérir ce potentiel dont les enjeux ne se limitent pas à l'économique seulement, mais s'étendent bien au-delà, à l'écologique, biologique, socioculturel.

Nous avons suivi une série d'étapes qui ont abouti à l'amélioration d'un code de calcul local. Cela s'est traduit par de la modélisation, de l'expérimentation et des éléments de validation. L'outil peut maintenant traiter le cas de l'éclairage (artificiel et/ou naturel) intérieur en tout point d'un plan utile.

Ces mêmes outils de conception devraient être établis sur la base de l'occupation de l'espace, et des activités auxquelles celui-ci est affecté. Ces aspects d'ordre qualitatif sont aussi pour beaucoup dans la réduction de la consommation d'énergie.

# **Bibliographies**



- [ Alshaibani, 1997] K. Alshaibani, "An average daylight factor for clear sky conditions", *Lighting Research and Technology*, pp. 29 (4), 192-196 p., 1997.
- [ Ana et al., 2007] P. B. Ana, B. Julia, and M.I Argimiro, "An evaluation of illuminance measurements at valladolid (spain)", *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, vol. 69, no. 8, pp. 939-946 , Jun 2007.
- [ Angioletti, 2001] H. Angioletti et D. Robert, "Maitrise de l'énergie dans les bâtiments : définitions, usages, consommations", *Technique de l'ingénieur*, pp. 18, 2001.
- [ Bellia, 2000] L. Bellia, "De-Light : a software tool for the evaluation of direct daylighting illuminances both indoors and outdoors - Comparison with Superlite 2.0 and Lumen 7.1", *Building and Environment*, vol. 35, pp. 281-295, 2000.
- [ Bernard, 1999] P. Bernard, "Application de la logique floue à l'aide à la décision en éclairage naturel", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Genève, Suisse, Thèse de Doctorat, N°1916, 1999.
- [ Bodart, 2002] M. Bodart, "Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment selon des critères physiques, écologiques et économique, pour un meilleur confort visuel et thermique", Université Catholique de Louvain, Louvain-La-Nouve, Belgique, Thèse de Doctorat, 2002.
- [ Boer, 1998] J. Boer, "Survey simple design tools", International Energy Agency, Stuttgart, ECBCS, IEA SHC Task 21, 1998.
- [ Boyer, 1993] Harry Boyer, "Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles", Université de La Réunion, Réunion (DOM), France, thèse de Doctorat, 1993.
- [ BRE, 1986] BRE, "Estimating daylight in building : Part 1 and 2 / Diggest 309 and 310", Building Research Establishment Digest, England, 1986.
- [ CIBSE, 1987] CIBSE, "Window design, application manual", Chartered Institution of Building Services Engineers, London, 1987.
- [ CIBSE, 1987] CIBSE, "Window design, application manual", The Charactered Institution of Building Service Engineers, ed. London: Delta house, 1987.
- [ CIE, 1970] CIE, "Daylight", Commission Internationale de l'Eclairage, Paris, Technical Report, Publication N°16 (E.3.2), 1970.

- [ CIE, 1994] CIE, "Spatial distribution of daylight\_Luminance distribution of various reference skies", Commission Internationale de l'Eclairage, no. 110, ISBN 3900 734 526, 1994.
- [ CIE, 1973] CIE, "Standardization of luminous distribution on clear sky", Commission Internationale de l'Eclairage, Paris, Technical Report, Publication CIE N°22, 1973.
- [ CIE, 1970] CIE, "Standardization of luminous distribution on clear sky", Commission Internationale de l'Eclairage, Paris, Technical Report, Publication CIE N°16, 1970.
- [ CIE, 2005] CIE, "Test Cases to assess the accuracy of lighting computer programs", Commission Internationale de l'Eclairage, Paris, France, CIE Technical Report (TC-3-33) 390 1 906 479, February 24, 2005.
- [ Clarke, 1998] J. A. Clarke and M. Janak, "Simulation the thermal effects of daylight - Controlled lighting", *Building performance (BEPAC UK)*, Spring, 1998.
- [ CLIP, 1997] CLIP, "MDE : l'éclairage en France", 1997.
- [ Collin, 1984] J.B. Collin, "The developpement of daylighting - a british view", *Lighting Research and Technology*, vol 16 (4), pp. 155-170, 1984.
- [ Collins, 1984] Collins, "The developpement of daylighting - a British view", *Lighting Research and Technology*, vol 16 (4), pp. 155-170, 1984.
- [ Cropper, 2001] P. Cropper, "Predicting Time-varying illuminance in complex spaces with lighting control system", Institute of Energy and Sustainable Development - De Montfort University, Leicester (UK), PhD Thesis, Jun, 2001.
- [ Cucumo et al., 2008] M. Cucumo, A. De Rosa, V. Ferrero, D. Kaliakatsos, and V. Marinelli, "Correlations of global and diffuse solar luminous efficacy for all sky conditions and comparisons with experimental data of five localities", *Renewable Energy*, vol. 33, no. 9, pp. 2036-2047, September, 2008.
- [ Danny et al., 2006] H. W. Li Danny, H. W. C. Gary, and C. S. L. Chris, "A simplified procedure for determining indoor daylight illuminance using daylight coefficient concept", *Building and Environment*, vol 41, pp. 578-589 , 2006.
- [ Darula et al., 2005] S. Darula, R. Kittler, et A. C. Gueymard, "Reference luminous solar constant and solar luminance for illuminance calculations", *Solar Energy*, vol. 79, no. 5, pp. 559-565, November 2005.

