

Développement d'une séquence de contrôle pour stores motorisés à l'aide de simulations de l'éclairage naturel

par

Maxime BORNAZAI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE, CONCENTRATION
ÉNERGIES RENOUVELABLES ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 12 JUIN 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Maxime Bornazai, 2018



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Danielle MONFET, directrice de mémoire
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Katherine D'AVIGNON, présidente du jury
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Stanislaw KAJL, membre du jury
Génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 4 MAI 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Les derniers mois durant lesquels j'ai réalisé ce projet de recherche m'ont permis de me dépasser tant au plan personnel que professionnel. Les encouragements de mes collègues et de mes proches ont été la source principale de ma motivation.

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de recherche, Mme Danielle Monfet, de m'avoir donné la chance de réaliser ce projet. Sa disponibilité, son expertise et sa facilité à enseigner ont été très favorables à ma réussite. Aussi, merci de m'avoir laissé la chance de découvrir le domaine de l'enseignement.

Je veux remercier mes parents, mes amis et aussi ma copine Rosalie de m'avoir encouragé et supporté tout au long de mon parcours scolaire qui dure depuis déjà plusieurs années. Je vous en suis reconnaissant.

Grâce au soutien financier du Fonds de développement durable de l'association étudiante de l'ÉTS (FDDAÉÉTS), il m'a été possible de réaliser ce projet. Je vous remercie pour votre collaboration.

Finalement, je tiens à remercier les personnes que j'ai rencontrées soit Alexandre, Marie-Hélène et Gilbert qui m'ont fait apprécier ces études et qui m'ont transmis leurs intérêts pour la recherche.

DÉVELOPPEMENT D'UNE SÉQUENCE DE CONTRÔLE POUR STORES MOTORISÉS À L'AIDE DE SIMULATIONS DE L'ÉCLAIRAGE NATUREL

Maxime BORNAZAI

RÉSUMÉ

L'éclairage naturel est une source d'énergie passive qui doit être mise à contribution dans les bâtiments. Il offre un environnement de travail stimulant et agréable. De plus, il contribue à la productivité des occupants et aide à réduire le niveau d'absentéisme au travail. Toutefois, il est démontré que l'éclairage naturel peut créer certains inconforts visuels à cause des éblouissements et des contrastes élevés de luminosité. Afin de limiter ces effets, l'apport en éclairage naturel doit être contrôlé à l'aide de dispositifs d'ombrage. Le recours à un outil de simulation tel que Radiance permet de simuler le niveau de luminosité dans une pièce afin d'évaluer l'impact de ces dispositifs.

Cette étude propose de développer une séquence de contrôle pour des stores motorisés à l'aide de simulations du niveau de luminosité pour une section des stores, la section R1, de l'atrium de la Maison des étudiants de l'École de technologie supérieure. L'atrium est modélisé à l'aide du logiciel SketchUp et le modèle 3D est calibré à l'aide des données mesurées sur le site pour trois hauteurs (positions) des stores : 7.15 m (Hsm1), 4.47 m (Hsm2) et 2.72 m (Hsm3). Pour le modèle calibré, l'erreur quadratique moyenne (EQM) (lux) et l'erreur quadratique moyenne relative (EQM relative) (%) se situent entre 432 lux à 12 835 lux et 14 % à 35 % pour la position Hsm1, entre 761 lux à 19 727 lux et 6 % à 30 % pour la position Hsm2 ainsi qu'entre 405 lux à 17 780 lux et 9 % à 23 % pour la position Hsm3. Par la suite, le confort visuel est évalué grâce à deux mesures, soit la luminosité utile de la lumière du jour communément appelée *Useful Daylight Illuminance* (UDI) ainsi que l'autonomie spatiale de la lumière du jour communément appelée *Spatial Daylight Autonomy* (sDA). Ces mesures permettent de sélectionner, pour la section R1 de l'atrium, la zone d'application, parmi huit zones étudiées, où sera appliquée la séquence de contrôle. La zone d'application retenue (zone GA) permet d'atteindre des valeurs de l'UDI (sDA) de 31 % (77 %) pour la position Hsm1, 40 % (74 %) pour la position Hsm2 et 46 % (71 %) pour la position Hsm3. Pour développer la séquence de contrôle, les valeurs horaires du rayonnement solaire acceptable sont déterminées pour chaque mois, entre 8h00 et 14h00, au moment où le niveau de luminosité simulé dans la pièce dépasse 3000 lux. Les valeurs sont déterminées pour les positions Hsm1, Hsm2 et Hsm3. Avec l'utilisation de la séquence de contrôle pour la zone GA, entre 8h00 et 11h00, il y a des risques que le niveau de luminosité dépasse 3000 lux. Toutefois, entre 11h00 et 14h00, il n'y a pas de risques que le niveau de luminosité dépasse 3 000 lux.

Mots-clés : Éclairage naturel, confort visuel, Radiance, OpenStudio, store motorisé, atrium, UDI, sDA.

DEVELOPMENT OF A CONTROL SEQUENCE FOR MOTORIZED BLINDS USING DAYLIGHT SIMULATIONS

Maxime BORNAZAI

ABSTRACT

Daylighting is a passive energy that must be used in buildings. It offers a stimulating and pleasant work environment. In addition, it contributes to occupant productivity and helps to reduce absenteeism at work. However, it is shown that daylighting can create some visual discomfort because of glare and high brightness contrasts. In order to limit these effects, the contribution to daylighting must be controlled with the use of shading devices. The use of simulation tool such as Radiance makes it possible to simulate the level of luminosity in a room to evaluate the impact of these devices.

This study proposes to develop a control sequence for motorized blinds using simulations of the level of luminosity for one section, section R1, of the atrium of the Maison des étudiants de l'École de technologie supérieure. The atrium is modeled with SketchUp and the 3D model is calibrated using measured data on site for three heights (positions) of blinds: 7.15 m (Hsm1), 4.47 m (Hsm2) and 2.72 m (Hsm3). For the calibrated model, the mean squared error (MSE) (lux) and the relative mean squared error (relative EQM) (%) range from 432 lux to 12 835 lux and 14 % to 35 % for the Hsm1 position, between 761 lux to 19 727 lux and 6 % to 30 % for the Hsm2 position and between 405 lux to 17 780 lux and 9 % to 23 % for the Hsm3 position. Subsequently, visual comfort is assessed using Useful Daylight Illuminance (UDI) and Spatial Daylight Autonomy (sDA). These measurements make it possible to select for the section R1 of the atrium, the application zone, among eight studied zones, where the control sequence will be applied. The selected application zone (zone GA) achieves UDI (sDA) values of 31 % (77 %) for position Hsm1, 40 % (74 %) for position Hsm2 and 46 % (71 %) for position Hsm3. To develop the control sequence, the hourly values of the acceptable solar radiation are determined for each month, between 8:00 and 14:00, at the moment when the level of simulated level of luminosity in the room exceeds 3000 lux. The values are determined for the positions Hsm1, Hsm2 and Hsm3. With the use of the control sequence for the GA zone, between 8:00 and 11:00, there is a risk that the level of luminosity will exceed 3000 lux. However, between 11:00 and 14:00, there is no risk that the level of luminosity exceeds 3000 lux.

Keywords: Daylighting, visual comfort, Radiance, OpenStudio, motorized blind, atrium, UDI, sDA.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Éclairage dans les bâtiments	5
1.1.1 Dispositifs d'ombrage.....	5
1.1.2 Interactions avec les occupants	8
1.2 Simulations	10
1.2.1 Modèles de ciel	10
1.2.2 Méthodes de calculs.....	11
1.2.3 Environnement extérieur et intérieur	12
1.2.4 Outils disponibles.....	13
1.3 Calibration du modèle.....	16
1.3.1 Méthodes de calibration.....	16
1.3.2 Appareils de mesure.....	16
1.3.3 Collecte de données	17
1.4 Évaluation du confort visuel	20
1.5 Proposition de la séquence de contrôle	23
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	27
2.1 Expérimentation.....	27
2.1.1 Montage expérimental	27
2.1.2 Collecte de données	29
2.2 Simulation : modélisation et calibration du modèle	31
2.2.1 Vérification des données.....	32
2.2.2 Calibration du modèle.....	33
2.3 Identification de la zone d'application.....	34
2.3.1 Évaluation du plan de luminosité.....	34
2.3.2 Sélection de la zone	35
2.4 Proposition d'une séquence de contrôle	36
2.4.1 Évaluation du niveau de rayonnement solaire acceptable selon la période de la journée	36
2.4.2 Intégration du rayonnement solaire acceptable à la séquence de contrôle.....	37
CHAPITRE 3 ÉTUDE DE CAS	39
3.1 Caractéristiques de l'atrium	40
3.2 Montage expérimental	42
3.3 Modélisation de l'atrium.....	44

CHAPITRE 4	RÉSULTATS	45
4.1	Résultats expérimentaux	45
4.1.1	Rayonnement solaire	47
4.1.2	Collecte de données	50
4.2	Modélisation et calibration du modèle	59
4.2.1	Modèle	59
4.2.2	Vérification des données de simulation	60
4.2.3	Calibration du modèle	61
4.3	Identification de la zone d'application	74
4.3.1	Évaluation des plans de luminosité	74
4.3.2	Sélection de la zone	79
4.4	Proposition d'une séquence de contrôle	82
4.4.1	Évaluation du rayonnement solaire acceptable selon la période de la journée	83
4.4.2	Intégration du niveau de rayonnement solaire acceptable à la séquence de contrôle	87
CHAPITRE 5	DISCUSSION	89
CONCLUSION		95
RECOMMANDATIONS		97
BIBLIOGRAPHIE		133

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Outils disponibles pour la modélisation et la simulation15
Tableau 1.2	Études précédentes sur l'éclairage naturel18
Tableau 1.3	EQM et EQM relative (%) obtenues à l'aide de Radiance19
Tableau 1.4	Mesures utilisées pour l'évaluation du niveau de luminosité22
Tableau 2.1	Position des stores30
Tableau 2.2	Coefficients de réflexion des surfaces (IBE-BIV, 2003; Hensen & Lamberts, 2011; IESNA, 2012).31
Tableau 2.3	Propriétés des composantes et des paramètres à évaluer33
Tableau 2.4	Rayonnement solaire acceptable (x_n) (W/m^2)37
Tableau 3.1	Conditions d'ouverture des stores43
Tableau 4.1	Collectes de données46
Tableau 4.2	Comparaison entre les données de P1 et P2, collecte de données no.1.48
Tableau 4.3	Comparaison entre les données de P1 et P2, collecte de données no.2.49
Tableau 4.4	Paramètres évalués61
Tableau 4.5	EQM (lux) (EQM relative (%)) des coefficients TLV du vitrage65
Tableau 4.6	EQM (lux) (EQM relative (%)) des coefficients Cr du sol extérieur67
Tableau 4.7	EQM (lux) (EQM relative (%)) des coefficients TLV du store72
Tableau 4.8	Paramètres du modèle73
Tableau 4.9	EQM (lux) (EQM relative (%)) du modèle 3D73
Tableau 4.10	Profondeur estimée (m) pour les valeurs supérieures à 3000 lux pour Hsm1, Hsm2 et Hsm379
Tableau 4.11	Dimension des zones à l'étude pour le calcul de l'UDI81

Tableau 4.12	Valeurs de l'UDI (%) et de l'sDA (%) pour chaque zone	82
Tableau 4.13	Rayonnement solaire acceptable (x_n) (W/m ²), Zone AA	84
Tableau 4.14	Rayonnement solaire acceptable (x_n) maximum (W/m ²), Zone GA	86

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Critères pour les dispositifs d’ombrage (Kuhn et al., 2001)	7
Figure 1.2 Positions des stores : (a) Méthode précédente (b) nouvelle méthode (Koo et al., 2010)	24
Figure 2.1 Méthodologie	27
Figure 2.2 Schéma expérimental à une zone	28
Figure 2.3 Support et capteur	29
Figure 2.4 Représentation de la position des stores	30
Figure 2.5 Plan de luminosité	32
Figure 2.6 Exemple de plan de luminosité	35
Figure 2.7 Dimensions pour la configuration de la zone	36
Figure 3.1 Espace aménagé dans l’atrium	41
Figure 3.2 Sections des stores motorisés dans l’atrium	41
Figure 3.3 Contrôle des zones des stores motorisés	42
Figure 3.4 Schéma expérimental pour la zone étudiée	43
Figure 4.1 Montage expérimental dans l’atrium	50
Figure 4.2 Données mesurées, Hsm1, 14 octobre 2016	51
Figure 4.3 Données mesurées, Hsm2, 17 octobre 2016	52
Figure 4.4 Données mesurées, Hsm3, 15 octobre 2016	53
Figure 4.5 Données mesurées, Hsm1, 24 mars 2017	54
Figure 4.6 Données mesurées, Hsm2, 23 mars 2017	55
Figure 4.7 Données mesurées, Hsm3, 22 mars 2017	56
Figure 4.8 Données mesurées, Hsm1, 20 juin 2017	57

Figure 4.9	Données mesurées, Hsm2, 22 juin 2017	58
Figure 4.10	Données mesurées, Hsm3, 21 juin 2017	59
Figure 4.11	Vue du modèle 3D	59
Figure 4.12	Plan de luminosité dans le modèle 3D	60
Figure 4.13	Variation du coefficient TLV du vitrage, Hsm1, C1s, 14 octobre 2016.....	63
Figure 4.14	Variation du coefficient TLV du vitrage, Hsm1, C2s, 14 octobre 2016.....	64
Figure 4.15	Variation du coefficient TLV du vitrage, Hsm1, C3s, 14 octobre 2016.....	64
Figure 4.16	Variation du coefficient Cr du sol extérieur, Hsm1, C1s, 14 octobre 2016.....	66
Figure 4.17	Variation du coefficient Cr du sol extérieur, Hsm1, C2s, 14 octobre 2016.....	66
Figure 4.18	Variation du coefficient Cr du sol extérieur, Hsm1, C3s, 14 octobre 2016.....	66
Figure 4.19	Variation du coefficient TLV du store, Hsm3, C1s, 15 octobre 2016.....	68
Figure 4.20	Variation du coefficient TLV du store, Hsm3, C2s, 15 octobre 2016.....	69
Figure 4.21	Variation du coefficient TLV du store, Hsm3, C3s, 15 octobre 2016.....	69
Figure 4.22	Variation du coefficient TLV du store, Hsm2, C1s, 17 octobre 2016.....	69
Figure 4.23	Variation du coefficient TLV du store, Hsm2, C2s, 17 octobre 2016.....	70
Figure 4.24	Variation du coefficient TLV du store, Hsm2, C3s, 17 octobre 2016.....	70
Figure 4.25	Zones d'ensoleillement pour la section R1, Hsm1, 9h00, 12h00 et 14h00.....	76

Figure 4.26	Zones d'ensoleillement pour la section R1, Hsm2, 9h00, 12h00 et 14h00.....	77
Figure 4.27	Zones d'ensoleillement pour la section R1, Hsm3, 9h00, 12h00 et 15h00.....	78
Figure 4.28	Représentation des zones sélectionnées AA, AB, AC, AD, EA, FA, GA et HA.....	80
Figure 4.29	Schéma pour la séquence de contrôle des stores motorisés adapté du schéma de Olbina et Hu (2012).....	88

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BNC	Bayonet Neill–Concelman
BRE	Building Research Establishment
CARS	Coefficient d’apport par rayonnement solaire
CIE	Commission internationale de l’éclairage
Cr	Coefficient de réflexion
CVCA	Chauffage, ventilation et conditionnement de l’air
PVC	Polychlorure de vinyle
EQM	Erreur quadratique moyenne
Er	Erreur relative
ÉTS	École de technologie supérieure
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
MDÉ	Maison des étudiants
PDF	Format de document portable
RTS	Technologie radio Somfy
sDA	Autonomie spatiale de la lumière du jour
TLV	Transmission de lumière visible
UDI	Luminosité utile de la lumière du jour
U	Coefficient de transmission thermique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Lux	Flux lumineux reçu par unité de surface
m	Mètre
m ²	Mètre carré
W/m ²	Watt par mètre carré

INTRODUCTION

En 2016 au Québec, dans le secteur commercial et institutionnel, 56 % de la consommation d'énergie annuelle d'un bâtiment était distribuée en trois pôles principaux : le chauffage (31 %), l'éclairage (17 %) et la climatisation (8 %) (Pineau & Whitmore, 2016). Étant donné que la consommation d'énergie de l'éclairage représente 17 % de la consommation d'énergie annuelle d'un bâtiment, il est intéressant d'intégrer l'éclairage naturel dans les bâtiments afin de réduire celle-ci. L'éclairage naturel offre un environnement de travail stimulant et plus agréable que l'éclairage artificiel, contribue à la productivité des occupants et réduit le niveau d'absentéisme au travail (Leather et al., 1998; Aries et al., 2010). Toutefois, cette intégration ne doit pas se faire au détriment du confort des occupants (Rea, 2000; Hensen & Lamberts, 2011). Par exemple, les rayons solaires qui pénètrent dans une pièce sont réfléchis sur les surfaces pâles et peuvent causer des éblouissements. Aussi, la réflexion des rayons solaires dans l'environnement extérieur peut créer des contrastes élevés entre la luminosité perçue à l'extérieur et celle dans la pièce, ce qui crée un inconfort visuel chez les occupants (Arnal et al., 2011). Bref, ces problèmes engendrent une difficulté à lire, causent une fatigue visuelle plus rapidement et limitent la vue directe à l'extérieur du bâtiment.

Afin d'apporter des solutions à ces problèmes, l'utilisation de dispositifs d'ombrage est envisagée. Un dispositif d'ombrage offre essentiellement de l'ombrage, réfléchit la lumière naturelle dans une pièce et améliore le confort visuel en réduisant les risques d'éblouissement (Konstantoglou & Tsangrassoulis, 2016). Pour certains dispositifs tels que les stores conventionnels et les stores vénitiens, l'usage d'une séquence de contrôle permet d'automatiser et de faciliter leur utilisation par les occupants. Toutefois, une séquence de contrôle présente certains désavantages : lorsqu'elle n'est pas adaptée à l'emplacement du bâtiment et aux conditions météorologiques du site, il en résulte un décalage entre les réglages de la séquence et les besoins en éclairage naturel.

Pour arriver à une solution efficace, il est nécessaire de prendre en compte plusieurs paramètres. La superficie et la hauteur de la pièce ont un impact sur le choix et l'emplacement des sondes de mesures utilisées pour le contrôle. La superficie des fenêtres, la localisation et l'orientation du bâtiment sont aussi importantes quant à l'apport en éclairage naturel. Ainsi, il sera possible de répondre aux besoins des occupants pour leur confort.

L'étude de cas présentée est celle de l'atrium de la Maison des étudiants de l'École de technologie supérieure (ÉTS) à Montréal. Le niveau de luminosité naturelle dans l'atrium est contrôlé à l'aide de stores motorisés sur la façade sud-est. Ceux-ci s'ouvrent et se ferment grâce à une séquence de contrôle liée à un pyranomètre qui mesure le niveau de rayonnement solaire extérieur sur le plan horizontal. Lorsque le pyranomètre capte plus de 450 W/m^2 , les stores descendent (fermeture). Lorsque le pyranomètre capte moins de 350 W/m^2 , les stores montent (ouverture). Malgré ce contrôle, le niveau de luminosité est trop élevé et les rayons directs nuisent au confort visuel et thermique des occupants. De plus, les stores s'ouvrent et se ferment trop fréquemment lorsque les conditions extérieures varient sur une courte période puisqu'aucun délai de contrôle n'est utilisé.

Afin de contribuer à l'amélioration de la séquence de contrôle actuelle, l'étude a pour but de répondre à la question suivante : est-ce qu'une séquence de contrôle des stores motorisés adaptée au site permet d'améliorer le confort visuel des occupants? Pour répondre à cette question, deux objectifs sont visés, soit :

1. Modéliser l'atrium et calibrer le modèle 3D pour simuler l'éclairage naturel;
2. Développer une séquence de contrôle de stores motorisés adaptée à l'atrium à l'aide du modèle calibré.

L'atrium est modélisé à l'aide du module d'extension OpenStudio (N.E.R.L., 2017) dans SketchUp (Google, 2016). Ensuite, les simulations de l'éclairage naturel sont effectuées grâce à Radiance (Ward & Rubinstein, 1988; Larson & Shakespeare, 1998) à partir de l'interface d'OpenStudio. Puis, le modèle est calibré en effectuant une analyse de sensibilité sur différents paramètres du modèle. Différentes configurations de la zone sont évaluées à l'aide des mesures

de la luminosité utile de la lumière du jour (UDI) et de l'autonomie spatiale de la lumière du jour (sDA) à l'aide des simulations pour les trois positions des stores motorisés soit Hsm1 (7.15 m), Hsm2 (4.47 m) et Hsm3 (2.72 m). Ainsi, il est possible de sélectionner, parmi les zones évaluées, la zone d'application pour la séquence de contrôle. Les valeurs horaires du rayonnement solaire acceptable sont déterminées pour chaque mois au moment où le niveau de luminosité simulé dans la pièce dépasse 3000 lux. Ces valeurs sont déterminées pour les positions Hsm1, Hsm2 et Hsm3. Par la suite, ces valeurs sont intégrées à la séquence de contrôle proposée. Les valeurs horaires sont déterminées spécifiquement pour chaque mois étant donné que la latitude du soleil varie au cours de l'année.

Le chapitre 1 présente une revue de la littérature sur l'éclairage dans les bâtiments, la simulation de l'éclairage naturel, la calibration d'un modèle, l'évaluation du confort visuel ainsi des séquences de contrôle proposées. Le chapitre 2 présente la méthodologie utilisée pour l'expérimentation, la simulation de l'éclairage naturel, l'identification de la zone d'application et la proposition d'une séquence de contrôle. Le chapitre 3 présente le cas à l'étude et l'application de la méthodologie proposée pour répondre aux objectifs. Les chapitres 4 et 5 présentent les résultats et une discussion de ceux-ci, respectivement. Finalement, la conclusion présente un résumé de ce qui a été réalisé au cours de l'étude. Des recommandations sont formulées pour les prochaines études.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre décrit l'éclairage dans les bâtiments, la simulation de l'éclairage naturel, la calibration d'un modèle, l'évaluation du confort visuel ainsi des séquences de contrôle proposées.

1.1 Éclairage dans les bâtiments

L'éclairage provient de deux sources distinctes soit de la lumière naturelle ou de la lumière artificielle. Tout d'abord, la lumière naturelle est définie comme une source de lumière blanche qui provient de la lumière directe et diffuse du soleil. Elle permet à la fois d'améliorer le confort des occupants et de contribuer à leur productivité et ainsi réduire le niveau d'absentéisme au travail (Leather et al., 1998; Aries et al., 2010). De plus, elle offre un environnement de travail stimulant et plus agréable que l'éclairage artificiel (Heschong, 2002; Peter Boyce, 2003; Heschong et al., 2013).

La lumière artificielle est définie comme une source de lumière provenant d'appareils électriques. Elle peut être utilisée comme une source d'éclairage complémentaire dans les bâtiments lorsque l'éclairage naturel n'est pas suffisant soit la nuit ou lors des journées partiellement ou complètement nuageuses.

1.1.1 Dispositifs d'ombrage

Un dispositif d'ombrage est un système qui permet de contrôler l'apport en éclairage naturel en bloquant les rayons solaires directs et en laissant pénétrer les rayons diffus. En agissant à titre d'intermédiaire entre l'extérieur et l'intérieur, ces dispositifs offrent de l'ombrage, peuvent redistribuer la lumière naturelle dans la pièce et réduisent les risques d'éblouissement (Konstantoglou & Tsangrassoulis, 2016).

Il existe plusieurs types de dispositifs d'ombrage. L'auvent est un élément extérieur en saillie, fixe ou mobile, offrant à la fois d'abris et de protection contre les rayons directs. Le pare-soleil est semblable à l'auvent. Il peut être fixe ou mobile et offre une protection contre les rayons directs devant une fenêtre. Pour ce qui est du store, plusieurs types sont disponibles. Le store vénitien est un système composé de lamelles horizontales inclinables. Le store conventionnel, opaque ou semi-opaque, est le plus fréquemment utilisé. Le store opaque bloque les rayons directs du soleil et préserve l'intimité, mais limite toutefois l'apport de lumière diffuse. Le store semi-opaque bloque les rayons directs du soleil, mais laisse passer la lumière diffuse. Le store bas haut fonctionne à l'inverse du store conventionnel (Kapsis et al., 2010). Ce dispositif permet de bloquer les rayons solaires à proximité de la fenêtre tout en laissant pénétrer les rayons solaires en profondeur dans la pièce. Par contre, ce dispositif bloque la vue directe vers l'extérieur du bâtiment.

Parmi ces systèmes, ce sont le store vénitien et le store conventionnel qui font le plus souvent l'objet d'études sur l'éclairage naturel dans les bâtiments (Dubois, 2003). Le store vénitien permet de redistribuer une partie de la lumière au fond de la pièce en réfléchissant les rayons sur les lamelles du store vers le plafond (Reinhart & Walkenhorst, 2001). Il permet de contrôler les rayons directs qui entrent dans la pièce, ce qui limite les risques d'éblouissement. Par contre, la vue à l'extérieure peut être limitée lorsque les lamelles sont inclinées. Le store conventionnel peut être ajusté dépendamment des conditions extérieures. Lorsque le ciel est nuageux, le store est ouvert afin de laisser entrer le maximum de lumière naturelle. Lorsque le ciel est éclairci, le store est partiellement ou totalement fermé afin de limiter l'apport en rayons directs.

La Figure 1.1 présente les critères à atteindre lors de l'utilisation des dispositifs d'ombrage. En hiver, l'éclairage naturel et les gains solaires sont maximisés tout en limitant les risques d'éblouissements. En été, l'éclairage naturel est maximisé tout en limitant les gains solaires et les risques d'éblouissements. Ces critères sont applicables lorsque le ciel est éclairci et que les rayons directs du soleil pénètrent dans la pièce. Lorsque le ciel est couvert, l'éclairage naturel peut être maximisé en limitant l'utilisation des dispositifs d'ombrage (Kim et al., 2009; Koo et al., 2010). Aussi, plusieurs critères de confort visuel sont visés tels que l'homogénéité de la luminosité dans la pièce, la protection contre l'éblouissement, la protection de la vue privée, le contact avec l'extérieur et les rendus de couleurs (Kuhn et al., 2001).

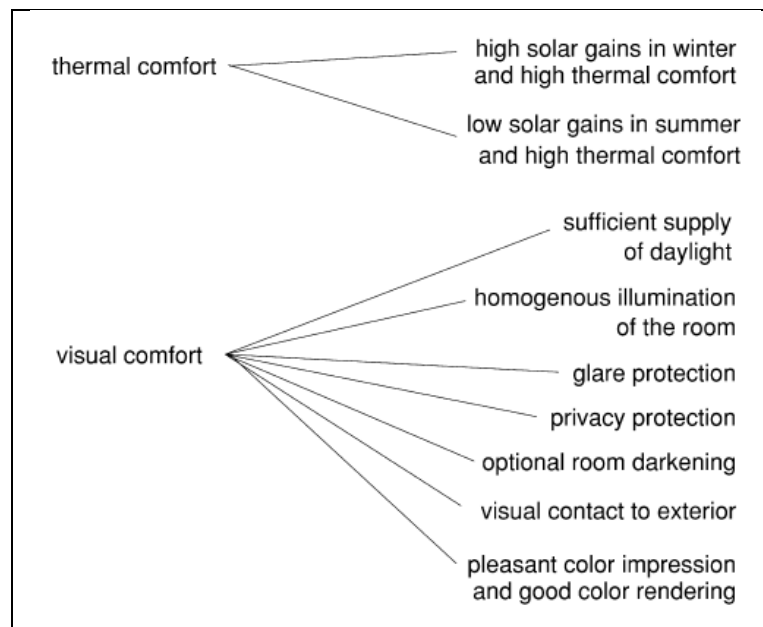


Figure 1.1 : Critères pour les dispositifs d'ombrage (Kuhn et al., 2001)

Dubois (2003) a réalisé une étude comparative sur la performance des différents types de dispositifs d'ombrage. Le pare-soleil, l'auvent blanc et le store vénitien horizontal offrent un niveau de luminosité un peu élevé, mais tout de même adéquat pour l'éclairage d'un plan de travail. Le store vénitien à 45 degrés et le store conventionnel blanc offrent un niveau de luminosité acceptable pour l'éclairage d'un plan de travail.

Les stores vénitiens et conventionnels sont opérés selon trois types d'opération soit manuel, motorisé et automatisé (Kim et al., 2009). Le type d'opération utilisé dépend des besoins, de la précision des résultats attendus et surtout de l'investissement financier accordé au projet.

Le mode manuel nécessite que l'utilisateur se déplace pour ajuster le dispositif selon ses besoins et son confort. Un problème lié au mode manuel est que l'occupant ajuste le dispositif seulement lorsqu'il est inconfortable (Kim et al., 2009). Aussi, la fréquence à laquelle le dispositif d'ombrage est ajusté n'est pas optimale puisque l'occupant est peu actif à ajuster la position de celui-ci (O'Brien et al., 2013). L'occupant peut aussi avoir recours au mode motorisé afin d'ajuster le dispositif. Le mode automatique permet de régler le système d'ombrage, en incluant le contrôle de l'éclairage électrique si désiré, à un niveau de luminosité confortable ce qui permet de réaliser des économies d'électricité dans le bâtiment (Karizi et al., 2014). Un dispositif d'ombrage automatisé est plus avantageux pour l'occupant puisqu'il n'a pas besoin de l'ajuster. Donc, l'occupant reste concentré sur ses tâches et il maintient sa productivité (Kim et al., 2009). Toutefois, lorsque le contrôle automatisé n'est pas bien utilisé selon l'emplacement et les conditions des lieux, il peut y avoir un décalage entre les réglages et les conditions réelles. Aussi, les stratégies de contrôle liées à l'automatisation des dispositifs sont souvent trop simples ou trop complexes à conceptualiser et à appliquer (Konstantoglou & Tsangrassoulis, 2016).

1.1.2 Interactions avec les occupants

Selon l'étude de Sadeghi et al. (2016), les principales raisons qui incitent les occupants à fermer les stores sont de réduire le niveau de luminosité global sur le plan de travail et de réduire l'éblouissement sur les écrans d'ordinateur. À l'inverse, les raisons qui incitent les occupants à ouvrir les stores sont d'augmenter le niveau d'éclairage naturel dans l'espace de travail et d'avoir une meilleure vue à l'extérieur. Escuyer et Fontoynt (2001) ont aussi déterminé que le contrôle de l'éclairage naturel dépend de l'intérêt des occupants à vouloir regarder à l'extérieur et à avoir une vue privée. Selon l'étude de Van Den Wymelenberg (2012), les trois éléments qui affectent l'utilisation des stores sont l'orientation du bâtiment, les saisons et les

conditions du ciel. Dans certains cas, l'utilisation du store peut être non désirée, non appropriée ou impossible. Cela est dû à l'inaccessibilité de la fenêtre, le besoin d'avoir une vue en continu avec l'extérieur ou le besoin d'avoir un niveau de luminosité élevé pour le travail (Hopkinson, 1972).

Ce ne sont pas tous les occupants qui ont le même intérêt à utiliser un dispositif d'ombrage. En effet, il existe deux types d'utilisateurs de l'éclairage naturel soit l'utilisateur passif et l'utilisateur actif (Bourgeois et al., 2006). Le type d'utilisateur a une influence sur le niveau d'éclairage dans une pièce et sur l'utilisation de l'éclairage électrique. Un utilisateur passif priorise l'éclairage électrique et limite l'apport en éclairage naturel. Un utilisateur actif ajuste les dispositifs d'ombrage afin de prioriser la lumière naturelle à l'éclairage électrique. Malgré la présence d'utilisateurs actifs, l'optimisation de l'éclairage naturel peut être difficilement atteinte en considérant que l'utilisateur ajuste le dispositif d'ombrage selon ses propres critères de confort. Ce contrôle n'est pas fiable et les occupants doivent constamment ajuster le dispositif pour atteindre les résultats escomptés (Athienitis & Tzempelikos, 2002).

Un autre problème est le contrôle de l'éclairage électrique par les occupants : lorsque le niveau d'éclairage naturel est confortable ou élevé, les occupants ne ferment pas l'éclairage électrique puisqu'ils oublient que celui-ci est ouvert (Pigg et al., 1996). Dans le cas de l'utilisation d'un dispositif d'ombrage tel que le store vénitien, les occupants ont tendance à modifier l'angle d'inclinaison seulement lorsque le confort visuel n'est pas adéquat, ce qui limite la réduction de la consommation d'énergie (Kim et al., 2009). Pourtant, c'est à ces moments qu'il serait possible de réaliser des économies d'énergie. Pigg et al. (1996) ont constaté que les occupants n'éteignent pas toujours l'éclairage électrique lorsque le niveau d'éclairage naturel dans la pièce est élevé. Ils suggèrent de relier le système d'éclairage électrique à un détecteur de mouvements ou à un dispositif de fermeture. Ainsi, l'éclairage est ajusté à la baisse et le niveau de luminosité correspond à celui désiré tout en permettant de réaliser des économies d'énergie.

1.2 Simulations

Étant donné qu'il peut être difficile d'optimiser les économies d'énergie en laissant le contrôle des dispositifs d'ombrage aux occupants, il est nécessaire de pouvoir prédire la position des dispositifs d'ombrage afin de les ajuster automatiquement au moment opportun.

À l'aide des logiciels de simulation, il est possible d'évaluer le niveau de luminosité dans les bâtiments pour une année complète. La simulation de l'éclairage naturel peut répondre aux questions quant à l'apport et à la propagation de l'éclairage naturel dans une pièce ainsi que son impact sur les gains thermiques. De plus, elle permet de prédire le niveau de luminosité à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments sous des conditions de ciels déterminées pour ensuite interpréter les résultats à l'aide de mesures de performance (voir section 1.4).

L'éclairage naturel est considéré comme une source lumineuse variable tandis que l'éclairage par les appareils électriques, considéré comme une source lumineuse constante, est utilisé comme éclairage d'appoint. Puisque ces deux types de sources lumineuses proviennent de localisations différentes, il est suggéré d'établir la prédiction de celles-ci séparément (Park & Athienitis, 2003).

1.2.1 Modèles de ciel

La distribution de la luminosité du ciel varie durant la journée selon la position du soleil. De plus, les conditions météorologiques et le climat sont des paramètres qui varient selon l'emplacement. Deux modèles de ciel sont principalement utilisés afin de reproduire les types de ciels existants; le modèle de la commission internationale de l'éclairage (CIE) et le modèle de Perez.

La commission internationale de l'éclairage est une coopération mondiale liée à l'échange d'informations quant à l'art de la lumière et de l'éclairage (CIE, 2018). Elle a proposé en 1994 un modèle de ciel standard nuageux et un modèle de ciel clair (CIE, 1994). Par la suite, la CIE (2003) et l'ISO (2004) ont adopté une classification de 15 types de ciels (Ferraro et al., 2013).

Le modèle de Perez (Perez et al., 1993) est un algorithme qui utilise la clarté et la luminosité comme paramètres. Ce modèle repose sur les mêmes équations que le modèle de la CIE. Toutefois, la différence se situe par rapport aux modèles standards de la CIE qui offre 15 types de cieux selon les paramètres des équations déterminées alors que le modèle de Perez permet de varier les paramètres des équations selon le rayonnement, l'éclairage direct et l'éclairage diffus (Hensen & Lamberts, 2011).

1.2.2 Méthodes de calculs

Il existe différentes approches numériques utilisées afin de reproduire l'éclairage naturel dans une pièce selon les modèles de cieux décrits à la section 1.2.1. Dans leur étude, Ochoa et al. (2012) présentent quatre méthodes principales pour la simulation de l'éclairage : méthode de flux partagés, méthode de radiosité, méthode de traçage des rayons et méthode Monte-Carlo.

La méthode des flux partagés, développée à l'établissement de recherche en bâtiment britannique (BRE), modélise seulement les conditions de cieux diffus (Hensen & Lamberts, 2011). Basée sur les travaux de Dufton (1946), elle divise le niveau de luminosité intérieur en trois composants soit le composant du ciel, le composant de réflexion externe et le composant de réflexion interne. Cette méthode considère uniquement les objets avec une vue directe, ce qui sous-estime la répartition réelle du facteur de la lumière du jour dans l'espace (Hensen & Lamberts, 2011).

La méthode de radiosité permet de calculer le niveau de luminosité selon le niveau d'éclairage naturel ou électrique (Hensen & Lamberts, 2011). L'hypothèse initiale de cette méthode est que les surfaces diffuses vont générer la même intensité dans toutes les directions (Bao et al., 1997). Donc, la surface principale est divisée en plusieurs surfaces plus petites et il est possible d'associer leur intensité à une constante. La distribution ne dépend plus de la surface et de la direction de l'émission et les surfaces sont alors considérées comme des surfaces diffuses.

La méthode de traçage des rayons (Cook et al., 1984) permet de simuler les rayons lumineux individuels dans une scène et d'extrapoler la répartition de la lumière selon deux types; le traçage des rayons vers l'avant et le traçage des rayons vers l'arrière (Hensen & Lamberts, 2011). Le traçage des rayons vers l'avant est utilisé pour analyser l'interaction de la lumière avec des composants individuels tel qu'un store vénitien. Le traçage des rayons vers l'arrière (*Backward Ray Tracing*) est utilisé pour des scènes plus complexes (Larson & Shakespeare, 1998). Dans ce cas, les rayons sont émis à partir du point étudié et parcourent le chemin arrière jusqu'à ce qu'une source lumineuse soit atteinte.

La méthode Monte-Carlo est considérée comme un calcul répétitif du chemin que fait une particule de lumière à partir de son émission jusqu'à une éventuelle absorption (Tregenza, 1983). Elle peut être utilisée pour effectuer les calculs des méthodes de radiosité et de traçage des rayons.

1.2.3 Environnement extérieur et intérieur

La qualité des résultats d'une simulation est en grande partie liée à une modélisation détaillée et adéquate de l'environnement extérieur. Toutefois, les logiciels de modélisation ne permettent pas de représenter convenablement l'environnement extérieur ce qui a une grande influence sur la luminosité intérieure (Reinhart & Walkenhorst, 2001).

La réflexion des rayons solaires sur les surfaces varie d'un matériau à un autre. La réflexion des rayons est présente sur le plancher, les murs, le plafond, les éléments architecturaux, l'environnement extérieur, etc. Ce sont les surfaces représentées par les tuiles polies, les carreaux d'insonorisation pour le plafond, le dessus d'une table et les panneaux avec un fini glacé qui sont à risque de créer de l'éblouissement (Hopkinson, 1972). Toutefois, il est encore difficile de simuler la réflexion de la lumière naturelle sur les parois et sur les fournitures dans une pièce (Dubois, 2003). Donc, il est préférable d'exclure le mobilier lors des simulations.

La réflexion des rayons est particulièrement importante lorsque le ratio de la fenêtre sur le mur est petit puisque le niveau de luminosité dans la pièce provient de la réflexion des rayons sur les parois internes. Dubois et Flodberg (2013) suggèrent que le choix de la couleur des murs intérieurs devrait faire partie intégrante de la conception des projets. Ainsi, les simulations permettraient de prédire à un certain degré de certitude le niveau de luminosité espéré dans une pièce. Aussi, il pourrait en découler des choix plus appropriés sur le type d'éclairage électrique nécessaire et sur l'ajout de dispositifs d'ombrage adaptés à la pièce. Pourtant, le problème récurrent est que le choix de la couleur est effectué vers la fin du projet.

Le coefficient de transmission de lumière visible (TLV) a un impact sur la quantité de rayonnement solaire traversant un composant. Dans le cas d'un vitrage, le coefficient TLV laisse entrer plus ou moins de rayons dans la pièce. Dans le cas d'un dispositif d'ombrage tel que le store conventionnel, la diminution du coefficient TLV permettrait de bloquer une partie des rayons directs afin d'offrir un éclairage diffus.

1.2.4 Outils disponibles

Il existe différents outils de modélisation et de simulation pour l'éclairage naturel. Les principaux outils sont présentés dans cette section. D'autres outils fréquemment utilisés sont présentés au Tableau 1.1.

SketchUp est un logiciel de modélisation 3D qui permet de dessiner des plans et de modéliser des volumétries (Google, 2016). Il permet de créer des ouvertures, de modifier des textures et de modéliser des éléments architecturaux tels que les colonnes, les meneaux et les poutres.

