

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider-Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Architecture
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم: الهندسة المعمارية
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de :
Doctorat en sciences

**Modélisation du système anidolique pour un environnement lumineux
intérieur intégré**

Présentée par :
Mme Daich Safa

Soutenu publiquement le :

Devant le jury composé de :

Pr. Benabbas Moussadek	Professeur	Président	Univ. De Biskra.
Pr. Eugenio Morello	Professeur	Examinateur	Politecnico di Milano.
Pr. Debache Samira	Professeur	Examinatrice	Univ. De Constantine 3
Dr. Barbara E. A. Piga	P.H.D	Membre invité	Politecnico di Milano.
Dr. Hamouda Abida	M.C.A	Examinatrice	Univ. De Batna.
Dr. Bouzaher Soumia	M.C.A	Examinatrice	Univ. De Biskra.
Pr. Zemmouri Noureddine	Professeur	Rapporteur	Univ. De Biskra.

Résumé

Plusieurs recherches ont prouvé que la lumière du jour offre plusieurs avantages sur l'être humain sur différents plans physiologique et psychologique. Dans les espaces de bureaux, un bon éclairage naturel permet de créer une atmosphère intérieure confortable, d'augmenter la productivité des employés et de réduire également la facture énergétique du bâtiment. L'objectif de notre étude est de modéliser un système de plafond anidolique pour assurer un environnement lumineux intérieur intégré. Pour cela, deux méthodes d'investigation et d'analyse ont été utilisées. La première est une méthode de simulation qui a comme but, d'une part de modéliser un système anidolique spécifique pour la ville de Biskra en recourant à la simulation numérique, et d'autre part, d'analyser l'aspect quantitatif et qualitatif qu'apporte le système dans un espace construit à l'aide d'un modèle physique. La deuxième méthode consiste à développer un questionnaire afin d'étudier les différentes appréciations subjectives des participants vis-à-vis de l'environnement lumineux à l'intérieur du modèle physique dans différents scénarios et situations. Les résultats de l'évaluation quantitative de la performance du système de plafond anidolique intégré (PAI) montrent que le modèle de test (modèle équipé d'un PAI) permet d'avoir une large zone de confort (60% de la surface totale) caractérisée par un éclairage compris entre 300 lux et 500 lux et à douze mètre de la fenêtre, l'éclairage de ce modèle est cinq fois plus élevé par rapport à celui de référence (modèle sans PAI). Les résultats montrent aussi que l'autonomie d'énergie qu'offre le modèle de référence est très faible de l'ordre de 19 % par rapport au modèle de test qui atteint 60 %. De plus, l'étude a montré que pour un facteur de lumière de jour annuel moyen de 1.83 % (500 lux), le système d'éclairage électrique On/Off Switching reste éteint d'environ 50 % durant l'année et plus de 70 % d'autonomie de l'éclairage peut être gagné si le mode électrique utilisé est le système Dimming Switch. De plus, l'évaluation du phénomène de l'éblouissement a démontré que le modèle de test réduit de manière significative le risque d'éblouissement à 34 % en moyenne par rapport au modèle de référence quelque soit la position de l'observateur. Les résultats de l'évaluation qualitative issue du questionnaire montrent que les réponses positives des participants, par rapport au modèle de test, ont confirmé que la distribution de la lumière est plus uniforme et suffisante en quantité avec un contraste bien défini. Les statistiques démontrent également que le système de PAI a contribué de manière considérable à l'éclairage de l'espace, 59.67 % des sujets étaient satisfaits de l'éclairage et 61.28 % de l'uniformité de la distribution lumineuse, 53.22 % étaient satisfaits de la quantité de lumière présente et 59.67 % ont pu définir le contraste. Les résultats indiquent aussi que les participants ont préféré l'éclairage et l'ambiance lumineuse créés par le PAI. Les sujets ont recouru aux trois échelles positives des adjectifs suivants : 'agréable', 'stimulante', 'ordonnée', 'claire' et 'passive' afin d'exprimer leurs satisfaction et leurs sensations. De plus, 60 % des participants ont considéré l'espace équipé du PAI comme plus ouvert, plus spacieux et plus lumineux que celui de référence. L'interprétation des graphiques a montré que les gens étaient satisfaits de leur environnement lumineux lorsque le D.G.I.P présente des valeurs inférieures à 20 %. Pour le modèle de test, toutes les valeurs de D.G.I.P enregistrées étaient comprises entre 02 % et 20% (éblouissement imperceptible) et les participants ont recouru à des appréciations positives (échelle 6 et 7).

Les mots clés

Éclairage naturel, confort visuel, plafond anidolique intégré (PAI), modélisation, simulation numérique, simulation expérimentale, questionnaire.

Abstract

Several studies have shown that daylight offers many advantages for humans on different physiological and psychological levels. In office spaces, good natural lighting can create a comfortable indoor atmosphere, increase the productivity of employers and also reduce the energy consumption of the building. The objective of our study is to model an Anidolic Integrated Ceiling (AIC) to ensure an integrated interior light environment. For this, two methods of investigation and analysis were used. The first is a simulation method which aims on the one hand to model a specific anidolic system for the city of Biskra using numerical simulation and on the other hand to analyze the quantitative and qualitative aspect that brings the system in a space using a physical model. The second method consists in developing a questionnaire survey in order to study the participants' subjective assessments of the luminous environment in the physical model in different scenarios and situations. The results of the quantitative evaluation of the performance of the an Anidolic Integrated Ceiling system show that the test model (equipped with AIC) provides a large comfort zone (60% of the total area) characterized by an illuminance between 300lux and 500lux and at twelve meters from the window, the illumination of this model is five times higher compared to that of reference model. The results show also that the daylight autonomy offered by the reference model is very low of about 19% compared to the test model which reaches 60%. In addition, the study showed that for an average annual daylight factor of 1.83% (500lux), the On / Off Switching electrical lighting system remains off about 50% during the year and more than 70%. % of lighting autonomy can be gained if the electric mode used is the Dimming Switch system. In addition, the evaluation of the glare phenomenon had shown that the test model reduces the glare risk to 34% on average compared to the reference model regardless of the position of the observer. The results of the qualitative evaluation from the questionnaire survey show that the positive responses of the observers confirmed that the distribution of light is more uniform and sufficient in quantity with a well-defined contrast. Statistics analysis show that the AIC system contributed significantly to the lighting of the space, 59.67% of the subjects were satisfied with the lighting and 61.28% of the uniformity of the light distribution, 53.22% were satisfied with the quantity of light present in the model and 59.67% could defined the contrast. The results show also that the participants preferred the lighting and the light atmosphere created by the AIC. The subjects used the three positive scales of the adjectives 'pleasant', 'stimulating', 'orderly', 'clear' and 'passive' to express their satisfaction and sensation. In addition, 60% of participants considered the space equipped with the AIC as more open, spacious and brighter than the reference one. The interpretation of the graphs showed that people were satisfied with their light environment when the D.G.I.P values are below than 20%. For the test model, all D.G.I.P values recorded were ranged from 02% to 20% (imperceptible glare) and participants used positive responses (scale 6 and scale 7).

Keywords

Natural lighting, visual comfort, integrated anidolic ceiling, modeling, numerical simulation, experimental simulation, questionnaire survey.

ملخص

قد أظهرت العديد من الدراسات أن ضوء النهار يقدم الكثير من المزايا للأشخاص في مختلف المستويات الفسيولوجية والنفسية. توفير الإضاءة الطبيعية الجيدة في المكاتب يمكن أن يخلق جوًا داخليًا مريحًا، يزيد من إنتاجية أصحاب العمل ويقلل أيضًا من فاتورة الطاقة للمبنى. الهدف من دراستنا هذه هو تصميم نظام السقف الأنيدوليكي المندمج (س.أ.م) ملائم للظروف المناخية والضوئية لمدينة بسكرة لأجل ضمان بيئة ضوئية داخلية متكاملة. لتحقيق هذا الهدف، قمنا باللجوء لطريقتين للبحث والتحليل. الطريقة الأولى هي طريقة محاكاة تهدف من ناحية إلى نمذجة نظام (س.أ.م) خاص بمدينة بسكرة باستخدام محاكاة عددية ومن ناحية أخرى تحليل الجانب الكمي والنوعي الذي يقدمه النظام المقترح داخل المبنى باستخدام نموذج مصغر. تتمثل الطريقة الثانية في تطوير استبيان من أجل دراسة التقييمات الشخصية الكيفية للمشاركين للبيئة الضوئية في النموذج الفيزيائي في سيناريوهات ووضعيات مختلفة. أظهرت نتائج التقييم الكمي لأداء نظام السقف الأنيدوليكي المتكامل أن نموذج الاختبار 'نموذج مزود (س.أ.م)' يسمح بتوفير الرفاهية البصرية في مساحة كبيرة (60% من المساحة الكلية) أين كمية الإضاءة المسجلة تتراوح ما بين lux300 و lux500 كما أن إضاءة نموذج الاختبار على بعد اثني عشر متراً من النافذة أعلى بخمس مرات مقارنةً بالنموذج المرجعي 'نموذج بدون (س.أ.م)'. كما أظهرت النتائج أن استقلالية الطاقة التي يوفرها النموذج المرجعي منخفضة جداً بحوالي 19% مقارنةً بنموذج الاختبار التي تصل إلى 60%. إضافة إلى ذلك، أظهرت الدراسة أنه لأجل قيمة سنوية متوسطة لمعيار (FLJ) بنسبة 1.83% (lux500) فإن نظام الإضاءة الكهربائية نمط تشغيل / إيقاف يبق مغلق حوالي 50% خلال السنة وأكثر من 70% من استقلالية الإضاءة يمكن الحصول عليها إذا كان الوضع الكهربائي المستخدم هو نظام Dimming Switch. أظهر تقييم ظاهرة الانبهار أن نموذج الاختبار يقلل بشكل كبير من خطر الانبهار إلى 34% في المتوسط مقارنةً بالنموذج المرجعي بغض النظر عن موضع الملاحظ. تظهر نتائج التقييم النوعي بواسطة طريقة الاستبيان أن الردود الإيجابية للمشاركين أكدت أن توزيع الضوء في النموذج المصغر المزود بنظم (س.أ.م) هو أكثر اتساقاً وكفاية في الكمية مع إمكانية تحديد التضاد. تشير الإحصاءات إلى أن نظام (س.أ.م) ساهم إلى حد كبير في الإضاءة الطبيعية للمجال حيث أن 59.67% من المشاركين عبروا عن رضاهم من الإضاءة الداخلية، 61.28% أعجبوا من التوزيع المتجانس للضوء، 53.22% كانوا راضين عن كمية الضوء الموجودة و 59.67% من الملاحظين تمكنوا من تحديد التضاد. كما أظهرت النتائج أن المشاركين فضلوا الإضاءة والجو الضوئي الذي يضيفه نظام (س.أ.م) داخل المجال حيث أن أغلبية المشاركين قد لجئوا إلى السلالم الإيجابية الثلاثة للصفات التالية: 'رائع'، 'مثير'، 'منظم'، 'واضح' و 'السلبى' للتعبير عن احساسهم اعجابهم من البيئة الضوئية الداخلية. بالإضافة إلى ذلك، اعتبر 60% من المشاركين أن المجال الداخلي للنموذج المصغر المزود بنظم (س.أ.م) يبدو أكثر انفتاحاً، أكثر اتساعاً وأكثر ضياءً من النموذج المرجعي. أظهر تفسير الرسوم البيانية أن الأشخاص المشاركين في التجربة كانوا راضين عن البيئة المضيئة عندما تكون قيم مؤشر احتمال الانبهار بضوء النهار (D.G.I.P) أقل من 20%. بالنسبة لنموذج الاختبار، جميع قيم (D.G.I.P) المسجلة تتراوح بين 02% و 20% (وهج غير محسوس) حيث لجأ المشاركون إلى اختيار الملاحظات الإيجابية (السلم 6 والسلم 7).

الكلمات المفتاحية

الإضاءة الطبيعية، الراحة البصرية، السقف الأنيدوليكي المندمج (س.أ.م)، النمذجة، محاكاة عددية، محاكاة تجريبية، استبيان.

Liste des matières

Résumé	I
Liste des matières.....	IV
Liste des figures	XI
Liste des tableaux.....	XVII
La nomenclature.....	IXX
Remerciements.....	XXII
Introduction générale.....	1
Problématique.....	1
Les hypothèses.....	2
Les objectifs.....	2
La méthodologie.....	3
La structure du mémoire.....	3
Partie théorique.....	5
Chapitre 1 – Revue de la littérature.....	6
Introduction.....	6
1.1. L'éclairage naturel dans le bâtiment.....	7
1.1.1. Les bienfaits de la lumière naturelle.....	7
1.1.1. a. Les bienfaits sur la santé de l'occupant.....	7
1.1.1. b. Ses effets sur la productivité.....	8
1.1.1. c. Son impact sur la consommation d'énergie.....	9
1.1.2. La stratégie d'éclairage naturel.....	9
1.1. 2. a. La stratégie d'éclairage dans un climat chaud.....	10
1.1. 3. Les technologies avancées d'éclairage adéquates au climat chaud.....	11
1.1. 3. a. Systèmes d'éclairage avec dispositif d'ombrage.....	11
1.1. 3. a1. Le système anidolique intégré.....	12
1.1. 3. a2. Les panneaux prismatiques.....	13
1.1. 3. a3. Les persiennes et les stores.....	14
1.1. 3. a4. Les light shelves de redirection de la lumière directe et diffuse.....	16
1.1. 3. a5. Les puits de lumière avec laser cut panels.....	17
1.1. 3. a6. Les stores solaires anidoliques.....	18
1.1. 3. a7. Les éléments optiques holographiques.....	19
1.1. 3. b. Systèmes d'éclairage sans dispositif d'ombrage.....	20
1.1. 3. b1. Les systèmes de redirection de la lumière (directe et diffuse).....	20
1.1. 3. b1. 1. Les lasers cut panels.....	22
1.1. 3. b1. 2. Les puits de lumière avec EOH.....	24
1.1. 3. b1. 3. Les vitrages directionnels.....	25
1.1. 3. b2. Les systèmes de transport de la lumière.....	26
1.1. 3. b2. 1. Les systèmes light pipes.....	26
1.1. 3. b2. 2. Les tubes solaires.....	28
1.1. 3. b2. 3. Les plafonds anidoliques intégrés.....	29
Conclusion.....	36
Références.....	38

Chapitre 2 – Le Plafond Anidolique Intégré.....	41
Introduction.....	41
2.1. Les technologies avancées d'éclairage naturel.....	42
2.2. La conception d'un système anidolique.....	42
2.3. Le Plafond Anidolique Intégré (PAI).....	47
2.3.1. Principe de fonctionnement.....	47
2.3.2. Rôles d'un plafond anidolique.....	49
2.3.3. Les différentes composantes.....	50
2.3.4. Les matériaux de fabrication.....	52
2.3.5. Les catégories de système anidolique.....	54
2.3.5.a. Plafond Anidolique Intégré.....	54
2.3.5.b. Système Anidolique Intégré.....	55
2.3.5.c. Stores Solaires Anidoliques.....	56
2.3.6. Exemple des différents collecteurs anidoliques.....	57
2.3.7. Le dimensionnement du système anidolique.....	58
2.3.7.a. Exemple d'un dimensionnement d'un Système Anidolique Intégré.....	60
2.3.8. L'efficacité du transfert lumineux.....	61
2.3.9. Les coûts et les économies d'énergie.....	62
2.3.10. Le système anidolique et la qualité lumineuse intérieure.....	64
2.4. Exemples de réalisation.....	64
2.4.1. Modèle de démonstration de l'éclairage naturel (DEMONA), Lausanne, Suisse.....	64
2.4.2. Le bâtiment expérimental LESO (LESO Solar Experimental Building), Suisse.....	66
2.4.3. La rénovation du bâtiment de la Caisse-Conge à Bruxelles, Belgique.....	67
2.4.4. Nouveau bâtiment 'Techno Parc Siegen', Allemagne.....	68
Conclusion.....	69
Références.....	71
Chapitre 3 - Evaluation de l'environnement lumineux dans les bureaux.....	73
Introduction.....	73
3.1. La lumière et le système visuel humain.....	74
3.1.1. Les composantes biophysiques.....	74
3.1.2. Les aspects d'interprétations internes.....	75
3.2. La qualité de la lumière naturelle.....	75
3.2.1. L'aspect visuel.....	75
3.2.1.a. Les critères relatifs à la performance visuelle.....	76
3.2.1.a1. Le champ de vision.....	76
3.2.1.a2. La performance visuelle.....	77
3.2.1.a3. L'adaptation de l'œil à la luminosité.....	78
3.2.1.a4. L'acuité visuelle.....	79
3.2.1.b. Les critères relatifs au confort visuel.....	80
3.2.1.b1. L'uniformité de l'éclairage.....	81
3.2.1.b2. Les caractéristiques des couleurs.....	83
3.2.1.b3. L'éblouissement.....	84
3.2.1.b4. Le contraste.....	85
3.2.1.b5. Les rapports des luminances.....	87

3.2.2. L'aspect non visuel.....	88
3.2.2. a. Les aspects biologiques.....	89
3.2.2. b. Les aspects psychologiques.....	90
3.3. Les outils de conception de la lumière du jour.....	91
3.3.1. Les mesures sur site	92
3.3.2. Les méthodes du calcul simplifiées.....	92
3.3.3. Les modèles numériques.....	93
3.3.4. Les modèles réduits.....	93
3.4. Les méthodes de calcul de la distribution lumineuse.....	94
3.4.1. La méthode de lancer de rayon.....	94
3.4.2. La méthode de radiosité.....	95
3.5. Les indicateurs de la performance de l'éclairage intérieur.....	96
3.5.1. Le facteur de lumière du jour (FLJ).....	96
3.5.2. L'éclairement utile (EU).....	96
3.5.3. Les indices d'éblouissement.....	98
3.5.4. LIDC.....	99
3.5.5. L'autonomie de l'éclairage.....	100
Conclusion.....	101
Références.....	103
Chapitre 4 – Méthodologie	108
Introduction.....	108
4.1. Méthode d'expérimentation.....	109
4.1.1. Critères de choix	109
4.1.1. 1. La méthode d'expérimentation	109
4.1.1. 1. a. Le choix de l'outil de simulation.....	109
4.1.1. 1. b. Les paramètres de simulation.....	110
4.1.1. 2. La méthode d'expérimentation physique.....	112
4.1.1. 2. a. Le choix de la méthode.....	112
4.1.1. 2. b. Le choix de l'échelle du modèle réduit.....	112
4.1.1. 2. c. Le choix des matériaux de construction	113
4.1.1. 3. d. L'environnement de l'expérimentation	114
4.1.1. 3. e. Les mesures effectuées.....	114
4.2. Méthode d'enquête par questionnaire.....	115
4.2.1. Le choix de la méthode.....	115
4.2.2. La logique de formulation du questionnaire	116
4.2.2. a. L'objet, les hypothèses et les objectifs de l'enquête	116
4.2.2. b. La population d'enquête et l'échantillon.....	117
4.2.2. c. Le projet du questionnaire.....	117
4.2.2. d. Le prétest.....	119
4.2.2. e. Le formulaire du questionnaire définitif 'Le questionnaire développé'	120
4.2.2. f. Le mode d'administration du questionnaire.....	124
4.2.2. g. Le codage et l'analyse des résultats.....	125
Conclusion.....	126
Références.....	128

Partie pratique.....132

Chapitre 5 – Vers un modèle spécifique de système anidolique133

Introduction133

5.1. La construction du gabarit dimensionnel de système anidolique134

5.1.1. Le profil théorique des systèmes anidoliques134

5.1. 2. Les données relatives au dimensionnement du système134

5.1. 3. Le pré-dimensionnement du système anidolique137

5.1. 3. a. La détermination des variables137

5.1. 3. a1. Les valeurs proposées de la largeur de l’ouverture d’entrée (a’)138

5.1. 3. a2. Les valeurs proposées de la largeur de l’élément anidolique extérieur (l’m)138

5.1. 3. a3. Les valeurs proposées de la largeur de l’élément anidolique intérieur (L)138

5.1. 3. b. Les modèles proposés à la simulation139

5.1. 4. Les données relatives au climat.....140

5. 2. La simulation numérique142

5. 2. 1. La méthodologie142

5. 2. 2. Le modèle de référence144

5. 2. 3. Les modèles de Plafond Anidolique Intégré ‘PAI’.....145

5. 2. 3. a. La simulation du ‘modèle 1’145

5. 2. 3. b. La simulation du modèle ‘2’ et ‘3’146

5. 2. 3. c. La simulation du modèle ‘4’ et ‘5’147

5. 2. 3. d. La simulation du modèle ‘6’ et ‘7’148

5. 2. 3. e. La simulation du modèle ‘8’ et ‘9’.....149

5. 2. 3. f. La simulation du modèle ‘10’ et ‘11’.....150

5. 2. 3. g. La simulation du modèle ‘12’151

5. 2. 3. h. Comparaison des douze modèles de PAI152

5. 2. 4. Les modèles de Système Anidolique Intégré ‘SAI’156

5. 2. 5. Comparaison du rendement de PAI, SAI et modèle de référence157

5. 3. Les formules mathématiques spécifiques au système modélisé ‘PAI modèle 3’158

5. 3. 1. La formule de la courbe AA159

5. 3. 1. La formule de la courbe BB160

Conclusion161

Références163

Chapitre 6 – La procédure expérimentale164

Introduction164

6.1. Les objectifs de l’expérimentation.....166

6. 2. La réalisation des modèles expérimentaux166

6. 2. 1. Les modèles expérimentaux : Avantages et inconvénients166

6. 2. 2. Description du modèle expérimental167

6.2.2. a. La réalisation du modèle réduit (Echelle 1/12)169

6.2.2. b. La réalisation du modèle à grande échelle (Echelle ¼)171

6.2.2. b1. La réalisation des parois latérales173

6.2.2. b2. La réalisation du sol174

6.2.2. b3. La réalisation du plafond et du faux plafond174

6.2.2. b4. L’étanchéité du modèle à la lumière175

6. 2.2. b5. La réalisation du plafond anidolique intégré	176
6. 2.2. b6. L'aménagement intérieur et le modèle final	178
6. 2.2. c. Le test de fiabilité des modèles construits	179
6. 3. Description de l'expérience et les mesures à effectuer.....	180
6.3.1. Les mesures quantitatives	182
6.3.1. Les mesures qualitatives	185
Conclusion	186
Références	187
Chapitre 7 – Evaluation quantitative	188
Introduction	188
7.1. Présentation des résultats	189
7.2. L'analyse de l'éclairément extérieur	192
7. 2.1. La validation des résultats	193
7. 2.1. a. Validation entre le modèle réduit et le modèle à grande échelle	193
7. 2.1. b. Validation entre la simulation et les mesure sur site	195
7. 3. Evaluation quantitative de la performance de PAI	197
7. 3.1. Evaluation du niveau d'éclairément	197
7. 3. 1. a. Sans et avec PAI	197
7. 3. 1. b. Par rapport à l'uniformité de l'éclairément.....	199
7. 3. 1. c. Par rapport au temps	199
7. 3. 1. d. Par rapport aux saisons	201
7. 3. 1. e. Par rapport à l'orientation	202
7. 3. 1. f. Par rapport à l'autonomie d'énergie	203
7. 4. Evaluation de l'éblouissement	204
7. 4. 1. Evaluation relative à la performance du système.....	205
7. 4. 2. Evaluation relative aux orientations	208
7. 4. 2. a. Par rapport à l'orientation Nord.....	208
7. 4. 2. b. Par rapport à l'orientation Sud.....	211
7. 4. 2. c. Par rapport à l'orientation Est.....	214
7. 4. 2. d. Par rapport à l'orientation Ouest	217
Conclusion	221
Références	224
Chapitre 8 – Enquête sur la qualité lumineuse intérieure dans un modèle physique...225	
Introduction.....	225
8.1. Méthode.....	226
8.1.1. Le questionnaire développé.....	226
8.1.2. Les mesures photométriques.....	227
8.1.3. Les participants	227
8.1.4. La procédure statistique	227
8.2. Les résultats	228
8.2.1. Les test de fiabilité.....	228
8.2.1. a. Test de fiabilité d'échelle	228
8.2.1. b. Test de la normalité	229
8. 2 .2. Etude de la corrélation entre les variables qualitatives	231

8. 2. 2. a. Au niveau de la Position ‘P1’	231
8. 2. 2. a1. Test de Spearman ‘P1’	232
8. 2. 2. b. Au niveau de la Position ‘P2’	235
8. 2. 2. b1. Test de Spearman ‘P2’	236
8. 2. 2. c. Au niveau de la Position ‘P3’	238
8. 2. 2. c1. Test de Spearman ‘P3’	239
8. 2. 2. d. Au niveau de la Position ‘P4’	240
8. 2. 2. d1. Test de Spearman ‘P4’	241
8. 2. 3. Les variables quantitatives	243
8. 2. 4. Les variables quantitatives et qualitatives	243
8. 2. 4. a. Le test ANOVA pour la ‘P1’	243
8. 2. 4. b. Le test ANOVA pour la ‘P2’	244
8. 2. 4. c. Le test ANOVA pour la ‘P3’	246
8. 2. 4. d. Le test ANOVA pour la ‘P4’	247
8.3. L’analyse descriptive et les techniques statistiques.....	248
Conclusion	250
Références	253
Chapitre 9 – Résultats et discussions	254
Introduction	254
9.1. Analyse des variables qualitatives	255
9.1.1. Analyse du facteur ‘Evaluative’	255
9.1.1. a. La satisfaction.....	255
9.1.1. a1. Satisfaction : position ‘1’	256
9.1.1. a2. Satisfaction : position ‘2’	257
9.1.1. a3. Satisfaction : position ‘3’	257
9.1.1. a4. Satisfaction : position ‘4’	258
9.1.1. a5. Satisfaction : Synthèse	258
9.1.1. b. L’uniformité	259
9.1.1. b1. Uniformité : position ‘1’	260
9.1.1. b2. Uniformité : position ‘2’	260
9.1.1. b3. Uniformité : position ‘3’	260
9.1.1. b4. Uniformité : position ‘4’	261
9.1.1. b5. Uniformité : Synthèse	261
9.1.1. c. La quantité.....	262
9.1.1. c1. Quantité : position ‘1’	263
9.1.1. c2. Quantité: position ‘2’	263
9.1.1. c3. Quantité : position ‘3’	263
9.1.1. c4. Quantité: position ‘4’	264
9.1.1. c5. Quantité : Synthèse	264
9.1.1. d. Le contraste	264
9.1.1. d1. Contraste: position ‘1’	266
9.1.1. d2. Contraste: position ‘2’ et ‘3’	266
9.1.1. d3. Contraste : position ‘4’	266
9.1.1. d4. Contraste : Synthèse	267
9.1. 2. Analyse du facteur ‘Satisfaction’	267
9.1. 2. a. Appréciation_1	267
9.1. 2. b. Appréciation_2	268

9.1. 2. c. Appréciation_3	270
9.1. 2. d. Appréciation_3	271
9.1. 2. e. Ambiance_1	272
9.1. 2. f. Ambiance_2	273
9.1. 2. g. Satisfaction : Synthèse	274
9.1. 3. Analyse du facteur ‘spaciosité’ et ‘sensibilité à l’éblouissement’	274
9.1. 3. a. Description ‘1’	275
9.1. 3. b. Description ‘2’	275
9.1. 3. c. Luminosité	277
9.1. 3. d. ‘Spaciosité’ et ‘sensibilité à l’éblouissement’ : Synthèse	278
9.2. Analyse des variables quantitatives	278
9.2. Analyse des variables quantitatives et qualitatives	279
9.2.1. Analyse des résultats au niveau de ‘P1’	280
9.2.2. Analyse des résultats au niveau de ‘P2’	281
9.2.3. Analyse des résultats au niveau de ‘P3’	282
9.2.4. Analyse des résultats au niveau de ‘P4’	282
9.2.5. Analyse des variables quantitatives et qualitatives : Synthèse	285
Conclusion	286
Conclusion générale	290
Limites, perspectives et axes futurs	295
Bibliographie	296
Publications.....	309
Annexes.....	344
Annexe1 (A1). Le questionnaire développé	344
A1.1. Version Test	344
A1.2. Version Finale	346
Annexe 2 (A2). Résultats de la Simulation Numérique	349
A2.1. Résultats de Modèle de Référence	349
A2.1. Résultats de Modèle de Test	349
A2.1.1. Modèle 1	349
A2.1.2. Modèle 2	349
A2.1.3. Modèle 3	350
A2.1.4. Modèle 4	350
A2.1.5. Modèle 5	350
A2.1.6. Modèle 6	351
A2.1.7. Modèle 7	351
A2.1.8. Modèle 8	351
A2.1.9. Modèle 9	352
A2.1.10. Modèle 10	352
A2.1.11. Modèle 11	352
A2.1.12. Modèle 12	353
Annexe 3 (A3). Les Images Sphériques	353
A3.1. Modèle de Référence	353
A3.2. Modèle de Test	354
Annexe 4 (A4). Statistique Descriptive	354
A4.1. L’Age des Participants	354
A4.2. Le Genre	355
A4.3. La Performance Visuelle	355
A4.4. Provenance des participants	355

Liste des figures

Figures	Page
Chapitre 1	
Figure 1.1 : A gauche, le principe de fonctionnement du système Anidolique Intégré ; A droite, la performance du système	13
Figure 1.2 : Les panneaux prismatiques.....	14
Figure 1.3 : Le principe de fonctionnement des persiennes.....	15
Figure 1.4 : Le système light shelf.....	16
Figure 1.5 : A gauche, puits de lumière avec LCP ; A droite, puits de lumière inversé.....	18
Figure 1.6 : Les stores solaires anidoliques.....	19
Figure 1.7 : Les éléments optiques holographiques (EOH).....	20
Figure 1.8 : A gauche, laser cut panels ; A droite, façade équipée d'un LCP.....	23
Figure 1.9 : Puits de lumière avec EOH.....	25
Figure 1.10 : Le vitrage directionnel.....	26
Figure 1.11 : Les conduits de lumière.....	27
Figure 1.12 : Les composants d'un tube solaire typique.....	29
Figure 1.13 : Le plafond anidolique intégré.....	30
Chapitre 2	
Figure 2.1 : Lumière collimatée par déconcentration en utilisant ONI.....	43
Figure 2.2 : La conception de réflecteur anidolique	44
Figure 2.3 : La conception de CPC	45
Figure 2.4 : Le principe de CCP	46
Figure 2.5 : Le système de plafond anidolique intégré.....	47
Figure 2.6 : Le fonctionnement de système de PAI	49
Figure 2.7 : Les éléments composants un système de PAI	50
Figure 2.8 : Les principaux éléments de collecteur zénithal	51
Figure 2.9 : Les éléments principaux du light duct et de distributeur	52
Figure 2.10 : Comparaison du rendement de différents revêtements de collecteurs anidoliques.....	53
Figure 2.11 : Le système de Plafond Anidolique Intégré.....	55
Figure 2.12 : Le système Anidolique Intégré.....	56
Figure 2.13 : Les stores solaires anidoliques.....	56
Figure 2.14 : Les différents types de collecteurs anidoliques.....	57
Figure 2.15 : Dimensionnement d'un système anidolique.....	59
Figure 2.16 : Dimensionnement d'un système anidolique.....	59
Figure 2.17 : A gauche, coupe verticale de dispositif, A droite, le profil théorique.....	60
Figure 2.18 : Profil adapté au gabarit dimensionnel.....	60
Figure 2.19 : A gauche, coupe d'un local équipé de dispositif anidolique ; A droite, image sphérique prise dans le même local.....	61
Figure 2.20 : A gauche, l'autonomie de l'éclairage avant l'ajout de système anidolique; A droite, l'autonomie de l'éclairage après l'ajout de système.....	64

Figure 2.21 : A gauche, les modèles DEMONA ; A droite, La performance du plafond anidolique.....	65
Figure 2.22 : Vue intérieur de module de test de la lumière naturelle (DEMONA).....	66
Figure 2.23 : A gauche, Façade rénovée du bâtiment LESO ; A droite, coupe verticale de la façade.....	67
Figure 2.24 : Concentrateurs Anidoliques pour la collecte de la lumière naturelle (bâtiment Caisse- Gonges, Belgique).....	67
Figure 2.25 : Plafond anidolique intégré dans la salle de conférence (bâtiment Techno Park, Allemagne).....	68

Chapitre 3

Figure 3.1 : A gauche, champ visuel pour une position assise ; A droite, champ visuel pour une position debout.....	76
Figure 3.2 : La vision humaine binoculaire et monoculaire	77
Figure 3.3 : A gauche, Plans photométriques pour la construction d'une LIDC ; A droite, LIDC d'un type de plafond anidolique.....	99

Chapitre 4

Figure 4.1 : Vue intérieure d'un modèle physique de 1 :4.....	112
Figure 4.2 : Modèle physique construit en bois.....	113
Figure 4.3 : La logique de formulation du questionnaire.....	118
Figure 4.4 : Le questionnaire préliminaire utilisé dans le prétest.....	119
Figure 4.5 : Le questionnaire développé 'la version définitive'.....	120
Figure 4.6 : La partie 1 du questionnaire développé.....	121
Figure 4.7 : La partie 2 du questionnaire développé.....	121
Figure 4.8 : La partie 3 du questionnaire développé.....	122
Figure 4.9 : La partie 4 du questionnaire développé (série 1 des questions).....	123
Figure 4.10 : La partie 4 du questionnaire développé (série 2 des questions).....	123
Figure 4.11 : La partie 4 du questionnaire développé (série 3 des questions).....	124
Figure 4.12 : La partie 4 du questionnaire développé (série 4 des questions).....	124
Figure 4.13 : Le mode auto-administration du questionnaire.....	125

Chapitre 5

Figure 5.1 : A gauche, plafond anidolique intégré ; A droite, dispositif anidolique intégré..	134
Figure 5.2 : Profil théorique de système anidolique.....	135
Figure 5.3 : La détermination de l'angle θ : A gauche, les variables liées à la largeur du système ; A droite, les variables liées à la longueur de l'élément anidolique extérieur.....	136
Figure 5.4 : Détermination de l'angle θ'	137
Figure 5.5 : Système anidolique de 'Type 4'.....	137
Figure 5.6 : Les valeurs proposées pour l'élément (a').....	138
Figure 5.7 : Les valeurs proposées pour l'élément ($l'm$).....	138
Figure 5.8 : Les valeurs proposées pour l'élément (L).....	138
Figure 5.9 : Coupe sur le modèle expérimental.....	143
Figure 5.10 : Simulation de modèle de référence.....	144

Figure 5.11 : Simulation du modèle de référence à partir de 3m de la fenêtre.....	145
Figure 5.12 : Simulation du ‘modèle 1’	146
Figure 5.13 : Simulation du ‘modèle 1’ à partir de 2m de la fenêtre.....	146
Figure 5.14 : Simulation du modèle ‘2’ et ‘3’ au niveau de l’axe AA.....	147
Figure 5.15 : Simulation du modèle ‘2’ et ‘3’ au niveau de l’axe BB	147
Figure 5.16 : Simulation du modèle ‘4’ et ‘5’ au niveau de l’axe AA.....	148
Figure 5.17 : Simulation du modèle ‘4’ et ‘5’ au niveau de l’axe BB.....	148
Figure 5.18 : Simulation du modèle ‘6’ et ‘7’ au niveau de l’axe AA.....	149
Figure 5.19 : Simulation du modèle ‘6’ et ‘7’ au niveau de l’axe BB.....	149
Figure 5.20 : Simulation du modèle ‘8’ et ‘9’ au niveau de l’axe AA.....	150
Figure 5.21 : Simulation du modèle ‘8’ et ‘9’ au niveau de l’axe BB.....	150
Figure 5.22 : Simulation du modèle ‘10’ et ‘11’ au niveau de l’axe AA.....	151
Figure 5.23 : Simulation du modèle ‘10’ et ‘11’ au niveau de l’axe BB.....	151
Figure 5.24 : Simulation du modèle ‘12’ au niveau de l’axe AA et BB.....	152
Figure 5.25 : Simulation des douze modèles de PAI au niveau de l’axe AA.....	152
Figure 5.26 : Simulation des douze modèles de PAI au niveau de l’axe BB.....	153
Figure 5.27 : Simulation des douze modèles au niveau de l’axe AA à partir de 3m de la fenêtre	154
Figure 5.28 : Simulation des douze modèles au niveau de l’axe BB à partir de 3m de la fenêtre	154
Figure 5.29 : Comparaison du rendement quantitatif des modèles 3, 7 et 11 au niveau de l’axe BB.....	155
Figure 5.30 : Comparaison des douze modèles de système anidolique intégré	156
Figure 5.31 : Comparaison entre le rendement du modèle 3 de PA I, du modèle 11 de SAI et le modèle de référence au niveau de l’axe AA et BB	157
Figure 5.32 : Comparaison entre le rendement du modèle 3 de PA I, du modèle 11 de SAI et le modèle de référence à partir de 3m de profondeur	158
Figure 5.33 : Courbe de l’éclairement en fonction de la profondeur obtenu par Matlab : Axe AA.....	159
Figure 5.34 : Courbe de l’éclairement en fonction de la profondeur obtenu par Matlab : Axe BB.....	160

Chapitre 6

Figure 6.1 : Le modèle expérimental.....	168
Figure 6.2 : Coupe sur le modèle de test.....	168
Figure 6.3 : Dimensions du PAI.....	168
Figure 6.4 : La réalisation de la maquette. Etape 1 : construction des parois par un papier mousse et les recouvert par un papier blanc afin d’assurer une bonne étanchéité	170
Figure 6.5 : La réalisation de la maquette. Etape 2 : La composition des parois, les recouvertes par un autocollant noir et la réalisation du toit et du faux plafond.....	170
Figure 6.6 : La réalisation de la maquette. Etape 3 : La réalisation du plafond anidolique intégré.....	170
Figure 6.7 : La réalisation de la maquette. Etape 4 : La réalisation des trous pour effectuer les mesures et les instruments utilisés.....	171
Figure 6.8 : La réalisation de la maquette : Le modèle final.....	171

Figure 6.9 : Le document graphique du modèle à grande échelle : A, plan du modèle ; B, façade latérale ; C, façade postérieure.....	172
Figure 6.10 : Revêtement du petit côté du modèle physique.....	173
Figure 6.11 : Revêtement du grand côté du modèle physique	173
Figure 6.12 : L'assemblage des parois.....	174
Figure 6.13 : Le revêtement du sol.....	174
Figure 6.14 : Le revêtement de la face intérieure (en blanc) et la face extérieure (en aluminium) du faux plafond.....	175
Figure 6.15 : Le revêtement de la face intérieure du plafond en aluminium.....	175
Figure 6.16 : Les matériaux utilisés pour l'étanchéité de la maquette à la lumière	176
Figure 6.17 : A gauche, les trous de mesure ; A droite ; le traitement de la jonction entre les parois.....	176
Figure 6.18 : La réalisation du PAI : A, l'assemblage des différentes composantes du système ; B, le renforcement de l'étanchéité de la face extérieure ; C, la couverture de la face intérieure par un papier aluminium	177
Figure 6.19 : La modélisation du mobilier intérieur	178
Figure 6.20 : A gauche, la fixation des roues ; A droite, le modèle physique final.....	178
Figure 6.21 : Le test de fiabilité des modèles construits	179
Figure 6.22 : A droite, la distribution de la lumière dans le conduit lumineux ; A gauche, la distribution de la lumière à l'intérieur du modèle	179
Figure 6.23 : A gauche, luxmètre ; à droite, appareil photo et Fish Eye	181
Figure 6.24 : L'intervalle entre les points de mesure dans le sens transversal	182
Figure 6.25 : L'intervalle entre les points de mesure dans le sens longitudinal	182
Figure 6.26 : A gauche, plan du modèle montrant la position des quatre positions ; A droite, perspective intérieure montrant la position et la hauteur les points P2 et P4... ..	183
Figure 6.27 : Les étapes de traitement des images sphériques prises à l'intérieur du modèle physique	185

Chapitre 7

Figure 7.1 : Validation des résultats obtenus dans les deux modèles au niveau de l'axe AA	194
Figure 7.2 : Validation des résultats obtenus dans les deux modèles au niveau de l'axe BB	194
Figure 7.3 : Le taux de variation de l'éclairement dans les deux modèles	195
Figure 7.4 : Validation mesures/ simulation au niveau de l'axe AA	196
Figure 7.5 : Validation mesures/ simulation au niveau de l'axe BB	196
Figure 7.6 : Le taux de variation de l'éclairement (simulation et mesure).....	197
Figure 7.7 : Valeurs d'éclairements obtenues par le modèle de référence et le modèle de test : A gauche, axe AA ; A droite, axe BB.....	198
Figure 7.8 : Rendement journalier du PAI avec sept sorties de light duct	200
Figure 7.9 : Plan d'un local équipé d'un PAI avec trois sorties de light duct	200
Figure 7.10 : Rendement journalier avec quatre sorties de light duct.....	201
Figure 7.11 : Rendement saisonnier du PAI.....	201
Figure 7.12 : Effet de l'orientation sur le rendement d'un PAI dans un modèle physique... ..	202

Figure 7.13 : L'autonomie d'énergie donnée par le modèle 3 de PAI.....	203
Figure 7.14 : A gauche, l'AEA du système On/Off Switching ; A droite, l'AEA du système Dimming Switch.....	204
Figure 7.15 : Les quatre positions de prise des images sphériques.....	205
Figure 7.16 : Position 1 : A gauche : modèle avec système; A droite, modèle sans système.	205
Figure 7.17 : Position 2 : A gauche : modèle avec système; A droite, modèle sans système.	206
Figure 7.18 : Position 3 : A gauche : modèle avec système; A droite, modèle sans système.	206
Figure 7.19 : Position 4 : A gauche : modèle avec système; A droite, modèle sans système.	206
Figure 7.20 : Images sphériques traitées prises au Nord dans P2 et P4 aux différentes heures : A gauche, position 2 ; A droite, position 4.....	209
Figure 7.21 : Le D. GLP calculé au nord dans P2 et P4 aux différentes heures.....	210
Figure 7.22 : Images sphériques traitées prises au sud dans P2 et P4 aux différentes heures : A gauche, position 2 ; A droite, position 4.....	212
Figure 7.23 : Le D. GLP calculé au sud dans P2 et P4 aux différentes heures.....	213
Figure 7.24 : Images sphériques traitées prises à l'Est dans P2 et P4 aux différentes heures : A gauche, position 2 ; A droite, position 4.....	215
Figure 7.25 : Le D. GLP calculé à l'est dans P2 et P4 aux différentes heures.....	216
Figure 7.26 : Images sphériques traitées prises à l'Ouest dans P2 et P4 aux différentes heures : A gauche, position 2 ; A droite, position 4.....	218
Figure 7.27 : Le D. GLP calculé à l'ouest dans P2 et P4 aux différentes heures.....	219

Chapitre 8

Figure 8.1 : Test de fréquence	230
Figure 8.2 : Test de normalité de Kolmogorov et Shapiro	230
Figure 8.3 : ACM pour la Position 'P1'	231
Figure 8.4 : ACM pour la Position 'P2'	235
Figure 8.5 : ACM pour la Position 'P3'	238
Figure 8.6 : ACM pour la Position 'P4'	241

Chapitre 9

Figure 9.1 : Satisfaction par rapport aux scénarios.....	256
Figure 9.2 : Uniformité par rapport aux scénarios.....	259
Figure 9.3 : Quantité par rapport aux scénarios.....	262
Figure 9.4 : Contraste par rapport aux scénarios	265
Figure 9.5 : Appréciation_1 par rapport aux scénarios	268
Figure 9.6 : Appréciation_2 par rapport aux scénarios.....	269
Figure 9.7 : Appréciation_3 par rapport aux scénarios.....	270
Figure 9.8 : Appréciation_4 par rapport aux scénarios	271
Figure 9.9 : Ambiance_1 par rapport aux scénarios.....	272
Figure 9.10 : Ambiance_2 par rapport aux scénarios	273
Figure 9.11 : Description_1 pour P3 par rapport aux scénarios.....	275
Figure 9.12 : Description_2 pour P1, P2 et P3 par rapport aux scénarios.....	276
Figure 9.13 : Luminosité pour P1, P2 et P4 par rapport aux scénarios.....	277
Figure 9.14 : Graphique de dispersion de points pour les variables DGIP et effectif	279

Figure 9.15 : Graphiques de dispersion de points pour les variables qualitatives et le D.GI.P dans la 'P1'	280
Figure 9.16 : Graphiques de dispersion de points pour les variables qualitatives et le D.GI.P dans la 'P2'	281
Figure 9.17 : Graphiques de dispersion de points pour les variables qualitatives et le D.GI.P dans la 'P3'	282
Figure 9.18 : Graphiques de dispersion de points pour les variables qualitatives (satisfaction, uniformité, quantité et contraste) et le D.GI.P dans la 'P4'	283
Figure 9.19 : Graphiques de dispersion de points pour les variables qualitatives (appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3 et appréciation_4) et le D.GI.P dans la 'P4'	284
Figure 9.20 : Graphiques de dispersion de points pour les variables qualitatives (ambiance_1, ambiance_2) et le D.GI.P dans la 'P4'	285

Liste des tableaux

Tableaux	Page
Tableau 1.1 : Les systèmes d'éclairage naturel avec dispositif d'ombrage intégré adéquats au climat chaud	32
Tableau 1.2 : Les systèmes de redirection de la lumière naturelle sans dispositif d'ombrage intégré adéquats au climat chaud	33
Tableau 1.3 : Les systèmes de transport de la lumière naturelle sans dispositif d'ombrage intégré adéquats au climat chaud	35
Tableau 2.1 : Principaux avantages et inconvénients de dispositifs anidolique.....	54
Tableau 3.1 : Valeurs de l'éclairage requises pour l'usage d'un bureau	82
Tableau 3.2 : Critère de choix de l'éclairage proposé par IESNA	82
Tableau 3.3 : Valeurs de correction proposée par IESNA	82
Tableau 3.4 : Valeurs de l'éclairage requises pour l'usage d'un bureau	83
Tableau 3.5 : Les critères de l'éblouissement pour le DGI.....	98
Tableau 4.1 : Tableau récapitulatif des paramètres de simulation selon les recherches précédentes.....	111
Tableau 4.2 : Tableau récapitulatif des facteurs de réflexion des parois du modèle physique selon les recherches précédentes.....	113
Tableau 4.3 : Echelle d'évaluation de l'éblouissement utilisée.....	115
Tableau 5.1 : Dimensions des 12 modèles de système anidolique proposés pour la simulation informatique	139
Tableau 5.2 : Les valeurs d'EEG reçues à Biskra sur une surface horizontale.....	141
Tableau 5.3 : Comparaison des résultats obtenus par les modèles 3, 7 et 11.....	155
Tableau 5.4 : Valeurs d'éclairage données par le modèle 3 de PAI, axe AA.....	159
Tableau 5.5 : Valeurs d'éclairage données par le modèle 3 de PAI, axe BB	160
Tableau 6.1 : La réflexion des cartons utilisés dans le modèle réduit de 1/12.....	169
Tableau 6.2 : Les caractéristiques géométriques et photométriques des modèles physiques.....	180
Tableau 7.1 : Valeurs d'éclairages mesurés à partir du modèle de référence	190
Tableau 7.2 : Valeurs d'éclairages mesurés à partir du modèle de 1/12 équipé d'un PAI.....	190
Tableau 7.3 : Valeurs d'éclairages mesurés à partir du modèle de 1/4 équipé d'un PAI.....	191
Tableau 7.4 : Valeurs d'éclairages obtenues par la simulation informatique.....	191
Tableau 7.5 : Valeurs d'éclairages intérieurs étalonnées des trois modèles.....	192
Tableau 7.6 : Valeurs d'éclairages intérieurs étalonnées des trois modèles.....	193
Tableau 7.7 : La distribution de 'éclairage dans les trois zones dans les deux modèles...	198
Tableau 7.8 : L'uniformité de l'éclairage dans les trois zones.....	199
Tableau 7.9 : Les valeurs de D. GI. P ainsi que les caractéristiques de la source d'éblouissement obtenus dans les deux modèles dans les quatre positions.....	207
Tableau 7.10 : Les caractéristiques de la source d'éblouissement obtenu dans la position 2 et 4 au niveau de l'orientation Nord.....	210
Tableau 7.11 : Les caractéristiques de la source d'éblouissement obtenu dans la position 2 et 4 au niveau de l'orientation Sud	213
Tableau 7.12 : Les caractéristiques de la source d'éblouissement obtenu dans la position 2 et 4 au niveau de l'orientation Est.....	216

Tableau 7.13 : Les caractéristiques de la source d'éblouissement obtenu dans la position 2 et 4 au niveau de l'orientation Ouest	219
Tableau 8.1 : Statistique de fiabilité : réponses à échelle	229
Tableau 8.2 : Statistique de fiabilité : réponses à choix multiple.....	229
Tableau 8.3 : Statistique de fiabilité : réponses à choix unique	229
Tableau 8.4 : Valeurs-p obtenue par le test de Kolmogorov et Shapiro	230
Tableau 8.5 : Test de Spearman pour la Position 'P1' : Groupe 1.....	232
Tableau 8.6 : Test de Spearman pour la Position 'P1' : Groupe 2.....	233
Tableau 8.7 : Test de Spearman pour la Position 'P1' : Groupe 3.....	234
Tableau 8.8 : Test de Spearman pour la Position 'P2' : Groupe 1.....	236
Tableau 8.9 : Test de Spearman pour la Position 'P2' : Groupe 2	237
Tableau 8.10 : Test de Spearman pour la Position 'P3' : Groupe 1	239
Tableau 8.11 : Test de Spearman pour la Position 'P3' : Groupe 2	240
Tableau 8.12 : Test de Spearman pour la Position 'P4' : Groupe 1	241
Tableau 8.13 : Test de Spearman pour la Position 'P4' : Groupe 2	242
Tableau 8.14 : Test ANOVA pour la Position 'P1'.....	243
Tableau 8.15 : Test ANOVA pour la Position 'P2'.....	245
Tableau 8.16 : Test ANOVA pour la Position 'P3'.....	246
Tableau 8.17 : Test ANOVA pour la Position 'P4'.....	247
Tableau 8.18 : Tableau récapitulatif des techniques statistiques utilisées dans les quatre positions.....	251
Tableau 9.1 : Satisfaction par rapport aux scénarios	255
Tableau 9.2 : Uniformité par rapport aux scénarios.....	259
Tableau 9.3 : Quantité par rapport aux scénarios.....	262
Tableau 9.4 : Contraste par rapport aux scénarios	265

Nomenclature

Abréviations

NTNU	L'Université norvégienne des sciences et de la technologie
EPB	Performance Energétique des Bâtiments
LCP	Laser Cut Panels
EOH	Eléments Optiques Holographiques
LESO-PB	Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique de Bâtiment.
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
AIE	Agence Internationale de l'Energie
ADS	Anidolic Daylighting System (Système anidolique d'éclairage naturel)
ONI	Optique Non- Imagerie
ACE	Angle de Collecte Extrême
P	Point focal
CPC	Concentrateur/collecteur Parabolique Composé
CEC	Concentrateur Elliptique Composé
PAI	Plafond Anidolique Intégré
NUS	Université Nationale de Singapour
GES	Gaz à Effet de Serre
CAZ	Collecteur Anidolique Zénithal
PMMA	Poly Méthyl MéthAcrylate
CIE	Comité Internationale de l'Eclairage
FLJ	Facteur de Lumière du Jour
Cd/m ²	Candelas par mètre carré
HDR	High Dynamic Range
DGIP	Daylight Glare Index Probability
DGI	Daylight Glare Index
UGR	Useful Glare
CGI	CIE Glare Index
VCP	Visual Comfort Probability
ACM	Analyse Des Correspondances Multiples
DA	Daylight Autonomy 'l'autonomie de l'éclairage'
LIDC	La Courbe de la Distribution de l'Intensité Lumineuse
EU	Eclairage Utile
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
AFE	Association Française de l'Eclairage
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
GERACT	Groupe d'Etude et de Réalisations pour l'Amélioration des Conditions de Travail.
TCC	Température de Couleur Colorée
SPD	Distribution Spectrale de la Puissance de la Source lumineuse
IRC	Indice de Rendu de Couleur
FRC	Facteur de Redu de Contraste
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
SAI	Système Anidolique Intégré
EEG	Eclairage Extérieur Global
Scé_1	Scénario 1
Scé_2	Scénario 2
VF	Version Finale
VI	Version Initiale

TV	Taux de Variation
P1	Position 1
P2	Position 2
P3	Position 3
P4	Position 4
R _{parois intérieure}	Réflexion des parois intérieures
R _{Simulation}	Réflexion des parois du modèle simulé
R _{Modèle 1/12}	Réflexion des parois du modèle physique (1/12)
R _{CL}	Réflexion des parois du conduit lumineux
R _{sol modèle 1/12}	Réflexion du sol du modèle physique (1/12)
R _{sol simulation}	Réflexion du sol du modèle simulé (1/12)
R _{f int du CL}	Réflexion de la face intérieure du conduit lumineux
R _{f int du faux plafond}	Réflexion de la face intérieure du faux plafond
R _{f int de l'EA}	Réflexion de la face intérieure de l'élément anidolique

Symboles mathématiques

FL _{entrant}	Flux lumineux entrant
FL _{sortant}	Flux lumineux sortant
pr	Facteur de réflexion
L	Largeur de tube lumineux
f	La distance focale de chaque parabole
a	La largeur de l'ouverture de sortie
a'	La largeur de l'ouverture d'entrée
L:	La longueur horizontale de la configuration de deux paraboles
L ₂	La largeur de l'élément anidolique externe
θ :	L'angle formé par l'horizontale et une ligne reliant le bord d'entrée avec le bord opposé de sortie
y:	L'axe horizontal du profil de système
z:	L'axe vertical du profil de système
D _{entré}	Secteur angulaire optimal d'entrée
D _{sortie}	Secteur angulaire optimal de sortie
G	Glare 'Eblouissement'
C	Contraste
L _c	Luminance de la cible
L _f	Luminance du fond
CC	Composante du Ciel
CRI	Composante Réfléchie Intérieure
CRE	Composante Réfléchie Extérieure
L _s	Luminance de chaque partie de la source [cd / m ²],
L _b	Luminance moyenne des surfaces situant dans le champ de vision [cd / M ² f],
L _w	Luminance moyenne pondérée de la fenêtre en fonction des zones relatives de ciel, de l'obstruction, et de la masse [cd / m ²],
ω	L'angle solide de la fenêtre [sr],
Ω	L'angle solide de la source, modifié en fonction de la ligne de visée
B	Angle d'incidence = La latitude de lieu = 34°
α	Angle entre l'ouverture d'entrée avec le plan horizontal:
l'm	La largeur extérieur de l'élément anidolique
lm	La largeur de l'ouverture d'entrée
a'	La largeur de l'ouverture de sortie

Modélisation du système anidolique pour un environnement lumineux intérieur intégré

a	La largeur de conduit lumineux
θ	L'angle formé par le plan horizontal avec la ligne reliant le bord d'entrée avec le bord de sortie opposé.
L'm	La longueur du conduit entre les deux éléments anidolique.
L	La longueur du conduit lumineux
f	La distance focale de chaque parabole
y	L'axe horizontal du profil de système et
z	L'axe vertical du profil de système.

Remerciements

Tout d'abord, j'offre ma plus sincère gratitude à mon encadreur en Algérie, Prof. Zemmouri Noureddine qui m'a donné l'honneur de travailler sous sa supervision. Je n'ai pas de mots pour exprimer tous mes remerciements pour ses conseils tout au long de ces années, pour tout son soutien, pour son enthousiasme pour ce travail et qui grâce à son aide, la thèse est arrivée à terme. Les remerciements les plus sincères s'adressent aussi à mes Co-encadreurs en Italie, Prof. Morello Eugenio et Prof. Piga Barbara. E.A pour leur excellente supervision de mon travail et de leurs conseils inestimables pendant la période de ma présence en Italie.

Je suis très reconnaissante au Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique algérien de m'avoir offert une bourse d'études qui m'a vraiment aidée à achever cette recherche dans les temps. Je remercie également Politecnico di Milano, en particulier Morello Eugenio et Piga Barbara de m'avoir donné la possibilité de passer un stage de dix-huit mois au sein de leur laboratoire 'LabSimUrb' à Milan, Italie. Je remercie infiniment mes collègues: Giuseppe, Marco, Nicola, Mattia, Cecilia, Zen, Gabriella et Irene de m'avoir offert un souvenir inoubliable pendant mon séjour à Milan.

Un remerciement spécial à Mr Belakhal Azzeddine pour son conseil et son soutien constant, à mes collègues de travail Mr Mezerdi Toufik et Medouki Mostafa pour leur aide, sans oublier tous les étudiants qui ont participé à mon expérience.

Je voudrais remercier toute ma famille, mes parents et mon frère, qui malgré la distance, leur soutien a été inestimable ainsi que leur encouragement tout au long de mon séjour à l'étranger. Le plus grand merci à mon mari 'Yacine', non seulement parce qu'il m'a beaucoup aidée, mais aussi pour sa compréhension et son soutien généreux et sans réserve. A la fin, je dédie ce travail à mes deux princesses 'Sarah' et 'Lina'.

Safa

Biskra, le 23 Mars 2018

Introduction générale

L'éclairage naturel dans les bureaux est une thématique qui a été abordée dans plusieurs études qui ont traité la problématique de la lumière du jour et son effet sur les occupants sous des aspects visuels et non visuels. Des résultats rapportés par des recherches spécialisées démontrent que les employés de bureaux préfèrent la lumière du jour et que cette dernière offre aux occupants plusieurs avantages sur différents plans biologique, physiologique et psychologique. De plus, ces études ont constaté une hausse de productivité lorsque les gens travaillent dans de bonnes conditions d'éclairage naturel. Il a été prouvé également qu'une bonne conception d'éclairage naturel peut contribuer à faire des économies substantielles en électricité, ce qui réduit la facture énergétique du bâtiment. La qualité de l'environnement lumineux intérieur peut être atteinte si on assure des niveaux d'éclairages adéquats, une bonne uniformité de l'éclairage, un bon rapport de contraste et une bonne étude du phénomène de l'éblouissement. De plus, le contexte et le climat influent considérablement sur la qualité de la lumière intérieure. Les régions ayant un climat caractérisé par un gisement solaire élevé peuvent bénéficier de conditions favorables d'éclairage naturel pour réaliser des économies d'énergie et assurer un confort visuel optimal dans les espaces de bureaux. Cependant, des problèmes potentiels peuvent résulter si le rayonnement solaire capté n'est pas contrôlé ce qui conduit à générer plusieurs gênes visuels et thermiques tels que l'éblouissement d'inconfort, le contraste excessif, surtout entre la source lumineuse et le fond de l'espace ainsi que l'augmentation des charges thermique pendant l'été qui affectent les systèmes de climatisation active du bâtiment. La conception d'un environnement de travail de haute qualité nécessite de prendre en compte plusieurs éléments qui concernent à la fois l'environnement physique du bâtiment ainsi que l'état physiologique et émotionnel de l'occupant.