- [ David, 2005] M. David, "Développement d'un générateur de climat multi-variable : application au programme régional de réhabilitation des écoles solaires.Optimisation énergétique de batiments," Université de la Réunion, Saint-Pierre, Réunion (DOM), France, Thèse de Doctorat, Décembre, 2005.
- [ Demers, 2004] C. Demers and André Potvin, "LUMcalcul 2.01 : Prédiction de la lumière naturelle pour la conception architecturale", in *Proceeding of eSIM2004*, Vancouver, 2004.
- [ DIAL, 2005] DIAL. (2005) Light Building Software. [Online]. <http://www.dial.de/>
- [ Dogniaux, 1985] R. Dogniaux, "Programme général de calcul des éclairements solaires énergétiques et lumineux des surfaces orientées et inclinées", Institut Royal Météorologique de Bruxelles, Bruxelles, Rapport interne, 1985.
- [ Dumortier, 1995] D. Dumortier, "Mesure, analyse et modélisation du gisement lumineux. Application à l'évaluation des performances de l'éclairage naturel des bâtiments", Université de Savoie, Savoie, Thèse de Doctorat, 1995.
- [ Erhorn et al., 1997] H. Erhorn, J. Stoffel, and M. Szermann, "Adeline 2.0 - Using computer tools to Evaluate Daylighting and Electric lighting Applications in Building", *Right-Light Four Conference*, 1997.
- [ Fakra, 2007] A. H. Fakra et H. Boyer, "Intégration d'un modèle d'éclairage naturel dans le logiciel CODYRUN", *Colloque Equilibre environnementaux énergies renouvelables et développements urbains.*, vol. 2 (29), pp. 55-67, Mars, 2007.
- [ Fakra et al., 2007] A. H. Fakra, H. Boyer, L. Eddy, et P. Lauret, "The new method to determinate indoor daylighting the building : improving Lumen models", in *ISES Solar World Congress 2007*, Beijing, Chine, pp. 4,September, 2007.
- [ Fakra et al., 2008] A. H. Fakra, H. Boyer, et F. Maamari, "Experimental validation for software DIALUX : application in CIE test cases for building daylighting simulation", *COBEE (First Internationnal Conference On Building Energy and Environment)*, Août, 2008.
- [ Gabriel, 2007] Lopez Gabriel and A. Gueymard Christian, "Clear-sky solar luminous efficacy determination using artificial neural networks", *Solar Energy*, vol (81) , pp. 929-939, 2007.

- [ Gastron, 1996] Gastron, "BRE British Research Establishment, Estimating daylight in building : Part 1-2", in *Building Research station*, Gastron, pp. 310, 1996
- [ Green, 1987] C. Green, "MODLUX - Final report on program development and user manual version 1.4", 1987.
- [ Harrison, 1992] A. W. Harrison, "Directional luminance versus cloud cover and solar position," *Solar Energy*, vol (46), pp. 13-20, 1992.
- [ Hooper, 1980] F. Hooper and A. P. Brunger, "A model for the angular distribution of sky radiance. Transaction of the ASME", *Solar Energy Engineering*, vol (102), pp. 196-202, 1980.
- [ Hopkinson, 1963] R. G. Hopkinson, "*Architectural physics : lighting*", London, England: H.M.S.O Her Majesty's stationery office in British Research Establishment (BRE), 1963.
- [ IEA, 2007] IEA, "Daylight for the 21st century : new opportunities with daylighting techniques", Solar Heating and Cooling programmes for International Energy Agency, Washington, 2006 annual Report-Task 31, 2007.
- [ IEA, 2001] IEA, "Daylight Responsive lighting Control-Cases", International Energy Agency, IEA Task 21, Subtask B (Daylight in Buildings), December, 2001.
- [ IES, 1989] IES, "IES recommended practice for Lumen Method of daylight calculation", International Energy Society, New York, IES Calculation Procedure Committees, RP-23-1989, 1989.
- [ IESNA, 1984] IESNA, "IES Lighting Handbook", Illumination Engineering Society of North America, New York, USA, Book, 1984.
- [ IESNA, 1993] IESNA, "Lighting handbook - reference & application", Illuminating Engineering Society of North America, New York, Book, 8th ed., 1993.
- [ Jean-Marie, 2006] M. A. Jean-Marie, "Perspectives énergétiques mondiales," *Technique de l'ingénieur*, 2006.
- [ Jones, 1983] B. F. Jones, "Very simple Hand calculations for daylighting", in *International daylighting conference*, Arizona, pp. 87, 1983.
- [ Kapamichael, 1993] K. Kapamichael and L. Beltran, "Simulating the daylight performance of fenestration systems and spaces of arbitrary complexity : the IDC method", Lawrence National Berkeley Laboratory, California, 1993.