Radiance est un outil de simulation d'éclairage validé qui permet de simuler l'éclairage naturel (Ward & Rubinstein, 1988; Larson & Shakespeare, 1998). Le moteur de simulation de Radiance utilise une approche hybride entre la méthode Monte-Carlo et le traçage des rayons, ce qui permet d'obtenir un résultat raisonnablement précis dans un délai raisonnable (Hensen & Lamberts, 2011). D'après l'étude de Reinhart et Fitz (2006), plus de 50 % des programmes de simulation utilisent le moteur de simulation de Radiance.

OpenStudio est un module d'extension pour SketchUp et aussi une plateforme de travail qui permet de soutenir la modélisation énergétique du bâtiment et les calculs de l'éclairage naturel effectués par Radiance (N.E.R.L., 2017). Grâce aux fonctions d'OpenStudio, il est possible d'insérer, de manière virtuelle, un plan de luminosité et des capteurs de luminosité dans le modèle 3D de SketchUp afin de simuler le niveau de luminosité à l'aide de Radiance.

EnergyPlus est un logiciel de simulation thermique et énergétique des bâtiments qui permet de réaliser des études sur la demande et la consommation énergétique (EnergyPlus, 2017). Il peut être utilisé pour l'analyse du chauffage, de la climatisation, de la ventilation, de l'éclairage et d'autres domaines connexes.

Tableau 1.1 : Outils disponibles pour la modélisation et la simulation

Outils	Descriptions	Références
Ecotect	Logiciel de simulation qui permet d'effectuer des analyses solaires, thermiques, acoustiques et de coûts qui s'associent à un modèleur 3D à l'aide de Radiance et d'EnergyPlus. Permet de visualiser le rayonnement solaire, de calculer les niveaux de luminosité et d'afficher la position du soleil selon la localisation, la date et l'heure choisie.	Ecotect (2007) N.E.R.L. (2017)
DIVA-for-Rhino	Interface hautement optimisée pour Rhinoceros afin de modéliser l'éclairage naturel. Permet d'évaluer la performance environnementale des bâtiments grâce à plusieurs tâches de modélisation et d'analyse. Peut être utilisée afin de mesurer le niveau de luminosité en se basant sur des images à grande gamme dynamique.	DIVA-for-Rhino (2018)
Rhinoceros	Logiciel de modélisation 3D qui peut effectuer une multitude de tâches tant pour la modélisation que pour les rendus. Utilise l'extension DIVA-for-Rhino afin d'effectuer les simulations.	Rhinoceros (2018)
DAYSIM	Logiciel d'analyse qui modélise l'éclairage naturel dans les bâtiments. Permet de modéliser des façades avec des stores vénitiens, différents types de vitrages et une combinaison de ces éléments. Peut être utilisé comme une extension à partir de Rhinoceros, SketchUp et Ecotect. Effectue les calculs à partir des algorithmes provenant de Radiance.	DAYSIM (2018)
ESP-r	Logiciel de simulation qui permet d'évaluer la forme du bâtiment, l'environnement, la ventilation et la régulation. Permet de modéliser la chaleur, l'air, l'humidité et les flux d'énergie électrique. Utilise Radiance afin d'effectuer les calculs sur l'éclairage.	ESP-r (2018)

1.3 Calibration du modèle

Cette section présente les méthodes de calibration, les appareils de mesure et les méthodes de collectes de données afin de calibrer un modèle.

1.3.1 Méthodes de calibration

La calibration permet d'ajuster différents paramètres d'un modèle afin que les données simulées soient le plus similaires aux données mesurées. Un modèle peut être calibré selon trois méthodes soit la comparaison des résultats de la simulation avec un scénario pouvant être résolu analytiquement (Athienitis & Tzempelikos, 2002; Tzempelikos et al., 2004; Gomes et al., 2014; Karizi et al., 2014), la comparaison avec les résultats de d'autres logiciels (Hu & Olbina, 2014) et la comparaison avec des données mesurées (Jarvis & Donn, 1997; Reinhart & Walkenhorst, 2001; Galasiu & Atif, 2002; Yun et al., 2014; Gilani & O'Brien, 2016).

1.3.2 Appareils de mesure

L'éclairage naturel peut être mesuré à l'aide de deux appareils de mesure : un pyranomètre et un capteur photométrique. Un pyranomètre est un instrument qui capte le flux thermique afin de mesurer le rayonnement solaire (W/m^2). Un capteur photométrique permet de mesurer le niveau de luminosité (lux). Différents facteurs peuvent contraindre l'utilisation du capteur photométrique tels que son champ de vision, le niveau de luminosité dans une pièce lorsqu'il est utilisé dans celle-ci, la composition spectrale de la lumière ainsi que la distribution de la lumière naturelle et artificielle (Doulos et al., 2008). Un facteur supplémentaire à prendre en compte est la position du capteur dans une pièce. Reinhart et Walkenhorst (2001) ont démontré que les données mesurées par un capteur situé au plafond sont plus élevées que les données provenant d'un capteur situé sur un plan de travail étant donné la lumière réfléchi par l'environnement extérieur. Aussi, Doulos et al. (2014) ont constaté qu'il est difficile de capter les changements du niveau de luminosité sur un plan de travail lorsque le capteur est situé au plafond. Il est donc préférable de mettre un capteur sur le plan de travail.

Un capteur situé sur un plan de travail peut obtenir des données erronées dues au passage des occupants et de la présence d'objets à proximité qui cachent la lumière directe sur celui-ci à certains moments de la journée (Park & Athienitis, 2003; Arnal et al., 2011; Doulos et al., 2014). Dans certains cas, l'ombrage créé peut provenir des éléments structuraux du bâtiment tels que les colonnes, les meneaux des murs-rideaux et les garde-corps. Ces éléments ne peuvent pas être négligés lors des collectes de données ou des simulations puisqu'ils sont permanents. Colaco et al. (2008) suggèrent que les futures recherches devraient se concentrer sur l'optimisation du contrôle des systèmes en améliorant l'emplacement des capteurs et la connexion du système avec des mesures en temps réel. Finalement, Thanachareonkit et al. (2006) ont conclu dans leur étude qu'il peut y avoir un écart de 10 % entre les données simulées et les données mesurées lorsqu'il y a une variation de plus de 0.05 m sur la position d'un capteur. Donc, il est important que la position des capteurs lors des collectes de données soit la même à chaque fois.

1.3.3 Collecte de données

En combinant l'utilisation d'un pyranomètre situé à l'extérieur et d'un capteur photométrique situé dans la pièce, il est possible de connaître le niveau de luminosité et le niveau de rayonnement solaire extérieur pour une même période. Ces appareils ont été utilisés dans plusieurs études précédentes pour effectuer des collectes de données. Le Tableau 1.2 présente les informations telles que le nombre de jours de collecte, les variables mesurées, la durée des collectes, le pas de temps ainsi que la référence de l'étude pour six études de ce genre. Les valeurs de ces paramètres varient d'une étude à l'autre puisqu'il n'y a pas de suggestions ou de recommandations précises reconnues quant à la méthode à utiliser.

Tableau 1.2 : Études précédentes sur l'éclairage naturel

Nombre jours de collecte	Variables mesurées	Durée de la collecte	Pas de temps	Références
34	(a) Rayonnement solaire global (b) Niveau de luminosité intérieur	9h00 - 16h00	a) 5 min. b) 10 sec.	Gilani et O'Brien (2016)
12	Niveau d'éclairage naturel	8h30 - 17h00	1 min.	Littlefair (2001)
8	Niveau de luminosité extérieur et intérieur	9h00 - 16h00	5 min.	Mousavi et al. (2016)
6	(a) Rayonnement solaire (b) Niveau de luminosité naturel intérieur	9h00 - 18h00	Non spécifié	Kim et al. (2009)
1	Niveau de luminosité extérieur et intérieur	9h15 - 15h05	Non spécifié	Lim et al. (2010)
1	Niveau de luminosité	10h00 - 17h00	15 min.	Thanachareonkit et al. (2005)

L'objectif de calibrer un modèle est d'obtenir un modèle 3D dont les niveaux de luminosité simulés sont représentatifs des niveaux de luminosité mesurés. L'erreur quadratique moyenne (EQM) et l'erreur quadratique moyenne relative (EQM relative) sont utilisées pour comparer les données mesurées et simulées. Il n'existe pas de standard ou de référence commune pour que les valeurs de la simulation soient considérées comme « valables ». Toutefois, l'écart d'erreur acceptable suggéré est de 32 % (Reinhart & Breton, 2009). Cette valeur est basée sur le plus grand écart obtenu lors d'une validation du logiciel Daysim pour l'éclairage naturel par Reinhart et Walkenhorst (2001). Le Tableau 1.3 présente les résultats de l'EQM (lux) et de l'EQM relative (%) obtenus par trois études sur la simulation de l'éclairage naturel à l'aide de Radiance.

Tableau 1.3 : EQM et EQM relative (%) obtenues à l'aide de Radiance

EQM / EQM relative	Durée ou nombre	Référence
Entre 8408 lux et 11 169 lux	34 jours	Gilani et O'Brien (2016)
6 % à 26 %	10 097 types de ciel	Reinhart et Walkenhorst (2001)
21 % à 110 % ¹ 15 % à 73 % ²	14 jours	Reinhart et Breton (2009) Logiciels : ¹ 3dsMax, ² DAYSIM

Gilani et O'Brien (2016) ont fait une étude sur la comparaison du niveau de luminosité simulé et mesuré à l'aide de capteurs et du rayonnement solaire mesuré par un pyranomètre. Le niveau de luminosité intérieur est prédit grâce à Radiance et à DAYSIM à partir d'un modèle SketchUp. Les données sont collectées dans un bureau situé au campus de l'Université Carleton entre 9h00 et 16h00. Trois capteurs ont mesuré le niveau de luminosité à une distance de 1 m, 2 m et 3 m de la fenêtre. Un pyranomètre a mesuré le rayonnement solaire extérieur. Les valeurs de radiation solaire directe normale et diffuse sont calculées à partir de la valeur du rayonnement solaire total mesuré. Les résultats ont démontré que la radiation solaire globale a une influence plus importante pour le capteur situé à 1 m de la fenêtre en atteignant des valeurs d'EQM de 8408 lux et 11 169 lux à 300 - 440 W/m² et à 400 - 550 W/m² respectivement. Par la suite, une analyse de sensibilité a été réalisée. Les résultats ont démontré que la réflexion du rayonnement sur les murs est le paramètre qui a le plus grand impact sur la valeur de l'EQM. Les résultats démontrent une variation de 16 % pour le capteur situé à une distance de 3 m de la fenêtre. Pour les capteurs situés à 1 m et à 2 m, la valeur de l'EQM a varié de 4 %. Ensuite, les résultats ont démontré que la variation du coefficient de transmission du vitrage a un impact plus significatif pour les capteurs situés à 1 m et à 2 m de la fenêtre. Il a été noté que les écarts entre les valeurs mesurées et simulées sont dus à l'approche utilisée pour calculer la radiation solaire directe normale et diffuse qui est basée sur le rayonnement solaire global. Suite à leur étude, Gilani et O'Brien (2016) suggèrent l'évaluation de la position des dispositifs d'ombrage et de la précision de l'éclairement du plan de travail lors des simulations pour de futures recherches.

1.4 Évaluation du confort visuel

L'intégration de l'éclairage naturel dans les bâtiments doit permettre un confort visuel adéquat pour les occupants. Le niveau de luminosité désiré varie selon le niveau d'occupation et le type de tâche réalisé par les occupants. De plus, il est important de prendre en compte l'âge, le degré de fatigue et les antécédents culturels des occupants (Rea, 2000). Des niveaux de luminosités recommandés ont été suggérés suite à différentes recherches. Tout d'abord, Rea (2000) suggère un niveau de luminosité de 300 lux pour un travail intensif à l'ordinateur et un niveau de luminosité de 500 lux pour travail intermittent à l'ordinateur. Selon une étude faite par Veitch et Newsham (2000), le niveau moyen de luminosité acceptable se situe entre 400 lux et 500 lux.

L'interaction du rayonnement solaire avec l'environnement peut créer des problèmes. Arnal et al. (2011) définissent trois types d'éblouissement soit la vue directe vers le soleil, la réflexion des rayons solaires dans une pièce et le contraste trop élevé entre le niveau de luminosité dans une pièce et celui de l'environnement extérieur. Par exemple, les rayons directs qui pénètrent dans une pièce et qui atteignent des surfaces pâles ou réfléchissantes engendrent de l'éblouissement. Ces problèmes ont des répercussions sur les occupants tels qu'une difficulté à lire et à utiliser l'écran d'ordinateur, causent une fatigue visuelle plus rapide et la vue directe à l'extérieur du bâtiment est limitée.

Le confort visuel dans une pièce peut être évalué à l'aide de différentes mesures de performance. Certaines permettent d'évaluer l'éblouissement tandis que d'autres permettent d'évaluer le niveau de luminosité. Étant donné que la définition d'un niveau de luminosité « adéquat » ne semble pas être encore bien définie, celui-ci sera considéré comme un bon niveau de luminosité lorsque les inconforts visuels sont minimisés et lorsqu'une bonne qualité visuelle est possible sous des conditions ensoleillées durant l'année (Mardaljevic et al., 2009). Toutefois, une question souvent soulevée est s'il est adéquat de considérer qu'une seule mesure pour décrire l'éclairage naturel dans une pièce (Mardaljevic et al., 2009). C'est pourquoi l'utilisation de plusieurs mesures devrait être envisagée pour évaluer le confort visuel dans une pièce. Ainsi, cette combinaison de mesure pourrait servir à évaluer différents aspects pour une

même simulation tels que le niveau de luminosité minimum et maximum, l'inconfort visuel et l'éblouissement. Cela permettrait aussi de déterminer quelles mesures ont le plus d'impact selon l'étude effectuée.

Développé par Nabil et Mardaljevic (2005), l'éclairage utile de la lumière du jour communément appelée l'*Useful Daylight Illuminance* (UDI) est une mesure qui permet d'évaluer la proportion d'une zone, en pourcentage, pour laquelle le niveau de luminosité se situe entre 100 lux et 2000 lux au moins 50 % du temps. La limite supérieure est fixée à 2000 lux puisqu'au-dessus de celle-ci il y a des risques d'éblouissement.

Nabil et Mardaljevic (2006) décrivent les niveaux de luminosité pour l'UDI selon quatre catégories :

- Un niveau de luminosité inférieur à 100 lux est généralement considéré comme insuffisant. Un apport en éclairage électrique peut être combiné avec l'éclairage naturel;
- Un niveau de luminosité entre 100 et 500 lux est considéré comme fonctionnel. Un apport en éclairage électrique peut être tout de même combiné avec l'éclairage naturel;
- Un niveau de luminosité entre 500 et 2000 lux est considéré comme désirable et tolérable; aucun éclairage électrique n'est requis;
- Un niveau de luminosité supérieur à 2000 lux est considéré comme pouvant créer un inconfort thermique et visuel.

Il est important de mentionner que la valeur supérieure de 2000 lux a été augmentée à 3000 lux. La raison qui explique ce changement est la présence des nouveaux types d'écrans d'ordinateur qui tolèrent mieux les niveaux de luminosité élevés (Mardaljevic, 2015). De plus, les résultats de la mesure de l'UDI obtenus par Radiance pour un modèle OpenStudio sont calculés pour une plage entre 100 lux et 3000 lux.

L'autonomie spatiale de la lumière du jour communément appelée *Spatial Daylight Autonomy* (sDA) permet d'évaluer la proportion d'une zone, en pourcentage, pour laquelle le niveau de luminosité est supérieur à 300 lux au moins 50 % du temps. Le seuil préférable pour la valeur de l'sDA doit être une valeur supérieure à 75 % et le seuil nominal acceptable pour la valeur de l'sDA doit être une valeur supérieure à 55 % (Illuminating Engineering Society, 2016). D'autres mesures pour évaluer le niveau de luminosité et l'éblouissement sont présentées dans le Tableau 1.4.

Tableau 1.4 : Mesures utilisées pour l'évaluation du niveau de luminosité

Mesure	Définition	Sources
Facteur de la lumière du jour (DF)	Ratio de la luminosité interne d'un point dans un bâtiment par rapport à la luminosité horizontale externe sous un ciel couvert.	Moon et Spencer (1942) Nabil et Mardaljevic (2005)
Autonomie de la lumière du jour (DA)	Pourcentage des heures annuelles d'occupation de la journée pour un point donné qui dépasse le niveau de luminosité spécifié.	Frankel et Lyles (2017) (Reinhart et al., 2006)
Autonomie spatiale de la lumière du jour (sDA)	Le seuil préférable doit être supérieur à 75 %. Le seuil nominal acceptable doit être supérieur à 55 %.	IESNA (2012)
Autonomie continue de la lumière du jour (cDA)	Modification de la mesure DA. Accorde une partie du crédit de façon linéaire aux valeurs inférieures du seuil défini par l'utilisateur	Rogers (2006)
Indice de l'éblouissement (GI)	Représente un degré d'éblouissement ou d'inconfort.	Robinson et al. (1962) Bedocs et Simons (1972) Hopkinson (1972)
Éclairage utile de la lumière du jour (UDI)	Permet de définir l'occurrence annuelle de la luminosité sur un plan de travail où le niveau de luminosité se situe entre 100 et 2000 lux au moins 50 % du temps.	Nabil et Mardaljevic (2005) Nabil et Mardaljevic (2006) Reinhart et al. (2006)
Exposition annuelle à la lumière du soleil (ASE)	Potentiel d'inconfort visuel de l'environnement intérieur de travail.	IESNA (2012)
Probabilité d'éblouissement à la lumière du jour (DGP)	Évalue l'éblouissement causé par la lumière du jour.	Wienold et Christoffersen (2006)

1.5 Proposition de la séquence de contrôle

L'utilisation d'une séquence de contrôle permet d'automatiser l'utilisation des dispositifs d'ombrage tels que les stores vénitiens et les stores conventionnels. Leur intégration dans une pièce se fait en fonction des conditions existantes de celle-ci afin de contrôler l'apport en rayonnements solaires pour améliorer le confort visuel.

La variation du niveau de luminosité est due en grande partie aux conditions de transition des conditions météorologiques soit le passage de nuages dans de courts délais. Sous un ciel nuageux, la fluctuation de la lumière naturelle est beaucoup plus importante que sous un ciel éclairci (Kim & Kim, 2007). Il est alors important de prendre en compte dans la séquence de contrôle la fréquence à laquelle le dispositif est ajusté (Littlefair, 2001). Cette fréquence dépend en partie de la forme architecturale du bâtiment afin de modérer ou de tamiser la luminosité dans les espaces intérieurs (Mardaljevic et al., 2009). Si le dispositif d'ombrage est ajusté trop fréquemment, cela dérange les occupants et nuit à leur occupation (Vine et al., 1998). Par exemple, le bruit du moteur crée de la distraction lorsqu'il est en fonction (Karizi et al., 2014).

Dans son étude, Littlefair (2001) propose deux façons d'utiliser un temps de réponse dans les stratégies de contrôle de l'éclairage naturel afin de déterminer la fréquence de contrôle. La première façon consiste à ce que la commande ne puisse pas se produire n minutes après la dernière opération, où n est un délai préprogrammé. La deuxième façon consiste à ce que la commande ne puisse pas se produire tant que le niveau de luminosité dans la pièce n'a pas excédé une valeur spécifique pendant plus de n minutes. Si le niveau de luminosité dépasse la limite déterminée pendant plus de n minutes, la commande peut permettre de monter ou de descendre le store. Dans le cas du contrôle du niveau de luminosité dans une pièce en fonction du niveau de rayonnement solaire extérieur, la fréquence de contrôle doit être en relation avec la fréquence de mesure du pyranomètre. Littlefair (2001) propose une fréquence f de contrôle aux 1/30 minutes à 1/45 minutes afin de minimiser le nombre de changements de position des dispositifs d'ombrage.

Une méthode de contrôle pour le store conventionnel automatisé développée par Koo et al. (2010) permet de maximiser l'apport de lumière naturelle en profondeur dans la pièce tout en prévenant les risques d'éblouissement. Cette méthode permet d'éclairer différentes zones en fonction de l'éclairage naturel disponible et de la position des occupants (Figure 1.2). La méthode de contrôle précédemment utilisée (Figure 1.2 (a)) considère une seule zone restrictive malgré plusieurs zones de travail. À l'aide de la nouvelle méthode de contrôle proposée (Figure 1.2 (b)), il est possible de contrôler chaque store afin d'offrir le maximum d'éclairage naturel à chaque zone de travail. Toutefois, cette nouvelle méthode doit être sélectionnée lors de l'intégration du système de stores motorisés au projet puisque le choix du système devra permettre de contrôler chacun des stores indépendamment. Dans la majorité des cas, les stores sont séparés en plusieurs sections ce qui permet de contrôler plusieurs stores à la fois. De plus, il faut s'assurer que les zones de travail sont fixes; sinon, la méthode doit être adaptée aux nouveaux aménagements de la pièce.

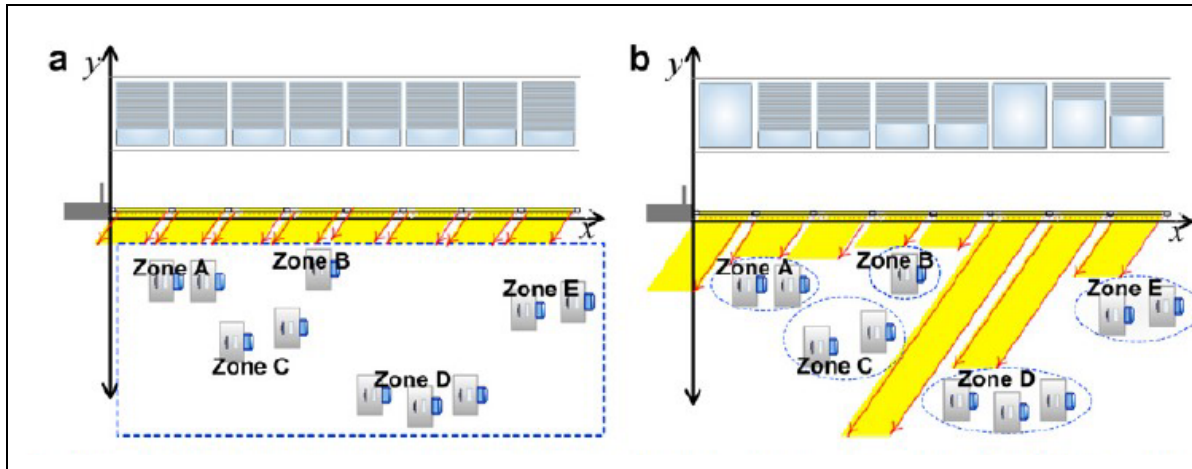


Figure 1.2 : Positions des stores : (a) Méthode précédente (b) nouvelle méthode (Koo et al., 2010)

En résumé, plusieurs recherches ont porté sur le contrôle de l'éclairage naturel à l'aide de dispositifs d'ombrage. Ce contrôle permet à la fois d'assurer le confort visuel, mais permet aussi de réaliser des économies d'énergie. Toutefois, le contrôle doit être adapté à la pièce puisque l'apport en éclairage naturel est spécifique à chaque pièce selon les caractéristiques de celle-ci : superficie, profondeur, hauteur de la fenestration, etc.

L'utilisation d'un capteur photométrique installé de façon permanente dans une pièce permettrait de mesurer le niveau de luminosité durant la journée. Ainsi, il serait possible d'ajuster la position d'un dispositif d'ombrage, tel que le store motorisé, pour offrir un confort visuel adéquat pour les occupants. Toutefois, les valeurs mesurées par le capteur peuvent être influencées par l'obstruction de celui-ci due au passage des occupants ou à l'ombrage créé par des composants du bâtiment. De plus, le capteur doit être calibré après une certaine période d'utilisation et il est dispendieux à l'achat. Cela explique pourquoi cette manière de procéder est peu utilisée.

C'est pourquoi les simulations de l'éclairage naturel peuvent être utilisées afin de prédire le niveau de luminosité dans une pièce. Pour y arriver, des capteurs peuvent être installés de manière temporaire dans une pièce afin d'effectuer des collectes de données. À l'aide de ces données mesurées, il serait possible de calibrer le modèle 3D de la pièce. Ensuite, l'utilisation des mesures telles que l'UDI et l'sDA permettrait d'évaluer, à partir des simulations, si le confort visuel dans la pièce est adéquat pour une année complète. Ainsi, ces simulations permettraient de prédire le niveau de luminosité dans la pièce à certains moments critiques durant l'année. Cela éviterait l'installation permanente d'un capteur photométrique dans la pièce pour collecter des données durant une année complète.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente l'approche pour l'expérimentation, la simulation, l'identification de la zone d'application et la proposition d'une séquence de contrôle pour des stores motorisés (Figure 2.1).

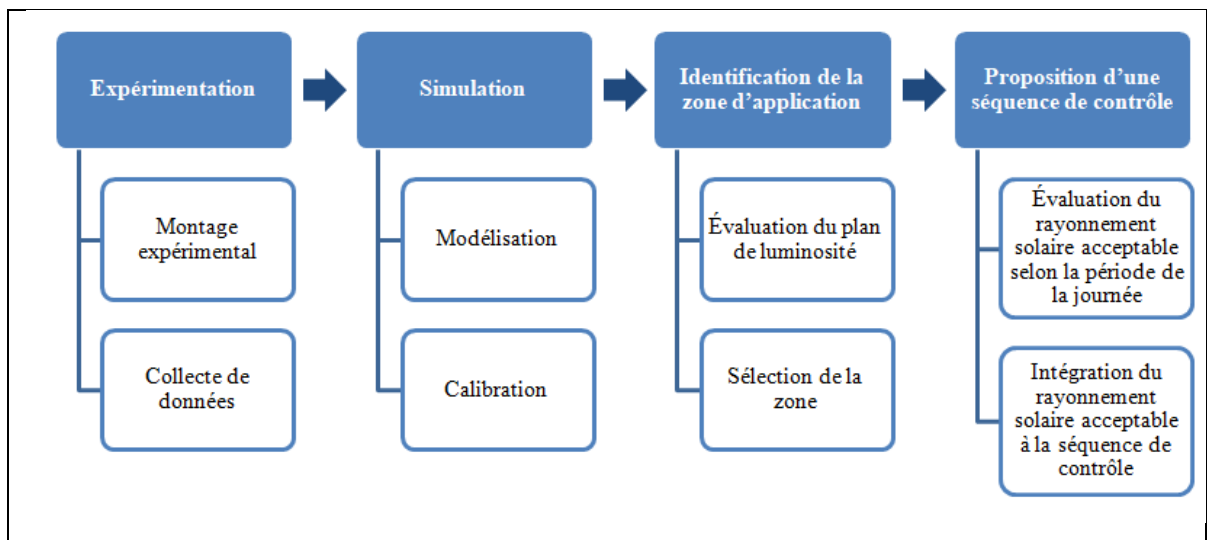


Figure 2.1 : Méthodologie

2.1 Expérimentation

Cette section présente les détails de l'expérimentation avec le montage expérimental pour l'installation des appareils de mesure ainsi que l'approche pour la collecte des données.

2.1.1 Montage expérimental

Le montage expérimental est présenté sous forme de schéma pouvant être utilisé selon la pièce à l'étude. Il prend en compte les dimensions spécifiques de la pièce et le positionnement des appareils de mesure. Selon l'IESNA (2012), une zone est définie comme l'espace devant une fenêtre ou une ouverture et ne doit pas excéder 930 m^2 (Figure 2.2).

Ainsi, pour une grande superficie de pièce, la collecte de données peut être effectuée en adaptant le schéma à plusieurs zones. Une zone est définie par une longueur (y) et une largeur (x) (Figure 2.2). Le schéma proposé contient trois capteurs photométriques LI-210R-BNC (C1m, C2m et C3m) (Tableau-A I-1). Les capteurs sont centrés dans la zone ($x/2$) et à une distance égale (d_1) entre eux. Les données sont colligées à l'aide d'un enregistreur de données LI-1500 (Tableau-A I-3). Le type de capteur choisi mesure le niveau de luminosité (lux) avec une photodiode de silicium sensible à la lumière dans le spectre visible. Il possède un niveau de sensibilité comparable à l'œil humain, une précision de $\pm 5\%$ due aux variations de température et un écart de moins de 1% jusqu'à $100\,000$ lux.

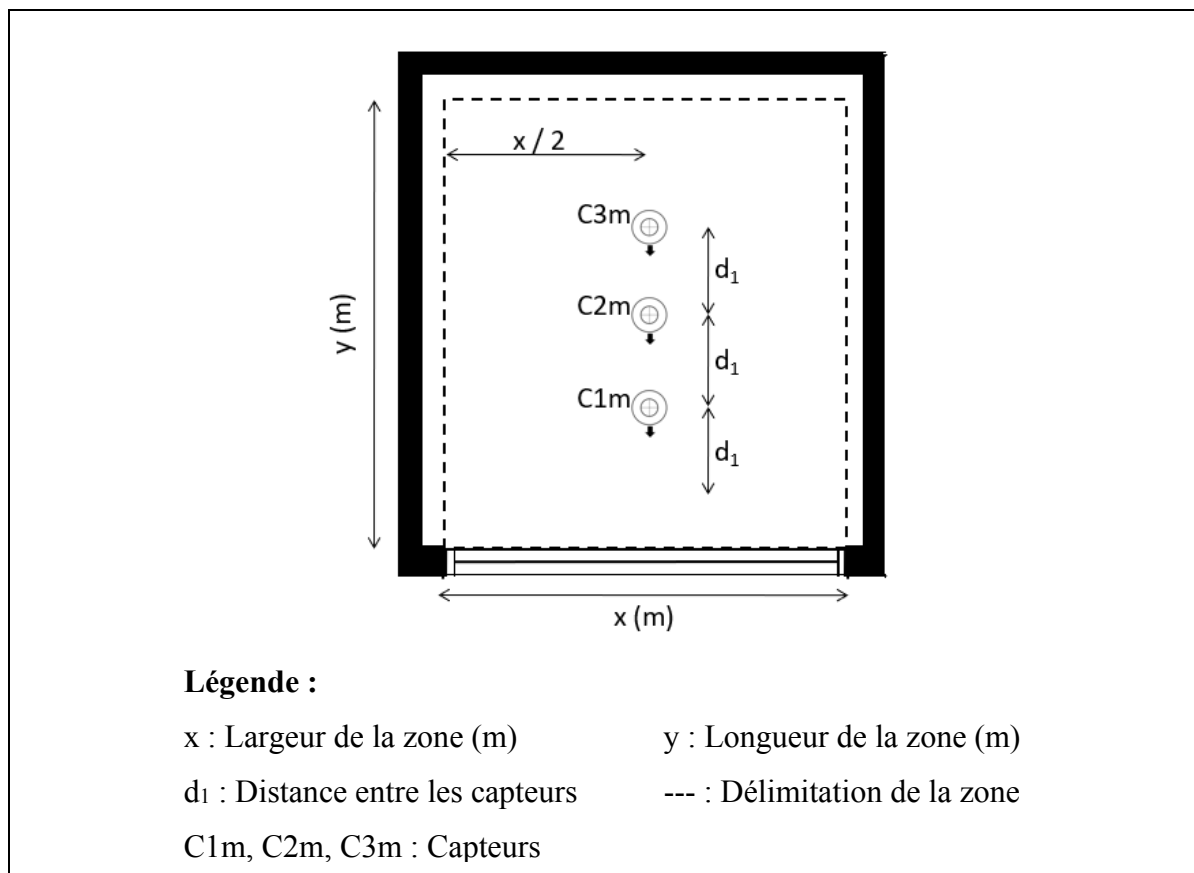


Figure 2.2 : Schéma expérimental à une zone

Les capteurs sont positionnés à une hauteur de 0.8 m, soit la hauteur typique d'un plan de travail (IESNA, 2012). La réflexion des rayons solaires sur les surfaces environnantes ou les surfaces de travail pourrait influencer les données mesurées des capteurs (voir section 1.3.2). Pour réduire cette influence, les capteurs sont installés sur des supports grâce à une fixation 2003S (Figure 2.3). Les supports sont fabriqués avec des tuyaux de PVC. Un pyranomètre CMP3 (P1), installé à l'extérieur du bâtiment, est utilisé pour mesurer le rayonnement solaire moyen (W/m^2). Il possède une variation de moins de 5 % due à la température et une variation de moins de 1 % à 1000 W/m^2 due à l'inclinaison.

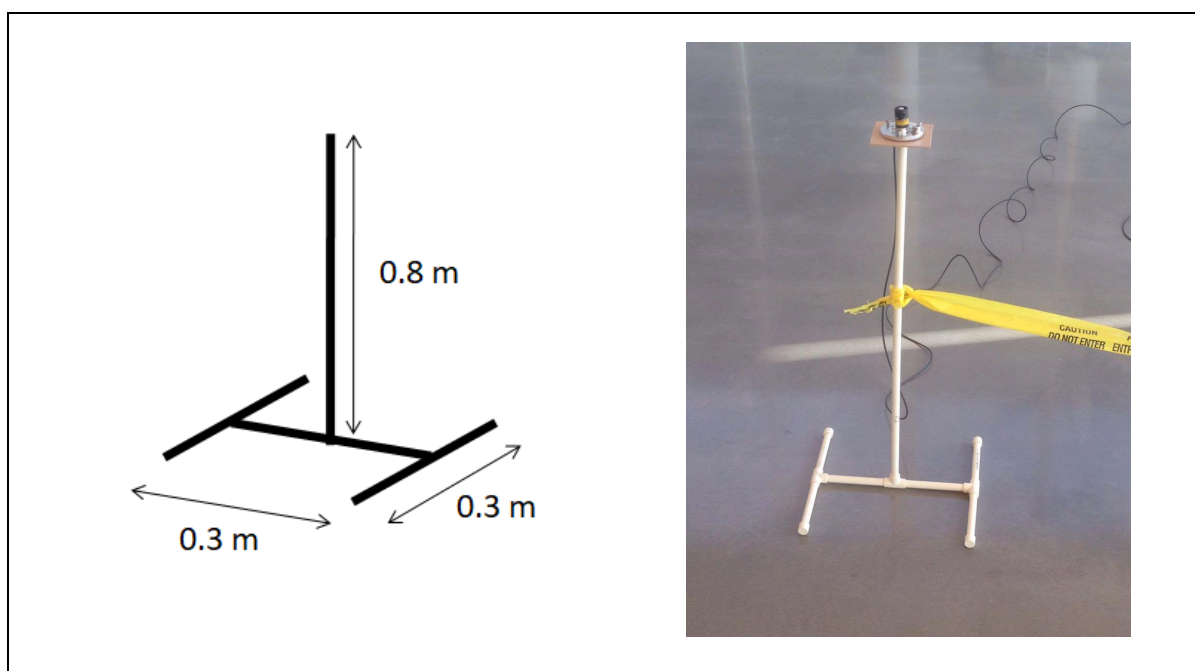


Figure 2.3 : Support et capteur

2.1.2 Collecte de données

Le rayonnement solaire (W/m^2) et le niveau de luminosité (lux) doivent être mesurés pendant une période de temps assez longue afin de prendre en compte plusieurs éléments : les modes d'opération du dispositif d'ombrage, une étendue complète des variables indépendantes pouvant être perçues et la prévision d'un bon niveau de certitude sur les économies à réaliser (ASHRAE, 2002).

Tout d'abord, la collecte de données est réalisée pour une plage horaire définie, soit entre 8h00 et 18h00 (IESNA, 2012). Cette plage horaire correspond à un horaire moyen de travail ou d'occupation des espaces pour ce type de bâtiment. Toutefois, cette plage peut être ajustée en fonction des heures d'occupation et d'ensoleillement de la pièce à l'étude.

Ensuite, la collecte de données est effectuée pour différentes positions des stores (H_{smn}) détaillées au Tableau 2.1 et à la Figure 2.4. Les journées de collecte sont déterminées en fonction des dates d'équinoxe et de solstice de l'année en cours.

Tableau 2.1 : Position des stores

Position	Condition (n)	Hauteur (m)
Hsm1	1	À spécifier
Hsm2	2	À spécifier
Hsm3	3	À spécifier
Hsm _n	n	À spécifier

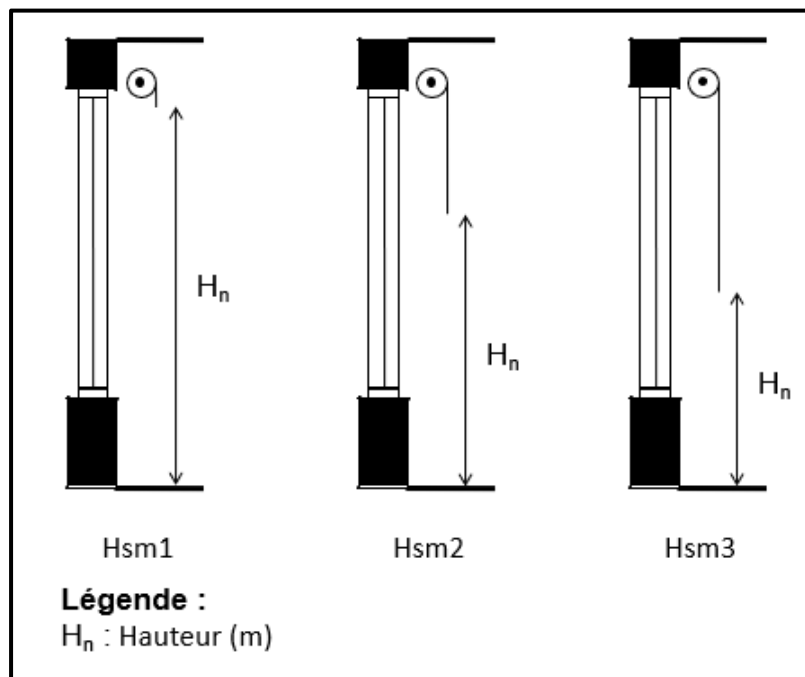


Figure 2.4 : Représentation de la position des stores

2.2 Simulation : modélisation et calibration du modèle

La pièce est modélisée à l'aide du module d'extension OpenStudio (N.E.R.L., 2017) dans SketchUp (Google, 2016) selon les dimensions principales de celle-ci. Les ouvertures pour la fenestration, les éléments architecturaux et les colonnes sont modélisés. De plus, le sol extérieur et les bâtiments extérieurs à moins de 30 mètres sont aussi modélisés (IESNA, 2012). Suite à la modélisation, il est nécessaire d'ajuster les propriétés des surfaces. Les coefficients de réflexion (Cr) recommandés pour les surfaces intérieures et extérieures sont présentés au Tableau 2.2 (IBE-BIV, 2003; Hensen & Lamberts, 2011; IESNA, 2012). L'orientation géographique du modèle est considérée.

Tableau 2.2 : Coefficients de réflexion des surfaces (IBE-BIV, 2003; Hensen & Lamberts, 2011; IESNA, 2012).

Composant	Coefficient de réflexion (Cr)
Sol extérieur	0.10
Surface des bâtiments extérieurs	0.30
Plancher	0.20
Mur	0.50
Plafond	0.70

Le plan de luminosité dans le modèle est défini par une longueur (y) et une largeur (x) (Figure 2.5). Il est positionné à une hauteur de 0.8 m et à une distance de 0.5 m des murs (d_2). Le maillage du plan de luminosité (d_3) est de 0.6 m par 0.6 m (IESNA, 2012). Les capteurs sont centrés dans le plan de luminosité ($x/2$) à une distance égale (d_1) entre eux et à une hauteur de 0.8 m.