La problématique

Dans les bureaux contemporains, les employés passent plus en plus de temps derrière leurs bureaux. Ces derniers n'ont pas souvent la possibilité de choisir l'emplacement de leurs postes de travail ; ils sont contraints dans la majorité des cas à travailler dans des environnements lumineux de mauvaise qualité. **Un problème** majeur se pose lorsque ces espaces sont de grande profondeur où le concepteur se trouve face à plusieurs exigences quantitatives et qualitatives à la fois. Dans des conditions de ciel de très forte luminosité -le cas de notre étude- la difficulté face à laquelle les concepteurs sont confrontés est comment apporter la lumière du jour jusqu'au fond de l'espace sans avoir des problèmes d'éblouissement ou de taches solaires intérieures.

Face à cette situation, **des solutions d'ordre architectural et d'autres d'ordre technique peuvent être adoptées**. Ces dernières décennies, les techniques et les systèmes d'éclairage naturel dans le bâtiment ont connu un véritable essor. Et vu le progrès technologique accompli dans le domaine architectural, ces derniers sont conçus afin de répondre à des exigences spatiales et climatiques spécifiques de manière optimale. **D'où, notre questionnement** : Est-il possible de développer un système d'éclairage naturel spécifique aux caractéristiques climatiques et lumineuses de la ville de Biskra qui assure un environnement lumineux intérieur de qualité ? Est-ce que le système développé peut être utilisé dans les bureaux de grandes profondeurs tout en garantissant un confort visuel et en empêchant les gênes visuelles qui peuvent influencer le rendement des occupants ?

Hypothèses

L'ensemble des questions posées dans la problématique nous a conduit de manière assez logique à proposer **les hypothèses** suivantes :

Hypothèse 1 : Un bon choix d'un système d'éclairage naturel peut offrir une uniformité visuellement confortable, réduire le risque de l'éblouissement et améliorer la performance énergétique globale du bâtiment.

Hypothèse 2 : Sous les conditions spécifiques de notre cas d'étude, les systèmes anidoliques de transport de la lumière peuvent être performants et leurs rendements dépendent essentiellement de la configuration, des dimensions, des matériaux de fabrication, de l'orientation et de l'installation de ces systèmes.

Hypothèse 3 : La mesure de la qualité visuelle peut être effectuée en recourant à la méthode expérimentale et à l'enquête en quantifiant tous les critères relatifs à l'environnement visuel ayant une influence physiologique et psychologique sur les usagers.

Les objectifs

Ce travail présente une approche quantitative et qualitative dont **l'objectif principal** est de modéliser un système anidolique d'éclairage naturel qui correspondra le mieux aux caractéristiques climatiques et lumineuses de la ville de Biskra. D'autres objectifs sont fixés et sont résumés dans les points suivants :

- Assurer une bonne qualité visuelle par un bon facteur de lumière du jour, une bonne homogénéité de la distribution lumineuse dans tout le local en canalisant la lumière profondément et par la diminution de l'éblouissement et du contraste entre l'éclairement au fond de l'espace et la source lumineuse.

- Créer une ambiance lumineuse satisfaisante, résultantes du système anidolique modélisé, qui permet d'améliorer l'environnement visuel, augmenter la productivité des usagers et conduit également à améliorer la performance énergétique du bâtiment en réduisant la consommation d'électricité pendant le jour.

La méthodologie

Pour atteindre les objectifs cités précédemment, la méthodologie adoptée consiste à recourir à deux méthodes d'investigation et d'analyse couramment utilisées dans les études destinées à l'éclairage intérieur. La première est 'la méthode d'expérimentation simulée' qui a été proposée pour la modélisation et l'évaluation de la performance du système de Plafond Anidolique Intégré et à créer une atmosphère visuellement confortable pour les usagers d'un bureau. Dans cette dernière, on a utilisé 'un modèle physique' et 'un modèle numérique' alors que la deuxième méthode est 'la méthode d'enquête par questionnaire'. Le principal intérêt de cette méthode a porté sur l'évaluation de la qualité lumineuse à l'intérieur d'un modèle physique par l'intermédiaire d'un formulaire de questionnaire composé d'un ensemble de questions construites à partir des modèles précédents.

La structure de la thèse

La méthodologie adoptée pour notre investigation nous a conduit de manière assez logique à organiser notre travail de recherche dans **deux grandes parties**, dont chacune regroupe un ensemble de chapitres :

- **Une partie théorique** précédée par une introduction générale dans laquelle on a défini notre axe de recherche, la problématique, les hypothèses, les objectifs et la méthodologie. Cette partie constitue le bagage théorique nécessaire pour notre étude ; elle est composée de quatre chapitres : **Le premier chapitre** est une revue de la littérature sur tous les systèmes et les techniques d'éclairage naturel qui pourraient être appliqués dans des régions ayant un climat spécifique. Cette première lecture nous a montré que les systèmes anidoliques sont très performants dans des conditions identiques à notre cas d'étude, ces systèmes vont être étudiés en détail dans **le deuxième chapitre**. **Le troisième chapitre** propose d'évaluer l'environnement lumineux intérieur dans les espaces de bureaux en matière de normes, recommandations, outils et méthodes de conception de l'éclairage, les méthodes de calcul de la distribution lumineuse et les indicateurs de la performance les plus utilisés pour évaluer un système d'éclairage. Dans **le dernier chapitre**, nous allons fixer la méthodologie d'approche après avoir consulté plusieurs travaux similaires.

-**Une partie pratique**, qui regroupe cinq chapitres comprenant les résultats de notre investigation. **Le cinquième chapitre** consiste à modéliser un système anidolique spécifique qui répond aux exigences spatiales et lumineuses de la ville de Biskra. Ce modèle théorique sera étudié et analysé en adoptant une procédure expérimentale adéquate qui sera expliqué en détail dans **le sixième chapitre**. **Le septième chapitre** présente une évaluation quantitative dans le but d'avoir une idée générale sur la quantité de la lumière qu'offre notre système anidolique dans un espace à usage spécifique alors que dans **le huitième chapitre**, on propose une évaluation qualitative afin de déterminer la qualité lumineuse intérieure. **Le dernier chapitre** regroupe tous les résultats de type quantitatif et qualitatif qui ont été recueillis et qui seront présentés sous forme de discussions, de recommandations et de conclusion. Ce manuscrit sera clôturé par une conclusion générale, des recommandations, des perspectives futures de notre travail ainsi que les limites et les problèmes rencontrés.

PARTIE THEORIQUE

Cette partie consiste à recueillir tout le bagage théorique nécessaire à travers une revue de la littérature et un aperçu général sur les recherches antérieures afin de comprendre notre thématique et atteindre nos objectifs. Elle est structurée en quatre chapitres ordonnés et classés selon l'utilité et le contenu de chacun d'eux.

Le premier chapitre a pour but de faire un état de l'art sur tous les systèmes et les techniques d'éclairage naturel qui pourraient être appliqués dans des régions ayant un climat spécifique (climat chaud et fortement lumineux). Deux types de systèmes vont être étudiés après avoir déterminé la stratégie d'éclairage adoptée dans ces conditions climatiques. Il s'agit des systèmes d'éclairage munis d'un dispositif d'ombrage et des systèmes de redirection et de transport sans système d'ombrage intégré. Cette revue de la littérature a permis de sélectionner les systèmes d'éclairage les plus performants et a montré également que les systèmes anidoliques vont faire le sujet de notre recherche et constitueront l'élément principal du chapitre suivant. Pour cela, une analyse détaillée sur leur design, leur principe de fonctionnement, les matériaux de fabrication...etc. seront d'une grande utilité et seront présentés dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre est proposé pour étudier et bien déterminer l'environnement lumineux intérieur dans les espaces de bureaux. Normes, recommandations et exigences qui concernent la relation de la lumière avec le système visuel de l'utilisateur ainsi que les aspects visuels et non visuels de la lumière doivent être requis afin de pouvoir évaluer cette atmosphère dans des situations différentes. A travers ce chapitre, nous proposons également un aperçu sur les outils et les méthodes de conception de l'éclairage, les méthodes de calcul de la distribution lumineuse et les indicateurs de la performance les plus utilisés pour évaluer un système d'éclairage. Dans le dernier chapitre constituant ce bagage théorique, nous allons fixer la méthodologie d'approche après avoir consulté plusieurs travaux similaires. Il s'agit de la méthode d'expérimentation simulée à l'aide des logiciels numériques et des modèles physiques pour modéliser le système de Plafond Anidolique Intégré et la méthode d'enquête par questionnaire qui est pratiquement la seule qui soit adaptée aux enquêtes quantitatives et qui permet de traiter les données recueillies statistiquement.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTERATURE

Introduction

Selon Van Den Wymelenberg (2008), un bâtiment éclairé naturellement peut être décrit comme un bâtiment qui comprend plusieurs attributs clés : il doit considérer que la lumière du jour est la principale source d'éclairage diurne qui répond à toutes les exigences lumineuses des occupants, il doit également assurer un environnement intérieur visuellement et thermiquement confortable en maintenant la relation avec l'extérieur et enfin, il doit maximiser les économies d'énergie en matière d'éclairage électrique tout en minimisant la demande d'énergie de pointe. Conceptuellement, les types de bâtiments et les conditions climatiques de la région sont des points primordiaux qui devraient être pris en considération pour créer un éclairage intérieur satisfaisant. Un environnement lumineux agréable se définit comme étant une atmosphère qui permet d'exercer une activité donnée sans fatigues visuelles. Les gênes visuelles résultent soit par un fort contraste ou la présence d'une source d'éblouissement qui provient surtout de l'extérieur par la luminance visible depuis le ciel ou bien par le rapport de la luminosité du ciel à la luminosité ambiante d'un espace (Boubekri & Boyer, 1992; Chauvel, Collins, Dogniaux & Longmore, 1982; Hopkinson, 1970a, b, 1972). Avec le développement technologique que connaît le domaine de l'éclairage naturel des bâtiments ces dernières années, les problèmes lumineux peuvent être résolus par l'intégration des systèmes d'éclairages. Ces derniers permettent d'assurer à la fois un confort visuel optimal, une protection solaire contre la lumière directe du soleil, une répartition harmonieuse de la lumière, un éclairage satisfaisant pour les bâtiments de grande profondeur.

L'intérêt principal, à travers cet état de l'art, est de faire une investigation sur les différents systèmes d'éclairage naturel qui peuvent être intégrés dans les bâtiments situés dans un climat chaud. Cette étude exhaustive a pour but d'étudier les caractéristiques de ces systèmes en définissant leurs rôles, leurs principes de fonctionnement, les matériaux utilisés, les différents composants ainsi que les avantages et les inconvénients. Ce chapitre propose donc une description et une analyse de tous les systèmes d'éclairage naturel suivi par une synthèse sous forme de tableaux qui nous a permis d'évaluer la performance de tous les dispositifs étudiés et choisir par la suite le ou les systèmes d'éclairage qui correspond le mieux à notre cas d'étude.

1. 1. L'éclairage naturel dans le bâtiment

1.1. 1. Les bienfaits de la lumière naturelle

Nombreuses études ont été faites en mesure de démontrer l'importance de la lumière naturelle pour l'environnement et l'environnement construit. Elle est indispensable à notre équilibre vital, à notre santé, notre bien-être et plus encore. La lumière de jour constitue la première source d'énergie des écosystèmes terrestres. Elle interprète plusieurs rôles dans des domaines différents : elle a probablement été un facteur essentiel dans la formation et le développement de la vie sur terre, tant par le maintien d'une température ambiante favorable que par les réactions photochimiques telle la photosynthèse qu'elle génère. La lumière naturelle offre aux occupants un confort et des prestations de santé, é tant donné qu'elle joue un rôle biologique important dans le contrôle des rythmes physiologiques et psychologiques des êtres vivants (Boyce et al, 2003 ; Choi et al, 2012). Elle peut améliorer les performances des personnes même dans des conditions extrêmes (absence totale de l'éclairage électrique ou dans le cas d'un espace sans fenêtres). Des études ont montré que la lumière du jour contribue au bien-être humain (Lieberman, 1991) et augmente la productivité dans les écoles (Smiley, 1996). En outre, les fenêtres assurent une relation visuelle avec l'extérieur ce qui permet de donner aux usagers un sentiment de sécurité et d'orientation. De plus, la qualité de la lumière naturelle, sa composition spectrale et sa variabilité donne un environnement lumineux agréable que celui qu'apporte la lumière artificielle car, l'œil humain a évolué pour répondre à un stimulus de la lumière naturelle alors que l'éclairage électrique ne permet pas d'avoir le même stimulus. La lumière de jour influence significativement à la fois l'équilibre de la consommation d'énergie dans les bâtiments et l'activité humaine (Vine et al, 1998 ; Aries et al, 2008) car, une efficacité énergétique est obtenue lors du remplacement de la demande d'électricité pendant la journée par l'utilisation de l'énergie solaire et par conséquent une réduction importante des émissions de gaz à effet de serre. En 1994, Goulding et al, avaient remarqué qu'il y'a des coûts liés à l'utilisation maximale de l'éclairage naturel dans les bâtiments, pour cela il est important de comprendre les raisons selon lesquelles on doit introduire la lumière du jour à l'intérieur.

1.1.1. a. Les bienfaits sur la santé de l'occupant

La lumière naturelle a de nombreux effets physiques et psychologiques sur les êtres humains. Elle affecte les personnes grâce à ces deux aspects : l'intensité de la lumière et l'exposition spécifique à la composante ultraviolette (Baker et Steemers, 2002). L'intensité de la lumière qui entre dans les yeux d'une personne active une voie neuronale, qui régule le rythme circadien. L'exposition à la composante ultraviolette à des effets désirables qui comprend : la production

de vitamine D3, l'absorption accrue de calcium, l'absence de la sécrétion de la mélatonine, les effets sur la croissance et la sécrétion de plusieurs organes endocriniens, les effets sur l'activité musculaire, le taux de la respiration, le pouls, la pression artérielle, de l'humeur et une augmentation de l'état émotionnel (Hughes, 1983) alors que le manque d'exposition peut provoquer une carence en vitamine D (Lucas et Ponsonby, 2002). La lumière naturelle est perçue comme plus naturelle, agréable, lumineuse et stimulante qui fournit des niveaux plus élevés de détente et de confort visuel avec moins de fatigue. Il a été ignoré pendant longtemps que le manque de lumière était une source de dépression, de fatigue, et un facteur provoquant une augmentation du stress, voire dans les cas extrêmes des tendances suicidaires. Le manque de lumière retarderait la production de la mélatonine qui est sécrétée par la glande pinéale mais aussi par la rétine. Cette hormone intervient dans l'endormissement et une baisse de celle-ci provoque une sensation de fatigue pendant la journée. La lumière de jour peut fournir, avec efficacité, de hauts niveaux d'éclairement qui peuvent contribuer à une bonne santé, au confort et une bonne productivité (Leslie, 1994). Elle affecte également de façon significative la satisfaction des occupants qui est l'un des aspects les plus importants de confort (Abdou, 1997; Cowling, Coyne & Bradley, 1990; Wotton & Barkow, 1983).

1.1.2. Ces effets sur la productivité

L'effet de l'éclairage sur la productivité est ambigu. Le plus grand avantage économique de l'éclairage naturel est le meilleur potentiel d'augmenter la productivité des travailleurs. La présence d'un éclairage naturel ainsi qu'une connexion avec le monde extérieur améliorent fortement la satisfaction des occupants, le confort intérieur, diminuent le niveau de stress et optimisent le rendement des travailleurs (Abdou, 1997; Clanton, 1996). De nombreux programmes de recherche ont rapporté que, grâce à l'amélioration des conditions environnementales intérieures y compris un éclairage naturel suffisant dans les lieux de travail, la production des travailleurs était augmentée avec un pourcentage qui varie entre 5 et 20 % (Abdou, 1997; Nicklas & Bailey, 1996; Penney & Althof, 1990; Riegel, Windheim, Davy & Shanus, 1983). Alors qu'une installation d'éclairage qui ne répond pas aux attentes des utilisateurs peut être considérée comme inacceptable même si elle répond aux conditions de la performance visuelle car elle peut avoir un impact sur l'exécution des tâches, la motivation et donc la productivité (Boyce 2003, Gligor 2004).

La productivité est affectée par nombreux facteurs, il y'a le stress, la santé et la satisfaction du travail effectué. Alors que certains de ces facteurs sont liés à la gestion de l'organisation et de la personnalité des gens comme le type de travail par exemple. Alternativement, des études

psychologiques ont montré que l'environnement physique a également un effet sur le bien-être et la satisfaction des gens et qui sont liés à la productivité. Boyce et al. (2003) ont souligné que l'éclairage peut changer l'humeur des occupants dans un bâtiment. D'autres études ont suggéré que les avantages de la lumière naturelle sur la productivité peuvent être mesurés par la réduction de la fréquence des visites médicales et par le nombre d'heures ou de jours de maladie prises par les salariés (Boyce et al, 2003). Une étude réalisée par Moore en 1981 sur les demandes de soins des prisonniers a révélé que ceux avec des fenêtres donnant sur les collines font moins d'appels de soins et de maladies que ceux avec une vue donnant sur une cour.

1.1.3. Son impact sur la consommation d'énergie

L'utilisation de la lumière naturelle a de nombreuses implications sur la consommation d'énergie dans les bâtiments. Elle est plus efficace que la lumière électrique car, elle fournit plus de lumière avec moins de chaleur qu'une source artificielle. En conséquence, la lumière du jour permet également de réduire les besoins de refroidissement d'un bâtiment jusqu'à 15 % (Muhs, 2000). Le secteur résidentiel et tertiaire représente 40 % de la consommation totale d'énergie (Meijer, 2009 ; EPB, 2010) et 36 % des émissions de CO₂. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), l'éclairage artificiel constitue 19 % de la consommation électrique dans le monde entier. En agissant sur l'efficacité énergétique des bâtiments, il est possible de réduire la consommation d'énergie et donc les émissions de CO₂ dans l'atmosphère (Blok, 2005 ; Alrubaih et al, 2013). En 1996, Lancashir et al., ont signalé que chaque kWh d'énergie économisée empêche l'émission de 680,39 g de dioxyde de carbone, 5,67 g de dioxyde de soufre, et 2,27 g d'oxyde d'azote. De plus, dans les bâtiments classiques, entre 75 % et 80 % de la consommation de l'éclairage électrique pourraient être gagnées grâce à l'utilisation des technologies d'éclairage naturel avancées et un éclairage artificiel performant et en appoint de l'éclairage naturel ainsi que des commandes et une gestion d'éclairage efficaces (Kristensen, 1994, Hayman et al. 2000).

1.1.2. La stratégie d'éclairage naturel

La lumière naturelle joue un rôle essentiel sur la qualité du rapport entre le bâtiment et son environnement. Les stratégies de l'éclairage naturel peuvent contribuer à réduire la consommation énergétique dans les bâtiments ainsi que les émissions de gaz à effet de serre par la réduction des besoins de leur éclairage électrique et de refroidissement (Scartezzini et al, 1994). Elle a pour but également de répondre aux exigences de confort visuel des occupants. La lumière de jour reçue à l'intérieur d'un espace est la résultante de trois composantes : la lumière directe due au ciel et éventuellement au soleil, déterminée par la partie de ciel visible à

travers les ouvertures, la composante lumineuse due aux réflexions de la lumière sur les surfaces extérieures et, enfin, celle due aux réflexions à l'intérieur du local. La stratégie de la lumière naturelle doit tenir compte de ces trois composantes. Elle vise à mieux capter et faire pénétrer la lumière naturelle, puis à mieux la répartir et la focaliser. On veillera aussi à contrôler la quantité de lumière présente dans un espace afin d'éviter toutes sources de gêne visuel. La stratégie de la lumière naturelle est aussi l'étude de la relation entre la lumière naturelle et le bâtiment selon cinq concepts destinés à favoriser la meilleure utilisation possible de la lumière naturelle dans le bâtiment : 1- Capter, 2- Transmettre, 3- Distribuer, 4- Se protéger, 5- Contrôler. Ces concepts dépendent du climat dans lequel le bâtiment se trouve.

1.1.2. a. La stratégie d'éclairage dans un climat chaud

Sous un climat chaud, on favorise la stratégie du froid, on se concentre sur l'étude de l'implantation du bâtiment, de l'orientation des ouvertures, de l'isolation thermique, de l'organisation spatiale...etc. De plus, des systèmes de ventilation et de climatisation sont utilisés afin d'assurer un confort thermique estival. Le problème dans ce type de climat réside dans la stratégie d'éclairage qui diffère d'une saison à l'autre. En hiver, on peut recourir à la stratégie d'éclairage adoptée dans les climats tempérés. En été, il y a le risque de surchauffe qu'on doit éviter. La conception traditionnelle dans les régions chaudes et arides consiste à empêcher la composante directe du rayonnement solaire à pénétrer à l'intérieur des bâtiments. Cette stratégie peut être une solution efficace pour réduire le risque de surchauffe et d'inconfort visuel qui résulte de la présence de la tache solaire, d'une mauvaise répartition de la lumière dans l'ensemble de l'espace, de la luminosité excessive ainsi que l'éblouissement. De nombreux types de protections solaires existent, elles sont classées de deux manières différentes, soit en fonction de leur position par rapport au vitrage (intérieure, en interface ou extérieure), soit de leur mobilité ; on distingue alors, les protections permanentes (vitrages spéciaux, films autocollants), fixes (auvents, avancées architecturales) et mobiles (stores extérieurs, volets). Le choix d'une protection solaire doit se faire en fonction de l'orientation de la fenêtre. Si possible, elle maintiendra la possibilité de bénéficier d'une lumière naturelle suffisante. De plus, des nouveaux systèmes d'éclairage naturel ont été créés afin d'optimiser la pénétration de la lumière dans le bâtiment, on trouve : les systèmes de plafonds anioniques, les puits de lumière, les toits shelves, les vitrages spéciaux... etc. Le contrôle de la lumière naturelle consiste à gérer la quantité et la distribution de la lumière dans un espace en fonction de la variation des conditions climatiques et des besoins des occupants. De plus, on peut diviser les solutions de contrôle de l'éclairage naturel en trois catégories : soit par l'utilisation de systèmes d'éclairage naturel

adaptables, tels que des éléments de contrôle amovibles, soit par le zonage de l'installation d'éclairage artificiel en fonction de la lumière naturelle disponible ou bien par la régulation du flux des lampes en fonction de la présence de lumière naturelle. Des recherches ont montré que des économies d'énergie appréciables peuvent être réalisées grâce à la diminution de l'utilisation de l'éclairage artificiel par la prise en compte de la disponibilité de l'éclairage naturel tout en adaptant le temps durant lequel l'éclairage artificiel est utilisé ainsi que leurs flux lumineux à notre besoin d'éclairage.

1.1.3. Les technologies avancées d'éclairage adéquates au climat chaud

Afin d'intégrer le mieux le bâtiment dans son climat, de nouvelles technologies (systèmes et solutions) d'éclairage naturel ont été conçues et introduites pour assurer un environnement lumineux confortable pour les usagers tout en créant des bâtiments sains et économes en énergie. Les fenêtres ordinaires traitent de manière adéquate les besoins de l'éclairage des petits espaces dont la profondeur n'est pas importante, alors que dans le cas des locaux profonds, elles n'a pas la même efficacité. Les technologies avancées d'éclairage naturel peuvent servir à améliorer l'éclairage dans ce type de bâtiment et apporter la lumière du jour plus profondément dans l'espace. Ces nouvelles technologies sont plus performantes que les solutions classiques, elles offrent les avantages suivants :

- Elles fournissent une lumière qui pénètre plus profondément dans le bâtiment, ce qui permet d'avoir une bonne distribution de la lumière et un bon rapport de contraste entre l'éclairage de la zone située près de la source lumineuse et celle du fond.
- Elles sont recommandées pour les climats avec un ciel majoritairement couvert. Ces systèmes permettent de maximiser le captage de la lumière du jour et de la faire canaliser à l'intérieur.
- Elles sont aussi efficaces dans les climats très ensoleillés où le contrôle du soleil direct est nécessaire car, ils permettent de diriger la quantité de lumière dont on a besoin et bloque celle qui peut constituer une source de gêne ou d'inconfort.
- Elles améliorent le rendement des ouvertures qui ont une vision restreinte du ciel ou bloquées par des obstacles extérieurs, comme elles peuvent être une excellente solution pour l'éclairage des locaux qui ne possèdent pas des ouvertures donnant vers l'extérieur.

Les systèmes avancés d'éclairage naturel peuvent être classés en deux grandes catégories : les systèmes d'éclairage naturel avec dispositif d'ombrage et d'autres sans dispositif d'ombrage.

1.3.1. a. Systèmes d'éclairage avec dispositif d'ombrage

L'utilisation des protections solaires classiques, telles que les brise-soleil basses, permet de se protéger de la lumière directe mais elles réduisent considérablement la quantité d'éclairage à

l'intérieur de la pièce. Pour augmenter la pénétration de la lumière du jour tout en procurant de l'ombre, des systèmes avancés d'éclairage naturel avec dispositifs d'ombrage ont été mis au point afin de protéger la zone située près de la fenêtre du rayonnement solaire direct et envoyer la lumière du jour à l'intérieur d'un espace. Ils peuvent également être une solution pour résoudre des problèmes d'éclairage naturel comme la protection contre l'éblouissement et la redirection de la lumière vers d'autres endroits. Ces systèmes d'éclairage peuvent être classés en deux types selon le principe de fonctionnement, nous trouvons d'une part les systèmes dont le fonctionnement s'appuie principalement sur la lumière diffuse et exclut la lumière directe qui provient du soleil et d'autre part des systèmes qui utilisent uniquement la composante directe. Les systèmes présentés ci-dessous sont les technologies d'éclairage naturel, munis d'un dispositif d'ombrage, qui ont montré leurs performances dans les climats chauds.

1.1.3. a1. Le système Anidolique Intégré

Un système Anidolique Intégré est un système d'éclairage et d'ombrage à la fois situé à l'extérieur qui oriente la lumière du soleil vers le plafond qui va à son tour la diffuser vers le fond de l'espace (voir figure 1.1). Il se compose d'une ouverture équipée d'un vitrage diffuseur et de deux réflecteurs conçus selon les principes de l'optique non-imageante afin de mieux diriger la lumière (la composante diffuse surtout) provenant de l'ouverture à des angles spécifiés dans une plage angulaire de 60° depuis l'horizontale. L'élévation inférieure est fixée à zéro ou à l'horizontale pour éviter l'éblouissement. La face intérieure de ces systèmes est revêtue par des matériaux très réfléchissants (aluminium, métal léger) afin de maximiser leur rendement. Le système Anidolique Intégré doit être installé sur le tiers supérieur de la paroi ou sur la moitié d'un système de fenêtrage. Il est aussi muni de deux panneaux verticaux sur les côtés qui jouent le rôle de support et aussi permettent un ombrage supplémentaire.

Ce dispositif présente deux inconvénients : d'une part, son coût de fabrication est trop élevé à cause de sa configuration complexe, des matériaux utilisés et du travail d'étanchéité et d'autre part, dans des conditions particulières (la pluie), le dispositif peut entraîner des fuites d'eau qui peuvent être corrigées par l'installation de petits trous de drainage. Le système Anidolique Intégré peut augmenter et réguler les niveaux d'éclairement d'un espace jusqu'à 5 m de profondeur (de la fenêtre) et son rendement dépend principalement de la forme et de la taille de la fenêtre, de l'angle d'inclinaison, de facteur de réflexion des parois (plafond, murs et sol), du type de vitrage utilisé ainsi que des conditions ambiantes. Ce système est également prouvé d'être performant dans des conditions de ciel clair, car il peut fournir, à 5 m de la fenêtre, un

éclairage atteint 1000 lux sur un plan de travail, alors que dans des conditions de ciel couvert, l'éclairage moyen obtenu serait moindre, de l'ordre de 250 lux.

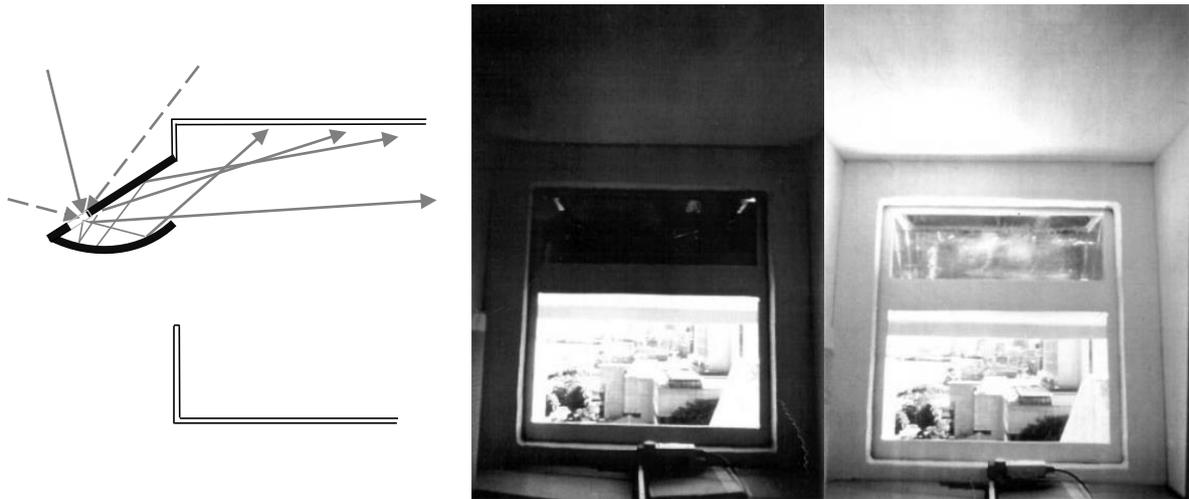


Figure 1.1 : A gauche, le principe de fonctionnement du système Anidolique Intégré (Source : Scartezzini et al., 2002) ; A droite, la performance du système (Source : Daylight in buildings, 2000).

1.1.3. a2. Les panneaux prismatiques

Les panneaux prismatiques sont constitués d'une série de prismes acryliques transparents formant d'un côté, une surface plane et de l'autre côté, des faces prismatiques parfois partiellement recouvertes d'un film d'aluminium à haute réflexion spéculaire. Le système prismatique est constitué de deux feuilles de panneaux prismatiques : une située à l'intérieur pour le protéger de la poussière, la deuxième est insérée dans une unité de double vitrage dans le but d'éliminer l'entretien. Leur fonctionnement consiste à utiliser à la fois le phénomène de réflexion et de réfraction afin de contrôler la pénétration de la lumière du jour dans le bâtiment et assurer une transmission profonde. La direction de la lumière qui traverse le panneau est modifiée par le passage dans un prisme triangulaire. Les fractions de la lumière réfléchiée et réfractée dépendent de l'angle d'incidence, des indices de réfraction et de l'état de la polarisation de la lumière incidente. Pour assurer un bon fonctionnement des panneaux prismatiques et éclairer profondément un espace, la lumière réfractée devrait émerger avec un angle inférieur à 15° au-dessus de l'horizontale afin d'obtenir une pénétration optimale tout en évitant le problème de l'éblouissement qui peut être produit par les panneaux prismatiques à cause de la redirection d'une partie de la lumière du soleil vers le bas de l'ouverture. Mais, avec un profil correct et bien étudié ainsi qu'une inclinaison avec un angle qui correspond aux saisons, les rayons lumineux bas peuvent être évités. La performance du panneau est donc déterminée par l'angle de réfraction.

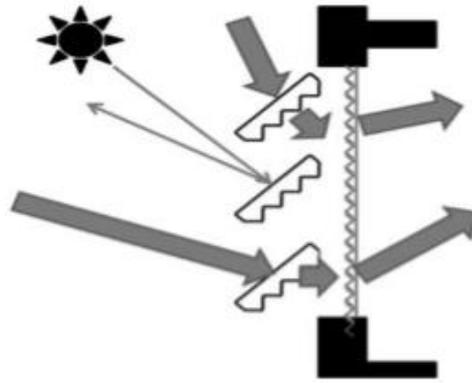


Figure 1.2 : Les panneaux prismatiques (Source : MG Nair et al., 2014)

Les panneaux prismatiques peuvent être utilisés dans toutes les orientations et appliqués de plusieurs manières, en tant que système fixe ou mobile, installés sur le plan vertical de la façade ou sur le toit, positionnés entre les feuilles de vitrage ou sur le côté extérieur ou intérieur de l'unité de vitrage. Lorsqu'il est utilisé sur les façades, il est nécessaire de l'installer dans la partie supérieure de la fenêtre afin de maintenir le contact avec l'extérieur. Dans le cas où les panneaux sont installés sur les toits vitrés ou appliqués sous forme d'un système d'ombrage mobile, leur structure doit être mobile de telle sorte qu'elle suive le mouvement du soleil.

Les panneaux prismatiques ont deux rôles complémentaires, ils permettent la redirection ou la réfraction de la lumière du jour à l'intérieur d'un bâtiment et peuvent aussi agir en tant que dispositif d'ombrage qui permet de réduire la luminosité au niveau de la fenêtre. Lorsqu'il est utilisé comme un système d'ombrage, il réfracte la lumière directe, mais il transmet aussi la lumière diffuse. Ils permettent également de fournir un éclairage moyen de 450 lux à 4 m de la fenêtre et sa performance peut atteindre, dans certaines situations, 5.5 m de profondeur

1.1.3. a3. Les persiennes et les stores

Les stores et les persiennes sont des systèmes d'éclairage naturel traditionnels qui peuvent être appliqués comme une protection solaire, pour se protéger contre l'éblouissement et/ou un système d'éclairage pour rediriger la lumière du jour à l'intérieur d'un local. Les persiennes sont généralement situées à l'extérieur de la façade alors que les stores sont montés à l'intérieur ou entre les vitrages. Elles sont composées de multiples lamelles horizontales, verticales ou inclinées. Ces dernières peuvent être soit plates ou courbées, espacées de manière égale à une distance qui est inférieure à la largeur des lamelles, de sorte que ces dernières se superposent lorsqu'elles sont complètement fermées. La taille des lamelles varie en fonction de leur emplacement (à l'extérieur, à l'intérieur ou entre les vitres d'une fenêtre à double vitrage), elle

est comprise entre 50 et 100 mm de largeur lorsqu'elles sont situées à l'intérieur et entre 10 à 50 mm de largeur pour celles qui se trouvent à l'extérieur.

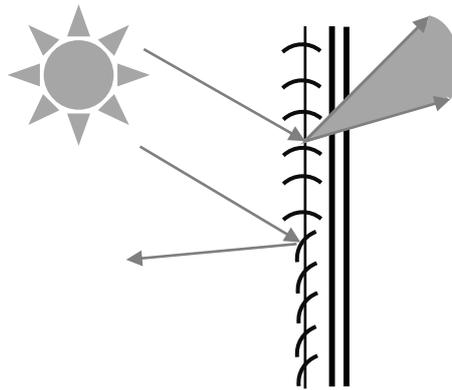


Figure 1.3 : Le principe de fonctionnement des persiennes (Source : Daylight in buildings, 2000)

Les persiennes peuvent être conçues pour être fixes ou à contrôle automatique. Dans ce dernier type, elles sont contrôlées automatiquement de manière qu'elles puissent suivre le mouvement du soleil. Pendant une période quotidienne et/ou saisonnière, les persiennes à contrôle automatique donnent généralement de meilleurs résultats que celles qui sont fixes mais elles nécessitent une calibration et des algorithmes qui sont calculés en fonction de nos besoin en éclairage. De plus, certains modèles plus avancés de stores sont conçus spécifiquement pour rediriger la lumière au plafond en utilisant des lamelles concaves recouvertes par une surface supérieure spéculaire. Des stores argentés peuvent normalement être utilisés à condition qu'ils soient situés au-dessus de la hauteur des yeux afin d'éviter l'éblouissement potentiel.

De plus, les deux systèmes peuvent être utilisés dans toutes les orientations alors que les stores verticaux sont principalement utilisés sur façade est et ouest. Leur fonctionnement consiste à obstruer, absorber, réfléchir et/ou transmettre le rayonnement solaire (diffus et direct) à l'intérieur d'un bâtiment. Leur rendement dépend de la position du soleil, de leur emplacement (extérieur, intérieur ou entre les deux), de l'angle de positionnement des lamelles ainsi que la réflexion des matériaux utilisés. Ces dispositifs ont pour objectif d'augmenter la pénétration de la lumière naturelle ce qui permet d'accroître de manière significative l'efficacité énergétique. Une étude a été faite au Royaume-Uni sur un bâtiment de recherche équipé de persiennes et de stores a montré que 500 lux sont atteints à 4.5m de la fenêtre sous un ciel clair et à 3 m sous un ciel couvert. Lorsque le ciel est couvert, les persiennes et stores peuvent promouvoir une distribution uniforme de la lumière du jour. Sous un ciel couvert, les persiennes et les stores permettent d'apporter la lumière profondément dans un local tout en assurant une distribution

lumineuse uniforme. Dans des conditions ensoleillées, les stores peuvent produire des lignes extrêmement lumineuses le long des lamelles provoquant des problèmes d'éblouissement. Les persiennes peuvent également conduire au risque d'éblouissement car lorsque ces lamelles sont installées avec un angle horizontal, elles permettent d'augmenter le contraste entre les lamelles et les surfaces adjacentes. Si on les incline vers le haut, le risque d'éblouissement augmente et la partie visible du ciel sera plus grande. Si on les incline vers le bas, l'ombre se produit et le problème d'éblouissement se diminue. De plus, on doit choisir une finition mate, spéculaire, ou translucide pour les lamelles plutôt que brillante pour minimiser tout risque d'éblouissement ou de surchauffe. Ces systèmes ont deux inconvénients : selon l'angle des lamelles, ils peuvent partiellement ou complètement obstruer la vue directionnelle vers l'extérieur. De plus, bien que ces systèmes nécessitent peu de nettoyage, leur entretien peut être difficile à cause de leur emplacement, les lamelles intérieures recueillent de la poussière et celles situées à l'extérieures peuvent accumuler de la saleté.

1.1. 3. a4. Les light shelves de redirection de la lumière directe et diffuse

Le système light shelf a été utilisé depuis l'époque des pharaons égyptiens. Ils sont utilisés pour rediriger et contrôler la quantité de la lumière dans un espace, comme ils peuvent aussi servir à réduire la luminosité qui provient du ciel tout en admettant les rayons lumineux directs et diffus (Fletcher 1975). Un light shelf est un réflecteur installé dans la partie supérieure de la fenêtre à une hauteur de 2.2 m du sol afin de ne pas empêcher le contact avec l'extérieur. Il divise l'ouverture en deux parties : la grande fenêtre qui va éclairer la zone située près d'elle et la petite fenêtre qui est équipée d'un système light shelf qui permet d'éclairer le fond de l'espace. La profondeur recommandée pour ce réflecteur est environ égale à sa hauteur par rapport à la hauteur du plan de travail (Littlefair 1995).



Figure 1.4: Le système light shelf (Source: Ruck et al., 2000)

Plusieurs expériences ont été faites dans le but d'étudier la performance du système light shelf à l'aide d'un modèle réduit afin d'étudier l'effet de l'orientation sur son rendement. Les résultats montrent que le light shelf fonctionne mieux s'il est installé sur la façade sud dans l'hémisphère nord et au nord dans l'hémisphère sud. Son rendement est réduit à l'est et à l'ouest ainsi que les régions caractérisées par un ciel couvert dominant. Si le dispositif est bien conçu, un light shelf doit rediriger la lumière du soleil ou de la lumière diffuse sur le plafond qui va à son tour la rediriger vers les zones éloignées de la fenêtre, ce qui conduit à l'amélioration de la distribution de la lumière tout en réduisant l'éblouissement (Molinelli et Boyer, 1987). Sa capacité d'éclairer en profondeur atteint les 10 m et à 5.5 m de la fenêtre, un éclairage moyen de 550 lux était obtenu. Cela dépend d'une grande partie de la réflexion de sa partie supérieure qui doit être revêtue par un matériau de haute réflectance (aluminium anodisé), du type du ciel, de l'orientation, la configuration de la pièce et la latitude. De plus, le local doit avoir une hauteur au moins de 2.5 m et le plafond doit être incliné légèrement vers l'intérieur. Selon le climat de la région ainsi que l'activité (le niveau d'éclairage recommandé), un light shelf peut prendre plusieurs configurations qui peuvent être classées selon : sa position par rapport à la fenêtre (intérieur, extérieur, ou combiné), son inclinaison (vers l'intérieur ou vers l'extérieur), sa forme (droite ou incurvé) et selon sa mobilité (fixe ou mobile). Dans un climat chaud, l'utilisation d'un light shelf droit intérieur et extérieur est la meilleure configuration qui offre à la fois une lumière profonde transmise par le réflecteur intérieur et réduit les risques de surchauffe en été grâce à sa partie extérieure qui joue le rôle d'ombrage (Daich Safa, 2011).

1.1.3. a5. Les puits de lumière avec laser cut panels

Les puits de lumière sont généralement installés sur le toit d'un bâtiment. Ils sont constitués d'un double vitrage : le premier forme la couverture extérieure alors que le deuxième utilise un laser cut panels qui constitue leur face intérieure. Cette transparence leur permet d'assurer une transmission sélective angulaire de la lumière. Les puits de lumière peuvent prendre deux formes : pyramidale ou triangulaire. Les puits pyramidaux utilisent quatre panneaux dont chacun prend une forme triangulaire fixés à la face intérieure du puits de lumière alors que les puits triangulaires utilisent des panneaux rectangulaires. La fonction principale d'un puits de lumière sélectif angulaire est de fournir une lumière relativement constante à l'intérieur pendant la journée et de réduire le risque de surchauffe en été. Il est utilisé aussi pour l'air conditionné et la ventilation dans les bâtiments. Sa performance dépend de l'espacement de laser cut panels, de l'angle d'inclinaison de la pyramide ou du triangle, de la profondeur du puits de lumière, de l'heure du jour et de la saison et les conditions du ciel. Ce dispositif peut fournir un éclairage

qui atteint 1200 lux sous un ciel clair, alors que sous des conditions de ciel couvert, l'éclairage intérieur est compris entre 250 lux et 600 lux. Son rendement sera maximisé lorsqu'on inverse la position de la pyramide ou du triangle en orientant le sommet vers le bas (voir figure 1.5).

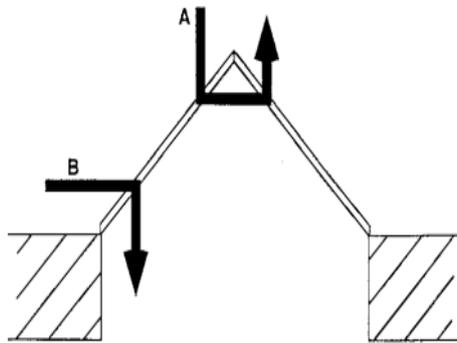


Figure 1.5: A gauche, puits de lumière avec LCP; A droite, puits de lumière inversé (Source: Daylight in buildings, 2000).

De plus, ce système transmet mieux la lumière à basse altitude car, les lasers cut panels dévient la lumière de basse altitude vers le bas du puits, ce qui augmente le facteur de transmission de la lumière à l'intérieur du bâtiment. Son inclinaison doit être comprise entre 45° et 55° afin d'éviter la surchauffe lorsque le soleil est au zénith. Son rendement est faible sous un ciel couvert et à haute altitude, son inclinaison doit être comprise entre 25° et 35° afin d'optimiser sa performance. Ce système est bon marché et ne nécessite pas d'opérations d'entretien ou de maintenance.

1.1.3. a6. Les stores solaires anidoliques

Les stores solaires anidolique sont constitués d'une grille composée de plusieurs éléments creux et réfléchissants. Chaque élément est composé à son tour de deux concentrateurs paraboliques conçus selon l'optique non-imageante. Contrairement aux autres systèmes anidoliques comme les plafonds anidoliques et les ouvertures zénithales anidoliques, les stores solaires anidoliques utilisent des éléments réfléchissants tridimensionnels de petite échelle. Ce système permet de contrôler la pénétration de la lumière du jour ainsi que les gains thermiques dans toute l'enveloppe du bâtiment tout en empêchant la surchauffe en été. Les éléments anidoliques sont conçus pour bloquer les rayons lumineux de haute altitude et de transmettre la lumière diffuse à basse altitude. Les stores solaires anidoliques peuvent être fixés directement sur les ouvertures qui constituent la source lumineuse elle-même, comme ils peuvent être placés dans la partie supérieure d'une fenêtre tout en maintenant la vue vers l'extérieur à travers une partie de

l'ouverture située au-dessous du système. Dans les deux applications, les stores solaires anidoliques seraient normalement placés entre deux plaques de verre pour la protection contre la poussière. Théoriquement, ce système peut être optimisé pour chaque latitude et pour toutes les orientations. Il peut être utilisé sous un ciel clair et/ou couvert. Des tests expérimentaux avaient montré et confirmé que les gains solaires et les niveaux éclairements peuvent être optimisés en inclinant le dispositif de sa position verticale de 18° vers le haut. Cette conception permet de diffuser la lumière jusqu'à 6.5 m de profondeur avec un éclairage moyen de 300 lux sans aucun risque d'éblouissement. La fabrication d'un store solaire anidolique demande un coût élevé qui dépend en grande partie du processus de la fabrication des détails car, la performance du système est liée principalement à la forme tridimensionnelle des éléments anidoliques qui est plus complexe que celle bidimensionnelle. Un processus efficace devrait être mis au point pour traduire les critères de conception par une application particulière dans le moule jusqu'à la forme final du produit final.

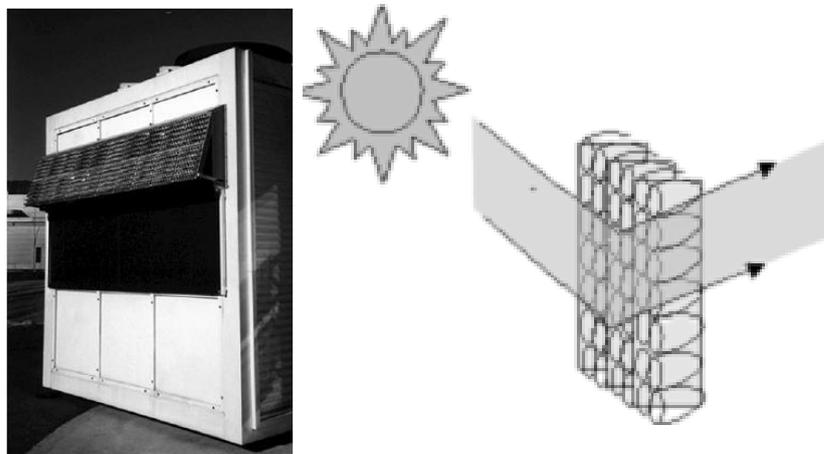


Figure 1.6 : Les stores solaires anidoliques (Source : *Daylight in buildings*, 2000)

1.1.3. a7. Les éléments optiques holographiques (EOH)

Les éléments optiques holographiques (EOH) sont des systèmes d'ombrage sélectifs directionnels qui rejettent la lumière incidente provenant d'une petite zone angulaire de la voûte céleste. Ainsi, ils peuvent réorienter ou réfléchir la lumière directe du soleil tout en transmettant la lumière diffuse provenant d'autres directions. Cet élément d'ombrage sélectif fournit un bon éclairage intérieur sans altérer la vue depuis la fenêtre. Il se compose d'une grille d'éléments holographiques intégrés dans un verre laminé (stratifié). L'élément fonctionnel essentiel dans ce système d'ombrage sélectif directionnel est le film holographique qui est placé entre deux plaques de verre pour avoir une stabilité mécanique et une protection contre l'humidité. Un ou plusieurs vitrages contenant ces éléments optiques holographiques sont ensuite intégrés à

d'autres éléments de structure pour créer les modules linéaires. Ces systèmes d'éclairage et d'ombrage peuvent être installés sur une façade vitrée ou sur un toit, comme ils peuvent être appliqués à l'intérieur du bâtiment et le gain solaire produit peut être évacué à travers la structure du toit. Quelque soit sa position, à l'intérieur ou à l'extérieur, le système d'ombrage doit être bien intégré dans la conception architecturale et technique du bâtiment.

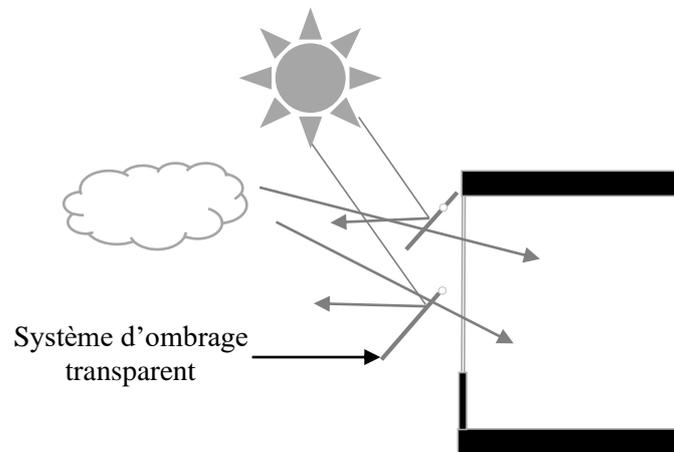


Figure 1.7 : Les éléments optiques holographiques (EOH) (Source: *Daylight in buildings*, 2000)

Ce système peut être utilisé de deux manières différentes pour assurer le contrôle d'ombrage pour les grandes surfaces vitrées : il y a les systèmes de protection solaire transparente et les systèmes de concentration de la lumière directe. Dans les systèmes de protection solaire transparente, les éléments optiques holographiques sont conçus pour réfléchir directement la lumière du soleil incidente dans une plage angulaire relativement étroite et normale à la surface. Ils permettent de maintenir un degré élevé de la transparence du bâtiment et de fournir un bon contrôle solaire. Ils peuvent être installés pour tourner autour de l'axe horizontal ou vertical, soit sur une façade verticale soit sur un toit en verre. Si le verre qui intègre ces éléments est mis en rotation pour suivre le soleil, la lumière directe ne peut pas pénétrer dans le bâtiment tandis que la lumière incidente provenant d'autres angles passe à travers le système. Dans les systèmes de concentration de la lumière directe, les éléments holographiques sont conçus pour concentrer et réorienter directement la lumière du soleil vers des bandes opaques dans une seconde grille composée des éléments vitrés. A travers ces éléments, la lumière du soleil est réfléchie, absorbée ou convertie en énergie thermique ou en électricité par un panneau photovoltaïque qui doit être bien intégré dans l'enveloppe du bâtiment (Müller 199). Cette conception permet de bloquer la composante directe du soleil tout en étant transparent pour diffuser de la lumière à l'intérieur et assurer un contact visuel avec l'extérieur. Dans les deux types d'éléments optiques holographiques, les éléments d'ombrage doivent suivre la trajectoire du soleil qui devrait

normalement être obtenue par un système automatisé contrôlé pour un fonctionnement et un ombrage optimal.

Les éléments optiques holographiques présentent plusieurs lacunes. D'une part, c'est un nouveau système qui exige un coût de production très élevé parce que les éléments holographiques ne sont pas encore assez produits et les systèmes de contrôle utilisés sont très complexes et coûteux. D'autre part, ils sont installés dans la façade vitrée d'un bâtiment ce qui peut produire l'éblouissement ou la surchauffe à cause des grandes surfaces vitrés. De plus, les éléments de verre nécessitent une maintenance et un nettoyage fréquent afin de restituer leur performance. Des effets de couleur peuvent être causés par la dispersion de la lumière dans l'élément optique holographique qui ne peut pas être remarqué à l'intérieur.

1.1.3. b. Systèmes d'éclairage sans dispositif ombrage

Les systèmes d'éclairage naturel sans dispositif d'ombrage intégré sont conçus principalement pour rediriger, canaliser et/ou focaliser la lumière du jour vers les zones lointaines de la fenêtre ou d'un puits de lumière. Ils peuvent ou ne peuvent pas bloquer la lumière solaire directe. Ces systèmes peuvent être classés en deux catégories :

1.1.3. b1. Les systèmes de redirection de la lumière (diffuse ou directe)

Les systèmes de redirection de la lumière envoient la lumière directe ou diffuse à l'intérieur de l'espace sans produire des effets indésirables comme l'éblouissement et la surchauffe. Les systèmes de redirection de la lumière directe peuvent améliorer l'utilisation de la lumière du jour dans des conditions du ciel clair. Leur fonctionnement consiste à envoyer, guider et redistribuer la lumière directe à l'intérieur du bâtiment sans produire de gênes visuelles ou thermiques. Alors que sous un ciel couvert, le rendement de ces systèmes dépend en grande partie de leur positionnement dans l'enveloppe du bâtiment (l'angle d'inclinaison) car la zone autour de zénith est beaucoup plus lumineuse que celle trouvée à l'horizon. Il y a plusieurs systèmes de redirection de la lumière dont la performance dépend de la position du système dans le bâtiment et/ou de la manière par laquelle il dirige la lumière. Ces systèmes peuvent être regroupés en trois catégories : des éléments horizontaux, verticaux ou paraboliques. Les éléments horizontaux peuvent prendre la configuration d'un réflecteur horizontal ou composé de multiples lamelles horizontales ou inclinées. Ces systèmes peuvent rediriger la lumière du soleil en profondeur et les meilleures performances ont été atteintes à des distances de 3 m à 5 m de la fenêtre. Cependant, en raison de leur position statique, leur rendement varie selon les saisons. Pour augmenter leur rendement, leur inclinaison peut être modifiée de façon

saisonnaire tout en utilisant des éléments optiquement lumineux et leur performance peut atteindre 5 m à 10 m de profondeur (Ruck et al., 2000). De plus, suite à leurs formes horizontales, ces éléments permettent de se protéger contre l'éblouissement mais ils nécessitent également un entretien permanent afin de maintenir leurs performances. Les éléments verticaux sont des dispositifs placés verticalement ou avec un certain angle d'inclinaison dans la partie supérieure d'une fenêtre. Ils utilisent les phénomènes physiques de réflexion et de réfraction pour rediriger la lumière vers les zones profondes. Ils sont constitués de panneaux en acrylique empilés verticalement dans une double couche de verre ou des films polymères stratifiés entre deux panneaux de verre. Ces systèmes sont faciles à intégrer dans le bâtiment et peuvent éclairer jusqu'à 10 m de profondeur (Ruck et Smith, 1982 ; Ruck, 1985 ; Ruck et al., 2000 ; Edmonds, 1993a). La troisième catégorie consiste à utiliser une forme géométrique spécifique sous forme de collecteur parabolique composé, recouvert par un matériau très réfléchissant. Cette configuration a été conçue spécifiquement pour les régions caractérisées par un ciel ensoleillé ou un ciel couvert. Ce système peut recueillir et rediriger la lumière jusqu'à 6 m de profondeur (Scartezzini et Courret, 2002) et son inconvénient réside dans son intégration dans le bâtiment lorsque sa conception n'était pas introduite dans la phase d'esquisse du projet.

Quelques systèmes d'éclairage naturel peuvent appartenir aux deux types des systèmes d'éclairage (avec ombrage et sans ombrage). On parle de système light shelf, de vitrage prismatique et les systèmes anidoliques intégré qui ont été déjà abordés précédemment. Le laser cut panels, les puits de lumière avec élément optique holographique (EOH) et les vitrages directionnels vont être présentés ci-dessous.

1.1.3. b1.1. Les lasers cut panels

Le système Laser-Cut panels (LCP) est un autre système de redirection de lumière qui a été utilisé spécialement pour améliorer la collecte de la lumière par les conduits lumineux (Edmonds et al., 1995, Shao et Riffat, 2000). Le fonctionnement de ce système consiste à collecter la lumière lorsque le soleil est bas dans le ciel et rejeter la lumière lorsque les rayons solaires sont plus hauts (au zénith) afin de réduire le problème de surchauffe. Un laser-cut panel est un panneau fin, fait avec un matériau acrylique transparent, découpé par des panneaux lasers à l'intérieur d'un ensemble d'éléments rectangulaires. La lumière est déviée dans chacun des éléments du panneau par réfraction, puis par une réflexion interne totale, puis par une deuxième réfraction ce qui permet d'avoir une déviation très efficace car toutes les réflexions vont dans la même direction. Un laser cut panel est généralement fixé à l'intérieur d'une unité de vitrage, mais il peut aussi être utilisé comme un vitrage extérieur. En pratique, le matériau est placé

entre deux vitrages, est composé d'une succession de cavités qui, par réfraction, permettent de dévier une partie des rayons incidents et la forme arrondie des cavités réduit l'effet d'irisation (la séparation des couleurs). Cependant, ce système offre plusieurs caractéristiques : il donne la possibilité de collecter la lumière de l'ensemble de la voûte céleste, il permet de dévier les composantes à la fois directes et diffuses de la lumière du jour, il garantit le maintien de la vue vers l'extérieur, il permet également une large propagation de la lumière réfléchie avec un grand angle supérieur à 120° et enfin, il demande une méthode de fabrication flexible adaptée aux petites et ou grandes quantités.