- [ Khodulev, 1996] A. B. Khodulev and E. A. Kopylov, "Physically accurate lighting simulation-computer graphics software", in *Sixth International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Visualization in Russia*, Saint Petersburg, Russia, 1996.
- [ Kittler, 1960] R. Kittler, "An historical review of method and instrumentation for experimental daylight research by means of models and artificial skies", *Proceedings 14 Th CIE (Commission International de l'Eclairage) Session*, vol. 8, no. 59, pp. 319-334, 1960.
- [ Kittler, 1985] R. Kittler, "Luminance distribution characteristics of homogeneous skies : a measurement and prediction strategy", *Lighting Research and Technology*, pp. 183-188, 1985.
- [ Kittler, 1986] R. Kittler, "Luminance models of homogeneous skies for design and energy performance prediction", In : *Proceedings of the 1 st, International Daylighting Conference*, pp. 18-22, 1986.
- [ Kittler et al., 1992] R. Kittler, S. Hayman, N. Ruck, et W. Julian, "Daylight measurement data : Methods of evaluation and representation", *Lighting Research and Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 173-187, 1992.
- [ Kwok, 1992] Bernard Kwok, "Analyse of Radiosity techniques in computer Graphics", Dept of Computer Science, York University, Toronto, Ontario, Master Thesis ISBN O-315-728450, 1992.
- [ Lam, 1986] W. M. C. Lam, "Sunlight as Formgiver for Architecture", Van Nostrand Reinhold Co, New-York, 1986.
- [ Lau, 1972] J. J. H. Lau, "Use of Scale models for appraising lighting quality", *Lighting Research and Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 254-262, 1972.
- [ Lau, 1992] J.J.H. Lau, "Use of scale models for appraising lighting quality," *Lighting Research and Technology*, pp. Vol. 4, N°4, pp. 354-262, 1992.
- [ Leslie, 2003] R. P. Leslie, "Capturing the daylight dividend in building : why and how ?", *Building and Environments*, vol (38), pp. 381-385, 2003.
- [ Liébard, 2005] A. Liébard and A. De Herbe, "*Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique*", Observ'ER, 2005.
- [ Littlefair, 1985] P. J. Littlefair, "The luminous efficacy of daylight : a review", *Lighting Research and Technology*, pp. vol 17(4), pp. 162-182, 1985.
- [ Littlefair, 1988] P. J. Littlefair, "measurement of the luminous efficacy of daylight", *Lighting Research and Technology*, vol. 20(4), pp. 177-188, 1988.

- [ Maamari, 2004] F. Maamari, "La simulation numérique de l'éclairage : atouts et potentiels," Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France, Thèse de Doctorat, 04 ISAL 0016, Mars 29, 2004.
- [ Maamari et al., 2006] Fawaz Maamari, M. Fontoynt, and N. Adra, "Application of the CIE test cases to assess the accuracy of lighting computer programs", *Energy and Building*, vol (38), pp. 689-877, 2006.
- [ Mark, 2000] S. R. Mark, "*Lighting Handbook : Reference & Application*", New York, USA: The Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), 2000.
- [ Masaki et al., 2001] M. Masaki, Y. Hitoshi, and K. Shoich, "Daylighting simulation of japanese architecture using all sky model", in *Seventh International IBPSA conference*, Rio de Janeiro, 2001.
- [ Matej, 2005] B. Kobav Matej and Bizjak Grega, "Development of a substitutive light source for indoor daylight calculations", *Building and Environment*, vol 40, pp. 1611-1618, 2005.
- [ Matsuura, 1990] K. Matsuura and T. Iwata, "A model of daylight source for the daylight illuminance calculations on the weather conditions", in *In : Proceeding of the third international daylighting conference*, 1990.
- [ Michel, 1998] L. Michel, "IEA 21 Scale Model Daylighting Systems Evaluation", Rapport interne du Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment, September, 1998.
- [ Michel, 1999] L. Michel, "Méthode expérimentale d'évaluation des performances lumineuses des bâtiments," Ecole Polytechnique Fédérale de la Lausanne, Thèse de Doctorat, N° 2042, 1999.
- [ Michel, 1995] L. R. Michel and J.-L.Ch. Scartezzini, "Performance of a new scanning sky simulator", *Lighting Research and Technology*, vol. 27 (4), pp. 197-207, 1995.
- [ Miranville, 2002] F. Miranville, "Contribution à l'étude des parois complexe en physique du bâtiment : modélisation, expérimentation et validation expérimentale de complexe de toiture incluant des produits minces réfléchissant en climat tropical humide", Université de La Réunion, Saint-Denis, Réunion, France, Thèse de Doctorat, Juillet, 2002.
- [ Mitanchey, 1988] R. Mitanchey, "Développement d'un logiciel de simulation de la lumière naturelle," Ecole des Mines de Saint Etienne, Saint Etienne, Diplôme d'étude Approfondies, 1988.

- [ Multon et al., 2004] B. Multon, G. Robin, M. Ruellan, and H. B. Ahmed, "Situation énergétique mondiale à l'aube du 3ième millénaire. Perspectives offertes par les énergies renouvelables", Cachan, 2004.
- [ Murphy, 2007] P. Murphy, "Daylight for the 21st century. New opportunities with daylighting techniques", Washington, 2007.
- [ Nabil, 2005] A. Nabil and J. Mardaljevic, "Useful daylight illuminance : a new paradigm for assessing daylight in building", *Lighting Research Technology*, vol 31 (1) , pp. 41-49, 2005.
- [ Pattanasethanon et al., S. Pattanasethanon, C. Lertsatitthanakorn, S. Atthajariyakul, and S. 2007] Soponronnarit, "All sky modeling daylight availability and illuminance / irradiance on horizontal plane for mahasarakhan", *Energy and management*, vol. 48 (5), pp. 1601-1614, May, 2007.
- [ Perez et al., 1992] R. Perez, J. Michalsky, and R. Seals, "Modeling sky luminance angular distribution for real sky conditions : experimental evaluation of existing algorithms", *Journal of International Energy Society*, vol. 21, pp. 84-92 , 1992.
- [ Perraudau, 1988] M. Perraudau, "Luminance models", in *National Lighting Conference and Daylighting colloquium*, Cambridge, pp. 291-292, 1988.
- [ Pierpoint, 1983] W. A. Pierpoint, "A simple sky model for daylighting calculations", *International Daylighting Conference*, February, 1983.
- [ RAVEL, 1993] RAVEL, "Eclairage : éléments d'éclairagisme", Suisse, 1993.
- [ Secker, 1983] S. M. Secker, "Regional variations of daylight availability - A review of measured data and estimating methods", *Lighting Research and Technology*, vol. 15 (3), pp. 151-156 , 1983.
- [ Sigrid, 2001] R. Sigrid and A. De Herbe, "*L'éclairage naturel des bâtiments*", Wallonne: Presse universitaire de Louvain, 2001.
- [ Siret, 1997] D.I Siret, "Proposition pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural : Application à l'ensoleillement", Université de Nante, Nante, France, Thèse de Doctorat, Juin 13, 1997.
- [ Slater, 2002] A. Slater and H. Graves, "Benchmarking Lighting Design software", CIBSE, London, TM28 / 00, 33.CIBSE, 2002.
- [ Spencer, 1942] M. Spencer, "Illumination from a non-uniform sky", *Illumination Engineering*, vol. 37, pp. 707-726, 1942.