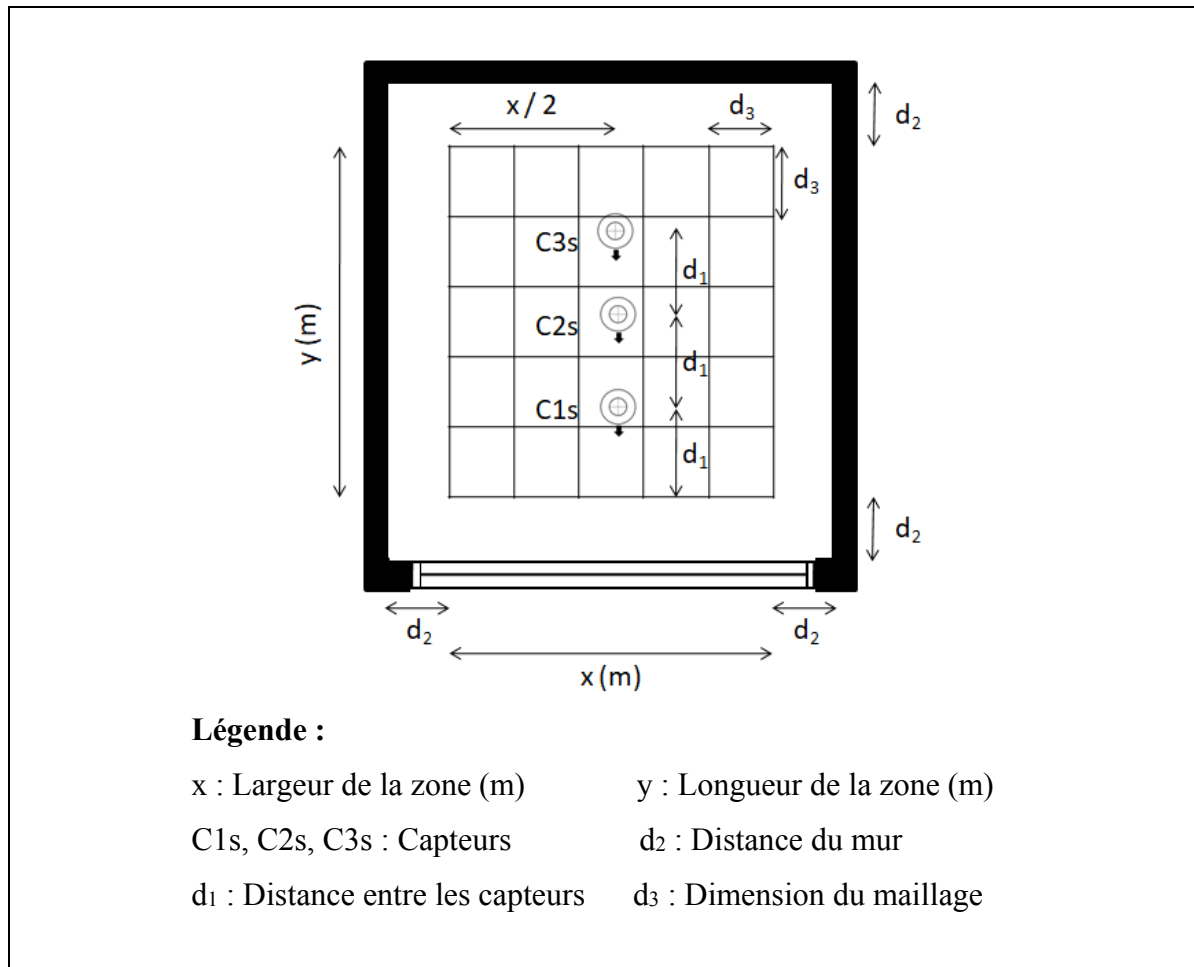


Figure 2.5 : Plan de luminosité

2.2.1 Vérification des données

Le rayonnement solaire mesuré sur le site par le pyranomètre (P1) est comparé au rayonnement solaire provenant du fichier météo (P2) afin de vérifier que les données sont similaires. Le choix du fichier météo dépend de l'emplacement et de la proximité du lieu à l'étude. Dans le cas où les données sont similaires, le fichier météo peut être utilisé pour les simulations.

Tel que décrit à la section 1.2.2, le moteur de simulation de Radiance utilise une approche hybride entre la méthode Monte-Carlo et le traçage des rayons (Hensen & Lamberts, 2011). Il peut y avoir une variation dans les résultats obtenus entre plusieurs simulations du même

modèle. Donc, trois simulations sont effectuées afin de comparer, pour une même journée et une même position des stores, les niveaux de luminosité afin de quantifier l'écart.

2.2.2 Calibration du modèle

Le modèle est calibré à l'aide d'une analyse de sensibilité qui consiste à faire varier les valeurs de trois paramètres : le coefficient de transmission de lumière visible (TLV) du vitrage, le coefficient de réflexion (Cr) du sol extérieur et le coefficient de transmission de lumière visible (TLV) du store. L'analyse de sensibilité a pour but d'identifier les paramètres sensibles parmi les trois paramètres sélectionnés et de déterminer les coefficients qui permettent aux données simulées de coller le plus possible aux données mesurées. Le Tableau 2.3 présente les plages des valeurs étudiées ainsi que la taille du pas. Pour le coefficient TLV du vitrage, une plage de 0.27 à 0.77 est étudiée. Pour le coefficient Cr du sol extérieur, une valeur minimum de 0.10 est considérée et une valeur maximale de 0.50 est considérée pour représenter une surface réfléchissante en hiver. Pour le coefficient TLV du store, une plage de 0.07 à 0.27 est étudiée. La méthode utilisée consiste à faire varier chaque paramètre un par un, communément appelée la méthode *One-At-a-Time* (OAT) (Pianosi et al., 2016).

Tableau 2.3 : Propriétés des composantes et des paramètres à évaluer

Composants	Paramètres	Coefficients de base	Plages	Taille du pas
Vitrage	Coefficient de transmission de lumière visible (TLV)	À spécifier	0.27 - 0.77	0.10
Sol extérieur	Coefficient de réflexion (Cr)	0.10	0.10 - 0.50	0.10
Store	Coefficient de transmission de lumière visible (TLV)	À spécifier	0.07 - 0.27	0.10

Pour calibrer le modèle, les données mesurées et les données simulées sont comparées à l'aide de l'erreur quadratique moyenne (EQM) (Équation 2.1) et l'erreur quadratique moyenne relative (EQM relative (%)) (Équation 2.2) (Debaditya & Hazem, 2017). Le calcul de l'erreur relative (Er (%)) permet de comparer les valeurs du rayonnement solaire mesuré sur le site (P1) et du rayonnement solaire provenant du fichier météo (P2) (Équation 2.3).

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{s,i} - x_{m,i})^2}{n}} \quad (2.1)$$

$$EQM \text{ relative } (\%) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{s,i} - x_{m,i}}{x_{m,i}} \right)^2} \times 100 \quad (2.2)$$

$$Er (\%) = \left(\frac{r_{s,i} - r_{fm,i}}{r_{fm,i}} \right) \times 100 \quad (2.3)$$

Où

$x_{s,i}$: Niveau de luminosité simulé (lux)

$x_{m,i}$: Niveau de luminosité mesuré (lux)

$r_{s,i}$: Rayonnement solaire mesuré sur le site (W/m²)

$r_{fm,i}$: Rayonnement solaire du fichier météo (W/m²)

n : Nombre de points de mesure

2.3 Identification de la zone d'application

Suite à la calibration du modèle, il est nécessaire d'évaluer le niveau de luminosité parmi les différentes configurations de la zone afin de sélectionner la zone d'application pour la séquence de contrôle proposée.

2.3.1 Évaluation du plan de luminosité

Tout d'abord, le niveau de luminosité est évalué de manière qualitative grâce aux plans de luminosité (Figure 2.6). Le plan de luminosité présente le niveau de luminosité (lux) pour une heure spécifique. Pour chaque position des stores, trois périodes pertinentes sont évaluées soit 9h00, 12h00 et 15h00 afin de qualifier la propagation de l'éclairage naturel dans la pièce

(Mardaljevic, 2011). Ainsi, il sera possible d'estimer à partir des plans de luminosité la profondeur à laquelle le niveau de luminosité est supérieur à 3000 lux.

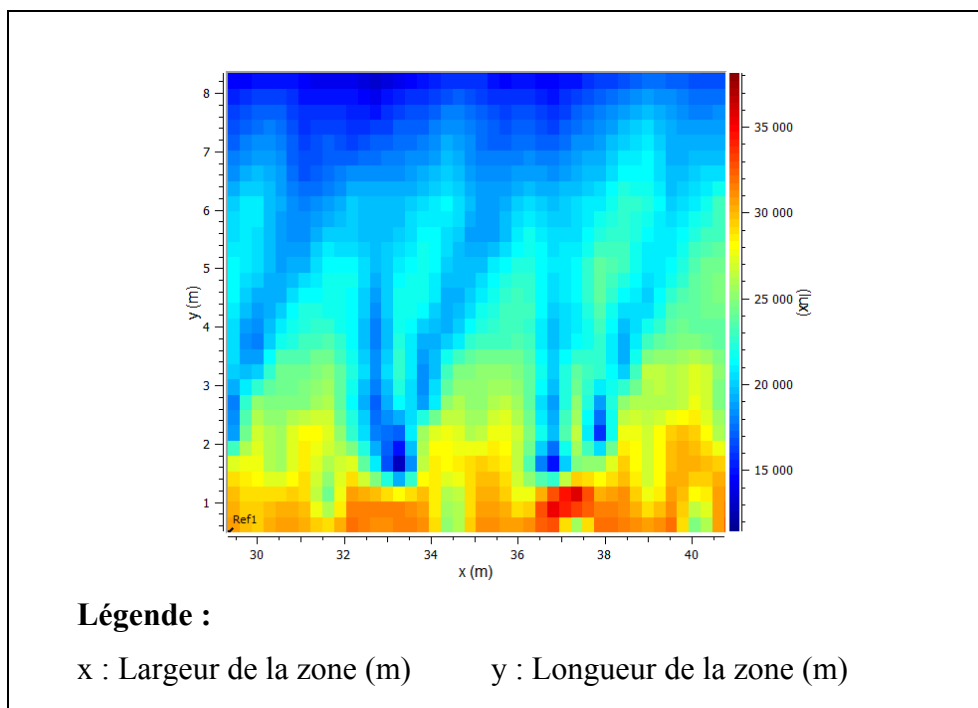


Figure 2.6 : Exemple de plan de luminosité

2.3.2 Sélection de la zone

Suite à l'analyse des plans de luminosité, les résultats des simulations sont quantifiés via l'UDI et l'sDA afin de vérifier si le niveau de luminosité respecte les critères de chacune des mesures (voir section 1.4). La méthode utilisée pour améliorer les valeurs de l'UDI et de l'sDA est d'évaluer la zone à l'étude selon différentes configurations (Figure 2.7). Les valeurs analysées pour l'UDI et l'sDA se situent dans la période d'occupation du bâtiment, soit entre 8h00 et 17h00. Une simulation est effectuée pour chaque configuration de la zone à l'étude pour chacune des positions des stores. Par la suite, les valeurs de l'UDI et de l'sDA obtenues permettront d'identifier la zone retenue, soit la zone d'application, pour développer une séquence de contrôle appropriée.

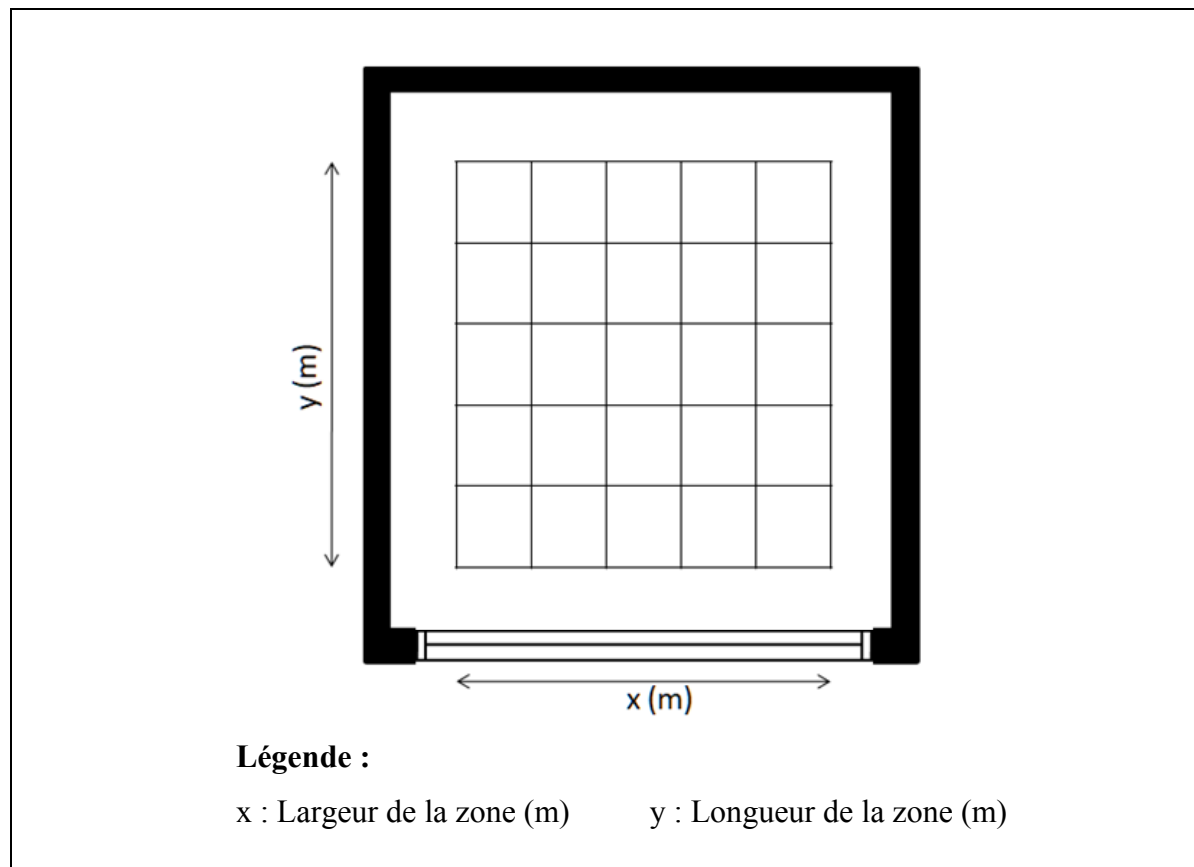


Figure 2.7 : Dimensions pour la configuration de la zone

2.4 Proposition d'une séquence de contrôle

Cette section présente l'approche pour évaluer le niveau de rayonnement solaire acceptable selon la période de la journée et son intégration dans la séquence de contrôle.

2.4.1 Évaluation du niveau de rayonnement solaire acceptable selon la période de la journée

Les valeurs horaires du rayonnement solaire pour lesquelles le niveau de luminosité dans la zone d'application atteint 3000 lux sont par la suite déterminées afin de les intégrer à la séquence de contrôle. Ces valeurs permettront de déterminer à quels moments les stores vont s'ouvrir ou se fermer. Pour y arriver, les valeurs du rayonnement solaire horaire provenant du fichier météo sont comparées aux niveaux de luminosité simulés dans la pièce.

Plusieurs méthodes sont possibles afin déterminer les valeurs du rayonnement solaire acceptable pour différentes périodes de l'année : selon la latitude du soleil, en séparant les données par groupe de x jours, de manière hebdomadaire ou mensuelle, par exemple. Ainsi, les valeurs horaires pourraient être adaptées selon une de ces méthodes et être intégrées à la séquence de contrôle. Étant donné que la méthodologie présentée est une preuve de concept, il a été choisi de séparer les valeurs sur une base mensuelle, soit en 12 périodes, afin de prendre en compte la variation de la latitude du soleil durant l'année. Les valeurs horaires du rayonnement solaire acceptable sont par la suite tabulées dans un tableau tel que celui présenté au Tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Rayonnement solaire acceptable (x_n) (W/m^2)

Hsm _n												
Heure	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
8h00	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	x ₉	x ₁₀	x ₁₁	x ₁₂
9h00	x ₁₃	x ₁₄	x ₁₅	x ₁₆	x ₁₇	x ₁₈	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

2.4.2 Intégration du rayonnement solaire acceptable à la séquence de contrôle

La séquence de contrôle proposée pour les stores motorisés, adaptée de celle proposée par Olbina et Hu (2012), s'appuie sur l'intégration du rayonnement mesuré (x_n) pour la zone d'application sélectionnée (Tableau 2.4). Donc, c'est avec les valeurs x_n qu'il sera possible de d'évaluer, à partir de la séquence de contrôle proposée, s'il faut fermer ou ouvrir les stores.

CHAPITRE 3

ÉTUDE DE CAS

L'étude de cas porte sur l'atrium de la Maison des étudiants de l'École de technologie supérieure (ÉTS) située à Montréal. L'atrium est situé au 2^e étage et est utilisé comme une aire de repos, de lecture et de travail. Il possède trois façades de mur-rideau soit à l'est, au sud-est et au sud. L'atrium est propice comme pièce à l'étude puisque la séquence de contrôle actuellement utilisée pour les stores motorisés sur les façades sud-est et sud n'est pas adaptée au type d'occupation. En effet, l'aménagement des tables de travail n'est pas fixe, ce qui limite l'utilisation des stores motorisés. De plus, il n'y a pas d'éclairage d'appoint prévu pour les tables et l'utilisation des stores n'est pas prévue pour offrir un confort visuel adéquat pour la lecture ou le travail à l'ordinateur.

La séquence de contrôle actuellement utilisée fonctionne comme suit : un pyranomètre, situé sur un bâtiment adjacent, capte le niveau de rayonnement solaire à une fréquence f de 1/15 minutes. Lorsque le rayonnement solaire mesuré est supérieur à 450 W/m², les stores descendent. Lorsque le rayonnement solaire mesuré est inférieur à 350 W/m², les stores montent. Présentement, il n'y a pas de délai de contrôle dans la séquence. Ainsi, lorsque les conditions météorologiques varient sur une courte période, les stores montent et descendent fréquemment.

Malgré l'utilisation des stores motorisés, plusieurs problèmes de confort persistent. Tout d'abord, les rayons directs créent de l'éblouissement dû à la réflexion des rayons sur les surfaces intérieures ainsi qu'aux contrastes entre les niveaux de luminosité perçus (Figure-A II-1 à II-3). Ceci fait référence aux types d'éblouissement décrits par Arnal et al. (2011) (voir section 1.4). Les problèmes sont plus présents près de la fenêtre où les rayons sont directement réfléchis sur les surfaces blanches du mobilier. De plus, le mobilier est positionné à des endroits où le rayonnement direct est présent durant la majeure partie de la journée. Cela crée un inconfort visuel chez les occupants et peut même causer un inconfort thermique.

Un autre élément qui pose problème est que les stores descendent jusqu'à une distance minimale de 2.72 m du sol. Cette hauteur a été fixée afin d'offrir une vue à l'extérieur non obstruée, de garder l'aspect esthétique désiré par les architectes et d'éviter que les occupants endommagent les stores. La hauteur des stores ne permet pas de bloquer les rayons directs le matin étant donné la position du soleil plus basse à ce moment de la journée. Le but de l'étude est donc de développer une séquence de contrôle pour les stores motorisés à l'aide de simulations de l'éclairage naturel afin d'améliorer le confort visuel des occupants.

3.1 Caractéristiques de l'atrium

L'atrium est un espace à aire ouverte avec des plafonds d'une hauteur moyenne de 7.15 m (Figure 3.1). Les dimensions principales sont de 43.55 m de largeur par 8.40 m de profondeur. La façade principale à l'étude est celle située au sud-est avec des dimensions de 43.55 m de largeur par 7.15 m de hauteur.

La surface de plancher de l'atrium est en béton poli gris. Il y a des colonnes d'acier blanches sur le périmètre des façades est et sud-est. Le matériel du plafond suspendu est du placage de merisier lustré. Le vitrage du mur-rideau est composé d'une unité scellée à double vitrage soit un verre extérieur standard fritté 50 % starphire d'une épaisseur de 6 mm, un espace de 12.7 mm incluant de l'argon et un verre intérieur LoE²272 claire d'une épaisseur de 6 mm. Le composant de fenêtre a un coefficient de transmission de lumière visible (TLV) de 0.47, un coefficient d'apport par rayonnement solaire (CARS) de 0.36 et un coefficient de transmission thermique (U) de 0.22 W/m² K. Les meneaux ont des dimensions de 64 mm par 165 mm. Le tissu du store est le modèle SheerWeave 2390 de couleur P14 Oyster Pearl Grey avec un facteur d'ouverture de 5 %. Les stores motorisés fonctionnent à l'aide d'un moteur #510S2.



Figure 3.1 : Espace aménagé dans l'atrium

Les stores motorisés sont divisés en trois sections soit R1, R2 et R3 (Figure 3.2). Chaque section peut être contrôlée individuellement.

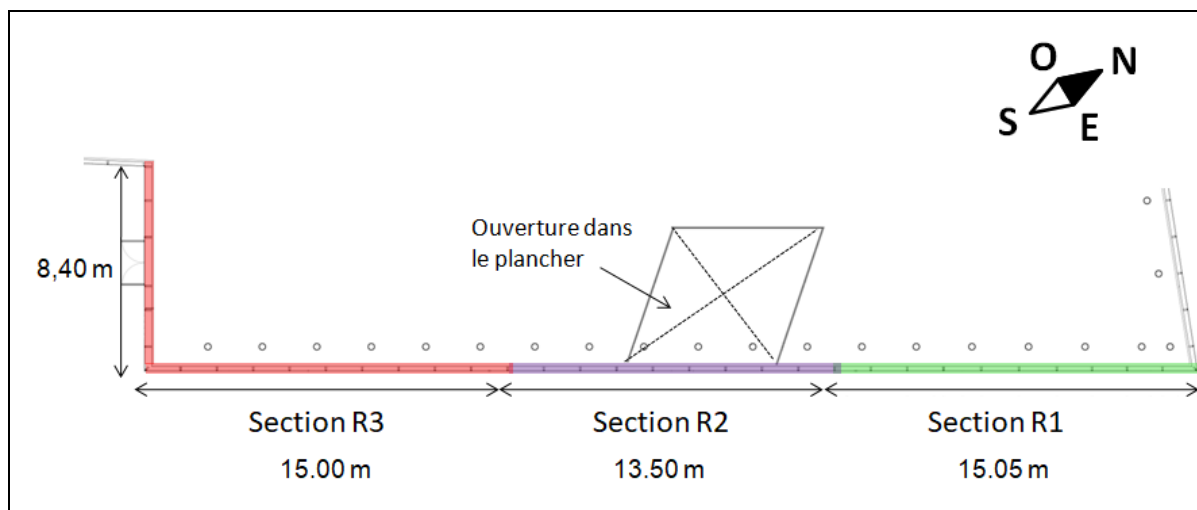


Figure 3.2 : Sections des stores motorisés dans l'atrium

Dans la séquence de contrôle actuelle, des relais à contact sec RTS communiquant avec les sections R1, R2 et R3 permettent seulement de fermer complètement les stores ou d'ouvrir complètement les stores par le logiciel de commande. Toutefois, les trois sections peuvent être contrôlées individuellement à l'aide d'une télécommande (Figure 3.3). Dans le cadre de l'étude, le contrôle manuel est utilisé pour positionner les stores à la position Hsm2 puisque cette position n'est pas disponible avec la séquence de contrôle existante.

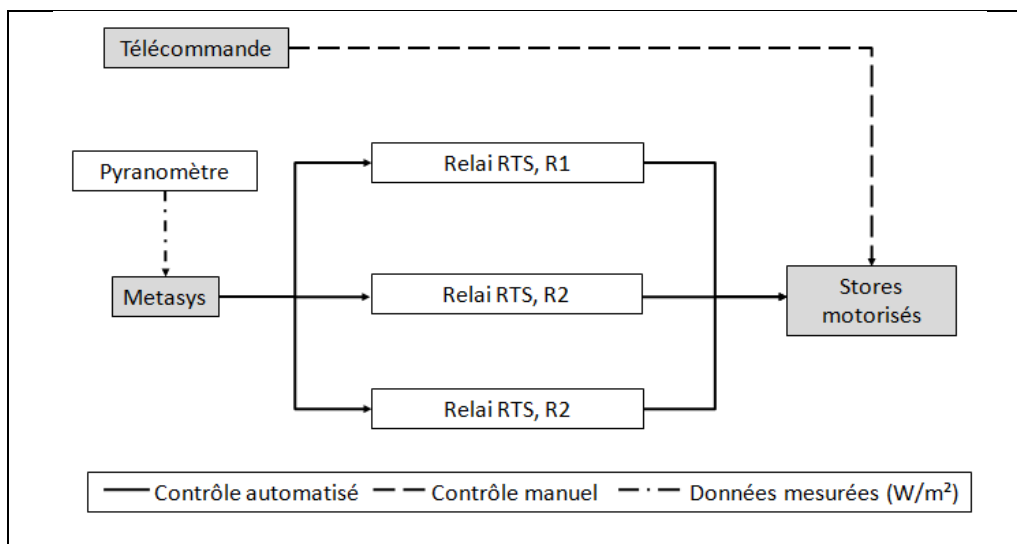


Figure 3.3 : Contrôle des zones des stores motorisés

3.2 Montage expérimental

Le montage expérimental est tel que présenté à la Figure 3.4. Pour la collecte de données, le pyranomètre utilisé est le même que celui déjà installé pour la séquence de contrôle actuelle. Les données sont collectées pour la section R1 seulement. Cette section de l'atrium est caractérisée par un aménagement de tables de travail pour les occupants. Les tables sont disposées en périphérie du mur-rideau afin de profiter de l'apport en éclairage naturel. Toutefois, c'est dans la zone périphérique que les risques d'éblouissement semblent présents.

Les données sont mesurées par les capteurs C1m, C2m et C3m situés au centre de la section R1 à une distance égale (Figure 3.4). Pour chacune des positions des stores, une hauteur H_n est mesurée à partir du sol (Tableau 3.1). La hauteur H_1 représente la position des stores

complètement ouverts. La hauteur H_2 représente une hauteur intermédiaire des stores. La hauteur H_3 représente la position des stores complètement fermés soit la hauteur minimale à laquelle les stores peuvent descendre.

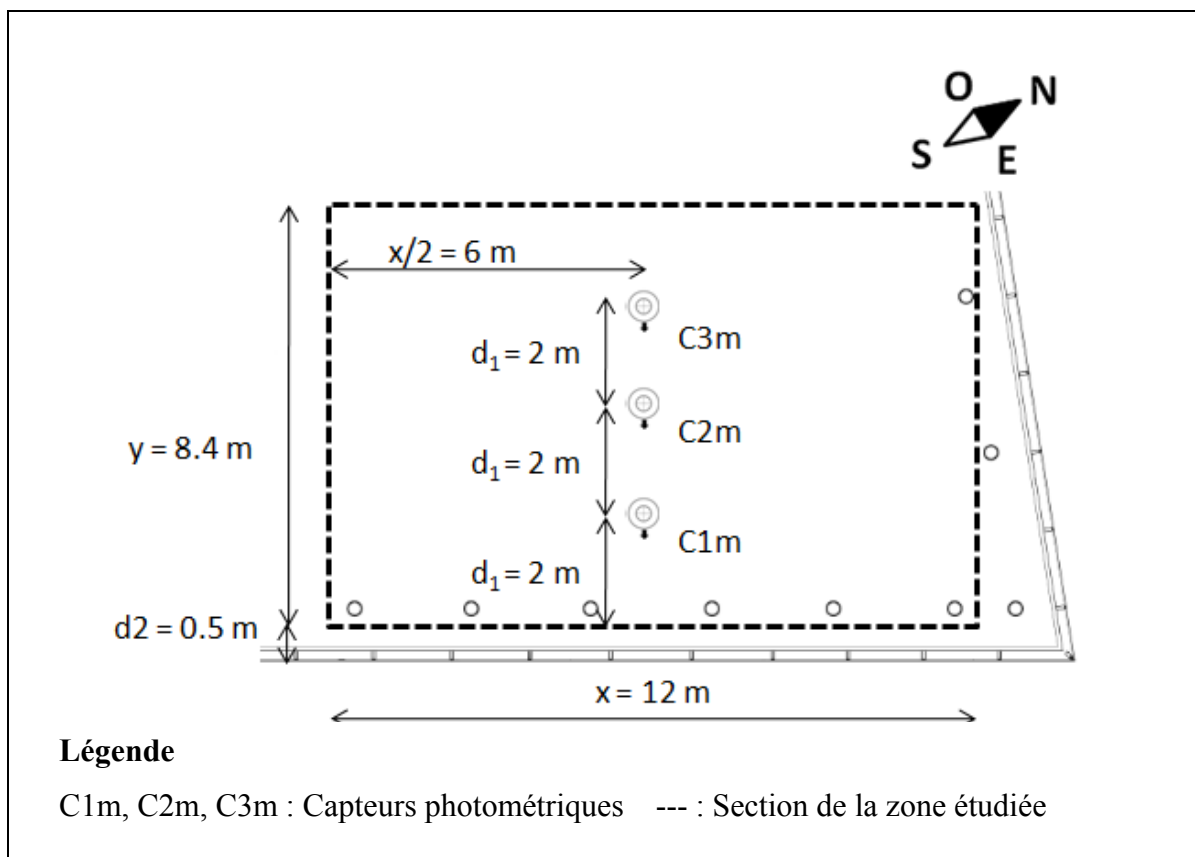


Figure 3.4 : Schéma expérimental pour la zone étudiée

Tableau 3.1 : Conditions d'ouverture des stores

Position	Condition (n)	Hauteur (m)
Hsm1	1	7.15
Hsm2	2	4.47
Hsm3	3	2.72

3.3 Modélisation de l'atrium

L'atrium est modélisé selon les dimensions principales obtenues à partir des plans PDF. Les coefficients de réflexion utilisés pour les meneaux, les colonnes, le plancher, les murs et le plafond sont présentés au Tableau 2.2. Le sol et les bâtiments adjacents sont modélisés.

Les propriétés du store sont présentées au Tableau-A I-4. Le modèle est orienté à 60 degrés anti-horaires par rapport au nord. La modélisation de l'atrium ne prend pas en compte les éléments suivants :

- La détérioration des surfaces des matériaux;
- La modélisation des surfaces inclinées présentes sur le plafond et les escaliers;
- La modélisation du mobilier;
- La modélisation de l'ouverture dans le plancher;
- La modélisation des poutres au plafond.

Les simulations de l'éclairage naturel permettent d'évaluer le niveau de luminosité selon la position des stores. L'utilisation des mesures de l'UDI et de l'sDA permettra de sélectionner la zone d'application où sera appliquée la séquence de contrôle proposée. Ainsi, des modifications de l'aménagement de la zone de travail pourront être suggérées.

Les valeurs horaires du rayonnement solaire où les niveaux de luminosité simulés dans l'atrium dépassent 3000 lux seront déterminées. Ces valeurs sont déterminées pour chaque mois afin de prendre en compte la variation de la latitude du soleil durant l'année. Ainsi, il sera possible de vérifier si le rayonnement solaire peut être augmenté dépendamment des périodes de l'année, tout en maintenant un niveau de luminosité sous 3000 lux. Par la suite, ces valeurs seront intégrées à la séquence de contrôle proposée. Le découpage des valeurs en sections mensuelles a été choisi afin d'élaborer une preuve de concept.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors des collectes de données, les résultats des simulations suite à la calibration du modèle, l'évaluation et la sélection de la zone d'application. Finalement, la séquence de contrôle proposée est présentée.

4.1 Résultats expérimentaux

Cette section présente les données mesurées par les capteurs C1m, C2m et C3m pour les positions de stores Hsm1, Hsm2 et Hsm3. Les conditions météorologiques et les observations ont été notées dans les tableaux A III-1 à III-10. Les collectes de données ont eu lieu entre le 14 octobre 2016 et le 22 juin 2017 (Tableau 4.1).

Les journées de collecte sont choisies en fonction des solstices et des équinoxes de 2016 et de 2017 à Montréal (Tableau-A I-2). Ainsi, il est possible d'évaluer l'apport en rayonnement solaire selon les latitudes minimums et maximums du soleil. Pour la collecte de données no.1, les données sont collectées en octobre près de l'équinoxe d'automne 2016. Pour la collecte de données no.2, les données sont collectées en mars près de l'équinoxe du printemps 2017. Pour la collecte de données no.3, les données sont collectées en juin près du solstice d'été 2017. Les paramètres de l'enregistreur de données LI-1500 sont présentés au Tableau-A I-3.

Tableau 4.1 : Collectes de données

Collecte de données	Date	Durée de la collecte	Conditions du ciel	Positions
1	14 octobre 2016	8h00 - 13h00	Ciel dégagé / ensoleillé	Hsm1
	15 octobre 2016	8h00 - 13h00	Ensoleillé avec passage nuageux	Hsm3
	17 octobre 2016	8h00 - 13h00	Généralement ensoleillé	Hsm2
2	22 mars 2017	8h00 - 14h00	Partiellement nuageux	Hsm3
	23 mars 2017	8h00 - 14h00	Nuages prédominants	Hsm2
	24 mars 2017	8h00 - 14h00	Nuageux avec éclaircies, faible neige intermittente	Hsm1
3	20 juin 2017	8h00 - 14h00	Ciel nuageux	Hsm1
	21 juin 2017	8h00 - 14h00	Ciel nuageux	Hsm3
	22 juin 2017	9h00 - 14h00	Partiellement nuageux	Hsm2

Les données ont été collectées à une fréquence f de 1/15 minutes entre 8h00 et 14h00. Les collectes se sont terminées à 14h00 puisqu'il n'y avait plus de rayonnement direct dans la zone à l'étude. Les données du 14 octobre sont disponibles à une fréquence f de 1/5 minutes puisque c'est la fréquence à laquelle les données ont été recueillies lors de cette journée. Les collectes de données du mois d'octobre 2016 se terminent à 13h00 dû à un décalage des données à l'heure normale.

4.1.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire mesuré sur le site provient du pyranomètre (P1) situé sur le toit du pavillon A de l'ÉTS. Le rayonnement solaire du fichier météo (P2) provient de la station météo située à Dorval, Québec. Étant donné que les données du fichier météo proviennent d'une station météo éloignée du site à l'étude, il est important de vérifier si les données sont similaires.

Le fichier météo contient les données du 1^{er} janvier 2017 au 9 juillet 2017 et du 10 juillet 2016 au 31 décembre 2016 afin de contenir les données des collectes effectuées entre le 14 octobre 2016 et le 22 juin 2017. La comparaison des données des pyranomètres P1 et P2 permet de vérifier si l'écart est inférieur à 30 % (Hensen & Lamberts, 2011). Le calcul de l'Er est basé sur des données horaires entre 8h00 et 18h00 puisque ce sont ces valeurs horaires qui sont utilisées lors des simulations. Dans le Tableau 4.2 et le Tableau 4.3, les valeurs de l'Er en gras représentent les valeurs avec un écart relatif inférieur à 30 % pour les collectes de données no.1 et no.2, respectivement. Les valeurs n'ont pas été vérifiées pour la collecte de données no.3 puisque les données du pyranomètre P1 ne sont pas disponibles (N-D) durant cette période.

Pour le 14, 15 et 17 octobre 2016, les conditions météorologiques sont caractérisées par un ciel dégagé/ensoleillé, ensoleillé avec passages nuageux et généralement ensoleillé, respectivement (Tableau-A III-1 à III-3). L'Er est en dessous de 30 % entre 9h00 et 15h00 pour le 14 octobre et le 15 octobre ainsi qu'entre 12h00 et 15h00 pour le 17 octobre (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 : Comparaison entre les données de P1 et P2, collecte de données no.1.

	14 octobre			15 octobre			17 octobre		
Heure	P1 (W/m ²)	P2 (W/m ²)	Er (%)	P1 (W/m ²)	P2 (W/m ²)	Er (%)	P1 (W/m ²)	P2 (W/m ²)	Er (%)
08:00	91	164	80.05	71	173	142.75	74	34	-53.78
09:00	257	331	28.67	285	324	13.51	248	78	-68.50
10:00	412	460	11.63	331	340	2.58	405	220	-45.72
11:00	533	548	2.78	435	523	20.35	516	318	-38.40
12:00	618	586	-5.17	598	574	-4.06	580	485	-16.42
13:00	619	567	-8.36	556	548	-1.50	577	529	-8.32
14:00	555	498	-10.32	548	463	-15.54	523	454	-13.17
15:00	452	372	-17.64	442	350	-20.75	320	299	-6.63
16 :00	352	220	-37.50	293	198	-32.33	272	157	-42.33
17:00	137	25	-81.72	N-D	N-D	N-D	N-D	N-D	N-D
18 :00	N-D	N-D	N-D	N-D	N-D	N-D	N-D	N-D	N-D

Pour le 22, 23 et 24 mars 2017, les conditions météorologiques sont caractérisées par un ciel avec nuages prédominants, nuageux avec éclaircies et nuageux avec faible neige intermittente, respectivement (Tableau-A III-4 à III-6). L'Er est inférieur à 30 % entre 10h00 et 17h00 pour le 22 mars et le 23 mars ainsi qu'entre 15h00 et 16h00 pour le 24 mars (Tableau 4.3). Pour le 24 mars, il est possible de constater que les précipitations de faible neige intermittente créent des écarts plus importants entre les données de P1 et de P2. Étant donné la présence de nuages, l'apport en rayonnements diffus peut être variable d'une localisation à une autre. De plus, il a été constaté lors de la collecte de données que lorsqu'il neige, le niveau de luminosité ambiant augmente légèrement, probablement dû à une augmentation du rayonnement diffus en lien avec un ciel plus claire. En général pour les trois journées de collecte, il est plus difficile d'obtenir des valeurs similaires entre 8h00 et 10h00.

Tableau 4.3 : Comparaison entre les données de P1 et P2, collecte de données no.2.

	22 mars 2017			23 mars 2017			24 mars 2017		
Heure	P1 (W/m ²)	P2 (W/m ²)	Er (%)	P1 (W/m ²)	P2 (W/m ²)	Er (%)	P1 (W/m ²)	P2 (W/m ²)	Er (%)
08:00	99	274	177.67	164	255	55.92	17	31	79.31
09:00	346	460	32.79	345	457	32.35	10	59	477.13
10:00	535	618	15.51	534	618	15.81	36	195	446.34
11:00	682	738	8.23	674	735	8.97	97	227	134.74
12:00	770	798	3.64	775	798	2.98	91	189	108.40
13:00	806	801	-0.56	804	798	-0.77	91	176	93.26
14:00	780	744	-4.64	776	738	-4.86	89	179	100.99
15:00	687	630	-8.29	685	624	-8.93	112	113	0.68
16:00	549	466	-15.11	544	444	-18.36	54	69	28.07
17:00	361	271	-24.86	328	236	-28.03	12	47	293.35
18:00	159	82	-48.35	154	85	-44.77	N-D	N-D	N-D

Suite à la vérification des données de P1 et de P2, les données de rayonnement solaire provenant du fichier météo (P2) sont utilisées pour la suite de l'étude puisque les valeurs de l'Er ne dépassent pas 30 % pour la majorité des heures. D'autres raisons expliquent ce choix:

- Les données de P1 ne sont pas disponibles pour l'ensemble des journées de collecte de données;
- Les données de P2 sont disponibles pour l'ensemble des journées de collecte de données;
- Il est nécessaire d'avoir l'ensemble des données annuelles du rayonnement solaire pour évaluer les mesures de l'UDI et de l'sDA lors des simulations;
- La station météorologique la plus près du site dont les données de rayonnement solaire sont disponibles est située à Dorval.

4.1.2 Collecte de données

La Figure 4.1 présente le montage expérimental dans la zone à l'étude. Le mobilier est retiré de la zone à l'étude pour la collecte de données. De plus, celle-ci est délimitée avec du ruban afin que les occupants ne passent pas à travers le montage expérimental.

Pour les collectes de données no.1, no.2 et no.3, les données sont présentées en ordre selon la position des stores, soit Hsm1, Hsm2 et Hsm3. Les journées de collecte ont été choisies afin de prioriser les stores descendus (fermeture) pour des journées ensoleillées et les stores montés (ouverture) lors des journées nuageuses.



Figure 4.1 : Montage expérimental dans l'atrium

4.1.2.1 Collecte de données no.1

Pour la position des stores Hsm1, les données mesurées sont colligées pour le 14 octobre 2016 pour des conditions météorologiques caractérisées par un ciel dégagé/ensoleillé (Tableau-A III-1). La Figure 4.2 présente les données mesurées entre 8h00 et 13h00 et les données de P2 entre 8h00 et 14h00. Les données des capteurs C1m, C2m et C3m ont la même tendance entre

8h00 et 10h15 à l'exception de quelques variations. Vers 10h15, il y a une diminution significative du niveau de luminosité pour les trois capteurs. Cela est dû à la latitude du soleil qui, vers cette heure, est moins perceptible à l'horizon et diminue l'apport en rayonnement en profondeur dans l'atrium. À partir de 12h15, le rayonnement direct est caché par le plafond. Cela explique la diminution du niveau de luminosité pour les trois capteurs. Vers 13h30, il n'y a plus de rayonnement direct sur les capteurs. Un niveau de luminosité sous 3000 lux est atteint par C3m à 12h00 à 2781 lux, par C2m à 12h30 à 2827 lux et par C1m à 13h00 à 2752 lux. Donc, l'utilisation de la position Hsm1 ne permet pas d'atteindre un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux entre 8h00 et 13h00.