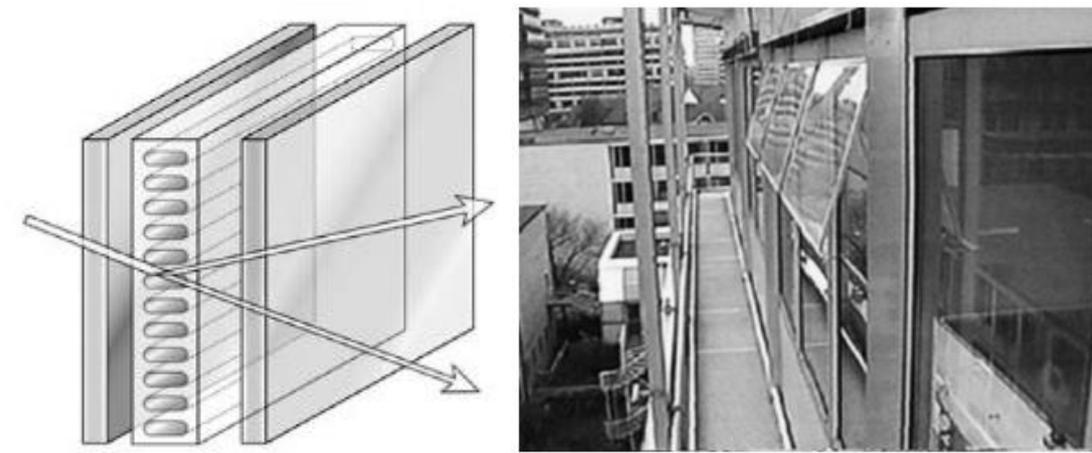


Figure 1.8: A gauche, Laser cut panels (Source: Damelin court et al., 2010) ; A droite, façade équipée d'un LCP (Source: Daylight in buildings 2000)

Les lasers cut panels peuvent être utilisés dans des configurations fixes et/ou mobiles dans un système de fenêtrage. Il est préférable d'utiliser ce système à des fins d'éclairage et non pour assurer un contact visuel avec l'extérieur même s'il offre un niveau élevé de transparence car ce dispositif va rediriger la lumière entrante depuis le bas vers une direction élevée qui peut créer de l'éblouissement. Pour cela, il est souhaitable qu'ils soient installés dans la moitié supérieure d'une fenêtre. Ces systèmes sont classés en trois configurations, ils peuvent se présenter comme un système d'ombrage solaire fixe, un système de redirection de la lumière ou un système à double fonctions (système d'ombrage et un système de redirection de la lumière). Dans la première configuration, si le panneau est monté horizontalement dans une fenêtre, il va réfléchir la lumière directe du soleil vers l'extérieur lorsque cette dernière est en haute altitude tout en permettant une visualisation entièrement ouverte vers l'extérieur. La deuxième configuration regroupe les dispositifs fixes et mobiles des systèmes de redirection de la lumière. Les systèmes fixes sont installés verticalement dans la fenêtre et leur fonctionnement consiste à dévier presque toute la lumière incidente au-dessus de l'angle de 45° et à transmettre

également plus de lumière incidente en dessous de 20°. Ainsi, une grande quantité de lumière est déviée par le panneau sur le plafond qui agit en tant que source lumineuse secondaire qui va diffuser la lumière réfléchi. La configuration mixte peut être utilisée dans les persiennes. Lorsque ces dernières sont mobiles, elles rejettent la lumière du soleil lorsque les panneaux sont en position de grille ouverte (été) et redirigent la lumière vers l'intérieur lorsque les panneaux sont en position fermée (hiver).

L'Université norvégienne des sciences et de la technologie (NTNU) a testé un laser cut panel vertical dans un immeuble de bureaux à Sandvika, Norvège (latitude est 59°N). Les résultats de cette expérience ont montré que ce système améliore la distribution de la lumière au cours de la journée et même durant l'année et l'éclairage atteint 300 lux à 5 m de l'ouverture. Le principal obstacle technique de ces systèmes est leur coût. Actuellement, les panneaux sont conçus et découpés en fonction de la taille et de la forme d'une fenêtre spécifique. Si les panneaux sont fixés à l'intérieur du vitrage ou d'un puits de lumière existant, ils ne demandent aucun entretien alors s'ils sont stratifiés entre des minces feuilles de verre et installés en tant que simple vitrage, l'entretien est nécessaire.

1.1.3. b1.2. Les puits de lumière avec EOH

Les puits de lumière avec élément optique holographique (EOH) sont installés sur les toits plats ou en pentes et qui peuvent fournir un niveau d'éclairage uniforme dans un espace à condition que sa surface vitrée ne doive pas être supérieure à 5 % à 6 % à la surface totale de toit. Les puits de lumière sont généralement efficaces pour l'éclairage de type horizontal et fonctionnent mieux pour les bâtiments d'un seul étage. Ils sont utilisés pour introduire la lumière depuis le haut puis la diffuser à l'intérieur ce qui permet d'éviter les rayons directs du soleil qui causent dans la plupart des cas le problème de l'éblouissement. Les puits de lumière avec élément optique holographique sont constitués d'un ensemble d'éléments holographiques placés entre deux plaques de verre conçus pour réorienter directement la lumière du soleil incidente dans une plage angulaire relativement étroite et normale à la surface et la faire pénétrer à travers le puits jusqu'au bas (à l'intérieur). Les EOH sont expliqués en détail dans la partie 1.3.1.7 de ce chapitre La performance de ce système diffère selon le type de ciel (clair ou couvert). Le gain thermique peut fortement être produit dans les climats chauds. Parmi les inconvénients de ce système le coût élevé de production à cause de la complexité de processus de fabrication. De plus, si la surface du puits de lumière est importante, le risque d'éblouissement ou de surchauffe peut fortement se produire surtout à la mi-journée. On outre, les éléments optiques

holographiques nécessitent un nettoyage et une maintenance permanente afin de garder leur transparence et leur performance.

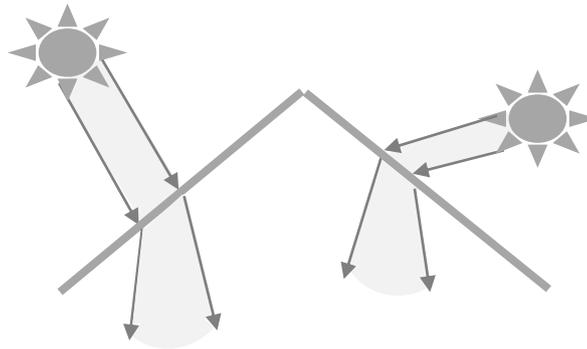


Figure 1.9 : Puits de lumière avec EOH (Source: *Daylight in buildings*, 2000)

1.1.3. b1.3. Les vitrages directionnels

Les vitrages directionnels sont des éléments acryliques concaves empilés verticalement à l'intérieur d'une unité de double vitrage. Ils servent à rediriger, de manière très efficace, les rayons solaires directs arrivant de différents angles d'incidence vers le plafond qui va à son tour apporter la lumière plus profondément dans le bâtiment. Des éléments réfléchissants, en aluminium par exemple, peuvent être intégrés dans le plafond pour focaliser la lumière réfléchie dans les zones ayant des tâches spécifiques. Lorsque la lumière traverse l'unité de vitrage avec un angle horizontal étroit, un modèle sinusoïdal sur la surface intérieure de cette unité peut être utilisé pour diffuser la lumière sortante et un film holographique sur la vitre extérieure peut être également utilisé pour concentrer la lumière du jour entrante (Kisch, 1996). Le système est conçu spécifiquement pour rediriger la composante directe du soleil mais il peut dévier également la lumière diffuse et le niveau d'éclairement reçu à l'intérieur est beaucoup plus faible que celui résultant par la redirection de la lumière directe. Le système de vitrage directionnel doit être installé dans la fenêtre au-dessus de la hauteur de vue d'une personne afin d'éviter l'éblouissement ainsi que d'autres effets de visibilité. La fenêtre située au-dessous du vitrage directionnel, qui permet la visualisation avec l'extérieur, peut être ombragée par des stores. De plus, sa hauteur doit être environ 10 % de la hauteur totale de la pièce. Le vitrage directionnel peut aussi être installé sur le toit (dans un puits de lumière). Le verre doit être incliné à un angle d'environ 20° afin de rediriger la lumière lorsque le soleil est bas, comme il peut être placé dans la face intérieure ou extérieure de la façade dans le cas de rénovation par exemple. Son efficacité est optimale dans l'orientation sud pour les régions situées dans l'hémisphère nord alors qu'à l'est, il est performant seulement le matin et à l'ouest, son rendement est optimal l'après-midi. Pour la façade nord, les éléments acryliques doivent être plus grands.

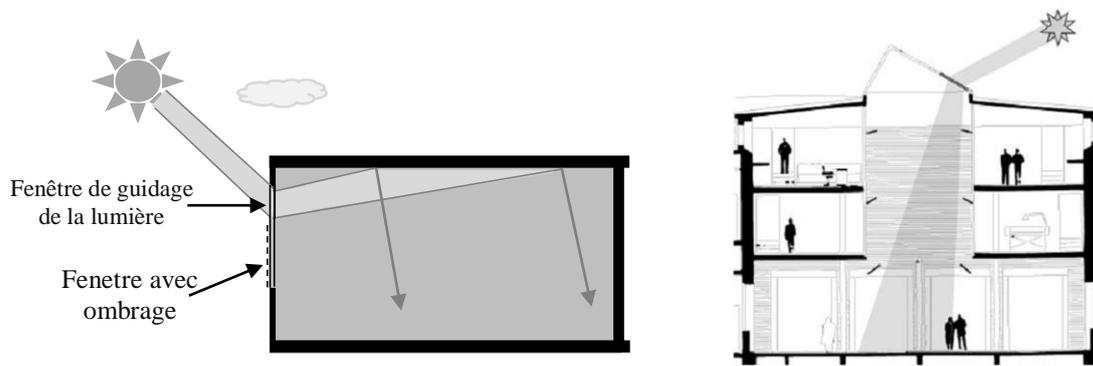


Figure 1.10 : Le vitrage directionnel (Source: *Daylight in buildings*, 2000)

Les vitrages directionnels réfléchissent et redirigent la lumière vers un plan horizontal et même vertical. La déviation horizontale est réalisée soit par des éléments optiques holographiques soit par une surface vitrée sinusoïdale alors que la déviation verticale est obtenue grâce la forme des éléments acryliques eux-mêmes. De plus, ce système de redirection a prouvé son efficacité d'éclairer le fond d'une pièce pour toutes les positions du soleil sans recourir au système de contrôle mobile qui suivent la position du soleil. Un vitrage directionnel peut éclairer jusqu'à 6 m de profondeur et sa performance permet d'atteindre un éclairement de 600 lux sous des conditions de ciel clair et atteint 350 lux sous un ciel couvert. Ce système ne nécessite pas un contrôle ou une maintenance car il ne comprend pas de pièces mobiles ou réglables et les éléments directionnels du dispositif sont installés entre deux panneaux de verre. Le seul obstacle de son utilisation est le coût.

1.1.3. b2. Les systèmes de transport de la lumière

Dans les bâtiments qui dépassent les 10 m de grande profondeur, l'éclairage naturel peut être seulement atteint par l'utilisation de systèmes de transport de la lumière. Ces derniers sont des dispositifs capables de canaliser la lumière du soleil, sur de longues distances jusqu'au centre d'un bâtiment, d'un sous-sol ou d'autres espaces qui ne reçoivent pas un éclairage suffisant lorsqu'on s'éloigne de l'enveloppe. Ils sont constitués de trois composants principaux : un collecteur de lumière extérieur, un tube de transport et des distributeurs situés à l'intérieur. (Ayers et Carter, 1995). Le tube lumineux intérieur doit être revêtu d'un matériau très réfléchissant afin d'assurer le bon fonctionnement du système.

1.1.3. b2.1. Les systèmes light pipes

Un light pipe est un système qui permet de transporter la lumière du jour jusqu'au fond d'un espace à travers des conduits horizontaux ou aux étages inférieurs d'un immeuble à travers les conduits verticaux. Il est composé d'un capteur solaire qui rassemble la lumière du soleil

(il peut être un simple miroir fixe ou un système informatisé sophistiqué (Héliodon) qui suit les mouvements du soleil), un concentrateur qui regroupe l'énergie solaire sur une petite surface. Ce dernier est fait d'un miroir de concentration ou de lentille qui concentre l'énergie captée à partir d'un collecteur de grande taille sur une surface plus petite de sorte qu'il peut être transporté efficacement). Un système de transport (il peut être une simple ouverture à travers les différents étages d'un bâtiment comme il peut être un prisme) et enfin, un système de distribution. La lumière est ensuite transportée et répartie vers l'intérieur.

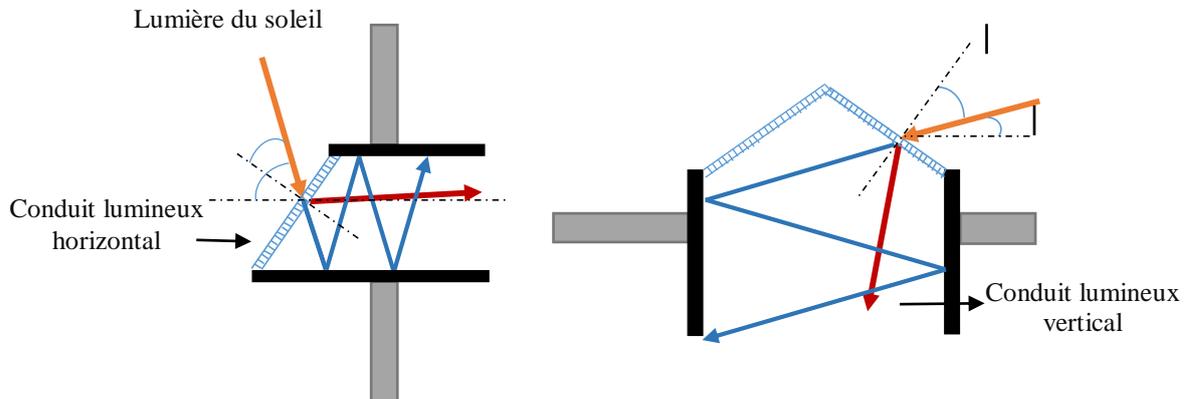


Figure 1.11: Les conduits de lumière (Source : Hansen et al., 2003)

Les systèmes de light pipes fonctionnent mieux sous un ciel serein et leur efficacité atteint, à plus de 10 m de profondeur, 400 lux par un conduit horizontal et 250 lux par un conduit vertical. La performance de light pipe horizontale dépend de l'orientation de la façade ainsi que l'ombrage des bâtiments voisins ; cependant, il est facile à intégrer dans le bâtiment lorsque les faux plafonds sont disponibles. En revanche, les conduits verticaux fonctionnent mieux en termes de collecte de lumière mais leur intégration architecturale est plus compliquée surtout lorsqu'ils ne sont pas programmés dès le début. Les recherches actuelles sur les systèmes de transport léger travaillent sur l'amélioration de chacun des composants de ce système surtout le tube de transport et le classement général des light pipes dépend du matériau utilisé pour le revêtement de tube. Parmi les matériaux innovant il y a : les fibres optiques qui sont des systèmes très efficaces fabriqués en verre ou en plastique silicate qui transportent la lumière par réflexion interne totale, le poly méthyl méthacrylate (PMMA) qui est un matériau acrylique transparent choisi pour ses propriétés de transmission et pour le coût relativement faible. De plus, une composition faite de lentilles et de miroirs peuvent être un revêtement performant à condition qu'elle doit avoir une bonne transmission et qu'elle est capable de maintenir un faisceau concentré de lumière, ...etc. Ce système nécessite un entretien et un nettoyage permanent afin d'éviter la diminution de son rendement qui peut être dû à la saleté ou la poussière. Il est indispensable aussi de contrôler le rendement de chaque élément composant

le système, surtout le tube de transport, afin d'éviter toute défaillance qui peut interrompre son fonctionnement. On outre, son coût de fabrication est relativement élevé à cause des matériaux de fabrication qui doivent être de haute réflectance.

1.1.3. b2.2. Les tubes solaires

Le tube solaire est une stratégie d'éclairage zénithale qui utilise le même principe d'un système de light pipe. Son fonctionnement consiste principalement à apporter la lumière directe du soleil dans des pièces qui ne possèdent pas d'ouverture sur l'extérieur ou en complément d'une ouverture existante, comme il permet d'éclairer des espaces ayant une grande profondeur sans produire de surchauffe en été (Oakley et al., 2000, Zhang et al., 2002). Ce système est un dispositif linéaire qui canalise la lumière au centre d'un bâtiment (Carter et al., 2009). Il permet également de réduire considérablement la consommation énergétique pendant le jour. Il est constitué de trois composants : un dôme, un conduit lumineux et un diffuseur. Le dôme est un collecteur extérieur en forme de coupole clair lumineuse, fabriqué de polycarbonate propre qui élimine tous les rayons ultraviolets indésirables et empêche la pénétration de la poussière et de la pluie. Le collecteur doit être installé au niveau du toit afin de collecter et capter le maximum la lumière du soleil. Le conduit de lumière se présente sous forme d'un tube recouvert d'un film réfléchissant qui agit comme un élément de transport léger qui guide la lumière dans le bâtiment par réflexion. Le tube doit avoir des surfaces internes hautement réfléchissantes et l'utilisation d'un film prismatique optique ou une feuille d'aluminium de haute réflectance, d'environ 95 à 99 %, augmentent considérablement son rendement (Zhang et al., 2002). Le diffuseur prend la forme d'un dôme en polycarbonate blanc monté sur le plafond de la pièce à éclairer, il peut être plat, convexe ou concave. Il est fait d'un matériau transparent et sa transparence varie pour répondre aux besoins de l'éclairage. Son rôle consiste à diffuser la lumière réfléchi depuis le tube afin de la répartir à l'intérieur.

L'enquête menée par Al-Marwae et al (2006) sur treize bâtiments a révélé que les tubes solaires pourraient fournir 25 % à 50 % d'éclairage nécessaire sur un plan de travail et la performance maximale de ce système est obtenue sous des conditions de ciel dégagé (clair) et l'éclairage atteint 1200 lux alors qu'il fournit un éclairage de 57 lux seulement sous un ciel couvert (Mohelnikova, 2009). La quantité de lumière fournie varie au cours de l'année.

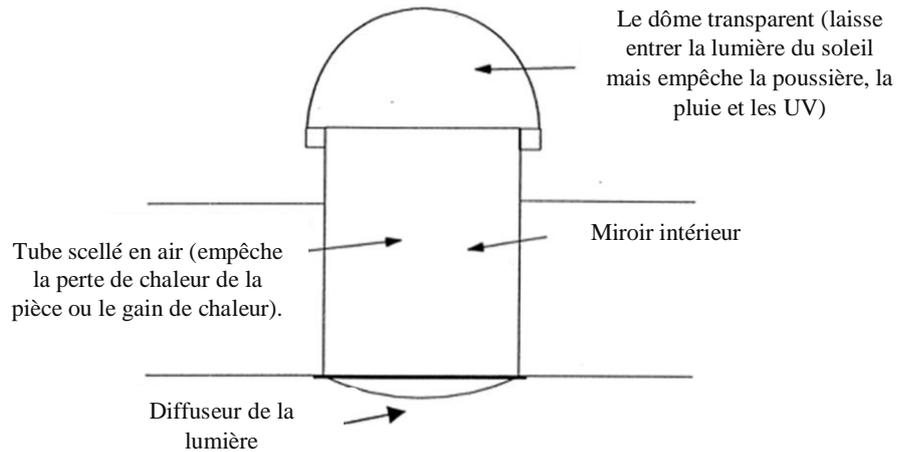


Figure 1.12: Les composants d'un tube solaire typique (Source: Oakley et al., 2000)

Le système de conduit de lumière présente plusieurs défis qui peuvent être résumés en termes de coût, d'entretien et de la sensibilisation des utilisateurs. Le coût d'installation de ces systèmes est sensiblement plus élevé par rapport à un système électrique ou une simple fenêtre classique en raison de la mise en œuvre des technologies avancées afin de recueillir plus de lumière (Mayhoub, 2011). Cependant, afin d'assurer le bon fonctionnement de ce système, un programme de maintenance doit être appliqué ainsi qu'un nettoyage régulier car la saleté et la poussière peuvent réduire son efficacité. On doit également vérifier la performance de chaque composant en remplaçant tout élément défaillant. La sensibilisation des usagers sur l'utilisation du conduit de lumière est essentiellement importante pour généraliser son installation dans le bâtiment. La réduction de la facture d'électricité, grâce à ce système, ne suffit pas pour convaincre l'utilisateur à cause de son coût élevé. En fournissant des informations sur les avantages en termes de l'environnement lumineux produit, le bien-être et l'amélioration de la productivité peuvent augmenter la sensibilisation des gens pour recourir à ce dispositif.

1.1.3. b2.3. Les plafonds anidoliques intégrés

Le plafond anidolique est un système d'éclairage zénithal, conçu selon le principe de l'optique non imageante, pour éclairer naturellement des espaces de grande profondeur. L'objectif principal de ce système est de fournir une bonne quantité de lumière sous des conditions de ciel couvert par la collecte de la lumière diffuse de la voûte céleste de sorte il peut être utilisé dans toutes les latitudes. Il est conçu pour être placé sur une façade verticale dans la partie supérieure de la fenêtre. Il fournit un éclairage latéral pour les bâtiments à caractère commercial, industriel ou institutionnel et non pour les bâtiments résidentiels. Le plafond anidolique intégré se compose d'un concentrateur optique situé à l'extérieur du bâtiment et des éléments anidoliques intérieurs placés sur les deux extrémités d'un conduit lumineux. Le concentrateur extérieur va

concentrer la lumière diffuse captée depuis la partie supérieure du ciel et oriente efficacement ces rayons vers le conduit à travers les deux éléments anidoliques. Au fond du local, un réflecteur parabolique installé près de l'ouverture de sortie qui permet de diffuser la lumière vers le bas (vers l'intérieur) et empêche tout rayon lumineux de retourner vers le conduit de lumière. La lumière du jour est transportée ensuite plus profondément dans la pièce par plusieurs réflecteurs spéculaires (light duct) qui occupent une grande partie du plafond. L'emplacement et les dimensions de ces derniers doivent être bien étudiés et compatibles avec les dimensions de l'espace afin d'éviter le risque d'éblouissement.

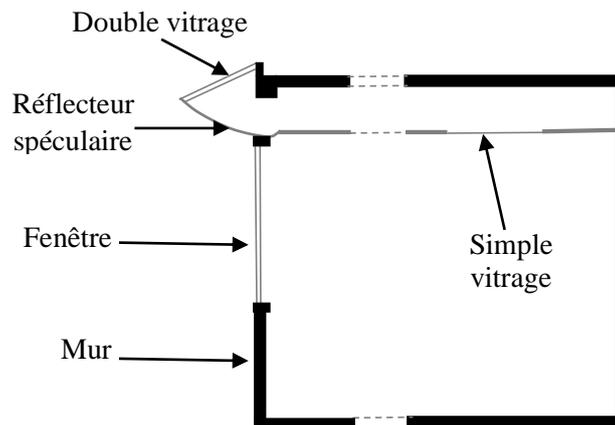


Figure 1.13 : Le Plafond Anidolique Intégré (Source: Courret et al., 1998)

Les éléments composant ce système doivent être revêtus par un matériau très réfléchissant et le facteur de réflexion doit être supérieur à 90 % afin qu'il atteigne sa performance maximale. Sous des conditions ensoleillées, des stores solaires sont installés au niveau du collecteur anidolique extérieur pour empêcher la pénétration des rayons solaires directs qui peuvent produire un risque d'éblouissement et/ou de surchauffe en été. Le store peut être déployé à l'entrée du vitrage et peut être commandé manuellement ou automatiquement. De plus, afin de recueillir le maximum de lumière depuis l'extérieur, le collecteur anidolique extérieur doit généralement couvrir toute la largeur de la façade et le conduit lumineux intérieur doit également occuper tout le vide au-dessus du faux plafond. Donc, l'intégration de ce système nécessite une bonne planification et une coordination dès la phase d'esquisse. Une expérimentation effectuée en Suisse (DEMONA) consiste à utiliser deux modèles de 6.5 m de profondeur. Le premier est un modèle de référence équipé d'une fenêtre classique alors que le deuxième est équipé d'un plafond anidolique intégré. L'évaluation de l'éclairage intérieur dans les deux modèles a montré que le plafond anidolique avait amélioré de manière significative l'éclairage au fond de l'espace qui atteint 300 lux à 6.5 m de profondeur.

Le système de plafond anidolique ne demande pas d'entretien ou de contrôle. Dans des conditions climatiques normales, la pluie suffit à nettoyer la partie extérieure du système pour maintenir son niveau optimal de performance. Dans le cas où il y aura de la poussière ou lorsque un système d'ombrage est installé, un nettoyage sera nécessaire. Des expériences réelles avaient confirmé que ce système peut garder sa performance pendant environ trois ans sans avoir un disfonctionnement ou une défaillance.

Les trois tableaux présentés ci-dessous regroupent les différents systèmes d'éclairage naturel qu'on peut utiliser dans les climats chauds. Ils sont classés en trois catégories selon leur principe de fonctionnement ainsi que l'intégration d'un dispositif d'ombrage :

- Tableau 1 : regroupe les systèmes d'éclairage naturel avec dispositif d'ombrage.
- Tableau 2 : regroupe les systèmes de redirection de la lumière naturelle sans dispositif d'ombrage intégré.
- Tableau 3 : regroupe les systèmes de transport de la lumière naturelle sans dispositif d'ombrage intégré.

Tableau 1.1 : Les systèmes d'éclairage naturel avec dispositif d'ombrage intégrés adéquats au climat chaud (Source : Auteur)

Les catégories des systèmes d'éclairage	Les types	Localisation dans l'enveloppe	Orientation	Profondeur de la zone passive	Avantages/ Eclairage intérieur obtenu	Les composants du système	Matériaux et revêtements	Inconvénients	Rôles
Les systèmes d'éclairage naturel avec dispositif d'ombrage	Le système anidolique intégré	Façade latérale	Nord/sud	5 m de la fenêtre	à 5 m de la fenêtre : -Ciel clair : 1000 lux -Ciel couvert : 250 lux	-Une ouverture vitrée -Deux réflecteurs extérieurs	-Aluminium -métal léger	-Coût élevé -Fuite d'eau	Guider la lumière diffuse
	Les panneaux prismatiques	-Façade latérale -Toit	Toutes les orientations	5.5m (selon des études)	A 4m de la fenêtre : - Eclairage moyen est de 450lux -Réduire la luminosité de la fenêtre.	Panneaux prismatiques transparent acryliques	Revêtement réfléchissant partiel (Aluminium)	-Coût élevé Eblouissement -la dispersion des couleurs	Guider la lumière diffuse
	Les stores et les persiennes	-Façade latérale -Toit	Toutes les orientations	-Ciel clair : 3m -Ciel couvert : 4.5m (selon des études)	A 4.5m de la fenêtre : - Eclairage moyen est de 500lux - distribution uniforme -Accroître l'efficacité énergétique.	Multiples lamelles	-Acier galvanisé, anodisé ou aluminium peint, -Plastique (PVC)	-Eblouissement -Contraste -Obstruer la vue extérieure -Difficulté de maintenance	obstruer, absorber, réfléchir, transmettre la lumière diffuse et directe
	Light shelf de redirection de la lumière directe	-Façade latérale	Nord/Sud	5.5m de la fenêtre	A 5.5m de la fenêtre : - Eclairage moyen est de 550lux -Réduit l'éblouissement	Un ou des plusieurs réflecteurs	Revêtement réfléchissant (aluminium anodisé, miroir...)	-Nettoyage permanent	Réfléchit et redirigé la lumière directe
	Les puits de lumière avec laser cut panels	-Toit	Sud	Profondeur non limité	-Ciel clair : 650lux<Eclairage<1200lux -Ciel couvert : 200lux<Eclairage<1600lux	-Un puits de lumière (pyramidale ou triangulaire) -Laser cut panels	-Laser cut panels	-faible rendement à haute altitude et sous un ciel couvert	Transmettre la lumière directe
					A 6.5m de la fenêtre :				

	Les stores solaires anidolique	-Façade latérale	Toutes les orientations	6.5m de la fenêtre	- Eclairage moyen est de 300lux -Ne provoque pas d'éblouissement	-Des éléments tridimensionnels -Plaques de verre	Revêtement réfléchissant	-Coût élevé	Transmettre la lumière directe
	Les éléments optiques holographiques	-Façade latérale -Toit -A l'intérieur du bâtiment	Toutes les orientations	-	-	-Film holographique -Plaques de verre	verre laminé (stratifié)	-Coût élevé Eblouissement -Surchauffe -la dispersion des couleurs -Entretien et nettoyage fréquent	Bloque la lumière directe et transmet la lumière diffuse

Tableau 1.2 : Les systèmes de redirection de la lumière naturelle sans dispositif d'ombrage intégré adéquats au climat chaud (Source : Auteur)

Les catégories des systèmes d'éclairage	Les types	Localisation dans l'enveloppe	Orientation	Profondeur de la zone passive	Avantages/ Eclairage intérieur obtenu	Les composants du système	Matériaux et revêtements	Inconvénients	Rôles	
Les systèmes d'éclairage naturel sans dispositif d'ombrage	Systèmes de redirection	Les systèmes anidolique intégré	Façade latérale	Nord/sud	5m de la fenêtre	A 5m de la fenêtre : -Ciel clair : 1000lux -Ciel couvert :250lux	-Une ouverture vitrée -Deux réflecteurs extérieurs	-Aluminium -Métal léger	-Coût élevé -Fuite d'eau	Guider la lumière diffuse
		Les panneaux prismatiques	-Façade latérale -Toit	Toutes les orientations	5.5m (selon des études)	A 4m de la fenêtre : - Eclairage moyen est de 450lux -Réduire la luminosité de la fenêtre.	Panneaux prismatiques transparents ou acryliques	Revêtement réfléchissant (Aluminium)	-Coût élevé Eblouissement -la dispersion des couleurs	Guider la lumière diffuse
		Light shelf de redirection de la lumière directe	-Façade latérale	Nord/Sud	5.5m de la fenêtre	A 5.5m de la fenêtre : - Eclairage moyen est de 550lux	Un ou plusieurs réflecteurs	Revêtement réfléchissant (aluminium)	-Nettoyage permanent	Réfléchir et rediriger la

Les systèmes d'éclairage naturel sans dispositif d'ombrage						-Réduit l'éblouissement		anodisé, miroir...)		lumière directe
	Laser cut panels	-Façade latérale -Toit	-	5m de la fenêtre	A 5m de la fenêtre : - Eclairage atteint 300lux.	-Panneaux fins -Laser cut panels -Unité de vitrage	-Matériau acrylique transparent -Vitrage	-Entretien nécessaire. -Coût élevé		Guider la lumière directe et dévier la lumière diffuse
	Les puits de lumière avec élément optique holographique (EOH)	-Toit	-	-	-	-Film holographique -Plaques de verre	verre laminé (stratifié)	-Coût élevé Eblouissement -Surchauffe -Entretien et nettoyage fréquent		Réfléchir et rediriger la lumière directe
	Les vitrages directionnels de la lumière directe	-Façade latérale -Toit	Sud	6m de la fenêtre	A 6m de la fenêtre : -Ciel clair : 600 lux -Ciel couvert :350 lux	-Des éléments acryliques -Double vitrage	Des éléments acryliques réfléchissants -Vitrage	-Coût élevé		Réfléchir et rediriger la lumière directe

Tableau 1. 3 : Les systèmes de transport de la lumière naturelle sans dispositif d'ombrage intégré adéquats au climat chaud

(Source : Auteur)

Les catégories des systèmes d'éclairage	Les types	Localisation dans l'enveloppe	Orientation	Profondeur de la zone passive	Avantages/ Eclairage intérieur obtenu	Les composants du système	Matériaux et revêtements	Inconvénients	Rôles
Les systèmes d'éclairage naturel sans dispositif d'ombrage Systèmes de transport de la lumière	Les light pipes (les conduits de lumière horizontaux CLH et verticaux CLV)	-Façade latérale -Toit	- Nord/Sud	Plus de 10m de profondeur	-Conduit horizontal : l'éclairage atteint 400lux. -Conduit vertical : l'éclairage atteint 250lux.	-Collecteur - Concentrateur -Tube de transport -Système de distribution	- Polycarbonate -Fibres optiques/ PMMA/ miroirs.	-Intégration architecturale difficile pour les CLV. -Entretien périodique. -Coût élevé.	Guider la lumière directe
	Les plafonds anodolique intégré	-Façade latérale	- Nord/Sud (ciel clair) -Toutes les orientations (ciel couvert)	6.5m de la fenêtre	A 6m de la fenêtre : - Eclairage moyen est de 300lux	-Collecteurs anodoliques -Réflecteurs anodolique spéculaire -Vitrage -Conduit -Store solaire -Light duct	-Aluminium anodisé -Vitrage organique -Double vitrage	-Contrôle pour les stores solaires	Rediriger et réfléchir la lumière diffuse et directe
	Les tubes solaires	-Toit	-	-	1200lux sous un ciel clair (100000lux)	-Une coupole -Un conduit -Un diffuseur	- Polycarbonate -Feuille d'aluminium /Film optique prismatique		Guider la lumière directe

Conclusion

A travers cette revue de la littérature, on peut déduire que la plupart des systèmes d'éclairage naturel étudiés améliorent la qualité lumineuse de l'espace architectural et permettent également d'assurer un confort lumineux intérieur agréable dans un climat chaud. Ces dispositifs sont classés en deux grandes catégories : on trouve les systèmes avec dispositif d'ombrage intégré et d'autres sans système d'ombrage. Une analyse approfondie de chaque dispositif a montré que les systèmes d'éclairage muni d'un dispositif d'ombrage intégré fonctionnent bien dans un climat chaud, ils bloquent la composante directe du soleil et transportent la lumière diffuse à l'intérieur mais ils présentent plusieurs inconvénients tels que la possibilité d'avoir le risque d'éblouissement et de surchauffe en été, le coût élevé de fabrication comme ils demandent un entretien et une maintenance permanente. Dans la deuxième catégorie (systèmes sans dispositif d'ombrage), on distingue les systèmes de redirection de la lumière et ceux qui transportent la lumière du jour profondément dans l'espace. Les systèmes de redirection permettent de guider la lumière directe ou la lumière diffuse depuis l'extérieur à l'intérieur du bâtiment par les phénomènes optiques de réflexion, de réfraction ou de déviation. Certaines études ont démontré qu'avec l'intégration de ces derniers, la zone passive s'étale à 6 m de profondeur et l'éclairage atteint 250 lux sous un ciel couvert et 1000 lux sous un ciel clair. Les systèmes de redirection nécessitent un coût de fabrication élevé et un entretien périodique pour assurer leur performance et dans certaines conditions, le risque d'éblouissement peut être présent. Le dernier type consiste à transporter et canaliser la lumière vers l'intérieur et peuvent, dans des situations spécifiques, éclairer plus profondément que les systèmes de redirection. Ils guident et réfléchissent la lumière directe et la lumière diffuse vers l'intérieur et leur performances atteignent jusqu'à 10 m de profondeur avec un éclairage moyen de l'ordre de 300 lux (selon des recherches).

On en conclut, que dans un climat chaud, les systèmes de transport de la lumière naturelle sont les plus performants car, ils utilisent à la fois la composante directe et diffuse et permettent d'éclairer naturellement des espaces ayant une grande profondeur sans qu'ils conduisent à l'inconfort visuel (l'éblouissement) et à la surchauffe en été. Notre recherche sur ces systèmes a démontré que le système de plafond anidolique intégré est plus efficace que les conduits lumineux et les tubes solaires car, ces derniers présentent quelques inconvénients (intégration architecturale difficile, coût élevé, entretien périodique, niveau d'éclairage trop élevé).

Donc, le système de plafond anidolique intégré sera l'objet principal de notre prochain chapitre.

Référence

- Abdou, O.A. (1997). Effects of Luminous Environment on Worker Productivity in Building Spaces. *Journal of Architectural Engineering*, 3 (3), 124-132.
- Alrubaiha, M.S., Zaina, M.F.M., Alghoulb, N.L.N. Ibrahima, S.M.A., & Elayebb, O. (2013). Research and development on aspects of daylighting fundamentals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 494–505.
- Ayers, M. J., & Carter, D. J. (1995). Remote source electric lighting systems: A review. *Lighting Research and Technology*, 27, 1-15.
- Baker, N., Fanchiotti, A., & Steemers, K. (1993). Daylighting in Architecture: a European reference book. *Commission of the European Communities, DG XII for Science, Research and Development, James and James, Brussels, 1993.*
- Blok, K. (2005). Enhanced policies for the improvement of electricity efficiencies. *Energy Policy*, 33(13), 1635–1641
- Boubekri, M., & Boyer, L.L. (1992). Effect of window size and sunlight presence on glare.
- Boyce, P. R. (2003). *Human Factors in Lighting. 2nd ed. London and New York: Taylor & Francis.*
- Boyce, P.R., Hunter, C., & Howlett, O. (2003). The benefits of daylight through windows. *Troy (NY): Lighting Research Center.*
- Carter, D. J., & Al Marwae, M. (2009). User Attitudes Toward Tubular Daylight Guidance Systems. *Lighting Research and Technology*. 41, 71-88.
- Chauvel, P., Collins., Dogniaux., & Longmore. (1982). Glare from Windows: current views of the problem. *Lighting Research & Technology*, 14(1), 31-46.
- Choi, J. H., Beltranb, L.O., & Kimc, H.S. (2012). Impacts of indoor daylight environments on patient average length of stay (ALOS) in a healthcare facility. *Building and Environment*, 50, 65–75.
- Clanton, N. (1996). Daylighting Increases Productivity While Cutting Costs. *Energy User News*, 21 (11), 34.
- Courret, G., Scartezzini, J.L., Francioli, D., & Meyer, J.J. (1998). Design and assessment of an anidolic light-duct. *Energy and Buildings*, 28, 79-99.
- Cowling, I., Coyne, S., & Bradley, G. (1990). Light in Brisbane Office Buildings -a Survey. *Brisbane: Centre for Medical and Health Physics, Queensland University of Technology.*
- Daich, S. (2011). Simulation et Optimisation du Système Light Shelf sous des Conditions Climatiques Spécifiques. *Thèse de magistère, Université de Biskra, Algérie.*
- Damelincourt, J.J., Zissis, G., Corbé, C., & Paule, B. (2010). Eclairage d'intérieur et ambiances visuelles (2010), *Cachan: Lavoisier, ISBN : 2743019115, 9782743019112.*
- Daylight in Buildings (2000): *A Source Book on Daylighting Systems and Components, a report of the International Energy Agency SHC Task 21/ECBCS Annex 29 (July 2000).*
- Directive 2010/31/EU. Energy performance of buildings; 2010
- Edmonds, I. R., Moore, G. I., & Smith, G. B. (1995). Daylighting enhancement with light pipes coupled to laser-cut light-deflecting panels. *Lighting Research and Technology*, 27, 27-35.
- Edmonds, I. R. (1993). Performance of laser cut light deflecting panels in daylighting applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 29(1), 1-26.
- Fletcher, B.A. (1975). History of architecture. *18th Edition. New York, NY: Charles Scibner's Sons.*

- Gligor, V. (2004). Luminous environment and productivity at workplaces. *Thesis (Licentiate), Helsinki University of Technology, Espoo.*
- Goulding, J. R., Lewis, O., & Steemers, T. C. (1994). Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook, B.T. Batsford Limited for the Commission of the European Communities, London.
- Hansen, G., Veronica., & Edmonds, Ian. (2003). Natural Illumination of deep-plan office buildings: light pipe strategies. *In: ISES Solar World Congress 2003, 14-19 June 2003, Goteborg, Sweden.*
- Hayman, S., Ruck, N., Johnsen, K., Selkowitz, S., Lee, E., Jakobiak, R., Scartezzini, J.L., & Kaase, H. (2000). Concept paper for IEA SHC Task 31: Daylighting buildings in the 21st Century. Integrating Sustainable Energy Savings with Human Needs. Brisbane. International Energy Agency. *Solar Heating and Cooling Programme.*
- Hopkinson, R.G. & Collins, J.B. (1970). *The Ergonomics of Lighting, Macdonald & Co.*
- Hopkinson, R.G. (1972). Glare from daylighting in buildings. *Applied Ergonomics*, 3(4), 206–215.
- <http://www.iea.org/>
- Hughes, P.C. (1983). An Examination of the Beneficial Action of Natural Light on the Psychobiological System of Man. *In: CIE 20th Session. International Commission on Illumination CIE. pp. D603.*
- Kisch, k. L. M. (1996). New Systems for Better Daylight Utilization. *Proceedings of Solar Energy in Architecture and Urban Planning, Berlin, German.*
- Kristensen, P. E. (1994). Daylighting technologies in non-domestic buildings. *Renewable Energies in Europe; International Journal of Solar Energy*, 15, 55-67.
- Lancashire, D.S., & Fox, A.E. (1996). Lighting: the way to building efficiency. *Consulting-specifying engineer; 1996. p.34*
- Leslie, R.P. (1994). What Makes Daylighting Successful? *CADDET Energy Efficiency Newsletter, Vol. 4.*
- Lieberman, J. (1991). Light-Medicine of the Future: How we can Use it to Heal Ourselves Now. *Bear and Co. Publ., Santa Fe, USA, 1991.*
- Littlefair, P.J. (1995). Computer assessment of the daylighting performance of light shelves. *Lighting Research & Technology*, (27)2, 69-74.
- Lucas, R. M., & Ponsonby, A. (2002). Ultraviolet radiation and health: Friend and Foe. *The Medical Journal of Australia*, 177, 594-598.
- Marwaee, M. A., & Carter, D. J. (2006). A Field Study of Tubular Daylight Guidance Installations. *Lighting Research and Technology*, 38, 241-258.
- Mayhoub, M. S., & Carter, D. J. (2011). The Costs and Benefits of Using Daylight Guidance to Light Office Buildings. *Building and Environment*, 46, 698-710.
- Meijer, F., Itarda, L., & Sunikka-Blankb, M. (2009). Comparing European residential building stocks: performance, renovation and policy opportunities. *Building Research & Information*, 37(5-6), 533-551.
- Mohelnikova, J. (2009). Tubular Light Guide Evaluation. *Building and Environment*, 44, 2193-2200.
- Molinelli, J.F., & Boyer, L.L. (1987). Measurements and comparisons of light shelf performance in two Texas office buildings. *Proc. of the 5th Symposium on Improving Building Energy Efficiency in Hot and Humid Climates. pp. 10-19. Houston, TX.*

- Molteni, S., Courret, G., Paule, B., Michel, L., & Scartezzini, J.L. (2000). Design of anidolic zenithal lightguides for daylighting of underground spaces. *Solar Energy*, 69, 117-129.
- Moore, E. O. (1981). A prison environment's effect on health care service demands. *Journal of Environmental Systems*, 11, 17-34.
- Muhs, J. D. (2000). Design and Analysis of Hybrid Solar Lighting and Full-Spectrum solar energy systems. *Proceedings of American Solar Energy Society "Solar2000 Conference", Madison, Wisconsin*.
- Müller, H. (1996). Erprobung einer anpassungsfähigen Fassade für die ganzjährige Solarenergienutzung (Testing of a flexible facade for usage of solar energy through the year). *Bauphysik 1/96, Verlag Ernst & Sohn, Berlin (1996)*.
- Myriam, B.C., Aries, G., & Newsham, R. (2008). Effect of daylight saving time on lighting energy use: A literature review. *Energy Policy*. Volume 36(6), 1858-1866.
- Nair, M.G., Ramamurthy, K., & Ganesan, A.R. (2014). Classification of indoor daylight enhancement systems. *Lighting Research and Technology*, 46, 245-267.
- Nicklas, M., & G, Bailey. (1996). Daylit Students Shine Brighter. *SunWorld*, 20 (3), 13-15.
- Oakley, G., Riffat, S., & Shao, L. (2000). Daylight Performance of Light pipes. *Solar Energy*, 69, 89-98.
- Penney, T.R., & Althof, J. (1990). American Trends in Commercial Buildings. In: *Int. Conf. on Water and Energy Conservation in Commercial Buildings. Brisbane, Oct 17-20, pp. 116-125*.
- Riegel, R.J., Windheim, L.S., Davy, K.V., & Shanus, M.D. (1983)). Case Study: Lockheed Building 157-an Innovative Deep Daylighting Design for Reducing Energy Consumption. In: *Advances in Energy Cost Savings for Industry and Buildings. Atlanta, Georgia: Fairmont Press Inc.*
- Ruck, N. (1985). Beaming daylight into deep rooms. *Building Res. Pract.*13, 144-147.
- Ruck, N., & Smith, S. C. J. (1982). Solar beam lighting as an energy conservation using a prismatic panel. *Proceedings of Proc. Conf. Daylighting and Energy Conservation, University of New South Wales. Australia*.
- Ruck, N., Aschehoug, O., Aydinly, S., Christoffersen, J., Courret, G., Edmonds, I., Jakobiak, R., Kischkoweit-Lopin, M., Klinger, M., Lee, E., Michel, L., Scartezzini, J.-L. & Selkowitz, S. (2000) Daylighting in Buildings. *A Source book on Daylighting Systems and Components, International Energy Agency (IEA) Task 21. Solar Heating and Cooling Programme, Energy Conservation in Buildings & Community System Lawrence Berkeley National Laboratory, California*.
- Scartezzini, J. L. et al. (1994). Office Lighting. *Publication of RAVEL Swiss action programme, EDMZ, Bern, Switzer-land*.
- Scartezzini, J.L., & Courret, G. (2002). Anidolic daylighting systems. *Solar Energy*, 73, 123-135.
- Shao, L., & Riffat, S. B. (2000). Daylighting using light pipes and its integration with solar heating and natural ventilation. *Lighting Research and Technology*, 32,133-139.
- Smiley, F. (1996). Students delight in daylight. *International Association for Energy Efficient Lighting Newsletter*, 5 (2), 11-12.
- Van Den Wymelenberg, K.G. (2008). Daylight Dialect. *Architectural Lighting*, pp.28-29
- 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 build*, 28 (2), 205-218.

- Wotton, E., & B, Barkow. (1983). An Investigation of the Effects of Windows and Lighting in Offices. *In: Int. Daylighting Conf. Phoenix.*
- Zhang, X., Muneer, T., & Kubie, J. (2002). A Design Guide for Performance Assessment of Solar Light-Pipes. *Lighting Research and Technology*, 34, 149-169.

CHAPITRE 2

LE PLAFOND ANIDOLIQUE INTÉGRÉ

Introduction

L'éclairage naturel peut être amélioré par l'installation de l'un des systèmes passifs de réorientation extrêmement performant qui est le système de plafond anidolique intégré qui a été développées par le LESO-PB/EPFL en Suisse (Courret,1999). Selon des recherches réalisées par Compagnon et Courret, ce dispositif d'éclairage naturel a la possibilité d'accroître de façon substantielle la pénétration de la lumière du jour dans les locaux profonds. Les résultats de ces dernières ont montré également que le facteur de lumière du jour a été doublé et la lumière transportée atteint, par plusieurs configurations du dispositif anidolique une profondeur de 5 mètres en comparaison avec une façade conventionnelle équipée d'une fenêtre classique (Compagnon et al, 1993 ; Courret et al, 1998). L'Agence internationale de l'énergie (AIE) a donné une classification pour ces technologies d'éclairages destinées aux bâtiments pour prévoir un très bon aperçu avec une liste de fonctionnalités pour aider les concepteurs à la sélection selon leurs besoins.

Le système anidolique intégré proposé dans cette étude peut utiliser les avantages des deux sources lumineuses latérales et zénithales grâce à configuration spécifique. Il offre plusieurs avantages à la fois : il canalise horizontalement un rayon lumineux, il nécessite peu de contrôle de l'éblouissement comme il peut éclairer chaque étage d'un immeuble de grande hauteur. Dans ce présent chapitre, on propose une analyse approfondie et une description bien détaillée des différentes configurations de systèmes anidoliques pour étudier leurs conception, leurs principe de dimensionnement, leurs principaux composants, leurs principe de fonctionnement, leurs efficacité énergétique, les exigences de la performance, les matériaux de fabrication, ainsi que quelques exemples réels de réalisation.

2. 1. Les technologies avancées d'éclairage naturel

Au cours des dernières décennies, diverses technologies d'éclairage naturel ont été développées, certaines d'entre elles ont prouvé leurs efficacité (Scartezzini et Courret, 2002). Ces systèmes sont intégrés dans le bâtiment soit au niveau de la façade (latérale) soit en toiture (zénithale). Un conduit de lumière est un dispositif conçu pour transporter la lumière à partir d'une source lumineuse extérieure d'un point ou d'une surface à une certaine distance (profondeur), il redirige la lumière du jour à travers une fenêtre classique (ouverture latérale ou zénithale) d'ombre incliné. Le dispositif est constitué d'un diffuseur de la lumière à partir d'une ouverture d'entrée et spécialement des réflecteurs qui sont conçus pour diriger la lumière dans une section angulaire spécifiée (Edmonds, 1992). Généralement, cette section angulaire s'étend à horizontalement jusqu'à une altitude d'environ 60°. Ainsi, l'ouverture de sortie du guide lumineux apparaît sombre, ce qui réduit la possibilité d'éblouissement pour les occupants. Ces dispositifs d'éclairage sont fixés sur la fenêtre de la même manière qu'une protection externe classique agissant à la fois pour réduire le gain de chaleur rayonnante et de rediriger la lumière du jour dans le bâtiment, ils sont habituellement faits de matériaux de qualité optique maximale tels que la résine acrylique, le polycarbonate, les résines époxydes et le verre (Callow, 2003) pour une meilleure manipulation du phénomène de réflexion.

Les technologies d'éclairage naturel sont classées selon les conditions climatiques et le taux de la couverture nuageuse du ciel ainsi que les différentes composantes directes et diffuses. Les techniques employées dans les climats chauds doivent utiliser la lumière directe du soleil, tout en conservant un confort visuel et thermique acceptable pour les occupants du bâtiment. Ceci peut être réalisé en adaptant la conception d'un système de protection extérieure qui produit de l'ombre. Ces systèmes guident une partie de la lumière solaire incidente en profondeur dans le bâtiment tout en veillant à éviter l'apparition de l'éblouissement et le dispositif peut améliorer l'éclairage naturel tout en assurant la protection solaire directe. L'éblouissement qui provient des fenêtres est lié principalement à la luminance visible depuis le ciel, et d'autre part au rapport de la luminosité du ciel à la luminosité ambiante d'une pièce (Boubekri & Boyer, 1992; Chauvel, Collins, Dogniaux & Longmore, 1982; Hopkinson, 1970a, b, 1972).

2. 2. La conception d'un système anidolique

La recherche d'un système d'éclairage naturel statique qui redirige la lumière profondément et empêche également la lumière directe du soleil de pénétrer dans un espace est une préoccupation primordiale pour des concepteurs. Les Systèmes anidolique (ADS) sont classés

parmi les systèmes d'éclairage naturel intégrés en façade les plus efficaces ; ils ont été introduits dans le bâtiment pour la première fois en 1998. En fait, cette nouvelle approche d'éclairage naturel a été développée dans le laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment (LESO-PB) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) en Suisse (Compagnon et al, 1993 ; Courret et al, 1999). Le mot anidolique est le synonyme de non-imagerie, en grec ancien, «un» signifie «non», alors que «Eidolon» signifie "image" (Mihano et al, 1991). Ce système est conçu suivant les principes de l'Optique Non-Imagerie (ONI) (Welford et Wilson, 1989) qui consiste à étudier les phénomènes optiques qui maximisent l'efficacité du transfert lumineux (la concentration et de déconcentration) sans produire des reflets lumineux (Compagnon, 1993; Welford & Winston, 1978; Winston, 1991). La loi de la thermodynamique et la loi de conservation étendue impliquent que la lumière se concentre à partir d'une grande surface vers une petite surface qui peut être atteinte pour une section angulaire restreinte pour les rayons lumineux acceptés. Inversement, la déconcentration de la lumière dirige les rayons lumineux dans une section angulaire limitée. Cette propriété est utile pour la collimation de la lumière.

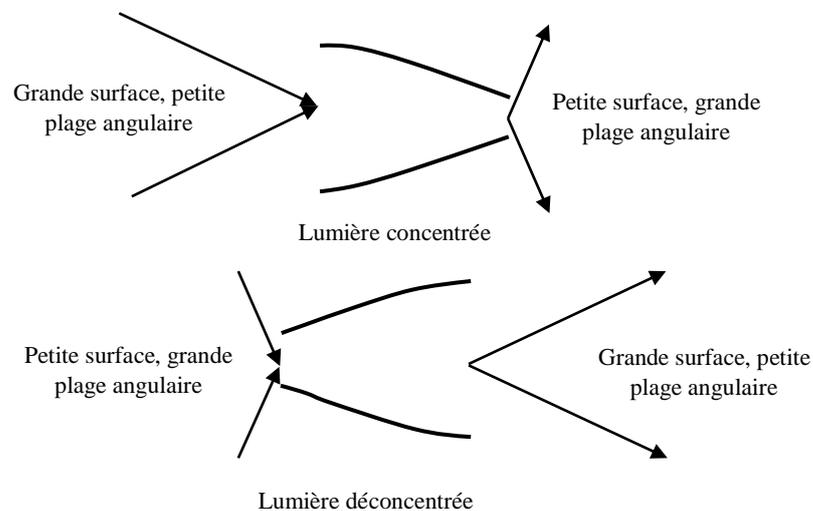


Figure 2.1 : Lumière collimatée par déconcentration en utilisant ONI (Source : Greenup, 2004)

L'optique Non-imagerie a établi des méthodes fiables et efficaces pour la conception des concentrateurs solaires qui atteignent presque la limite théorique de la concentration solaire dictée par la loi de la thermodynamique : un facteur de concentration de 46 000 pour la lumière du soleil (Welford et Winston, 1989). Les concentrateurs solaires et les luminaires artificiels utilisent la conception de l'optique non imagerie (Elmer, 1980; Gordon & Kashin, 1994; Gordon, Kashin & Rabl, 1992; Gordon & Rabl 1992; Rabl, 1976; Rabl & Gordon, 1994; Ries & Winston, 1994 ; Winston & Ries, 1993). Ensuite, cette théorie a été facilement appliquée à la conception de nouveaux dispositifs d'éclairage naturel.

Cette fonction peut être expliquée par les propriétés de l'optique non-imagerie suivantes :

- Le flux lumineux sortant du système optique montre une mesure étendue égale à celle du flux incident. La figure 2.2 indique que la conception de la forme du réflecteur selon l'optique non-imagerie assure que la mesure optique du faisceau lumineux entrant $FL_{entrant}$ (en traversant l'ouverture d'entrée) qui pénètrent à travers l'ensemble du dispositif anidolique est égale à celle du faisceau émergent $FL_{sortant}$ (sortant à travers l'ouverture de sortie). Différentes techniques peuvent être utilisées pour déterminer les profils du réflecteur du système anidolique dont les principales sont l'application du principe de bord-ray et la méthode du vecteur du flux géométrique. Le principe de bord-ray, schématisé dans la figure 2. 2 exige que tous les rayons entrant par l'ouverture d'entrée avec un angle de collecte extrême (ACE) se concentrent au point focal P et émergent ensuite à l'ouverture de sortie. Un profil parabolique est ensuite obtenu, à partir de point P et des axes parallèles à la direction de l'axe parabolique $Direction_{AP}$, conduit ainsi à une solution graphique simple pour un flux lumineux uniforme.

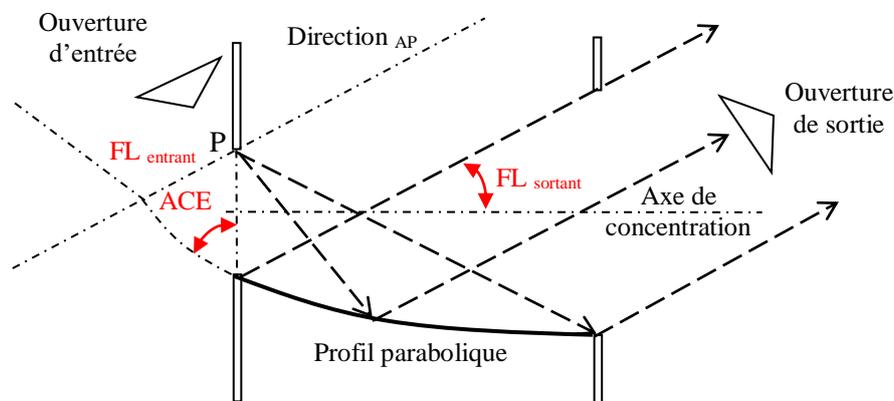


Figure 2.2 : La conception de réflecteur anidolique (Source : Scartezzini et Courret, 2002)

- Le nombre de réflexions des rayons lumineux sur les surfaces optiques du système peut être minimisé grâce à une conception appropriée (expliquant l'efficacité optique élevée atteinte par le système).
- Le système optique peut être conçu pour assurer une haute sélectivité angulaire permettant la sélection précise des rayons entrants à l'entrée de l'ouverture du système, ainsi qu'un contrôle précis des rayons sortants à l'orifice de sortie.

Les systèmes anidolique se présentent sous la forme de miroirs de forme parabolique dont la conception est inspirée des principes de l'optique non-imagerie et d'une technologie appelée le concentrateur parabolique composé (CPC). Le CPC a été utilisé à l'origine comme un concentrateur solaire qui accepte tous les rayons lumineux provenant d'une mesure angulaire

définie et les concentre sur une zone plus petite. Lorsque le CPC est utilisé pour les applications d'éclairage naturel, il utilise le même type de profil de réflecteur mais la lumière se déplace dans le profil dans la direction opposée. Les CPC sont construits avec un matériau très réfléchissant et la concentration du rayonnement solaire est obtenue par la forme parabolique de l'élément. ils acceptent la lumière d'une certaine partie du ciel (secteur de l'admission) qui est ensuite transmise avec un nombre modéré de réflexions internes, permettant la concentration du flux lumineux (Courret et al., 1998, Molteni et al., 2000). Le secteur d'admission du CPC est choisi en définissant la partie du ciel qui est considérée comme une source de lumière en fonction des exigences du système. Par exemple, si le système est dans une zone où les conditions nuageuses sont dominantes, la section d'acceptation est plus grande mais la concentration est plus faible et les composants du système doivent d'être de plus grande taille. Les rayons entrants dans le collecteur avec une inclinaison comprise dans cette gamme seront transmis par le CPC, les autres rayons seront réfléchis. Il y a quatre paramètres qui définissent la géométrie du CPC : la taille de l'ouverture d'entrée et de sortie, la longueur et l'angle de sortie maximale. Le réglage de deux paramètres permettra de déterminer les deux autres et de définir complètement la géométrie du CPC. En se référant à la figure 2.3 et sur la base d'une vue latérale d'un collecteur anidolique zénithal de Scartezzini et al (2002), la lumière pénètre dans toutes les directions à travers un petit orifice d'entrée et elle s'aligne dans une section angulaire contrôlée à la sortie.