- [ Syurapong, 2001] C. Syurapong, "Development of a methodology and a computer program for calculation of Daylight illuminance through Window", Asian Institute of Technology, Thailand, Daylighting projet Energy Program school of Environment Resource and Development, ISBN : 974-88272-1-6, February 2001.
- [ TECSOL, 2003] TECSOL, "Etude complete pour l'habitat du potentiel solaire réunionnais", Saint-denis, 2003.
- [ Tregenza, 1986] P. Tregenza, "Measured and calculated frequency distribution of daylight illuminance", *Lighting Reseach and Technology*, vol. 18 (2), pp. 71-74 , 1986.
- [ Tregenza, 1983] P. R. Tregenza and I. M. Waters, "Daylight coefficients", *Lighting Research and Technology*, vol. 15 (2), pp. 65-71 , 1983.
- [ Walkenhorst et al., 2002] O. Walkenhorst, J. Luther, C. Reinhart, et J. Timmer, "Dynamic annual daylight simulations based on one-hour and one-minute means of irradiance data", *Solar Energy*, vol 72 (5), pp. 385-395, 2002.
- [ War, 1993] G. J. War, "*The Radiance Synthetic Imaging System*", Californie, USA: Lawrence Berkeley Laboratory, 1993.
- [ Ward, 1994] G. J. Ward, "Application of RADIANCE to architecture and lighting design", in *Proceeding of the 1994 IES National Conference*, August 1994.
- [ Wetter et al., 2004] M. Wetter, E. Polak, et V. P. Carey, "BuildOpt 1.0.1 Validation", Lawrence Berkeley National Laboratory, Californie, Technical Report LBNL-54658, Mars 25, 2004.
- [ William, 1999] L. Carrol William, "A report of IEA; SHC Task21/ ECBCS", Annex 29 and Lawrence Berkeley National Laboratory - 44296, December 1999.

# **ANNEXES**



# ANNEXE A

## Annexe A

### Inventaire des logiciels de simulation numérique de l'éclairage

Le tableau présenté ci-dessous résume la liste exhaustive, par ordre alphabétique, des logiciels qui sont en mesure de réaliser des simulations numériques d'éclairage. Nous les avons classés par domaine d'intervention (éclairage artificiel ou/et naturel – intérieur et/ou extérieur), par mode d'utilisation (payant ou non) et, selon les informations disponibles, par catégories de modèles utilisés.



Nom du Logiciel	Type d'éclairage	Mode d'utilisation	Références (ou site internet)	Modèles utilisés	Observations
<b>ADELINÉ</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.ibp.fhg.de/wt/adeline/">http://www.ibp.fhg.de/wt/adeline/</a> (Allemagne)	Néant	
<b>AGI 32</b>	Naturel et artificiel (intérieur et extérieur)	Payant	<a href="http://www.agi32.com">http://www.agi32.com</a> (U.S.A)	Radiosité, Tracé de Rayons	
<b>Blue Moon rendering Tools</b>	Naturel et artificiel intérieur	Néant	Développé par Larry Gritz dans la Société PIXAR (U.S.A)	Radiosité progressive	
<b>BSim 2002</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.bsimsim.dk">http://www.bsimsim.dk</a> (Denmark)	Radiosité	Packages contenant SimLight
<b>Building Design Advisor</b>	Naturel et artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://gaia.lbl.gov/BDA">http://gaia.lbl.gov/BDA</a> (U.S.A)	Néant	Interface graphique conviviale
<b>Compulyte</b>	Naturel et artificiel (intérieur et extérieur)	Gratuit	<a href="http://www.genlytesupplydivision.com">http://www.genlytesupplydivision.com</a> (U.S.A)	Néant	
<b>Daylight</b>	Naturel et artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://www.archiphysics.com">http://www.archiphysics.com</a> (U.S.A)	Néant	Calcul du facteur de lumière du jour
<b>DAYSIM</b>	Naturel et artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://www.daysim.com">http://www.daysim.com</a> (Canada)	Néant	Logiciel dédié à la recherche
<b>DesignBuilder</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.designbuilder.co.uk">http://www.designbuilder.co.uk</a> (Angleterre)	Néant	Logiciel très complet
<b>DIALUX</b>	Naturel et artificiel (intérieur et extérieur)	Gratuit	<a href="http://www.dialux.com">http://www.dialux.com</a> (Allemagne)	Néant	Très complet
<b>Ecasys</b>	Gestion de l'éclairage intérieur	Payant	<a href="http://www.fundamentalenergy.com">http://www.fundamentalenergy.com</a> (U.S.A)	Néant	Logiciel en ligne
<b>EcoAdvisor</b>	Prise de décision dans un projet d'éclairage	Gratuit	<a href="http://www.ecoadvisor.com">http://www.ecoadvisor.com</a> (U.S.A)	Néant	Logiciel en ligne
<b>Eco Lumen</b>	Artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.ecolumen.com">http://www.ecolumen.com</a> (Inde)	Néant	Permet de réaliser des économies d'électricité