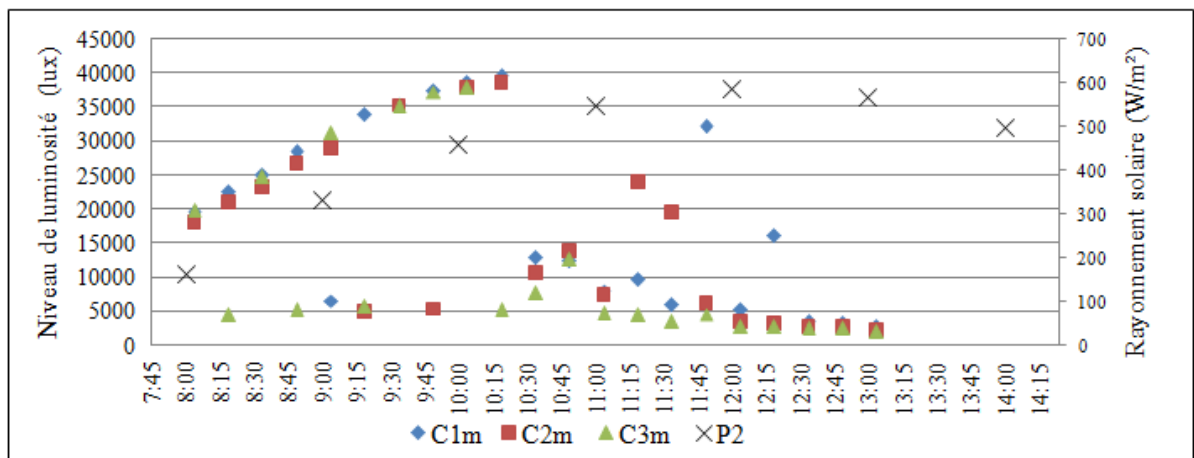


Figure 4.2 : Données mesurées, Hsm1, 14 octobre 2016

Pour la position Hsm2, les données mesurées sont colligées pour le 17 octobre 2016 pour des conditions météorologiques caractérisées par un ciel généralement ensoleillé (Tableau-A III-3). La Figure 4.3 présente les données mesurées entre 8h00 et 13h00 et les données de P2 entre 8h00 et 14h00. Les données des capteurs C1m et C2m suivent la même tendance entre 8h00 et 10h30. Pour le capteur C3m, le niveau de luminosité vers 9h45 passe de 31 062 lux à 3161 lux. Étant donné l'utilisation du store à une hauteur de 4.47 m, le niveau de rayonnement solaire direct mesuré par C3m décroît plus tôt dans la journée qu'avec la position Hsm1, soit environ 45 minutes plus tôt. Par la suite, les données du capteur C2m diminuent significativement passant de 33 239 lux à 3497 lux à 10h45. Cette diminution a lieu vers la même heure qu'à la position Hsm1. Donc, la hauteur du store à la position Hsm2 ne permet

pas de bloquer les rayons solaires sur C2m plus tôt dans la journée. Les données mesurées par C1m atteignent un niveau de 28 881 lux jusqu'à 11h45 puis diminuent significativement par la suite. Un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux est atteint par C3m à partir de 10h00 à 2959 lux, par C2m vers 11h40 à 2718 lux et par C1m vers 12h40 à 2962 lux. Donc, malgré l'utilisation de la position Hsm2, le niveau de luminosité est supérieur à 3000 lux pour la majorité de la journée.

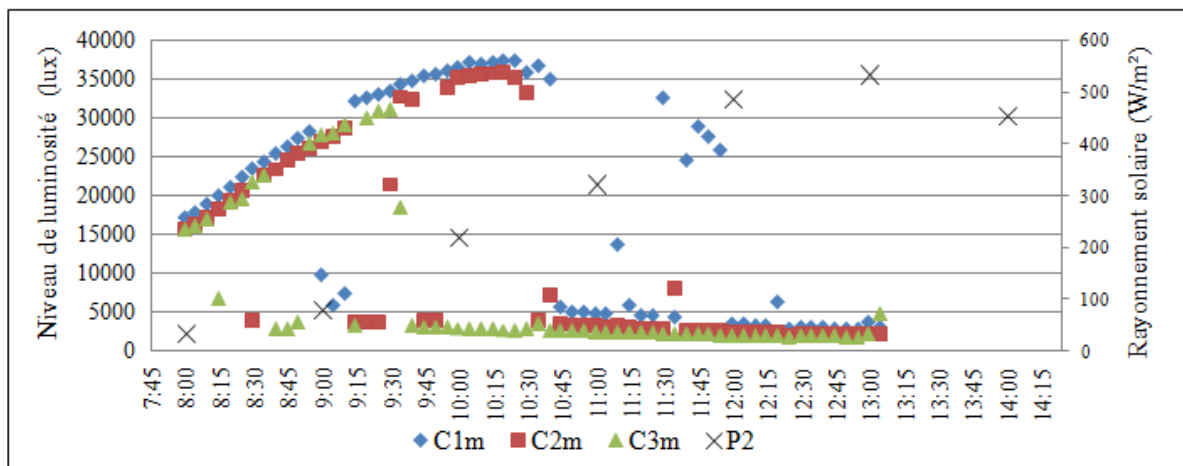


Figure 4.3 : Données mesurées, Hsm2, 17 octobre 2016

Pour la position Hsm3, les données mesurées sont colligées pour le 15 octobre 2016 pour des conditions météorologiques caractérisées par un ciel ensoleillé avec passages nuageux (Tableau-A III-2). La Figure 4.4 présente les données mesurées entre 8h00 et 13h00 et les données de P2 entre 8h00 et 14h00. À partir de 8h15, les données mesurées par le capteur C3m sont inférieures à 3000 lux variant entre 1104 lux et 2666 lux jusqu'à 14h00. À partir de 9h45, le capteur C2m présente des données inférieures à 3000 lux variant entre 1267 lux et 2997 lux. Pour le capteur C1m, les données mesurées atteignent un sommet d'environ 37 736 lux vers 10h30 pour ensuite atteindre 2173 lux vers 11h15. Donc, la position Hsm3 permet d'atteindre un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux plus tôt dans la journée qu'avec les positions Hsm1 et Hsm2.

Le rayonnement direct n'est pas bloqué à l'aide des stores à l'emplacement du capteur C1m puisque celui-ci est trop près de la fenêtre. Au final, la position Hsm3 permet d'atteindre un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux dans la zone dès 9h45 à partir de 4 m de profondeur avec des valeurs de P2 pouvant atteindre 598 W/m².

En général pour le mois d'octobre, il est possible d'avoir un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux en fermant les stores à la position Hsm3, soit à une hauteur de 2.72 m.

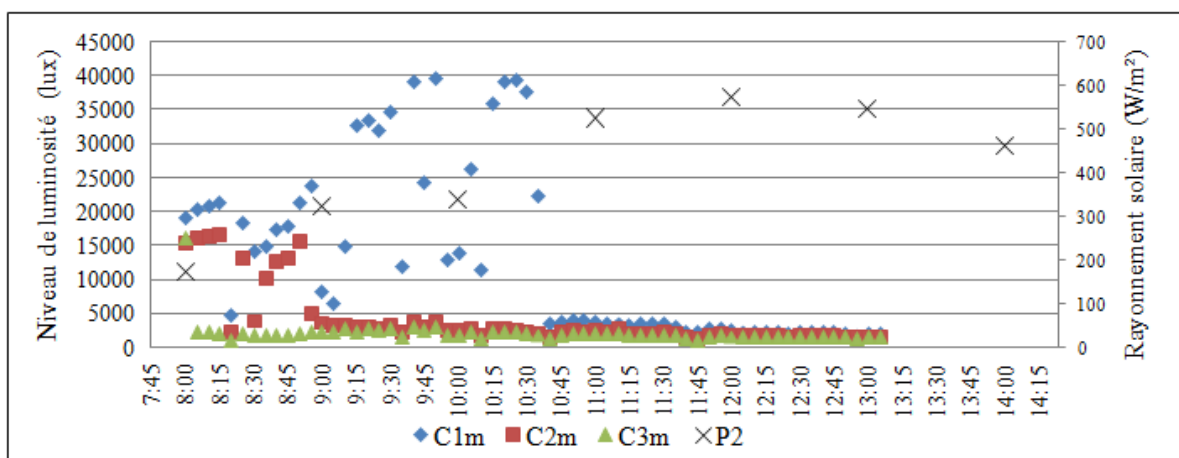


Figure 4.4 : Données mesurées, Hsm3, 15 octobre 2016

4.1.2.2 Collecte de données no.2

Pour la position Hsm1, les données mesurées sont colligées pour le 24 mars 2017 pour des conditions météorologiques caractérisées par un ciel nuageux avec faible neige intermittente à 10h30 et à 11h30 (Tableau-A III-6). La Figure 4.5 présente les données mesurées entre 8h00 et 14h00 et les données de P2 entre 8h00 et 14h00. Les données mesurées par les capteurs C1m, C2m et C3m suivent la même tendance tout au long de la journée. Les données mesurées par C1m sont plus élevées puisque c'est le capteur le plus près de la fenêtre. Les données de C3m sont moins élevées puisque c'est le capteur le plus éloigné de la fenêtre. Étant donné que le ciel est couvert, l'éclairage naturel provient majoritairement du rayonnement diffus. Les maximums atteints à 10h30 et 11h30 sont expliqués par des précipitations de neige. Ainsi, le

niveau de rayonnement solaire augmente à ces moments. Les données de C1m sont supérieures à 3000 lux à 10h30 et à 11h30, soit les moments où il neige. Conséquemment, pour une journée nuageuse où les valeurs de P2 ne dépassent pas 140 W/m^2 , la position Hsm1 permet d'avoir un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux pour la majorité de la journée.

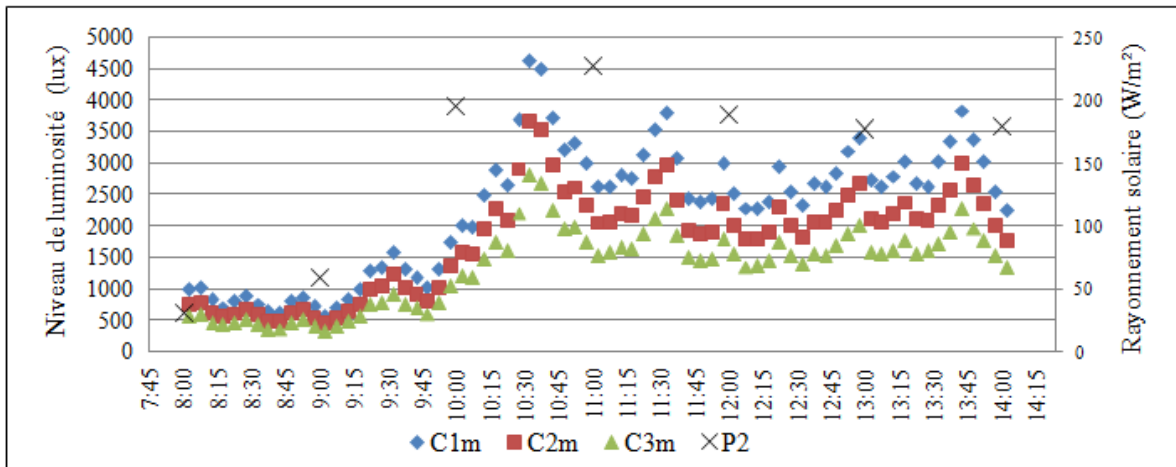


Figure 4.5 : Données mesurées, Hsm1, 24 mars 2017

Pour la position Hsm2, les données mesurées sont colligées pour le 23 mars 2017 pour des conditions météorologiques caractérisées par un ciel nuageux avec éclaircies (Tableau-A III-5). La Figure 4.6 présente les données mesurées entre 8h00 et 14h00 et les données de P2 entre 8h00 et 14h00. Les données mesurées par les capteurs C1m, C2m et C3m suivent la même tendance de 8h00 à 10h00. À partir de 10h15, les données mesurées des capteurs C2m et C3m diminuent à 5311 lux et à 4311 lux, respectivement. Les données du capteur C2m atteignent un sommet vers 11h00 à 43 620 lux et elles diminuent par la suite. Malgré la présence de nuages prédominants dans le ciel, le rayonnement solaire mesuré par P2 atteint une valeur de 798 W/m^2 . Pour le capteur C1m, les données mesurées augmentent pour atteindre un maximum de 50 148 lux à 11h45 et par la suite elles diminuent à 6681 lux. Ces conditions ne permettent pas d'avoir un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux pour la position du capteur C1m. Un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux est atteint seulement vers 13h00 et 13h30 pour les capteurs C3m et C2m, respectivement. Pour une journée avec un ciel nuageux avec éclaircies, l'utilisation de la position Hsm2 ne permet pas d'avoir un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux pour la majorité de la journée.

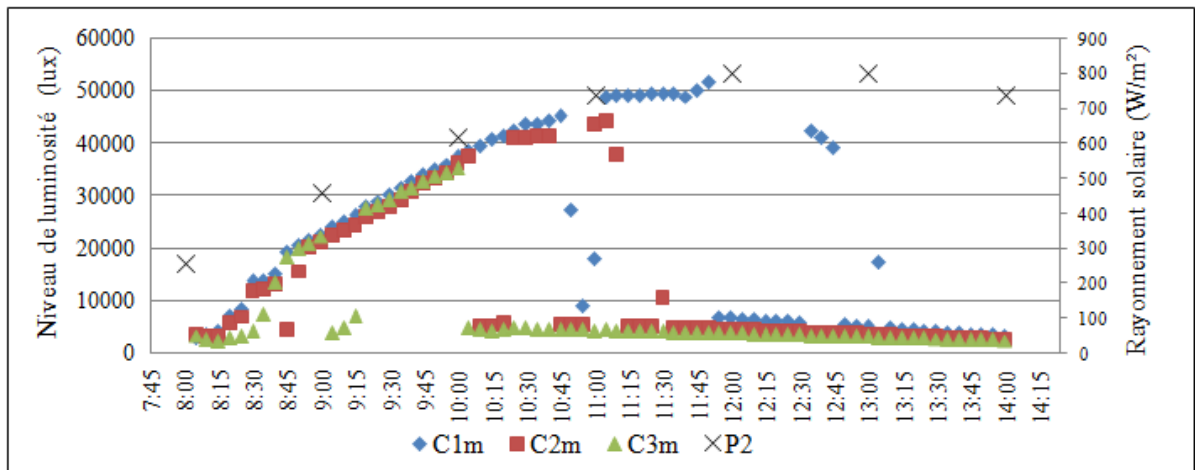


Figure 4.6 : Données mesurées, Hsm2, 23 mars 2017

Pour la position Hsm3, les données mesurées sont colligées pour le 22 mars 2017 pour des conditions météorologiques caractérisées par un ciel avec nuages prédominants (Tableau-A III-4). La Figure 4.7 présente les données mesurées entre 8h00 et 14h00 et les données de P2 entre 8h00 et 14h00. Les données mesurées par les capteurs C1m et C2m suivent la même tendance entre 8h00 et 9h00. Après 9h00, les données mesurées par C1m augmentent pour atteindre un niveau de 45 111 lux à 11h00 et elles diminuent sous 3000 lux vers 13h30. À 9h00, les données mesurées par le capteur C2m atteignent un sommet de 21 688 lux puis diminuent sous 3000 lux à 11h45. Entre 8h45 et 14h00, les données du capteur C3m varient entre 1870 lux et 3356 lux et elles sont sous 3000 lux à partir de 11h15. Le fait que les données mesurées par le capteur C3m atteignent 3000 lux un peu plus tard dans la journée comparé au 15 octobre peut être expliqué par la différence du niveau de rayonnement solaire. Entre 8h00 et 11h15, le niveau de rayonnement varie entre 274 W/m² et 738 W/m² comparativement au 15 octobre où le niveau de rayonnement varie entre 71 W/m² et 434 W/m². Pour une journée avec un ciel avec nuages prédominants, un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux n'est pas atteint avant 13h30.

En général pour le mois de mars, il est démontré que pour des journées avec des précipitations de neige, il est possible d’avoir un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux. Dans le cas des journées avec nuages prédominants ou des journées éclaircies, les données mesurées sont supérieures à 3000 lux.

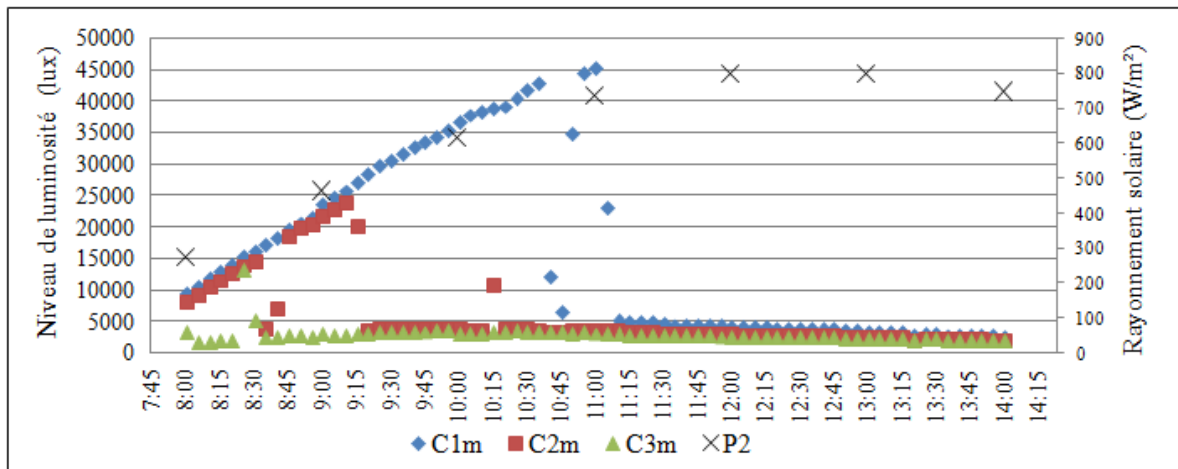


Figure 4.7 : Données mesurées, Hsm3, 22 mars 2017

4.1.2.3 Collecte de données no.3

Pour la position Hsm1, les données mesurées sont colligées pour le 20 juin 2017 pour des conditions météorologiques caractérisées par un ciel nuageux avec orages (Tableau-A III-7). La Figure 4.8 présente les données mesurées entre 9h00 et 14h00 et les données de P2 entre 8h00 et 14h00. Le niveau de luminosité maximum mesuré est atteint vers 10h30 pour les capteurs C1m et C2m avec 61 531 lux et 56 553 lux, respectivement. Pour les données mesurées par le capteur C3m, le niveau de luminosité varie entre 222 lux et 6323 lux. Cette journée est caractérisée par des conditions nuageuses. L’augmentation du niveau de luminosité à 10h30 est expliquée par un ciel dégagé. Le niveau maximum de rayonnement solaire est atteint à 12h00 à 574 W/m². À 13h30, le niveau de luminosité est inférieur à 3000 lux aux capteurs C2m et C3m à 2492 lux et 2252 lux, respectivement. Dans le cas du capteur C1m, les données mesurées sont supérieures à 3000 lux jusqu’à 14h00. Pour un ciel nuageux, il n’est pas possible d’avoir un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux.

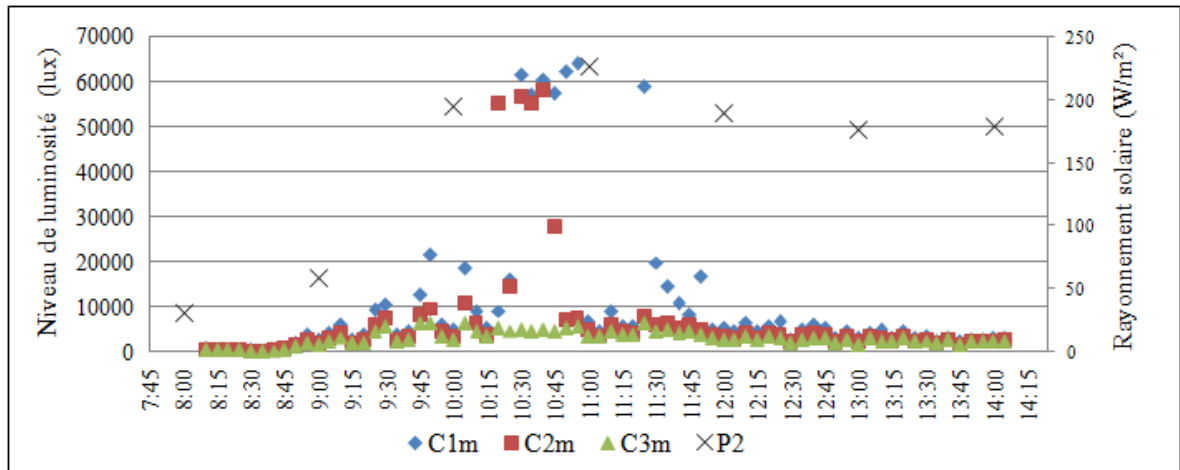


Figure 4.8 : Données mesurées, Hsm1, 20 juin 2017

Pour la position Hsm2, les données mesurées sont colligées pour le 22 juin 2017 pour des conditions météorologiques caractérisées par un ciel avec passages nuageux (Tableau-A III-9). La Figure 4.9 présente les données mesurées entre 9h00 et 14h00 et les données de P2 entre 8h00 et 14h00. Les données des capteurs de C2m et C3m varient peu au courant de la journée. Les données de C2m sont un peu au-dessus de 3000 lux variant entre 1712 lux et 4154 lux. Les données de C3m sont inférieures à 3000 lux à partir de 9h30 et elles varient entre 1216 lux et 3075 lux. Toutefois, les données de C1m sont nettement supérieures à 3000 lux entre 9h00 et 11h15. En juin, le soleil atteint le solstice d'été. Le fait que ce soit seulement C1m qui présente des données mesurées minimales de 2941 lux entre 9h00 et 14h00 peut être expliqué par la latitude du soleil qui limite la propagation des rayons en profondeur dans l'atrium. Donc, un niveau de luminosité de 3000 lux peut être partiellement atteint à une profondeur de plus de 4 m dans la pièce lors d'une journée avec un ciel avec des passages nuageux.

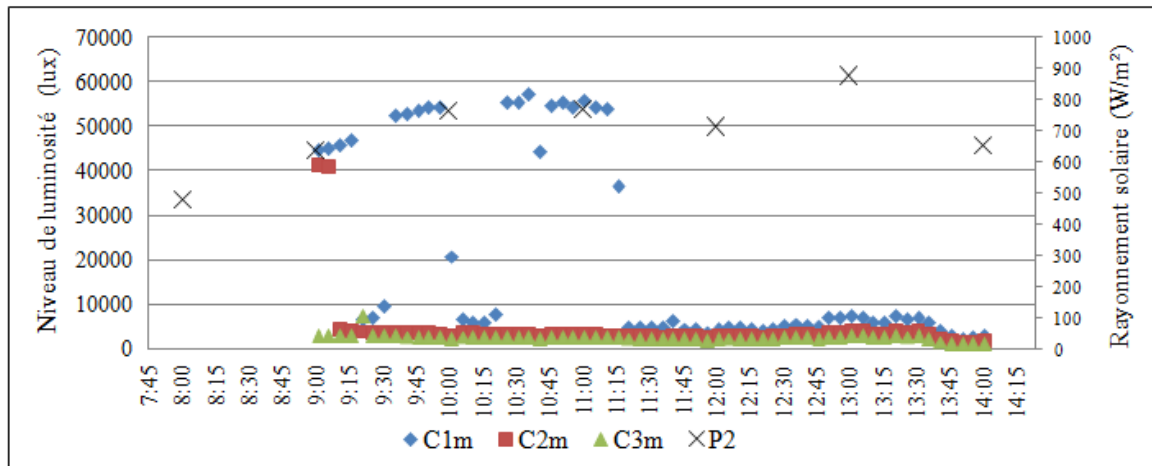


Figure 4.9 : Données mesurées, Hsm2, 22 juin 2017

Pour la position de store Hsm3, les données mesurées sont colligées pour le 21 juin 2017 pour des conditions météorologiques caractérisées par un ciel nuageux (Tableau-A III-8). La Figure 4.10 présente les données mesurées entre 8h00 et 14h00 et les données de P2 entre 8h00 et 14h00. Malgré que les données mesurées par le capteur C2m soient plus élevées que celles mesurées par C3m, elles suivent une tendance similaire durant la journée. De 11h30 à 11h45, les données mesurées par C2m dépassent 3000 lux. Les données de C3m sont inférieures à 3000 lux pour toute la journée. Les conditions météorologiques de cette journée sont caractérisées par des passages nuageux. Cela explique la variation des données du capteur C1m. Donc, avec la position Hsm3 et avec un rayonnement solaire qui varie entre 294 W/m² et 658 W/m² pour un ciel nuageux, il est possible d'avoir un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux à partir de 4 m de profondeur dans la pièce.

En général pour le mois de juin, il n'est pas possible d'atteindre des niveaux de luminosité inférieurs à 3000 lux pour des conditions de ciel nuageux. Toutefois, avec la position Hsm2 et Hsm3 il est possible d'avoir un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux à partir de 4 m de profondeur.

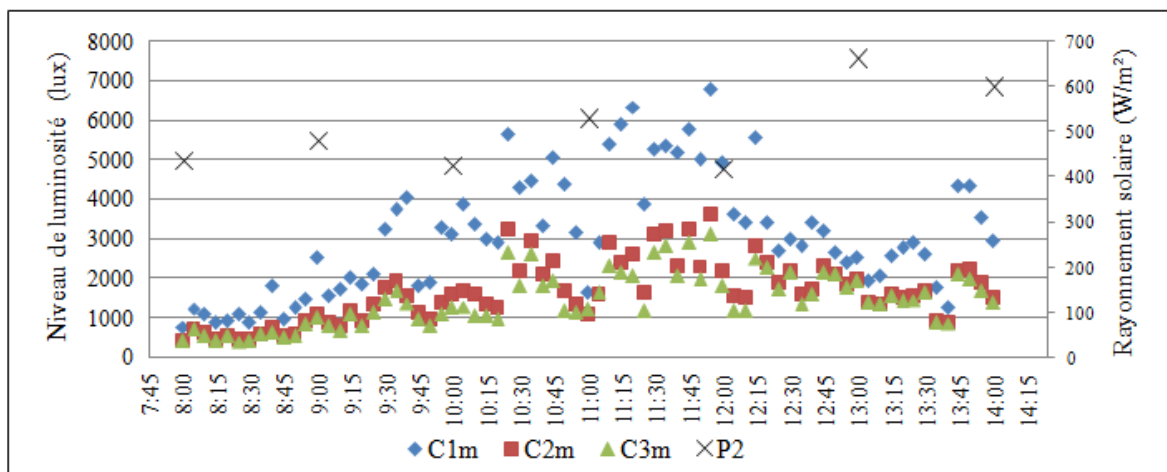


Figure 4.10 : Données mesurées, Hsm3, 21 juin 2017

4.2 Modélisation et calibration du modèle

Cette section présente le modèle 3D de l'atrium, une vérification des données des pyranomètres et la calibration du modèle pour la section R1 des stores à l'aide d'une analyse de sensibilité.

4.2.1 Modèle

La Figure 4.11 présente le modèle 3D de l'atrium modélisé sur SketchUp. Le pavillon A de l'ÉTS (1) et les résidences étudiantes de l'ÉTS (2) sont aussi modélisés.

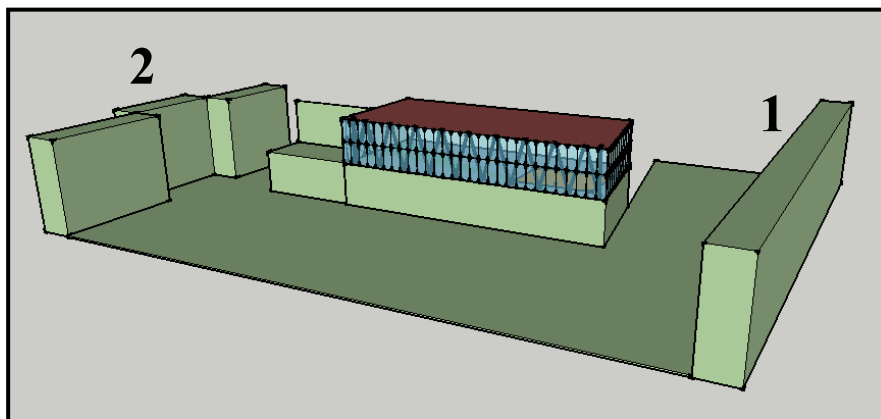


Figure 4.11 : Vue du modèle 3D

Le schéma du plan de luminosité dans le modèle 3D présenté à la Figure 4.12 est basé sur le schéma de la Figure 2.5. Le schéma présente l'emplacement des capteurs C1s, C2s et C3s pour la section R1 des stores. Étant donné qu'un seul capteur à la fois peut être positionné dans le modèle lors des simulations, il est nécessaire de faire une simulation pour chaque capteur. Les données du fichier météo proviennent de la région de Dorval, Québec (SIMEB, 2017).

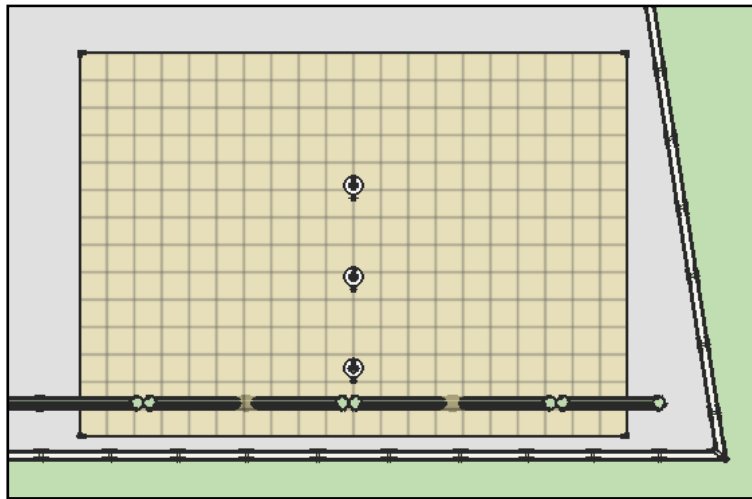


Figure 4.12 : Plan de luminosité dans le modèle 3D

4.2.2 Vérification des données de simulation

Le moteur de simulation de Radiance utilise une approche hybride entre la méthode Monte-Carlo et le traçage des rayons (Hensen & Lamberts, 2011). Il peut donc y avoir des variations dans les résultats des simulations. Afin de quantifier ces écarts, trois simulations pour chacun des capteurs C1s, C2s et C3s sont effectuées (Annexe IV). L'écart maximum pour C1s, C2s et C3s sont de 208 lux, 218 lux et 202 lux avec une erreur relative de 3.18 %, 6.88 % et 3.53 %, respectivement. Donc, un écart d'au plus 6.88 % entre les valeurs provient de la méthode de calcul utilisée.

4.2.3 Calibration du modèle

Afin de calibrer le modèle, une analyse de sensibilité est réalisée pour trois paramètres : le coefficient de transmission de lumière visible (TLV) du vitrage, le coefficient de réflexion (Cr) du sol extérieur et le coefficient de transmission de lumière visible (TLV) du store (Tableau 4.4). Il y a peu d'études disponibles afin de valider un modèle. Toutefois, les données simulées sont comparées aux résultats obtenus par Gilani et O'Brien (2016) dans laquelle la valeur de l'EQM maximum obtenue est de 11 169 lux pour les simulations de l'éclairage naturel. Pour le vitrage du mur-rideau, le coefficient TLV de base, selon la fiche technique du composant, est 0.47 et la valeur peut atteindre 0.77. Pour le store, le coefficient TLV de base, selon les fiches techniques, est 0.07 et la valeur peut atteindre 0.27. Pour le sol extérieur, la plage de valeur utilisée est celle proposée au Tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Paramètres évalués

Composants	Paramètres	Coefficients de base	Plages	Taille du pas
Vitrage	Coefficient de transmission de lumière visible (TLV)	0.47	0.27 - 0.77	0.10
Sol extérieur	Coefficient de réflexion (Cr)	0.10	0.10 - 0.50	0.10
Store	Coefficient de transmission de lumière visible (TLV)	0.07	0.07 - 0.27	0.10

Chaque comparaison des données mesurées et simulées présente des contextes uniques dus à l'heure de la journée, au niveau de rayonnement direct et diffus et au type de ciel. Il est donc difficile d'établir un cadre qui permet d'utiliser une analyse statistique spécifique.

Aussi, sept comparaisons horaires par jour sont possibles puisque la quantité de données simulées pouvant être obtenues est limitée aux valeurs horaires entre 8h00 et 14h00. Tel que spécifié dans le guide 14 de l'ASHRAE (2002), lorsque des erreurs sont identifiées dans les données mesurées ou simulées, celles-ci peuvent être ignorées. Les erreurs identifiées lors de la collecte de données sont mentionnées et justifiées dans cette section. Dans le cas de l'étude, la limite acceptable de l'erreur individuelle élevée au carré pour le calcul de l'EQM a été fixée à 550 % pour les valeurs horaires. Il a été constaté dans les résultats qu'au-dessus de 550 %, l'erreur individuelle élevée au carré atteint des valeurs aberrantes. Lorsque ce critère est atteint ou dépassé, les valeurs sont ignorées pour le calcul de l'EQM et de l'EQM relative. Cette approche est spécifique à ce projet et cette hypothèse n'a pas été validée lors d'études précédentes.

Les valeurs mesurées par les capteurs C1m, C2m et C3m pour le 20 juin entre 8h00 et 9h00 présentent des écarts significatifs avec les valeurs simulées puisque les valeurs de l'erreur individuelle élevée au carré sont au-dessus de la limite fixée à 550 %. Donc, ces valeurs sont ignorées pour les calculs de l'EQM et de l'EQM relative pour l'analyse de sensibilité des trois coefficients. Ces écarts peuvent être expliqués par les conditions nuageuses lors de la collecte de données. Aussi, il pourrait y avoir eu des écarts entre les conditions sur le site et celles enregistrées par le pyranomètre situé à Dorval. Pour le 24 mars à 9h00, l'erreur individuelle élevée au carré est supérieure à 550 %. Donc, ces valeurs sont ignorées pour les calculs de l'EQM et de l'EQM relative pour l'analyse de sensibilité des trois coefficients. Cela est expliqué en partie par une couverture nuageuse complète à ce moment et l'écart entre le rayonnement solaire mesuré entre P1 et P2 ayant une erreur relative de 477% (Tableau 4.3).

4.2.3.1 Coefficient de transmission de lumière visible (TLV) du vitrage

Le coefficient TLV du vitrage est évalué seulement lorsque les stores sont à la position Hsm1, soit la position où les stores sont ouverts. Ainsi, le store ne pourra pas influencer les résultats obtenus. Les figures 4.13 à 4.15 présentent les données pour le 14 octobre 2016 pour les capteurs C1, C2 et C3, respectivement. À la Figure 4.13, la valeur mesurée par C1m est

inférieure à la valeur simulée par C1s à 9h00. Cela peut être dû à l'obstruction du rayonnement solaire sur C1m et qui n'est pas perçue par C1s lors de la simulation. Cette obstruction est due en partie à l'ombrage créé par les meneaux et les colonnes structurales. Pour C1s et C2s, les valeurs maximums sont atteintes vers 10h00 tel que pour C1m et C2m. Pour C3s, la valeur maximum est atteinte vers 9h00 tandis que le sommet est atteint vers 10h00 par C3m. Il est aussi possible de remarquer que la variation du coefficient TLV a un impact plus important pour le capteur C1s puisqu'il est plus près de la fenêtre. En effet, cela pourrait être expliqué par un plus grand apport en rayons directs. Cela est dû en partie au nombre de réflexions des rayons dans le modèle lié à la méthode de calcul utilisée par Radiance, soit l'approche hybride entre la méthode Monte-Carlo et le traçage des rayons. Aussi, cela peut être aussi dû aux limites de la simulation à considérer le rayonnement diffus. Enfin, pour C1s et C2s, le niveau de luminosité est inférieur à 3000 lux à partir de 14h00 et à partir de 13h00 pour C3s. Les figures-A V-1 à V-3 pour le 24 mars ainsi que les figures-A V-4 à V-6 pour le 20 juin sont présentées en annexe V. En général, les mêmes constats peuvent être faits pour ces deux journées.

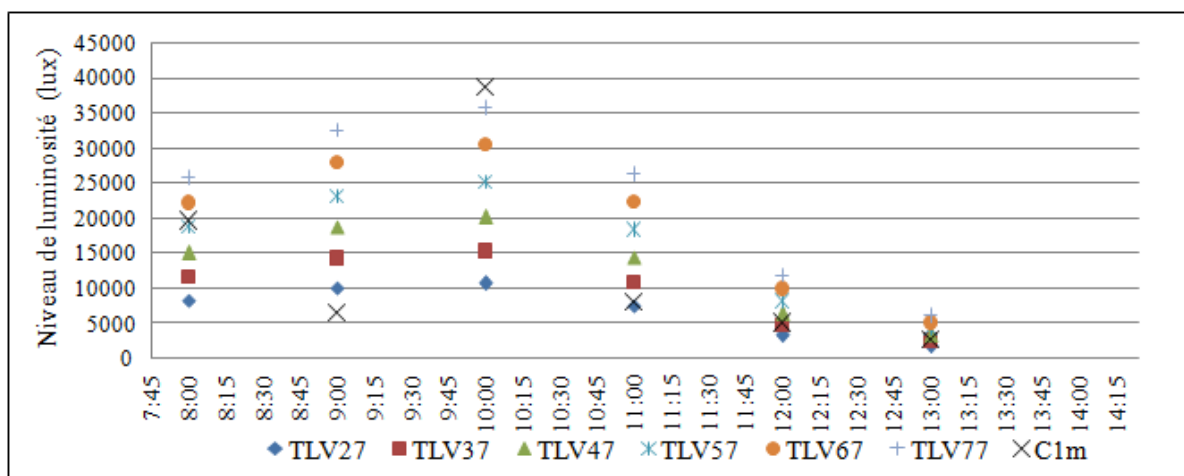


Figure 4.13 : Variation du coefficient TLV du vitrage, Hsm1, C1s, 14 octobre 2016

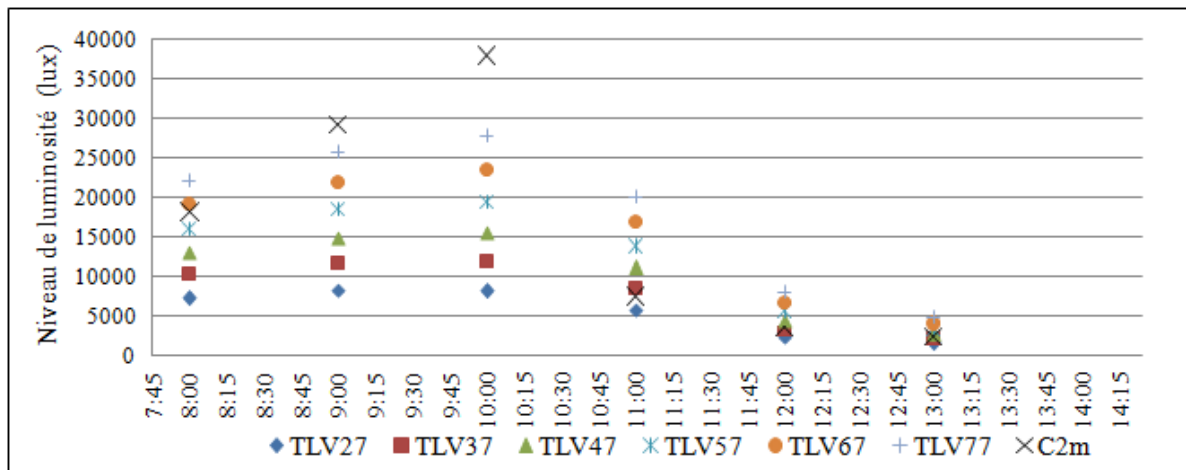


Figure 4.14 : Variation du coefficient TLV du vitrage, Hsm1, C2s, 14 octobre 2016

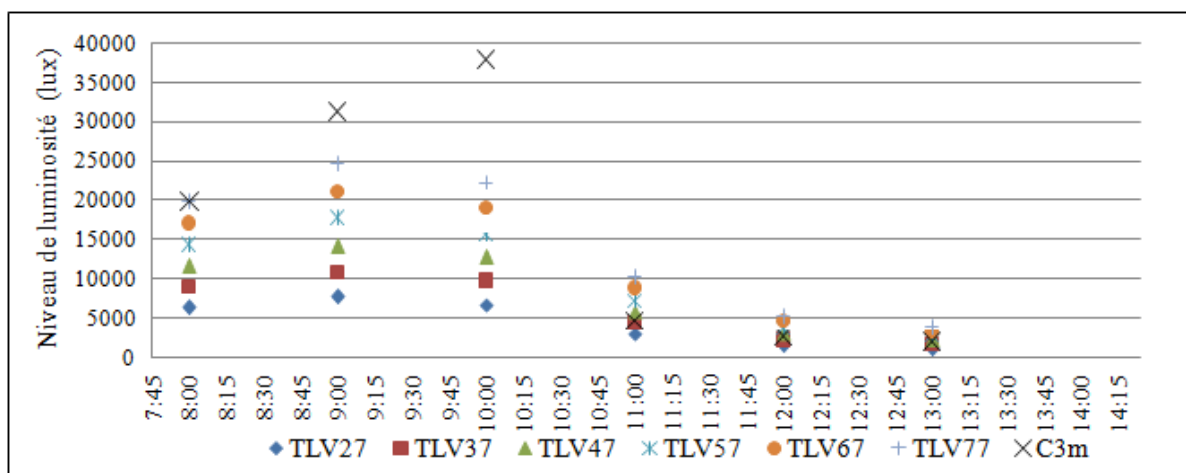


Figure 4.15 : Variation du coefficient TLV du vitrage, Hsm1, C3s, 14 octobre 2016

Les résultats de l'EQM (EQM relative (%)) obtenus suite à la variation du coefficient TLV du vitrage sont présentés au Tableau 4.5. Les valeurs de l'EQM en gras représentent les valeurs supérieures à la valeur de l'EQM de 11 169 lux obtenue par Gilani et O'Brien (2016). Les valeurs de l'EQM relative en gras représentent les valeurs supérieures à l'EQM relative acceptable de 32 %, soit la valeur acceptable utilisée par Reinhart et Breton (2009). Les résultats montrent que les valeurs de l'EQM sont plus élevées au mois d'octobre qu'aux mois de mars et juin. L'EQM relative dépasse 32 % pour la majorité des données de C1 en octobre. Les coefficients 0.27 et 0.37 permettent d'avoir une EQM relative de moins de 32 %. Par contre, en diminuant la valeur du coefficient TLV du vitrage, les données simulées présentent

des écarts entre 9 % et 24 % par rapport aux données mesurées. Donc, suite aux résultats obtenus, la valeur de 0.47 est sélectionnée, soit la valeur du coefficient de base.