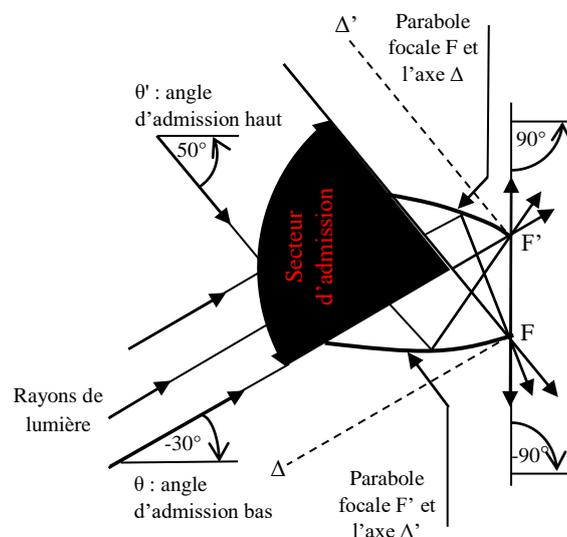


Figure 2.3 : La conception du CPC (Source : Courret et al, 1998)

Il existe deux types de concentrateurs de lumière : un CPC bidirectionnel, constitué d'un profil CPC clos avec des miroirs plats où l'ouverture de sortie de lumière est réduite dans une

direction et un CPC tridimensionnel, qui est un profilé réalisé par la rotation d'un profil CPC 2-D autour de son axe de symétrie. La section d'admission angulaire minimise le rejet de la lumière du ciel même si la lumière est diffuse permettant une bonne solution pour collecter la lumière dans des conditions nuageuses. Dans un CPC 3-D, la surface de sortie de la lumière est réduite dans les deux directions. Les figures suivantes présentent les deux types de collecteurs CPC (Molteni et al., 2000) :

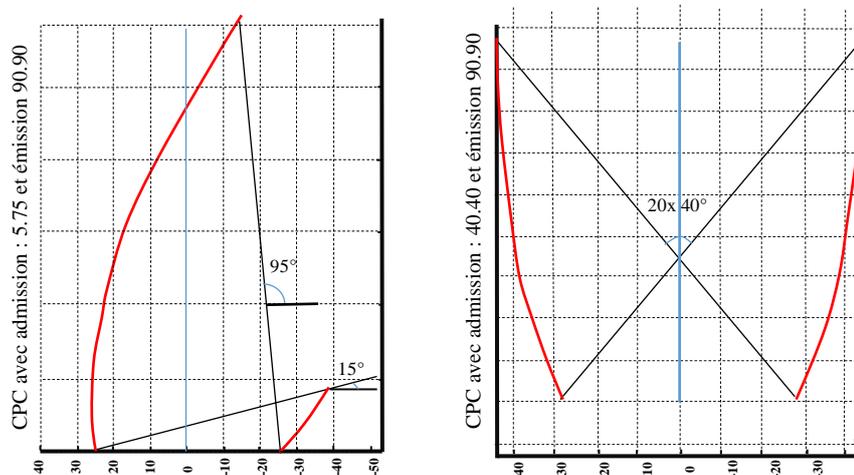


Figure 2.4 : Le principe de CCP (Source : Molteni et al., 2000)

Actuellement, les collecteurs sont couplés d'un conduit lumineux anidolique et spéculaire qui est placé au-dessus du plafond. Ces dispositifs sont appelés systèmes de plafond anidolique intégré (PAI) dont leur conception vise à fournir une lumière du jour suffisante principalement pour une pièce dans des conditions de ciel couvert (Courret et al., 1998). La pénétration de la lumière directe du soleil est contrôlée par un dispositif situé sur le vitrage d'entrée. Le système est principalement conçu pour l'éclairage latéral des bâtiments commerciaux avec des façades qui se trouvent dans des conditions essentiellement couvertes. Aucun contrôle ni entretien particuliers est nécessaires. Des tests ont montré que les niveaux d'éclairage dans le lieu de travail augmentent avec l'installation de ce système et une bonne distribution de luminances dans des immeubles de bureaux dans des conditions de ciel nuageux a été enregistrée (Ruck et al., 2000). En général, un concentrateur anidolique présente plusieurs avantages : 1) la taille du conduit est réduite en raison de la concentration de la lumière du jour et 2) la collecte de la lumière du jour de manière passive minimise les coûts de construction et d'entretien contrairement aux systèmes actifs. De plus, il existe différentes géométries et formes de collecteurs anidoliques dont leur conception dépend de type de bâtiment. Cependant, la concentration du flux lumineux dépend des angles de collecte de lumière qui varie en fonction de l'emplacement géographique du bâtiment.

2. 3. Le plafond anidolique intégré (PAI)

Le plafond anidolique est un système de distribution intensif de la lumière naturelle. Il est conçu pour être situé sur une façade verticale au-dessus de la fenêtre pour ne pas empêcher la vue vers l'extérieur. La partie externe de ce système recueille les rayons de lumière diffuse avec une grande efficacité optique, le plafond anidolique est adapté pour éclairer les pièces avec la lumière diffuse au cours de conditions de ciel couvert. Le système est conçu pour collecter la lumière diffuse de la voûte du ciel, de sorte qu'il peut être utilisé dans toutes les latitudes si les stores solaires sont installés pour protéger contre l'éblouissement et la surchauffe du soleil direct. Le plafond anidolique est un système d'éclairage zénithal. Il s'agit en fait d'un conduit lumineux intégré dans un plafond suspendu au milieu de la pièce, il est composé de deux miroirs de forme parabolique jouant le rôle de concentrateurs qui captent le flux lumineux entrant et le redistribuent sur une zone plus large. Les éléments anidoliques sont placés aux deux extrémités du conduit lumineux. Le collecteur anidolique zénithal, est composé d'un miroir parabolique externe, qui rassemble la lumière du zénith du ciel, et de deux miroirs paraboliques internes, qui redistribuent la lumière collectée. Les courbes de ces miroirs internes sont conçues et positionnées selon le principe de bord-ray de l'optique non-imagerie, qui stipule que les rayons extrêmes entrant dans le système devraient être les mêmes rayons à la sortie (Wolford, 1989).



Figure 2.5. Le système de plafond anidolique intégré (Source : Scartezini et Courret, 2002)

2.3.1. Principe de fonctionnement

Un plafond anidolique recueille typiquement un flux maximal de la lumière du jour depuis l'extérieur du bâtiment et le redistribue à l'intérieur avec un nombre minimum de réflexions. Cela signifie que chaque rayon de lumière qui entre dans le système est conduit tout au long

avec un nombre minimum de rebonds, en veillant à ce que les pertes de réflexion sont réduites et qu'aucun rayon n'est non utilisé. Il est spécialement conçu pour réduire le flux de lumière qui atteint la zone située près de la fenêtre et pour augmenter l'éclairage au fond de la pièce. L'éblouissement et les zones sombres peuvent être évités de cette façon. Typiquement, la lumière est capturée avec un collecteur parabolique composé (CPC) ou collecteur elliptique composé (CEC) installés sur la partie extérieure du bâtiment. Ces collecteurs se présentent sous forme de miroirs qui fournissent la lumière pour une large collection et avec un angle de capture vertical de près de 90 degrés, à partir de l'horizon au plan vertical de la paroi de support. En faisant placer le CPC asymétriquement, les angles solaires admis peuvent être adaptés à l'orientation de la façade et le soleil, en excluant les rayons chauds du soleil de l'après-midi. Un premier CPC est dirigé vers l'extérieur, reflétant une certaine sélection des rayons du soleil en fonction de sa géométrie choisie. Le deuxième CPC reflète la lumière provenant du premier, en fournissant une redirection de la lumière du soleil vers l'arrière de local. Contrairement aux concentrateurs paraboliques industriels, les CPC architecturaux ne capturent la lumière qu'en un point focal unique ou en ligne focale ; à la place, la lumière est dirigée dans le bâtiment à travers une ouverture relativement large. Avec le même modèle de capture, en corrélation avec un faible taux de concentration, ce qui atténue la nécessité d'un suiveur solaire : un collectionneur anidolique fixé à demeure reste efficace à tout moment de la journée (Chaves, 2008). Un deuxième CPC ou CEC vont agir comme un transformateur d'angle qui se disperse dans ce faisceau (Chaves, 2008). Les collecteurs paraboliques externes nécessitent une isolation de la chaleur, double vitrage sur l'ouverture et stores zénithaux pour réduire l'éclairage excessif, l'éblouissement et la chaleur des jours ensoleillés.

Afin de recueillir suffisamment de flux lumineux, le collecteur anidolique doit généralement couvrir toute la largeur de la façade de la chambre et le conduit de lumière doit complètement occuper le vide au-dessus du plafond suspendu dans la salle. Aucun autre système de construction ou éléments structurels doivent être placés dans cet espace. Sinon, la performance lumineuse va diminuer. En outre, parce que l'utilisation des plafonds anidolique affecte directement de nombreux autres éléments de construction, l'utilisation de ce système nécessite une coordination supplémentaire dans la planification et la construction.

La figure 2.6 illustre une section d'un système de plafond anidolique qui recueille la lumière diffuse à partir de demi-hémisphère installée sur la partie supérieure d'une façade vers une ouverture d'entrée qui la refoule à l'intérieur d'un espace à travers une ouverture de sortie sous forme d'un faisceau lumineux d'étalement angulaire qui est égal à $P/2$.

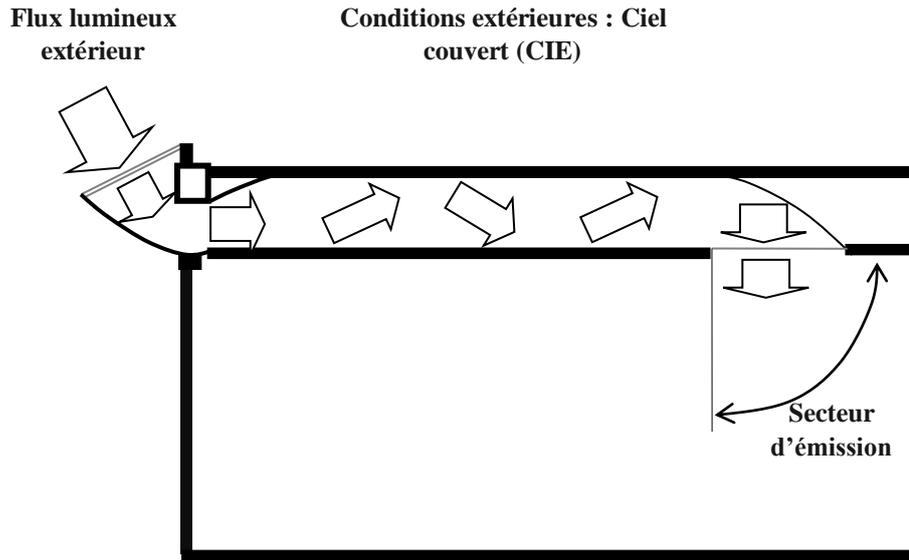


Figure 2.6 : Le fonctionnement de système de PAI (Source : Courret et al, 1998)

2.3.2. Rôles d'un plafond anidolique

Le but de la plupart des systèmes de redirection est d'augmenter la quantité de la lumière du jour utile dans un espace, soit en éliminant l'éblouissement et donc la nécessité d'installer des stores, soit en assurant une bonne distribution de la lumière du jour, ce qui rend la pièce plus lumineuse ou semble l'être. Une étude menée par Aizlewood (1993) a montré que tout système de redirection de la lumière doit causer des pertes de transmission. Les systèmes anidoliques d'éclairage naturel ont une capacité particulière d'augmenter constamment et sensiblement le niveau d'éclairage naturel et le conduisent profondément dans un espace. La capacité de recueillir, de collecter et de redistribuer la lumière diffuse est l'un des plus grands avantages du système anidolique chose qui nécessite une conception particulière. L'ouverture du système anidolique est donc installée au-dessus de la fenêtre et bloque une partie de la lumière entrante. Le système parvient toujours à améliorer la qualité lumineuse intérieure en augmentant les niveaux de lumière en profondeur et en créant une distribution plus équilibrée dans tout l'espace tout en occupant l'espace réduit du faux plafond. Ainsi, il conduit à faire des économies importantes d'énergie par la réduction de l'utilisation de l'éclairage électrique dans les espaces ayant une grande profondeur durant la journée.

Donc, les avantages de ce système sont résumés comme suit :

1. Le système bloque une grande partie de la composante directe du flux lumineux qui atteindrait la section de la fenêtre à travers un vitrage vertical. Il réduit donc l'éclairement de

plan de travail ainsi que les luminances des objets et des murs, ce qui contribue à réduire l'éblouissement et améliore le confort pour les occupants qui travaillent à côté des fenêtres.

2. Le flux lumineux bloqué n'est pas rejeté mais redirigé vers le plafond qui le diffuse vers tout le local, ce qui assure une répartition plus uniforme. Des mesures faites dans des études précédentes ont montré que le niveau d'éclairage obtenu sur le plan de travail, grâce au plafond anidolique, est plus élevé au centre et au fond par rapport à une fenêtre standard.

2.3.3. Les différentes composantes

Le système de plafond anidolique est installé au-dessus d'un faux plafond et comprend trois principales composantes : un collecteur anidolique zénithal installé à l'extérieur du bâtiment qui est utilisé pour capturer le maximum de lumière du jour. Ce collecteur est couvert par un double vitrage et équipé d'une protection estivale. Un tube ou un conduit lumineux de forme rectangulaire situé dans les pièces intérieures. Ce dernier est un tube opaque de transport situé entre le collecteur extérieur et les distributeurs intérieurs et délimité par deux éléments anidoliques. Son rôle consiste à transférer la lumière du jour à partir du collecteur au distributeur et à assurer une distribution optimale de la lumière capturée pour cibler les zones à éclairer. Il peut changer de forme et de largeur et leurs modifications peuvent influencer la quantité de lumière intérieure. Le tube lumineux est muni d'un ou de plusieurs puits lumineux (light duct), couverts par un vitrage et placés selon le besoin. La dernière composante est un élément de distribution (distributeur) qui se présente sous forme d'un tube diffuseur situé à l'intérieur de l'espace et placé à la fin du conduit lumineux afin de canaliser la lumière de jour et la faire diffuser dans l'espace.

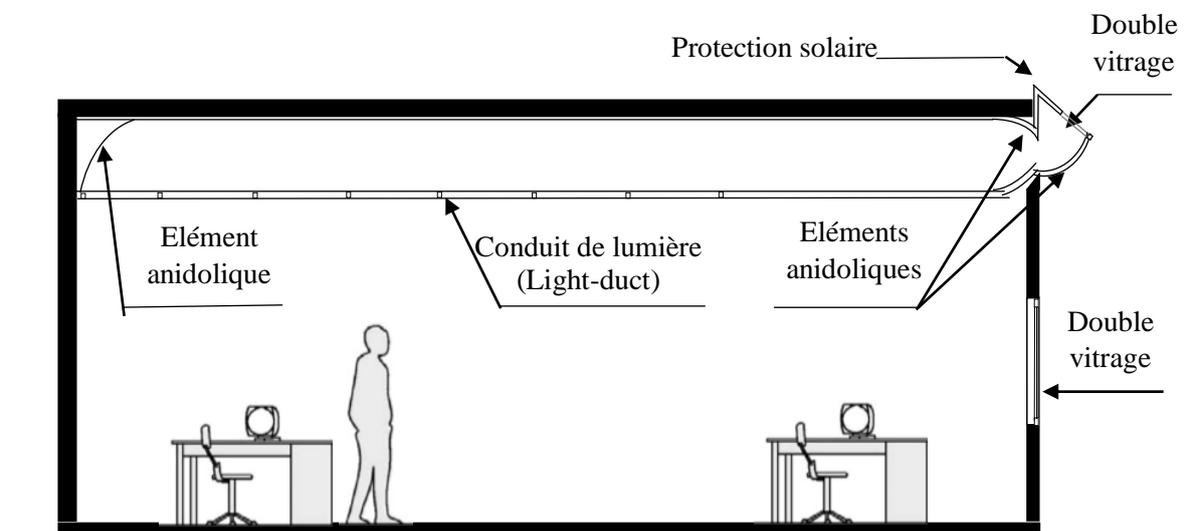


Figure 2.7 : Les éléments composants un système de PAI (Source : Wittkopf et al. ,2010)

Un nouveau modèle informatisé du plafond a été récemment mis au point lors d'un projet de collaboration entre l'EPFL et l'Université nationale de Singapour (NUS). Le grand avantage de ce nouveau modèle est le fait qu'il est constitué de plus de 30 composants différents. Différentes matières de revêtement peuvent être attribuées à chacun d'eux. Cela permet d'identifier les composants du système où l'utilisation des revêtements réfléchissants qui sont fortement coûteux est nécessaire et d'autres composants qui peuvent utiliser des matériaux moins coûteux sans que cela diminue significativement l'efficacité optique du plafond anidolique intégré (PAI). Le collecteur zénithal du PAI peut être fractionné en huit principaux éléments. Les parties une et deux de collecteur anidolique pourraient en outre être divisées en six sous-éléments distincts (voir figure 2.8).

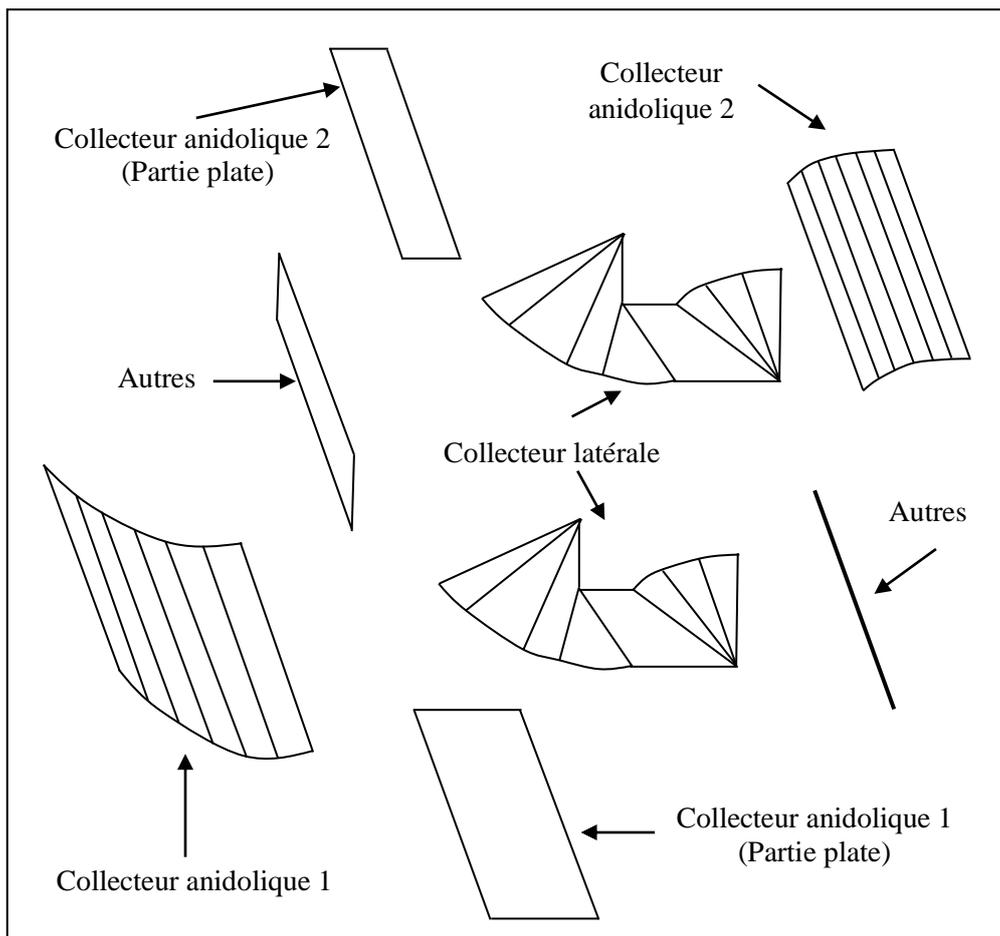


Figure 2.8 : Les principaux éléments de collecteur zénithal (Source : Friedrich L et al, 2009)

Il est également possible de diviser le distributeur anidolique en six sous-éléments et les côtés du distributeur en trois sous-éléments pour chacun. En outre, le light duct se compose de quatre éléments dont deux latéraux, un haut et un autre bas (voir figure 2.9).

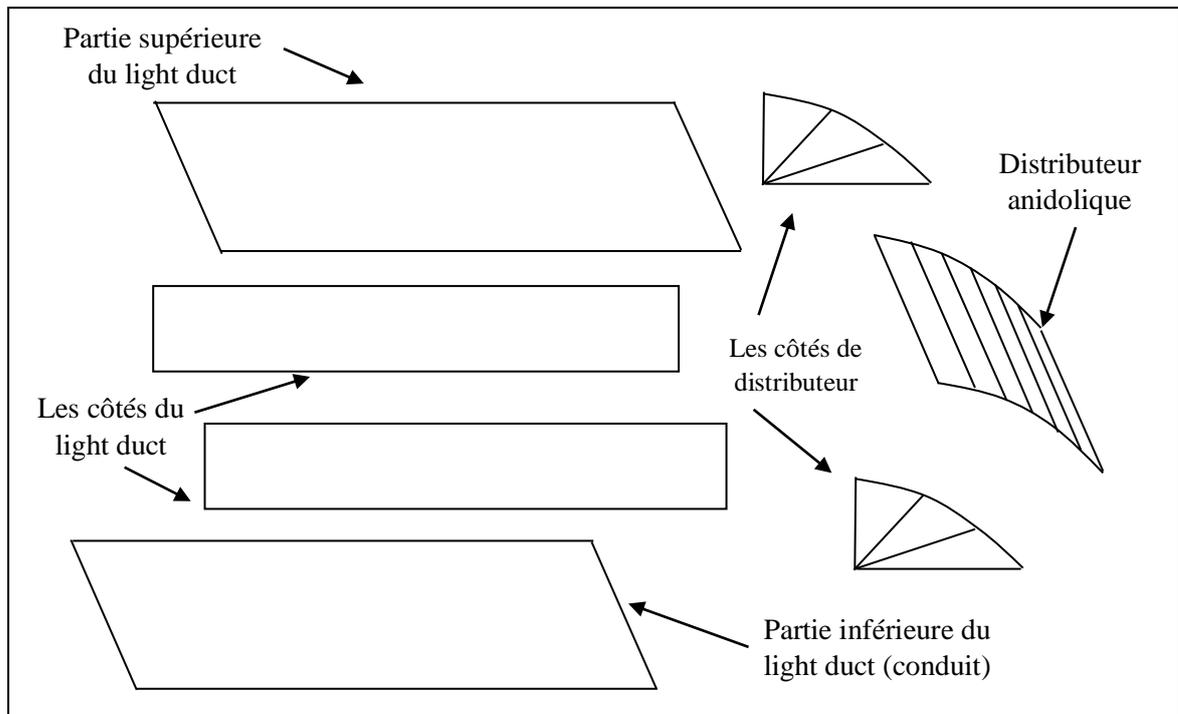


Figure 2.9 : Les éléments principaux du light duct et de distributeur (Source : Friedrich et al, 2009)

2.3.4. Les matériaux de fabrication

La composante la plus importante dans un plafond anidolique, qui assure sa performance, est l'élément anidolique qui reçoit le rayon lumineux en le rebondit grâce à sa revêtement très réfléchissant. Il existe deux types de matériaux dont chacun a ses propres caractéristiques : les feuilles prismatiques et les feuilles spéculaires. Dans le premier type, la réflectivité est une réflexion totale résultante d'une série de textures de rainurage triangulaires d'un matériau transparent dont l'indice de réfraction est très élevé. De plus, les rayons situés dans la plage des angles acceptables sont reflété parallèlement par les rainures. Cette dernière dépend de l'indice de réfraction de chaque matériau. Dans le type spéculaire, la réflectivité suit la règle de base de réflexion qui stipule que l'angle d'incidence des rayons est égal à l'angle du rayon réfléchi, elle donne le coefficient de transmission et d'absorption du matériau. L'élément anidolique est un déviateur, réalisé par translation du profil selon une droite horizontale, qui est revêtu dans la plupart des cas de tôle d'aluminium anodisée à haut pouvoir de réflexion ($\rho = 0.9$) afin d'atteindre un rendement maximal. Il est rattaché à des cadres faits en bois qui peuvent être remplacés par du métal, du plastique ou des matériaux composites lorsque les volumes de production augmentent. La configuration la plus utilisée d'élément anidolique se compose de vingt pièces dont chacune est composée de plusieurs éléments fabriqués en matière plastique au moyen de moulage à froid sous vide dans un moule en silicone. La pièce-mère est obtenue par stéréo lithographie à partir d'un modèle informatique. Les réflectance

des surfaces est atteintes grâce à un revêtement d'aluminium par un dépôt de vapeur de 10 µm. Puis après, plusieurs couches de vernis sont appliquées sous et sur le métal. Il est à noter qu'il est impossible d'obtenir un polissage parfait en raison des difficultés qui sont apparues lors de l'enlèvement du moule. Les vingt pièces sont installées dans un cadre métallique et inclinées selon l'angle d'incidence des rayons solaires. A la fin de tube anidolique, on trouve une fenêtre zénithale faite par un vitrage organique. Ce dernier est généralement considéré, dans l'industrie, comme un matériau en feuille produit par la polymérisation séquencée de méthacrylate de méthyle. Il est utilisé pour enfermer les foyers et pour les vitrages des serres, des dômes, des fenêtres et des vérandas. Le long du conduit anidolique, il y a des puits de lumière (light duct) qui sont enfermés par un vitrage pour garder le nettoyage des surfaces réfléchissantes. Le collecteur zénithal est fabriqué en double vitrage afin d'assurer à la fois la pénétration de la lumière et minimiser les échanges thermiques avec l'extérieur. Le collecteur parabolique externe est équipé de stores zénithaux (Roller blind) qui doivent être correctement intégré dans le système et utilisés pour réduire l'éclairage excessif, l'éblouissement et la chaleur pendant estivale.

Une recherche faite, par Friedrich et al (2009) à Singapour, qui avait comme objectif de comparer l'efficacité lumineuse de six matériaux de coefficients de réflexion différents ont montré que le facteur de réflexion des matériaux utilisés pour la fabrication ou la couverture des éléments qui composent le système anidolique influence considérablement son rendement et son efficacité. Les résultats de cette expérience sont présentés dans la figure 2.10

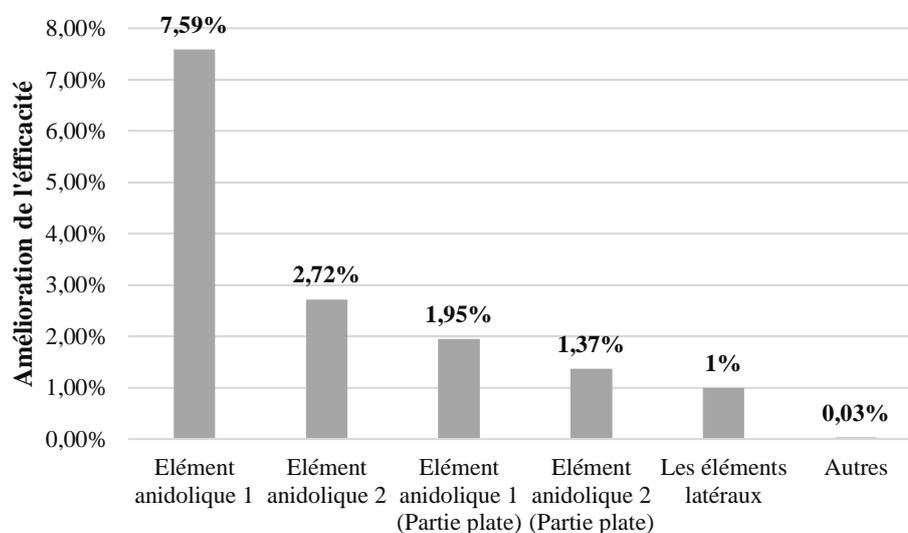


Figure 2.10 : Comparaison du rendement des différents revêtements des collecteurs anidoliques (Source : Friedrich et al, 2009).

De plus, les chercheurs ont constaté une amélioration de l'efficacité du plafond anidolique qui atteint 7.59 % lorsqu'on change le revêtement d'aluminium anodisé de l'un des collecteurs par un revêtement d'argent hautement réfléchissant qui atteint 98 % de réflectance spéculaire et laissant tous les autres éléments de système revêtu par un aluminium anodisé (matériaux utilisés au début) de 90 % de réflectance spéculaire ou l'efficacité de ces éléments est de l'ordre de 0.03 % et 2.72 % .

2.3.5. Les catégories du système anidolique

Deux catégories différentes de systèmes anidoliques ont ainsi fait l'objet de travaux de recherche et de développement à l'EPFL : il y a des dispositifs munis d'un collecteur anidolique zénithal en façade et d'autres dispositifs intégrés à des stores ou à des fenêtres à double vitrage. Compte tenu du nombre élevé et de la diversité des critères de performance appliqués aux dispositifs d'éclairage naturel, chaque catégorie possède des avantages et des inconvénients qui sont présentés dans le tableau suivant ;

Tableau 2.1 : Principaux avantages et inconvénients de dispositifs anidolique (Source : Scartezzini et al, 2000)

Catégorie	Avantages	Inconvénients
1	-Performance très élevées par ciel couvert et serein -Economies d'énergie importantes par ciel couvert	-Collecteur protubérant en façade -Plus grande difficulté d'intégration architecturale
2	-Performance élevées par ciel serein -Intégration architecturale plus aisée -Protection solaire intégrée	-Performance moyenne par ciel couvert

De plus, les systèmes anidoliques peuvent être classés en trois types selon la largeur et la profondeur du tube lumineux (L), on trouve les plafonds anidoliques intégrés, les systèmes anidoliques intégrés et les stores solaires anidoliques.

2.3.5. a. Plafond Anidolique Intégré (L>2m)

Le plafond anidolique intégré est un système diffuseur de lumière fixé au plafond. Il se compose d'une grille d'éléments réfléchissants rigides et creux fabriqués en matière plastique revêtus d'aluminium. Chaque élément creux est constitué d'une combinaison de concentrateurs paraboliques composés (CPC). En changeant son inclinaison verticale, la performance de plafond peut être modifiée pour répondre aux différentes applications de

construction et aux besoins des utilisateurs. Ce système nécessite une intégration complète dans la façade ainsi que dans le plafond du bâtiment. Ce type est caractérisé aussi par :

- Un large tube lumineux qui dépasse 2 m.
- Une réduction de la distance de débordement du collecteur sur la façade du bâtiment ce qui assure une meilleure intégration du système dans l'enveloppe et une meilleure intégration architecturale à l'intérieur de l'espace par une conception soignée de l'élément anidolique en termes de dimensions et de configurations.
- Une satisfaction des usagers vis-à-vis du confort lumineux par la réduction de l'éblouissement résultant des valeurs élevées de luminances provenant du diffuseur interne.

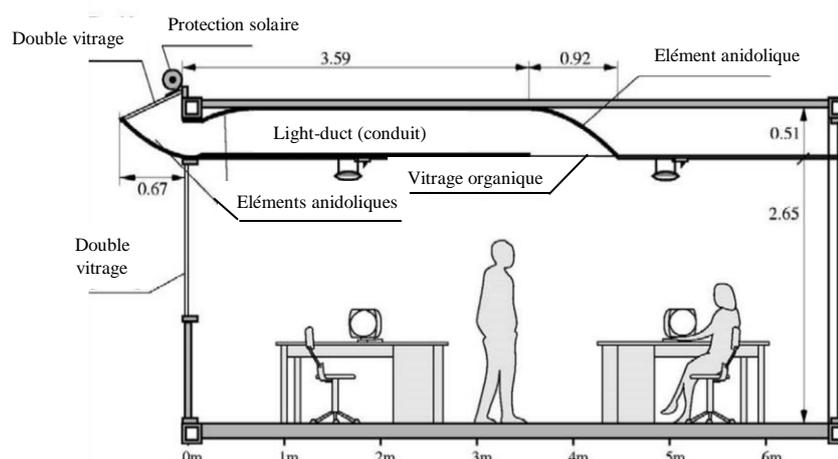


Figure 2.11: Le système de Plafond Anidolique Intégré (Source : Wittkopf et al, 2010)

2.3.5. b. Système Anidolique Intégré ($0,2 < L < 2m$)

Le système anidolique intégré utilise le même principe que le plafond anidolique. Il sert à rediriger la lumière captée depuis le collecteur extérieur vers le plafond qui, après une série de réflexions internes dans le conduit lumineux, va la diffuser la lumière vers le fond du local. Ce type doit être bien intégré dans la façade et est spécifiquement conçu pour être facilement ajouté à des bâtiments existants. Il se caractérise par :

- Un tube lumineux de largeur qui varie entre à 0.2 m et 2 m.
- Une intégration optimale du système anidolique dans l'enveloppe du bâtiment.
- Un processus optimisé dans la conception et la construction industrielle du système ce qui peut réduire les coûts.
- Une amélioration de l'applicabilité du système pour la rénovation des bâtiments à cause de la simplification de la construction.

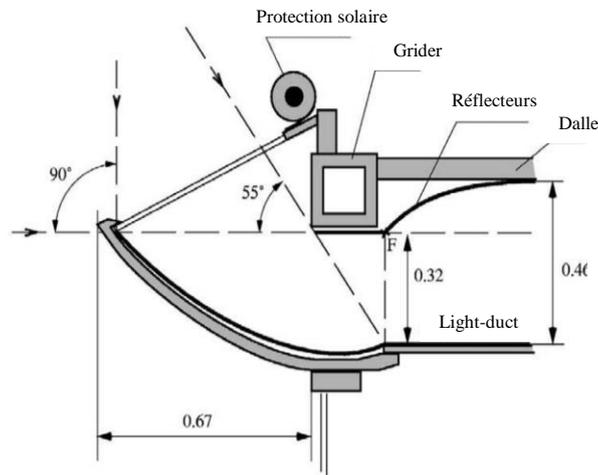


Figure 2.12. : Le système anidolique intégré (Source : Scartezzini et Courret, 2002)

2.3.5. c. Stores Solaires Anidoliques ($L < 0,2$ m)

Le store solaire anidolique est conçu pour atteindre une sélection angulaire exclusive et le contrôle de la direction de la lumière du soleil. Ce système utilise le principe de redirection préférentielle de la lumière pour éclairer le fond des espaces et réduit le risque de surchauffe à la fin de la journée surtout en été. En raison de sa géométrie, les flux lumineux entrants et sortants de ce dispositif sont égaux. Le nombre de réflexions et les pertes d'énergies peuvent être minimisés avec une conception plus soignée. Ce type se caractérise par :

- Une largeur de tube lumineux inférieur à 0.2 m.
- Amélioration de la collecte et de redistribution de la lumière du soleil.
- Optimisation pour les climats dominés par un ciel clair.
- L'utilisation de principe de sélection angulaire de la lumière du soleil pour qu'il s'adapte avec les saisons et même pendant la journée.



Figure 2.13. : Les stores solaires anidoliques (Source : Scartezzini et Courret, 2002)

2.3.6. Exemples des différents collecteurs anidoliques

Une recherche faite par Stephen Wittkopf et al en 2010, dans le domaine des collecteurs anidoliques a permis de dégager sept configurations différentes des collecteurs selon le type, les dimensions, la hauteur au-dessus du plafond et le débordement par rapport à la façade. Les contours du collecteur présentés dans la Figure 2.14 comprennent des concentrateurs paraboliques composés (CPC) et des dé concentrateurs (Rabl, 1976a) qui sont complétés dans certains types par deux capteurs plats simples servant comme des capteurs de référence. Les formes pour tous les concentrateurs et les dé concentrateurs sont générées par un logiciel pour définir l'angle d'acceptation donné et une hauteur totale (Kampf, 2000). La hauteur de l'ouverture de sortie du conduit lumineux est fixée à 0,5 m dans tous les types des collecteurs même si le contour varie. Leur longueur en saillie horizontale à partir de la façade varie entre 0,5 m et 1,3 m. Pour la mise en œuvre de ce type de système, la hauteur sous plafond doit être importante de l'ordre de 2.70 m au minimum.

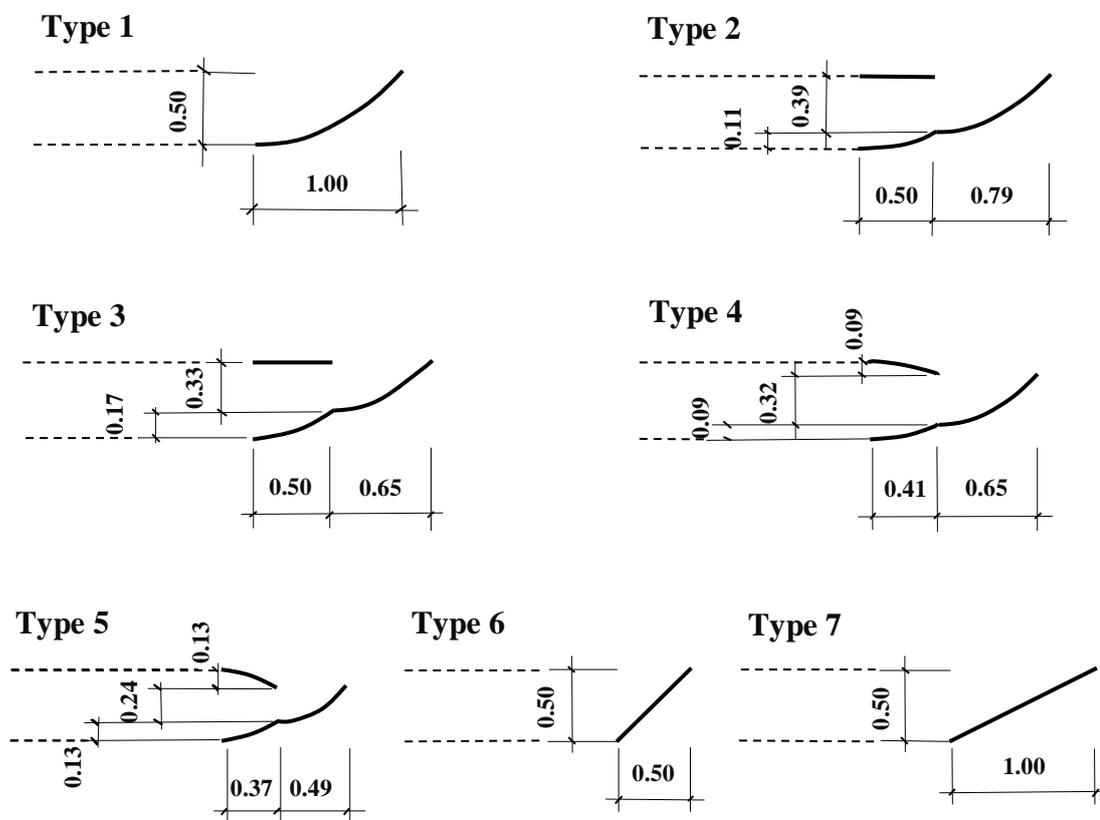


Figure 2.14. : Les différents types de collecteurs anidoliques (Source : Wittkopf et al, 2010)

Le collecteur de Type 1 est un concentrateur parabolique avec une ouverture d'entrée de 90° pour capter et recueillir toute la lumière du jour entre l'horizon et le zénith. Le Type 2 est une combinaison réduite de Type 1 et d'un dé concentrateur supplémentaire pour collimater la

lumière à environ $\pm 40^\circ$ à partir de l'axe horizontal du conduit lumineux. Le collecteur de Type 3 est une variante de Type 2 avec un concentrateur plus grand pour réduire encore plus la propagation. Pour les deux types, le concentrateur a été proportionnellement réduit pour qu'il s'inscrive dans la hauteur prévue de 0,5 m. Dans les collecteurs de Types 4 et 5, des concentrateurs supérieurs ont été ajoutés essentiellement en tant que miroirs similaires à ceux utilisés dans le Type 2 et 3. Deux simples collecteurs en chicane plate ont été ajoutés pour compléter l'ensemble des collecteurs, dont 45 pour le Type 6 et 26.6 chicanes pour le Type 7.

2.3.7. Le dimensionnement du système anidolique

L'élément principal du système anidolique est constitué d'un déviateur de lumière conçu selon les principes de l'optique anidolique imageante (Courret, 1999 ; Welford, 1989). Ce déviateur est constitué de concentrateurs anidoliques bidimensionnels (symétrie de translation) et également de Concentrateurs Paraboliques Composés (CPC). De plus, l'ensemble des miroirs paraboliques intérieurs utilisés dans les systèmes anidoliques et les plafonds anidoliques intégrés sont généralement limités par des préoccupations spatiales. Il est important de noter que leurs dimensions sont fortement liées avec l'angle d'incidence du rayon lumineux, de la largeur de l'ouverture d'entrée et de la largeur de l'ouverture de sortie qui doit être le double par rapport à celle de l'entrée. Un système anidolique intégré est issu, à l'origine, des formules mathématiques et des équations données par Welford et Winston (de 2.1 à 2.6):

$$\mathbf{f} = \mathbf{a}' \mathbf{x} (1 + \sin \theta) \quad (2.1)$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}' / \sin \theta \quad (2.2)$$

$$\mathbf{L} = (\mathbf{a}' + \mathbf{a}) \cot \theta \quad (2.3)$$

$$0 = (z \cos \theta + y \sin \theta)^2 + 2\mathbf{a}'(1 + \sin \theta)z \quad (2.4)$$

$$- 2\mathbf{a}' \cos \theta (2 + \sin \theta)y \quad (2.5)$$

$$- \mathbf{a}'^2 (1 + \sin \theta)(3 + \sin \theta) \quad (2.6)$$

L'équation absolue (2.7) du concentrateur parabolique composé (CPC) est également donnée par Welford et Winston (1989):

$$0 = (z + y \sin \theta \cos \theta)^2 + 2\mathbf{A}'(1 + \sin \theta)z - 2\mathbf{a}' \cos \theta (2 + \sin \theta)y - \mathbf{a}'^2 (1 + \sin \theta)(3 + \sin \theta) \quad (2.7)$$

Où : $2\mathbf{a}$ est la largeur de l'ouverture de sortie, $2\mathbf{A}'$ est la largeur de l'ouverture d'entrée, \mathbf{f} est la distance focale de chaque parabole, \mathbf{L} est la longueur horizontale de la configuration de deux paraboles et θ est l'angle formé par l'horizontale et une ligne reliant le bord d'entrée avec le bord opposé de sortie. La longueur et la largeur du système ont évidemment un impact sur les

préoccupations esthétiques et spatiales alors que la propagation angulaire θ a un effet sur la répartition de la lumière. y est l'axe horizontal du profil de système et z représente l'axe vertical.

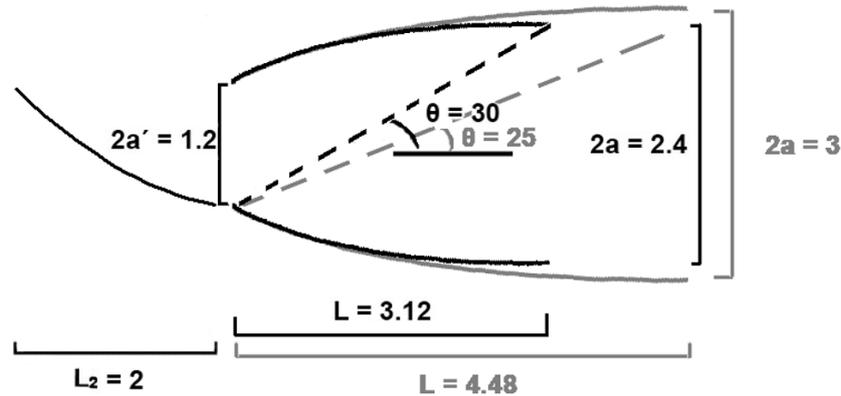


Figure 2.15. : Dimensionnement d'un système anidolique (Source : Kleindienst et Andersen, 2006)

De plus, dans le pré dimensionnement d'un système anidolique, on doit prendre en considération le secteur angulaire optimal d'entrée ($D_{\text{entrée}}$:] $0, -82^\circ$ [) qui dépend à l'angle avec lequel les rayons du soleil frappent perpendiculairement l'ouverture d'entrée et le secteur angulaire de sortie qui doit conformer aux contraintes d'ergonomie visuelle (D_{sortie} :] $10^\circ, -37^\circ$ [). Les secteurs $D_{\text{entrée}}$ et D_{sortie} sont expliqués dans la figure 2.16 :

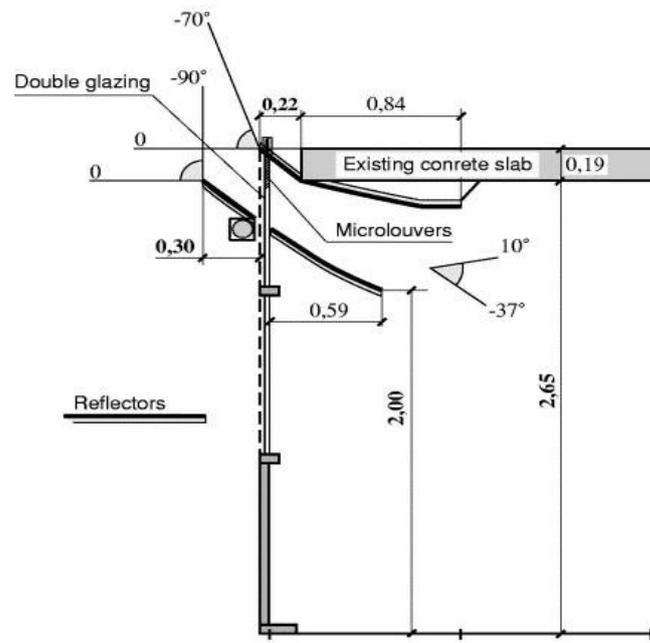


Figure 2.16. : Dimensionnement d'un système anidolique (Source : Scartezzini et Courret, 2002)

2.3.7. a. Exemple d'un dimensionnement d'un système anidolique intégré

Le système anidolique présenté ci-dessous a été réalisé par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) dans le cadre d'une rénovation d'un bâtiment qui vise principalement à permettre l'intégration de ce dispositif dans la façade. La coupe verticale de déviateur anidolique et le profil théorique de système sont représentés dans la figure 2.17. Le déviateur, a été réalisé par translation du profil selon une droite horizontale est revêtu de tôle d'aluminium anodisée à haut pouvoir de réflexion ($\rho_r = 0.9$), afin d'atteindre un rendement lumineux maximal. La configuration finale du déviateur, tenant compte du gabarit dimensionnel du dispositif, est donnée dans la figure 2.18.

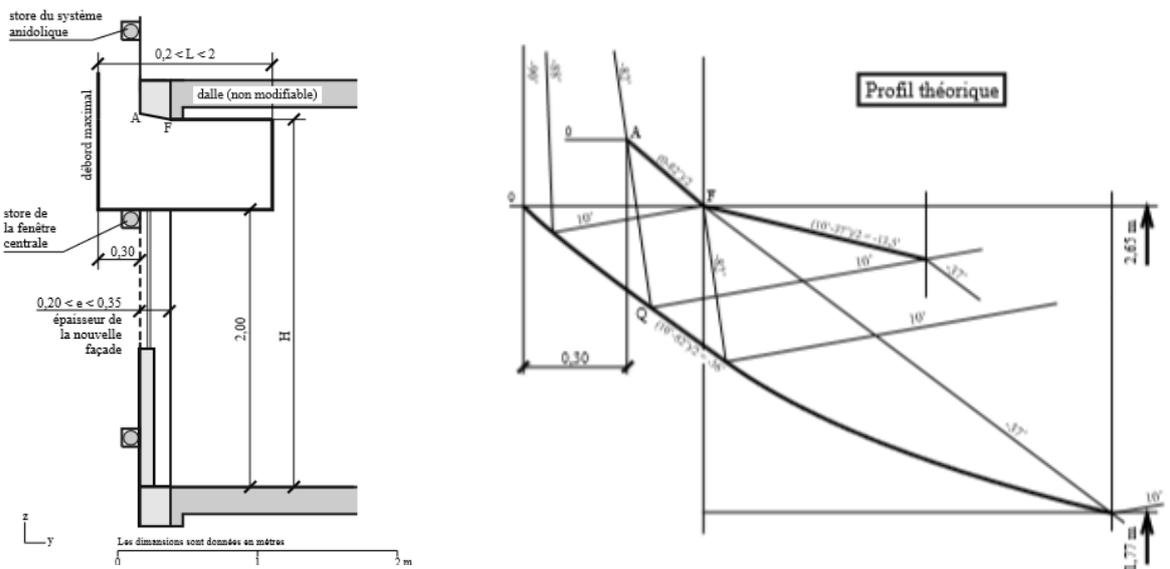


Figure 2.17 : A gauche, coupe verticale de dispositif, A droite, le profil théorique (Source : Scartezzini et al, 2000)

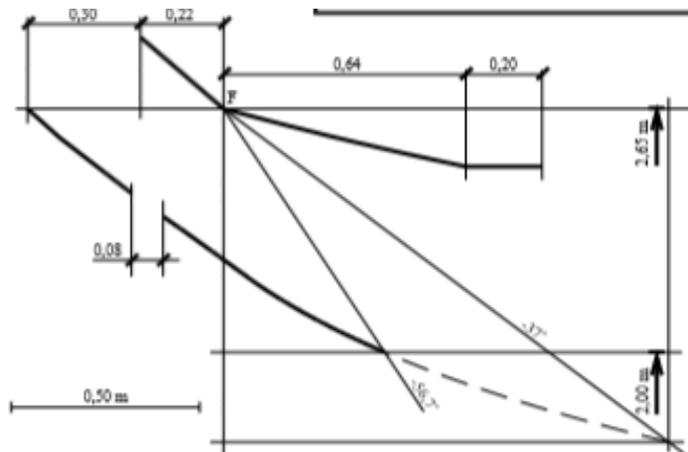


Figure 2.18 : Profil adapté au gabarit dimensionnel (Source : Scartezzini et al, 2000)

2.3.8. L'efficacité du transfert lumineux

La performance de la plupart des technologies de redirection de la lumière du jour dépend de l'angle d'incidence du rayon direct du soleil. En général, ils sont conçus pour dévier la lumière du jour et la faire rebondir sur le plafond puis vers le fond de l'espace. Dans ce cas, la lumière diffuse n'est pas assez intense à tout angle d'incident pour avoir un grand effet. Les systèmes anidoliques ont la capacité d'accepter une lumière plus importante à partir d'un large angle d'incidence pour la redistribuer en profondeur. De plus, le système permet une augmentation de la lumière du jour dans les parties les plus profondes d'un local ce qui assure par conséquent une bonne distribution lumineuse. La figure 2.19 montre une comparaison du facteur de lumière du jour entre une simple fenêtre avant (à gauche) et après (à droite) après l'addition de système anidolique ainsi qu'une visualisation du local qui change de sombre vers un espace plus clair après l'ajout du système. Les résultats de cette expérience ont montré également une amélioration de facteur de lumière du jour de 3,3 %.

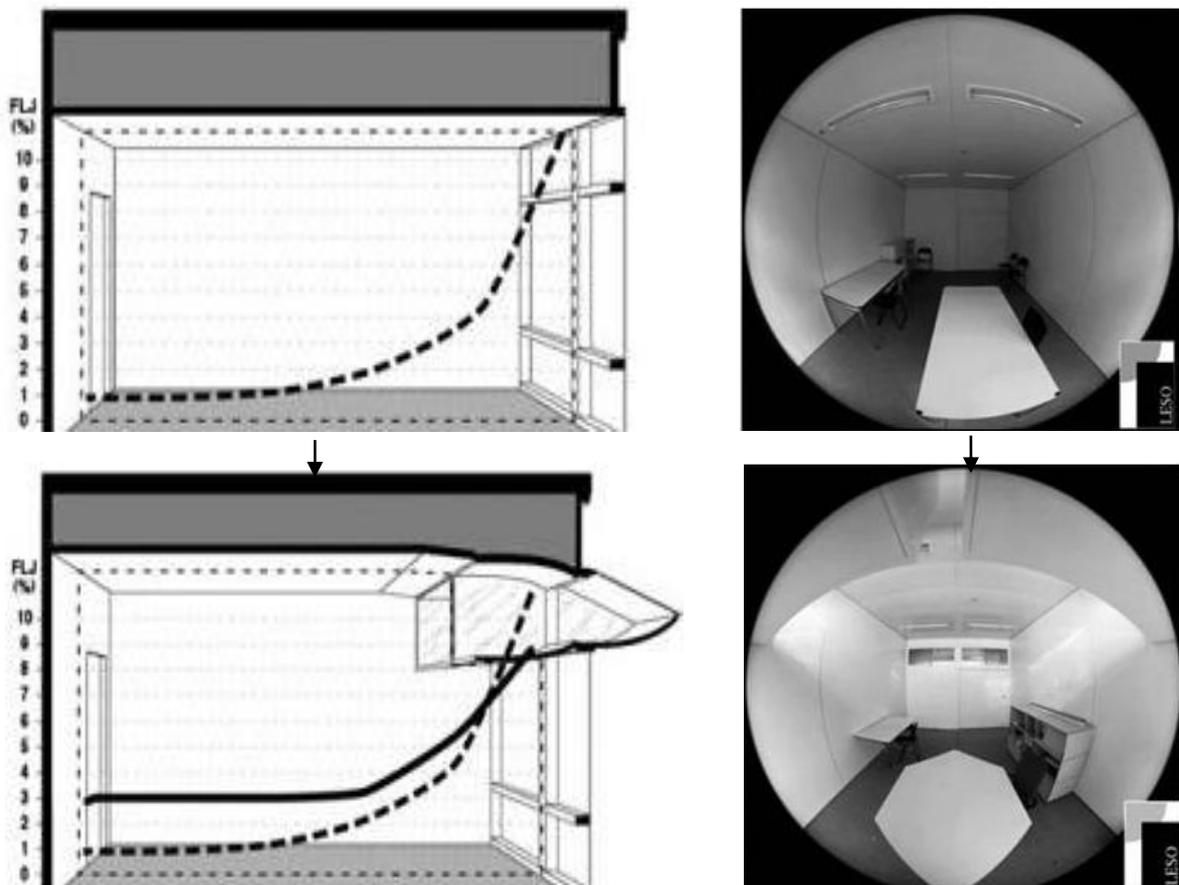


Figure 2.19: A gauche, coupe d'un local équipé d'un dispositif anidolique ; A droite, image sphérique prise dans le même local (Source: Damelin court et al, 2010)

Il est important de noter, dans ce cas, que le système anidolique a été placé dans la façade sans changer ni la taille ni la forme de la fenêtre originale et dans la visualisation, les deux images ont été prises avec les mêmes caractéristiques d'exposition. Cette affinité de la lumière diffuse est intéressante dans le cas des immeubles existants, en particulier sur les façades qui ne reçoivent pas beaucoup de lumière du soleil et dans les conditions du ciel couvert. Les études montrent que la lumière directe a une relation inaltérable et inégale avec chaque façade alors que la lumière diffuse est disponible sur toutes les façades et dans tout type de conditions météorologiques. En fait, les systèmes anidoliques atteignent leur performance maximale sous un ciel clair (lumineux) et même nuageux car dans ces deux conditions la lumière diffuse est la plus disponible. Dans le cas où la lumière directe pénètre à travers le système, on doit intervenir pour empêcher la production du phénomène d'éblouissement par l'ajout d'un système d'ombrage. Dans un nouveau bâtiment ou dans le cas d'une rénovation complète de la façade, on a la possibilité d'intégrer les systèmes de miroirs dans l'enveloppe. Par contre, L'une des difficultés d'un système anidolique peut avoir lieu avec les bâtiments existants est celui de l'intégration car, dans ce cas le bâtiment offre un espace limité pour installer le système. Donc, la conception de système anidolique utilisé n'est pas entièrement optimisée du point de vue de la performance. Malgré les problèmes d'intégration de systèmes anidoliques avec les bâtiments existants, des solutions intéressantes, en particulier pour le collecteur extérieur sont possibles même dans un espace très limité.

2.3.9. Les coûts et les économies d'énergie

Le système de plafond anidolique nécessite un coût supplémentaire par rapport à une fenêtre classique pour installer le système de collecteur optique dans la façade et pour construire le plénum de réflexion avec l'élément optique émetteur. De plus, ce système offre une amélioration non seulement des niveaux de la lumière naturelle à l'intérieur d'un bâtiment mais aussi dans l'efficacité énergétique (Wittkopf et al., 2006, Linhart et al., 2010). Wittkopf et al. (2006) a montré que plus de 20 % de la consommation d'énergie électrique pour l'éclairage pourrait être économisée par ce système. Pour Courret et al. (1998) Cette économie de l'énergie électrique pour l'éclairage est de 30 %. Scartezzini et Courret (2002) ont montré aussi que sur une journée nuageuse, le facteur de lumière du jour, mesuré au fond d'un local augmente de 1,7; cela permet une réduction de la consommation électrique pour en tiers. De plus, Linhart et Scartezzini (2010) ont prouvé qu'avec les systèmes anidoliques, des densités de puissance d'éclairage peuvent être réduites par au moins 4 W/m^2 sans avoir des effets significatif sur le confort visuel.