<b>ECOTECT</b>	Naturel et artificiel (intérieur et extérieur)	Payant (existe en version Demo.)	<a href="http://www.ecotect.com/products/ecotect">http://www.ecotect.com/products/ecotect</a> (Angleterre)	Radiosité, Tracé de Rayons, Lumen, Flux Split, ..	Utilise AutoDesk®
<b>ENERGIE+</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	<a href="http://energie.wallonie.be/xml/">http://energie.wallonie.be/xml/</a> (Belgique)	Néant	Logiciel complet regroupant plusieurs laboratoires
<b>Energy Profil Tool</b>	Artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.energyprofiletool.com">http://www.energyprofiletool.com</a> (Canada)	Néant	Etude énergétique d'un bâtiment
<b>ENVSTD and LTGSTD</b>	Naturel et Artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://www.energycodes.gov">http://www.energycodes.gov</a> (U.S.A)	Néant	Utilise DOES
<b>FLucs</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.ies4d.com">http://www.ies4d.com</a> (Angleterre)	Néant	
<b>FLucsDL</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.iesve.com">http://www.iesve.com</a> (Angleterre)	Utilise le FLJ	Voir IES (Illuminating Engineering Society)
<b>FLucsPro</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.iesve.com">http://www.iesve.com</a> (Angleterre)	Radiosité, FLJ,...	Version Professionnelle de FLucs
<b>HELIOS</b>	Naturel et artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://www.helios32.com">http://www.helios32.com</a> (Canada)	Radiosité, Tracé de Rayons, ...	Logiciel adapté à la recherche. Etudie le rendu visuel
<b>HiLight</b>	Artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://www.eley.com">http://www.eley.com</a> (U.S.A)	Néant	Voir norme ASHRAE pour l'éclairage
<b>LESODIAL</b>	Naturel intérieur	Payant	<a href="http://lesowww.epfl.ch/anglais/Leso_a_frame_sof.html">http://lesowww.epfl.ch/anglais/Leso_a_frame_sof.html</a> (Suisse)	FLJ, Radiosité,...	[Bernard, 1999].
<b>Lighting Boy</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.LightingBoy.com">http://www.LightingBoy.com</a> (Canada)	Néant	Traite les données photométriques
<b>Light Pro</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.iesve.com">http://www.iesve.com</a> (Angleterre)		Voir IES [IES, 1989]
<b>Light R</b>	Naturel et artificiel intérieur	Gratuit	Concepteur : Bernard Kwok [Kwok, 1992] (Canada)	Lancer de Rayon, Radiosité	Très simple à utiliser

<b>Lightscape</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.except.nl/lightwave/lslwute/lightscapelightwave-4.htm">http://www.except.nl/lightwave/lslwute/lightscapelightwave-4.htm</a> (Pays Bas)	Néant	Rendu 3D et image de synthèse
<b>LIGHTSWITCH WIZARD</b>	Naturel et artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/software_e.html">http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/software_e.html</a> (Canada)	Néant	Etude annuelle
<b>Lightworks</b>	Naturel et Artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.lightworkdesign.com/">http://www.lightworkdesign.com/</a> (Angleterre)	Néant	Rendu 3D
<b>Load Express</b>	Artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.trane.com/commercial/software">http://www.trane.com/commercial/software</a> (U.S.A)	Néant	Utilisé dans les bâtiments tertiaires
<b>OptiMizer</b>	Artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://www.fdlabs.com/">http://www.fdlabs.com/</a> (U.S.A)	Néant	Audit et diagnostic
<b>Quick Calc</b>	Artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://www.ExcelLine.com">http://www.ExcelLine.com</a> (U.S.A)	Néant	Sous format Excel en ligne. Calculs rapide
<b>Quick Est</b>	Artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://www.genlytesupplydivision.com">http://www.genlytesupplydivision.com</a> (U.S.A)	Néant	En ligne
<b>Radiance</b>	Naturel et artificiel (intérieur et extérieur)	Gratuit (version Démo)	<a href="http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html">http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html</a> (U.S.A)	Radiosité, Tracé de rayon	Logiciel de recherche complet
<b>Radiance Control Panel</b>	Naturel et artificiel (intérieur et extérieur)	Gratuit	: <a href="http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html">http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html</a> (U.S.A)	Tracé de rayon	Utilise Radiance. Etudie l'éblouissement
<b>Radiance Interface</b>	Naturel et artificiel (intérieur et extérieur)	Néant	: <a href="http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html">http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html</a> (U.S.A)		Interface graphique du logiciel Radiance
<b>RadVis</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www.cs.cmu.edu/~radiosity/radvis.html">http://www.cs.cmu.edu/~radiosity/radvis.html</a> (U.S.A)	Radiosité	Rendu visuel uniquement
<b>Raysmith</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	Contacteur Eduardo Bustillo Iceta : <a href="mailto:epabuice@bi.ehu.es">epabuice@bi.ehu.es</a> (Espagne)	Tracer de rayon	Rendu visuel uniquement
<b>Render Park</b>	Naturel et artificiel intérieur	Payant	<a href="http://www2.cs.kuleuven.be/~graphics/renderpark/">http://www2.cs.kuleuven.be/~graphics/renderpark/</a> (Angleterre)	Tracer de rayon et radiosité	Image de synthèse
<b>SkyVision</b>	Naturel et artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ie/lighting/daylight/skyvision_f.html">http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ie/lighting/daylight/skyvision_f.html</a> (Canada)	Néant	lanterneau, optique des vitrages,etc.