Tableau 4.5 : EQM (lux) (EQM relative (%)) des coefficients TLV du vitrage

	Octobre			Mars			Juin		
TLV	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
0.27	12 430 (20)	15 545 (23)	16 862 (25)	1083 (19)	856 (20)	593 (18)	1725 (14)	1414 (16)	1070 (16)
0.37	10 619 (24)	13 234 (17)	14 837 (19)	712 (13)	564 (13)	382 (12)	931 (9)	755 (10)	603 (11)
0.47	9596 (35)	11 156 (17)	12 835 (17)	703 (14)	523 (13)	432 (15)	2 007 (22)	998 (18)	833 (20)
0.57	9791 (49)	9197 (21)	10 878 (18)	1100 (22)	797 (20)	696 (23)	3 518 (37)	1830 (30)	1451 (31)
0.67	11 291 (65)	7775 (29)	9016 (23)	1660 (32)	1206 (30)	1035 (34)	5236 (53)	2831 (44)	2198 (45)
0.77	13 618 (82)	7241 (40)	7401 (29)	2267 (43)	1652 (40)	1392 (45)	6954 (70)	3877 (59)	3010 (61)

4.2.3.2 Coefficient de réflexion (Cr) du sol extérieur

Le coefficient de réflexion (Cr) du sol extérieur est évalué lorsque les stores sont à la position Hsm1 seulement. Les figures 4.16 à 4.18 présentent les données pour le 14 octobre 2016. Les données simulées suivent la tendance des données mesurées. Par contre, les simulations ne permettent pas d'atteindre des niveaux de luminosité aussi élevés que les données mesurées à 10h00. Dans le cas de C1m, C2m et C3m, les niveaux de luminosités mesurés augmentent de 8h00 à 10h00 pour ensuite diminuer drastiquement de 11h00 jusqu'à 13h00. Les résultats montrent une faible variation du niveau de luminosité pour C1s, C2s et C3s en faisant varier le coefficient Cr du sol extérieur. Les figures-A V-7 à V-9 pour le 24 mars ainsi que les figures-A V-10 à V-12 pour le 20 juin sont présentées en annexe V.

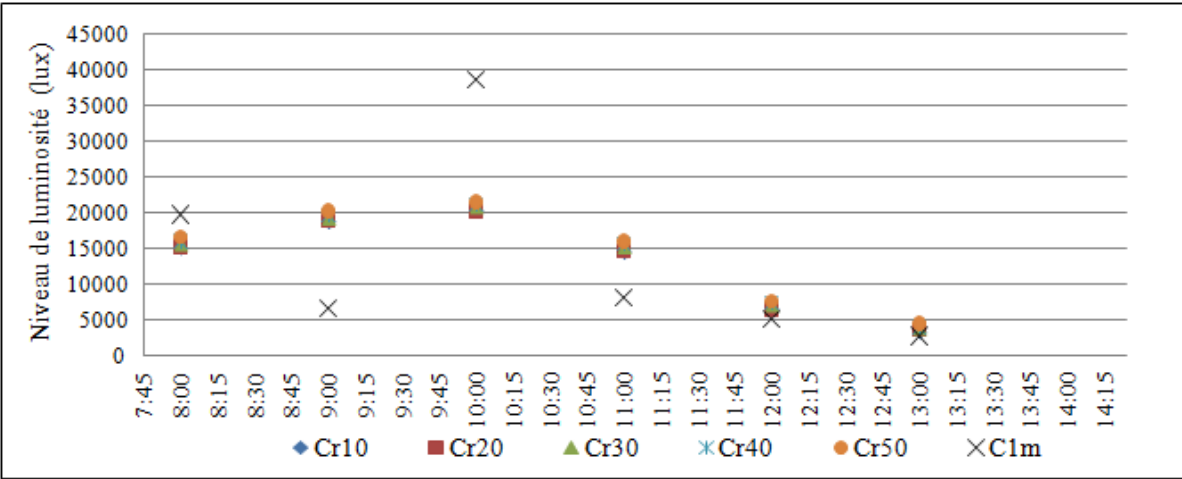


Figure 4.16 : Variation du coefficient Cr du sol extérieur, Hsm1, C1s, 14 octobre 2016

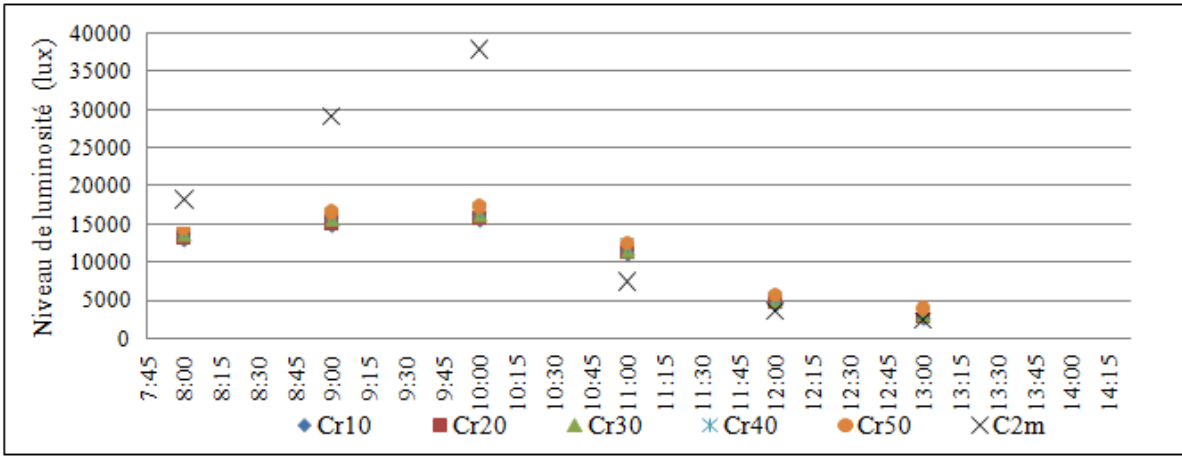


Figure 4.17 : Variation du coefficient Cr du sol extérieur, Hsm1, C2s, 14 octobre 2016

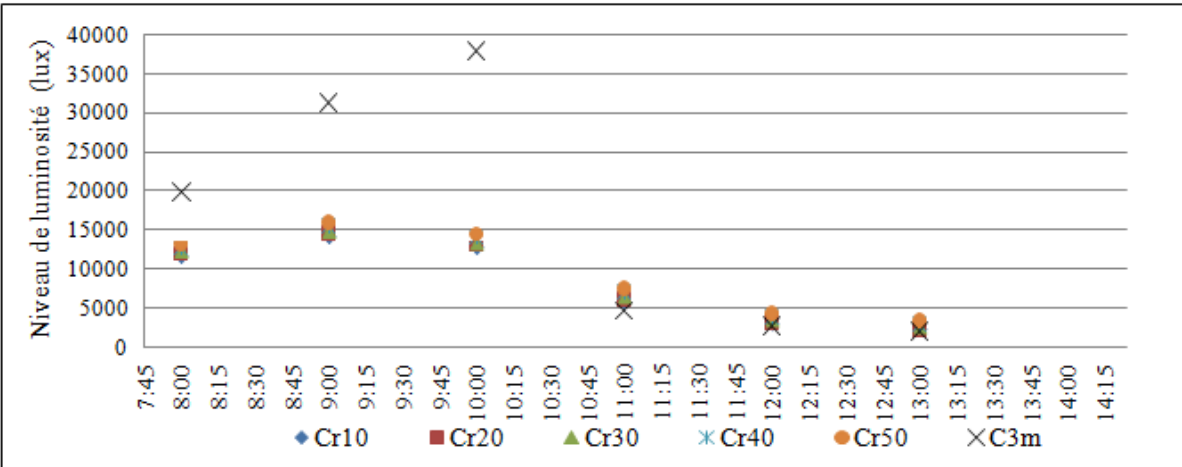


Figure 4.18 : Variation du coefficient Cr du sol extérieur, Hsm1, C3s, 14 octobre 2016

Le fait que l'atrium est situé au 2^e étage a un impact sur l'apport en rayons réfléchis par le sol extérieur. Donc, la variation du coefficient Cr du sol extérieur a un faible impact dans le cas de l'atrium.

Les résultats de l'EQM (EQM relative (%)) obtenus suite à la variation du coefficient Cr du sol extérieur sont présentés au Tableau 4.6. Les valeurs de l'EQM en gras représentent les valeurs supérieures à la valeur de l'EQM de 11 169 lux obtenue par Gilani et O'Brien (2016). Les valeurs de l'EQM relative en gras représentent les valeurs supérieures à l'EQM relative acceptable de 32 %. Les valeurs maximales de l'EQM sont observées au capteur C3 pour le mois d'octobre et elles se situent entre 11 814 lux et 12 835 lux. Au mois d'octobre, l'EQM relative dépasse plus de 32 % pour C1 pour les coefficients de Cr entre 0.10 et 0.50. Au mois de juin, les valeurs dépassent 32 % pour les trois capteurs pour un coefficient Cr de 0.50. Les écarts minimums obtenus sont avec le coefficient Cr de 0.10. Malgré l'augmentation du coefficient Cr, les valeurs de l'EQM et de l'EQM relative augmentent. Donc, la valeur retenue pour le coefficient est de 0.10, soit la valeur du coefficient de base.

Tableau 4.6 : EQM (lux) (EQM relative (%)) des coefficients Cr du sol extérieur

	Octobre			Mars			Juin		
Cr	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
0.10	9596 (35)	11 156 (17)	12 835 (17)	703 (14)	523 (13)	432 (15)	2007 (22)	998 (18)	833 (20)
0.20	9609 (36)	10 971 (17)	12 605 (17)	718 (14)	546 (14)	466 (16)	2207 (25)	1190 (21)	1020 (24)
0.30	9549 (37)	10 765 (18)	12 446 (18)	758 (15)	577 (15)	517 (17)	2424 (28)	1404 (24)	1237 (28)
0.40	9585 (39)	10 404 (19)	12 051 (19)	804 (16)	635 (16)	590 (20)	2751 (32)	1820 (31)	1638 (37)
0.50	9683 (41)	10 235 (23)	11 814 (23)	871 (17)	712 (18)	685 (23)	3 122 (36)	2221 (38)	2082 (46)

4.2.3.3 Coefficient de transmission de lumière visible (TLV) du store

Le coefficient de transmission de lumière visible (TLV) est évalué lorsque le store est aux positions Hsm2 et Hsm3 seulement. Étant donné que le store est complètement ouvert à la position Hsm1, il n'est pas possible d'évaluer ce coefficient. Les figures 4.19 à 4.21 présentent les données pour la position Hsm2 (15 octobre 2016). Les résultats de C1s, C2s et C3 présentent peu de changements avec la variation du coefficient TLV du store. Entre 8h00 et 10h00, les valeurs simulées ne permettent pas d'atteindre les niveaux de luminosités mesurés. Par contre, entre 11h00 et 13h00, les valeurs simulées suivent la même tendance que les valeurs mesurées. Les figures 4.22 à 4.24 présentent les données pour la position Hsm3 (17 octobre 2016). Pour cette journée, les données simulées sont similaires aux données mesurées à l'exception des données à 8h00. Les figures-A V-13 à V-15 et V-19 à V-21 pour les 23 mars 2017 et 22 mars 2017 ainsi que les figures-A V-16 à V-18 et V-22 à V24 pour les 22 juin et 21 juin 2017 sont présentées en annexe V.

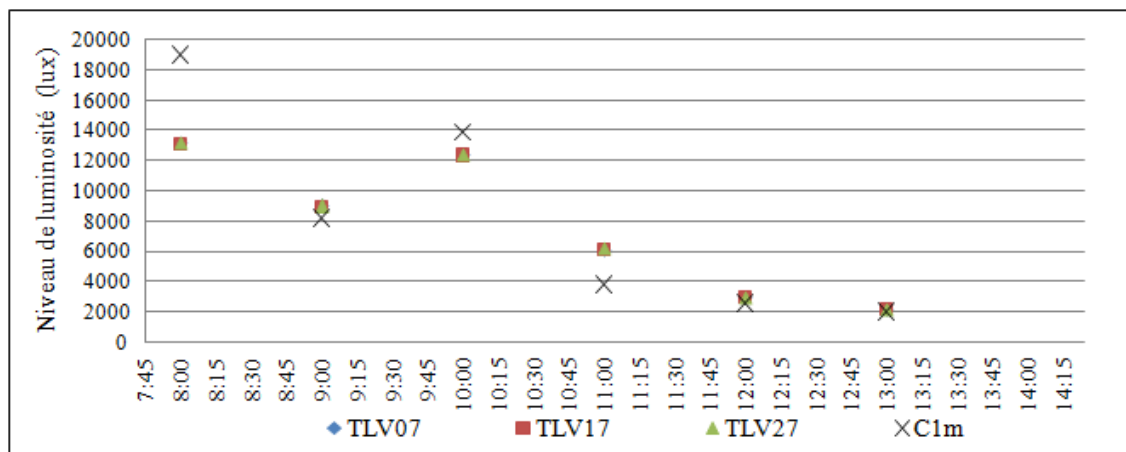


Figure 4.19 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm3, C1s, 15 octobre 2016

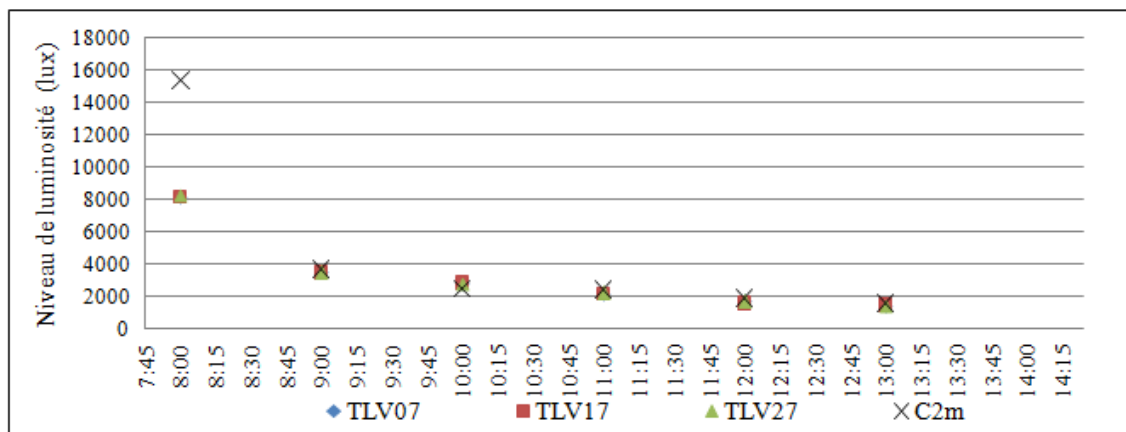


Figure 4.20 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm3, C2s, 15 octobre 2016

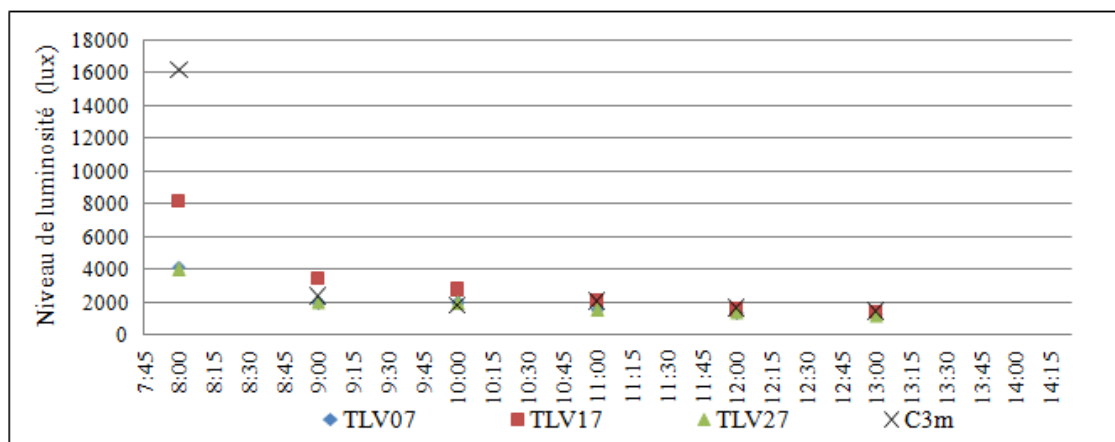


Figure 4.21 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm3, C3s, 15 octobre 2016

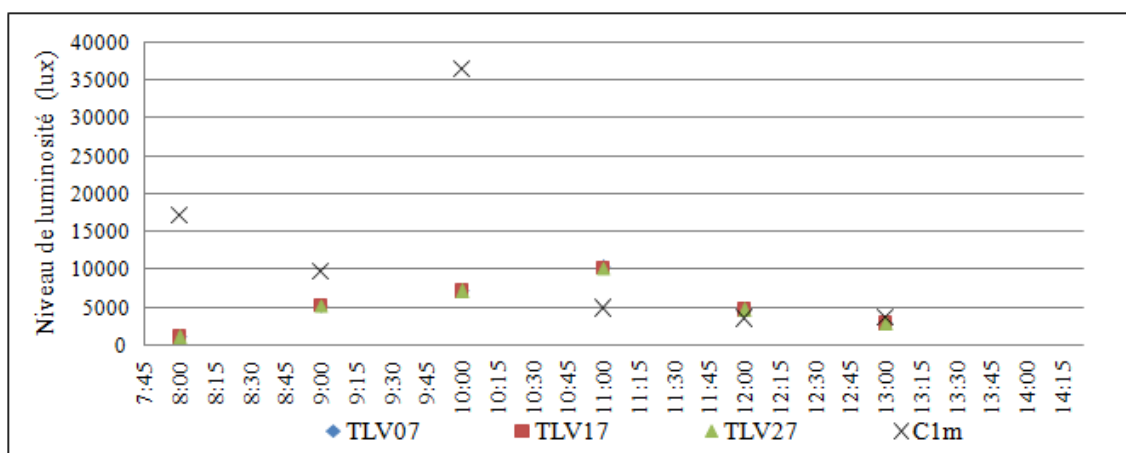


Figure 4.22 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm2, C1s, 17 octobre 2016

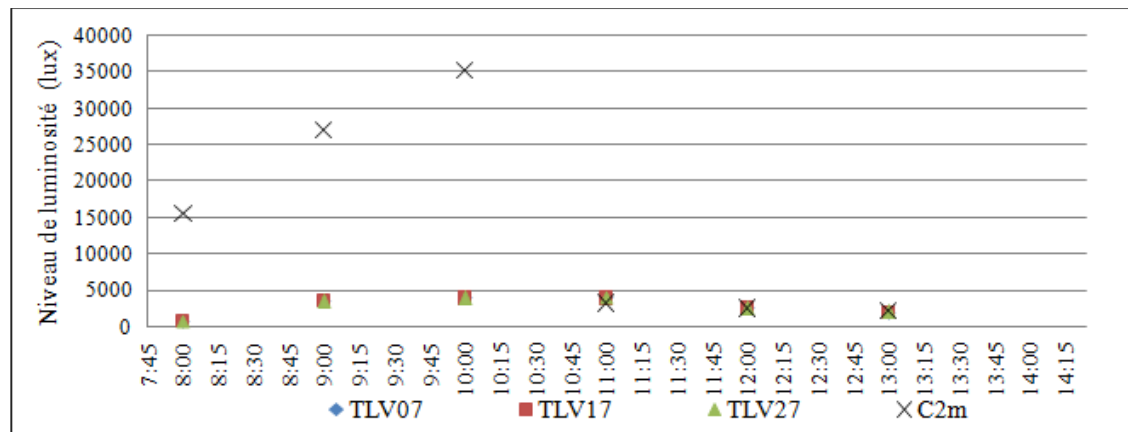


Figure 4.23 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm2, C2s, 17 octobre 2016

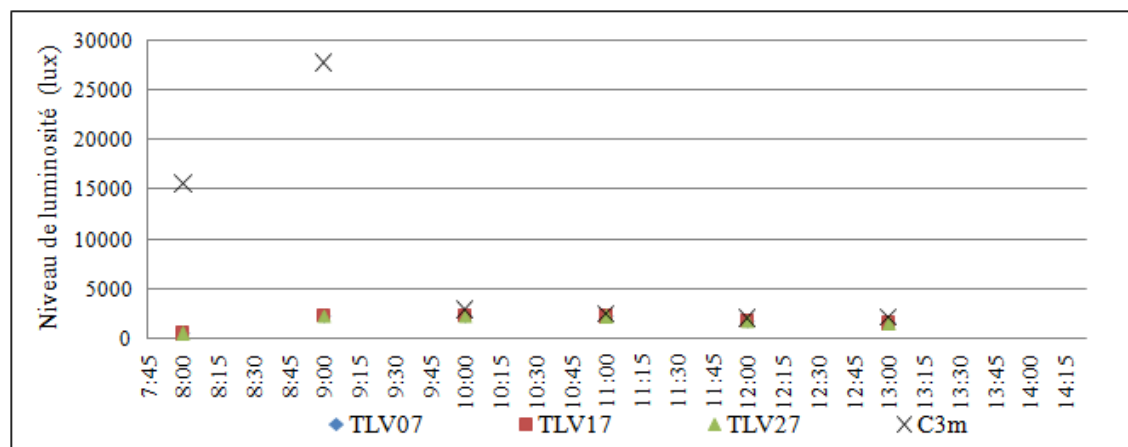


Figure 4.24 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm2, C3s, 17 octobre 2016

Les résultats de l'EQM (EQM relative (%)) obtenus suite à la variation du coefficient TLV pour Hsm2 et Hsm3 sont présentés au Tableau 4.7. Les valeurs de l'EQM en gras représentent les valeurs supérieures à la valeur de l'EQM de 11 169 lux obtenue par Gilani et O'Brien (2016). Les valeurs de l'EQM relative en gras représentent les valeurs supérieures à l'EQM relative acceptable de 32 %. Pour la position Hsm2, l'EQM relative dépasse plus de 11 169 lux pour la majorité des capteurs et des valeurs du coefficient Cr. Toutefois, l'EQM se situe sous 32 % pour l'ensemble des cas. Pour la position Hsm3, l'EQM dépasse plus de 11 169 lux pour les capteurs C1m et C1s au mois de mars seulement. La valeur de l'EQM maximale atteinte est de 6416 lux pour les capteurs C2m et C2s au mois de mars. Les valeurs de l'EQM relative sont inférieures à 32 % pour l'ensemble des capteurs.

En résumé, les valeurs de l'EQM obtenues pour la position Hsm3 sont plus basses que celles obtenues pour la position Hsm2. C'est aussi le cas pour les valeurs de l'EQM obtenues à la position Hsm1 qui sont plus faibles que celles à la position Hsm2. Donc, avec une hauteur intermédiaire Hsm2, il est plus difficile d'obtenir des valeurs simulées similaires aux valeurs mesurées. Dans le cas de la position Hsm3, les valeurs de l'EQM et de l'EQM relative obtenues démontrent que les valeurs simulées sont acceptables. Par contre, ce n'est pas le cas pour les valeurs obtenues entre C1m et C1s au mois de mars. Pour le 23 mars à 8h00 pour Hsm2, les valeurs présentent des écarts significatifs. Cela peut être dû aux écarts entre les valeurs du rayonnement solaire mesuré par P1 et par P2 avec une erreur relative de 55.92 % (Tableau 4.3). Aussi, pour le 21 juin à 8h00 pour Hsm3, les données présentent des écarts significatifs. Toutefois, les valeurs du rayonnement solaire mesuré sur le site par P1 pour cette journée ne sont pas disponibles. Donc, il n'est pas possible de vérifier s'il y avait des écarts entre le rayonnement solaire mesuré par P1 et par P2 à ce moment. Bref, ces valeurs sont ignorées pour les calculs de l'EQM et de l'EQM relative pour l'analyse de sensibilité du coefficient de store. Donc, suite aux résultats obtenus, la valeur retenue du coefficient TLV des stores est de 0.47, soit la valeur du coefficient de base.

Tableau 4.7 : EQM (lux) (EQM relative (%)) des coefficients TLV du store

Hsm2									
	Octobre			Mars			Juin		
TLV	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
0.07	13 988 (30)	17 110 (27)	12 034 (23)	4034 (6)	19 727 (21)	14 004 (20)	21 518 (19)	13 960 (18)	593 (9)
0.17	13 985 (29)	17 103 (26)	12 038 (23)	3936 (6)	19 667 (21)	13 954 (20)	21 535 (19)	13 867 (18)	618 (10)
0.27	13 990 (29)	17 119 (27)	12 030 (23)	3900 (6)	19 768 (21)	13 979 (20)	21 586 (19)	14 231 (18)	612 (9)
Hsm3									
	Octobre			Mars			Juin		
TLV	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
0.07	2662 (12)	2953 (9)	4914 (14)	17 780 (23)	6376 (13)	711 (9)	1367 (22)	558 (19)	405 (15)
0.17	2702 (12)	2947 (9)	4921 (14)	11 839 (25)	6416 (13)	768 (10)	1365 (22)	565 (20)	414 (15)
0.27	2 671 (12)	2911 (9)	4962 (14)	11 819 (25)	6343 (12)	741 (10)	1368 (22)	567 (20)	416 (15)

En résumé, le coefficient qui a le plus d'impact est le coefficient TLV du vitrage. Effectivement, la variation de ce coefficient a un impact sur l'apport en rayonnement solaire dans la pièce. Ensuite, la variation du coefficient TLV du store a présenté peu d'impact. Toutefois, il est à noter que le fait d'inclure le dispositif d'ombrage dans le modèle influence l'apport en rayonnement solaire dans la pièce et bloque une partie des rayons directs. Quant au coefficient Cr du sol extérieur, celui-ci n'a pas eu d'impact significatif. Cela peut être expliqué par le fait que l'atrium est situé au 2^e étage et que les rayons réfléchis sur le plafond à une hauteur de 7.15 m influencent peu les résultats. Suite à la calibration du modèle à l'aide d'une analyse de sensibilité pour la section R1, il a été démontré que les paramètres avec les coefficients de base sont ceux qui permettent d'obtenir les valeurs de l'EQM et de l'EQM relative les plus basses. Les paramètres du modèle sont présentés au Tableau 4.8. Le Tableau 4.9 présente les valeurs de l'EQM et l'EQM relative pour le modèle 3D. Les valeurs de l'EQM

en gras représentent les valeurs supérieures à la valeur de 11 169 lux obtenue par Gilani et O'Brien (2016). Les valeurs de l'EQM relative représentent les valeurs supérieures à l'EQM relative acceptable de 32 % (Reinhart & Breton, 2009). Dans l'ensemble, les valeurs dépassent l'EQM de 11 169 lux pour la position Hsm2 la plupart du temps (Gilani & O'Brien, 2016). Ensuite, seul le capteur C1 pour la position Hsm1 atteint une valeur de l'EQM relative égale à 35%. Sinon, pour les autres valeurs de l'EQM relative, les résultats sont inférieurs à la limite de 32 % acceptable pour l'ensemble des simulations de la section R1. Le modèle est donc considéré comme calibré.

Tableau 4.8 : Paramètres du modèle

Paramètres	Coefficients de base	Coefficients finaux
Coefficient de transmission de lumière visible (TLV)	0.47	0.47
Coefficient de réflexion (Cr)	0.10	0.10
Coefficient de transmission de lumière visible (TLV)	0.07	0.07

Tableau 4.9 : EQM (lux) (EQM relative (%)) du modèle 3D

Hsm1								
Octobre			Mars			Juin		
C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
9596 (35)	11 156 (17)	12 835 (17)	703 (14)	523 (13)	432 (15)	2007 (22)	998 (18)	833 (20)
Hsm2								
Octobre			Mars			Juin		
C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
13 988 (30)	17 110 (27)	12 034 (23)	4 034 (6)	19 727 (21)	14 004 (20)	20 033 (16)	13 181 (27)	761 (10)
Hsm3								
Octobre			Mars			Juin		
C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
2662 (12)	2953 (9)	4914 (14)	17 780 (23)	6376 (13)	711 (9)	1367 (22)	558 (19)	405 (15)

4.3 Identification de la zone d'application

Suite à la calibration du modèle, la zone à l'étude est analysée à l'aide des plans de luminosité provenant des simulations. Par la suite, les mesures de l'UDI et de l'sDA permettront de vérifier différentes configurations de la zone afin de déterminer la zone d'application retenue pour l'application de la séquence de contrôle proposée. Cette zone sera utilisée pour aménager les espaces de travail pour les occupants afin de limiter le niveau de luminosité à 3000 lux, soit la limite à laquelle il peut y avoir des éblouissements ou des inconforts visuels.

4.3.1 Évaluation des plans de luminosité

L'évaluation des plans de luminosité est réalisée pour la section R1 des stores dans l'atrium pour la zone présentée à la Figure 3.4. Les plans de luminosité sont situés à une distance minimum de 0.5 m des murs (Figure 2.5). Les plans de luminosité ont une profondeur totale de 8.4 m (Figure 3.4). Pour déterminer les zones où le niveau de luminosité est supérieur à 3000 lux, les plans de luminosité sont présentés pour les solstices et les équinoxes (Tableau-A I-2). Pour chaque position des stores, trois moments sont évalués soit 9h00, 12h00 et 14h00 étant donné que les données mesurées sont disponibles entre 8h00 et 14h00.

La Figure 4.25 présente les plans de luminosité provenant de la simulation pour la position Hsm1. Il y a un risque d'inconfort visuel puisqu'un niveau de luminosité de 3000 lux est souvent dépassé dans la majorité de la zone. À 14h00, l'ensemble des plans de luminosité démontrent sur la droite un niveau de luminosité plus élevé. Puisque le mur adjacent à l'est est un mur-rideau, il y a un apport significatif en éclairage naturel par cette façade. Il serait préférable de réduire la zone devant les deux façades. Bref, pour ces quatre journées, l'ensemble de la zone présente des conditions inconfortables lorsqu'aucun dispositif d'ombrage n'est utilisé.

La Figure 4.26 présente les plans de luminosité provenant de la simulation pour la position Hsm2. Les résultats démontrent un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux pour les quatre journées à partir de 5 m, 3 m et 3 m pour 9h00, 12h00 et 14h00, respectivement. Donc, l'utilisation du store motorisé permet de limiter l'apport en rayonnement solaire dans l'atrium. La Figure 4.26 démontre la même tendance à la droite des plans de luminosité que sur la Figure 4.25. Étant donné que les stores sont présents seulement sur la façade sud-est, il n'y a pas d'impact sur la diminution de l'apport en rayonnement solaire sur la façade est.

La Figure 4.27 présente les plans de luminosité provenant de la simulation pour la position Hsm3. Les résultats démontrent que les niveaux de luminosité sont inférieurs à ceux obtenus aux positions Hsm1 et Hsm2. En général, un niveau de luminosité de 3000 lux n'est pas atteint à plus de 4 m de profondeur de la zone. Donc, la position Hsm3 permet d'améliorer le niveau de luminosité dans la zone. La même constatation qu'aux positions Hsm1 et Hsm2 peut être faite sur la droite des plans de luminosité. Encore une fois, puisqu'il n'y a pas de stores sur la façade est, les rayons ne peuvent pas être bloqués. Toutefois, ce niveau élevé de luminosité peut provenir en partie des rayons réfléchis sur le bâtiment voisin. Malgré une possible utilisation des stores sur la façade est, la hauteur limite des stores ne pourrait pas bloquer les rayons jusqu'à une certaine distance de la paroi. En résumé, l'utilisation de la position Hsm3 permet d'atteindre un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux pour une plus grande superficie de la zone à l'étude.

L'interface de ResultsViewer est utilisée afin d'obtenir les plans de luminosité. Toutefois, il n'est pas possible d'ajuster l'échelle des axes. Donc, dans les figures 4.25, 4.26 et 4.27, l'échelle de l'axe pour le niveau de luminosité (lux) n'est pas la même.