Plusieurs prototypes de système anidolique d'éclairage naturel (ADS) ont été construits par le laboratoire de l'énergie solaire et de physique du bâtiment de l'EPFL afin de valider les principes de cette nouvelle approche de la lumière naturelle à l'égard du confort visuel et d'économies d'énergie. La consommation d'énergie pour l'éclairage électrique a été contrôlée dans deux bureaux identiques de 6,6 m de profondeur équipé du même contrôleur de lumière à intensité réglable et des appareils d'éclairage suspendu (deux rangées de deux tubes fluorescents de 36 W). Le premier est un modèle de référence (sans système anidolique) alors que le deuxième est équipé de dispositif anidolique. Les deux façades étaient munies d'un vitrage clair et ombrées et orientés au plein nord au cours de l'expérience. Les premiers résultats de l'expérimentation ont montré que les valeurs d'éclairages ($300 \text{ lux} \pm 15 \%$) à 5 m de la fenêtre ont été équilibrées dans les deux modèles par le contrôle de l'éclairage électrique. Les deuxièmes résultats, qui concernent le calcul de la consommation électrique, ont prouvé que le modèle d'essai (celui équipé d'un plafond anidolique) a utilisé 31% moins d'électricité pour l'éclairage au cours de cette période de l'expérience par rapport au modèle de référence. Ces résultats sont en bon accord avec les chiffres d'économie d'éclairage calculé pour cette technologie en utilisant la méthode suisse pour l'éclairage naturel (ASE 8911,1989), qui prédit une économie annuelle d'éclairage de 30 %. La méthode suisse permet le calcul statistique de la consommation d'énergie d'éclairage pour un éclairage de bureau donné (300 lux dans le cas de bureau). Cette économie prend le contrôle entièrement automatique de l'éclairage électrique indépendant du comportement des utilisateurs (l'utilisation de stores solaires) ainsi que l'orientation de la façade (la façade orientée sud, par exemple, reçoit plus de lumière directe par rapport à une autre orientée vers le nord).

Une autre recherche menée, par Stephen et al (2006), dans deux régions de caractéristiques climatiques et lumineuses différentes (Singapour et Sheffield), dans le but d'étudier l'autonomie en éclairage naturel dans un espace équipé d'un système anidolique. Les résultats ont montré que plus de 20 % de l'énergie électrique pour l'éclairage pourrait être économisée, ce qui conduit à l'amélioration de l'autonomie d'éclairage. Les économies étaient assez semblables pour les deux sites, avec 21 % pour Singapour et 26 % pour Sheffield ce qui confirme que le plafond anidolique intégré est une solution universelle pour améliorer la lumière du jour dans les bâtiments profonds.

La figure 2.20 présente les résultats de la simulation de l'autonomie d'éclairage sans et avec plafond anidolique pour Singapour.

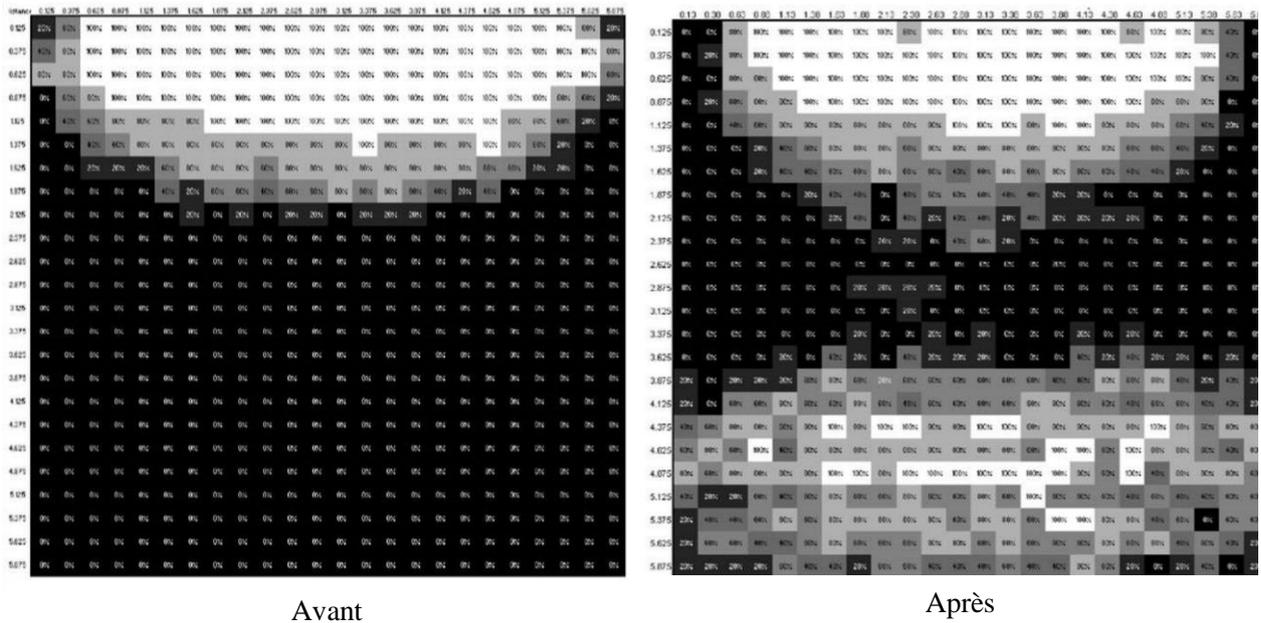


Figure 2.20 : A gauche, l'autonomie de l'éclairage avant l'ajout de système anidolique ; A droite, l'autonomie de l'éclairage après l'ajout de système (Source : Wittkopf et al., 2006)

2.3.10. Le système anidolique et la qualité lumineuse intérieure

Ochoa and Capeluto (2006) ont montré que l'installation de plafond anidolique dans un espace offre des niveaux élevés de l'éclairage en termes quantitatifs ce qui assure un confort visuel optimal. De point de vue qualitatif, les recherches issues d'une simulation informatique et même de questionnaire ont prouvé que le système apporte une qualité particulière en termes d'ambiance lumineuse mais il faut contrôler l'orientation et l'inclinaison de système (les angles solaires) pour qu'elles ne causent pas de problème d'éblouissement. Dans le cas où il aura lieu, suite à des contraintes particulières, les stores solaires sont indispensables. De plus, Wittkopf et al (2006) et Courret et al (1978), dans une étude comparative (sans et avec plafond anidolique), ont prouvé que l'appréciation personnelle de l'ambiance lumineuse intérieur est plus élevée. Cette sensation est causée par une homogénéité de la distribution et la bonne répartition de la luminance dans toute la pièce ou le plafond anidolique est installé ainsi qu'une satisfaction visuelle des utilisateurs par rapport au modèle de référence.

2.4. Exemples de réalisation

2.4. 1. Modèle de démonstration de l'éclairage naturel (DEMONA), Lausanne, Suisse

Le plafond anidolique a été construit en 1996 et installé sur un module de test mobile de la lumière naturelle à l'échelle de 1 : 1 (DEMONA), situé sur le campus de l'EPFL, placé à côté

d'un autre modèle de référence équipé d'une façade classique et muni d'un double vitrage et caractérisé par photométriques et géométriques.. Il utilise un conduit de lumière dans un plafond pour guider un grand flux de lumière du jour dans un bureau de 6,55 m de profondeur (3,05 x 6,55 x 3,05 mètres). Sa conception consiste à concevoir un collecteur anidolique zénithal (0,7 m en saillie sur la façade) placé en face de la lumière pour guider, collecter et concentrer le flux lumineux à l'entrée de light duct. Un autre appareil anidolique a été installé à l'extrémité du conduit afin de répartir ce flux entrant en profondeur tout en réduisant les risques d'éblouissement. Toutes les surfaces internes de PA étaient couvertes de matériau optique très réfléchissant (feuilles d'aluminium anodisé de 0,93% de réflexion). Le dispositif est recouvert d'un double vitrage isolant à l'ouverture d'entrée et un seul volet, fait de matière organique, a été placé à l'ouverture de sortie. De plus toutes les parties externes du système sont isolées thermiquement pour éviter les pertes de chaleur et la condensation de l'eau. Les résultats de cette expérience sous des conditions réelles, en comparaison avec une façade classique conventionnelle, ont montré que le dispositif anidolique permet d'avoir un éclairage plus uniforme au plan de travail sur toute la profondeur de bureau, une amélioration significative du facteur de lumière du jour en particulier au centre de de bureau (2-4 mètres de la façade) ainsi qu'une légère amélioration du facteur de lumière du jour a été observé plus profondément dans cet espace (augmentation de FLJ de 0,5 % en terme absolu).

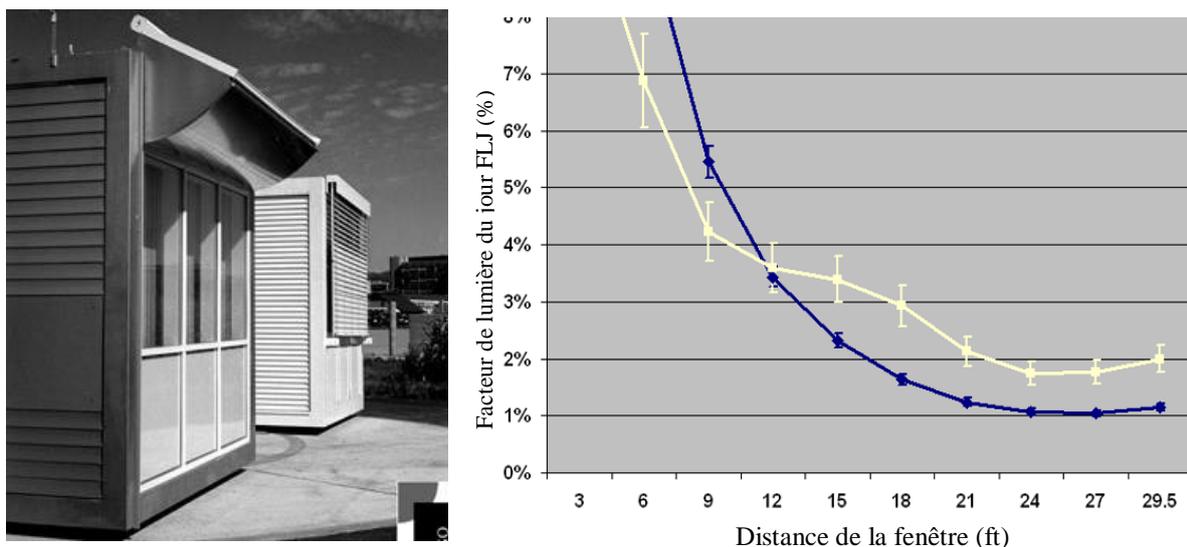


Figure 2.21 : A gauche, les modèles DEMONA (Source : Scartezzini et Courret, 2002); A droite, La performance du plafond anidolique (Source : /leso.epfl.ch.)

L'évaluation des conditions de confort visuel et de la qualité lumineuse intérieure, à partir de la figure 2.22, a confirmé que les valeurs de luminances atteintes par le plafond anidolique,

sont plus élevées sur le plafond et sur le mur arrière du bureau qui rend l'espace plus lumineux.



Figure 2.22: Vue intérieur de module de test de la lumière naturelle (DEMONA) (Source : /leso.epfl.ch.)

2.4 .2. Le bâtiment expérimental LESO (LESO Solar Experimental Building), Suisse

Le bâtiment expérimental LESO est un centre de recherche qui offre la possibilité de surveiller et analyser la performance énergétique des façades solaires passives et actives dans des conditions réelles "in-situ". La façade sud de l'édifice, qui a accueilli les différentes façades solaires expérimentales a été rénovée en 1999. La nouvelle façade bénéficie de l'expérience acquise par l'énergie solaire et par le laboratoire physique du bâtiment dans les différents domaines de la technologie de la construction afin de concevoir et de mettre en place une façade anidolique durable. Le travail de rénovation concerne 200 m² de la façade et prend en considérations les points suivants :

- Plus de 80% des matériaux de construction sont à base de bois ce qui réduit l'impact environnemental de la façade par la réduction de l'émission de GES.
- La partie inférieure de la façade, protégée de la pluie par un plateau horizontal, est équipée d'un double vitrage isolé à faible émissivité retenu par des cadres en bois ($U = 1,4 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$).
- La partie supérieure, montée sur l'étagère horizontale, est un système anidolique d'éclairage naturel setup avec un collecteur zénithal non saillant. Dans les deux parties de la façade, les stores solaires extérieurs sont disponibles et peuvent être déplacés indépendamment par les utilisateurs du bâtiment.

L'évaluation de la performance lumineuse de la façade rénovée équipée d'un système anidolique durable, ainsi que les résultats d'un questionnaire qui a été fait sur utilisateurs quotidiens de bâtiment ont confirmé la satisfaction visuelle des usagers en termes de quantité et de qualité par rapport à la conception de la façade originelle. Une homogénéité

significativement de luminances et un éclairage plus élevé est atteint par la façade anidolique durable avec une augmentation du facteur de lumière à 5 m de la fenêtre).

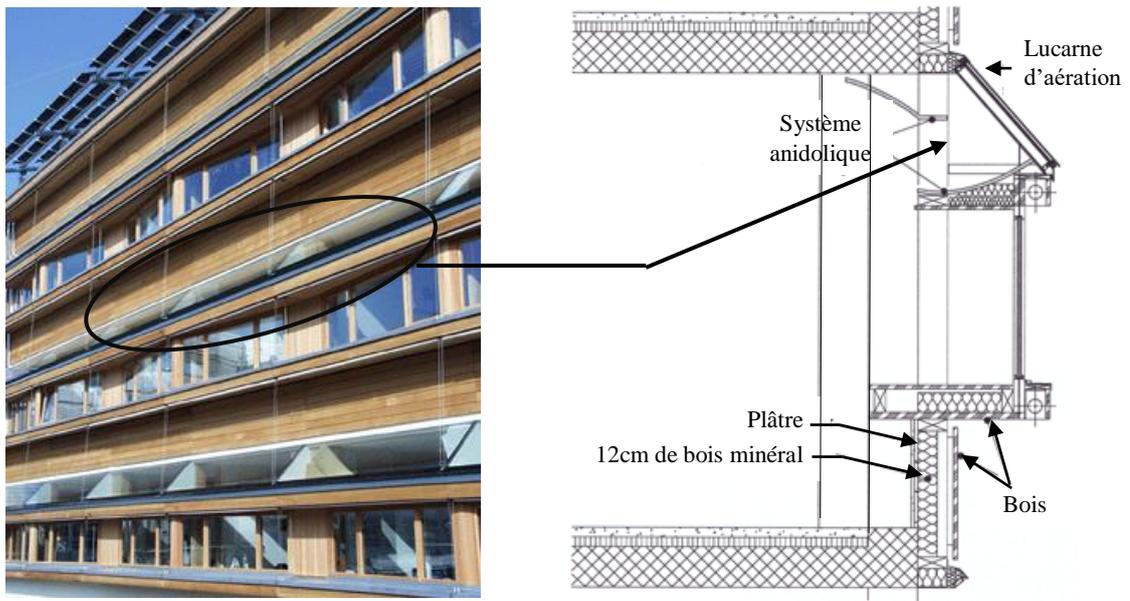


Figure 2.23: A gauche, Façade rénovée du bâtiment LESO ; A droite, coupe verticale de la façade (Source : /leso.epfl.ch.)

2.4. 3. La rénovation du bâtiment de la Caisse-Conge à Bruxelles, Belgique

Un projet de rénovation de l'immeuble de la Caisse-Conge à Bruxelles (Belgique) a été réalisé par les architectes Philippe Samyn et partenaires en collaboration avec l'Institut de recherche en construction Belge. Un collecteur anidolique zénithal (CAZ) a été proposé et intégré dans la conception pour augmenter la quantité de lumière à l'intérieur du bâtiment. Les études de ce système ont été particulièrement faites pour les zones de haute latitude ($>40^\circ$) avec des conditions nuageuses dans le but d'augmenter l'éclairage au fond des espaces jusqu'à six mètres de façade.

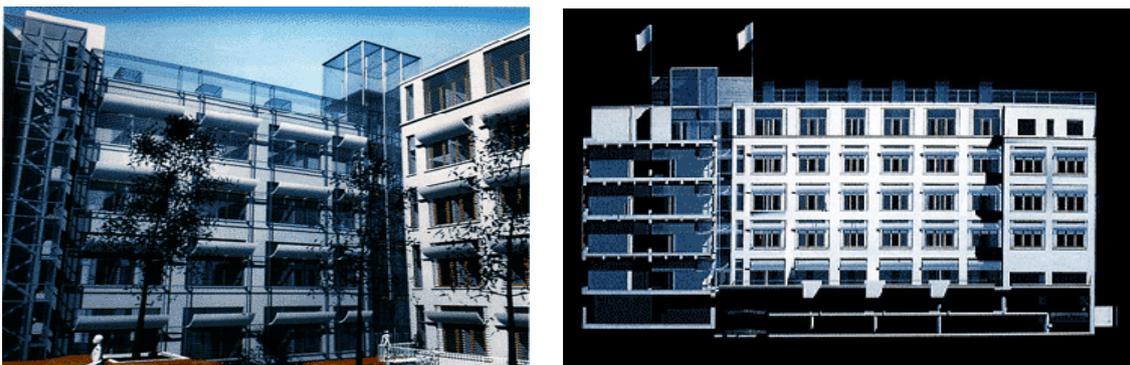


Figure 2.24 : Concentrateurs Anidoliques pour la collecte de la lumière naturelle (bâtiment Caisse-Gonges, Belgique) (Samyn 1998 veronica). (Source : /leso.epfl.ch.)

L'évaluation de la performance de ce dispositif a confirmé les caractéristiques les plus remarquables d'un CAZ à l'égard de la pénétration profonde de la lumière naturelle dans les salles. De plus, son impact architectural n'est pas négligeable, il offre une expression d'une façade non conventionnelle, ce qui contribue à la qualité du projet et répond à la fois à des préoccupations architecturales et esthétiques

2.4 .4. Nouveau bâtiment 'Techno Parc Siegen', Allemagne

Une nouvelle conception du bâtiment dans le parc technologique de Siegen (Allemagne) a été réalisée par les architectes hollandais Rau et Partenaires d'Amsterdam. Dans ce projet, une nouvelle conception du plafond anidolique a été développée et intégrée dans une grande salle de conférence à l'aide du laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment afin d'améliorer la pénétration de la lumière du jour dans l'espace du bâtiment. La performance lumineuse a été évaluée par des simulations informatiques qui ont confirmé l'existence d'une amélioration substantielle du facteur de lumière du jour par l'intégration de ce dispositif dans sa conception originale (taille réelle) et même dans les modules du test de l'éclairage naturel DEMONA.

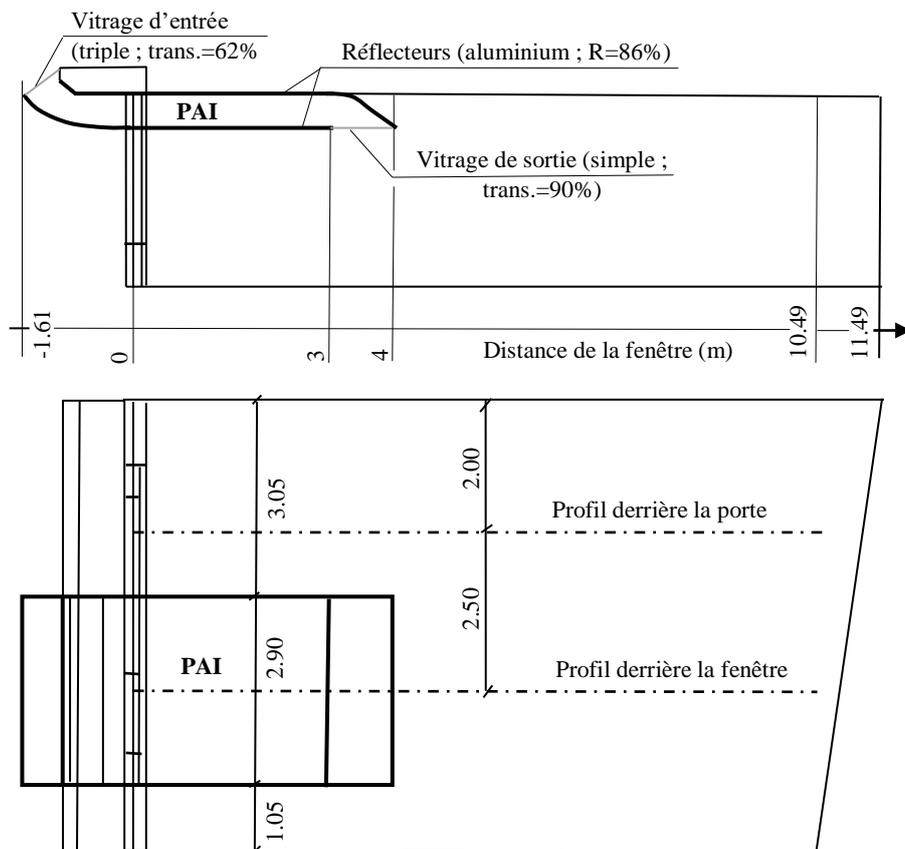


Figure 2.25 : Plafond anidolique intégré dans la salle de conférence (bâtiment Techno Park, Allemagne). (Source : /leso.epfl.ch.)

Conclusion

Les systèmes anidoliques sont classés parmi les systèmes d'éclairage intégré en façade les plus efficaces. Ils sont conçus selon le principe de l'optique non imageante, qui consiste à maximiser l'efficacité du transfert lumineux sans produire des reflets lumineux afin d'augmenter le niveau de l'éclairage en profondeur tout en créant une répartition plus équilibrée dans tout l'espace. Selon la largeur et la profondeur de tube lumineux, ces systèmes anidoliques sont classés en trois types : on trouve les plafonds anidoliques intégrés, les systèmes anidoliques intégrés et les stores solaires anidoliques. Le plafond anidolique intégré présente des caractéristiques idéales qui correspondent le mieux à notre étude. Il permet à la fois d'améliorer la satisfaction des utilisateurs de l'espace par la réduction du risque d'éblouissement, d'avoir un conduit lumineux qui dépasse 2m de largeur ainsi qu'une meilleure intégration architecturale dans l'enveloppe du bâtiment et même à l'intérieur de l'espace par une conception soignée de l'élément anidolique en termes de dimensions et de configurations. Cinq types de collecteurs anidoliques ont été établis dont chacun possède des caractéristiques spéciales. Le type 5 est couramment utilisé dans le bâtiment, il a prouvé sa performance sous différents climat lumineux. Cette configuration est constituée de trois principales composantes : un collecteur anidolique zénithal installé à l'extérieur du bâtiment qui est utilisé pour capter le maximum de lumière du jour, un conduit lumineux intérieur délimité par deux éléments anidoliques permettant de canaliser la lumière en profondeur ainsi que des éléments de distribution/ des diffuseurs (light duct).

Le rendement du plafond anidolique intégré dépend du revêtement de ces composants et plus précisément de l'élément anidolique qui est revêtu dans la plupart des cas de tôle d'aluminium anodisée à haut pouvoir de réflexion ($\rho_r = 0.9$) afin d'atteindre un rendement lumineux maximal. Des études ont constaté une amélioration de l'efficacité du plafond anidolique qui atteint 7.59 % lorsqu'on change le revêtement d'aluminium anodisé par un revêtement d'argent hautement réfléchissant (98 % de réflectance spéculaire). L'efficacité du transfert lumineux du plafond anidolique dépend également de l'angle d'incidence du rayon lumineux. Donc, dans le pré dimensionnement du système, il est indispensable de prendre en considération la section angulaire d'entrée optimal ($D_{\text{entrée}} :] 0, -82^\circ [$) qui dépend à l'angle avec lequel les rayons du soleil frappent perpendiculairement l'ouverture d'entrée et la section angulaire de sortie qui doit se conformer aux contraintes d'ergonomie visuelle. Ainsi, il est recommandé que la largeur en saillie doive être comprise entre 0,5 m et 1,3 m et pour la mise en œuvre de ce type de système, la hauteur sous plafond doit être supérieure à 2.70 m.

Chapitre 2 : Le Plafond Anidolique Intégré

Il est également prouvé que l'intégration du plafond anidolique conduit réellement à des économies d'énergie en électricité qui atteint 30 % (dans un climat subtropical). Plusieurs études dans le domaine de l'éclairage intérieur des locaux profonds ont démontré qu'une amélioration de facteur de lumière du jour de 3,3 % a été constatée ce qui génère une qualité visuelle intérieure satisfaisante et une ambiance lumineuse agréable.

Référence

Aizlewood, M. E. (1993). Innovative daylighting systems: An experimental evaluation. *Lighting Research and Technology*, 25 (4), 141-152.

Chaves, J. (2008). Introduction to Nonimaging Optics. *CRC Press. ISBN 978-1-4200-5429-3*

Courret, G., Scartezzini, J.L., Francioli, D., & Meyer, J.J. (1998). Design and assessment of an anidolic light-duct. *Energy and Buildings*, 28, 79-99.

Courret, G. (1999). Anidolic Daylighting Systems. *Department of Architecture, EPFL, Lausanne, Switzerland, PhD dissertation no. 2026.*

Damelincourt, J.J., Zissis, G., Corbé, C., & Paule, B. (2010). Eclairage d'intérieur et ambiances visuelles (2010), *Cachan: Lavoisier, ISBN : 2743019115, 9782743019112.*

Elmer, W.B. (1980). The Optical Design of Reflectors. *New York: John Wiley & Sons Inc.*

Gordon, J.M. & Kashin, P. (1994). Achieving Uniform Efficient Illumination with Multiple Asymmetric Compound Parabolic Luminaires. *Optical Engineering*, 33 (1), 267-272.

Gordon, J.M. & Rabl, A. (1992). Nonimaging Compound Parabolic Concentrator-Type Reflectors with Variable Extreme Direction. *Appl. Opt*, 31 (34), 7332-7338.

Gordon, J.M., Kashin, P., & Rabl, A. (1992). Nonimaging Reflectors for Efficient Uniform Illumination. *Appl. Opt*, 31 (28), 6027-6035.

Greenup, P.J. (2004). Development of Novel Technologies for Improved Natural Illumination of High Rise Office Buildings. *PhD Thesis.*

Kampf, J. (2000). Parametric anidolic shape generator. In : *Concent.pl, Deconcent_inf.pl, Deconcent_sup.pl*, (Eds), *Solar Energy and Building Physics Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne.*

Kleindienst, S., & Andersen, M. (2006). Improving Daylighting in Existing Buildings: Characterizing the Effect of Anidolic Systems. *Renewable Energy-Key to Climate Recovery.*

leso.epfl.ch.

Linhart, F., Scartezzini, J.L., Courret, G., Francioli D., & Meyer, J.J. (2010). Minimizing lighting power density in office rooms equipped with anidolic daylighting systems. *Sol Energy*, 84, 587-95.

Linhart, F., Wittkopf, S.K., Müncha, M., & Scartezzini, J.L. (2009). Recent Research on Anidolic Daylighting Systems: Highly Reflective Coating Materials and Chronobiological Properties. *Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB), EPFL, 1015 Lausanne, Switzerland and Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS), NUS, Singapore, 2009.*

- Linhart, F., Wittkopf, S.K., & Scartezzini, J.L. (2010). Performance of anidolic daylighting systems in tropical climates- parametric studies for identification of main influencing factors. *Sol Energy*, 84, 1085-1094.
- Molteni, S., Courret, G., Paule, B., Michel, L., & Scartezzini, J.L. (2000). Design of anidolic zenithal lightguides for daylighting of underground spaces. *Solar Energy*, 69, 117-129.
- Ochoa, C.E., & Capeluto, I.G. (2006). Evaluation visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates, *Build Environ*, 41, 1128-1135.
- Rabl, A., & Gordon, J.M. (1994). Reflector Design for Illumination with Extended Sources: The Basic Solutions. *Appl. Opt*, 33 (25), 6012-6021.
- Rabl, A. (1976). Comparison of Solar Concentrators. *Solar Energy*, 18 (2), 93-111.
- Ries, H.R., & Winston, R. (1994). Tailored Edge-Ray Reflectors for Illumination. *J. Opt. Soc. Am.*, 11 (4), 1260-1264.
- Ruck, N., Aschehoug, O., Aydinly, S., Christoffersen, J., Courret, G., Edmonds, I., Jakobiak, R., Kischkoweit-Lopin, M., Klinger, M., Lee, E., Michel, L., Scartezzini, J.-L. & Selkowitz, S. (2000) Daylighting in Buildings. *A Source book on Daylighting Systems and Componets, International Energy Agency (IEA) Task 21. Solar Heating and Cooling Programme, Energy Conservation in Buildings & Community System Lawrence Berkeley National Laboratory, California.*
- Scartezzini, J. L., Michel, L., Courret, G., Suter, T., Giaccari, I., & SA, F. (2000). Intégration de dispositifs anidoliques d'éclairage naturel en façade (2000). *Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment, EPFL (LESO-PB-CONF-2000-010).*
- Scartezzini, J.L., & Courret, G. (2002). Anidolic daylighting systems. *Solar Energy*, 73, 123-135.
- Welford, W.T., & Winston, R. (1978). The Optics of Nonimaging Concentrators. *London: Academic Press Inc. Ltd.*
- Winston, R., & Ries, H. (1993). Nonimaging Reflectors as Functionals of the Desired Irradiance. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 10 (9), 1902-1908.
- Winston, R. (1991). Nonimaging Optics. *Sci. Am.*, 264 (March), 52-57.
- Wittkopf, S.K., Grobe, L.O., Geisler-Moroder, D., Compagnon, R., Kampf, J., Linhart, F., & Scartezzini, J.L. (2010). Ray tracing study for non-imaging daylight collectors. *Solar Energy*, 84, 986-996.
- Wittkopf, S.K., Yuniarti, E., & Soon, L.K. (2006). Prediction of energy savings with anidolic integrated ceiling across different daylight climates. *Energy and Buildings* 38, 1120-1129.

CHAPITRE 3

ÉVALUATION DE L'ENVIRONNEMENT LUMINEUX DANS LES BUREAUX.

Introduction

Actuellement, les gens passent plus en plus de temps dans leurs bureaux. Dans la plupart des cas, les travailleurs n'ont pas le choix pour la sélection de l'espace où ils s'installent. Il est donc important pour les concepteurs de créer un environnement de travail de haute qualité. Les recherches suggèrent clairement que la lumière du jour apporte une valeur supplémentaire par rapport à la satisfaction, le bien-être, le confort, la santé, l'opportunité ainsi que la durabilité (Figueiro et al., 2002, Heschong Mahone Group, 2003, Pauley, 2004). La qualité de l'éclairage est aussi une question financière car, un éclairage mal conçu peut conduire à la diminution de la productivité des employés. De plus, assurer des niveaux d'éclairage adéquats et appropriés en termes de qualité est une étape élémentaire dans la création d'un environnement lumineux confortable. L'uniformité de l'éclairage, la distribution des luminances, les caractéristiques des couleurs et l'éblouissement sont des facteurs susceptibles qui contribuent à la qualité de l'éclairage (Veitch et Newsham 1998). Cette dernière dépend également, en grande partie, des attentes des gens et de leurs expériences avec l'éclairage électrique. La mesure de la qualité visuelle consiste tout d'abord à quantifier tous les critères relatifs à l'environnement visuel ayant une influence physiologique et psychologique sur une personne pour assurer la satisfaction de besoins.

Ce chapitre donne un aperçu général sur l'aspect visuel de la lumière naturelle dont on a abordé le système visuel humain et comment il fonctionne car, la vision est le principal élément par lequel nous absorbons des informations dans un environnement construit, intérieur ou extérieur et permet également d'étudier les différents phénomènes lumineux. La performance et l'acuité visuelle, la luminosité, l'uniformité de l'éclairage, les couleurs et les contrastes sont les principaux aspects qui doivent être pris en compte afin de pouvoir évaluer un éclairage donné. Puis, nous allons parler des différents facteurs non visuels de l'environnement lumineux, tels que les aspects biologiques et psychologiques. De plus, des outils et des méthodes destinés à la conception, au calcul et à l'étude de la lumière seront également discutés ainsi que les principaux indicateurs de la performance qui permettront de quantifier et d'évaluer de manière significative la distribution lumineuse intérieure dans un espace construit.

La lumière et le système visuel humain

La lumière désigne les ondes électromagnétiques classées en catégories en fonction de la fréquence et de la longueur d'onde et visibles par l'œil humain qui ne perçoit qu'une infime partie du spectre émis par le soleil, d'environ 780 nm vers le bas à 390 nm. La vue est le moyen privilégié de la connaissance et de l'éducation puisque les quatre cinquième de ce que nous mémorisons dépendent de ce que nous voyons. L'œil est notre récepteur de la lumière même si son fonctionnement est spécifique. La vision ou la capacité de voir est le processus par lequel notre cerveau perçoit les informations par les yeux. Il est appelé aussi la perception visuelle. Le système visuel humain représente un outil visuel incroyable qui sert à recueillir des informations et de rester en contact avec le monde extérieur. Il est composé d'un ensemble de composants optiques comprenant la cornée, l'iris, la pupille, les humeurs aqueuses et vitreuses, le cristallin et la rétine. L'œil est donc le responsable de l'initiation du processus visuel total. Il y a deux aspects qui composent notre perception visuelle : il y a les composantes biophysiques qui concernent l'œil et sa fonction et les composantes d'interprétation interne.

3.1.1 Les composantes biophysiques

Le système visuel humain se compose de trois couches, la sclérotique, une structure dure modifiée à l'avant de l'œil dans une couche transparente appelée la cornée. La seconde couche est appelée la choroïde, une membrane noire qui absorbe la lumière et empêche les inter-réflexions. Cette couche est modifiée à l'avant en une lentille transparente qui focalise la lumière avec précision sur la troisième couche, la rétine. Le processus commence lorsque la lumière pénètre dans l'œil. Ces rayons seront orientés vers le centre de l'œil et pénétreront par la pupille. La lumière traverse ensuite le cristallin, une lentille biologique, qui nous assure d'avoir une image nette au fond de l'œil pour atteindre l'iris. Sous différentes conditions de luminosité, l'iris contrôle la taille de la pupille et admet la quantité optimale de la lumière dans l'œil. L'iris réduit la taille de la pupille quand il est lumineux et vice-versa. La cornée et le cristallin reçoivent et focalisent la lumière provenant du monde extérieur sur la rétine. Cette dernière est responsable de la sensibilité, elle contient un grand nombre de petits récepteurs de lumière dits cônes et bâtonnets. Les cônes sont principalement répartis le long de l'arrière et le centre de la rétine là où on trouve la fovéa, qui est le point focal de la lentille. Ils sont sensibles à différentes longueurs d'ondes qui produisent la vision des couleurs et ils sont capables de s'adapter à une luminance allant de 3 cd/m² à 1 000 000 cd /m². Les bâtonnets sont distribués plus largement le long du bord de l'œil. Ils sont extrêmement sensibles à la lumière et fonctionnent mieux à des niveaux de faible luminosité et capables de répondre à une luminance située dans la plage de

1/1000 à 120 cd/m². Ils sont moins denses agissant plus lentement que les cellules de cônes et donc ils ne permettent pas une bonne précision des détails et n'ont pas également une sensibilité à la couleur, mais ils ont une extraordinaire sensibilité au mouvement. Le nerf optique transmet les informations reçues au cerveau par des impulsions électriques. Une vision est créée dans le cerveau à travers ce processus. (Stein, 2006). Les cellules de bâtonnets et de cônes ont des réactions différentes à des grandeurs de lumière, pour cette raison, plusieurs modes de perception sont distingués. Elles sont respectivement : la vision photopique pour adapter l'œil à la lumière, la vision scotopique pour adapter l'œil à l'obscurité et la vision mésopique qui est entre les deux modes. Les deux premiers modes ont des sensibilités différentes à la lumière ; la sensibilité scotopique maximale des cellules de bâtonnets est à 507 nm, tandis que la sensibilité photopique maximale est à 555 nm (des cellules de cônes). Les études montrent qu'il nous faut une heure de temps pour que l'œil puisse s'adapter à ce changement de longueurs d'ondes. Donc, ce mécanisme met en jeu plusieurs phénomènes physiques (formation de l'image sur la rétine), physiologiques (transmission de l'image formée en signaux codés transmis au cerveau) et psychophysiologiques (transformation des signaux codés en perception visuelle qui fait appel à différents types de mémoires (vue, toucher, goût, odorat...)).

3.1.2. Les aspects d'interprétations internes

Lorsque le cerveau reçoit des informations du nerf optique, il traite les données et permet la reconnaissance et la compréhension. Des expériences, des attentes et des émotions ont un impact considérable sur la perception et l'évaluation de nos images visuelles (nous en parlerons de ces aspects internes en détail au point 3.2. 2. L'aspect non visuel de la lumière.

3.2. La qualité de la lumière naturelle

Des approches différentes ont été proposées pour définir la qualité de l'éclairage (Loe et Rowlands 1996, Veitch et Newsham 1998, Boyce et Cuttle 1998). La définition qui est généralement applicable est que la qualité de l'éclairage est donnée par la mesure dans laquelle l'installation de l'éclairage est conforme aux exigences fixées par le client et le concepteur (Boyce, 2003). Elle est liée à des objectifs qui consistent à améliorer des performances des tâches pertinentes, à créer des impressions spécifiques et à assurer également le confort visuel. La perception de cette qualité est influencée par deux aspects, visuel et non visuel.

3.2.1. L'aspect visuel

La mesure de la qualité de l'éclairage implique plusieurs facteurs tels que l'uniformité de l'éclairage dans le champ de vision, la performance visuelle, l'éblouissement, le contraste. Les recherches qui ont été faites dont l'objectif est d'étudier les interactions entre la lumière et

notre système visuel ont principalement porté sur deux critères, ceux liés à la performance visuelle et ceux du confort visuel.

3. 2.1.a. Les critères relatifs à la performance visuelle

3. 2.1. a1. Le champ de vision

La quantité de la lumière entrant dans l'œil est déterminée principalement par la luminance dans le champ de vision. Ce dernier est la capacité de l'œil à saisir une information visuelle qui dépend de sa position relative dans le champ visuel, il représente également l'espace délimité par la perception spatiale de l'œil, sans bouger la tête. Les humains ont un champ de vision très large mais les capacités visuelles ne sont pas uniformes à travers un champ de vue.

Différentes fonctions se produisent telles que la vision des couleurs, la capacité à percevoir la forme et le mouvement qui varient à travers le champ visuel ; chez l'homme la perception des couleurs est concentrée dans le centre, tandis que la seconde (mouvements et formes) tend à être beaucoup plus forte dans la périphérie du champ visuel. La perception de détails est appelée vision fovéale, effectuée par la fovéa qui est un champ visuel central assez restreint de 2° . Elle est responsable de la vision centrale qui est nécessaire pour l'être humain afin d'exercer toute activité où le détail visuel a une importance primordiale et plus nous nous éloignons de ce champ central, plus la vision ne devient pas nette et les détails seront difficilement perceptibles. La vision fovéale fournit également une meilleure vision de couleurs en raison de la concentration des cônes (Egan, 1983). L'ergonoma est un autre champ visuel de 30° par rapport à l'axe de vue et il nous permet de distinguer les formes alors que le panorama est un champ de 60° par rapport à l'axe de vue qui nous permet de distinguer les mouvements. La ligne ou l'axe de vue est une ligne perpendiculaire à l'œil de 10° sous l'horizontale dans la position debout et 15° au-dessous d'horizontale dans la position assise humaine (figure 3.1).

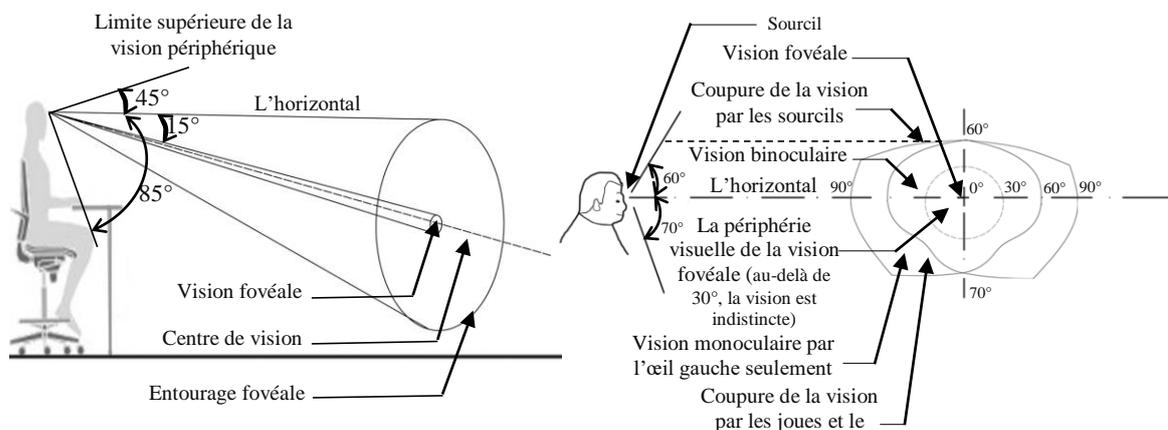


Figure 3.1. A gauche, champ visuel pour une position assise (Source : Lechner, 1991) ; A droite, champ visuel pour une position debout (Source : Egan, 1983)

Il y a des limites à la luminosité qui peut être acceptée par un champ de vue particulier. La vision dans un angle solide de 60° , qui est de 30 degrés dans toutes les directions autour de l'axe de la vision fovéale, est appelé l'environnement proche ou immédiat. Dans cette région le détail de l'acuité des yeux où la sensibilité est encore assez élevée et l'œil peut détecter des différences de luminosité entre l'objet et son premier plan ou arrière-plan. Au-delà de cette zone, on trouve la vision périphérique, qui est une surface lointaine, qui peut s'étendre à 180° dans la direction horizontale dont sa taille varie en fonction de la superposition des champs de vision des deux yeux. La capacité du cerveau à percevoir les images des deux yeux, comme une image unique est appelée une vision binoculaire (180°) qui se prolonge verticalement vers 130° et horizontalement de plus de 120° lorsque les deux yeux sont axés sur un objet fixe (Egan, 1983) ce qui nous donne surtout nos réactions de nos ambiances subjectives (Stein 2006). La vision d'un œil seul est appelé vision monoculaire qui a un angle de vision d'environ 150° (figure 3.2).

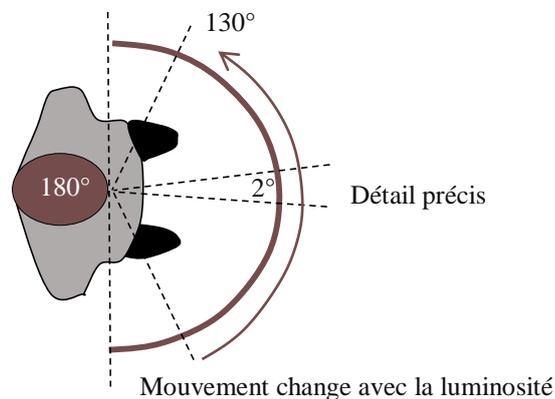


Figure 3.2. La vision humaine binoculaire et monoculaire (Source : Stein, 2006)

3. 2.1. a2. La performance visuelle

L'une des principales recommandations de l'éclairage consiste à fournir un éclairage adéquat permettant aux personnes d'effectuer leurs tâches visuelles. La performance visuelle est un taux d'évaluation du système visuel utilisé pour quantifier les aptitudes d'une personne à détecter, identifier et analyser les détails et les objets de dimensions données entrant dans son champ visuel à des distances données en se fondant sur la vitesse, la précision et la qualité de sa perception (CIE 1987). Les modèles de performances visuelles sont utilisés pour évaluer les relations entre la performance visuelle des tâches et la taille de la cible visuelle, le contraste, l'âge d'observateur et les niveaux de luminance (CIE, 2002). La performance visuelle est fortement liée à la quantité de lumière, elle est améliorée lorsque il y a une augmentation de la luminance mais, dans certains cas, les études ont montré que l'augmentation de luminance ne conduisent pas à des améliorations de la performance visuelle (Rea et Ouellette 1991, CIE

2002). La performance visuelle dépend entre autre des caractéristiques propres de la tâche à accomplir, de l'acuité visuelle de l'observateur, de la nature de l'arrière-plan, des conditions d'éclairage, ...etc. Les principales tâches visuelles sont la perception du contraste, des détails fins et le gradient de luminosité. De plus, la visibilité du détail dépend de sa dimension angulaire et de sa forme, sa luminance et sa couleur, son contraste par rapport au fond immédiat, sa position dans le panorama visuel, la luminance d'adaptation, l'âge de l'observateur, le temps d'observation, etc. La visibilité de la tâche est utilisée pour relier la performance visuelle aux paramètres de l'éclairage sans tenir compte de l'attitude de l'observateur à l'égard de la tâche, elle est déterminée par la visibilité du détail critique. Ainsi, la performance visuelle et la consommation d'électricité pour l'éclairage doivent être en équilibre en vue d'accroître l'efficacité énergétique sans négliger les aspects de la qualité de l'éclairage.

3. 2.1. a3. L'adaptation de l'œil à la luminosité

L'être humain s'adapte de plusieurs façons avec son environnement physiologique, dans le sens où il y a des changements physiques et psychologique. L'adaptation visuelle est la capacité de s'adapter à différents niveaux de luminosité présents dans un environnement. Elle modifie la sensibilité à la quantité de lumière, le changement de luminosité, le contraste et aussi le degré d'inconfort. Elle est influencée par le phénomène de l'éblouissement (Hopkinson et al, 1960) ainsi que toutes les surfaces situées dans le champ visuel. Le processus d'adaptation comprend trois phases essentielles, une première phase rapide qui implique le mécanisme neuronal, une deuxième phase de temps d'ajustement moyen de la taille de la pupille et une dernière phase lente qui est régie par la vitesse de système photochimique (Boyce, 1981). Selon Schiller et Japee (2001), l'œil peut s'adapter de 10.81lux à 108,00001lux en moins d'une minute et détecter la luminosité sur une plage de 1012 cd/m² à 1 cd/m², mais il ne peut pas voir l'ensemble de cette gamme en un seul niveau d'adaptation. Cependant, pour des niveaux de faible luminosité, les yeux humains ont besoin d'une période de temps, appelé temps d'adaptation. Ce dernier est le temps nécessaire pour que les yeux s'adaptent à chaque fois qu'il y a un changement de luminance globale. Notre adaptation visuelle deviendra problématique si le changement de luminance est trop rapide ou quand il y a un endroit très lumineux tandis que la luminance globale de fond est sombre. Pendant la journée, l'adaptation visuelle peut varier considérablement en fonction des conditions du ciel et de la position du soleil ainsi que des luminances situées dans le champ de vision. La lumière du jour extérieure peut varier de 120 000 lux pour la lumière du soleil directe à midi, à moins de 5 lux dans des conditions de ciel très couvert avec le soleil à l'horizon. Cela signifie que l'œil humain a besoin d'adapter ce

que l'on assimile en une progression logarithmique. Elle peut également varier uniquement avec le mouvement des yeux ou le corps entier d'un point de vue ou d'un espace à un autre en fonction des niveaux de luminance expérimentés lors de la visualisation de différentes surfaces. S'adapter aux nouvelles conditions d'éclairage prend un peu de temps, de quelques secondes à quelques minutes, en fonction de l'amplitude de différence de la luminance. L'adaptation visuelle ne peut généralement pas être mesurée directement avec un simple instrument de mesure, mais la mesure de l'éclairement au niveau du plan de l'œil d'un observateur ($E_{\text{œil}}$) conduira à une très bonne approximation ($L_{\text{adaptation}} = E_{\text{œil}} / \pi$). Il faut savoir que toute luminance moyenne donnée sur l'ensemble du champ visuel peut être créée par de nombreuses et très différentes distributions de luminance. Une approche conceptuelle pour les espaces visuellement confortables consiste à déterminer les niveaux d'adaptation de luminance appropriées qui permettent de déterminer la gamme de luminance appropriée dans le champ de vision. Les niveaux d'adaptation souhaitables en référence à des tâches à effectuer pourraient ainsi devenir des niveaux de luminance de base pour l'espace. D'autre part, les études actuelles n'ont trouvé aucun impact significatif de l'âge de l'observateur sur les conditions de luminance préférées dans les environnements de bureau (Veitch et Newsham., 2000).

3. 2.1. a4. L'acuité visuelle

Des expériences peuvent être faites pour mesurer la relation entre le niveau d'éclairage et la capacité de l'œil à voir. Selon Egan, (1983) l'exécution des tâches visuelles constitue habituellement la détection, la reconnaissance et l'identification. La capacité d'un œil sain pour voir le détail est basée sur plusieurs facteurs tels que le niveau d'éclairement que reçoivent un objet ou le détail, le contraste entre le détail et son arrière-plan, la taille et la dimension du détail et le temps passé à regarder les détails. L'acuité visuelle est la capacité de l'œil de distinguer les détails fins à une distance donnée. (Larson, 1964). Elle est la méthode la plus populaire utilisée pour déterminer la quantité d'éclairage nécessaire dans un espace. Elle est déterminée par la luminosité, le contraste et le temps d'adaptation. Plus l'éclairage est élevé, plus les petits détails peuvent être visibles. De plus, la quantité de lumière arrivant sur une tâche visuelle donnée détermine la différence de luminosité entre cette dernière et son environnement. L'acuité visuelle est largement dépendante du contraste de la luminosité dans la zone de travail. Toutefois, le contraste de luminosité entre l'objet observé et son arrière-plan peut également affecter l'acuité visuelle. Les couleurs et le contraste de couleur des objets peuvent influencer aussi l'acuité visuelle d'une manière très complexe car le sens de la couleur est également affecté par les niveaux de la lumière. Toute tâche peut être analysée en termes de la perception des

détails critiques, le contraste et la différence de couleur et l'éclairage suffisant doit être assuré pour cette reconnaissance dans un environnement donné et la visibilité de la tâche est importante pour déterminer la quantité et la qualité de la lumière requise dans un espace ou sur une surface. Sous une condition idéale, une acuité visuelle de 2,5 est la plus élevée et 1,0 est cliniquement normale pour voir les détails. Pour une acuité visuelle maximale, la luminance d'une tâche doit être la même ou légèrement supérieure à celle de l'arrière-plan, mais un rapport de 1/3 peut être accepté pour la plupart des situations (Stein, 2006). L'acuité visuelle augmente avec l'augmentation du niveau d'adaptation. L'acuité visuelle est aussi la capacité de l'œil à discriminer des détails spatiaux proches. Elle est mauvaise lors du passage de la lumière à l'obscurité (1% de l'acuité diurne) et s'améliore en 10 minutes pour atteindre 10 % qui seront faiblement dépassés pour un temps supérieur (accommodation ou adaptation à la vision nocturne). L'acuité est optimale lorsque l'éclairement est élevé sans être éblouissant et lorsque la luminance de la zone étudiée et celle de l'entourage sont proches. De plus, la fatigue visuelle qui est liée à des facteurs multiples comme une luminance insuffisante obligeant à des accommodations successives, un excès de luminance des surfaces de travail, un fort contraste entre deux zones de travail créant un éblouissement périphérique...etc. Une bonne visibilité de la tâche visuelle et de son environnement est particulièrement nécessaire et fortement influencée par les caractéristiques de l'éclairage. Il existe plusieurs méthodes permettant de mesurer l'acuité visuelle d'une personne, il y a la méthode de la carte des lettres de Snellen qui est largement utilisée par les ophtalmologistes et des opticiens. De plus, la méthode la plus couramment utilisée pour tester l'acuité visuelle est un graphique Landolt Ring, développé par Wetson dans les années 1930. Cette méthode a été utilisée dans diverses recherches d'éclairage liées à la vision. Le procédé est également un appareil de tâche visuelle commune utilisée pour détecter des signaux visuels pour les études de performances visuelles (Perry, 1985).

3.2.1. b. Les critères relatifs au confort visuel

Dans une étude menée par Boyce (2003), cinq paramètres ont été définis dans l'objectif d'évaluer et de mesurer les niveaux d'éclairage, il s'agit de la taille de la tâche visuelle, le contraste de luminance, la différence de couleur, la qualité de l'image rétinienne et l'éclairement rétinien. Ces paramètres sont importants pour déterminer la mesure dans laquelle le système visuel est capable de détecter et d'identifier le stimulus. Il y a un certain nombre de facteurs liés à l'éclairage qui peuvent causer l'inconfort visuel et il n'y a pas une méthode simple à suivre pour créer un environnement lumineux visuellement confortable (Boyce, 2003 ; Veitch et Newsham, 1998). Les recommandations d'éclairage intérieur actuelles donnent des gammes de

valeurs d'éclairage pour différents types d'espaces et d'activités (EN1246 4-1 2002, CIBSE 1997, IESNA 2000). Les recommandations et les directives concernent principalement l'élimination de la gêne visuelle, mais le concepteur peut intervenir pour améliorer le confort visuel. Les causes de ce dernier peuvent être une lumière très faible ou peu forte, une distribution lumineuse non homogène causée par des variations importantes des niveaux d'éclairage entre les différentes surfaces d'un même local, un éclairage trop uniforme, un éblouissement ou ombres trop fortes. Le confort visuel dépend d'une combinaison de paramètres physiques : l'éclairage, la luminance, le contraste, l'éblouissement et le spectre lumineux auxquels s'ajoutent des caractéristiques propres à l'environnement et à la tâche visuelle à accomplir, comme la taille des éléments à observer et le temps disponible pour la vision. Le confort visuel relève, en outre, de facteurs physiologiques et psychologiques liés à l'individu, tels que son âge, son acuité visuelle ou la possibilité de regarder à l'extérieur.

3.2.1. b1. L'uniformité de l'éclairage

Chaque activité nécessite un certain niveau d'éclairage dans la zone où se déroule la tâche. En général, plus la difficulté pour la perception visuelle est importante, plus le niveau moyen d'éclairage devrait être élevé. Un niveau d'éclairage minimum est nécessaire pour une vision claire et sans fatigue. Toutefois, un éclairage trop abondant peut être inconfortable. De plus, l'éclairage moyen recommandé est généralement fixé selon la fonctionnalité du local et la précision de la tâche visuelle qui doit y être exercée. Les recommandations sont souvent données en termes d'éclairage plutôt que de luminance pour faciliter sa mesure. Comme la sensation de l'éclairage est mieux représentée par la luminance, il faut tenir compte du choix du coefficient de réflexion des surfaces car elle affecte à la fois l'uniformité et la consommation électrique. Plus le coefficient est faible et sa couleur est foncée, plus la vision s'avère difficile et plus le niveau d'éclairage doit être élevé. Pour permettre à la lumière naturelle de se distribuer le mieux possible dans le local, il est essentiel de placer le mobilier de telle sorte qu'il ne fasse pas écran et de disposer judicieusement les zones d'activité. Les plans de travail seront situés préférentiellement près des ouvertures où la lumière naturelle est bien reçue. Si le niveau d'éclairage et la luminance varient dans le champ visuel, une adaptation de l'œil est nécessaire lorsque le regard se déplace. Durant ce moment, l'acuité visuelle est diminuée, entraînant des fatigues inutiles. L'AFE (1993) a rédigé des recommandations relatives à l'éclairage (voir tableau 3.1), compte tenu des caractéristiques de la tâche et de l'observateur, afin de proposer des valeurs d'éclairage moyens à maintenir en permanence sur la zone de travail en fonction de l'activité. Ces valeurs peuvent être éventuellement

multipliées par 1.5 si les conditions de travail ou l'environnement l'exigent, en particulier si les erreurs de perception peuvent entraîner des circonstances dangereuses ou coûteuses ou lorsque les facteurs de réflexions et les rapports de contraste entre les surfaces de la tâche visuelle sont faibles ou quand la vitesse d'exclusion du travail est rapide ou bien si les tâches doivent être exécutées dans des locaux aveugles alors que l'éclairage recommandé est inférieur à 300 lux. Ces corrections sont enrichies par la suite par NF X35-103 (1990) tout en tenant compte de deux paramètres supplémentaires : l'âge de l'observateur et le caractère occasionnel de la tâche. Pour l'usage des bureaux, IESNA (1993) recommande d'utiliser des triples de 200-300-500 lux, de 500-750-1000 lux ou de 1000-1500-2000 lux (voir tableau 3.2). Il s'agit donc de choisir l'éclairage adéquat à la tâche visuelle et à l'observateur et additionner les facteurs correcteurs présentés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.1 : Valeurs de l'éclairage requises pour l'usage d'un bureau (Source : AFE, 1993)

L'espace du bureau	éclairage moyen à maintenir
Bureaux de travaux généraux	425 lux
Travail sur écran	350 lux
Dactylographie	425 lux
Salle de dessin, tables	850 lux

Tableau 3.2 : Critère de choix de l'éclairage proposé par IESNA (Source : IESNA, 1993)

Niveau d'éclairage correspondant à une activité donnée de bureau	Somme résultante		
	-2 -3	+2 +3	-1 0 ou +1
200-300-500 lux	200 lux	500 lux	300 lux
500-750-1000 lux	500 lux	1000 lux	750 lux
1000-1500-2000 lux	1000 lux	2000 lux	1500 lux

Tableau 3.3 : Valeurs de correction proposée par IESNA (Source : IESNA, 1993)

Caractéristiques de la tâche et de l'observateur	Facteur de correction		
	-1	0	+1
Age de l'observateur	Moins de 40 ans	40-55	Plus de 55
Vitesse et/ou précision	Peu importante	Importante	Critique
Facteur de réflexion du fond	Supérieur à 70%	30% à 70%	Moins de 30%

Les normes et les codes de l'éclairage fournissent des rapports d'éclairage recommandés entre la zone de travail et de ses environs. Pour l'éclairage de bureau, il y a des ratios de luminance recommandés entre la tâche et ses environs immédiats (EN 12464-1, 2002 ; CIBSE,

1997 ; IESNA, 2000). De plus, il faut une certaine uniformité de luminance, d'une part, entre le champ visuel en position de travail (le plan de travail) et au repos (les murs) et d'autre part, entre les différentes surfaces de référence (éclairage de la zone de travail et de la zone voisine). Les niveaux d'éclairage conseillés doivent être nuancés en fonction du contraste de luminance entre l'élément observé et son arrière-fond. L'éclairage à une corrélation directe avec l'accommodation à la distance et la profondeur du champ est meilleur lorsque l'éclairage est élevé. Si l'on est amené à changer la distance de vision, il est souhaitable que l'éclairage soit uniforme et élevé sur les deux surfaces. Les valeurs de l'éclairage recommandées dans le tableau 3.4 sont fondées sur des expériences réalisées dans la pratique et sont valables d'une manière générale. IESNA en 2000 avait établi des valeurs moyennes d'éclairage pour trois types de bureau mesurés sur un plan de travail dont sa hauteur diffère d'une activité à une autre.