<b>Solene</b>	Naturel extérieur/intérieur	Payant	<a href="http://www.cerma.archi.fr/">http://www.cerma.archi.fr/</a> (France)	Néant	Laboratoire de recherche
<b>Sombrero 3.01</b>	Naturel extérieur	Payant (existe en version Demo)	<a href="http://nesa1.uni-siegen.de/">http://nesa1.uni-siegen.de/</a> (Allemagne)	Néant	Masques proches et lointains, ensoleillement, etc.
<b>SPOT</b>	Naturel et artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://www.archenergy.com/SPOT/index.html">http://www.archenergy.com/SPOT/index.html</a> (U.S.A)	Néant	Etude complète annuelle, mensuelle, etc.
<b>Superlite</b>	Naturel et artificiel intérieur	Gratuit	<a href="http://btech.lbl.gov/tools/superlite/about_sl.html">http://btech.lbl.gov/tools/superlite/about_sl.html</a> (U.S.A)	Néant	Logiciel de recherche, bâtiment tertiaire
<b>Visual</b>	Artificiel intérieur et extérieur	Gratuit	<a href="http://www.VisualLightingSoftware.com">http://www.VisualLightingSoftware.com</a> (Angleterre)	Lumen method	Etude dans les rues, décor lumineux, rendu visuel



# ANNEXE B

Annexe B

Erreurs et degré fiabilité des logiciels

Nous présenterons dans cette annexe les méthodes de calcul des erreurs commises par les modèles et les logiciels de simulation. La démarche pour connaître le degré de fiabilité du logiciel est également énoncée.



## B.1. Les Erreurs

Il est fortement conseillé d'utiliser l'écart type pour calculer l'erreur probable entre la mesure et les modèles utilisés lorsque l'on étudie le gisement lumineux solaire extérieur [Dumortier, 1995]. Nous avons tenu compte des méthodes appliquées récemment dans le domaine pour l'étude des erreurs sur l'efficacité lumineuse. Il s'agit des travaux de Gabriel [Gabriel, 2007] et de Pattanasethanon [Pattanasethanon et al., 2007]. Les variables souvent utilisées pour caractériser ces erreurs sont au nombre de 5 : on a l'erreur quadratique moyenne (RMSD), l'écart type moyen (MBD) ; le coefficient de corrélation ( $R^2$ ). Soit donc :

- ✓  $E_{model}$  = Résultats de simulation de l'éclairement naturel lumineux à partir du modèle à un instant  $t$ .
- ✓  $E_{meas}$  = Mesures effectuées sur l'éclairement lumineux à ce même instant.
- ✓  $E_{mean}$  = la valeur moyenne des mesures effectuées  $E_{meas}$ .
- ✓  $N$  = le nombre de mesures.

Nous aurons les formules suivantes :

- L'écart (ou erreur) quadratique moyen ou RMSD (RootMean Square Deviation) utilisé pour les valeurs en lux ou  $W.m^{-2}$  :

$$RMSD = \frac{1}{E_{mean}} \times \left[ \frac{\sum_1^N (E_{model} - E_{meas})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}}$$

- La Moyenne de l'Ecart Type ou MBD (Mean Bias Deviation) utilisée pour les valeurs en lux ou  $W.m^2$ :

$$MBD (\%) = \left[ \frac{\sum_1^N (E_{model} - E_{meas})}{N \times E_{mean}} \right] \times 100$$

- Le coefficient de corrélation  $R^2$  défini par :

$$R^2 (\%) = 100 \times \frac{\sum_1^N (E_{model} - E_{meas})^2}{\sum_1^N (E_{meas} - E_{mean})^2}$$

Par contre, l'étude des erreurs sur les simulations d'éclairement lumineux à l'intérieur d'un local se fait à partir de la moyenne  $\varepsilon$  des erreurs relatives ponctuelles  $\varepsilon_i$  définie par :

$$\varepsilon_i = \frac{V_{sim,i} - V_{ref,i}}{|V_{ref,i}|}$$

Avec

$V_{sim,i}$  : valeur d'éclairage lumineux simulée au point éclairé d'indice  $i$

$V_{ref,i}$  : valeur d'éclairage lumineux de référence au point éclairé d'indice  $i$

$i$  : indice du point se trouvant sur la grille surfacique du plan utile.  $i$  varie de 0 à  $N$  (nombre de points de la grille surfacique).

D'où :

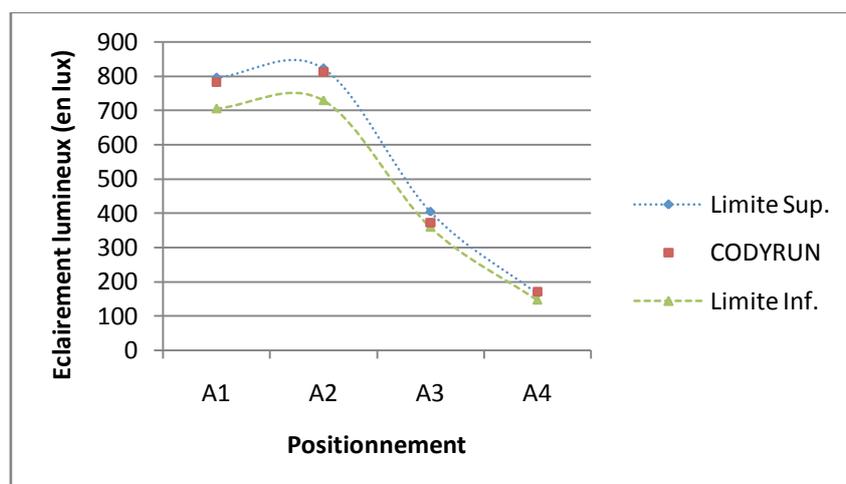
$$\varepsilon = \frac{1}{N} \times \sum_{i=0}^N \varepsilon_i$$