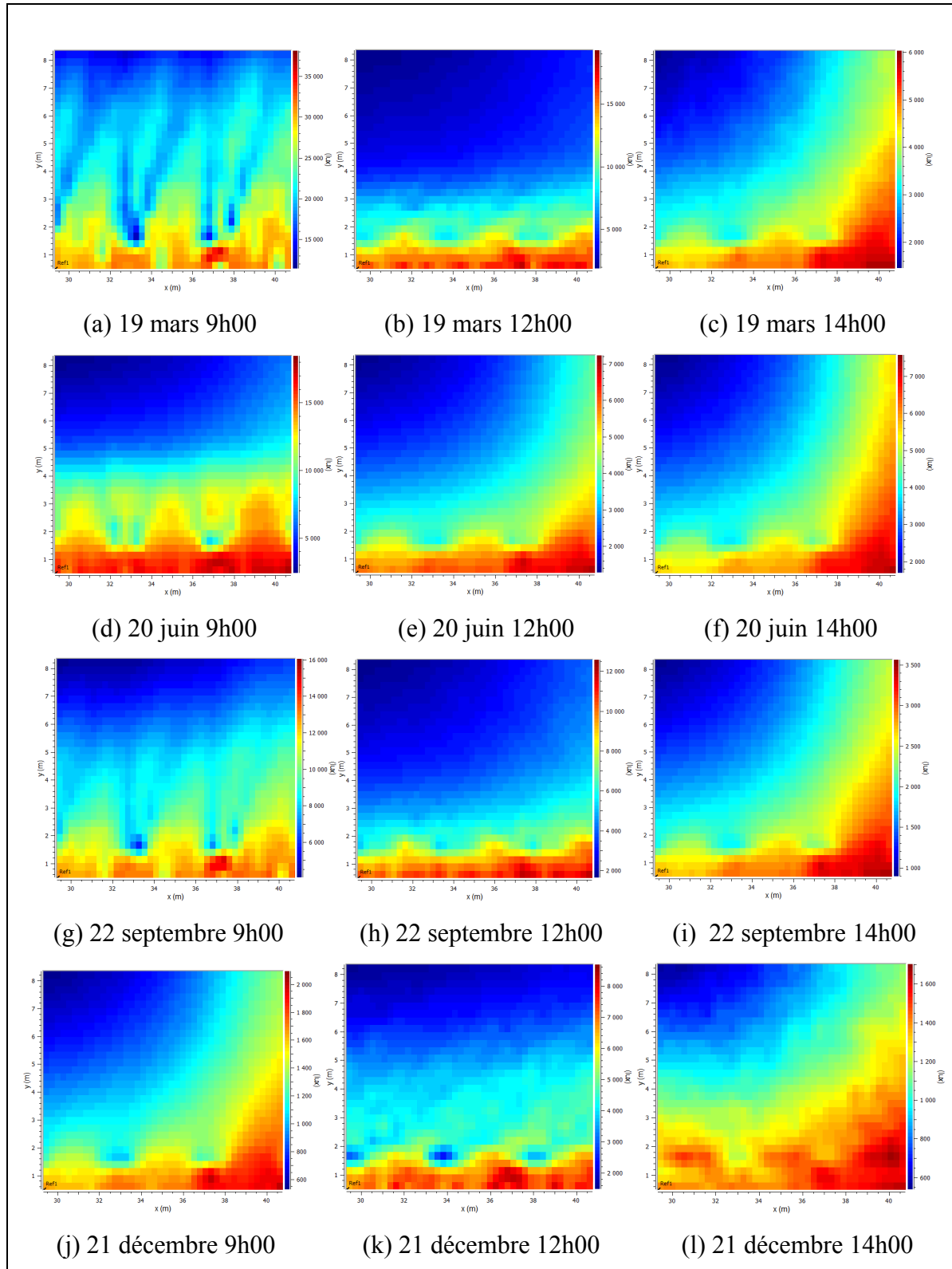


Figure 4.25 : Zones d'ensoleillement pour la section R1, Hsm1, 9h00, 12h00 et 14h00

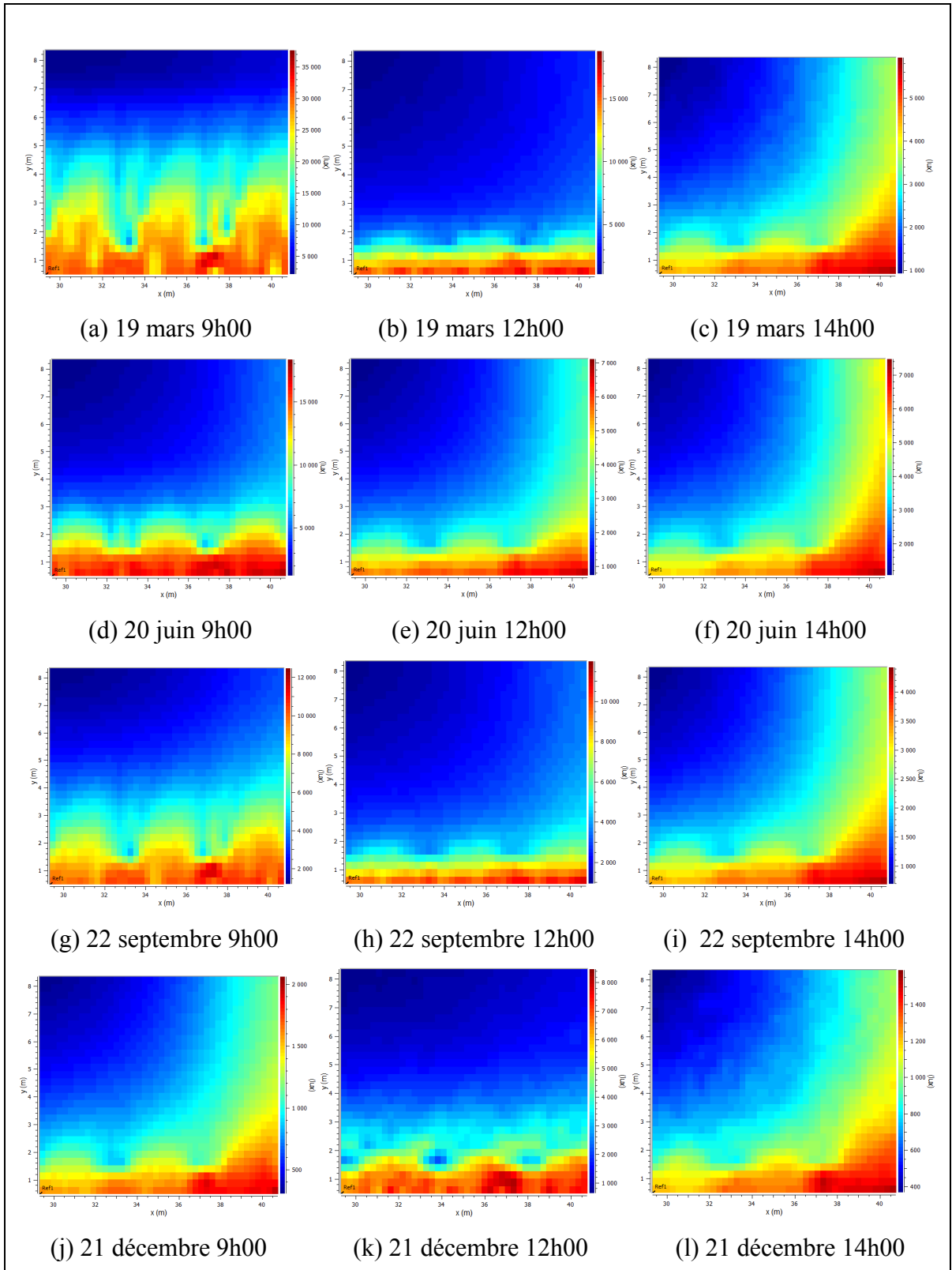


Figure 4.26 : Zones d'ensoleillement pour la section R1, Hsm2, 9h00, 12h00 et 14h00

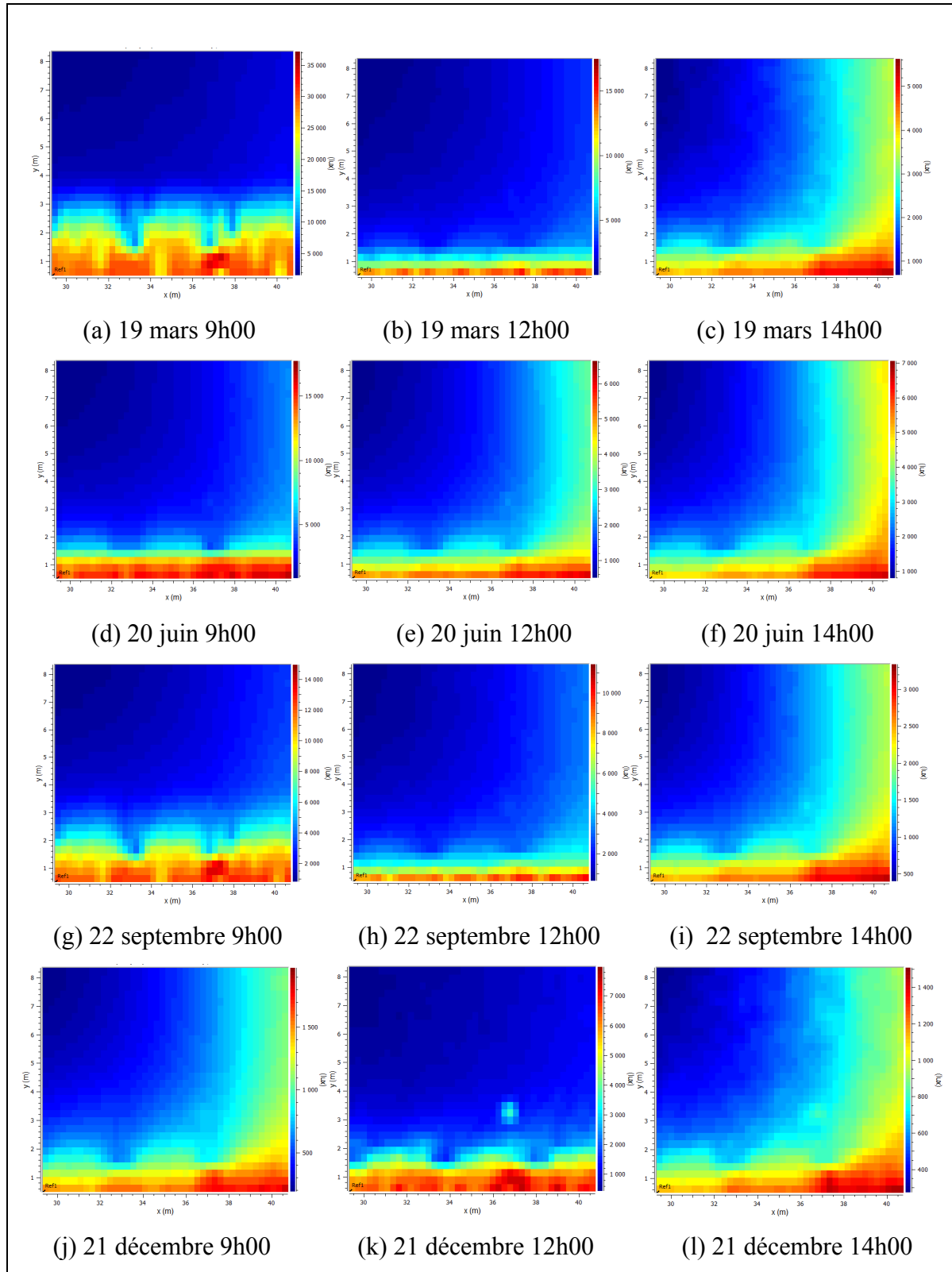


Figure 4.27 : Zones d'ensoleillement pour la section R1, Hsm3, 9h00, 12h00 et 15h00

Le Tableau 4.10 présente un résumé des profondeurs estimées pour lesquelles le niveau de luminosité est supérieur à 3000 lux dans chacun des plans de luminosité des figures 4.25 à 4.27.

Tableau 4.10 : Profondeur estimée (m) pour les valeurs supérieures à 3000 lux pour Hsm1, Hsm2 et Hsm3

Hsm1			
	Heure		
Date	9h00	12h00	14h00
19 mars	8.4	7.5	4.5
20 juin	8.4	4.2	7
22 septembre	8.4	6	1
21 décembre	1	6	1
Hsm2			
	Heure		
Date	9h00	12h00	14h00
19 mars	8.4	4	2.5
20 juin	5.5	2.5	3.5
22 septembre	6.2	3.5	1
21 décembre	0	3.5	0
Hsm3			
	Heure		
Date	9h00	12h00	14h00
19 mars	2	2.5	3
20 juin	3	4	3
22 septembre	3.8	2	0
21 décembre	0	1.8	0

4.3.2 Sélection de la zone

L'analyse qualitative effectuée à la section 4.3.1 a permis d'évaluer les profondeurs auxquelles le niveau de luminosité est supérieur à 3000 lux dépendamment de l'heure de la journée et de la période de l'année. Deux mesures sont utilisées soit l'éclairage utile de la lumière du jour (UDI) et l'autonomie spatiale de la lumière du jour (sDA) afin d'évaluer huit configurations de la zone (Figure 4.28). Les résultats de l'UDI et de l'sDA permettent de sélectionner la zone

d'application retenue, parmi les huit évaluées, afin d'appliquer la séquence de contrôle. La zone d'application déterminera l'endroit où l'utilisation des stores limitera le niveau de luminosité à 3000 lux. Le Tableau 4.11 présente les dimensions de chacune des zones. Ainsi, il est possible de comparer les valeurs de l'UDI et de l'sDA pour chaque zone et pour chaque position des stores. Comme discuté au chapitre 3, le rayonnement direct près des fenêtres ne peut pas être bloqué avec l'utilisation des stores. Cette section de la zone doit être évitée. En diminuant la profondeur et la largeur de la zone, les zones critiques près du mur-rideau sont exclues de la zone à l'étude. Toutefois, il faut utiliser un maximum de l'espace dans la zone puisque celle-ci est utilisée par les occupants. Une zone trop restrictive limite l'occupation de la zone.

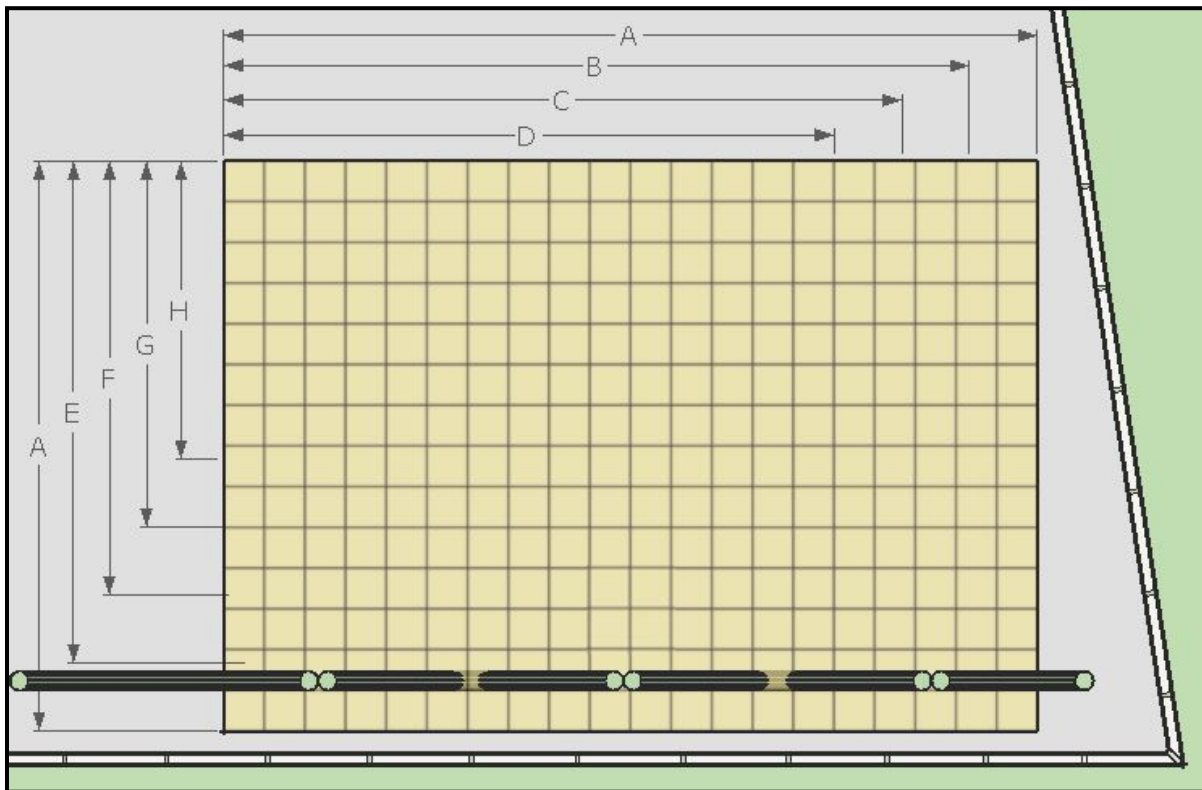


Figure 4.28: Représentation des zones sélectionnées AA, AB, AC, AD, EA, FA, GA et HA.

Tableau 4.11 : Dimension des zones à l'étude pour le calcul de l'UDI

Zone	Longueur (y) par rapport à la façade sud-est (m)	Largeur (x) par rapport à la façade est (m)
AA	8.4	12
AB	8.4	11
AC	8.4	10
AD	8.4	9
EA	7.4	12
FA	6.4	12
GA	5.4	12
HA	4.4	12

Tel que décrit à la section 1.4, l'UDI (Nabil & Mardaljevic, 2005) et l'sDA (IESNA, 2012) sont des mesures qui permettent d'évaluer le niveau de confort visuel. L'UDI permet d'évaluer la proportion de la zone, en pourcentage, pour laquelle le niveau de luminosité se situe entre 100 lux et 3000 lux au moins 50 % du temps. Il n'y a pas de valeur cible à atteindre pour l'UDI. Toutefois, la valeur la plus élevée sera priorisée. L'sDA permet d'évaluer la proportion de la zone, en pourcentage, pour laquelle le niveau de luminosité est supérieur à 300 lux au moins 50 % du temps. Le seuil préférable doit être une valeur de l'sDA supérieure à 75 % et le seuil nominal acceptable doit être une valeur de l'sDA supérieure à 55 %.

Les résultats de l'UDI et de l'sDA sont présentés au Tableau 4.12. La diminution de la largeur de la zone (AA à AD) permet d'augmenter la valeur de l'UDI d'au plus 3 % pour Hsm1, d'au plus 3 % pour Hsm2 et d'au plus 4 % pour Hsm3. La diminution de la profondeur de la zone (AA à HA) permet d'augmenter la valeur de l'UDI d'au plus 5 % pour Hsm1, d'au plus 7 % pour Hsm2 et d'au plus 7 % pour Hsm3. La position Hsm2 permet d'obtenir une valeur de l'UDI d'au plus 9 % plus élevée qu'avec la position Hsm1. Donc, la position Hsm2 améliore peu le confort des occupants. La position Hsm3 permet d'obtenir une valeur de l'UDI d'au plus 15 % plus élevée qu'avec la position Hsm1. Donc, avec la position Hsm3, il est possible d'avoir des valeurs de l'UDI supérieures à 40 % pour l'ensemble des zones.

La diminution de la largeur de la zone permet de diminuer la valeur de l'sDA d'au plus 1 % pour Hsm1, d'au plus 1 % pour Hsm2 et d'au plus 2 % pour Hsm3. Pour la position Hsm1, le seuil préférable de 75 % est atteint pour l'ensemble des zones. Pour la position Hsm2, le seuil préférable n'est pas atteint pour les zones GA et HA. Pour Hsm3, le seuil préférable n'est pas respecté pour l'ensemble des zones, mais le seuil nominal acceptable de 55 % est toutefois respecté (Illuminating Engineering Society, 2016). Dans l'ensemble, les valeurs de l'sDA présentent de faibles variations.

Tableau 4.12 : Valeurs de l'UDI (%) et de l'sDA (%) pour chaque zone

	Hsm1		Hsm2		Hsm3	
Zone	UDI (%)	sDA (%)	UDI (%)	sDA (%)	UDI (%)	sDA (%)
AA	27	77	34	75	40	73
AB	28	77	35	75	42	73
AC	29	77	37	75	43	72
AD	30	77	37	75	44	72
EA	29	77	37	75	43	73
FA	30	77	38	75	45	72
GA	31	77	40	74	46	71
HA	32	76	41	74	47	71

Le choix de la zone d'application prend en compte les résultats obtenus de manière qualitative à la section 4.3.1. Donc, la zone GA est sélectionnée comme zone d'application puisqu'elle ne restreint la zone que de 3 m, soit la limite où le niveau de luminosité dépasse 3000 lux avec la position Hsm3 (voir Tableau 4.10).

4.4 Proposition d'une séquence de contrôle

Cette section présente une comparaison des valeurs horaires du rayonnement solaire acceptable pour la zone initiale AA et la zone d'application GA selon les positions des stores, l'heure de la journée, et le mois de l'année. Les valeurs horaires du rayonnement solaire acceptable varient selon la position du store étant donné que cela a un impact sur l'apport en rayonnement direct et diffus dans la pièce. Par la suite, les valeurs horaires du rayonnement solaire acceptable pour la zone GA sont intégrées dans la séquence de contrôle proposée.

Le capteur de la zone AA est situé à une distance de 1.5 m de la fenêtre et le capteur de la zone GA est situé à une distance de 4.5 m de la fenêtre. Cela permet de mesurer le niveau de luminosité à la limite de chacune des zones.

4.4.1 Évaluation du rayonnement solaire acceptable selon la période de la journée

Les valeurs du Tableau 4.13 représentent les valeurs horaires du rayonnement solaire acceptable auxquelles le niveau de luminosité dans la pièce atteint 3000 lux. Pour obtenir les valeurs à insérer dans ce tableau, les valeurs du rayonnement solaire provenant du fichier météo (P2) sont comparées au niveau de luminosité obtenu par le capteur lors des simulations. Les valeurs en gras présentent les valeurs du rayonnement solaire qui sont supérieures par rapport aux valeurs de la position de store précédente. Lorsque les valeurs ne sont pas indiquées, c'est que le niveau de luminosité mesuré est inférieur à 3000 lux. Ces valeurs pourront être utilisées dans la séquence de contrôle proposée.

Pour la zone AA, les résultats démontrent pour la position Hsm1 que le niveau de 3000 lux est dépassé pour la majorité de l'année pour toutes les heures de la journée (Tableau 4.13). C'est seulement en novembre et en décembre entre 13h00 et 14h00 ainsi qu'en janvier à 14h00 que le niveau de luminosité de 3000 lux n'est pas dépassé. Dans le cas de la position Hsm2, les moments où le niveau de luminosité est inférieur à 3000 lux sont similaires à ceux de la position Hsm1. Dans le cas de la position Hsm3, il y a plus de moments où le niveau de luminosité est inférieur à 3000 lux entre septembre et mars entre 12h00 et 14h00. De plus, le niveau de rayonnement solaire acceptable a augmenté pour presque chaque mois entre 11h00 et 14h00. Donc, la position Hsm3 permet à la fois de réduire la fréquence à laquelle le niveau de luminosité dépasse de 3000 lux pour certains moments de l'année et permet aussi d'avoir un niveau de rayonnement acceptable plus élevé avant de dépasser un niveau de luminosité de 3000 lux.

Tableau 4.13 : Rayonnement solaire acceptable (x_n) (W/m²), Zone AA

Hsm1 (n=1)												
Heure	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
08:00	3	12	22	94	94	110	94	88	53	53	22	6
09:00	41	53	59	176	66	126	97	88	107	75	53	47
10:00	63	126	135	129	236	113	75	205	154	129	100	78
11:00	97	220	176	186	85	160	135	227	296	119	167	75
12:00	223	135	230	268	230	100	160	227	321	182	227	154
13:00	482	230	318	82	189	145	72	283	305	384	-	-
14:00	-	416	384	324	72	227	205	343	264	397	-	-
Hsm2 (n=2)												
Heure	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
08:00	3	12	22	94	94	110	148	88	53	53	22	6
09:00	41	53	116	176	66	126	97	167	107	75	53	56
10:00	63	126	135	129	236	113	75	205	154	129	100	78
11:00	97	220	176	186	242	299	258	227	296	119	167	75
12:00	239	211	230	268	246	100	160	227	321	290	233	264
13:00	-	230	318	82	280	145	72	482	305	416	-	-
14:00	-	520	555	372	72	536	473	391	264	-	-	-
Hsm3 (n=3)												
Heure	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
08:00	3	12	22	94	129	110	148	88	53	53	25	6
09:00	56	53	116	182	264	138	223	176	107	75	82	56
10:00	72	126	135	129	258	113	239	239	154	129	100	104
11:00	123	220	271	287	419	369	287	372	296	201	214	151
12:00	239	283	230	378	425	413	369	227	447	586	-	-
13:00	-	-	753	694	536	422	104	586	-	-	-	-
14:00	-	-	-	826	593	690	511	753	-	-	-	-

Pour la zone GA, les résultats soulignés démontrent pour la position Hsm1 que les valeurs horaires du rayonnement solaire acceptable par rapport à la zone AA ont augmenté (Tableau 4.14). À 8h00, le niveau de rayonnement acceptable est similaire à celui de la zone AA. Entre 8h00 et 14h00, le niveau de rayonnement acceptable présente des augmentations entre 3 W/m² et 439 W/m². Pour la position Hsm2, le rayonnement solaire acceptable présente des augmentations entre 3 W/m² et 666 W/m² entre 8h00 et 12h00. De plus, le niveau de luminosité est inférieur à 3000 lux entre 12h et 14h pour la majorité de l'année. Pour la position Hsm3, les résultats sont davantage concluants. Entre 8h00 et 10h00, le niveau de rayonnement acceptable présente des augmentations entre 6 W/m² et 429 W/m². Il y a tout de même des risques d'inconfort puisque le niveau de luminosité dépasse 3000 lux durant l'année entre 8h00 et 10h00. L'amélioration la plus importante se situe entre 11h00 et 14h00 où un niveau de luminosité supérieur à 3000 lux n'est pas atteint.

Donc, grâce à l'évaluation du rayonnement solaire des zones AA et GA pour les positions Hsm1, Hsm2 et Hsm3, il a été démontré que l'utilisation de la zone GA permet d'augmenter le niveau de rayonnement solaire acceptable dans la zone d'application tout en offrant un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux.

Tableau 4.14 : Rayonnement solaire acceptable (x_n) maximum (W/m^2), Zone GA

[illegible]

4.4.2 Intégration du niveau de rayonnement solaire acceptable à la séquence de contrôle

Le schéma présenté à la Figure 4.29 pour développer la séquence de contrôle est adapté à partir du schéma proposé par Olbina et Hu (2012). Tout d'abord, la pièce est modélisée. La localisation géographique et l'orientation du bâtiment sont ajoutées au modèle 3D. Ensuite, la zone d'application est sélectionnée à l'aide des mesures de l'UDI et de l'sDA tel que présenté à la section 4.3.2.

Par la suite, le niveau de rayonnement solaire mesuré (I) sur le site est comparé au niveau de rayonnement solaire acceptable (x_n) pour la zone d'application GA provenant du Tableau 4.14. Le rayonnement solaire acceptable (x_n) est la limite à laquelle le niveau de luminosité de la zone d'application est égal ou dépasse 3000 lux. Les valeurs mesurées du rayonnement solaire proviennent du pyranomètre (P1) installé sur le pavillon A à une fréquence f de 15 minutes. Toutefois, la fréquence f utilisée dans la séquence de contrôle est de 30 minutes (Littlefair, 2001). Ainsi, le niveau de rayonnement solaire mesuré est comparé au rayonnement solaire acceptable deux fois à l'heure.

Si le rayonnement solaire mesuré (I) est inférieur au niveau de rayonnement solaire acceptable (x_n) pour la position n , le store reste à la position n . Après 30 minutes, le rayonnement solaire mesuré est réévalué ($n=1$).

Si le rayonnement solaire mesuré (I) est supérieur au niveau de rayonnement solaire acceptable (x_n) pour la position n , n est comparé à n_{max} . Si n est inférieur à n_{max} , alors $n = n+1$. Ainsi, le rayonnement solaire mesuré (I) est comparé au niveau de rayonnement solaire acceptable (x_n) pour $n+1$. Après 30 minutes, le rayonnement solaire mesuré est réévalué ($n=1$).

Si n est égal à n_{max} , alors l'utilisation du store ne permet pas de bloquer le rayonnement direct afin d'avoir un niveau de luminosité inférieur à 3000 lux. Après 30 minutes, le rayonnement solaire mesuré est réévalué ($n=1$).

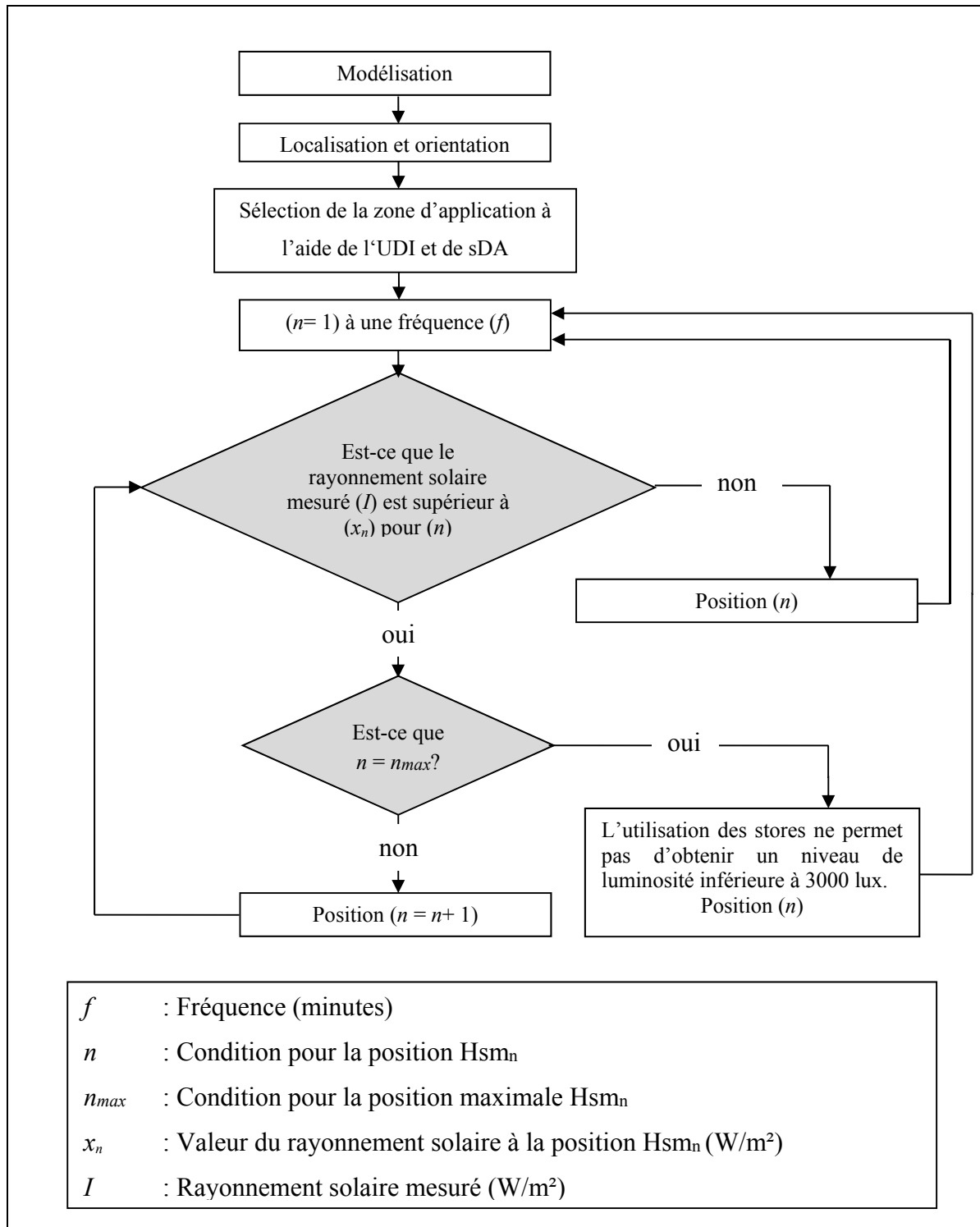


Figure 4.29 : Schéma pour la séquence de contrôle des stores motorisés adapté du schéma de Olbina et Hu (2012).

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Le but de l'étude est de proposer une séquence de contrôle pour des stores motorisés à l'aide de simulations de l'éclairage naturel. Pour y arriver, l'atrium a été modélisé et le modèle 3D a été calibré à l'aide de données mesurées pour la section R1 des stores dans l'atrium. Ce chapitre présente une discussion des résultats du chapitre 4.

Les résultats expérimentaux (section 4.1) ont démontré que l'utilisation des stores motorisés permet de réduire l'apport en rayonnement solaire afin de limiter le niveau de luminosité à 3000 lux dans la zone d'application GA. Dubois et Flodberg (2013) ont déterminé que le ratio de fenêtre optimal se situe entre 20 % et 40 %. Dans le cas de l'atrium, lorsque la position Hsm3 est utilisée, la superficie de fenêtre représente environ 38 %, soit le ratio suggéré. Ainsi, malgré l'aspect esthétique du mur-rideau, l'apport en rayonnement solaire crée un environnement inconfortable. Une question se pose à savoir si la quantité de fenestrations dans l'atrium est vraiment nécessaire pour offrir un éclairage naturel adéquat aux occupants. Cela serait alors un paramètre à tenir en compte pour la conception de futurs bâtiments à proximité de la Maison des étudiants de l'ÉTS.

Quelques limites ont été rencontrées lors de la modélisation de l'atrium et de l'environnement extérieur. Tout d'abord, le plafond de bois de l'atrium possède une forme architecturale inclinée. Cette inclinaison n'a pas été modélisée. Étant donnée la hauteur de 7.15 m de l'atrium, il a été supposé que cet aspect n'ait pas d'influence sur la réflexion de la lumière naturelle sur le plafond, hypothèse qui serait à vérifier. Ensuite, le site extérieur est modélisé jusqu'à une distance de 30 m. Toutefois, il y a des tours d'habitation de plusieurs étages à plus de 30 m de distance. Donc, lors des mesures expérimentales, le soleil était partiellement ou totalement caché par ces tours d'habitation en début de journée, ce qui limitait l'apport en rayonnement direct dans l'atrium. Cet aspect n'a pas été pris en compte dans l'environnement extérieur du modèle 3D.

Le moteur de simulation de Radiance utilise une approche hybride entre la méthode Monte-Carlo et le traçage des rayons (Hensen & Lamberts, 2011), ce qui fait varier les données simulées (voir section 4.2.2). Un écart de 6.88 % a été constaté entre les simulations, ce qui représente une proportion de 21.5 % de l'erreur acceptable de 32 % qui est attribuable à la méthode de calcul utilisée.

Les données du rayonnement solaire mesuré sur le site par le pyranomètre (P1) ont été comparées au rayonnement solaire provenant du fichier météo (P2). Les écarts obtenus sont dus aux conditions météorologiques particulières; dans le cas d'une journée nuageuse avec de la neige, les données présentent des écarts jusqu'à 477 % vers 9h00. Toutefois, les valeurs du fichier ont été utilisées pour l'analyse puisqu'elle présente des avantages. Tout d'abord, les données sont disponibles pour une année complète (365 jours). Ensuite, les valeurs de la radiation directe normale et de la radiation diffuse horizontale sont obtenues à l'aide du module Weather Converter d'EnergyPlus et sont directement incluses dans le fichier météo. Toutefois, l'utilisation des données du fichier météo peut avoir comme impact de surévaluer ou sous-évaluer le niveau de luminosité simulé. Aussi, les écarts entre les valeurs de P1 et de P2 n'ont pas seulement un impact sur le niveau de rayonnement direct, mais aussi sur le rayonnement dans l'environnement extérieur (Arnal et al., 2011). Gilani et O'Brien (2016) ont conclu que le calcul des valeurs de la radiation solaire directe normale et diffuse ne permettait pas d'améliorer la précision des valeurs simulées. Donc, il ne serait pas plus avantageux de modifier les valeurs du rayonnement solaire dans le fichier météo pour la calibration du modèle.

La calibration du modèle a été faite à l'aide d'une analyse de sensibilité réalisée pour le coefficient TLV du vitrage, le coefficient Cr du sol extérieur et le coefficient TLV du store. L'étude de sensibilité effectuée consistait à faire varier chaque paramètre un par un, soit la méthode *One-At-a-Time* (OAT) (Pianosi et al., 2016). Dans le cas où plusieurs paramètres présenteraient des variations importantes, une analyse de sensibilité multicritère serait suggérée afin d'accroître la précision du modèle 3D.

L'analyse de sensibilité a permis déterminer les paramètres sensibles et non sensibles dans le contexte de l'étude. Le coefficient de transmission visible (TLV) du vitrage est considéré comme un paramètre sensible. Effectivement, pour C1s, C2s et C3s à la position Hsm1, les écarts maximum (lux) (minimum (lux)) obtenus entre les coefficients TLV du vitrage de 0.27 et de 0.77 sont de 25 025 lux (4349 lux), 19 710 lux (3352 lux) et 16 853 lux (2712 lux), respectivement (voir section 4.2.3.1). Dans leur étude, Gilani et O'Brien (2016) ont aussi constaté que la variation du coefficient de transmission du vitrage a un impact significatif. Donc, il est important d'attribuer le coefficient TLV du vitrage selon les spécifications du composant.

Le coefficient de réflexion (Cr) du sol extérieur n'est pas considéré un paramètre sensible dans le contexte de l'étude. Effectivement, la zone d'application GA pour la section R1 se situe au deuxième étage. Donc, les rayons réfléchis sur le sol extérieur n'ont pas d'impact. Toutefois, il serait intéressant de faire une analyse de sensibilité sur ce paramètre pour un bâtiment situé au rez-de-chaussée ou avec des surfaces de planchers extérieurs au même niveau que le plancher de la zone à l'étude.

Le coefficient de transmission visible (TLV) du store n'est pas considéré un paramètre sensible dans le contexte de l'étude. Effectivement, les résultats ont démontré une faible variation des données suite à la variation du coefficient. Les données simulées ont tout de même démontré que les résultats collaient aux données mesurées pour la position Hsm3. Donc, l'ajout de stores dans le modèle 3D pour bloquer les rayons directs a un impact lors des simulations. Il est donc important de modéliser les éléments créant de l'ombrage afin d'avoir un modèle 3D le plus représentatif possible de la pièce à l'étude.

Le modèle calibré a permis d'obtenir pour les positions Hsm1 et Hsm3 des valeurs d'EQM inférieures à 11 169 lux dans la majorité des cas, limite établie par Gilani et O'Brien (2016). Par contre, avec la position Hsm2, les résultats ont démontré une faible similarité; la majorité des valeurs présentent des valeurs d'EQM supérieures à 11 169 lux. Donc, le fait de bloquer une partie de l'apport en rayonnement solaire réduit la capacité du logiciel à simuler les

niveaux d'éclairage naturel tels que les niveaux mesurés. Pour que le modèle soit considéré comme « valable », les valeurs de l'EQM relative doivent être inférieures à 32 %, ce qui a été vérifié (Reinhart & Breton, 2009). Seulement une valeur présentait une EQM relative supérieure à 32 %. Une autre source d'erreur possible est la qualité des données mesurées par les capteurs C1m, C2m et C3m. À plusieurs moments de la journée, il s'avérait que le rayonnement direct sur les capteurs était obstrué par les colonnes, les meneaux et les stores. Malgré un contrôle de l'environnement lors de la prise de données, ces variations n'ont pu être évitées. Cela confirme les constatations effectuées par Park et Athienitis (2003), Arnal et al. (2011) et Doulos et al. (2014) sur l'obstruction du rayonnement solaire sur les capteurs lors des collectes de données. Aussi, les conditions nuageuses pouvaient créer une variation sur le rayonnement solaire mesuré sur une courte période. Toutefois, cette variation ne peut pas être contrôlée lors des collectes de données.

Suite à la calibration du modèle, la combinaison des mesures de l'UDI et de l'sDA a permis d'évaluer différentes configurations de la zone à l'étude afin de choisir la zone d'application pour la séquence de contrôle. L'analyse des résultats provenant des deux mesures a permis de répondre à la question soulevée par Mardaljevic et al. (2009) à savoir s'il est adéquat de considérer qu'une seule mesure pour décrire adéquatement l'éclairage naturel. L'analyse a démontré que les valeurs de l'UDI ont présenté davantage de variation que les valeurs de l'sDA. Donc, c'est la mesure de l'UDI qui a été davantage un facteur décisionnel que la mesure de l'sDA pour le choix de la zone d'application pour la séquence de contrôle. Dans le contexte de l'étude, il a été plus adéquat d'utiliser les deux mesures afin de choisir la zone d'application.

Dans la majorité des cas, le niveau de rayonnement solaire de 450 W/m^2 utilisé dans la séquence initiale afin de fermer les stores occasionne un dépassement de 3000 lux dans la zone GA. Donc, la séquence de contrôle initiale n'était pas adaptée aux conditions de la pièce. Les valeurs de rayonnement solaire acceptable pour la séquence de contrôle proposée ont été établies à partir des valeurs du rayonnement solaire du fichier météo et ont été déterminées pour le moment où le niveau de luminosité dans la pièce atteint 3000 lux (Tableau 4.14).

Dans le cas des nouvelles valeurs du rayonnement solaire utilisées dans la séquence de contrôle, les positions Hsm2 et Hsm3 sont utilisées bien avant que le rayonnement solaire atteigne 450 W/m^2 .

La méthodologie utilisée pour déterminer les valeurs du rayonnement acceptable a permis de vérifier la preuve de concept sur l'application de la séquence de contrôle proposée. Deux améliorations peuvent être suggérées. Premièrement, le pyranomètre P1 peut être utilisé comme point de mesure pour la vérification du rayonnement solaire. Effectivement, l'utilisation des données du fichier météo a permis d'établir une base de valeurs complète à intégrer dans le Tableau 4.14. Étant donné que P1 est installé de façon permanente, ses valeurs peuvent être reprises afin de redéfinir les valeurs horaires du rayonnement solaire acceptable si les niveaux de luminosité sont inférieurs ou supérieurs par rapport aux valeurs proposées dans cette étude. Toutefois, ceci nécessiterait l'installation d'un capteur photométrique temporaire ou permanent afin de valider les niveaux de luminosité dans la pièce. Deuxièmement, les valeurs du rayonnement solaire ont été séparées en 12 catégories, soit une pour chacun des mois. Il est établi que les valeurs acceptables ne changent pas de manière drastique lorsqu'on passe d'un mois à un autre. C'est pourquoi il pourrait être utile de séparer les valeurs acceptables du rayonnement solaire selon des portions de la latitude du soleil. Ainsi, ces valeurs seraient plus adaptées à la séquence de contrôle.

Une des limites de l'application de la séquence de contrôle du projet est que les stores descendent à une hauteur minimale de 2.72 m du sol. Donc, il n'est pas possible d'utiliser les stores afin de bloquer le rayonnement direct avant 10h00. Toutefois, une hauteur limitée à 2.72 m du sol offre une vue extérieure et garde l'intégrité architecturale du bâtiment. La position Hsm2 a été utilisée pour vérifier l'influence d'une hauteur intermédiaire pour le développement de la séquence de contrôle. Au final, l'utilisation des stores motorisés pour la section R1 dans la zone d'application est limitée à deux positions, soit de monter (Hsm1) ou de descendre (Hsm3) les stores.

Dans le cas de l'atrium, l'utilisation d'un autre type de dispositif d'ombrage tel que le store vénitien, le store conventionnel opaque ou le pare-soleil ne serait pas plus efficace. L'objectif de conserver une vue dégagée du mur-rideau était à la fois de garder l'aspect architectural de l'atrium et d'offrir une vue à l'extérieur. Il ne serait donc pas logique d'installer des stores vénitiens sur cette façade. Étant donné la hauteur de 7.15 m de l'atrium, l'utilisation de pare-soleil serait inutile, puisqu'il faudrait installer soit un pare-soleil à 7.15 m, donc avec une très longue portée afin de bloquer les rayons solaires au niveau du plan de travail. L'utilisation du store conventionnel opaque limiterait l'apport en rayons diffus ce qui risquerait de diminuer le niveau d'éclairage naturel ambiant et pourrait aussi créer des contrastes élevés entre le niveau de luminosité intérieur et extérieur. Bref, les stores actuellement utilisés sont des dispositifs adéquats, mais il a été démontré que leur intégration dans le bâtiment n'était pas bien adaptée à l'atrium.

CONCLUSION

L'étude avait pour but de répondre à la question suivante: est-ce qu'une séquence de contrôle des stores motorisés adaptée au site permet d'améliorer le confort visuel des occupants? Pour y arriver, deux objectifs étaient visés, soit:

1. Modéliser l'atrium et calibrer le modèle 3D pour simuler l'éclairage naturel;
2. Développer une séquence de contrôle de stores motorisés adaptée à l'atrium à l'aide du modèle calibré.

Tout d'abord, le modèle 3D a été calibré à l'aide des logiciels OpenStudio et Radiance dans le but de comparer les données simulées aux données mesurées. Les valeurs obtenues pour l'EQM (lux) (EQM relative (%)) se situent entre 432 lux (15 %) et 12 835 lux (17 %) pour la position Hsm1, entre 761 lux (10 %) et 20 033 lux (16 %) pour la position Hsm2 et entre 405 lux (15 %) et 17 780 lux (23 %) pour la position Hsm3 pour la section R1 des stores. Le modèle 3D développé est considéré comme « valable » puisque les valeurs de l'EQM relative obtenues sont inférieures à 32 %, excepté une valeur (Reinhart & Breton, 2009).