Tableau 3.4 : Valeurs de l'éclairage requises pour l'usage d'un bureau (Source : IESNA, 2000)

Type de bâtiment	Type d'espace	Eclairage moyen maintenu sur le plan de travail (lux)	Hauteur du plan de travail (m)
Bureau	Bureau individuel	400	à 0.8 m
	Bureaux paysager	400	à 0.8 m
	Salle de conférence	300	à 0.8 m

Une recherche avait été menée par Fischer (1973) a montré que le pourcentage des personnes satisfaites de l'environnement lumineux augmente avec l'éclairage jusqu'à certain seuil au-delà duquel il décroît. Dans cette étude, le niveau d'éclairage jugé satisfaisant est d'environ 2000 lux. Mais, le jugement ne dépend pas seulement du niveau d'éclairage mais aussi d'autres facteurs tels que la répartition des luminances, les couleurs et les coefficients de réflexion des parois.

3.2.1. b2. Les caractéristiques des couleurs

Un corps coloré réfléchit sélectivement les radiations colorées qu'il reçoit. Le système visuel regroupe les différentes radiations réfléchies et donne une sensation de couleur. La couleur perçue est intimement dépendante du spectre lumineux émis. Les objets qui ont des couleurs chaudes comme le rouge et l'orange sont plus agréables lorsqu'elles sont éclairées par une lumière chaude plutôt que par une lumière froide, mais par contre, la lumière chaude tend à noircir les couleurs froides (bleu, violet). Elles peuvent contribuer dans une large mesure à modifier la dimension apparente des surfaces et des volumes. En effet, les couleurs chaudes

seront de préférence utilisées dans des locaux de dimensions importantes tandis que les couleurs froides seront choisies pour les petits locaux. Les caractéristiques de couleur de la lumière dans un espace sont déterminées par la distribution spectrale de puissance de la source lumineuse (SPD) et les propriétés de réflectance de la surface de la pièce. Les ambiances lumineuses colorées dans les bureaux ont été généralement évaluées par deux propriétés, à savoir la température de couleur corrélée (TCC) et l'indice de rendu de couleur (IRC). La température de couleur, mesurée en degrés Kelvin qui désigne la teinte de la lumière émise par un corps en fonction de sa température (plus elle est élevée, plus la lumière considérée contient de grandes quantités de couleurs). La température de couleur proximale est la température du corps noir dont la couleur perçue ressemble le plus, dans des conditions d'observation spécifiées, à celle d'un stimulus donné de même luminosité (CIE, 1987). La température de couleur d'une source naturelle dépasse les 6000 kelvins. Les recherches précédentes ont montré que pour un éclairage moyen de 450 lux dans un bureau, les usagers semblent préférer des sources comprises entre 3000 et 5000 kelvins. Plus la température de couleur d'une source est élevée plus sa teinte paraît froide et vice versa. Donc, on peut dire qu'il y a une corrélation entre la température de couleur et la quantité d'éclairage dans un espace. L'indice de rendu de couleur d'une source lumineuse est défini comme l'évaluation quantitative du degré d'accord entre la couleur psychophysique d'un objet éclairé par l'éclairage en essai et celle du même objet éclairé par l'éclairage de référence (CIE, 1987). Cet indice varie entre 50 et 100. Autrement dit, l'indice de rendu des couleurs IRC, exprimé en pourcentage, représente la capacité d'une source à rendre fidèlement les couleurs d'un objet (un IRC de 100 indique que la lumière considérée contient 100 % des couleurs existantes).

3.2.1. b3. L'éblouissement

L'éblouissement est causé par une différence de luminances ou des valeurs de luminance élevées ou excessives dans le champ visuel et l'individu est moins apte à percevoir les objets. Ce phénomène peut même diminuer la capacité de vision d'une personne et cela conduit à la fatigue visuelle. En éclairage naturel, l'éblouissement peut être provoqué par la vue directe du soleil, par une luminance excessive du ciel vu par les fenêtres ou par des parois fortement réfléchissantes du rayonnement solaire provoquant des contrastes trop élevés par rapport aux surfaces voisines. Suivant l'origine de l'éblouissement, on peut distinguer : L'éblouissement direct, indirect, perturbateur et inconfortable. L'éblouissement direct est causé par la présence d'une source lumineuse intense située dans la même direction que l'objet regardé ou dans une direction voisine, mesuré en candela/m². On peut distinguer deux types d'éblouissement direct ;

d'une part, l'éblouissement d'inconfort qui résulte de la vue en permanence de sources lumineuses de luminances relativement élevées. Cet éblouissement peut créer de l'inconfort sans pour autant empêcher la vue de certains objets ou détails. Ce type se rencontrera dans des locaux où l'axe du regard est toujours relativement proche de l'horizontale. D'autre part, l'éblouissement invalidant qui est provoqué par la vue d'une luminance très élevée pendant un temps très court. Celui-ci peut, juste après l'éblouissement, empêcher la vision de certains objets sans pour autant créer de l'inconfort. La lueur d'invalidité peut être réduite par l'élévation du niveau général de la luminosité dans le champ de vision. L'éblouissement indirect provient d'une réflexion perturbatrice des sources lumineuses sur des surfaces spéculaires ou brillantes alors que l'éblouissement indirect se présente sous deux formes : l'éblouissement par réflexion et l'éblouissement par effet de voile. Le premier type se produit par la réflexion sur des surfaces brillantes ou spéculaires, de l'image d'une source de lumière vers l'œil de l'observateur. L'éblouissement de voile apparaît lorsque des petites surfaces de la tâche visuelle réfléchissent la lumière provenant d'une source lumineuse et réduisent ainsi le contraste entre la tâche visuelle et son environnement immédiat. L'éblouissement perturbateur se produit quand la luminance atteint des valeurs extrêmes ou quand le contraste devient trop important ; il entraîne une perte momentanée de la vision alors que l'éblouissement inconfortable entraîne une diminution de la performance visuelle sans atteindre le seuil de la douleur. Cet éblouissement est généré par le contraste. Dans le bâtiment, l'éblouissement d'inconfort est considéré comme le type couramment produit. Ceci est considéré comme une gêne visuelle en présence de sources lumineuses d'éclairage, des luminaires, des fenêtres ou d'autres surfaces lumineuses (CIE, 1987 ; Boyce, 2003). Il existe des indices d'éblouissement mis en place pour l'évaluation de l'ampleur de l'éblouissement d'inconfort tels que : UGR (Unified Glare Rating) (EN 12464-1, 2002], Visual Comfort Probability (VCP) (IESNA, 2000), ...etc.

3.2.1. b4. Le contraste

La distribution lumineuse dans un espace doit être étudiée de telle façon que les différences excessives de luminance soient évitées pour permettre aux occupants de voir correctement. Des zones extrêmement sombres ou brillantes doivent être exclues car elles donnent naissance à un contraste non étudié. Le contraste est la différence de luminosité entre un objet et son environnement ou entre les différentes parties d'un objet, faisant ressortir l'un et l'autre. L'équilibre des contrastes est un élément déterminant le confort et de la perception des détails. Lorsqu'il y a de grandes différences de luminance dans le champ visuel, l'œil doit s'adapter au changement de la direction du regard. Pendant son adaptation, l'acuité visuelle est diminuée.

Cependant, si les différences entre les niveaux de luminance sont trop faibles, on crée dans le local une impression de monotonie très désagréable, il peut être impossible de distinguer de faibles contrastes. Bien que l'œil s'adapte à la luminosité d'ambiance de son champ visuel, il est plus impressionné par la luminance des zones situées dans sa vision fovéale. Nous sommes sensibles aux contrastes de luminance : en un point, notre cerveau compare l'intensité lumineuse à celle qui existait antérieurement ainsi qu'à celles des régions voisines. Pour garantir une répartition harmonieuse des luminances, il convient de ne pas dépasser certaines valeurs de contraste entre les différentes zones du champ visuel ou les surfaces de référence. Le rendu de contraste est défini par l'équation (3.1), où C , L_c et L_f représente le contraste, la luminance de la cible (l'objet) et la luminance du fond :

$$C = \left| \frac{L_c - L_f}{L_f} \right| \quad (3.1)$$

Dans le cas d'une tâche effectuée sur un plan horizontal. Les risques de gêne visuelle dus à la réflexion sont présents et qui peuvent être causés par la position de l'observateur, la direction d'arrivée de la lumière ainsi que la nature de la tâche. La réflexion qui produit la tâche visuelle est dite réflexion de voile et qui apparaît lorsque des petites surfaces de la tâche visuelle réfléchissent la lumière provenant d'une source lumineuse et réduisent ainsi le contraste entre la tâche visuelle et son environnement immédiat. La zone résultante est appelée zone offensante. Il est plus important lorsque le parier à une forte spécularité. Pour une tâche donnée, dans une direction d'observation donnée, il est défini comme étant le rapport du contraste de la tâche sous l'éclairage considéré, au contraste de la même tâche sous l'éclairage de référence (CIE, 1987). L'éclairage de référence est un éclairage complètement diffus et non polarisé par l'illuminant normalisé A d'une tâche dans son entourage. La CIE a défini le facteur de rendu de contraste (FRC) afin de vérifier si les réflexions de voiles réduisent la performance visuelle ou non. Des expériences et des enquêtes ont été faites et les résultats ont montré que les réflexions de voile présentent une source d'inconfort visuel avant d'être suffisamment forte pour engendrer une baisse significative de la performance (Bjorset et Frederiksen, 1979 ; BRE, 1981). Les risques de ces réflexions sont plus importants si le travail est fait sur un écran car l'angle entre la surface de l'écran et la verticale est compris entre 0 et 45 et a une surface qu'est plus spéculaire qu'un papier ainsi que la configuration de l'écran (plat ou convexe) et le contraste produit (positif ou négatif). Dans cette situation, le problème d'inconfort visuel est fortement présent, pour cela, il faut s'assurer de l'absence de forte luminance dans la zone offensante (Boyce et Eklund, 1995 ; IESNA, 1993). La conception d'un environnement de travail peut devenir très complexe lorsque la gamme de niveaux de luminance d'adaptation varie

considérablement d'un point de vue à l'autre, surtout si des changements de vue se produisent fréquemment. Les changements de luminance spatiale doivent donc se produire progressivement, permettant à l'œil de s'adapter suffisamment aux nouvelles conditions visuelles. Pour atteindre un confort visuel, les ratios de luminance ne devraient pas dépasser certaines valeurs. Les recommandations typiques supposent un rapport 1:3 entre la tâche visuelle et son environnement immédiat, un rapport de 1:10 entre la tâche visuelle et d'autres surfaces plus proches dans le champ visuel, et un rapport de 1:20 pour les surfaces les plus éloignées du champ visuel. Un rapport 1:40 entre la tâche et toutes les surfaces dans le champ de vision est généralement considéré comme la valeur maximale admissible. Cependant, des études sur les conditions de luminance préférées dans les bureaux, ont constaté que la plupart des travailleurs préféraient des rapports inférieurs. Mais un œil qui voit le soleil et adapté à la luminance d'un écran d'ordinateur connaîtront des rapports supérieures plusieurs fois à celles recommandées. Un rapport de luminance de 1:3 est également perçu comme une nette différence dans les niveaux de luminosité et contribue à ajouter de l'intérêt à une scène visuelle.

3.2.1. b5. Les rapports des luminances

Deux problèmes majeurs peuvent se produire et influencer notre performance visuelle pour effectuer une tâche donnée dus à un déséquilibre des valeurs de luminance dans le champ de vision. On parle de l'éblouissement perturbateur et de l'adaptation transitoire. L'éblouissement perturbateur se produit lorsque une ou plusieurs zones situées dans le champ visuel ayant une forte luminance par rapport à la tâche visuelle. Cette gêne conduit à des troubles de la vision des objets sans provoquer une sensation désagréable (CIE, 1987). L'adaptation transitoire est liée à un déséquilibre des luminances présentes dans le champ visuel. Ce déséquilibre provoque une brève perte de sensibilité aux contrastes. Dans un bureau, le travailleur doit déplacer son regard d'une tâche visuelle à une autre, l'adaptation transitoire se produit lorsque les luminances des tâches sont relativement différentes les unes des autres. Le déséquilibre des luminances peut être causé par une mauvaise répartition de lumière dans l'ergonama et le panorama. L'ergonama est définie par un cône, de révolution autour de l'axe optique, dont l'angle au sommet est égal à 30°. Elle regroupe la tâche visuelle, leur voisinage immédiat ainsi que les zones qui les séparent, elle représente la zone où l'utilisateur peut déplacer son regard lorsqu'il exécute un travail donné. Des expériences antérieures menées par plusieurs chercheurs tels que Boyce (1996), Achard (1984), AFE (1993), CIE (1984,1986) et CIBSE (1989) ont confirmé que pour avoir un confort visuel, il faut que les valeurs de luminances à l'intérieur de l'ergonama ne doivent pas dépasser un rapport de 1 à 3 c'est-à-dire de 1:1 à 1:3. Le panorama est un champ visuel de

60° par rapport à l'axe de vue, il inclut les zones qui restent, dont certaines sont observées rarement dans l'objectif de réfléchir ou de reposer les yeux. L'équilibre des luminances dans ce dernier n'est pas bien déterminé, du fait qu'il existe plusieurs règles et recommandations définissant le rapport entre la luminance du panorama et de celle de la tâche visuelle tels que la règle de 1:10 menée par IESNA (1993), Scartezini (1994), la norme DIN 5035 en 1983 et la proposition de GERACT (1984) qui recommandent que le rapport des luminance ne doit pas excéder 1:50 et celle de L'AFE (1993) qui propose un rapport de luminance compris entre 0.3 et 0.9 entre le plafond et la tâche visuelle. En outre, dans un plan de travail comprenant un clavier et un écran, la luminance du clavier habituellement sombre pourrait seulement être de 5 à 10 cd/m². Sous des niveaux d'éclairage très faibles, le rapport de luminance entre le clavier et l'écran aurait certainement causé de l'inconfort visuel et l'écran LCD deviendrait une source d'éblouissement si l'utilisateur a essayé d'adapter à la luminance du clavier. Si le niveau d'éclairage des tâches de bureau est compris entre 300 lux et 500 lux (valeurs normales), le rapport de luminance serait très probablement acceptable. Dans ces conditions, il serait probablement aussi à l'aise pour déplacer la vue entre une tâche horizontale (le papier) et une autre verticale (l'écran). En résumant, lorsque il 'y a aucune variation des niveaux d'éclairage dans un environnement de travail, l'utilisateur peut être en mesure de se concentrer sur sa tâche, mais devra faire face à un environnement plutôt terne, ennuyeux. Une bonne conception des systèmes de contrôle de contraste de luminosité augmente les performances et diminue la fatigue physiologique (Grandjean, 1985).

3.2.2. L'aspect non visuel

La photobiologie est un nouveau domaine dans la recherche d'éclairage, révélant qu'il existe une voie alternative de l'œil au cerveau, en plus de la vision, qui régit les interactions complexes entre les fonctions biologiques et des stimuli externes (CIE, 2004). Les recherches médicales et biologiques récentes ont prouvé que la lumière du jour, autre que la fourniture d'une stimulation visuelle, a également un effet non-visuel important sur la plupart des processus biologiques du corps (Veitch, 2005). Cependant, la pratique actuelle pour la conception de l'éclairage dans les bâtiments est encore liée à des critères absolument visuels se rapportant uniquement à la tâche d'éclairage et à la luminance. Pour améliorer la durabilité des environnements construits, garantir des économies d'énergie et promouvoir la santé et le bien-être de des occupants, les critères du confort visuel doivent être étendus à des facteurs non-visuels qui touchent l'aspect biologique et psychologique de la lumière.

3.2.2. a. Les aspects biologiques

La lumière a des effets qui sont entièrement ou partiellement séparés du système visuel appelés effets biologiques de la lumière et sont liés à la photo réception circadienne humaine (Brainard et al., 2001 ; Cajochen et al., 2005). Boyce et al. (2003) ont reconnu trois voies par lesquelles les signaux lumineux interagissent avec les fonctions humaines : visuel, circadiens et perceptives. Lorsque la lumière passe à travers l'œil, ses signaux sont effectués non seulement pour les principales zones visuelles, mais aussi pour les parties du cerveau responsables de la régulation hormonale. Le rayonnement visible résulte donc des stimuli impliquant l'ensemble des aspects physiques (échanges énergétiques), physiologiques (transformation des flux énergétiques en stimuli nerveux) et psychologique (interprétations du cerveau de ces stimuli) et les aspects qui informent le corps et l'esprit sur les caractéristiques de l'environnement proche et contribuent au métabolisme biologique de l'organisme humain. Autre que la simple fourniture d'informations visuelles, une lumière adéquate reçue au cours de la journée permet de synchroniser l'horloge circadienne, stimulant la circulation, ce qui augmente la production de vitamine D, la régulation du métabolisme des protéines en contrôlant le niveau d'hormones. L'horloge biologique humaine entraîne les rythmes les plus quotidiens dans la physiologie et le comportement d'une personne. Il transmet des informations qui régularisent pratiquement toutes les sécrétions hormonales, y compris l'hormone de mélatonine pinéale nocturne, de sérotonine et le cortisol. Il est prouvé que la lumière de courte longueur d'onde est la plus efficace dans la régulation de l'horloge biologique (Brainard et Hanifin, 2006 ; Wright et al., 2001 ; Thapan et al., 2001). Le cortisol et la mélatonine jouent un rôle fondamental dans la régulation du niveau de vigilance et de sommeil et de contrôle de la quantité de sucre dans le sang et par conséquent, la disponibilité d'énergie pour exécuter une activité donnée. Les niveaux de cortisol augmentent le matin avec l'exposition à la lumière du jour puis, pendant la journée, diminuent progressivement atteignant un minimum vers minuit. A l'inverse, la mélatonine diminue le matin et s'élève la nuit (Van Bommel et Van Den Beld, 2004). Une autre hormone liée à la lumière est la sérotonine. Lorsque les niveaux de mélatonine augmentent, les niveaux de sérotonine diminuent. L'exposition à des niveaux élevés de lumière abaisse les niveaux de mélatonine et conduit à la sécrétion de la sérotonine. Les employées qui travaillent près d'une fenêtre avaient des niveaux plus élevés de cortisol le matin pendant l'été que pendant l'hiver (Erikson et KOller, 1983). En outre, concernant le comportement, des valeurs élevées de cortisol du matin ont été associés à une inclinaison vers la sociabilité, tandis que les valeurs modérées ou faibles de cortisol semblent favoriser la concentration individuelle (Koller et

Lindsten, 1992). Pendant près de deux siècles de recherche en ophtalmologie, l'ensemble de ces processus ont été attribués au rôle des deux seuls photorécepteurs de l'œil humain : les cônes (sensibles à la lumière) et les bâtonnets qui régularisent l'information visuelle dans un environnement sombre. Lorsque la lumière atteint ces cellules, une réaction chimique se produit qui détermine les impulsions électriques à envoyer par une voie nerveuse au cortex visuel situé à l'arrière du cerveau où ces impulsions sont interprétées comme vision. Cependant, de nouvelles études ont montré que les processus biophysiques qui régissent la régulation circadienne sont très différents de ceux qui régissent les effets visuels. La découverte d'un troisième photorécepteur, qui sont des cellules rétinienne ganglionnaires (ipRGC) en 2002, a suscité un intérêt énorme à la fois dans la biologie circadienne et les milieux de recherche d'éclairage (Berson et al., 2002). Cette cellule semble être le principal responsable de la régulation des processus métaboliques biologiques non-visuels. Une autre recherche effectuée par Aries et al. (2005) implique que la distribution spatiale verticale du signal lumineux est également un facteur important pour la stimulation biologique. Les valeurs de l'éclairement rétinien sont cependant supposées être situées entre 1500 et 2000 lux, donc d'un ordre de grandeur beaucoup plus élevé que l'éclairement recommandé pour les espaces de travail intérieurs (allant généralement de 300 à 750 lux à la tâche et correspondant à environ 100-200 lux à l'œil, bien qu'il n'y ait pas de proportionnalité directe entre l'éclairement horizontal et vertical). De plus, la dynamique de l'éclairage en termes d'intensité et de composition spectrale pendant la journée semble jouer un rôle important pour entraîner des rythmes corporels et pour la production métabolique d'hormones (Aries et al., 2005). Les effets biologiques de la lumière et leurs effets sur la performance humaine ne sont pas encore bien connus. Des recherches consistantes sont encore nécessaires avant que nous puissions comprendre les effets non visuels de la lumière et en tenir compte dans la pratique de l'éclairage pour générer une meilleure compréhension de l'interaction entre les effets de différents aspects de l'éclairage sur le comportement humain et les tâches visuelles.

3.2.2. b. Les aspects psychologiques

L'environnement lumineux est observé à travers les yeux, mais le traitement des informations recueillies se fait au niveau du cerveau. Les scènes lumineuses produites sont donc jugées dans le cadre de références et des attentes. L'environnement lumineux peut être bien apprécié de plusieurs façons (plus ou moins agréable, plus ou moins attrayant, plus ou moins approprié à la fonction de l'espace,...etc.). Les variations de luminance et de couleurs peuvent renforcer l'attractivité, déclencher des émotions et affecter notre humeur ; l'impact de la lumière du jour

est relatif aux individus et à leur état d'esprit. Un éclairage qui ne répond pas aux attentes de l'utilisateur peut être considéré comme inacceptable même s'il fournit de bons niveaux d'éclairage nécessaires pour exécuter une tâche visuelle donnée ce qui peut avoir un impact sur la productivité (Boyce, 2003 ; Gligor, 2004). En outre, nos mécanismes de réaction dans des circonstances d'éclairage naturel sont compliqués par le fait que les effets de la lumière du jour n'affectent pas seulement notre performance visuelle. Gibson (1966) a défini trois niveaux de stimulation : optique, mécanique et chimique. Notre régulation hormonale, la chaleur du soleil et la nécessité psychologique d'avoir des vues vers l'extérieur affectent toute notre émotion, notre perception et même notre comportement (Boubekri, 2008). Le rôle de la lumière varie avec l'activité déroulée, l'orientation de la pièce, l'emplacement des fenêtres et des portes et l'agencement des meubles. Toutes ces composantes architecturales sont liées entre elles. La lumière naturelle devient donc un facteur actif qui interagit avec nos activités, affectant par conséquent notre degré de confort et nos attitudes. Certains chercheurs d'éclairage doutent que les conditions d'éclairage ont des effets puissants sur les comportements complexes tels que l'exécution des tâches, et ils soutiennent que ce qui explique la rareté des effets (Boyce, 1996). Neeman (1984) révèle, dans une expérience faite sur des employés de bureau, une corrélation entre la lumière du jour, la satisfaction et la productivité des travailleurs. La complexité de l'environnement de travail doit être considérée en termes de complexité de la vue (contact avec l'extérieur), ainsi que celui du niveau de l'éclairage disponible. Goodrich (1979) a montré que les gens travaillant près de la fenêtre ont évalué positivement la qualité de l'éclairage par rapport à ceux installés loin des fenêtres. De plus, les travailleurs soumis à des facteurs de stress qui peut disparaître rapidement lorsqu'il est fourni avec une vue de l'environnement naturel. Pour profiter au maximum, la vue devrait inclure le mouvement d'horizon spectacle qui change au fil du temps. Il est indiqué dans la plupart des recherches existantes sur l'utilisation des fenêtres que le but principal des fenêtres consiste à créer un sentiment de connexion entre l'intérieur et l'extérieur. Ces résultats appuient la thèse que les gens, en général, ne sont pas sensibles à leur environnement visuel que s'il est mauvais (Hopkinson & Bradley, 1965). Une fois l'exigence de confort minimal est atteinte, les gens peuvent ne pas être en mesure de préciser les différents degrés de confort. En d'autres termes, il est facile de faire la différence entre satisfaisante et non satisfaisante mais il est difficile de faire la différence entre les degrés de satisfaction.

3.3. Les outils de conception de la lumière du jour

Dans le passé, la conception de l'éclairage naturel a été fondée sur les attentes des clients et de l'expérience du concepteur. Des méthodes simples ont été introduites qui étaient principalement

impliquées avec la quantité de lumière comme une solution d'ingénierie. Le recours continu à l'éclairage naturel et l'augmentation de la consommation de l'énergie pour l'éclairage ont conduit les spécialistes à introduire des méthodes mathématiques comme une tentative pour augmenter les performances de l'éclairage naturel. Le confort visuel est assuré lorsque la quantité d'éclairement présente dans un espace est suffisante pour accomplir une tâche déterminée sans avoir de gêne pour l'œil humain. Cette gêne peut être le résultat d'un niveau d'éclairement qui n'est pas adapté à la tâche, de l'éblouissement ou d'une composition d'une lumière qui n'est pas compatible avec le niveau d'éclairement et l'activité. Afin de répondre aux exigences du confort visuel et de l'ambiance lumineuse, le designer, au cours de sa conception, fait recours à différentes méthodes et outils afin de prédéterminer l'éclairage d'un espace qui varient entre des mesure sur site, de nombreux types de formules mathématiques, les types de modèles réduits et des logiciels de simulation.

3. 3. 1. Les mesures sur site

Les mesures sur site sont un outil facile et simple à utiliser et permet d'étudier qualitativement et quantitativement la lumière dans un espace. Elles permettent de caractériser l'ambiance intérieure et d'obtenir les vraies valeurs d'éclairement, de luminance, etc... Pour effectuer des mesures sur site, il faut qu'on soit équipé du matériel adéquat. Cet outil offre la possibilité de combiner des études d'éclairage naturel et d'autres artificiels. Le choix de cet outil peut être compris entre deux limites, ces mesures ne peuvent être réalisées qu'après la construction du bâtiment et qu'elles dépendent fortement des conditions climatiques.

3. 3. 2. Les méthodes de calcul simplifiées

Les méthodes de calcul simplifiées sont des outils qui permettent la prédétermination de la lumière naturelle. Ces méthodes se présentent sous forme d'algorithmes simplifiés, de tables, de nomogrammes, de diagrammes, ... et sous forme informatique ou sous format papier. Ils sont utilisés pour le calcul des grandeurs photométriques tels que l'éclairement, le facteur de lumière de jour, ... etc. La commission internationale de l'éclairage a développé à l'aide des formules et des abaques une méthode pour pouvoir estimer le FLJ à l'intérieur d'un local sous des conditions de ciel couvert. Ces méthodes permettent d'estimer l'éclairement intérieur sous une distribution théorique des luminances du ciel conforme au modèle du ciel couvert. Les résultats de calcul sont présentés sous forme des valeurs ponctuelles ou des valeurs moyennes de FLJ tout en utilisant des coefficients de correction pour tenir compte de certains paramètres tels que la transparence et la propriété du vitrage ou la présence des obstructions extérieures. Les méthodes de calcul simplifiées sont généralement utilisées par les concepteurs dans la

première phase d'esquisse d'un projet d'éclairage dans le but d'obtenir des valeurs approximatives d'éclairage. Elles trouvent leurs limites dès que se présentent des besoins de visualisation de l'ambiance intérieure et dans des situations d'éclairage complexes. Différentes méthodes simplifiées permettent de calculer l'éclairage intérieur, on trouve, les diagrammes de Waldram, la méthode BRS, la norme NBN L 13-002 et la norme NBN L 14-002/A1.

3.3.3. Les modèles numériques (logiciels informatiques)

Pendant ces dix dernières années, le domaine informatique a connu un progrès important, ce qui a donné naissance à des nouveaux programmes de simulation qui ont touché le domaine du bâtiment, où les architectes ont commencé à utiliser ces multiples logiciels pour la prédétermination de la lumière naturelle dans leurs projets. Ces outils informatiques sont de deux catégories basées sur deux méthodes de calcul différentes : la technique de la radiosité et la méthode du lancer de rayon inverse. La méthode de la radiosité traite les échanges radiatifs entre des surfaces parfaitement diffusantes formant un espace clos. Les logiciels basés sur cette méthode traitent généralement des volumes simples éclairés par des ouvertures rectangulaires où les calculs ne tiennent pas compte des surfaces spéculaires ni de l'aspect spectral du phénomène lumineux. Alors que la méthode du lancer de rayon inverse tient compte de tous les phénomènes optiques qui peuvent être exprimés analytiquement par des équations physiques. Elle peut intégrer des matériaux spéculaires, semi-spéculaires, diffus, réfractant ou translucides. Cette méthode peut simuler de manière efficace des textures non-homogènes et des surfaces infiniment petites. Le bon exemple de logiciel utilisant cette méthode de calcul de propagation de la lumière est Radiance. Cependant, ces programmes demandent en général un temps d'apprentissage assez long, une certaine expérience et un temps de calcul relativement long. Ces logiciels requièrent également une description détaillée de tous les éléments de l'espace à modéliser et ne sont donc pas applicables au stade de l'esquisse ou de l'avant-projet.

3.3.4. Les modèles réduits

L'estimation de l'éclairage naturel sur un modèle réduit nécessite la disponibilité des instruments spécifiques tels que les ciels et soleils artificiels. Dans les études de l'éclairage basées sur une approche qualitative, cette méthode permet de visualiser la distribution de lumière dans un espace et de faire une évaluation comparative de différentes interventions. Actuellement, et après le développement des techniques et des technologies liées à la lumière et à l'image, l'utilisation de la maquette en architecture a dépassé ce stade. Elle est devenue un outil efficace permettant d'étudier le confort visuel et de réaliser même la conception de l'éclairage, ce qui a donné naissance à trois types de maquettes, nous trouvons des maquettes

sous ciel artificiel, l'Héliodon et des prototypes de taille réelle. Ainsi, selon la phase de la conception, on utilise différents types de modèles : des modèles de masse qui permettent d'étudier le soleil disponible en fonction du site, de la localisation du bâtiment et de son orientation, des modèles permettant d'étudier les performances du bâtiment, comme, par exemple, la pénétration de lumière du jour et sa distribution, les niveaux de luminance, l'éblouissement et les contrastes et enfin, des modèles étudiant les ouvertures, le vitrage, le système d'ombrage, les éléments directionnels, etc....

3. 4. Les méthodes de calcul de la distribution lumineuse intérieure

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la distribution de la lumière du jour dans un environnement construit. Les méthodes varient de la simple méthode de calcul du facteur de lumière de jour aux méthodes d'algorithmes complexes tels que le tracé de rayon et la radiosité.

3. 4. 1. La méthode de lancer de rayon (Ray-tracing)

A l'origine, les méthodes de simulation par lancer de rayon ont été développées pour la création d'images de synthèse, elles se basent sur le calcul des trajectoires d'un nombre important de rayons lumineux dans une scène. Si l'interface du logiciel le permet, cette technique autorise des simulations pour des configurations géométriques complexes incluant des composants modélisés avec beaucoup de détails comme elle peut les transformer en des formes plus simples. Contrairement à la méthode de radiosité, cette technique de simulation ne requiert pas la réalisation d'un maillage de division pour l'ensemble des surfaces de la scène. Les phénomènes optiques qui sont rendus par le moteur de lancer de rayons sont la réflexion, la réfraction et les ombres. Si la surface d'un objet est réfléchissante, l'algorithme doit non seulement calculer la valeur de l'éclaircissement de la surface, mais aussi ajouter les reflets des autres objets de la scène. Pour se faire, il suffit uniquement de connaître l'angle auquel part le rayon réfléchi, puis de lancer un nouveau rayon dans cette direction pour déterminer ce qui se reflète. La réfraction permet de prendre en compte la transparence des objets de la scène. Un rayon qui vient frapper un objet transparent va être dévié en fonction de l'indice de réfraction du matériau de cet objet, mais aussi de celui du matériau d'où arrive le rayon. Avec des algorithmes informatiques et la puissance du processeur, chaque rayon interagit par des phénomènes optiques avec les différentes surfaces du modèle. Deux approches sont possibles : le rayon est suivi depuis la source de lumière jusqu'à ce qu'il atteigne le point d'observation (lancer de rayon direct) ou bien le rayon de lumière est tracé depuis le point d'observation et suivi jusqu'à ce qu'il atteigne une source de lumière en essayant de la retracer (lancer de rayon inverse). Le lancer de rayon inverse offre l'avantage de réduire le nombre de rayons à tracer puisque seuls ceux qui

atteignent le point d'observation sont calculés. Par conséquent, un nombre limité des rayons lumineux réfléchis de manière diffuse entre les surfaces du modèle est calculé. Ainsi, en fonction des paramétrages utilisés, ces inter-réflexions diffuses ne sont pas toujours évaluées avec autant de précision. Cette méthode est moins performante lorsque des sources lumineuses fortement masquées sont utilisées. Il est toutefois possible de modéliser des surfaces ayant des modes de réflexion ou de transmission spéculaire, semi-spéculaire ou diffuse ainsi que des effets de réfraction, à condition qu'une expression analytique permette de décrire ces propriétés.

Le programme de Radiance utilise la technique de lancer de rayons (Ruck et al., 2000). Il peut utiliser une interface d'un programme de CAO et avec un dessin détaillé d'un bâtiment, il peut simuler une image réaliste à l'intérieur du modèle à partir d'une vue donnée. Cette méthode est précise et illustre la distribution de la lumière du jour dans les bâtiments mais la complexité des paramétrages et le temps de calcul relativement long sont les principaux désavantages de cette technique.

3.4 .2. La méthode de Radiosité

La méthode de radiosité est souvent utilisée dans le programme de simulation par ordinateur. Le procédé est mis au point à partir de la théorie de l'échange de rayonnement thermique entre les surfaces. Avec cette méthode, l'espace est divisé en une grille d'éléments. Chaque élément de la pièce est considéré comme réflecteur, ce qui signifie qu'il a une luminance constante indépendamment de la direction d'observation. Par conséquent chaque élément reçoit et reflète la lumière vers l'espace. L'éclairement de chaque point du maillage est déterminé en additionnant les flux lumineux reçus depuis toutes les surfaces environnantes et la lumière émise par la surface élémentaire. Cette méthode est moins précise que la méthode de lancer de rayon, mais le temps de calcul est plus court. Les surfaces qui reflètent la lumière dans toutes les directions sont supposées être parfaitement diffusantes (loi de Lambert). En définissant la fenêtre en tant que source de lumière, la distribution de la lumière du jour dans une pièce peut être calculée à partir des inter-réflexions entre les surfaces définissant l'espace architectural.

Dans la pratique, cette méthode de simulation est principalement utilisée par les logiciels développés pour la conception et le calcul de l'éclairage artificiel comme Dialux, Relux, ... etc. Parasol et Lights cape sont aussi des programmes qui utilisent cette technique (Bülow-Hübe, 2001). Ces applications informatiques intègrent, dans leurs versions récentes, la possibilité d'évaluer l'apport d'éclairage naturel, indépendamment ou en combinaison avec un système d'éclairage artificiel. Mais, vu les contraintes de cette méthode pour l'étude de l'éclairage naturel, ces outils ne devraient être utilisés que pour des configurations relativement simples.

3. 5. Les indicateurs de la performance de l'éclairage intérieur

3. 5. 1. Le Facteur de lumière du jour (FLJ)

Le Facteur de Lumière de jour ou Factor Méthode (FLJ) est défini comme le rapport de l'éclairement d'un point reçu, directement ou indirectement, sur un plan horizontal sous un ciel de distribution lumineuse connue ou présumée sur un plan horizontal dans un site parfaitement dégagé (Longmore, 1968). Le FLJ est une valeur relative qui est exprimée en pourcentage, il représente la mesure la plus couramment utilisée dans les études d'éclairage naturel. Il est utile parce que même si le niveau absolu de la lumière disponible à l'extérieur pourrait changer radicalement, le facteur de lumière du jour pour un moment donné de la journée et de l'état du ciel reste assez constant (Schiller et Jaypee, 2001). Le FLJ est généralement mesuré dans un état de ciel couvert, donc la lumière solaire directe est exclue. Sous les conditions du ciel couvert (ciel normalisé par la Commission Internationale de l'Éclairage), les valeurs du FLJ sont indépendantes de l'orientation des baies vitrées, de la saison, de l'heure et de jour. Plus le facteur de lumière du jour est élevé, plus le temps d'utilisation des locaux avec la lumière naturelle est élevé, limitant ainsi la consommation d'éclairage artificiel. Elles donnent ainsi une mesure objective et facilement comparable de la qualité de l'éclairement intérieur d'un bâtiment. La mesure de FLJ se fait à l'aide de Luxmètres et les résultats devraient être enregistrés simultanément. Dans le cas de la disponibilité d'un seul photomètre, il est préférable de prendre une mesure moyenne de l'éclairage extérieur, avant et après la prise de série de mesure à l'intérieur, à condition que la variance ne dépasse pas 10 %. Le FLJ peut également être estimé à l'aide de trois composants : Composant du Ciel (CC), Composante Réfléchie Extérieure (CRE) et Composante Réfléchie Intérieure (CRI). Ces composantes peuvent être calculées à l'aide de divers outils tels que le rapporteur, les tables, l'abaque, les diagrammes et les graphiques. Les outils les plus couramment utilisés sont le rapporteur BRS pour le CC et CRE et l'abaque pour la IRC (Longmore, 1968; Lim et al, 1979; Szokolay, 1980; Denan, 1999).

3. 5. 2. L'Eclairement Utile (EU)

L'éclairement réel qui atteint le plan de travail présente de grandes variations à la fois spatiales et temporelles. L'éclairement, à un point, peut varier considérablement d'un moment à l'autre en raison de changement de la position du soleil et / ou des conditions de ciel. La conception d'un éclairage uniforme sous des conditions de ciel couvert est inapplicable pour des conditions réalistes où la contribution de la lumière directe du soleil présente des grandes différences entre les niveaux maximales et minimales d'éclairement. Par conséquent, toute mesure proposée, qui est calculé pour tenir compte le changement des valeurs d'éclairement en

temps réel, doit répondre à une large gamme de niveaux de lumière naturelle. Cela peut être réalisé au mieux en abandonnant la notion de seuil d'éclairement, soit la valeur de 500 lux. La notion de l'éclairement Utile (EU) a été proposée en 2006 par Nabil et Mardaljevic. C'est une métrique de la performance dynamique de la lumière du jour basée également sur l'éclairement du plan de travail. L'éclairement utile est défini comme des valeurs/des niveaux d'éclairements qui entrent dans une gamme de 100 à 2000 lux. La gamme utilisée pour définir les limites de l'éclairement utile est fondée sur un examen exhaustif des données les plus récentes des études sur terrain sur le comportement des occupants dans des conditions d'éclairage naturel différentes. La méthode propose que si l'éclairement est trop faible, au-dessous du minimum, il peut ne pas contribuer à la perception de l'environnement visuel ou à l'exécution des tâches visuelles. Inversement, si l'éclairement de la lumière du jour est trop élevé, est au-dessus de maximum, il peut générer l'inconfort visuel ou thermique, ou les deux. L'EU vise à déterminer quand les niveaux de lumière du jour sont 'utiles' pour l'occupant, cette méthode est appliqué par la détermination de l'occurrence de la lumière du jour lorsqu'elle est dans l'intervalle défini comme utile (200-2000 lx), au-dessous de la plage utile (inférieure de 200 lux) ou dépasse la plage utile (supérieure à 2000 lux). Cependant, Nabil et Mardaljevic (2006) ont affirmé que les valeurs d'éclairement se situant au-dessous ou au-dessus de la gamme de l'éclairement utile peuvent varier selon les différents enquêteurs et les différentes régions en fonction de leurs interprétations (utile). Ko et al (2008) ont souligné que la gamme entre 200-1000 lux est l'éclairement le plus désiré. Li (2007) a également examiné le niveau d'éclairement supérieur à 1 000 lux. De son point de vue la valeur de 2 000 lux est toujours considérée comme valeur acceptée pour l'œil humain, mais elle entraînerait plus de gain de chaleur et donc de surchauffe. Une autre classification plus détaillée des plages de l'EU, basée sur la précédente, se résume comme suit :

- Les niveaux d'éclairement inférieurs à 100 lux sont généralement considérés comme insuffisants, soit d'être la seule source d'éclairage ou de contribuer significativement à l'éclairage artificiel.
- Les niveaux d'éclairement se situant dans la gamme de 100 lux à 500 lux sont considérés comme efficaces soit comme seule source d'éclairage ou en conjonction avec un éclairage artificiel.
- Les niveaux d'éclairement se situant dans la gamme de lux 500 lux à 2000 sont souvent perçus soit comme souhaitables ou au moins tolérables.
- Les niveaux d'éclairement supérieur à 2000 lux sont susceptibles de produire l'inconfort visuel ou thermique, ou les deux.

La méthode de l'EU est à la fois informative et simple et qui prend en considération le facteur humain, elle donne une indication pour les hauts niveaux d'éclairement qui sont liés à l'éblouissement d'inconfort et les gains de chaleur. De plus, elle fournit un mécanisme efficace pour signaler la zone dans un bâtiment dans lequel un dispositif d'ombrage est nécessaire. Les valeurs élevées d'EU pourraient contribuer à une faible consommation d'énergie pour l'éclairage et même pour le refroidissement, mais l'augmentation de l'autonomie de l'éclairage ne signifie pas l'absence des problèmes thermiques et visuels (Nabil et Mardaljevic, 2006).

3. 5. 3. Les indices d'éblouissement

L'étude des effets de l'éblouissement sur les humains peuvent être faites selon des critères d'une part, physiologiques qui se réfèrent à la mesure de la réponse physique d'une personne et d'autre part, psychophysiques qui sont liés aux facteurs extérieurs mesurables dont les indices d'éblouissement (DGI, VCP, UGR, CGI, DGP). Les sensations subjectives de l'éblouissement sont généralement liées à des quantités numériques (Wienold et Christoffersen, 2006). Bellia et al en 2008 ont développé une formule mathématique (3.2) permettant de calculer ce phénomène :

$$G = 0.48 * [L_s^{1.6} * \Omega^{0.8}] / [L_b + (0.07 \omega^{0.5} L_w)] \quad (3.2)$$

Où : G est l'éblouissement, L_s est la luminance de chaque partie de la source [cd / m²], L_b est la luminance moyenne des surfaces situant dans le champ de vision [cd / M²f], L_w est la luminance moyenne pondérée de la fenêtre en fonction des zones relatives du ciel, de l'obstruction, et de la masse [cd / m²], ω est l'angle solide de la fenêtre [sr], et Ω est l'angle solide de la source, modifiés en fonction de la ligne de visée. Hopkinson en 1957 a développé la première formule utilisée pour calculer le Daylight Glare Index (DGI) qui représente l'indice d'éblouissement d'inconfort qui provient d'une grande source. Ces valeurs sont situées entre 16 et 30 et classées en huit degrés selon le tableau 3.4.

Tableau 3.5 : Les critères de l'éblouissement pour le DGI (Source : Bellia et al. 2008)

Degrés de perception de l'éblouissement	DGI
Juste imperceptible	16
Visible	18
Juste acceptable	20
Acceptable	22
Juste inconfortable	24
Inconfortable	26
Juste intolérable	28
Intolérable	30

Le Visual Comfort Probability (VCP) est une autre méthode élaborée par Guth en 1963, elle correspond au pourcentage d'observateurs qui jugeraient que l'environnement lumineux considéré est acceptable. Les valeurs prises par le VCP sont comprises entre 18 et 85. De plus, la CIE (1995) et Sorensen (1987) ont développé un indice nommé Unified Glare Rating (UGR) dont ces valeurs de référence sont comprises entre 10 et 30. Il est à noter que toute valeur d'UGR inférieure à une unité ne soit pas détectable et dans le cas d'une valeur supérieure à cette gamme, la méthode n'a pas été validée par d'autres études. En outre, le CIE Glare Index (CGI) a été développé à partir d'une formule proposée par Einhorn (1969) et ces valeurs se trouvent dans un intervalle compris entre 10 et 30. Et dans le but d'améliorer les limites des indices précédents, Wienold et Christoffersen en 2006 ont développé le Daylight Glare Index Probability (DGP). Cette méthode tente de définir la probabilité qu'une personne à être éblouie par une source lumineuse donnée.

3. 5. 4. LIDC

La courbe de la distribution de l'intensité lumineuse (LIDC) est établie pour illustrer la distribution de l'intensité de la lumière des sources lumineuses. Les intensités sont cartographiées sur des angles horizontaux ϕ (plan 'C') et d'autres verticaux θ soit absolue ou relative pour un flux lumineux de 1000 lumens. Les valeurs de l'intensité lumineuse mesurées d'une source lumineuse ponctuelle, dans toutes les directions, sont renvoyées à l'espace à partir de la source sous forme de rayons-vecteurs. En liant les extrémités de points, nous obtenons une surface de luminance photométrique. Dans les calculs, il est généralement suffisant de savoir que certaines coupes de cette surface 3D, principalement dans les plans de coupe passant par la source lumineuse. De cette manière, nous obtenons des lignes (courbes d'éclairage) en coordonnées polaires comme il est illustré dans la figure 3.3.

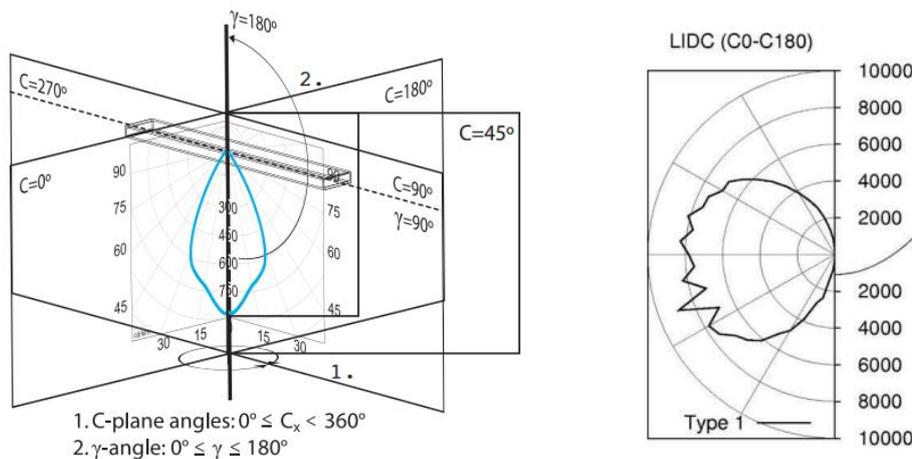


Figure 3.3 : A gauche, Plans photométriques pour la construction d'une LIDC (Source : <http://www.ledacademy.net/wp-content/uploads/2015/03/lesson2.pdf>) ; A droite, LIDC d'un type de plafond anidolique (Source : Wittkopf et al, 2010)

3. 5. 5. L'autonomie de l'éclairage (DA)

Le Daylight Autonomy ou l'autonomie de la lumière de jour est une notion par laquelle nos besoins en matière d'éclairage naturel sont maximisés tout en minimisant ou en éliminant le besoin de lumière électrique d'appoint. Mathématiquement, cette notion représente le pourcentage d'heures d'utilisation de la totalité ou de la partialité des besoins en lumière du jour d'un bâtiment. Elle est généralement donnée comme une valeur annuelle mais les présentations saisonnières, mensuelles et quotidiennes peuvent être faites. En 1989, cette notion a été mentionnée dans une norme suisse 'Association Suisse des Électriciens' qui avait disparu par la suite jusqu'à 2001 lorsque Reinhart et Walkenhorst avaient proposés cette métrique pour remplacer le facteur de lumière du jour (FLJ) car ce dernier avait eu beaucoup de limitations. La procédure de calcul de l'autonomie de l'éclairage consiste à déterminer le niveau d'éclairement horaire dans un point d'un local durant toute l'année. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut être utilisée pour évaluer la performance d'une conception en termes de la quantité de lumière de jour qu'elle fournit et par conséquent, elle permet d'estimer les économies électriques liées à l'éclairage de cette conception en fixant un seuil d'éclairement (lux) selon une activité donnée et en fonction de critères d'éclairage électrique. Si un espace nécessite un éclairement minimal de 200 lux sur le plan de travail, toute heure qui ne fournit pas au moins 200 lux compte comme 0 % d'autonomie et chaque heure qui dépasse 200 lux compte comme 100 % d'autonomie "Reinhart et Walkenhorst (2001). A la différence du FLJ, l'autonomie de la lumière du jour prend en considération toutes les conditions du ciel au cours de toute l'année. Il peut fonctionner très efficacement pour détecter les espaces ayant un bas niveau d'éclairement. Cette notion présente quelques limitations, elle ne permet pas d'identifier les zones ayant de problèmes de conception spécifiques et qu'elle ne présente aucune limite extrême pour alerter la surexposition des zones aux problèmes d'éblouissement, elle donne la valeur de 100 % pour tout point qui dépasse un certain seuil (300 lux par exemple). En outre, cette méthode donne du crédit au point lorsqu'il dépasse le seuil défini par l'utilisateur et ne permet pas d'avoir un crédit partiel pour les niveaux l'éclairement en dessous de ce seuil ce qui peut entraîner une surestimation de la consommation de l'éclairage électrique pour les dispositifs d'éclairage muni d'un système de contrôle.

Conclusion

A travers cette revue de la littérature, on peut dire qu'il y a plusieurs questions qui doivent être prise en compte par le concepteur d'éclairage dans la conception des bureaux. Nombreux facteurs physiques, physiologiques et psychologiques peuvent influencer la perception de la qualité de l'éclairage. La relation la plus évidente entre la lumière du jour et les êtres humains est le rythme diurne. L'éclairage naturel améliore notre santé en alimentant le processus métabolique et stimulant les fonctions biologiques essentielles dans le cerveau. La qualité de la lumière peut être jugée en fonction du niveau de confort visuel et des performances requises pour nos activités. Ceci représente l'aspect visuel. Elle peut également être évaluée sur la base de la satisfaction de l'environnement visuel et son adaptation au type de l'espace et de l'activité. Ceci représente l'aspect psychologique. La conception d'un environnement lumineux satisfaisant et plaisant pour l'usage des bureaux nécessite d'appliquer les normes recommandées pour le niveau d'éclairement qui doit être compris entre 300 et 500 lux sur un plan de travail situé au moins à 0.8 m au sol. De plus, il faut assurer une certaine uniformité de luminance, d'une part, entre le champ visuel en position de travail et au repos et d'autre part, entre les différentes surfaces voisines. Les niveaux d'éclairement conseillés doivent être nuancés en fonction du contraste de luminance entre l'élément observé et son arrière-fond. Les recommandations typiques supposent un rapport de 1:3 entre la tâche visuelle et son environnement immédiat, un rapport de 1:10 entre la tâche visuelle et d'autres surfaces plus proches dans le champ visuel, et un rapport de 1:20 pour les surfaces les plus éloignées du champ visuel. Un rapport 1:40 entre la tâche et toutes les surfaces dans le champ de vision est généralement considéré comme la valeur maximale admissible. Les recherches confirment qu'un bon contraste de luminosité augmente les performances et diminue la fatigue physiologique. L'aspect psychologique se présente sous forme d'expériences, de références et des attentes des personnes vis-à-vis de l'environnement lumineux et qui permettent de juger les ambiances lumineuses produites. Ces dernières peuvent être appréciées de plusieurs façons (plus ou moins agréable, plus ou moins attrayante, plus ou moins appropriée à la fonction de l'espace,...etc.). Les variations de luminance et de couleurs peuvent renforcer l'attractivité, déclencher des émotions, et affecter notre humeur ; l'impact de la lumière du jour est relatif aux individus et à leur état d'esprit.

En outre, l'étude de la lumière naturelle peut être effectuée par plusieurs outils et méthodes. Les simulations informatiques et les modèles réduits ont prouvé leur efficacité pour évaluer l'environnement lumineux intérieur. De plus, les indices de l'éblouissement, l'éclairement utile,

l'autonomie de la lumière de jour et la courbe de la distribution de l'intensité lumineuse sont des indicateurs couramment utilisés pour étudier la performance d'un éclairage intérieur.

On en conclut, que dans la conception d'un éclairage de haute qualité, il est recommandé de bien comprendre les spécificités de l'environnement construit en termes d'espace, d'activité et des exigences visuelles liées à cette dernière. Il est important d'identifier les problèmes liés à l'éclairage intérieur dans les bureaux afin de disposer des procédures adéquates afin de garantir une ambiance lumineuse agréable et favoriser la performance, le confort et l'agrément visuel des employés.

Référence

- Achard, G. (1984). Eclairagisme – Notions fondamentales et matériel d'éclairage, ENTPE, Vaulx-en-Velin, vol.1, 294, ISBN 2-86834-029-9, 1984.
- Aries, M.B.C., Begemann, S.H.A., Zonneveldt, L., & Tenner, A.D. (2005). Retinal illuminance from vertical daylight openings in offices. *Right Light 5. Nice, France*.
- Association Française de l'Eclairage : Recommandations relatives à l'éclairage intérieur des lieux de travail, AFE, 1993.
- Berson, D.M., Dunn, F.A., & Takao, M. (2002). Photo transduction by retinal ganglion cell that set the circadian clock. *Science*, 295, 1070-1073.
- Bjorset, H.H., Frederiksen, E. (1979). A proposal for recommendations for the limitation of the contrast reduction in office lighting. *Proc. of the CIE 19th Session (Kyoto), 1979, pp.310-314*.
- Boubekri, M. (2008). Daylighting, Architecture, and Health: Design Strategies. *Oxford: Architectural Press*.
- Boyce, P. R., & Eklund, N. H. (1995). Evaluating Lighting Quality. *Proc. Of the 3rd European Conf. on Energy-Efficient Lighting (Newcastle upon Tyne, UK, June 95), pp.189-196, 1995*.
- Boyce, P. R. (1996). Numerical Criteria – a help or a hindrance in lighting design: Visual performance criteria. *Proc. of the CIBSE National Lighting Conf. (Bath), pp.62-64, 1996*.
- Boyce, P. R. (2003). Human Factors in Lighting. *2nd ed. London and New York: Taylor & Francis*.
- Boyce, P. R. (1996). Illuminance selection based on visual performance-and other fairy stories.
- Boyce, P.R., Hunter, C., & Howlett, O. (2003). The benefits of daylight through windows. *Troy (NY): Lighting Research Center*.
- Boyce, P.R. (1981). Human Factors in Lighting. *London: Applied Science*.
- Brainard, G.C., Hanifin, J.P., (2006). Photons, clocks, and consciousness. *Journal of Biological Rhythms*, 20 (4), 314-325.
- Brainard, G.C., Hanifin, J.P., Greeson, J.M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E., & Rollag, M.D. (2001). Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *The Journal of Neuroscience*, 21 (16), 6405-6412.
- Building Research Establishment: Office lighting for good visual task conditions, Digest 256, Garston, 1981.
- Bülow-Hübe, H. (2001). Energy-Efficient Window System Effects on Energy Use and Daylight in Buildings. *Division of Energy and Building Design, Lund University, Sweden*
- Cajochen, C., Münch, M., Kobialka, S., Kräuchi, K., Steiner, R., Oelhafen, P., Orgül, S., & Wirz-Justice, A. (2005). High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation,

and Heart Rate to Short Wavelength Light. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 90 (3), 1311-1316.

Chartered Institution of Building Services Engineers, Areas for visual display terminals, ed.: CIBSE, London, 1989.

CIBSE 1997. CIBSE Code for interior lighting 1994: Additions and corrections 1997. ISBN 0 900953 64 0.

CIE (2004). Ocular lighting effects on human physiology and behaviour. *CIE Publ. 158, Vienna*

CIE (1987). CIE/IEC. International Lighting Vocabulary. *CIE 1987; 17: 4.*

CIE (2002). The correlation of models for vision and visual performance. *CIE 2002; 145.*

Commission Internationale de l'Eclairage: Guide on Interior lighting. *CIE 29.2, 1986.*

Commission Internationale de l'Eclairage: Vision and the visual display unit work station. *CIE 60, 1984.*

Denan, Z. (1999). Assessment and modification of daylight prediction and estimation tools for Malaysian practice. *Master Thesis, Universiti Teknologi Malaysia.*

DIN 5035: Part 6, Artificial lighting of interior. *Deutsches Institute fur Normung, Berlin, 1983*

Egan, M. D. (1983). Concepts in Architectural Lighting. *McGraw-Hill Book Company. ISBN 0-07-019054-2.*

Einhorn, H.D. (1969). A new method for the assessment of discomfort glare. *Lighting Research Technology*, 1(4), 235.

EN 12464-1, 2002. Light and lighting – Lighting at work places – Part I: Indoor Work Places. *European Standard. ISBN number: 0580411281.*

Erikson, C., & Kiiller, R. (1983). Non-visual effects of office lighting. *In: CIE 20th Session (Vol.1). Commission Internationale de L'Eclairage, Amsterdam: pp.D602/601-604.*

Figueiro, M., Rae, M. S., & Rae, A. C. (2002). Daylight and productivity: A possible link to circadian regulation. *Research Report, Troy, NY: Rensselaer Politic Institute.*

Fischer, D. (1973). A luminance concept for working interiors, *J.Illum.Eng.Soc*, 2 (2), 92-98.

Gibson, J.J. (1966). The Sense Considered as Perceptual Systems. Boston. *Houghton Mifflin Company.*

Gligor, V. (2004). Luminous environment and productivity at workplaces. *Thesis (Licentiate), Helsinki University of Technology, Espoo.*

Goodrich, R. (1979). How People Perceive Their Office Environment. *New York: Citiban*

Grandjean, E. (1985). Ergodesign. *In Behaviour and Information Technology - BIT*, 4 (1), 75-76.

Groupe d'Etude et de Réalisations pour l'Amélioration des Conditions de Travail : Manuel d'analyse des ambiances lumineuses dans les lieux de travail-Méthode ergonomique, GERACT, Toulouse, P.119, 1984.

Guth, S. K. (1963). A Method for the Evaluation of Discomfort Glare. *Illuminating Engineering, July 1963, Pg. 351.*

Heschong Mahone Group. (2003). Windows and Offices: A Study of Worker Performance and the Indoor Environment. *Sacramento: California Energy Commission.*

Hopkinson, R.G., & Bradley, R.C. (1965). Glare from very large sources. *Journal of the illumination Engineering Society, 55 (5), 228-297*

Hopkinson, R. G. (1960). A study of glare from very large sources. *Illuminating Engineering, 55, 255-294.*

Hopkinson, R. G. (1957). Evaluation of glare. *Illuminating Engineering, 305-316.*

<http://www.ledacademy.net/wp-content/uploads/2015/03/lesson2.pdf>.