## B.2. Degré de fiabilité d'un logiciel

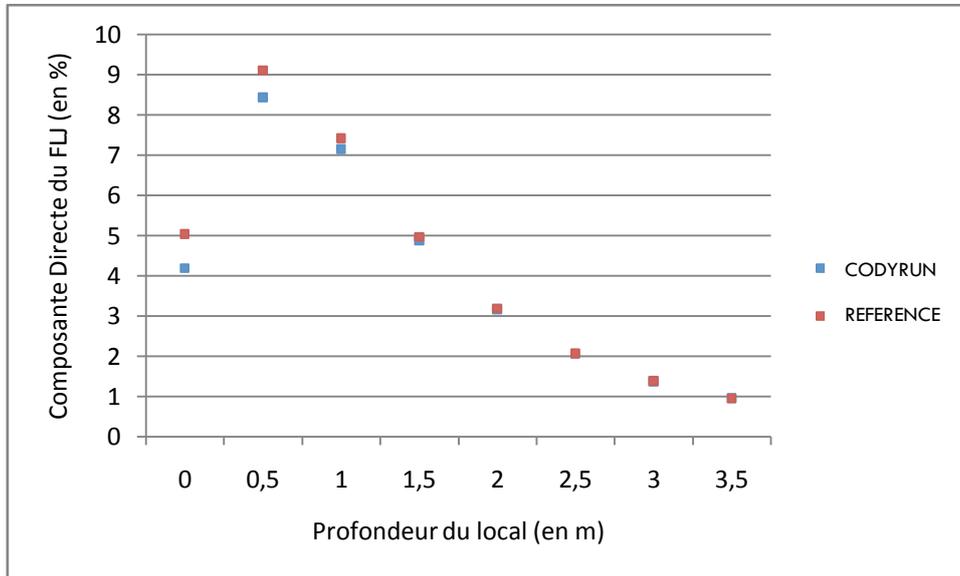
Le degré de fiabilité d'un logiciel (donnée en pourcentage) est la capacité de ce dernier à pouvoir simuler, correctement et de manière réaliste, une variable physique quelconque. Dans notre cas d'étude, la variable sera l'éclairage lumineux intérieur. Etant donné la complexité du domaine photométrique dans lequel on se place, on peut admettre que l'ensemble des résultats de simulation numériques d'un logiciel est acceptable par rapport à la réalité (ou aux résultats de références) lorsque son degré de fiabilité est supérieur ou égale à 50 %. Cela donne une idée précise sur les limites, les points faibles et les points forts du logiciel dans son domaine d'application.

On a alors, deux cas de figure qui se présentent :

- Soit les valeurs de référence sont données en chaque point de mesure (ou de calcul) sous forme de marges (limite Sup. et Limite Inf. de la courbe ci-dessous) de valeurs acceptables pour les résultats (valeurs données par CODYRUN dans la courbe ci-dessous) de simulation. Ces marges sont données par les valeurs mesurées +/- l'erreur totale estimée avec ou sans les erreurs liées à la simulation [Maamari, 2004]. Dans ce cas, le degré de fiabilité est le pourcentage des valeurs simulées comprises entre ces marges de référence.



- Soit les valeurs de référence sont données en chaque point de mesure (ou de calcul) sans les marges de valeurs acceptables pour les résultats de simulation. Alors, il est indispensable de connaître la moyenne d'erreurs relatives entre les valeurs de simulation et les valeurs de référence. Le degré de fiabilité est la soustraction de 100 % par la moyenne d'erreurs relatives obtenue. L'exemple de la figure ci-dessous illustre le cas que nous venons de décrire.





# ANNEXE C

## Annexe C

### Caractéristiques des luxmètres intérieurs et capteur extérieur

Nous présenterons dans cette annexe les caractéristiques de nos capteurs de mesure d'éclairage naturel à l'intérieur (luxmètre intérieur de type FLA603 VL2) du local et du luxmètre (ou capteur) placé à l'extérieur (de type FLA613 VLM) pour mesurer le gisement solaire lumineux. Ces capteurs ont été conçus par la société AHLBORN



### Tête de mesure d'éclairage 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'œil humain.

#### Modèle (avec certificat de contrôle constructeur)

Tête de mesure tous temps pour l'acquisition de l'éclairage énergétique, avec câble 1.5 m et connecteur ALMEMO®

Référence : FLA613VLM

#### Caractéristiques techniques :

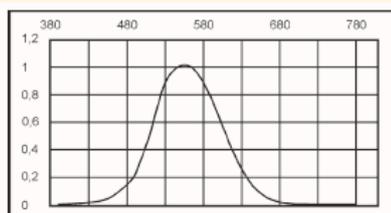
Plage de mesure :	0 à 170 kLux (env. 250W/m <sup>2</sup> )
Sensibilité spectrale :	360 nm à 760 nm
Sensibilité spectrale max. :	550 nm
Signal de sortie :	0 à 2 V
Alimentation :	+5 à +15 V
Fixation :	2 vis M4, dans le socle
Passage du câble :	par le bas
Boîtier :	aluminium anodisé
Diffuseur :	PTFE
Dôme :	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

## RAYONNEMENT OPTIQUE

### Tête de mesure de l'éclairage type FLA603VLx



- ▶ Tête de mesure de grande qualité, pour la détermination de l'éclairage 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  $V(\lambda)$  en vision de jour, classe B, supérieure à 6%.
- ▶ Différents canaux de mesure à sensibilité différente.