Ensuite, les plans de luminosité pour la section R1 des stores ont permis de déterminer les profondeurs auxquelles le niveau de luminosité était supérieur à 3000 lux. Puis, différentes configurations de la zone ont été analysées grâce à l'utilisation des mesures l'UDI et de l'sDA. La zone d'application retenue pour l'application de la séquence de contrôle est la zone GA. Celle-ci mesure 12 m de largeur par 5.4 m de profondeur et est située à une distance de 3.5 m du mur-rideau. Elle présente des valeurs de l'UDI (%) (sDA (%)) pour Hsm1, Hsm2 et Hsm3 de 31 % (77 %), 40 % (74 %) et 46 % (71 %), respectivement. Les simulations ont démontré des écarts significatifs entre les données simulées et mesurées avec l'utilisation des stores à la position Hsm2. De plus, les analyses ont démontré que la position Hsm2 n'avait pas d'impact considérable afin de réduire les risques d'inconfort visuel pour la section R1 des stores. Tel que présenté à la section 3.1, le système de contrôle actuel des stores permet seulement de monter (Hsm1) ou de descendre (Hsm3) les stores. Donc, seules les positions Hsm1 et Hsm3 sont utilisées pour la séquence de contrôle.

La sélection de la zone d'application GA et les valeurs horaires du rayonnement solaire acceptable ont été déterminées pour chaque mois, entre 8h00 et 14h00, au moment où le niveau de luminosité simulé dans la pièce dépasse 3000 lux. Ainsi, il a été possible de proposer une séquence de contrôle adaptée à l'atrium. Le but est de limiter le niveau de luminosité à 3000 lux afin d'améliorer le confort visuel des occupants.

La méthodologie utilisée dans cette étude peut être adaptée en fonction des dimensions de la pièce et des ouvertures de la fenestration. Elle a été développée selon les normes et les critères en vigueur (Rea, 2000; ASHRAE, 2002; Park & Athienitis, 2003; IESNA, 2012; Illuminating Engineering Society, 2016; N.E.R.L., 2017). De plus, la méthodologie appliquée permet de faire des simulations de l'éclairage naturel à la phase préliminaire du projet pour évaluer l'impact sur les dimensions et la volumétrie du bâtiment ainsi que pour le choix subjectif des matériaux.

La séquence de contrôle proposée a été développée de manière à ce qu'elle puisse être utilisée dans différents projets. Ainsi, la fréquence de contrôle peut être déterminée selon la disponibilité des données provenant du pyranomètre. Cette fréquence a été déterminée afin de réduire la fluctuation de la lumière naturelle due à un ciel nuageux (Kim & Kim, 2007). Ensuite, les valeurs du rayonnement acceptable, déterminées pour un projet spécifique, peuvent être intégrées à la séquence de contrôle. Le nombre de conditions dans la séquence de contrôle peut être déterminé selon le nombre désiré.

Bref, la démarche utilisée pour modéliser la pièce et pour développer la séquence de contrôle pourra être utilisée pour l'analyse d'autres pièces qui possèdent des conditions climatiques et des niveaux d'ensoleillement différents.

RECOMMANDATIONS

Le fichier météo utilisé doit provenir de l'endroit le plus près du site à l'étude. Ainsi, la variation des données du rayonnement solaire sera limitée lorsqu'il y a des variations des conditions locales liées à un ciel partiellement nuageux, par exemple.

Les collectes de données ont été réalisées à trois moments différents de l'année. Les neuf jours de collecte ont permis d'évaluer les trois positions des stores selon différentes conditions extérieures. Davantage de journées de collecte permettraient d'évaluer la validité du modèle pour différentes conditions pour l'ensemble des positions des stores. Ainsi, il serait possible de vérifier si l'écart entre les données obtenues provient des simulations ou du modèle, par exemple.

Lors de l'analyse, les valeurs de l'erreur individuelle élevée au carré dans le calcul de l'EQM relative supérieures à 550 % ont été ignorées dans l'analyse de sensibilité pour le calcul de l'EQM et de l'EQM relative. Toutefois, cette manière de procéder n'a pas été validée lors de précédentes études. Il serait donc suggéré d'effectuer des études sur les méthodes statistiques à appliquer aux simulations de l'éclairage naturel afin d'établir les critères qui définissent les données pouvant être décrites comme aberrantes ou ignorées.

Afin d'améliorer une séquence de contrôle, l'intégration d'un capteur photométrique dans la séquence de contrôle permettrait de valider le niveau de luminosité en temps réel dans la pièce. Bien que l'ombrage créé par les objets ou les occupants puissent biaiser les données, l'utilisation d'un capteur photométrique pourrait servir de point de vérification.

Il a été démontré lors des collectes de données et lors des simulations que le niveau de luminosité en périphérie du mur-rideau peut causer un inconfort visuel dû aux éblouissements. Il est donc suggéré de modifier l'aménagement de l'espace afin d'éviter l'aménagement de ces zones à risque.

Un tableau contenant une liste de vérification adaptée des recommandations de Hensen et Lamberts (2011) est proposée (Tableau-A VI-1). Celui-ci présente les points essentiels afin de modéliser une pièce et de réaliser des simulations de l'éclairage naturel.

Il serait intéressant de jumeler la simulation de l'éclairage naturel avec un modèle énergétique détaillé incluant les systèmes CVCA. Ainsi, il serait possible d'évaluer l'impact de l'apport du rayonnement solaire sur l'utilisation des systèmes CVCA.

Les photos présentées en Annexe II démontrent clairement la présence d'inconfort visuel dans l'atrium dû au rayonnement direct. De plus, les surfaces de tables blanches et luisantes réfléchissent les rayons, ce qui peut éblouir les occupants et contribuer à leur inconfort (Hopkinson, 1972). Il serait donc intéressant d'intégrer des caméras HDR pour capter les endroits où les surfaces qui sont à risque de créer de l'éblouissement. Ainsi, il sera possible de cibler ces zones et d'adapter le type et la couleur des surfaces.

ANNEXE I

INFORMATIONS ADDITIONNELLES POUR LA COLLECTE DE DONNÉES

Tableau-A I-1 : Numéro de capteur

Numéro de capteur	Capteur
C1m	100292
C2m	100291
C3m	100290

Tableau-A I-2 : Solstice et équinoxe pour les années 2016 et 2017

Année	Équinoxe de printemps	Solstice d'été	Équinoxe d'automne	Solstice d'hiver
2016	19 mars	20 juin	22 septembre	21 décembre
2017	20 mars	20 juin	22 septembre	21 décembre

Tableau-A I-3 : Paramètres utilisés dans l'enregistreur de données

Paramètres	Valeurs	Définitions
Activation	Oui	Le fichier de configuration est associé à la collecte de données en cours
Entrants	3	Valeurs de luminosités (kLux) collectées provenant des trois capteurs
Plage de valeurs	Auto	La gamme s'ajuste automatiquement
Extrants	3	Valeurs de luminosité (kLux) enregistrées (fichier .Txt) provenant des trois capteurs
Type de collecte	Continue	La collecte de données s'effectue en continu.
Fréquence d'enregistrement	5 minutes	Fréquence de la collecte de données
Type de capteur	LI-210/R	Selon le type de capteur connecté à l'enregistreur de données

Tableau-A I-4 : Propriétés du store (SolR, 2018)

Paramètres	Valeurs
Transmission solaire	0.07
Réflexion solaire	0.71
Transmission visible	0.07
Réflexion visible	0.70
Émissivité hémisphérique thermique	Non spécifié
Épaisseur	0.4572 mm
Conductivité	Non spécifié
Distance de la fenêtre	178 mm

ANNEXE II

PHOTOS

La photo présente des problèmes d'éblouissement. Tout d'abord, l'éblouissement direct dans le store. Ensuite, l'éblouissement engendré par la réflexion des rayons sur les meneaux et sur le plancher (Figure-A II-1).

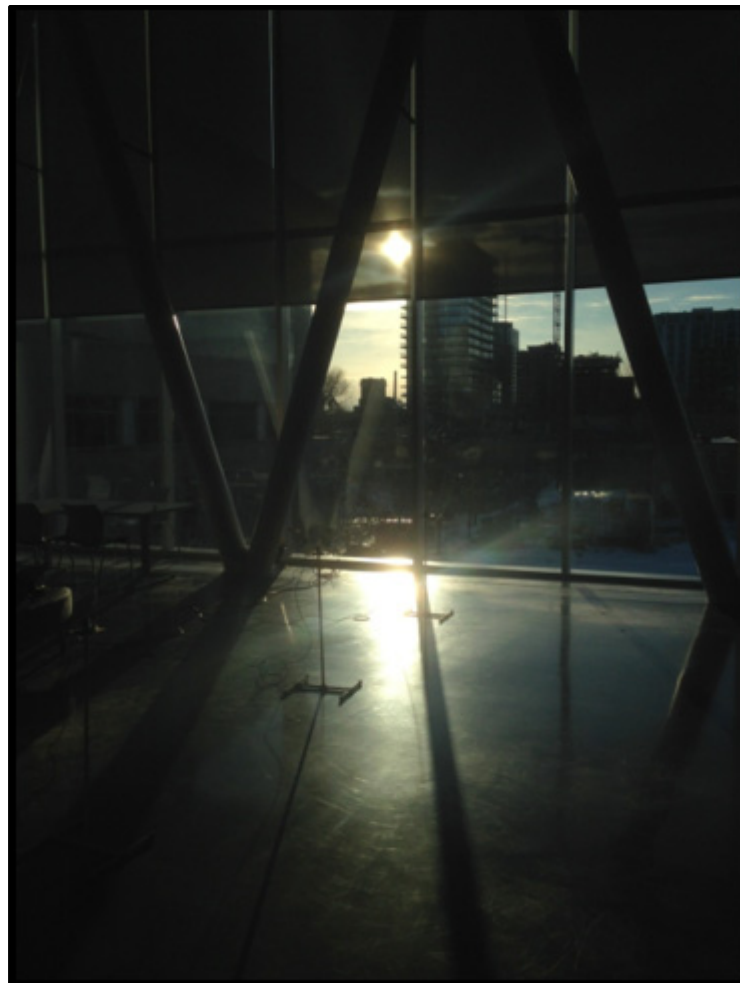


Figure-A II-1 : 15 août 2017

Cette photo présente l'éblouissement sur la surface de la table (Figure-A II-2).



Figure-A II-2 : 15 août 2017

Cette photo montre un problème d'éblouissement engendré par la vue directe sur le soleil (Figure-A II-3).

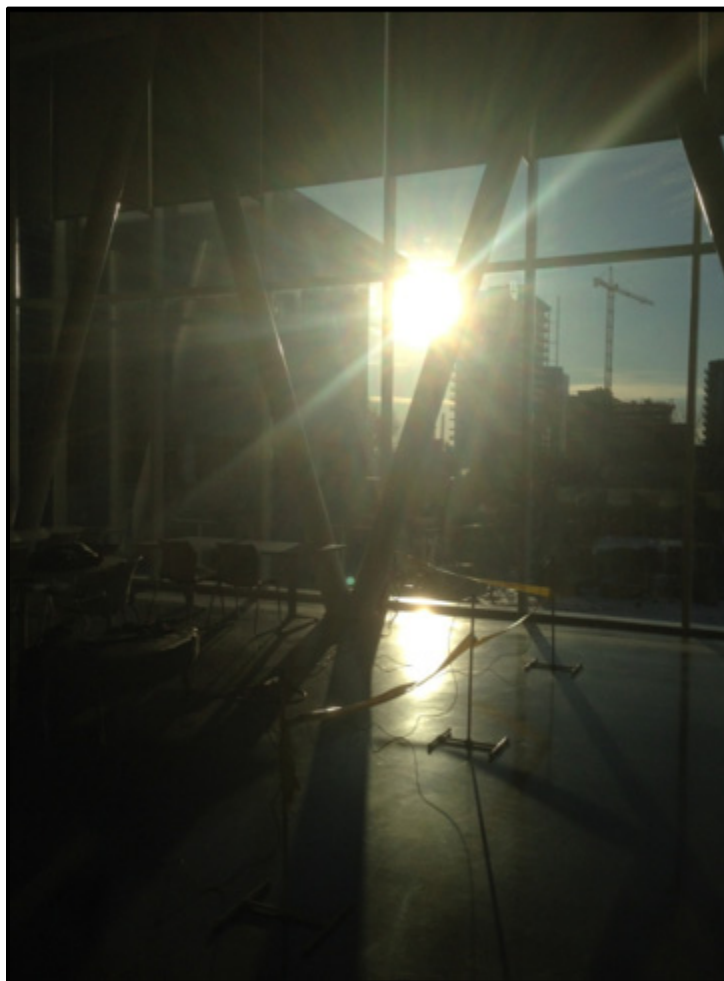


Figure-A II-3 : 15 août 2017



Figure-A II-4 : Position Hsm1



Figure-A II-5 : Position Hsm2



Figure-A II-6 : Position Hsm3

ANNEXE III

CAHIER DE NOTES

Tableau-A III-1 : Notes, 14 octobre 2016

Date	14 octobre 2016
Condition	Hsm1
Conditions extérieures	Ciel dégagé / ensoleillé
Température	2 °C
Humidité	54 %
Éclairage électrique	Stores
Relais 3-1 : Opérateur override : OFF	ABC_Up : Opérateur override : ON
Relais 3-2 : Opérateur override : OFF	DEFG_Up : Opérateur override : ON
Relais 3-3 : Opérateur override : OFF	HIJK_Up : Opérateur override : ON
Heure	Notes
7h45	Début de collecte
9h28	Ombrage créé par un meneau vertical sur C2m
9h50	Ombrage créé par une colonne sur C3m
10h07	Ombrage créé par un meneau vertical sur C1m
10h41	Ombrage créé par une colonne sur C2m
11h00 - 11h20	Ombrage créé par une colonne sur C3m
11h25	Présence de nuages dans le ciel
12h14	Le rayonnement direct est caché par le plafond sur C3m
12h50	Le rayonnement direct est caché par le plafond sur C2m
13h00	Ombrage créé par une colonne sur C1m
13h23	Rayonnement direct sur C1m
14h12	Fin de la collecte

Tableau-A III-2 : Notes, 15 octobre 2016

Date	15 octobre 2016
Condition	Hsm3
Conditions extérieures	Ensoleillé avec passages nuageux
Température	5 °C
Humidité	92 %
Éclairage électrique	Stores
Relais 3-1 : Opérateur override : OFF	ABC_Down : Opérateur override : ON
Relais 3-2 : Opérateur override : OFF	DEFG_Down : Opérateur override : ON
Relais 3-3 : Opérateur override : OFF	HIJK_Down : Opérateur override : ON
Heure	Notes
7h35	Début de collecte
7h48	Il y a de l'éblouissement puisque le store ne descend pas assez bas
8h14	Le capteur C3m est caché par le store
8h28	Ombrage sur le capteur C2m
8h56	Le capteur C2m est caché par le store
14h05	Fin de la collecte

Tableau-A III-3 : Notes, 17 octobre 2016

Date	17 octobre 2016
Condition	Hsm2
Conditions extérieures	Généralement ensoleillé
Température	9 °C
Humidité	81 %
Éclairage électrique	Stores
Relais 3-1 : Opérateur override : OFF	ABC_Down/Up : Opérateur override : OFF
Relais 3-2 : Opérateur override : OFF	DEFG_Down/Up : Opérateur override : OFF
Relais 3-3 : Opérateur override : OFF	HIJK_Down/Up : Opérateur override : OFF
Heure	Notes
7h39	Début de collecte
7h48	Il y a de l'éblouissement puisque le store ne descend pas assez bas
9h41	Le capteur C3m est caché par le store
10h43	Le capteur C2m est caché par le store
10h45 - 11h17	Ombrage sur le capteur C1m
14h04	Fin de la collecte

Tableau-A III-4 : Notes, 22 mars 2017

Date	22 mars 2017
Condition	Hsm3
Conditions extérieures	Nuages prédominants
Température	-12 °C
Humidité	55 %
Éclairage électrique	Stores
Relais 3-1 : Opérateur override : OFF	ABC_Down : Opérateur override : ON
Relais 3-2 : Opérateur override : OFF	DEFG_Down : Opérateur override : ON
Relais 3-3 : Opérateur override : OFF	HIJK_Down : Opérateur override : ON
Heure	Notes
7h36	Début de collecte
7h36	Présence de nuages dans le ciel, baisse du rayonnement direct Ombrage créé par une colonne sur C3m Ombrage créé par un meneau sur C1m
8h00	Les rayons du soleil sont en partie cachés par un édifice. Ombrage créé par une colonne sur C3m
8h06	Le soleil est au-dessus de l'édifice Ombrage créé par une colonne sur C3m Ombrage créé par un meneau sur C1m
8h10	Il y a de l'éblouissement puisque le store ne descend pas assez bas Présence d'éblouissement dû à la réflexion sur les tables, les chaises et le plancher
8h51	Il n'y a plus de rayonnement direct sur C3m
9h00	Le ciel n'est pas complètement éclairci. Il semble y avoir une couche nuageuse / filtre nuageux.
9h23	La valeur de C2m diminue autour de 10 000 lux. Pourtant, C2m n'est pas obstrué. Le soleil est haut et les stores cachent une partie du rayonnement direct
9h27	Il n'y a plus de rayonnement direct sur C2m
11h30	Dû à la hauteur du store, il n'y a plus de rayonnement direct sur C1m
12h00	Le rayonnement direct est présent sur une bande de 2m à partir du mur extérieur. Puisque C1m est à une hauteur de 0.8m, il n'est pas affecté par le rayonnement direct.
12h30	Ombrage créé par une colonne sur C1m

Tableau-A III-5 : Notes, 23 mars 2017

Date	23 mars 2017
Condition	Hsm2
Conditions extérieures	Nuageux avec éclaircies
Température	-8 °C
Humidité	48 %
Éclairage électrique	Stores
Relais 3-1 : Opérateur override : OFF	ABC_Down/UP : Opérateur override : OFF
Relais 3-2 : Opérateur override : OFF	DEFG_Down/UP : Opérateur override : OFF
Relais 3-3 : Opérateur override : OFF	HIJK_Down/UP : Opérateur override : OFF
Heure	Notes
7h44	Début de collecte
7h56	Ombrage créé par une colonne sur C3m Ombrage créé par un meneau sur C1m
8h10	Présence de nuages dans le ciel
8h42	Ombrage créé par un meneau sur C2m
8h58	Ombrage créé par un meneau sur C3m
9h08	Le capteur C3m présente déjà une baisse de luminosité. Cela pourrait être dû en partie par la hauteur du store puisque rien n'obstrue le capteur.
10h05	Dû à la hauteur du store, il n'y a plus de rayonnement direct sur C3
10h39	Ombrage créé par une colonne sur C2m
10h52	Ombrage créé par un meneau sur C1m Ombrage créé par une colonne sur C2m
11h11	Diminution du niveau de luminosité de C2m
11h48	Le plafond et le store cachent une partie du rayonnement direct
12h03	Ombrage créé par une colonne sur C1m
14h04	Fin de la collecte

Tableau-A III-6 : Notes, 24 mars 2017

Date	24 mars 2017
Condition	Hsm1
Conditions extérieures	Nuageux, faible neige intermittente
Température	-2 °C
Humidité	54 %
Éclairage électrique	Stores
Relais 3-1 : Opérateur override : OFF	ABC_UP : Opérateur override : ON
Relais 3-2 : Opérateur override : OFF	DEFG_UP : Opérateur override : ON
Relais 3-3 : Opérateur override : OFF	HIJK_UP : Opérateur override : ON
Heure	Notes
7h22	Début de collecte
7h22	Ciel nuageux, couverture nuageuse complète, aucun rayonnement direct Niveau d'éclairage confortable entre 170 et 300 lux
10h30	Forte neige, niveau de rayonnement diffus plus élevé
11h03	Faible neige
11h23	Pas de neige
11h40	Faible neige
12h05	Pas de neige
14h02	Fin de la collecte

Tableau-A III-7 : Notes, 20 juin 2017

Date		20 juin 2017
Condition		Hsm1
Conditions extérieures		Ciel nuageux avec orages
Température		19 °C
Humidité		95 %
Éclairage électrique		Stores
Relais 3-1 : Opérateur override : OFF		ABC_UP : Opérateur override : ON
Relais 3-2 : Opérateur override : OFF		DEFG_UP : Opérateur override : ON
Relais 3-3 : Opérateur override : OFF		HIJK_UP : Opérateur override : ON
Heure	Notes	
7h58	Début de collecte	
8h37	Ciel plus sombre, diminution du niveau de luminosité	
9h00	Nuageux avec éclaircies	
9h28	Éclaircies dans le ciel, rayonnement diffus	
9h48	Éclaircies	
10h12	Le capteur C3m est caché par le plafond	
10h19	Rayonnement direct présent, nuageux avec éclaircies	
10h22	C2 atteint jusqu'à 57 000 Lux dus au rayonnement direct Ombrage créé par un meneau sur C1m	
10h26	Ciel dégagé	
10h50	Le capteur C2m est caché par le plafond	
10h53	Passages nuageux	
11h08	Présence de nuages gris au-dessus de la MDE et cachent le soleil	
11h43	Nuages couvrant le rayonnement direct	
12h52	Présence de nuages gris dans le ciel	
14h04	Fin de la collecte	

Tableau-A III-8 : Notes, 21 juin 2017

Date	21 juin 2017
Condition	Hsm3
Conditions extérieures	Nuageux
Température	16 °C
Humidité	82 %
Éclairage électrique	Stores
Relais 3-1 : Opérateur override : OFF	ABC_Down : Opérateur override : ON
Relais 3-2 : Opérateur override : OFF	DEFG_Down : Opérateur override : ON
Relais 3-3 : Opérateur override : OFF	HIJK_Down : Opérateur override : ON
Heure	Notes
7h49	Début de la collecte
8h34	Éclaircies
9h56	Rayonnement direct
10h17	Éclaircies
10h26	Le capteur C1m est caché par le store Ciel dégagé avec passage nuageux
10h48	Le ciel se couvre, présence de nuages gris
12h22	Éclaircies
13h59	Fin de la collecte

Tableau-A III-9 : Notes, 22 juin 2017

Date	22 juin 2017
Condition	Hsm2
Conditions extérieures	Passages nuageux
Température	18°C
Humidité	77 %
Éclairage électrique	Stores
Relais 3-1 : Opérateur override : OFF	ABC_Down/Up : Opérateur override : ON
Relais 3-2 : Opérateur override : OFF	DEFG_Down/Up : Opérateur override : ON
Relais 3-3 : Opérateur override : OFF	HIJK_Down/Up : Opérateur override : ON
Heure	Notes
8h45	Début de la collecte
8h46	Le capteur C3m est caché par la hauteur du store
9h36	Le capteur C2m est caché par la hauteur du store
11h22	Le capteur C1m est caché par la hauteur du store
12h27	Nuages dans le ciel
13h35	Couverture nuageuse
14h06	Fin de la collecte

ANNEXE IV

DONNÉES SIMULÉES

Tableau-A IV-1 : Variation des données simulées par Radiance, 14 octobre 2016.

Capteurs	Heure	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Écart (lux)	Écart (%)
C1	08:00	15 182	15 201	15 082	120	0.79 %
	09:00	18 829	18 707	18 631	198	1.05 %
	10:00	20 119	20 195	20 130	76	0.38 %
	11:00	14 492	14 582	14 593	101	0.69 %
	12:00	6352	6387	6560	208	3.18 %
	13:00	3422	3353	3398	69	2.02 %
	14:00	2775	2817	2767	50	1.76 %
C2	08:00	12 992	12 928	12 985	63	0.49 %
	09:00	14 999	14 781	14 918	218	1.45 %
	10:00	15 494	15 601	15 542	108	0.69 %
	11:00	11 039	11 159	11 178	139	1.24 %
	12:00	4364	4427	4472	108	2.41 %
	13:00	2689	2646	2841	196	6.88 %
	14:00	2199	2223	2219	24	1.08 %
C3	08:00	11 755	11 553	11 699	202	1.72 %
	09:00	14 139	14 153	14 224	85	0.60 %
	10:00	12 643	12 796	12 662	153	1.19 %
	11:00	5797	5904	5820	107	1.81 %
	12:00	2996	2941	2951	55	1.84 %
	13:00	2149	2190	2194	45	2.07 %
	14:00	1848	1853	1879	32	1.68 %

Tableau-A IV-2 : Variation des données simulées par Radiance, 24 mars 2017.

Capteurs	Heure	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Écart (lux)	Écart (%)
C1	08:00	878	880	880	2	0.23 %
	09:00	3167	3175	3174	7	0.23 %
	10:00	3560	3571	3569	11	0.31 %
	11:00	2775	2780	2781	6	0.22 %
	12:00	2509	2515	2516	7	0.26 %
	13:00	2444	2449	2451	7	0.27 %
	14:00	1580	1583	1583	4	0.24 %
C2	08:00	684	686	687	3	0.45 %
	09:00	2453	2457	2462	9	0.35 %
	10:00	2700	2706	2712	12	0.45 %
	11:00	2125	2132	2136	11	0.51 %
	12:00	1920	1927	1930	10	0.50 %
	13:00	1875	1881	1885	10	0.52 %
	14:00	1222	1226	1228	6	0.48 %
C3	08:00	567	567	569	3	0.44 %
	09:00	1983	1983	1992	9	0.43 %
	10:00	2171	2173	2182	10	0.47 %
	11:00	1709	1710	1718	9	0.53 %
	12:00	1568	1569	1576	8	0.50 %
	13:00	1533	1535	1542	8	0.53 %
	14:00	1007	1009	1012	5	0.50 %

Tableau-A IV-3 : Variation des données simulées par Radiance, 20 juin 2017.

Capteurs	Heure	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Écart (lux)	Écart (%)
C1	08:00	14 900	14 917	14 909	17	0.12 %
	09:00	13 350	13 451	13 369	100	0.74 %
	10:00	5854	5873	5872	19	0.33 %
	11:00	9983	10 046	10 032	63	0.63 %
	12:00	4730	4743	4743	13	0.28 %
	13:00	5344	5339	5360	21	0.40 %
	14:00	4996	5027	5032	37	0.73 %
C2	08:00	11 471	11 376	11 490	114	0.99 %
	09:00	10 710	10 755	10 715	45	0.42 %
	10:00	4150	4164	4170	21	0.49 %
	11:00	5108	5124	5148	40	0.78 %
	12:00	3303	3316	3328	26	0.77 %
	13:00	3944	3991	4004	61	1.52 %
	14:00	3907	3922	3949	43	1.08 %
C3	08:00	8965	8844	8910	121	1.35 %
	09:00	5514	5513	5527	14	0.25 %
	10:00	3174	3175	3189	15	0.47 %
	11:00	3680	3690	3717	38	1.02 %
	12:00	2535	2539	2557	23	0.88 %
	13:00	3165	3203	3264	99	3.04 %
	14:00	3221	3249	3339	118	3.53 %

ANNEXE V

ANALYSE DE SENSIBILITÉ

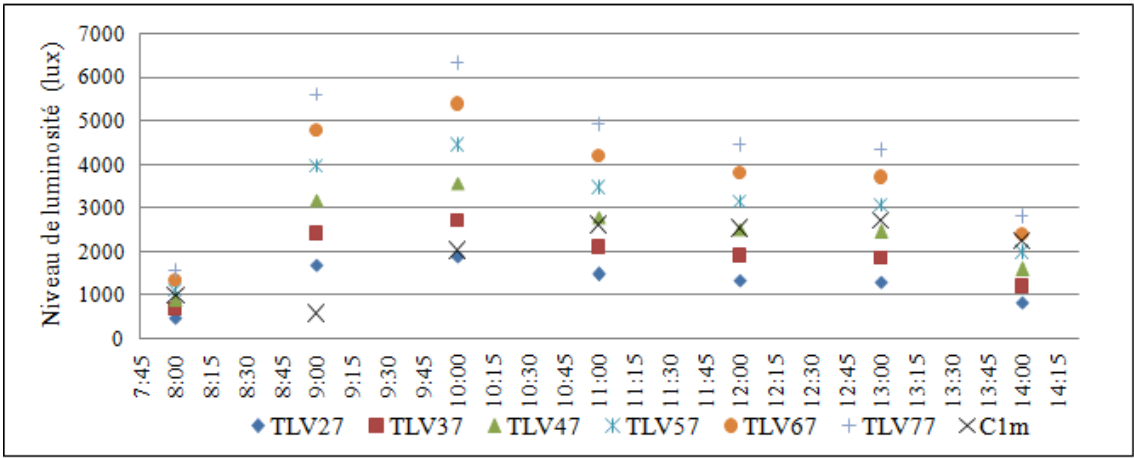


Figure-A V-1 : Variation du coefficient TLV du vitrage, Hsm1, C1s, 24 mars 2017

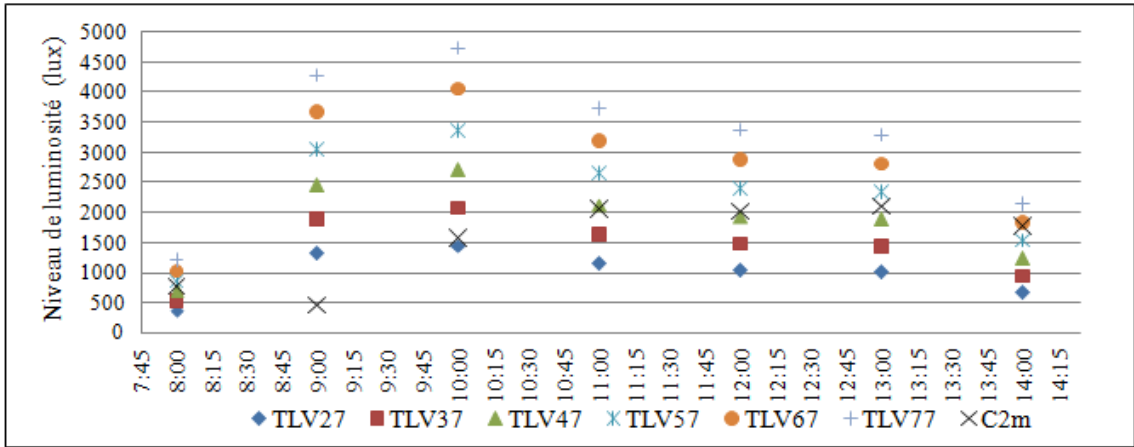


Figure-A V-2 : Variation du coefficient TLV du vitrage, Hsm1, C2s, 24 mars 2017

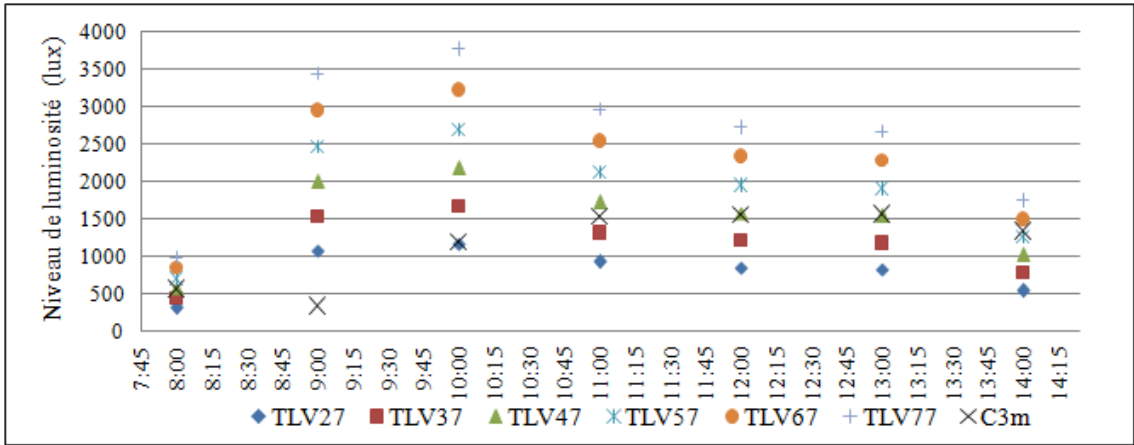


Figure-A V-3 : Variation du coefficient TLV du vitrage, Hsm1, C3s, 24 mars 2017

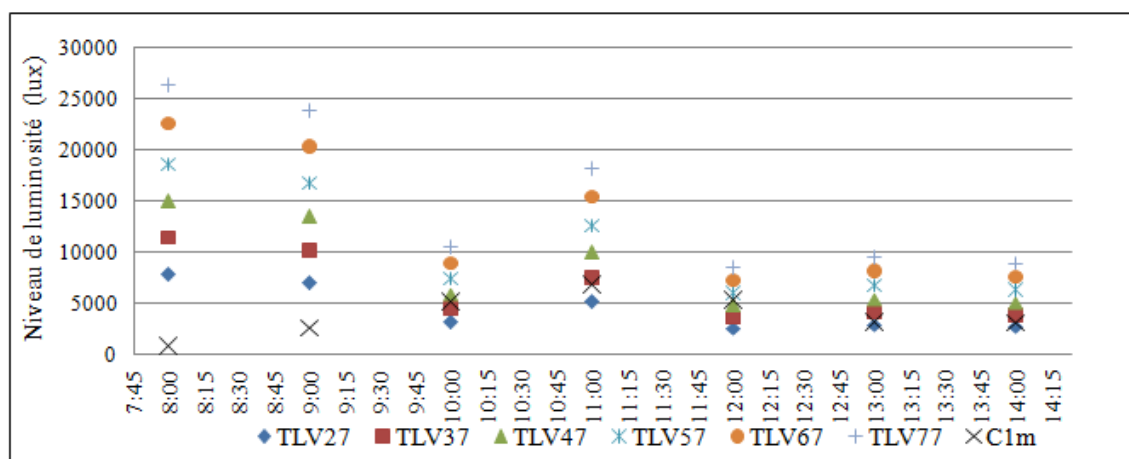


Figure-A V-4 : Variation du coefficient TLV du vitrage, Hsm1, C1s, 20 juin 2017

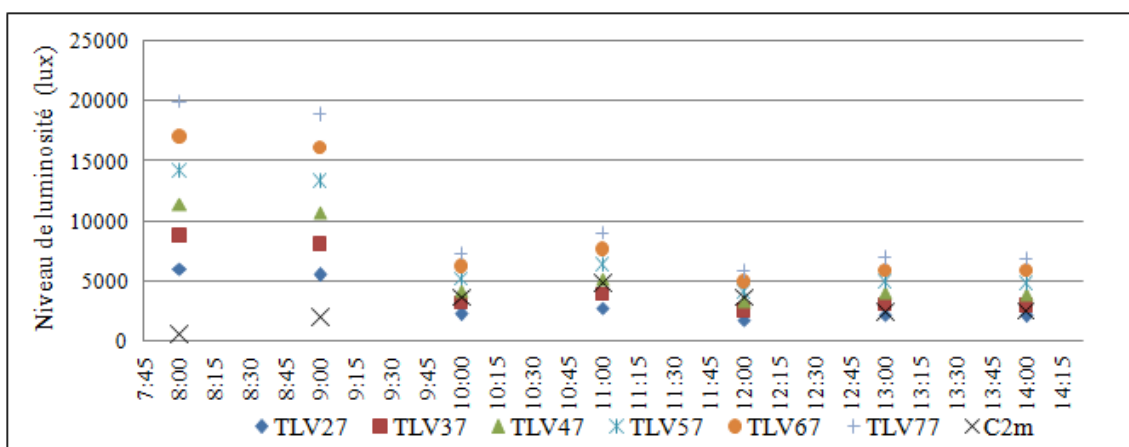


Figure-A V-5 : Variation du coefficient TLV du vitrage, Hsm1, C2s, 20 juin 2017

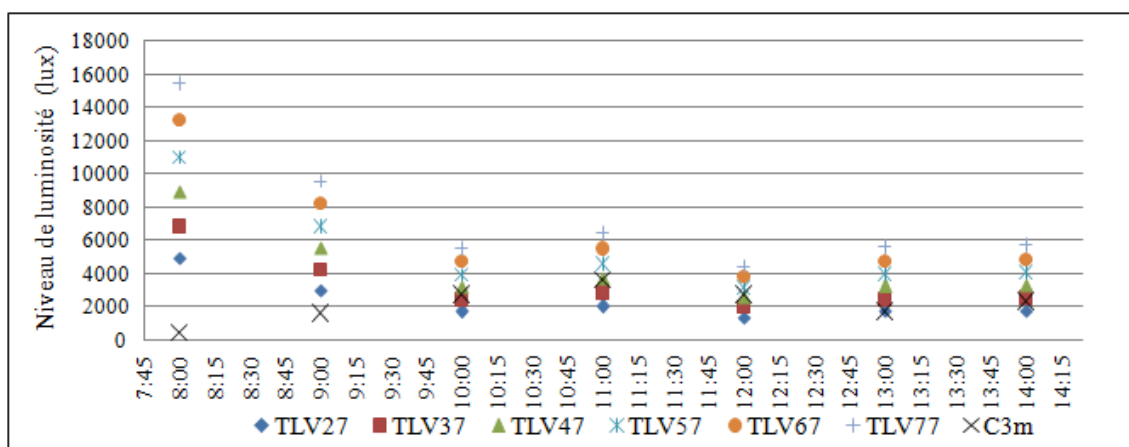


Figure-A V-6 : Variation du coefficient TLV du vitrage, Hsm1, C3s, 20 juin 2017

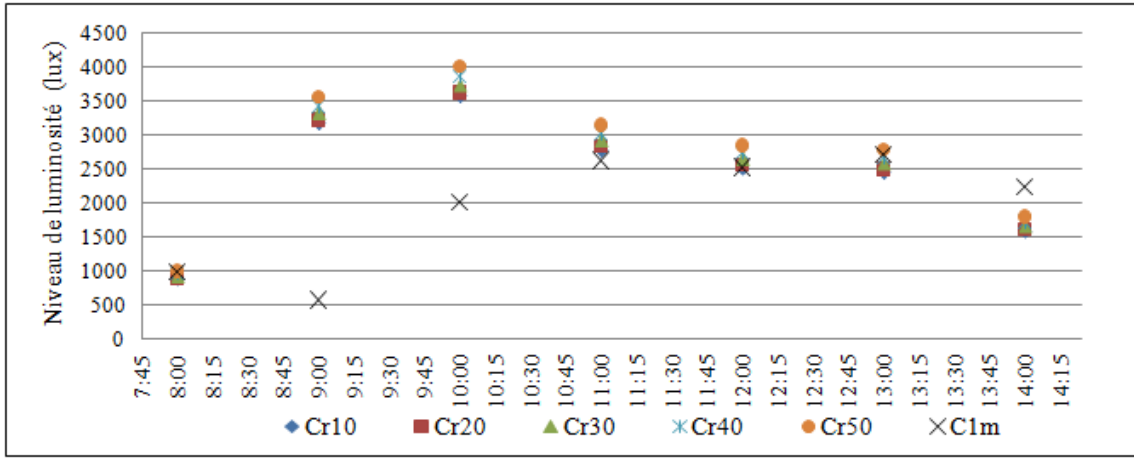


Figure-A V-7 : Variation du coefficient Cr du sol extérieur, Hsm1, C1s, 24 mars 2017

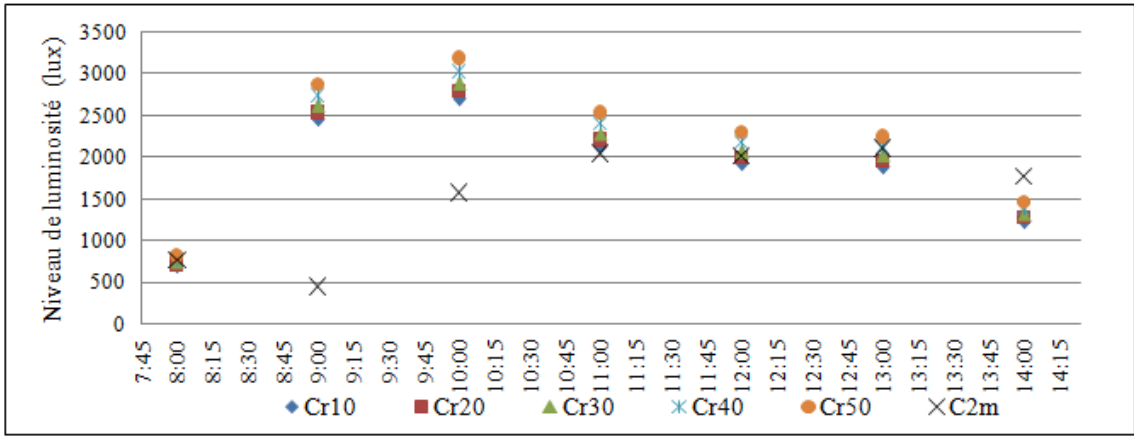


Figure-A V-8 : Variation du coefficient Cr du sol extérieur, Hsm1, C2s, 24 mars 2017