IESNA (2000). *The IESNA Lighting Handbook, 9th ed. New York: IESNA (Illuminating Engineering Society of North America).*

IESNA (1993). *Lighting Handbook-Reference & Application, ed.: REA M, IESNA (Illuminating Engineering Society of North America).*

Kiiller, B., & Lindsten, C. (1992). Health and Behavior of Children in Class rooms with and with windows. *Journal of Environmental Psychology, 12, 305-317.*

Ko, D. H., Elnimeiri, M., & Clark, R. J. (2008). Assessment and prediction of daylight performance in high-rise office buildings. The structural design of tall and special buildings. *Build, 17, 953-976.*

Larson, L. (1964). Lighting and its design. *New York: Whitney Library of Design.*

Laura, B., Cesarano, A., Iuliano, G.F., & Spada, G. (2008). DAYLIGHT GLARE: A REVIEW OF DISCOMFORT INDEXES. *Paper presented at visual quality and energy efficiency in indoor lighting: Today for tomorrow, International Workshop, Rome, Italy, March 31, 2008.*

Lechner, N. (1991). Heating, cooling, and lighting, Design Methods for Architects. *New York: John Wiley and Sons.*

Li, H. W. (2006). Daylight and energy implications for CIE standard skies. *Energy Conversion and Management, 48, 745-755.*

Lim, B.P., Rao, K.R., Tharmaratnam, K., & Maltar, A.M. (1979). Environmental Factors in the design of building fenestration. *London: Applied Science.*

Loe, D.L., Rowlands, E. (1996). The art and science of lighting: a strategy for lighting design. *Lighting Research and Technology, 28 (4), 153-164*

Longmore, J. (1968). BRS Daylight Protractors. *Department of the Environment, Building Research Station, London: Her Majesty's Stationery Office.*

Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, 38, 905-913.

Ne'eman, E. (1984). A comprehensive approach to the integration of daylight and electric light in buildings. *Energy and Buildings*, 6(2),97-108.

NF X35-103 : Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail, AFNOR, Paris, 1990.

Pauley, S. M. (2004). Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Medical Hypotheses*, 63, 588-596.

Perry, M.J. (1985). A flexible system for visual performance studies. *Lighting, Research and Technology*, 17 (1), CIBSE..

Rea, M.S., & Ouellette, M.J. (1991). Relative visual performance: a basis for application. *Lighting Research and Technology*, 23(3), 135-144.

Reinhart, C. F., & Walkenhorst, O. (2001). Dynamic RADIANCE-based Daylight Simulations for a full-scale Test Office with outer Venetian Blinds. *Energy & Buildings*, 33(7), 683-697.

Ruck, N., Aschehoug, O., Aydinly, S., Christoffersen, J., Courret, G., Edmonds, I., Jakobiak, R., Kischkoweit-Lopin, M., Klinger, M., Lee, E., Michel, L., Scartezzini, J.-L. & Selkowitz, S. (2000) Daylighting in Buildings. *A Source book on Daylighting Systems and Components, International Energy Agency (IEA) Task 21. Solar Heating and Cooling Programme, Energy Conservation in Buildings & Community System Lawrence Berkeley National Laboratory, California.*

Scartezzini, J. L. (1994). Eclairage des bureaux. *Publ. Ravel, 108p., ISBN 3-905233-44-4, 1994.*

Schiler, M., and Japee, S. (2001). Vital signs: Interior Illuminance, daylight controls and occupants response, vital signs.

Sorenson, K. (1987). A modern glare index method. *In: Proceedings CIE 21st Session. 1987; Venice. Paris: CIE.*

Stein, B. (2006). Mechanical and electrical equipment for buildings. *Hoboken, N.J.: Wiley, 2006.*

Szokolay, S.V. (1980). Environmental science handbook for architect and builders. *London: The Construction Press.*

Thapan, K., Arendt, J., & Skene, D.J. (2001). An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *The Journal of Physiology*, 535 (1), 261- 267.

Van Bommel, W.J.M., & Van den Beld, G.J. (2004). Lighting for work: a review of visual and biological effects. *Lighting Research and Technology*, 36 (4), 255-269.

Veitch, J. A., & Newsham, G. R. (2000). Preferred luminous conditions in open-plan offices: Research and practice recommendations. *Lighting Research and Technology*, 32, 199-212

Veitch, J.A. (2005). Light, Lighting and Health. Issues for Consideration. *Leukos*, 2 (2), 85-96.

Veitch, J.A., & Newsham, G.R. (1998). Determinants of lighting quality I: State of the Science. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 27 (1), 92-106.

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.

Wittkopf, S.K., Grobe, L.O., Geisler-Moroder, D., Compagnon, R., Kampf, J., Linhart, F., & Scartezzini, J.L. (2010). Ray tracing study for non-imaging daylight collectors. *Solar Energy*, 84, 986-996.

Wright, H.R., Lack, L.C., & Partridge, K.J. (2001). Light emitting diodes can be used to phase delay the melatonin rhythm. *Journal of Pineal Research*, 31, 350-355.

CHAPITRE 4

LA MÉTHODOLOGIE

Introduction

Le comportement d'une personne vis-à-vis de l'environnement lumineux est fortement lié à des facteurs multiples qui affectent son appréciation. Ces facteurs peuvent être externes qui tiennent en considération l'environnement physique et contextuel et d'autres facteurs internes liés à la psychologie, à la physiologie et à la culture de la personne. Les informations que nous recevons à partir de l'environnement externe affectent notre appréciation et notre comportement qui provoquent des sensations différentes selon les conditions de l'atmosphère lumineuse externe. L'évaluation affective de cet environnement dépend également des paramètres internes comme les expériences vécues, l'humeur, ...etc., indépendamment de la perception, qui dans certaines situations, peut contredire notre humeur.

Le travail proposé dans ce présent chapitre consiste, d'une part, à étudier l'environnement physique externe par la prise de mesures quantitatives et d'autre part, à évaluer le comportement et les différentes appréciations des individus par rapport à un environnement lumineux intérieur. Pour atteindre ces objectifs, la méthodologie adoptée sera le résultat d'une combinaison de deux méthodes d'investigation et d'analyse couramment utilisées dans les études destinées à l'éclairage intérieur. La première est dite 'méthode d'expérimentation simulée' alors que la deuxième est une 'méthode d'enquête par questionnaire'. La méthode d'expérimentation simulée a été proposée pour la modélisation et l'évaluation de l'efficacité du système de Plafond Anidolique Intégré à créer un environnement lumineux intérieur de qualité. Pour cela, les essais en modèle réduit, l'expérimentation à grande échelle 'modèle physique' et les outils de simulation par ordinateur 'méthode numérique' seront appliqués comme méthodes d'évaluation appropriées qui répondent à nos objectifs.

La méthode d'enquête par questionnaire présente de nombreux avantages comparativement à d'autres méthodes ; elle est facile, rapide, non coûteuse et peut être appliquée sur n'importe quel échantillon de la population. De plus, elle est pratiquement la seule qui est adaptée aux enquêtes quantitatives et permet de traiter les données recueillies statistiquement. Le principal intérêt de cette méthode a porté sur l'évaluation de la qualité lumineuse à l'intérieur d'un modèle physique par l'intermédiaire d'un formulaire de questionnaire composé d'un ensemble de questions développées à partir des modèles précédents.

4.1. Méthode d'expérimentation

4.1.1. Critères de choix

Afin de modéliser et d'optimiser la performance du système de plafond anidolique intégré 'PAI' dans les régions ayant un climat chaud et fortement lumineux (cas de la ville de Biskra), deux méthodes d'expérimentation ont été utilisées. Il s'agit de la simulation numérique et la simulation physique. Le choix de ces dernières est basé sur le résultat de plusieurs recherches qui ont prouvés l'efficacité de cette approche à étudier les systèmes d'éclairage dans le bâtiment (Philip, 2004 ; Wienold et Christoffersen, 2006; Daich, 2011; Daich et al, 2015 ; Hansen, 2006 ; Roshan et al, 2013). Ces deux méthodes offrent des possibilités et des inconvénients différents qui varient en fonction des objectifs de l'expérimentation ainsi que les caractéristiques lumineuses du ciel (Roy, 2000 ; EPFL, 1998 ; Maamari, 2003 ; Reinhart, 2006).

Dans notre recherche, et dans le but de faciliter l'investigation et d'arriver à des solutions fiables, l'étude est entamée par une simulation informatique basée sur un outil de modélisation numérique, qui va nous aider à déterminer le profil dimensionnel du système de PAI qui correspond aux caractéristiques climatiques et lumineuses de la ville de Biskra. Cette étude sera suivie et complétée par une simulation physique afin de comparer les valeurs numériques et physiques d'une part et de valider la fiabilité de la première méthode d'autre part (Athienitis et Tzempelikos, 2002 ; Roshan et al, 2013). Le recours à l'expérimentation simulée par logiciel en premier est due au fait que cette méthode semble avoir une flexibilité variée. Elle nécessite moins de temps et permet également de manipuler rapidement les paramètres en termes de l'heure, de saison, de matériaux...etc. avec des données météorologiques réelles tandis que le modèle physique sera utilisé dans des conditions bien déterminées qui a pour but d'une part de confirmer la fiabilité de la méthode informatique et d'autre part, de compléter l'étude des autres aspects lumineux.

4.1.1. 1. La méthode d'expérimentation numérique

4.1.1. 1. a. Le choix de l'outil de simulation

Les méthodes informatiques sont fréquemment utilisées dans la phase de design et de modélisation d'un système d'éclairage pour les bâtiments neufs ou existants, afin d'optimiser au maximum sa performance. En ce qui concerne l'approche basée sur le logiciel numérique, et avec le développement que connaît le domaine informatique, différents types de simulations ont été développés qui permettent de prédire et de calculer le facteur de luminosité, la

consommation d'éclairage électrique et les économies possibles grâce aux stratégies de contrôle de l'éclairage électrique et pour produire dans certaines formes, des représentations d'un environnement lumineux intérieur (IEA, 2000 ; Erhorn et al, 1998 ; Ward Larson et Shakespeare, 1998; EPFL). En termes d'outils, et selon l'institution suprême du Canada, les trois programmes les plus recommandés pour les simulations de lumière naturelle sont Ecotect, Radiance et Velux (Bledi, 2016). Plusieurs recherches étaient basées sur le logiciel Ecotect et qui confirment l'efficacité de ce dernier dans les études de l'éclairage intérieur (Bledi, 2016 ; Kurtay et Esen, 2016, Daich, 2011, Daich et al, 2014). Ce logiciel offre aux utilisateurs plusieurs avantages, c'est un outil de simulation simple et complet qui associe un modèleur 3D avec des analyses solaires, thermiques, acoustiques et de coût. Il permet également d'analyser plusieurs paramètres, tels que : le niveau de lumière du jour, l'éclairage artificiel, la pénétration du soleil, l'ombrage, la conception des appareils d'ombrage, etc. (Bledi Trashani, 2016). Il utilise la méthode de traçage de rayon 'ray tracing' pour analyser et visualiser la conception de l'éclairage. Il est conçu pour analyser la situation d'éclairage durant toute l'année, tout simplement en attribuant les paramètres de simulation (comme l'emplacement, la date, l'heure, l'état du ciel etc.). Il donne des résultats très visuels comme il peut être connecté avec d'autres logiciels (Radiance, EnergyPlus et d'autres logiciels performants). À partir d'Ecotect, nous pouvons importer des données de 3D Studio (.3DS .ASC .PRJ), Autocad (.DXF), EnergyPlus (.IDF), Windows Bitmap (.BMP). Comme nous pouvons faire des exportations vers DOE-2 (.INP), AIOLOS (.PPA), VRML (.WRL), ESP-r (.CFG), WinAir4 CFD (.GEO) ; Radiance (.RAD .OCT), EnergyPlus (.IDF), Autocad (.DXF).

Le système de plafond anidolique intégré 'PAI' proposé dans cette étude était modélisé avec une simulation numérique en utilisant l'option 'Lighting simulation software : Fonction Daylight' qui est couramment utilisée par les entreprises de conception de bâtiments (Philip, 2006). Cette dernière permet de calculer des facteurs différents tel que l'éclairement (lux), le facteur de lumière du jour (%), les réflexions intérieures et extérieures (%) à n'importe quel point du modèle, ainsi que les composantes du ciel. Selon le type de la grille (verticale ou horizontale), la fonction affiche les résultats en 2D et/ou en 3D. Elle simule aussi les économies potentielles qu'offre la conception axée sur l'éclairage naturel (Daich, 2011).

4.1.1. 1. b. Les paramètres de simulation

A partir des recherches faites par Kurati et Esen (2016), Athientis et Tzempelikos (2002), Scartezzini et Courret (2002), Courret et al (1998) et Daich (2011) et qui sont récapitulées dans

le tableau 4.1, on a pu déterminer, de manière assez logique, les conditions générales de notre simulation, les paramètres à manipuler ainsi que les mesures à effectuer.

Tableau 4.1 : Tableau récapitulatif des paramètres de simulation selon les recherches précédentes (Source : Auteur)

	Type du ciel	Période de calcul	Grille d'analyse (m)	'H' du plan du travail	Réflexion des matériaux	Mesures à effectuées
Kurati et Esen (2016)	Couvert 'CIE'	-	0.50x0.50	0.75	-	Eclairage (lux) FLJ (%)
Athienitis et Tzempelikos (2002)	Couvert 'CIE'	Décembre (8-17h)	0.50x0.50 1.0x1.0	0.8	-	Eclairage (lux) Luminance (cd/m ²)
Daich (2011)	Couvert 'CIE'	Décembre (10h)	0.50x0.50	0.9	Murs : 0.5 Sol : 0.50 Plafond : 0.96 Light shelf : 0.92	Eclairage (lux) FLJ (%)
Scartezzini et Courret (2002)	Couvert 'CIE' et Clair	-	0.50x0.50	0.75	Murs : 0.80 Sol : 0.15 Plafond : 0.80 Système anidolique : 0.90	Eclairage (lux) FLJ (%)
Courret et al (1998)	Couvert 'CIE'	-	1.0x1.0	0.75	Murs : 0.80 Sol : 0.15 Plafond : 0.80 Système anidolique : 0.81	Eclairage (lux) FLJ (%)

Notre simulation sera exécutée sous un ciel couvert de la CIE car, ce dernier est le plus utilisé pour le calcul de l'éclairage intérieur, il représente le type de ciel le plus stable et permet une distribution lumineuse uniforme (Courret et al, 1998). Pour cela, on a choisi le 21 janvier comme une journée représentative où le ciel est considéré comme couvert avec un éclairage extérieur de l'ordre de 31000 lux. De plus, l'expérimentation sera faite dans un site urbain et les obstructions extérieures ne vont pas être prises en considération lors du calcul. Par rapport à la période de calcul, et afin d'obtenir une idée générale sur la disponibilité de la lumière du jour dans l'espace au cours de toute la journée, la période de calcul doit être comprise de 8h jusqu'à 17h, comme on doit effectuer le calcul chaque heure de la journée selon l'objectif de la simulation (Roshan et al, 2013 ; Daich et al, 2015). Les outputs de la simulation peuvent être de natures diverses dont la plus adoptée est celle de l'éclairage horizontal en lux qui est généralement calculée dans un plan de travail situé entre 0.75 et 0.9 m du sol dans des points de mesures bien définis qui forment une grille d'analyse généralement de 0.5 m x 0.5 m.

4.1.1. 2. La méthode d'expérimentation physique

4.1.1. 2. a. Le choix de la méthode

Les résultats des différentes études focalisées sur l'évaluation de la lumière naturelle dans les bâtiments ont confirmé que l'utilisation des modèles physiques est un outil très performant et très fiable pour évaluer les performances des systèmes d'éclairage naturel (Tsikaloudaki et al, 2008 ; Wienold et Christoffersen, 2006). Cet outil d'investigation peut fournir des mesures photométriques et donne également une visualisation de l'éblouissement et du contraste dans l'espace (Baker et al, 1993 ; Bodart et Cauwerts, 2017). L'impression visuelle qu'on aura sera très proche de celle que l'on ressentira dans le local réel.

4.1.1. 2. b. Le choix de l'échelle du modèle réduit

Des recherches faites sur l'évaluation de la performance des systèmes anidoliques dans des espaces à échelles réduites (modèles physiques construits) ont montré que l'échelle du modèle optée pour l'étude varie de l'échelle réelle (1:1) à l'échelle de 1:50. On trouve que Scartezini et Courret (2002) et Courret et al (1998) ont utilisé une échelle réelle, Arsenault et al (2012) ont choisi une échelle de 1:4, Roshan et al (2013) ont recouru à l'échelle de 1:10 alors que Kesten et al (2009) ont simulé trois échelles différentes de 1:10, de 1:20 et de 1:50. Toutes ces échelles ont montré la fiabilité du modèle réalisé. De plus, Bodart et al (2008), ont confirmé que l'étude de l'efficacité des éléments de contrôle, les dispositifs d'éclairage, les nouveaux matériaux ainsi que la simulation des détails des ouvertures...etc. peut se faire par des maquettes à petites échelles de 1/10 jusqu'à l'échelle réelle et nécessitent plus de précision dans leur réalisation. A partir de ces constats, et dans notre expérimentation, deux modèles réduits d'échelles différentes étaient choisis. Le premier est de 1:12, qui est utilisé pour la validation des résultats de la simulation numérique ainsi que la validation de l'échelle alors que le deuxième est de 1:4 et qui permet une étude plus précise en termes de mesures photométriques et photographiques.



Figure 4.1 : Vue intérieure d'un modèle physique de 1:4 (Source : Arsenault et al, 2012)

4.1.1. 2. c. Le choix de matériaux de construction

Notre modèle expérimental était construit en bois. Ce dernier offre plusieurs avantages, il est disponible, facile à façonner et aussi étanche à la lumière, c'est à dire que les plaques de bois ne transmettent pas la lumière d'un coté à l'autre. Le recours au bois pour la réalisation des modèles physiques était observée dans plusieurs études (Hansen, 2006 ; Arsenault et al, 2012, Roshan et al, 2013). D'autres auteurs ont préféré l'utilisation de métal et d'aluminium (Scartezzini et Courret, 2002 ; Courret et al, 1998).



Figure 4.2 : Modèle physique construit en bois (Source : Roshan et al, 2013)

En se référant aux travaux de Scartezzini et Courret (2002), Arsenault et al (2012), Roshan et al (2013), Curtay et Esen (2016) et Daich et al (2016), présentés dans le tableau 4.2, ainsi que la méthode proposée par la CIE, on a choisi le facteur de réflexion des parois intérieures (%). Dans notre modèle expérimental, on a vérifié ces derniers en utilisant un luxmètre.

Tableau 4.2 : Tableau récapitulatif des facteurs de réflexion des parois du modèle physique selon les recherches précédentes (Source : Auteur).

Le facteur de réflexion de :	Scartezzini et Courret (2002)	Arsenault et al (2012)	Roshan et al (2013)	Daich et al, (2017)	Notre étude proposée
Parois	80%	80%	50%	60%	51%
Plafond	80%	80%	80%	92%	90%
Sol	15%	80%	20%	40%	41%
Système anidolique	90%	-	84%	96%	95%

4.1.1. 3. d. L'environnement de l'expérimentation

Notre expérimentation à l'aide d'un modèle physique a pour but d'étudier l'utilité de l'installation d'un PAI dans des bureaux de grande profondeur. Pour cette raison, on a choisi la période durant laquelle les mesures sont effectuées, les heures de travail ordinaires des

employés, qui est comprises entre 8h et 17h (Freewan, 2016, Roshan et al, 2013). De plus, l'expérience était déroulée sous des conditions du ciel réel de la ville de Biskra durant le mois de janvier dans un site parfaitement dégagé qui est le cas de plusieurs expériences (Roshan et al, 2013 ; Scartezzini et Courret, 2002 ; Courret et al, 1998 ; Daich et al, 2016, Daich, 2011).

4.1.1. 3. e. Les mesures effectuées

Durant cette investigation, des mesures de type quantitatif étaient prises et d'autres calculées à partir du modèle physique. En premier lieu, des valeurs d'éclairement horizontal (en lux) étaient prises dans un plan de travail situé à 0.8 m du sol par un luxmètre (Roshan et al, 2013). En second lieu, Hopkinson et al (1996) a montré que le confort visuel est étroitement lié à l'éblouissement, ce qui nous a conduit à recourir à l'une des méthodes d'évaluation de l'éblouissement qui est celle de Daylight Glare Probability 'DGIP' qui permet de prédire l'éblouissement à partir d'une image de format HDR. Plusieurs études antérieures ont confirmé l'efficacité de cette méthode (Wienold et Christoffersen, 2006 ; Gai et Chung, 2011) et des recherches récentes ont montré que la probabilité d'éblouissement peut être évaluée en utilisant des modèles à échelle réduite (Bodart et Cauwerts, 2017). Wienold et Christoffersen (2006), dans leur étude intitulée : Evaluation methods and development of new glare prediction model for daylighting environments with the use of CCD cameras, avaient défini le DGIP comme une fonction d'un éclairement vertical de l'œil et de la luminance de la source d'éblouissement, de son angle solide et de son indice de position. Ils avaient également développé une nouvelle équation de DGIP à partir des algorithmes de calcul d'éblouissement existants ainsi que les approches empiriques. Les résultats de leur expérience avaient montré l'existence d'une forte corrélation entre le DGIP calculé et les réponses subjectives des sujets.

Par rapport à notre expérience, nous proposons d'évaluer l'éblouissement à l'intérieur d'un modèle physique. Pour cela, trois points de vue ont été réalisés sur les façades du modèle au niveau des yeux afin de prendre des images photographiques à haute dynamique (HDR Images) de tout l'espace. Ces dernières sont un outil utile de mesure de luminance dont le rendement s'appuie principalement sur le type de caméra, l'objectif choisi et l'étalonnage photométrique utilisé pour sa précision (Gai et Chung, 2011). Pour la caméra, on a utilisé une de type 'Canon 1200D' alors que l'objectif était de type 'Sigma 4.5 mm F/2.8' qui permettent d'obtenir une image sphérique de haute qualité. Ces deux outils ont été utilisés et prouvés leur performances dans plusieurs recherches (Mitsunaga et Nayar, 1999 ; Moeck, 2007 ; Newsham et al, 2008 ; Chung et Ng, 2009).

Les images HDR capturées ont été ensuite calibrées en utilisant le logiciel Evalglare et Aftab Alpha 2.1.0 afin de calculer le D.GI.P et de prédire l'apparence du phénomène d'éblouissement dans ces espaces. L'analyse des valeurs de D.GI.P calculées a été effectuée selon l'échelle donnée par Jakubiec et Reinhart (2012) qui est présentée dans le tableau 4.3.

Tableau 4. 3 : Echelle d'évaluation de l'éblouissement utilisée

(Source : Jakubiec JA, Reinhart CF, 2012)

La classification de l'inconfort	Plages des valeurs d'éblouissement				
	DGP	DGI	UGR	CGI	VCP
Imperceptible (noir)	<0.30	<18	<13	<13	80-100
Perceptible (gris foncé)	0.30-0.35	18-24	13-22	13-22	60-80
Inquiétant (gris clair)	0.35-0.45	24-31	22-28	22-28	40-60
Intolérant (blanc)	>0.45	>28	>28	>28	<40

4.2. Méthode d'enquête par questionnaire

4.2.1. Le choix de la méthode

Le questionnaire est la méthode la plus connue et la plus fréquemment utilisée pour étudier les faits psychosociologiques. C'est une méthode uniquement collective de recueil des informations, qui s'applique à un ensemble et qui doit permettre des inférences statistiques, en vue de comprendre et d'expliquer les faits. C'est un outil méthodologique qui est composé d'un ensemble de questions qui s'enchaînent d'une manière structurée et logique afin de répondre aux objectifs bien définis. Le questionnaire d'enquête est considéré aussi comme une méthode quantitative qui est couramment utilisée pour les études liées à l'évaluation de l'éclairage intérieur dans les espaces destinés à l'usage du bureau. Elle a prouvé son efficacité dans plusieurs études et projets de recherche tel que le travail de M.L.G Matterson et al (2013), de Peng Xue, C.M. Mak*, H.D. Cheung (2014) et celui de L Roche MA, E Dewey et P Littlefair en 2000. De plus, Jan Wienold et Jens Christofferson (2006) et Jessen Page, Jean-Louis Scartezzeni, Jérôme Kaempf et Nicolas Morel (2007) avaient recouru à l'enquête par questionnaire pour étudier les conditions d'éclairage intérieur et la performance des systèmes d'éclairage dans des modèles du test à échelle réduite, qui est notre cas. De plus, d'autres recherches faites par Boyce et al (1995) et Lau (1972) ont porté sur l'utilisation de modèles réduits et ont eu une réponse positive des sujets.

A partir des résultats de ces travaux, on en conclut que l'utilisation d'un modèle à échelle réduite semble être appropriée pour la future étude proposée et le questionnaire d'enquête peut être aussi un outil très efficace pour collecter les informations nécessaires.

4.2.2. La logique de formulation du questionnaire

De manière générale, la construction et l'élaboration d'un formulaire de questionnaire doit être précédée par une définition l'objet, des objectifs et des hypothèses de l'enquête, d'une détermination de la population d'enquête ainsi que l'échantillon, d'une définition du projet du questionnaire, d'un prétest afin de vérifier la fiabilité des questions avant d'entamer la rédaction définitif du questionnaire, d'un choix de mode d'administration du questionnaire. La dernière phase consiste à coder et à analyser les résultats obtenus en fonction des objectifs assignés.

4.2.2. a. L'objet, les hypothèses et les objectifs de l'enquête

L'enquête proposée dans cette recherche a pour objet d'étudier et d'évaluer la qualité lumineuse intérieure dans un modèle physique dans des situations différentes et sous des conditions spécifiques. Pour cela, on a eu recours à une enquête dite causale, qui prend la forme d'une expérimentation où on fait varier une variable dite 'indépendante' afin d'observer les variations sur une variable dite 'dépendante' afin de pouvoir identifier un phénomène observé. Dans notre cas, les variables indépendantes sont le système de plafond anidolique intégré et les positions de l'observateurs alors que la variable dépendante est celle de la satisfaction des participants de la qualité d'éclairage fourni. Les études montrent que l'élaboration du questionnaire d'enquêtes nécessite tout d'abord la formulation des hypothèses et les objectifs seront définis en fonction de ces dernières. L'hypothèse principale à vérifier à travers cette expérience est que l'installation du système de plafond anidolique intégré permet d'améliorer la satisfaction des sujets vis-à-vis de la qualité de l'éclairage à l'intérieur du modèle physique en termes de confort visuel, de spaciosité de l'espace et de l'ambiance lumineuse et que le degré de satisfactions diffère en fonction du champ visuel de l'observateur. Ces dernières seront confirmées ou infirmées en définissant les objectifs suivants :

- Collecter des informations qui concernent les appréciations émotionnelles des sujets vis-à-vis de l'environnement lumineux construit à échelle réduite afin d'étudier la qualité de lumière que le PAI apporte à cet espace par rapport à un autre de référence.
- Utiliser ces données recueillies pour décrire un phénomène subjectif (la qualité de la lumière) afin d'expliquer un phénomène objectif (les mesures effectuées).

4.2.2. b. La population d'enquête et l'échantillon

La population d'enquête désigne l'ensemble des personnes concernées par l'expérience par lequel, les objectifs peuvent être atteints et c'est dans ce groupe de personnes que l'échantillonnage sera sélectionné. Concernant notre étude, l'univers de l'enquête est composé d'un groupe d'étudiants en master (architecture), dont les notions de base sur l'éclairage intérieur et les grandeurs photométriques nécessaires sont requises.

La détermination de l'échantillon à partir duquel sera effectuée l'enquête, résulte de la revue de la littérature de plusieurs études qui ont utilisé un questionnaire pour évaluer l'éclairage dans un modèle physique. Hélène Arsenault, Marc Hébert, Marie- Claude Dubois (2012) avaient invité 36 participants à répondre à un questionnaire pour étudier l'effet de la couleur du vitrage sur la qualité de la lumière dans les bureaux. Une étude pilote réalisée par Dubois M-C, Cantin F, Johnsen K en 2007 a impliqué 18 participants pour évaluer six types de vitrages, en utilisant deux modèles à l'échelle identique. Jan Wienold et Jens Christofferson (2006) avaient aussi demandé à 70 sujets d'évaluer l'éblouissement afin de développer un modèle de prédiction de l'éblouissement. Boyce et al (1995) ont étudié la transmittance minimale de trois types de verre qui ont été testés par 25 participants dans un bureau paysager modélisé à une échelle 1:12. A la base de ces études, on constate que pour chaque enquête citée précédemment, une moyenne de 36 participants a été impliquée. Pour notre échantillon, et vu que le nombre des étudiants est limité et que l'expérience va être faite en deux scénarios, on a opté à utiliser une trentaine d'étudiants (exactement 31 participants) pour chaque scénario, on obtiendra 62 sujets en total. Une étude menée par P. Xue et al (2014) avait montré qu'il n'y a aucune différence statistique entre les réponses des participants par rapport au genre pour la sensation de confort lumineux.

4.2.2. c. Le projet du questionnaire

A travers ce projet, on essaye de poser les questions principales par rapport à l'objet de notre enquête (l'étude de la qualité visuelle intérieure) afin de tracer les grands traits du questionnaire. Il est à noter que le confort visuel a été couramment étudié par l'évaluation de certains facteurs caractérisant la relation entre les besoins des usagers et l'environnement lumineux intérieur, tels que la quantité de lumière, l'uniformité de la lumière, la qualité de la lumière et la prédiction du risque d'éblouissement. L'étude des phénomènes lumineux par le recours à cet outil d'investigation nécessite la connaissance de ces facteurs afin de les impliquer dans le formulaire. Schweiker (2009) avait mentionné que le confort visuel et la qualité de l'éclairage intérieur sont influencés par plusieurs paramètres et les ont classés en deux catégories principales : les facteurs externes et les facteurs internes. Les facteurs externes

regroupent les paramètres liés à la science et à la physique du bâtiment et ceux liés au contexte. Les facteurs environnementaux physiques peuvent être des variables physiques intérieures ou extérieures (le soleil et sa position, la lumière du jour, la quantité de lumière, la pénétration de la lumière naturelle, l'uniformité de l'éclairage, le contraste des luminances, l'éblouissement, le climat et les conditions du ciel). Les facteurs contextuels concernent l'étude des obstructions extérieures, l'heure de la journée, la conception du bâtiment, la présence d'un dispositif d'ombrage et la position du plan du travail de l'occupant. Les facteurs internes sont strictement liés au domaine des sciences sociales c'est à dire aux usagers. Ils regroupent des facteurs physiologiques, psychologiques et sociaux. L'acuité visuelle et le sexe sont considérés comme des facteurs physiologiques. Laurentin en 2000 a déclaré qu'il existe généralement une différence de sexe en matière de confort visuel et ces résultats avaient montré que les hommes sont plus sensibles aux conditions du ciel et au confort visuel par rapport aux femmes. Les facteurs psychologiques sont liés aux préférences des gens vis-à-vis de la lumière du jour. L'enquête menée par Cuttle (1983) sur les employés des bureaux avait montré que 86 % des participants préfèrent la lumière naturelle de l'artificielle. Les facteurs sociaux concernent l'occupation de l'espace et le niveau culturel. Ce dernier pourrait influencer l'attitude des gens envers la lumière.

Le schéma suivant présente la logique dont les facteurs à étudier avait été utilisés afin de concevoir notre formulaire et déterminer les questions en fonction des objectifs de l'enquête.

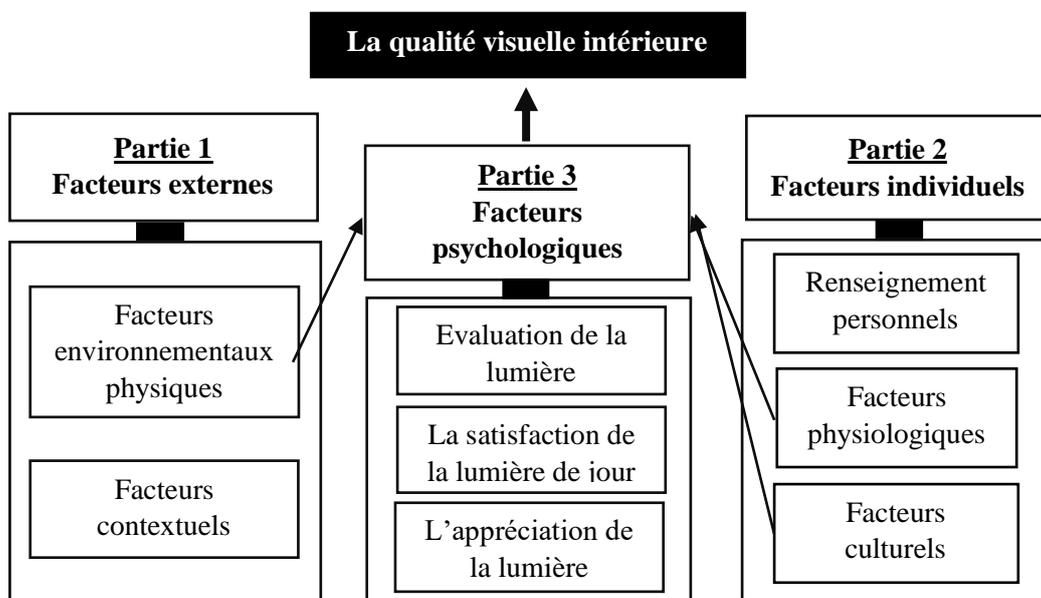


Figure 4.3: La logique de formulation du questionnaire (Source : Auteur)

En suivant la logique de formulation présentée dans la figure 4.3 et au regard des objectifs fixés au préalable, nous avons développé le formulaire suivant en nous basant sur des travaux similaires d'Arsenault et al (2012), de Kyle Stas Konis (2011), de Claudia Moscoso Paredes (2016) et Robert G. Davis (2006), de Boyce et al (2006) et celui de Mehrabian and Russel (1974). Ce formulaire préliminaire du questionnaire, présenté dans la figure 4.4, sera tout d'abord testé dans une étude pilote avant d'entamer la rédaction définitive du document.

Questionnaire : Evaluation qualitative de l'éclairage naturel à l'intérieur d'un modèle physique

Partie 1 :

Informations générales :

Date et Heure : / / Commencé à : Terminé à :

Type du ciel : Couvert Partiellement couvert Clair

Eclairage extérieur: _____ lux

Partie 2 :

Renseignements personnels :

Nom : _____ Code : _____

Genre : M F

Age : _____

Lieu de naissance : _____

Portez-vous des verres correcteurs

Partie 3 : Questionnaire

1. La lumière naturelle dans cet espace est-elle appropriée à l'activité d'un bureau ?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Pas de tout appropriée Neutre Très appropriée

2. Dans l'ensemble, à quel point êtes-vous satisfaits de votre niveau de confort visuel dans ce bureau ?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Pas de tout satisfait Neutre Très satisfait

3. Comment appréciez-vous l'uniformité de la lumière naturelle dans cet espace ?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Pas de tout uniforme Neutre Très uniforme

4. La quantité de la lumière présente dans ce bureau est-elle suffisante ?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très insuffisante Neutre Très suffisante

5. Avez-vous besoin d'utiliser l'éclairage artificiel dans cet espace ?

Oui Non

6. Si vous répondez oui, dans quelle zone(s) ?

Zone 1 Zone 2 Zone 3

7. Est-ce que le contraste entre les différents composants de l'espace est bien défini ?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Pas de tout défini Neutre Très défini

8. Comment vous appréciez la lumière dans ce bureau ?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très désagréable Neutre Très agréable

Très Ennuyeuse Neutre Très stimulante

Très chaotique Neutre Très ordonné

Très passive Neutre Très active

9. L'ambiance générale présente dans ce bureau semble être :

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très sombre Neutre Très gai

10. L'ambiance générale présente dans ce bureau semble être :

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très désagréable Neutre Très plaisante

11. Comment décrivez-vous cet espace, est-il :

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très étroit Neutre Très spacieux

Très fermé Neutre Très ouvert

12. Quel est le degré de la luminosité dans l'ensemble de cet espace ?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très sombre Neutre Très brillante

13. Dans quelle ouverture caractériseriez-vous le mieux la source d'inconfort visuel ?

- Ouverture 1 (près de la fenêtre)

- Ouverture 2 (au milieu)

- Ouverture 3 (dans le fond)

- Ouverture 4 (façade sud)

14. Veuillez évaluer votre niveau de sensibilité à l'éblouissement ou à l'inconfort visuel ?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très sombre Neutre Très lumineux

Figure 4.4 : Le questionnaire préliminaire utilisé dans le prétest (Source : Auteur)

4.2.2. d. Le prétest

Une étude pilote était proposée afin de développer notre questionnaire et vérifier la fiabilité des questions ainsi que la faisabilité des techniques statistiques choisies pour l'analyse des données obtenues. Pour cela, 12 personnes de même échantillon ont été appelés à participer à ce prétest. Une analyse préliminaire des résultats et au regard des commentaires des participants, on a constaté que la plupart des items du questionnaire étaient clairs et bien organisés, bien que certaines questions nécessitent plus d'informations. Par rapport aux questions 6 et 13, les répondants avaient trouvé une difficulté pour le choix de la réponse à cause d'une mal compréhension de la question, pour cela, un plan schématique du modèle a été ajouté et qui

porte toutes les informations sur le positionnement des zones ainsi que les ouvertures. De plus, pour mieux évaluer l'ambiance lumineuse générale présente dans l'espace, une question ouverte a été proposée qui consiste à demander aux sujets de décrire l'espace en utilisant trois mots cités en ordre. Et pour faciliter le classement des réponses par scénario et par ouverture, on a ajouté une partie informationnelle avant la partie qui comporte les questions, où les sujets doivent cocher la case du scénario ainsi que l'ouverture sur lequel ils vont répondre aux questions. La version finale de notre formulaire de questionnaire, qui sera distribué lors de l'enquête, va être présentée et expliquée en détail dans le prochain point.

4.2.2. e. Le formulaire de questionnaire définitif 'Le questionnaire développé'

À partir des données obtenues ainsi que les recommandations recueillies du prétest effectué, on a élaboré une nouvelle version du questionnaire, dite 'définitive' qui sera soumise aux enquêtés. Le formulaire de questionnaire développé est présenté en détail dans la figure 4.5.

Questionnaire: Evaluation qualitative de l'éclairage naturel à l'intérieur d'un modèle physique

Partie 1:

Informations générales:
 Date et Heure: / / Commencé à: Terminé à:
 Type du ciel: Couvert Partiellement couvert Clair
 Eclairement extérieur: _____ lux

Partie 2:

Renseignements personnels:
 Nom: _____ Code: _____
 Genre: M F
 Age: _____
 Lieu de naissance: _____
 Portez-vous des verres correcteurs: Oui Non
 Profession/Occupation: _____

Partie 3:
 Scénarios 1. Modèle de référence Scénarios 2. Modèle de test (avec PAI)
 Ouverture: 1 2 3 4

Partie 4: Questionnaire

1. La lumière naturelle dans cet espace est-elle appropriée à l'activité d'un bureau?
 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3
 Pas de tout appropriée Neutre Très appropriée

2. Dans l'ensemble, à quel point êtes-vous satisfaits de votre niveau de confort visuel dans ce bureau?
 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3
 Pas de tout satisfait Neutre Très satisfait

3. Comment appréciez-vous l'uniformité de la lumière naturelle dans cet espace?
 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3
 Pas de tout uniforme Neutre Très uniforme

4. La quantité de la lumière présente dans ce bureau est-elle suffisante?
 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3
 Très insuffisante Neutre Très suffisante

5. Avez-vous besoin d'utiliser l'éclairage artificiel dans cet espace?
 Oui Non

6. Si vous répondez oui, dans quelle zone(s)?
 Zone 1 Zone 2 Zone 3

7. Est-ce que le contraste entre les différents composants de l'espace est bien défini?
 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3
 Pas de tout défini Neutre Très défini

8. Comment vous appréciez la lumière dans ce bureau?
 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3
 Très désagréable Neutre Très agréable

9. L'ambiance générale présente dans ce bureau semble être:
 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3
 Très ennuyeuse Neutre Très stimulante

10. L'ambiance générale présente dans ce bureau semble être:
 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3
 Très chaotique Neutre Très ordonné

11. Décrivez en 3 mots, avec ordre, l'ambiance générale dans cet espace?
 1 _____ 2 _____ 3 _____

12. Comment décrivez-vous cet espace, est-il:
 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3
 Très étroit Neutre Très spacieux

13. Quel est le degré de la luminosité dans l'ensemble de cet espace?
 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3
 Très sombre Neutre Très brillante

14. Dans quelle ouverture caractériseriez-vous le mieux la source d'inconfort visuel?
 - Ouverture 1 (près de la fenêtre)
 - Ouverture 2 (au milieu)
 - Ouverture 3 (dans le fond)
 - Ouverture 4 (façade sud)

15. Veuillez évaluer votre niveau de sensibilité à l'éblouissement ou à l'inconfort visuel?
 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3
 Très sombre Neutre Très lumineux

Figure 4.5 : Le questionnaire développé 'la version définitive' (Source : Auteur)

Notre formulaire définitif est constitué de quatre parties et vise à recueillir des observations subjectives sur la qualité de la lumière fournie par notre système de plafond anidolique intégré

à l'intérieur d'un modèle physique dans des situations différentes afin d'étudier la capacité de ce dispositif à améliorer l'atmosphère lumineuse intérieure des bureaux. Il comprend quinze questions, dont treize sont fermées à choix multiples, une question fermée à réponse unique et une autre ouverte. En se référant au travail de C. M Paredes (2016) et celui de K. S Konis (2011), les enquêtés vont répondre à ces questions sur une échelle de sept points de Likert avec des oppositions sémantiques où 1 correspondait au score le plus négatif et 7 au score le plus positif. La première partie est réservée aux facteurs externes, elle comprend des informations générales sur l'environnement physique extérieur et le contexte de l'enquête, tel que la date et l'heure, le type du ciel et le niveau de l'éclairage extérieur en lux au moment de l'investigation.

Informations générales:		
Date et Heure: ____ / ____ / _____	Commencé à: _____	Terminé à: _____
Type du ciel : Couvert <input type="checkbox"/>	Partiellement couvert <input type="checkbox"/>	Clair <input type="checkbox"/>
Eclairage extérieur: _____ lux		

Figure 4.6: La partie 1 du questionnaire développé (Source : Auteur)

La deuxième partie regroupe tous les facteurs liés aux individus qui participent à cette expérience. Elle comprend des renseignements personnels, des facteurs physiologiques (le sexe, l'âge et l'acuité visuelle des participants comme des informations de base) et d'autres culturelles qui concernent le lieu de naissance et la profession de ces derniers.

Renseignements personnels:	
Nom: _____	Code : _____
Genre: M <input type="checkbox"/>	F <input type="checkbox"/>
Age: _____	
Lieu de naissance: _____	
Portez-vous des verres correcteurs: Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
Profession/Occupation: _____	

Figure 4.7 : La partie 2 du questionnaire développé (Source : Auteur)

La troisième partie est une partie informationnelle, qui était ajoutée après avoir effectué le prétest, et qui a comme objectif d'aider l'enquête au cours de l'expérience. Elle lui permet de connaître le scénario avec lequel il va participer ainsi que l'ouverture par laquelle il va répondre aux questions. Dans chaque étape de l'enquête, le participant doit cocher sur la case appropriée.

Partie 3:

Scénarios 1. Modèle de référence Scénarios 2. Modèle de test (avec PAI)

Ouverture : 1 2 3 4

Figure 4.8 : La partie 3 du questionnaire développé (Source : Auteur)

La quatrième partie comprend les questions par lesquelles les participants doivent répondre. En se basant sur des travaux ultérieurs, cette partie regroupe quatre facteurs psychologiques ‘dimensions’ qui concernent l’évaluation de la lumière, la satisfaction vis-à-vis de l’éclairage intérieur, l’appréciation de l’espace et la sensibilité à l’éblouissement s’il y a lieu.

La première série concerne le facteur d’évaluation, elle comprend des questions sur le confort visuel, le niveau d’éclairage intérieur et la précision. Les questions choisies se rapportent sur l’appropriation de l’espace, la satisfaction de l’environnement lumineux intérieur, l’uniformité de la distribution lumineuse et la quantité d’éclairage présente dans le local, le besoin d’éclairage électrique et le degré de contraste. Parmi ces éléments, trois facteurs (la question 1, 5 et 7) sont fondés sur l’étude d’Arsenault et al (2012), trois autres facteurs qui concernent la deuxième, la troisième et la quatrième question sont tirés des thèses de doctorat de K.S Konis, (2011) de R.G Davis (2006) et celle de C. M Paredes (2016). Le dernier facteur (Q6) a été proposé et formulé par l’auteur afin de confirmer ou infirmer les réponses données pour la Q5.

1. La lumière naturelle dans cet espace est-elle appropriée à l’activité d’un bureau ?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Pas de tout appropriée Neutre Très appropriée

2. Dans l’ensemble, à quel point êtes-vous satisfaits de votre niveau de confort visuel dans ce bureau ?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Pas de tout satisfait Neutre Très satisfait

3. Comment appréciez-vous l’uniformité de la lumière naturelle dans cet espace ?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Pas de tout uniforme Neutre Très uniforme

4. La quantité de la lumière présente dans ce bureau est-elle suffisante ?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Pas de tout suffisante Neutre Très suffisante

5. Avez-vous besoin d’utiliser l’éclairage artificiel dans cet espace ?

Oui Non

6. Si vous répondez oui, dans quelle zone(s) ?

Zone 1 Zone 2 Zone 3

Ouverture 4 → Fenetre et PAI ←

Ouverture 3 Ouverture 2 Ouverture 1

7. Est-ce que le contraste entre les différents composants de l'espace est bien défini ?						
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pas de tout défini			Neutre			Très défini

Figure 4.9 : La partie 4 du questionnaire développé (série 1 des questions) (Source : Auteur)

Dans la deuxième série, les questions étaient formulées pour étudier les facteurs qui influencent le niveau de satisfaction des participants vis-à-vis de leur environnement lumineux intérieur. Les quatre facteurs constituant cette série étaient construits en se référant aux travaux d'Arsenault et al (2012), la thèse de C. M Paredes (2016) et de Mehrabian et Russel (1974).

8. Comment vous appréciez la lumière dans ce bureau ?						
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très désagréable			Neutre			Très agréable
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très ennuyeuse			Neutre			Très stimulante
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très chaotique			Neutre			Très ordonné
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très passive			Neutre			Très active
9. L'ambiance générale présente dans ce bureau semble être :						
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très sombre			Neutre			Très gai
10. L'ambiance générale présente dans ce bureau semble être :						
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Très désagréable			Neutre			Très plaisante
11. Décrivez en 3 mots, avec ordre, l'ambiance générale dans cet espace ?						
1.	2.	3.	_____			

Figure 4.10 : La partie 4 du questionnaire développé (série 2 des questions) (Source : Auteur)

La troisième série des questions proposées traite le facteur de spaciosité du modèle expérimental. Elle permet de recueillir des informations sur les sentiments subjectifs des participants vis-à-vis de l'espace afin de vérifier si la relation entre la spaciosité de ce dernier et la quantité d'éclairage présente est proportionnelle, c'est-à-dire, plus il y a de lumière, plus le local apparaît plus spacieux. Ce facteur (Q12) est constitué de deux questions qui tournent autour de la spaciosité et de l'ouverture de l'espace. Ces questions sont inspirées de la dissertation de C.M Paredes (2016).

12. Comment décrivez-vous cet espace, est-il :

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très étroit			Neutre			Très spacieux
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très fermé			Neutre			Très ouvert

Figure 4.11 : La partie 4 du questionnaire développé (série 3 des questions) (Source : Auteur)

Dans la quatrième série, nous avons demandé aux participants de définir le niveau de la luminosité de l'espace (Q13), de choisir l'ouverture qui semble constituer une source d'inconfort visuel (Q14) et d'évaluer par la suite la sensibilité des participants à l'éblouissement ou à la gêne visuelle (Q15). La treizième et la quinzième question étaient basées sur l'étude d'Y. Akashi, P.R. Boyce (2006) ainsi que la thèse de K.S Konis (2011) alors que la quatorzième était proposée par l'auteur avec l'objectif d'obtenir plus d'informations sur ce facteur.

13. Quel est le degré de la luminosité dans l'ensemble de cet espace ?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très brillante			Neutre			Très sombre

14. Dans quelle ouverture caractériseriez-vous le mieux la source d'inconfort visuel ?

- Ouverture 1 (près de la fenêtre)
- Ouverture 2 (au milieu)
- Ouverture 3 (dans le fond)
- Ouverture 4 (façade sud)

Ouverture 4 →

ZONE 3ZONE 2ZONE 1

↑ Ouverture 3↑ Ouverture 2↑ Ouverture 1

← Fenêtre et PAI

15. Veuillez évaluer votre niveau de sensibilité à l'éblouissement ou à l'inconfort visuel ?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très sombre			Neutre			Très lumineux

Figure 4.12 : La partie 4 du questionnaire développé (série 4 des questions) (Source : Auteur)

4.2.2. f. Le mode d'administration du questionnaire

Il existe différents modes d'administration d'un questionnaire, il peut être distribué par l'enquêteur lui-même où il pose des questions et note les réponses des participants, par auto administration ou le sujet répond seul aux questions, par envoi postal (qui n'est pas recommandé, car le taux de réponse est généralement faible), par téléphone ou par internet. Dans notre étude et en vue de l'obtention des réponses précises, on a eu recours au deuxième mode, celui de type auto-administration où l'enquêté répond lui-même au questionnaire en lui donnant le temps nécessaire pour remplir tous ses renseignements personnels ainsi que les informations liées à l'enquête avant d'entamer ces observations (partie : questions/réponses).



Figure 4.13 : Le mode auto-administration du questionnaire (Source : Auteur)

4.2.2. g. Le codage et l'analyse des résultats

Toutes les questions formulées, les réponses recueillies des enquêtés ainsi que les valeurs de DGIP calculées à partir des modèles physiques au moment de l'enquête étaient introduites et codées de manière homogène afin de pouvoir les traiter et les analyser pour les interpréter par la suite. Pour cela, on a eu recours à la statistique descriptive à l'aide du logiciel 'IBM SPSS 24' qui est la méthode la plus adoptée dans des recherches similaires (P. Xue et al, 2014 ; Arsenault et al, 2012 ; Z. Gou et al, 2014). Après avoir effectué la première étape qui consiste à introduire toutes les données obtenues, on passe à une série de tests afin de vérifier la fiabilité des questions choisies, les plus couramment utilisées sont celles de la fiabilité (pour les variables qualitatives) et celles de la normalité (pour les variables quantitatives) (P. Xue et al, 2014). La troisième étape a pour but d'étudier la relation entre les variables de type qualitatif, on adopte souvent l'analyse des correspondances multiples 'ACM' et le test de Spearman (P. Xue et al, 2014 ; Y. Akashi et P. R Boyce, 2006) tandis que les variables qualitatives seront étudiées en faisant appel au test 'ANOVA one-way' (Akashi et Boyce, 2006 ; Boyce et al, 2006). Après avoir établi les relations entre toutes les variables, on passe à l'étape de l'interprétation de ces données à travers différentes techniques statistiques dont le choix dépend des objectifs de l'enquête. Parmi les techniques les plus utilisées, on trouve celle de Box-plot (boîte à moustaches), les histogrammes, le diagramme en barres et le diagramme en dispersion de points (nuage de points) (P. Xue et al, 2014 ; A. D. Galasieu et C. F Reinhart, 2008 ; J. Wienold et J Christoffersen, 2006 ; Akashi et Boyce, 2006).

Conclusion

L'intérêt principal de ce chapitre est la constitution d'une méthodologie bien définie qui pourra nous aider à étudier l'aspect quantitatif et qualitatif de la lumière qu'apporte le système de plafond anidolique intégré dans un espace de grande profondeur (cas d'un bureau). Pour répondre à ces préoccupations et atteindre nos objectifs, on a pu déterminer deux méthodes d'investigation et d'analyse après avoir effectué la revue de la littérature de plusieurs recherches qui ont été faites dans ce domaine et qui ont prouvé leurs fiabilités et leurs efficacités. La première méthode est basée sur une expérimentation simulée faite par le recours à la simulation numérique d'une part et par les modèles physiques d'autre part. Par rapport à cette première approche, on a proposé de construire deux modèles réduits d'échelle de 1:12 et de 1:4, réalisés en bois et simulés numériquement et physiquement pendant les heures de travail ordinaires des employés (de 8h à 17h). Les deux modèles portent les mêmes caractéristiques géométriques (12 x 6 x 3.5 m) et photométriques (R_{murs} :51%, R_{sol} : 41%, R_{plafond} : 90% et R_{PAI} : 95%). Les mesures ont été prises dans un plan de travail situé à 0.8 m du sol selon une grille de 50 cm x 50 cm. La simulation numérique a été faite par 'Ecotect Software' sous des conditions du ciel couvert de la CIE alors que l'expérimentation physique a été réalisée sous un ciel réel de la ville de Biskra pendant le mois de janvier à l'aide d'un luxmètre et d'une caméra équipée d'un dispositif Fish-Eye. L'objectif de cette étude est d'obtenir des données de type quantitatif en termes d'éclairement (lux) et d'indice d'éblouissement 'DGIP' (%) afin d'évaluer quantitativement l'environnement lumineux intérieur.

Par rapport à la deuxième méthode, on a opté pour une enquête par questionnaire. Pour la réalisation de cette dernière, on a tout d'abord défini l'objet, les hypothèses et les objectifs de l'enquête qui nous ont conduit de manière logique à déterminer la population d'enquête ainsi que l'échantillon. Il s'agit de 62 étudiants en master en architecture partagés en deux groupes afin de composer les deux scénarios. Ensuite, on a établi le projet de notre enquête dans le but de définir la logique de formulation de questions et fixer le contenu de questionnaire. Trois facteurs de type externe, individuel et psychologique ont été utilisés qui nous ont conduit à faire ressortir quatre dimensions : 1) l'évaluation visuelle ; 2) l'appréciation ; 3) la précision ; 4) la sensibilité à l'éblouissement. Ces dernières constituent les lignes directrices pour choisir les questions à poser et la formulation du premier questionnaire qui a été testé dans une étude pilote en faisant appel à 12 sujets du même échantillon. Après avoir consulté les réponses des participants du prétest et prendre toutes les recommandations en considération, on a formulé le questionnaire définitif qui est composé de quinze questions dont une ouverte, une fermée à

choix unique et le reste sont des questions fermées à réponses multiples. Les enquêtés vont répondre à ces questions sur une échelle de sept points de Likert avec des oppositions sémantiques (le '1' représente la réponse la plus négative, le '7' est la réponse la plus positive). Notre questionnaire est structuré en quatre parties qui s'enchainent de manière logique afin d'aboutir aux objectifs. La première contient des informations générales sur l'expérience (remplie par l'enquêteur), la deuxième comporte les renseignements personnels des enquêtés, la troisième est une partie informationnelle alors que la quatrième, qui est la plus importante, comporte les quinze questions sur lesquelles les sujets doivent répondre. Ce formulaire sera distribué en utilisant le mode auto administration.

Pour le traitement des données recueillies, en termes des observations subjectives ainsi que des valeurs objectives de type de DGIP (%) calculées à partir du modèle physique, on a eu recours à la méthode de la statistique descriptive en faisant appel au logiciel 'IBM SPSS Statistics 24' qui permet d'effectuer des analyses multiples sur l'ensemble des variables quantitatives et qualitatives comme le test ANOVA, le test de Spearman, ACM ainsi que les tests de fiabilité et de normalité. L'interprétation des résultats obtenus par cette analyse exploratoire sera faite e faisant appel à différentes techniques statistiques dont leurs choix dépendent des objectifs de l'enquête. Dans notre cas, on a utilisé le diagramme de Box-plot (boite à moustaches), les histogrammes, le diagramme en barres et le diagramme en dispersion de points (nuage de points à double ou à triples axes).