#### Modèle:

Tête de mesure d'éclairage, DIN classe B avec câble de raccordement ALMEMO®, longueur 1.5 m, avec certificat d'étalonnage d'usine calibré en lx pour l'éclairage 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 $V(\lambda)$ en vision de jour, classe B, supérieure à 6%
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



# ANNEXE D

Annexe D

Complément de la comparaison des résultats de simulation de CODYRUN avec les cas tests de Maamari

Nous présenterons dans cette annexe les compléments des résultats de simulation analytiques et expérimentaux obtenus à la suite des tests de référence de Maamari effectués sur le logiciel CODYRUN.



**Cas test de référence (II.10)** Ouverture 3mx2m sans vitrage :

Profondeur (en m) et point	Composante Directe (CODYRUN)	Composante Directe (Cas test)	erreur relative (en %)
0.25 (N)	44.40	44.43	0.1
0.75(M)	33.57	33.08	-1.4
1.25 (L)	24.4	23.91	-2.1
1.75 (K)	17.37	16.97	-2.3
2.25 (J)	12.3	12	-2.5
2.75 (I)	8.76	8.53	-2.6
3.25(H)	6.31	6.15	-2.6
3.75 (G)	4.62	4.50	-2.6

## Ouverture 2mx1 m avec vitrage

Profondeur (en m) et point	Composante Directe (CODYRUN)	Composante Directe (Cas test)	erreur relative (en %)
0.25 (N)	2.54	2.13	-19.7
0.75(M)	7.16	7.02	-2.1
1.25 (L)	6.06	6.26	3.1
1.75 (K)	4.14	4.28	3.2
2.25 (J)	2.67	2.78	3.6
2.75 (I)	1.75	1.81	3.2
3.25(H)	1.16	1.21	3.7
3.75 (G)	0.80	0.83	2.7

## Ouverture 3mx2m avec vitrage :

Profondeur (en m) et point	Composante Directe (CODYRUN)	Composante Directe (Cas test)	erreur relative (en %)
0.25 (N)	27.08	30.4	10.9
0.75(M)	28.53	25.7	-11.1
1.25 (L)	20.74	19.74	-5.1
1.75 (K)	14.76	14.42	-2.3
2.25 (J)	10.45	10.34	-1.1
2.75 (I)	7.44	7.41	-0.4
3.25(H)	5.36	5.36	-0.1
3.75 (G)	3.92	3.94	0.3



# ANNEXE E

Annexe E

Complément des cas tests du scénario 1 (TC3-33 du CIE) sur CODYRUN

Nous présenterons dans cette annexe les compléments des comparaisons entre les valeurs de référence du scénario 1 de la tâche TC3-33 du CIE et CODYRUN.



Ligne 1	Colonne						
	1	2	3	4	5	6	7
LS-E <sub>g</sub>	91	107	115	118	116	107	93
LS-E <sub>m</sub>	85	100	108	110	108	100	87
CODYRUN	63	90	95	87	93	91	65
LI-E <sub>m</sub>	65	77	83	85	83	77	67
LI-E <sub>g</sub>	59	70	75	77	76	70	61
Ligne 2	Colonne						
	1	2	3	4	5	6	7
LS-E <sub>g</sub>	103	124	130	129	129	124	105
LS-E <sub>m</sub>	96	116	122	120	121	116	98
CODYRUN	90	137	138	122	137	139	94
LI-E <sub>m</sub>	74	89	94	93	93	89	75
LI-E <sub>g</sub>	67	81	85	84	84	81	68
Ligne 3	Colonne						
	1	2	3	4	5	6	7
LS-E <sub>g</sub>	112	132	141	141	141	131	113
LS-E <sub>m</sub>	105	123	132	132	132	122	106
CODYRUN	94	138	142	129	141	140	97
LI-E <sub>m</sub>	81	95	101	102	101	94	81
LI-E <sub>g</sub>	73	86	92	92	92	86	74
Ligne 4	Colonne						
	1	2	3	4	5	6	7
LS-E <sub>g</sub>	115	133	143	146	143	133	116
LS-E <sub>m</sub>	108	124	133	137	133	124	108
CODYRUN	87	122	129	122	128	123	89
LI-E <sub>m</sub>	83	96	103	105	103	96	83
LI-E <sub>g</sub>	75	87	93	96	93	87	76
Ligne 5	Colonne						
	1	2	3	4	5	6	7
LS-E <sub>g</sub>	113	132	141	140	141	132	112
LS-E <sub>m</sub>	105	124	131	131	131	123	105
CODYRUN	93	136	140	128	139	137	96
LI-E <sub>m</sub>	81	95	101	101	101	95	81
LI-E <sub>g</sub>	74	86	92	92	92	86	73

Ligne 6	Colonne						
	1	2	3	4	5	6	7
LS-E <sub>g</sub>	103	124	130	127	130	123	104
LS-E <sub>m</sub>	97	116	121	119	121	115	97
CODYRUN	93	141	142	135	140	142	96
LI-E <sub>m</sub>	74	89	93	92	93	89	75
LI-E <sub>g</sub>	68	81	85	83	85	81	68
Ligne 7	Colonne						
	1	2	3	4	5	6	7
LS-E <sub>g</sub>	92	108	116	117	115	108	92
LS-E <sub>m</sub>	86	100	108	109	107	100	86
CODYRUN	67	97	100	92	99	97	69
LI-E <sub>m</sub>	66	77	83	84	83	77	66
LI-E <sub>g</sub>	60	70	76	76	75	70	60