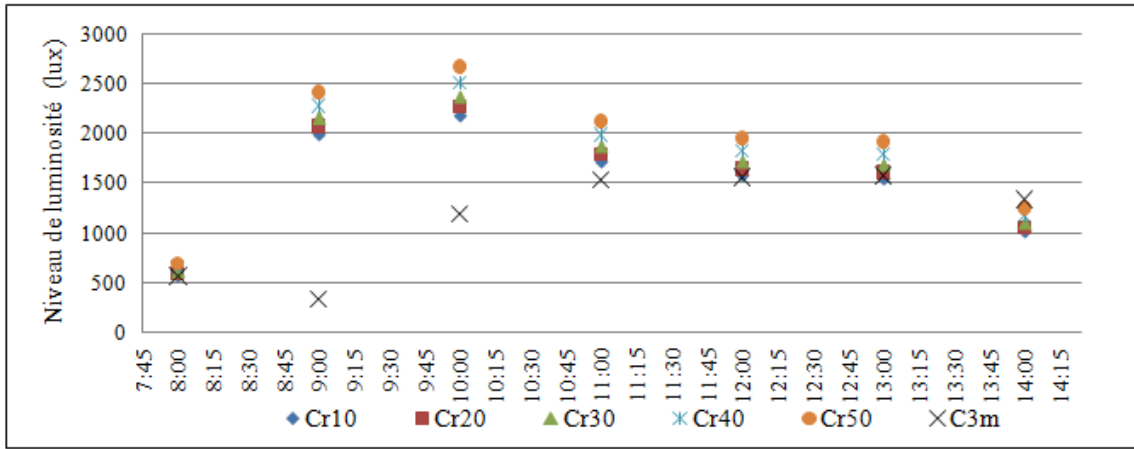


Figure-A V-9 : Variation du coefficient Cr du sol extérieur, Hsm1, C3s, 24 mars 2017

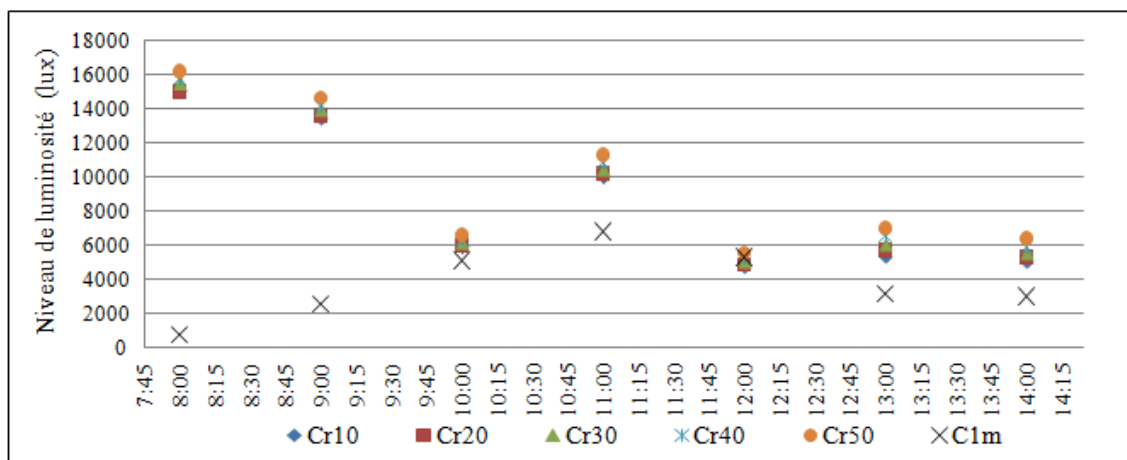


Figure-A V-10 : Variation du coefficient Cr du sol extérieur, Hsm1, C1s, 20 juin 2017

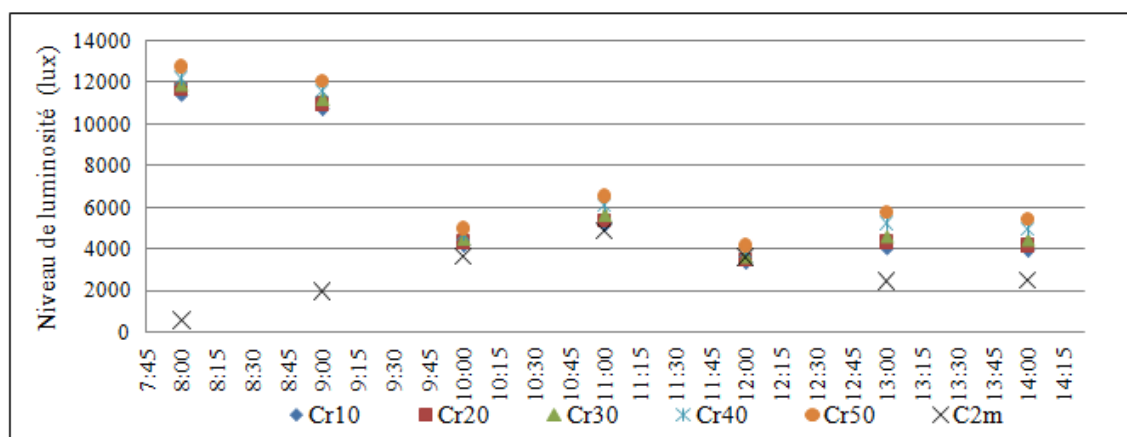


Figure-A V-11 : Variation du coefficient Cr du sol extérieur, Hsm1, C2s, 20 juin 2017

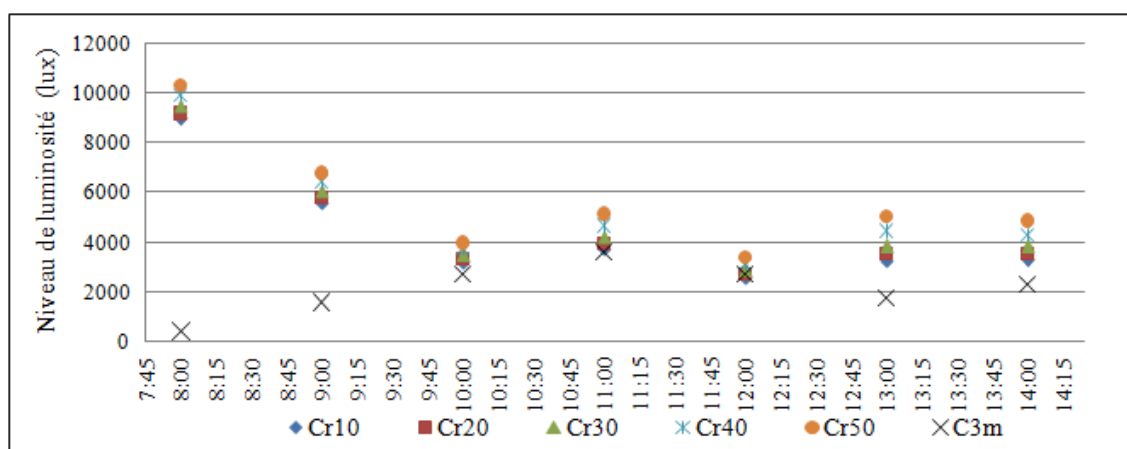


Figure-A V-12 : Variation du coefficient Cr du sol extérieur, Hsm1, C3s, 20 juin 2017

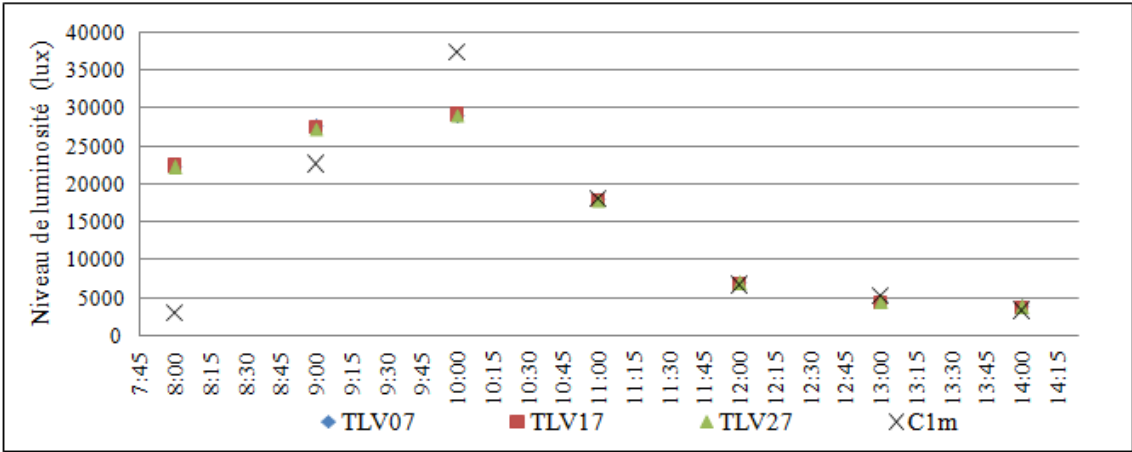


Figure-A V-13 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm2, C1s, 23 mars 2017

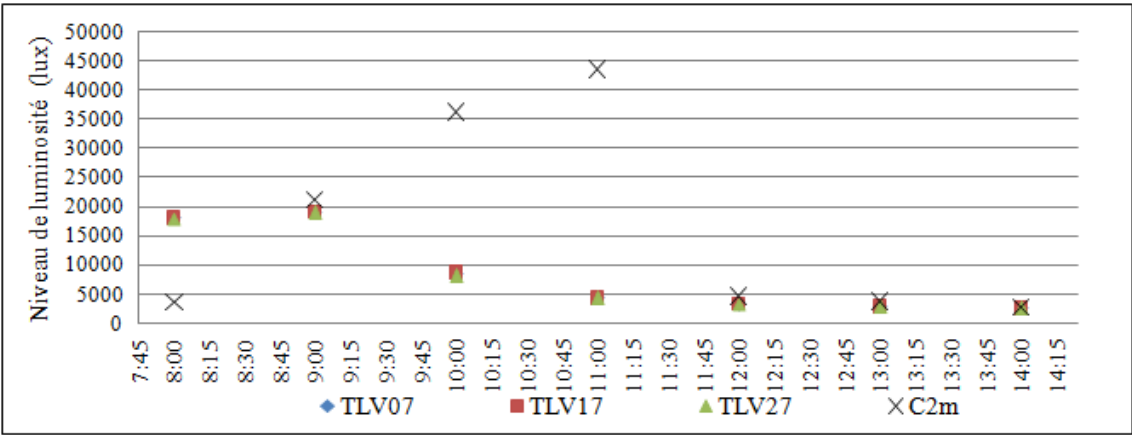


Figure-A V-14 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm2, C2s, 23 mars 2017

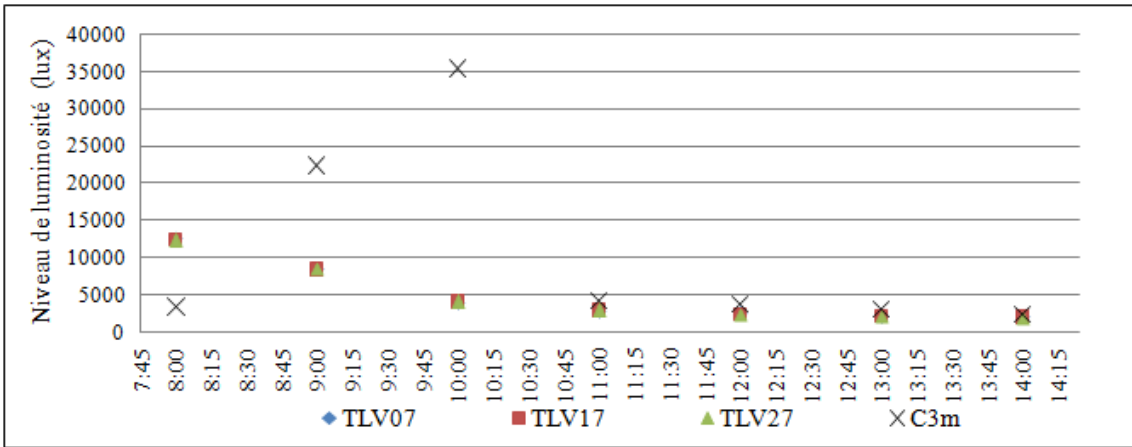


Figure-A V-15 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm2, C3s, 23 mars 2017

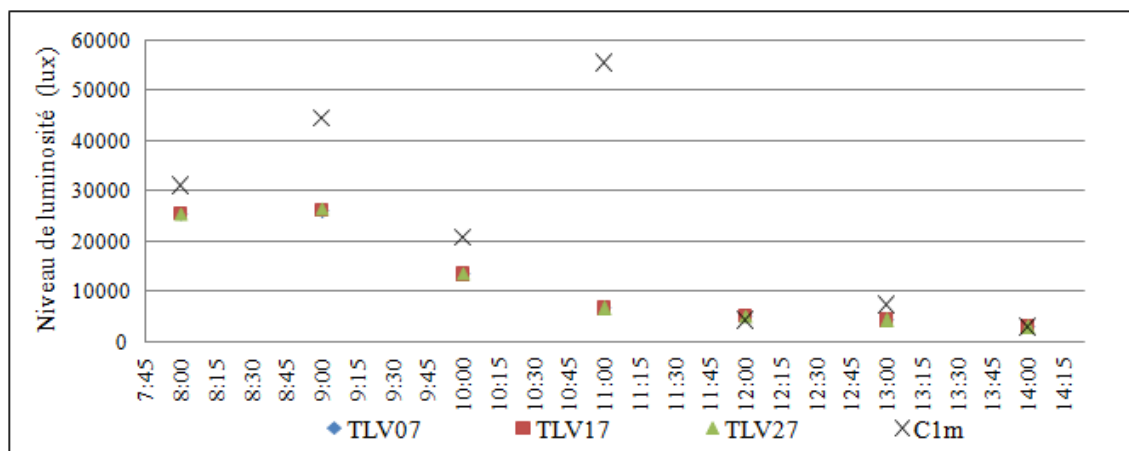


Figure-A V-16 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm2, C1s, 22 juin 2017

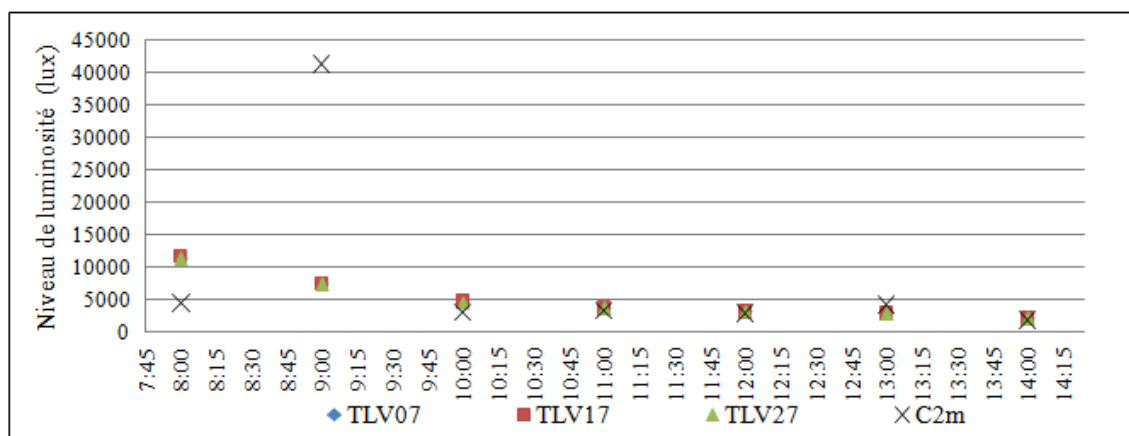


Figure-A V-17 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm2, C2s, 22 juin 2017

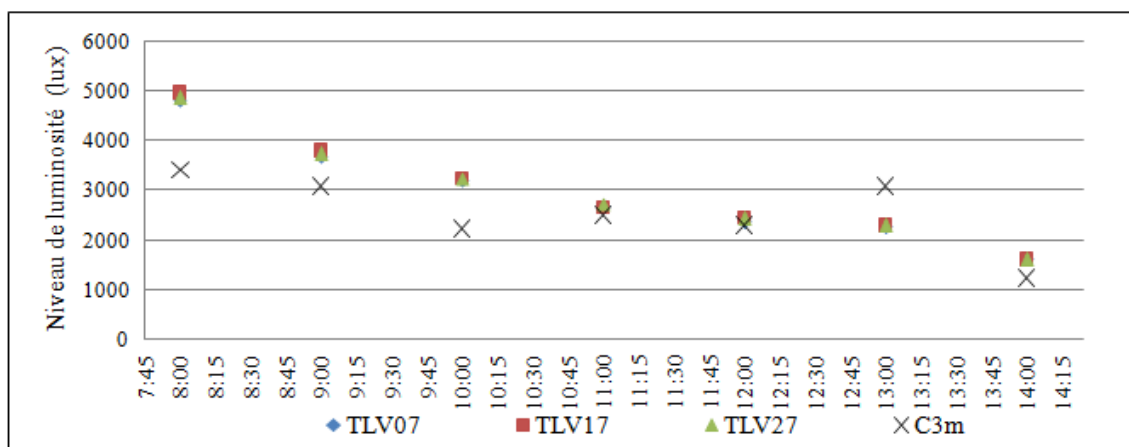


Figure-A V-18 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm2, C3s, 22 juin 2017

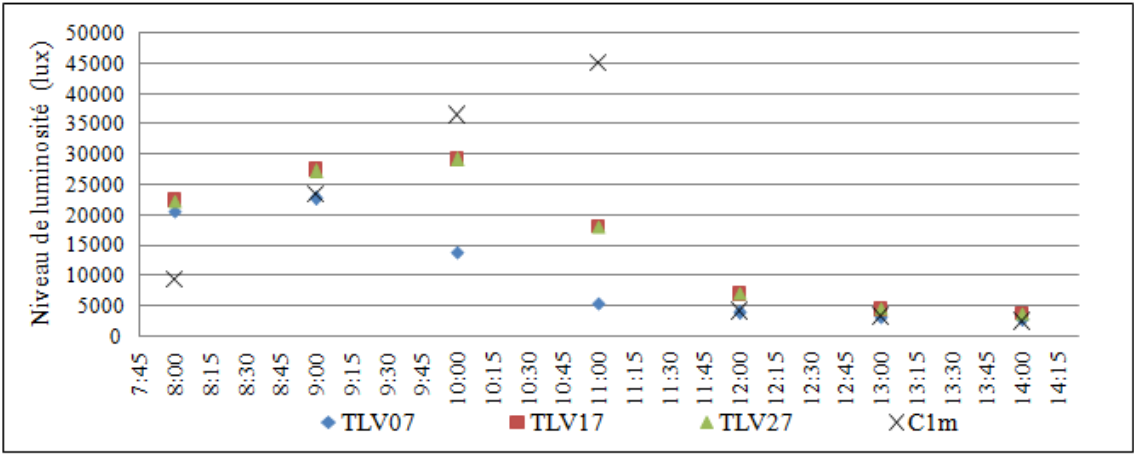


Figure-A V-19 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm3, C1s, 22 mars 2017

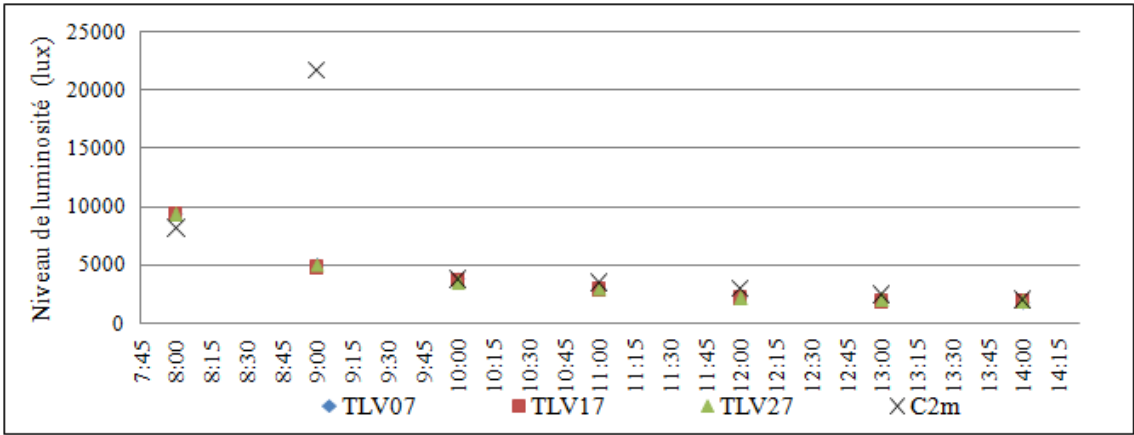


Figure-A V-20 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm3, C2s, 22 mars 2017

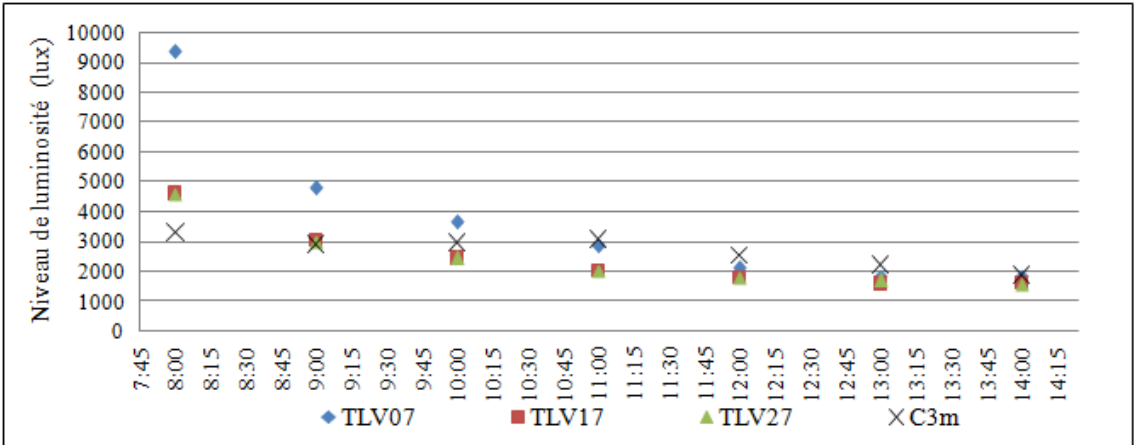


Figure-A V-21 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm3, C3s, 22 mars 2017

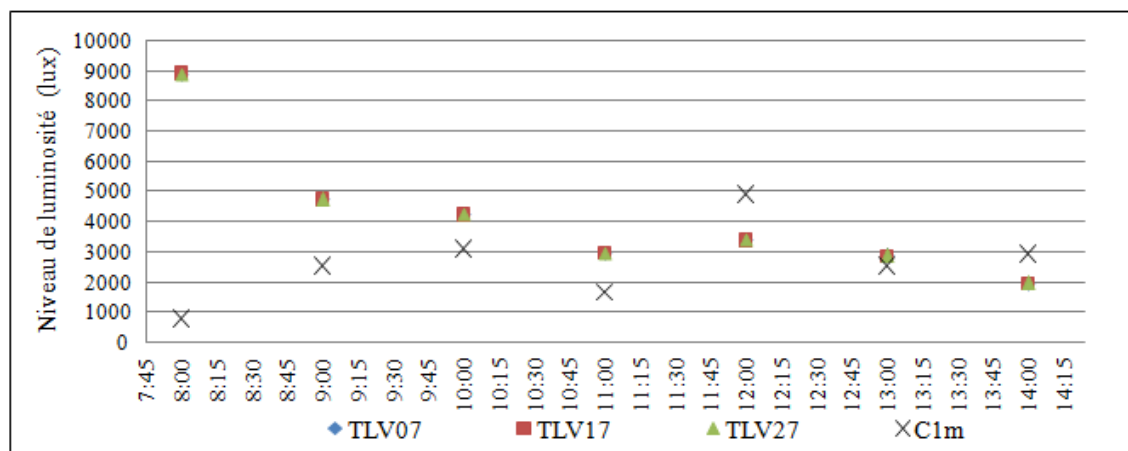


Figure-A V-22 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm3, C1s, 21 juin 2017

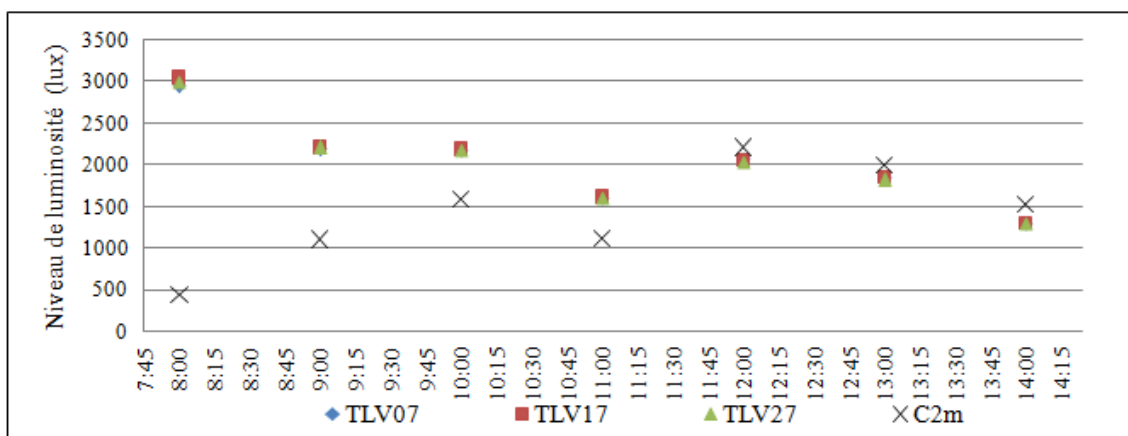


Figure-A V-23 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm3, C2s, 21 juin 2017

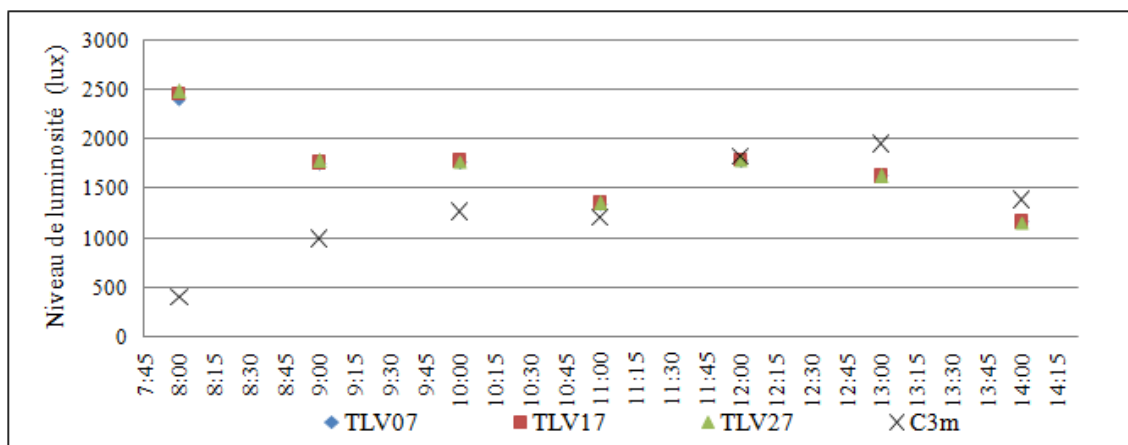


Figure-A V-24 : Variation du coefficient TLV du store, Hsm3, C3s, 21 juin 2017

ANNEXE VI

LISTE DE VÉRIFICATION

Tableau-A VI-1 : Liste de vérification adaptée de Hensen et Lamberts (2011)

Tâches	Vérification (À cocher)
Modéliser la volumétrie	☐
Modéliser les ouvertures de fenestration	☐
Modéliser les éléments intérieurs	☐
Modéliser le sol extérieur et les bâtiments adjacents	☐
Modifier les propriétés des surfaces et du vitrage	☐
Orienter le bâtiment	☐
Ajouter le fichier météo	☐
Ajouter le plan de luminosité	☐
Ajouter les capteurs photométriques	☐
Ajouter le dispositif d'ombrage	☐
Modifier les propriétés du dispositif d'ombrage	☐

BIBLIOGRAPHIE

- Aries, M. B. C., Veitch, J. A., & Newsham, G. R. (2010). Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. *Journal of Environmental Psychology*, 30(4), 533-541.
- Arnal, E., Anthierens, C., & Bideaux, E. (2011). Consideration of glare from daylight in the control of the luminous atmosphere in buildings. *2011 Ieee/Asme International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (Aim)*, 1070-1075.
- ASHRAE. (2002). Guideline 14. Measurement of Energy and Demand Savings *American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers Inc.* Alanta, GA.
- Athienitis, A. K., & Tzempelikos, A. (2002). A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device. *Solar Energy*, 72(4), 271-281.
- Bao, B., JIN, X., & Peng, Q. (1997). A progressive radiosity algorithm based on piecewise polynomial intensity distribution. *Computer Graphics*, 21, 8.
- Bedocs, L., & Simons, R. H. (1972). The accuracy of the IES Glare Index System. *Lighting Research & Technology*, 4(2), 80-89.
- Bourgeois, D., Reinhart, C., & Macdonald, I. (2006). Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control. *Energy and Buildings*, 38(7), 814-823.
- CIE. (1994). *Spatial Distribution of Daylight Luminance Distributions of Various Reference Skies*. (Rapport technique).
- CIE. (2003). *Spatial Distribution of Daylight-CIE Stadard General sky*. Vienne.
- CIE. (2018). Commission internationale de l'éclairage. Repéré à <http://www.cie.co.at/>
- Colaco, S. G., Kurian, C. P., George, V. I., & Colaco, A. M. (2008). Prospective techniques of effective daylight harvesting in commercial buildings by employing window glazing, dynamic shading devices and dimming control—a literature review. *Building Simulation*, 1(4), 279.
- Cook, L. R., Porter, T., & Carpenter, L. (1984). Distributed ray tracing. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 18(3), 137-145.
- DAYSIM. (2018). Repéré à <http://daysim.ning.com/>

- Debaditya, C., & Hazem, E. (2017). Performance testing of energy models: are we using the right statistical metrics? *Journal of Building Performance Simulation*, 1-16.
- DIVA-for-Rhino. (2018). Repéré à <http://diva4rhino.com/>
- Doulos, L., Tsangrassoulis, A., & Topalis, F. V. (2008). The role of spectral response of photosensors in daylight responsive systems. *Energy and Buildings*, 40(4), 588-599.
- Doulos, L., Tsangrassoulis, A., & Topalis, F. V. (2014). Multi-criteria decision analysis to select the optimum position and proper field of view of a photosensor. *Energy Conversion and Management*, 86, 1069-1077.
- Dubois, M. C. (2003). Shading devices and daylight quality: an evaluation based on simple performance indicators. *Lighting Research & Technology*, 35(1), 61-76.
- Dubois, M. C., & Flodberg, K. (2013). Daylight utilisation in perimeter office rooms at high latitudes: Investigation by computer simulation. *Lighting Research & Technology*, 45(1), 52-75.
- Dufton, A. F. (1946). Protractors for the Computation of Daylight Factors. *D.S.I.R. Building Research Technical Paper No. 28*.
- Ecotect. (2007). Repéré à <https://www.autodesk.com/education/free-software/ecotect-analysis>
- EnergyPlus. (2017). Repéré à <https://energyplus.net/>
- Escuyer, S., & Fontoynt, M. (2001). Lighting controls: a field study of office workers' reactions. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 33(2), 77-94.
- ESP-r. (2018). Repéré à <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>
- Ferraro, V., Marinelli, V., & Mele, M. (2013). A method for selecting the CIE standard general sky model with regard to calculating luminance distributions. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 95-96, 59-64. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.01.006>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682613000308>
- Frankel, M., & Lyles, M. (2017). Daylighting Pattern Guide. Repéré à <http://patternguide.advancedbuildings.net/>
- Galasiu, A. D., & Atif, M. R. (2002). Applicability of daylighting computer modeling in real case studies: comparison between measured and simulated daylight availability and lighting consumption. *Building and Environment*, 37(4), 363-377.

- Gilani, S., & O'Brien, W. (2016). Potential for virtual daylight sensors using daylight simulation and high-resolution measurement of solar radiation.
- Gomes, M. G., Santos, A. J., & Rodrigues, A. M. (2014). Solar and visible optical properties of glazing systems with venetian blinds: Numerical, experimental and blind control study. *Building and Environment*, 71, 47-59.
- Google. (2016). SketchUp User's Guide. Repéré à <https://www.sketchup.com>
- Hensen, J., & Lamberts, R. (2011). *Building performance simulation for design and operation*. London ; New York: Spon Press.
- Heschong, L. (2002). Daylighting and Human Performance. *Ashrae Journal*.
- Heschong, L., Wright, R., & Okura, S. (2013). Daylighting Impacts on Human Performance in School.
- Hopkinson, R. G. (1972). Glare from daylighting in buildings. *Applied Ergonomics*, 3(4), 206-215.
- Hu, J., & Olbina, S. (2014). Simulation-Based Model for Integrated Daylighting System Design. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 28(5).
- IBE-BIV, I. B. s. l. É. (2003). *Code de Bonne Pratique en Éclairage Intérieur*.
- IESNA. (2012). *IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*.
- Illuminating Engineering Society. (2016). Radiance IES user guide.
- ISO. (2004). *Spatial Distribution of Daylight-CIE standard General Sky*. Geneva.
- Jarvis, D., & Donn, M. (1997). Comparison of computer and model simulations of a daylight interior with reality.
- Kapsis, K., Tzempelikos, A., Athienitis, A. K., & Zmeureanu, R. G. (2010). Daylighting performance evaluation of a bottom-up motorized roller shade. *Solar Energy*, 84(12), 2120-2131.
- Karizi, N., Reddy, T. A., & Dasgupta, P. (2014). Developing a Baseline Strategy for Controlling Blinds in Buildings. *Proceedings of the Asme International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2013, Vol 12*.
- Kim, J.-H., Park, Y.-J., Yeo, M.-S., & Kim, K.-W. (2009). An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer. *Building and Environment*, 44(7), 1517-1527.

- Kim, S. Y., & Kim, J. J. (2007). The impact of daylight fluctuation on a daylight dimming control system in a small office. *Energy and Buildings*, 39(8), 935-944.
- Konstantoglou, M., & Tsangrassoulis, A. (2016). Dynamic operation of daylighting and shading systems: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 268-283.
- Koo, S. Y., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2010). Automated blind control to maximize the benefits of daylight in buildings. *Building and Environment*, 45(6), 1508-1520.
- Kuhn, T. E., Bühler, C., & Platzer, W. J. (2001). Evaluation of overheating protection with sun-shading systems. *Solar Energy*, 69(Supplement 6), 59-74.
- Larson, G. W., & Shakespeare, R. (1998). *Rendering with radiance: the art and science of lighting visualization*. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Leather, P., Pyrgas, M., Beale, D., & Lawrence, C. (1998). Windows in the Workplace. *Environment and Behavior*, 30(6), 739-762.
- Lim, Y.-W., Hamdan, A., & Remaz Ossen, D. (2010). Empirical Validation of Daylight Simulation Tool with Physical Model Measurement.
- Littlefair, P. J. (2001). Photoelectric control: the effectiveness of techniques to reduce switching frequency. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 33(1), 43-55.
- Mardaljevic, J. (2011). Building performance simulation for design and operation. Dans (pp. 341-389). London ; New York: Spon Press.
- Mardaljevic, J. (2015). *Climate-based daylight modelling and its discontents* présentée à CIBSE Technical Symposium, London.
- Mardaljevic, J., Heschong, L., & Lee, E. (2009). Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research & Technology*, 41(3), 261-283.
- Moon, P., & Spencer, D. (1942). Illumination from a non-uniform sky. *Illum. Eng.*, (37), 707-726.
- Mousavi, S. M., Khan, T. H., & Lim, Y.-W. (2016). Empirical validation of Radiance-IES daylight simulation for furnished and unfurnished rooms under a tropical sky. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 7(1), 61-69.
- N.E.R.L. (2017). NERL : OpenStudio. Repéré à <https://www.openstudio.net/>

- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research & Technology*, 37(1), 41-57.
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, 38(7), 905-913.
- O'Brien, W., Kapsis, K., & Athienitis, A. K. (2013). Manually-operated window shade patterns in office buildings: A critical review. *Building and Environment*, 60, 319-338. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.003>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132312002685>
- Ochoa, C., Aries, M., & Hensen, J. (2012). State of the art in lighting simulation for building science: a literature review. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(4), 209-233.
- Olbina, S., & Hu, J. (2012). Daylighting and thermal performance of automated split-controlled blinds. *Building and Environment*, 56(Supplement C), 127-138.
- Park, K. W., & Athienitis, A. K. (2003). Workplane illuminance prediction method for daylighting control systems. *Solar Energy*, 75(4), 277-284.
- Perez, R., Seals, R., & Michalsky, J. (1993). All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50(3), 235-245.
- Peter Boyce, C. H. a. O. H. (2003). *The Benefits of Daylight through Windows*.
- Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J. W., Rougier, J., Stephenson, D. B., & Wagener, T. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214-232. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815216300287>
- Pigg, S., Eilers, M., & Reed, J. (1996). Behavioural aspects of lighting and occupancy sensors in private offices: a case study of a university office buildings. *ACEEE summer study on energy efficiency in buildings*, 8, 161-171.
- Pineau, P. O., & Whitmore, J. (2016). *État de l'énergie au Québec*.
- Rea, M. S. (2000). *The IESNA lighting handbook : reference and application* (9th ed. éd.). New York.
- Reinhart, C., & Breton, P.-F. (2009). Experimental Validation of 'Autodesk®3ds Max Design 2009' and Daysim3.0

- Reinhart, C., & Fitz, A. (2006). Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design. *Energy and Buildings*, 38(7), 824-835.
- Reinhart, C., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design.
- Reinhart, C., & Walkenhorst, O. (2001). Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, 33(7), 683-697.
- Rhinoceros. (2018). Repéré à <https://www.rhino3d.com/fr/features>
- Robinson, W., Bellchambers, H. E., Grundy, J. T., Longmore, J., Burt, W., Hewitt, H., . . . Rowlands, E. (1962). The Development of the IES Glare Index System. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 27(1_IESTrans), 9-26.
- Rogers, Z. (2006). Daylighting Metric Development Using Daylight Autonomy Calculations In the Sensor Placement Optimization Tool. *Leukos*.
- Sadeghi, S. A., Karava, P., Konstantzos, L., & Tzempelikos, A. (2016). Occupant interactions with shading and lighting systems using different control interfaces: A pilot field study. *Building and Environment*, 97, 177-195.
- SIMEB. (2017). Repéré à <https://www.simeb.ca/index.php?>
- SolR. (2018). SheerWeave performance +. Repéré à <http://www.solr.ca/pdf/Sheerweave%20PerformancePlus%202410,2390,2500.pdf>
- Thanachareonkit, A., Scartezzini, J.-L., & Robinson, D. (2006). Comparing the accuracy of daylighting physical and virtual models for complex fenestration systems.
- Thanachareonkit, A., Scartezzini, J. L., & Andersen, M. (2005). Comparing daylighting performance assessment of buildings in scale models and test modules. *Solar Energy*, 79(2), 168-182.
- Tregenza, P. R. (1983). The Monte Carlo method in lighting calculations. *Lighting Research & Technology*, 15(4), 163-170.
- Tzempelikos, A., Laouadi, A., Reinhart, C., & Athienitis, A. (2004). Determining the optical properties of shading devices: 2 current modeling approaches and future directions.
- Van Den Wymelenberg, K. (2012). Patterns of occupant interaction with window blinds: A literature review. *Energy and Buildings*, 51, 165-176.

- Veitch, J. A., & Newsham, G. R. (2000). Preferred luminous conditions in open-plan offices: research and practice recommendations. *Lighting Research and Technology*, 32(4), 199-212.
- Vine, E., Lee, E., Clear, R., DiBartolomeo, D., & Selkowitz, S. (1998). Office worker response to an automated venetian blind and electric lighting system: a pilot study. *Energy and Buildings*, 28(2), 205-218.
- Ward, G. J., & Rubinstein, F. M. (1988). A New Technique for Computer Simulation of Illuminated Spaces. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 17(1), 80-91.
- Wienold, J., & Christoffersen, J. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings*, 38(7), 743-757.
- Yun, G., Yoon, K. C., & Kim, K. S. (2014). The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings. *Energy and Buildings*, 84, 70-85.