Référence

- Akashi, Y., & Boyce, P. R. (2006). A field study of illuminance reduction. *Energy and Building*, 588-599.
- Anca, D., Galasieu, C., & Reinhart, F. (2008). Current daylighting design practice: a survey. *Building Research & Information*, 36 (2), 159-174.
- Arsenault, H., Hebert, M., & Duboi, M. C. (2012). Effects of glazing colour type on perception of daylight quality arousal, and switch-on patterns of electric light in office rooms. *Building and environment*, 56, 223-231.
- 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.
- Baker, N., Fanchiotti, A., & Steemers, K. (1993). Daylighting in Architecture: a European reference book. *Commission of the European Communities, DG XII for Science, Research and Development, James and James, Brussels, 1993.*
- Bodart, M., & Cauwerts, C. (2017). Assessing daylight luminance values and daylight glare probability in scale models. *Building and Environment*, 113, 210-219.
- Bodart, M., Deneyer, A., & Moenssens, N. (2008). Guide précis d'aide à la construction des modèles réduits pour utilisation et mesures sous ciel artificiel de la CSTC. *CSTC, PP.23, 2008.*
- Boyce, P., Eklund, N., Mangum, S., Saalfeld, C., & Tang, L. (1995). Minimum acceptable transmittance of glazing. *Lighting Research and Technology*, 27(3), 145-152.
- Boyce, P.R, Veitchb, J.A., Newshamb, G.R., Jonesc, C.C., Heerwagenc, J., Myera, M., & Huntera, C.M. (2006). Lighting quality and office work: two field simulation experiments. *Lighting Research and Technology*, 38, (3), 191-223.
- Chung, T.M., & Ng, R.T.H. (2009).Variation of calibration factor over time for high dynamic range photography in a single daylit interior scene. *Proceedings of the 6th Lux Pacific: Light without Borders. Bangkok, Thailand: Pacific Rim Lighting Societies, 2009.*
- Courret, G., Scartezzini, J.L., Francioli, D., & Meyer, J.J. (1998). Design and assessment of an anidolic light-duct. *Energy and Buildings*, 28, 79-99.
- Cuttle, C. (1983). People and windows in workplaces. *In Proceedings of the People and Physical Environment Research Conference, Wellington, New Zealand, 8–11 June 1983.*
- Daich, S., Saadi, M. Y., Zemmouri, N., Eugenio, M., Piga, B. E. A., & Daiche, A.M. (2016). Evaluation quantitative et qualitative du système anidolique sous un climat chaud et aride. *Proceedings of 3rd International Congress on Ambiances. Greece; 2016.p. 219-226.*
- Daich, S., Saadi, M.Y., Zemmouri, N., & Daiche, A.M. (2014). Modeling Light Shelf Systems for a Sustainable Interior Sunlight Environment under Specific Climate Conditions. *DCA Conference, ISBN 978-1-4951-2763-2, pp. 348-351, 2014.*

Daich, S. (2011). Simulation et Optimisation du Système Light Shelf sous des Conditions Climatiques Spécifiques. *Thèse de magistère, Université de Biskra, Algérie.*

Daich, S., Zemmouri, N., Saadi, M. Y., Eugenio, M., & Piga, B. E. A. (2015). Modeling of an anidolique daylight system for a luminous integrated environment. *Advance Building Skins, Bern, Switzerland, ISBN: 978-3-98120538-1, pp.366-371.*

Davis, R. G. (2006). Cognitive and Perceptual Factors in Lighted Architectural Environments. *PhD Thesis.*

Dubois, M.C., Cantin, F., & Johnsen, K. (2007). The effect of coated glazing on visual perception: a pilot study using scalemodels. *Lighting Research and Technology, 39(3), 283-299.*

Erhorn, H., De Boer, J., & Dirksmoller, M. (1998). ADELINe-An integrated approach to lighting simulation. *Proceedings of international daylighting conference "Daylighting '98", Ottawa, Ont., Canada; 1998.*

Freewan, A. (2016). Using Tubular Daylighting Systems to Improve Illuminance Level in Double Loaded Corridors in Educational Buildings. *Jordan Journal of Civil Engineering, 10(2).*

Gai, H., & Chung, T.M. (2011). Improving the quality of high dynamic range images. *Lighting Research and Technology, 43, 87-102.*

Gou, Z., Lau, S.S.Y., & Ye, H. (2014). Visual alliesthesia: The gap between comfortable and stimulating illuminance settings. *Building and Environment, 82, 42-49*

Greenup, P.J. (2004). Development of Novel Technologies for Improved Natural Illumination of High Rise Office Buildings. *PhD Thesis.*

Hansen, V. G. (2006). Innovative daylighting systems for deep-plan commercial buildings. *PhD Thesis.*

Hopkinson, R. G., Petherbridge, P., & Longmore, J. Daylighting. *Heinemann, London (UK), 1996, pp: 606.*

http://lesowww.epfl.ch/anglais/Leso_a_frame_sof.html.

IEA (2000). Daylighting in buildings. *IEA SHC Task 21/ECBCS Annex 29 Final Report, 2000. (International Energy Agency).*

Jakubiec, J.A., & Reinhart, C.F. (2012). The adaptive zone - A concept for assessing discomfort glare throughout daylit spaces. *Lighting research and Technology, 44(2), 149-170.*

Kesten, D., Fiedler, S., Thumm, F., Löffler, A., & Eicker, U. (2009). Evaluation of Daylight Performance in Scale Models and a Full Scale Mock-Up Office. *Published in: Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Energy Technologies, Aachen, Germany, 2009.*

Konis, K.S. (2011). Effective Daylighting: Evaluating Daylighting Performance in the San Francisco Federal Building from the Perspective of Building Occupants. *PhD Thesis. University of California: Berkeley.*

Kurtay, C., & Esen, O. (2016). The Efficiency of Light Shelves According to Latitudes in Office Buildings. *Gazi University Journal of Science* 29(4), 711-721.

Lau, J.J.H. (1972). Use of scale models for appraising lighting quality. *Lighting Research Technology*, 4, 254-262.

Laurentin, C., Berrutto, V., & Fontoynt, M. (2000). Effect of thermal conditions and light source type on visual comfort appraisal. *Lighting Research Technology*, 32, 223-233.

leso.epfl.ch.

Maamari, F., & Fontoynt, M. Analytical tests for investigating the accuracy of lighting programs. *Lighting Research & Technology*, 35 (3) (2003), pp. 225-242

Matterson, M. L. G., Ferrà, J. O., Salom, J., & Portilla, J. H. (2013). Dynamic Daylight Simulation And Visual Comfort Survey In Mediterranean Climate. Case Study In Office Building. *In: Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. France; 2013.p.3010-3018.*

Mehrabian, A., & Russell, J. A. (1974). An approach to environmental psychology. pp. 216–217, *USA: The Massachusetts Institute of Technology.*

Mitsunaga, T., & Nayar, S.K. (1999). Radiometric self-calibration. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Ft. Collins, CO, USA: IEEE, 1999.*

Moeck, M. (2007). Accuracy of luminance maps obtained from high dynamic range images. *Leukos*, 4, 99-112.

Newsham, G.R., Aries, M.B.C., Mancini, S., & Faye, G. (2008). Individual control of electric lighting in a daylit space. *Lighting Research and Technology*, 40, 25-41.

Page, J., Scartezzeni, J.L., Kaempf, J., & Morel, N. (2007). On-site performance of electrochromic glazing coupled to an anidolic daylighting system. *Solar Energy*, 81, 1166-1179.

Paredes, C. M. (2016). Daylighting and Architectural Quality, Aesthetic Perception of Daylit Indoor Environments. *PhD Thesis, NTNU, 2016:25, ISBN 978-82-326-1394-6.*

Reinhart, C.F., & Fitz, A. (2006). Findings from a survey on the current use of daylight simulations during building design. *Energy & Buildings*, 38(7), 824-35.

Roche, L., Dewey, E., & Littlefair, P. Occupant reactions to daylight in offices(2000). *Lighting Research and Technology*, 32 (3), 119-126

Roshan, M., Kandar, M. Z. B., Nikpur, M., Mohammadi, M.P., & Ghasemi, M. (2013), Investigating the performance of Anidolic Daylighting System with respect to Building Orientation in Tropical Area. *ESTIJ An International Journal of Engineering Science and Technology*, 3 (1), 2250-3498.

- Roy, G.G. (2000). A comparative study of lighting simulation packages suitable for use in architectural design. *Perth: Murdoch University, School of Engineering; 2000.*
- Scartezzini, J.L., & Courret, G. (2002). Anidolic daylighting systems. *Solar Energy, 73*, 123-135.
- Schweiker, M., & Shukuya, M. (2009). Comparison of theoretical and statistical models of air-conditioning-usage behaviour in a residential setting under Japanese climatic conditions. *Build. Environ, 44*, 2137-2149.
- Trashani, B. (2016). New Daylight Technologies For Sustainable Design Case Study - Mother Tereza Hospital In Tirana. *Master Thesis, 2016.*
- Tsikaloudaki, K., Anagnostou, S., & Nichoritis, K. (2008). Investigating the performance of anidolic vertical openings under real conditions in Greece. *In: 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Dublin; 2008*
- Ward, L- G., & Shakespeare, R. (1998). Rendering with Radiance: the art and science of lighting visualisation. *San Francisco: Morgan Kaufmann; 1998.*
- 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.
- Xue, P., Mak, C.M., & Cheung, H.D. (2014). The effects of daylighting and human behavior on luminous comfort in residential buildings: A questionnaire survey. *Building and Environment, 81*, 51-59.

PARTIE PRACTIQUE

Cette partie a pour but d'utiliser toutes les informations théoriques, recueillies à travers la rédaction des chapitres théoriques, pour pouvoir construire le support pratique effectif de notre travail de recherche. La partie théorique nous a permis de déterminer le type de système anidolique qui correspond le mieux aux caractéristiques climatiques de la ville de Biskra ainsi que les exigences lumineuses pour un espace de bureau caractérisé par une grande profondeur et à la fin de cette partie, on a pu définir la méthodologie d'approche à suivre.

La partie pratique proposée dans cette investigation est constituée de cinq chapitres dont l'objectif est d'aboutir aux objectifs assignés et confirmer ou infirmer nos hypothèses. Le cinquième chapitre consiste à construire le profil dimensionnel d'un système anidolique spécifique qui répond aux exigences lumineuses et spéciales de la ville de Biskra. Ce modèle théorique sera étudié et analysé en adoptant une procédure expérimentale adéquate qui sera expliquée en détail dans le sixième chapitre. L'objectif de cette investigation est de vérifier la performance du système modélisé dans différentes situations. Deux types d'études sont proposés : une évaluation quantitative (septième chapitre) qui consiste à avoir une idée générale sur la quantité de la lumière qu'offre notre système anidolique dans un espace à usage spécifique et une autre de type qualitatif (huitième chapitre) afin de déterminer en parallèle la qualité lumineuse intérieure.

Les résultats de ces évaluations des valeurs quantitatives et qualitatives dans des scénarios et des positions différents seront présentés dans le dernier chapitre sous forme de discussions, de recommandations et de conclusion.

CHAPITRE 5

VERS UN MODELE SPECIFIQUE DE SYSTEME ANIDOLIQUE

Introduction

Comme a été déjà annoncé dans le deuxième chapitre, l'utilisation du plafond anidolique intégré est une excellente stratégie d'éclairage naturel adéquate aux régions à climat chaud permettant d'augmenter la transmission de la lumière du jour à l'intérieur d'un local tout en contrôlant la composante directe du soleil, d'assurer l'uniformité de la distribution lumineuse et de réduire la sensation d'éblouissement d'inconfort. Plusieurs modèles de plafond anidolique ont été développés dont leur conception dépend des facteurs climatiques, de l'environnement lumineux extérieur, des besoins d'éclairage ainsi que des caractéristiques architecturales et spatiales. L'objectif recherché à travers ce présent chapitre est de modéliser un système de plafond anidolique spécifique au climat chaud et aride (la ville de Biskra) et tester sa performance en termes du confort visuel, de dépense énergétique et de qualité lumineuse et spatiale. Pour cela, le travail est structuré en **trois parties** :

La première partie consistera à déterminer les différents paramètres permettant de dimensionner notre plafond anidolique. Ces paramètres sont relatifs au profil théorique (identification des différents variables) et au climat de la ville de Biskra afin de faire ressortir les modèles les plus performants. Dans cette investigation, nous allons faire appel à un modèle de référence 'modèle 3' qui était déjà développé dans des recherches précédentes. A la fin de cette partie, nous présenterons notre modèle de simulation 'modèle de référence : sans système intégré' (dimensions, réflexion des parois, matériaux de construction, ..) ainsi que les paramètres qui seront utilisés dans la simulation (présentation du logiciel utilisé, l'orientation, le type du ciel...). Dans **la deuxième partie**, des évaluations basées sur des simulations numériques seront proposées afin d'analyser le rendement quantitatif des douze configurations du système de plafond anidolique intégré 'PAI' et du système anidolique intégré 'SAI' ainsi que celui du modèle de référence. Les résultats de cette analyse permettront par la suite de faire ressortir les configurations optimales parmi les modèles proposés à la simulation et connaître leurs performances dans des conditions spécifiques. **La dernière partie** sera proposée afin de développer un modèle mathématique spécifique au système modélisé.

5.1. La construction du gabarit dimensionnel de système anidolique

Afin de déterminer le gabarit dimensionnel de système anidolique, des équations ainsi que trois formules, à l'origine fournies par Welford et Winston (1989), vont être utilisés pour le pré-dimensionnement du système. La première étape consiste à sélectionner le profil théorique des configurations de système les plus performantes qui ont été déjà étudiés dans le troisième chapitre. Puis, une série de données doit être identifiées selon le climat dans lequel il doit être intégré. Dans notre recherche, le système anidolique proposé va être installé dans une région chaude et aride (la ville de Biskra). Dans la deuxième étape, on propose une simulation informatique, à l'aide de logiciel Ecotect 5.5, afin de pouvoir modéliser et vérifier le modèle théorique construit sous des conditions lumineuses spécifiques et faire sortir le profil dimensionnel final du système anidolique qui est l'objectif de cette étude.

5.1.1. Le profil théorique des systèmes anidoliques

Selon l'étude qui a été faite précédemment, on peut dégager deux configurations de dispositifs anidoliques qui font l'objet de notre étude. La première est un système anidolique intégré dans la façade, dans ce type on n'a pas besoin d'un plafond très réfléchissant ou la lumière captée depuis l'extérieur, à travers l'élément anidolique, va être réfléchi directement vers le plafond qui va la diffuser en profondeur. La deuxième configuration représente un plafond anidolique intégré. Dans ce type, on a besoin d'un faux plafond et de deux éléments anidoliques intérieur et extérieur. Les profils théoriques de ces dispositifs sont présentés dans les figures suivantes :

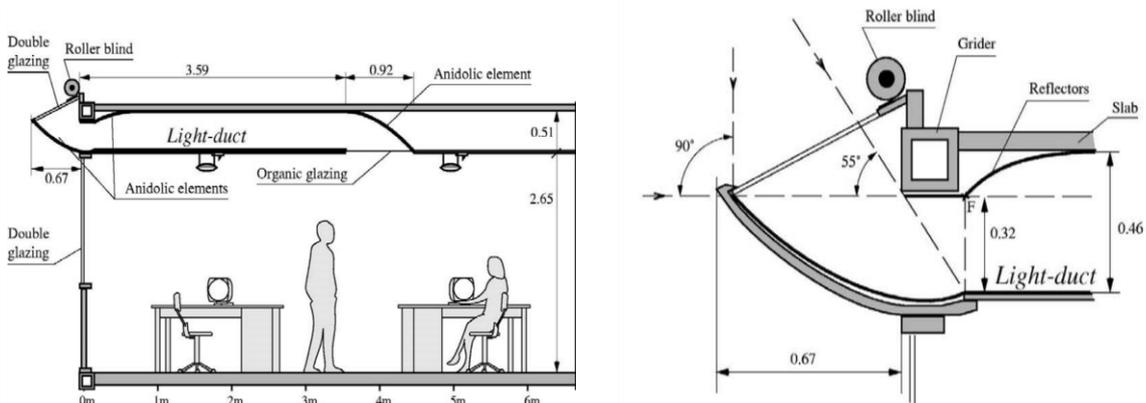


Figure 5.1 : A gauche, plafond anidolique intégré ; A droite, dispositif anidolique intégré.
Source : Scartezini et Courret (2002)

5.1.2. Les données relatives au dimensionnement de système

Le système anidolique utilisé dans cette étude se compose de deux principales parties, une à l'extérieur et l'autre à l'intérieur. La première est constituée d'un capteur/collecteur

parabolique composé CPC. L'inclinaison de cette partie dépend de l'angle d'incidence (β) de rayons lumineux. De plus, la largeur de partie vitrée dépend aussi de l'angle (β) et de la largeur de capteur. Les deux extrémités de paraboles sont positionnées selon la largeur de l'ouverture d'entrée. Les paramètres nécessaires pour la dimensionner sont les suivants :

β = Angle d'incidence = La latitude de lieu = 34° .

α = Angle entre l'ouverture d'entrée avec le plan horizontal:

$\alpha = 90^\circ - \beta = 56^\circ$.

$l'm$ = La largeur extérieur de l'élément anidolique

l_m = La largeur de l'ouverture d'entrée : $\sin \beta = l_m / l'm$

$l_m = l'm * \sin \beta$

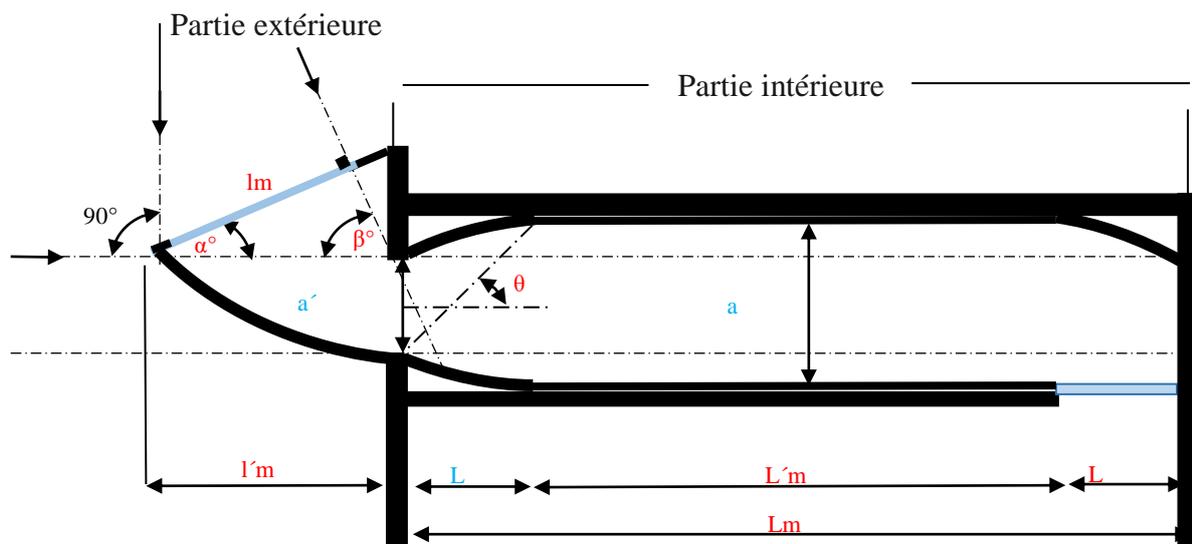


Figure 5.2 : Profil théorique de système anidolique (Source : Auteur)

La deuxième partie se compose de deux collecteurs intérieurs dans le cas de dispositif anidolique intégré et de deux collecteurs et d'un conduit lumineux qui se termine par un élément anidolique (situé au fond de local) dans le cas d'un plafond anidolique intégré. Des light duct sont ajoutés dans le deuxième cas et leurs nombres, dispositions et dimensions dépendent de niveau d'éclairage demandé et de la profondeur de local. Pour déterminer le profil théorique de cette partie, on doit connaître et calculer les paramètres suivants :

a' = La largeur de l'ouverture de sortie (sera dimensionner par la simulation)

a = La largeur de conduit lumineux qui se calcul selon l'équation (5.1) donnée par Welford et Winston (1989) :

$$2a' = a / \sin \theta \quad (5.1)$$

θ = L'angle formé par le plan horizontal avec la ligne reliant le bord d'entrée avec le bord de sortie opposé (voir figure 5.3), qui est calculé à partir de l'équation (5.2):

$$\text{Tan } \theta = \cos \gamma / \sin \gamma = [(1/2) * (a)] / [(2/3) * (L)] \quad (5.2)$$

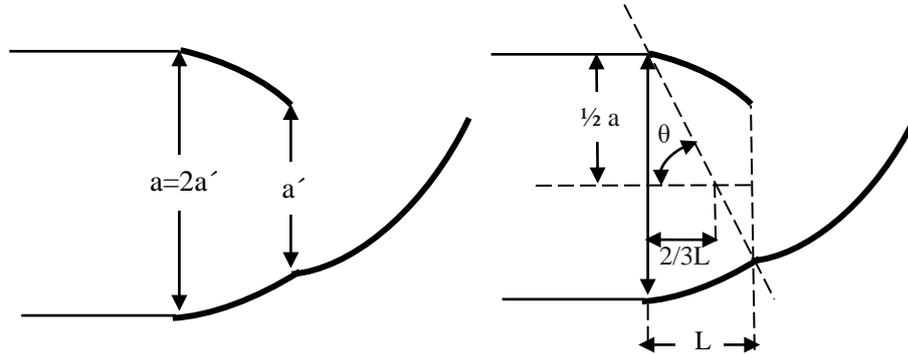


Figure 5.3 : La détermination de l'angle θ : A gauche, les variables liées à la largeur du système ; A droite, les variables liées à la longueur de l'élément anidolique extérieur (Source : Auteur)

La longueur L, la largeur a et a' du système ont évidemment un impact sur les préoccupations esthétiques et spatiales, mais l'angle θ a un effet sur la répartition de la lumière à l'intérieur de l'espace.

$L'm$ = La longueur du conduit entre les deux éléments anidolique.

L = se calcule selon la formule (5.3) de Welford et Winston (1989):

$$L = (a' + a) \cot \theta \quad (5.3)$$

$Lm = x$, qui dépend de la profondeur de local et on l'obtient par l'équation (5.4) :

$$L'm = Lm - (2 * L) \quad (5.4)$$

f = est la distance focale de chaque parabole qui est calculée selon la formule (5.5) :

$$f = a' \times (1 + \sin \theta) \quad (5.5)$$

Pour le dimensionnement du capteur anidolique extérieur, on peut utiliser l'équation absolue (5.6) donnée par Welford et Winston (1989) pour le calcul de capteur parabolique composé CPC. Où : a' et θ ont la même définition que ci-dessus, y est l'axe horizontal du profil de système et z est l'axe vertical du profil de système.

$$0 = (z \cos \theta + y \sin \theta)^2 + 2a'(1 + \sin \theta)^2 z - 2a' \cos \theta (2 + \sin \theta) y - a'^2 (1 + \sin \theta) (3 + \sin \theta) \quad (5.6)$$

Comme il y'a la possibilité d'utiliser la formule (5.5) pour le calcul de la distance focale de la parabole extérieure. Pour le calcul de l'angle θ' (voir figure 5.4), la largeur intérieure (L) est remplacée par la largeur extérieure (l_m) selon les formules (5.7) et (5.8) suivantes :

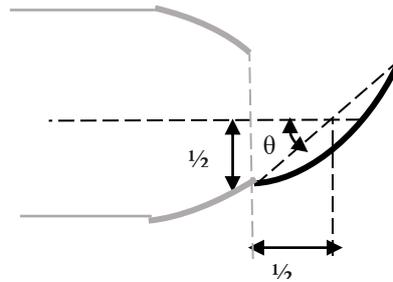


Figure 5.4 : Détermination de l'angle θ' (Source : Auteur)

$$\text{Tan } \theta' = \cos_{\gamma} / \sin_{\gamma} \quad (5.7)$$

$$\text{Tan } \theta' = [(1/2) * (a')] / [(1/2) * (lm)] \quad (5.8)$$

5.1.3. Le pré-dimensionnement de système anidolique

5.1.3. a. La détermination des variables

Pour le pré-dimensionnement de notre système anidolique, on doit tout d'abord établir et identifier une série des variables. Pour cela, on a se référé au dimensionnement d'un modèle qui existe déjà, celui qui a été construit par S. Wittkopf et al (2010). Le choix de ce modèle était fait par rapport à sa performance d'une part, car ce dispositif a été testé par EPFL et prouvé son efficacité sous des conditions spécifiques et d'autre part, par sa conception qui est faite de deux éléments anidoliques situés à l'intérieur et un collecteur anidolique extérieur.

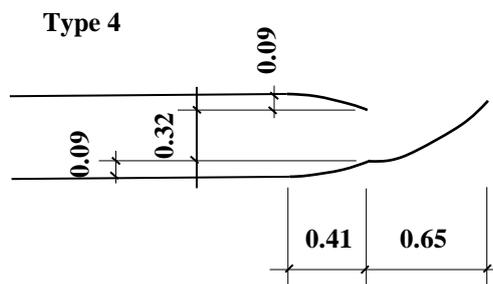


Figure 5.5 : Système anidolique de 'Type 4' (Source : Wittkopf et al 2010)

Au cours de cette modélisation, les caractéristiques climatiques de la ville de Biskra en termes de latitude ont été prises en considération pour le calcul de la largeur de l'ouverture d'entrée (lm). A partir de ce modèle 'Type 4', on a proposé des valeurs graduelles supérieures et inférieures à celle de valeur de référence (les valeurs indiquées dans la figure 5.5) de (+) ou (-) 5cm (0.05m) pour la configuration de chaque modèle. Les valeurs proposées concernent les éléments suivants : largeur de l'ouverture d'entrée (a'), largeur de collecteur extérieur ($l'm$) et largeur de l'élément anidolique intérieur (L).

5.1.3. a1. Les valeurs proposées pour la largeur de l'ouverture d'entrée (a')

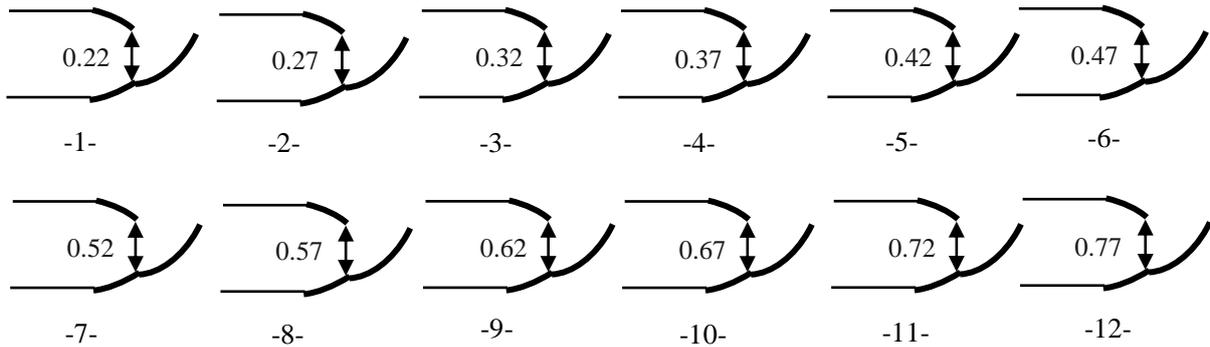


Figure 5.6: Les valeurs proposées pour l'élément (a') (Source : Auteur)

5.1.3. a2. Les valeurs proposées pour la largeur de l'élément anidolique extérieur ($l'm$)

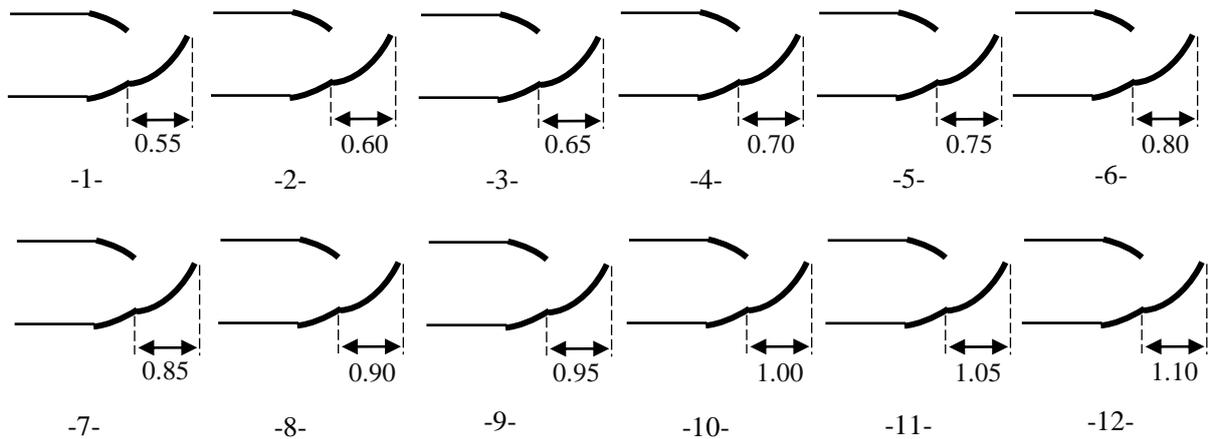


Figure 5.7: Les valeurs proposées pour l'élément ($l'm$) (Source : Auteur)

5.1.3. a3. Les valeurs proposées pour la largeur de l'élément anidolique intérieur (L)

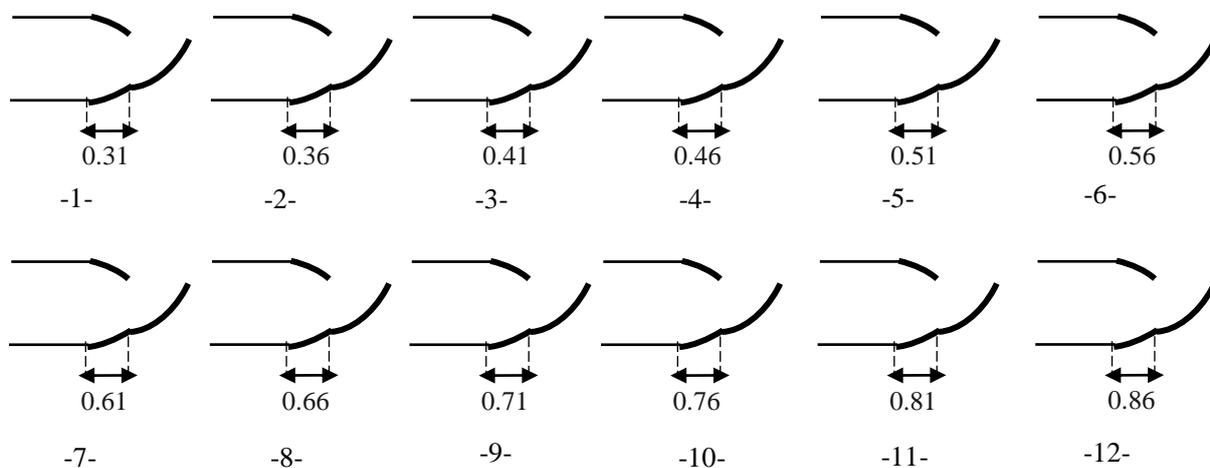


Figure 5.8: Les valeurs proposées pour l'élément (L) (Source : Auteur)

A partir de ces variables, on peut donc identifier et calculer (à partir des équations de Welford et Winston, 1989) les autres paramètres nécessaires pour la détermination de profile dimensionnel des systèmes anidoliques qui seront utilisés dans la simulation pour pouvoir ensuite ressortir un modèle spécifique à notre climat lumineux. L'ensemble de ces paramètres nous ont permis de dégager douze modèles pour le système anidolique intégrée et douze autres pour le plafond anidolique intégré.

5.1.3. b. Les modèles proposés à la simulation

Le tableau suivant présente les dimensions des différents éléments composant le système anidolique pour douze modèles :

Tableau 5.1 : Dimensions des 12 modèles de système anidolique proposés pour la simulation informatique (Source : Auteur)

Les modèles	a'	l'm	L	a	tan θ	θ°	lm	sinβ	sin θ	f int	tan θ°	θ°	sin θ°	f' ext
1	0,22	0,55	0,31	0,44	1,06	46	0,31	0,56	0,72	0,38	0,40	21,8	0,37	0,30
2	0,27	0,6	0,36	0,54	1,13	48	0,34	0,56	0,74	0,47	0,45	24,2	0,41	0,38
3	0,32	0,65	0,41	0,64	1,17	49	0,36	0,56	0,75	0,56	0,49	26,1	0,44	0,46
4	0,37	0,7	0,46	0,74	1,21	50	0,39	0,56	0,76	0,65	0,53	27,9	0,46	0,54
5	0,42	0,75	0,51	0,84	1,24	51	0,42	0,56	0,77	0,74	0,56	29,2	0,48	0,62
6	0,47	0,8	0,56	0,94	1,26	51	0,45	0,56	0,77	0,83	0,59	30,5	0,5	0,71
7	0,52	0,85	0,61	1,04	1,28	52	0,48	0,56	0,78	0,93	0,61	31,3	0,52	0,79
8	0,57	0,9	0,66	1,14	1,30	52	0,50	0,56	0,78	1,01	0,63	32,2	0,53	0,87
9	0,62	0,95	0,71	1,24	1,31	52	0,53	0,56	0,78	1,10	0,65	33	0,54	0,95
10	0,67	1	0,76	1,34	1,32	52	0,56	0,56	0,78	1,19	0,67	33,8	0,55	1,04
11	0,72	1,05	0,81	1,44	1,33	53	0,59	0,56	0,79	1,29	0,69	34,6	0,56	1,12
12	0,77	1,1	0,86	1,54	1,34	53	0,62	0,56	0,79	1,38	0,70	34,9	0,57	1,21

5.1.4. Les données relatives au climat

La conception avec la lumière du jour et l'analyse de la performance des stratégies d'éclairage naturel nécessite de connaître la lumière disponible, qui peut être déterminée à partir de mesures de éclairement horizontal globale horaire, de éclairage direct et diffus ou de la distribution de la luminance dans la voûte céleste. Notre cas d'étude est la ville de Biskra qui se trouve au sud-est de l'Algérie. Elle se caractérise par un climat froid en hiver, chaud et sec en été. La température maximale atteint 42°C en été (durant le mois de juillet) et la température minimale est en moyenne de 7°C en hiver (pendant le mois de janvier). La moyenne annuelle de la température est de 21.5°C. La précipitation moyenne annuelle est très faible, environ 8.8 mm. Elle atteint sa valeur maximale durant le mois de septembre (20mm). Les précipitations en été sont presque nulles (2 mm seulement en juillet). L'humidité moyenne annuelle est de 46%. Les caractéristiques géographiques de la ville sont :

- La latitude = 34.48 N.
- La longitude = 5.44 N.
- L'altitude qui est égale à 128 m au-dessus du niveau de la mer.

Selon "le programme SSE de la NASA" (Surface Météorologique et de l'Energie Solaire) (<http://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/>), la couverture nuageuse moyenne annuelle de la ville de Biskra est comprise entre un minimal de 31.3% et un maximal de 56% avec une moyenne annuelle de 49.21%, ce qui indique que le ciel dominant dans cette région est de type intermédiaire (Daich et al, 2014). La ville de Biskra possède ainsi un potentiel solaire et un gisement lumineux très important, compris entre 1825 et 2190 kWh/m²/an, qui nécessitent une exploitation rationnelle et durable afin de répondre en grande partie à la demande énergétique du bâtiment. Elle est parmi les régions les plus ensoleillées dans le monde avec 14 heures d'insolation par jour et la quantité moyenne de rayonnement solaire atteint 797.58 KW/m² (Daich, 2011). L'éclairement extérieur global reçu sur un plan horizontal à Biskra est la somme d'un éclairage direct qui est dû au soleil et d'un éclairage diffus qui est dû au ciel. La quantité d'éclairement directe est plus grande que celle de l'éclairement diffus ; cela est dû à la nature du ciel qui est intermédiaire et proche du clair ou la composante diffuse est très faible.

Il est à noter qu'au cours des simulations suivantes, nous allons travailler sur les valeurs d'éclairement extérieur global (EEG) durant la période comprise entre 9h à 16h, ce qui permettra d'évaluer effectivement l'efficacité du système anidolique dans des conditions climatiques et lumineuses particulières.

Chapitre 5 : Vers un modèle spécifique de système anidolique

Le tableau 5.2 présente les valeurs d'éclairement extérieur global (EEG) reçu sur une surface horizontale dans la région de Biskra :

Tableau 5.2 : Les valeurs de EEG reçues à Biskra sur une surface horizontale calculées (Source : Daich, 2011)

Mois	Heures													
	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
Janvier			4514	17034	31515	43024	49039	48172	41384	29133	14559			
Février			8850	25302	42701	55612	62349	62349	55612	42701	25302	8850		
Mars		4107	19459	40000	58839	70961	76821	76350	69511	56010	36528	16320		
Avril	1403	13470	33742	54560	70430	79619	82560	81760	76387	63801	45272	23531		
Mai	6134	21911	43235	62949	76806	82640	82912	83108	80028	69294	51563	30095	11324	762
Juin	7179	21500	39994	57021	68314	72708	71585	72426	71533	63946	49583	31287	14020	2924
Juillet	4661	14858	28323	40858	49980	54152	54266	54459	53409	47815	37418	24121	11316	2524
Aout	2108	11749	26159	40822	51960	57839	59578	59363	56573	48956	36635	21666	8234	
Sept		8281	23190	39765	53157	61011	63863	62669	56693	45817	29963	13639	2391	
Octobre		4821	19820	39141	55626	65618	69353	66014	56349	40149	21167	5530		
Nov		724	10945	26554	41879	51818	55252	52008	41130	27231	11419	968		
Déc			5518	17757	31121	40974	45205	43192	35361	22859	9504	520		

5.2. La simulation numérique

5.2.1. La Méthodologie

La quantité et le comportement de la lumière du jour dans un espace dépend de nombreuses variables physiques de ‘quantité’, qui affectent la quantité de la lumière qui entre dans l'espace et de ‘distribution’ qui déterminent la diffusion de cette lumière sur le plan de travail. En utilisant le programme Ecotect, modèle de forme rectangulaire a été créée. Le but de ces simulations est donc de trouver une bonne combinaison des variables afin de créer un ensemble de lignes directrices et des recommandations pour que le système anidolique soit une solution appropriée pour une bonne conception d'éclairage. La propagation de la lumière a été simulée avec le logiciel Ecotect ; cet outil de calcul est basé sur la méthode de tracé de rayon (ray tracing) qui prend en compte toutes les réfractions et les réflexions de rayon lumineux à la rencontre de chaque interface. Les paramètres de simulation sont :

- La location : la ville de Biskra (latitude 34.48 N, longitude 5°44N).
- La zone : Urbaine.
- Date de simulation : 21 décembre à 10h.
- L'éclairement extérieur : 31125lux.
- La précision de tracé de rayon (ray-tracing) : Very high.
- Le type du ciel : ciel couvert.
- Le logiciel de simulation : "Ecotect v5.5" (Fonction : Daylight Analysis).
- Les matériaux :
 - Les murs : paroi intérieure (Brick Timber Frame (Réflectance : 0,60)).
 - La dalle : paroi intérieure (ConcSlab OnGround (Réflectance : 0,40)).
 - Le plafond (1) : (suspend concrete ceiling (Réflectance extérieure : 0,92)).
 - Le plafond (2) : (Plaster insulation suspender (Réflectance intérieure : 0,92)).
 - Le plafond anidolique : (panel : mirror : (Réflectance intérieure : 0,80), (Réflectance extérieure : 0,10)).

Les premières validations ont été obtenues grâce à des simulations numériques. Un modèle de référence, qui contient de deux fenêtres classiques, a été construit et comparée avec un autre identique équipé une fois d'un plafond anidolique intégré et avec un deuxième par un système anidolique intégré. Les modèles utilisés dans cette simulation représentent un espace de bureau qui nécessite un niveau d'éclairement entre 300lux et 500lux. Pour permettre une comparaison des performances de l'éclairage naturel, les deux modèles ont des

Chapitre 5 : Vers un modèle spécifique de système anidolique

caractéristiques intérieures métriques, géographiques et photométriques strictement identiques qui sont les suivantes :

- Dimensions du modèle : 6m (largeur) x 12m (profondeur) x 3.5m (hauteur).
- Dimensions de fenêtres : 1.2m (largeur) x 1.2m (hauteur). La façade contient deux fenêtres situées sur le petit côté dans la même façade, qui prennent environ 26% de la surface totale de mur, orientées vers le nord. Le vitrage utilisé est un simple vitrage de **80%** de transmission.
- Les surfaces intérieures sont achromatiques et peint en blanc (murs, plafond) et un gris pour le sol. La réflexion des parois intérieures sont les suivantes : 40% pour le plancher, 60% pour les murs latéraux et 96% pour le plafond.

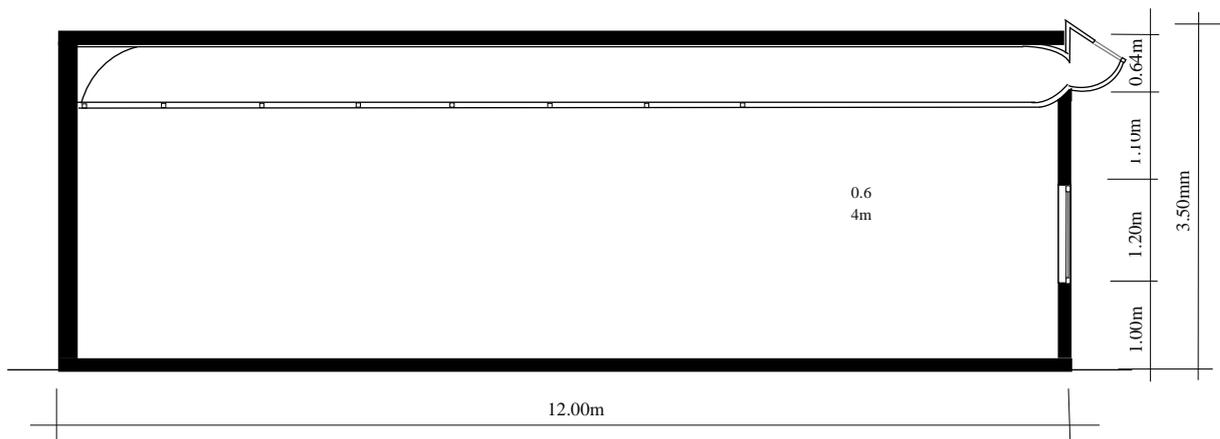


Figure 5.9 : Coupe sur le modèle expérimental (Source : Auteur)

L'éclairage horizontal est calculé dans 25 points, qui sont régulièrement espacés le long des deux axes avec un pas de 0.5m. Le premier axe se trouve au centre de la fenêtre alors que le deuxième est situé au centre du modèle. Le niveau d'éclairage est calculé sur un plan de travail situé à une hauteur de 0,9m au-dessus du sol. De plus, la simulation va pas prendre en considération les obstructions extérieurs et l'aménagement intérieur pour ne pas interrompre les résultats. L'objectif de cette simulation est de choisir les configurations de système anidolique les plus efficaces et les plus performantes du point de vue du confort visuel et de la consommation d'énergie.

Cette évaluation va être faite par la connaissance et la comparaison des valeurs de l'éclairage (en lux), des valeurs de FLJ (en %) ainsi que le pourcentage d'autonomie d'énergie.

5.2.2. Le modèle de référence

A partir des résultats présentés dans la figure 5.10 et selon le niveau d'éclairage reçu, le local peut être divisé en trois zones. La première s'étale sur deux mètres de profondeur à partir de la fenêtre et se caractérise par un éclairage très fort supérieur à 700lux. La deuxième représente la zone de confort lumineux avec des valeurs d'éclairages situés entre 200lux et 500lux ; elle couvre la surface située entre 2m et 3.5m. La première et la deuxième zone représentent la zone passive dont le local est éclairé naturellement par la fenêtre. La troisième zone est celle la plus grande, elle commence à partir de 3.5m jusqu'au fond de modèle. Cette dernière reçoit des valeurs d'éclairage très faibles inférieures à 100lux.

On en conclut que l'éclairage du modèle équipé de deux fenêtres classique (modèle de référence) est mal réparti. Le local reçoit une grande quantité de lumière par la fenêtre qui se dégrade rapidement vers le fond du local pour atteindre 60lux seulement. La zone passive représente 29% de la surface totale. La zone non passive couvre 71%. La zone de confort couvre une surface très restreinte de 8% seulement. A partir de 3m de profondeur, l'éclairage reçu à l'intérieur du modèle est inférieur à 300lux, un seuil qui n'est pas recommandé pour l'éclairage des bureaux. Cette mauvaise répartition de l'éclairage contribue à l'inconfort visuel par l'apparition de problème d'éblouissement, causé par l'éclairage excessif qui provient de la fenêtre, ainsi que le fort contraste résultant de la grande différence des niveaux d'éclairage entre l'avant et l'arrière zone du local. L'éclairage artificiel et le recours à l'utilisation des protections solaires seront nécessaires dans cette situation.

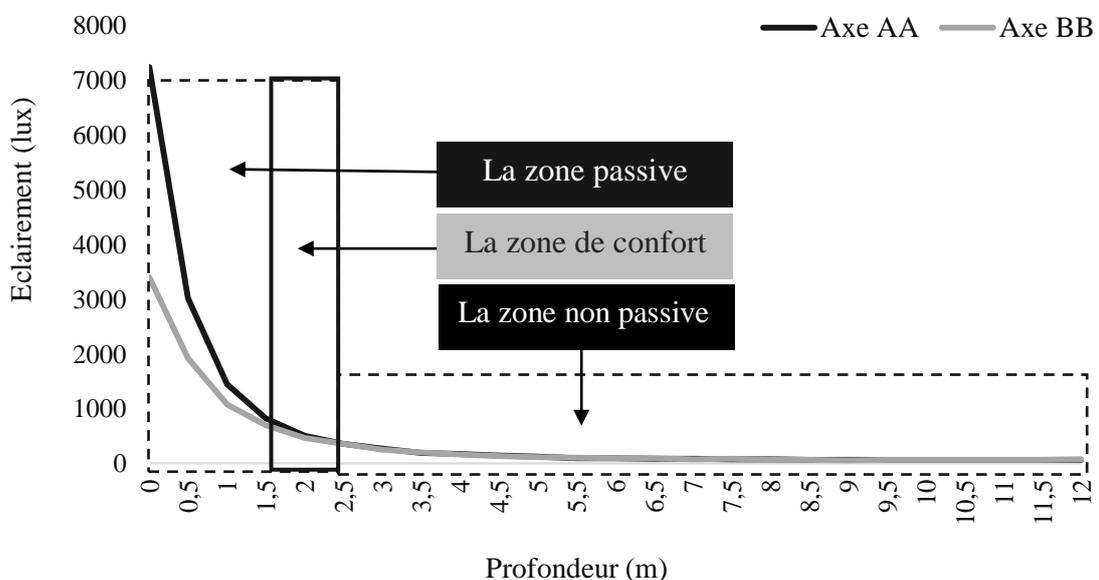


Figure 5.10 : Simulation de modèle de référence (Source : Auteur)

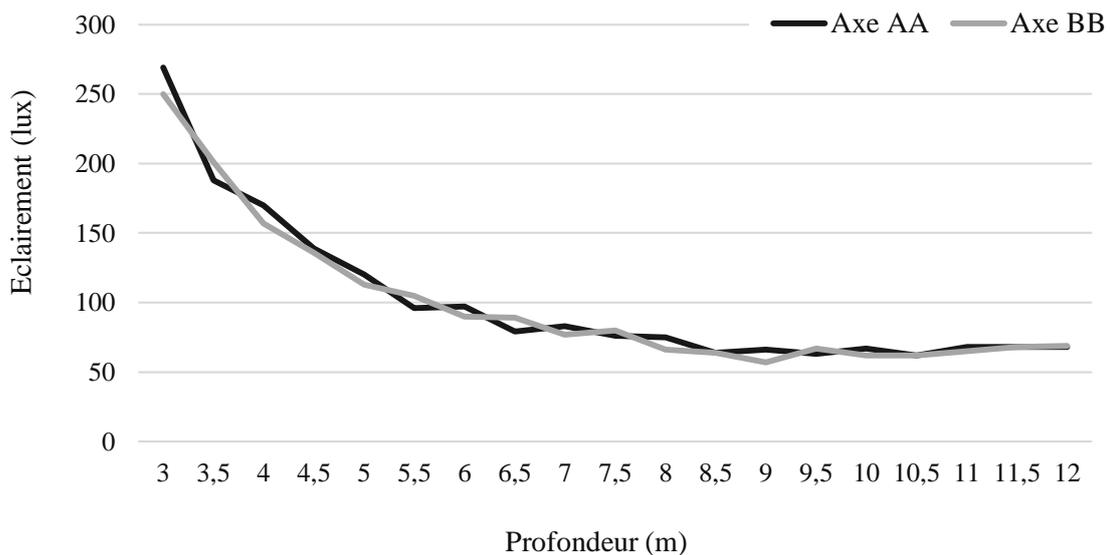


Figure 5.11 : Simulation du modèle de référence à partir de 3m de la fenêtre (Source : Auteur)

5. 2. 3. Le modèle de Plafond Anidolique Intégré ‘PAI’

5. 2. 3. a. La simulation du ‘modèle 1’

Le premier modèle est celui qui porte les dimensions les plus petites. Après avoir ajouté le plafond anidolique intégré (PAI) au modèle de référence, l'éclairage intérieur du local est devenu plus élevé et plus uniforme surtout en profondeur. Cette augmentation de l'éclairage est dû à l'effet du plafond anidolique qui transporte la lumière et la faire diffuser par les light duct. Dans les trois premiers mètres, l'éclairage est assuré par la fenêtre seulement, le PAI ne participe pas à l'éclairage de cette zone (zone passive). A partir de cette distance, le système anidolique est la seule source d'éclairage, il augmente et régularise le niveau d'éclairage pour qu'il soit entre 300lux et 500lux dans les deux axes (AA et BB). Ainsi, l'analyse du graphe de la figure 5.12 et celui de la figure 5.13 indique que l'ajout de PAI dans un local avait augmenté considérablement la zone de confort lumineux, réduit la surface de la zone passive et exclut totalement la zone non passive. La zone de confort devient plus large et s'étale sur une surface de $60m^2$, elle occupe plus de $\frac{3}{4}$ de la surface totale et couvre 83%. La zone passive couvre seulement 17% et ne comprend pas la zone de confort.

De plus, les résultats montrent que les valeurs d'éclairage les plus élevés sont situés sous les ouvertures de conduit lumineux (light duct) et l'éclairage intérieur est compris entre 328lux et 635lux. On constate également que l'éclairage de l'axe AA est plus stable et offre une lumière plus uniforme que celui de l'axe BB. Dans ce dernier, on a remarqué des forts pics d'éclairage surtout entre 8m et 11m de profondeur et l'écart de lumière atteint les

200lux (voir figure 5.13). Cela est dû à l'augmentation de la réflexion par les parois latérales au fond du local ainsi que la réflexion de la lumière par le plafond.

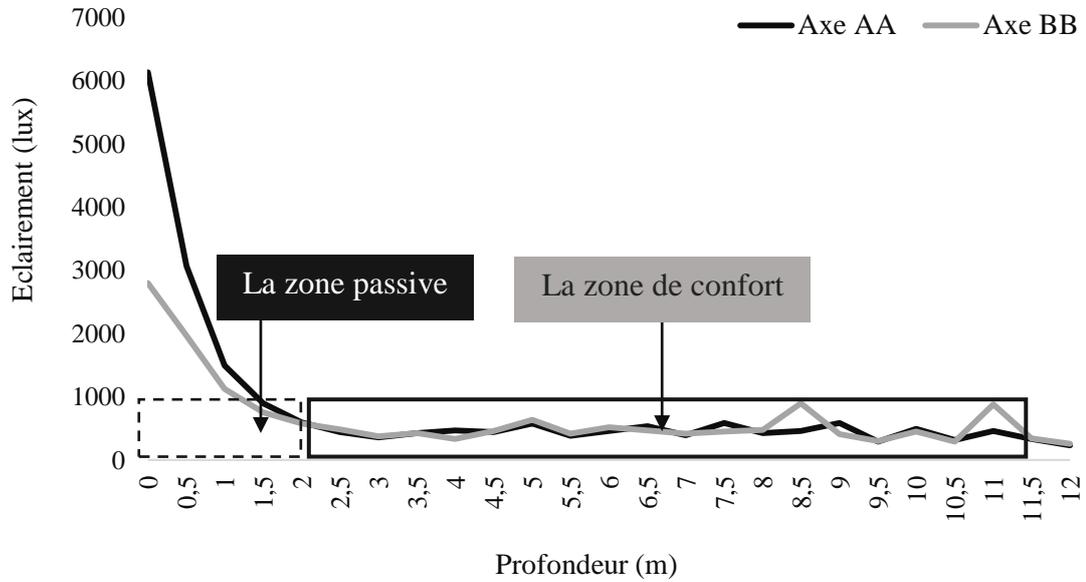


Figure 5.12 : Simulation du 'modèle 1' (Source : Auteur)

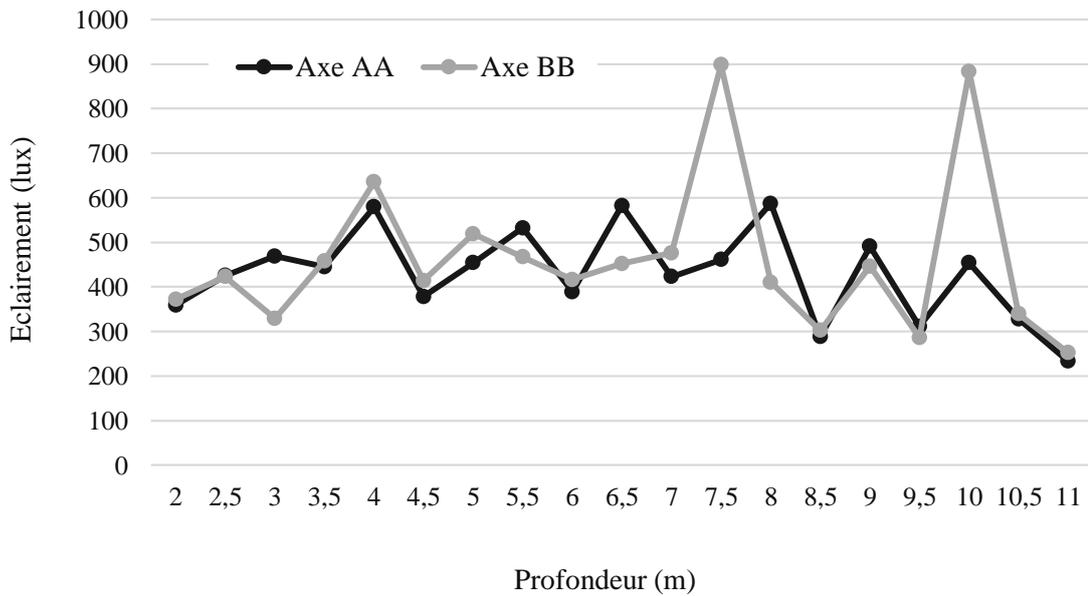


Figure 5.13 : Simulation du 'modèle 1' à partir de 2m de la fenêtre (Source : Auteur)

5. 2. 3. b. La simulation du modèle '2' et '3'

Les deux courbes suivent la même allure au niveau des axes AA et BB et l'éclairage du modèle 3 est légèrement plus élevé. La zone de confort est la même pour les deux modèles et identique à celle de modèle 1(83%). Le niveau d'éclairage atteint grâce aux modèles 2 et 3

de PAI est compris entre 282 et 618 lux qui sont répartie sur deux zones ayant une distribution uniforme (zone 1 et 2). De plus, la courbe AA est la plus stable de point de vue d'uniformité, car les valeurs d'éclairément sont très rapprochées, situés entre 400lux et 500lux alors que dans la surface couverte par l'axe BB, on constate une différence remarquable entre les points qui atteint 260lux.

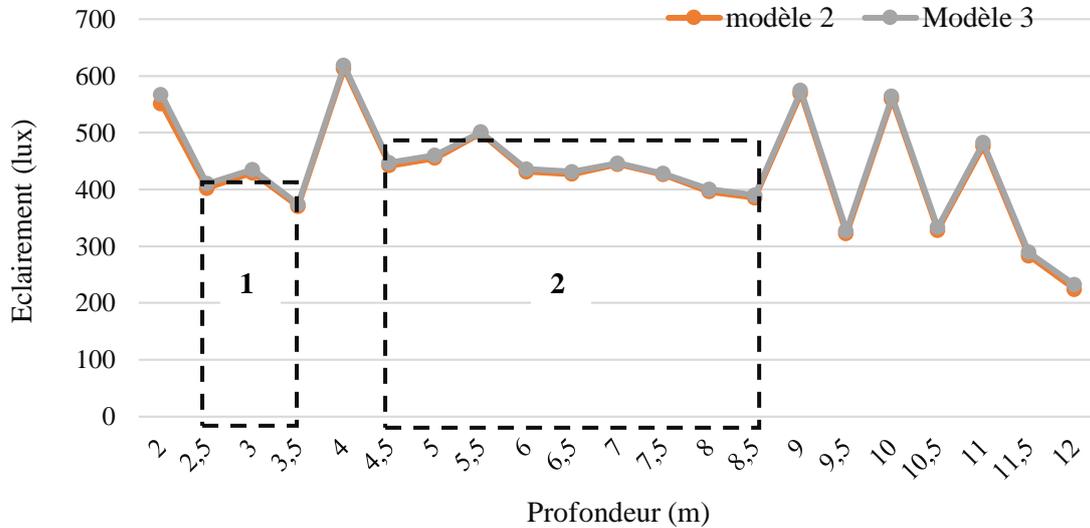


Figure 5.14 : Simulation du modèle '2' et '3' au niveau de l'axe AA (Source : Auteur)

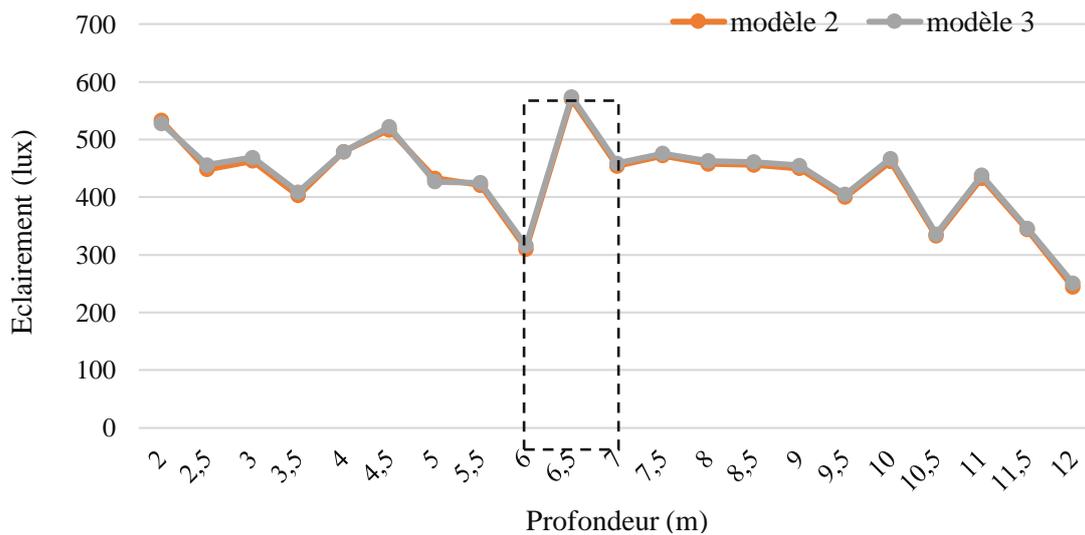


Figure 5.15 : Simulation du modèle '2' et '3' au niveau de l'axe BB (Source : Auteur)

5. 2. 3. c. La simulation du modèle '4' et '5'

Les résultats de cette simulation est presque similaire à la précédente. Les modèles 4 et 5 de PAI permettent au local de recevoir un éclairément légèrement plus important que celui reçu par les modèles 2 et 3 de PAI. Il est situé entre 290lux et 630lux et la zone de confort reste

presque pratiquement la même (83%). La comparaison des graphes nous a permis de déduire que le modèle 4 du PAI donne des résultats meilleurs par rapport au modèle 5. Il permet une répartition plus uniforme de la lumière et réduit également le grand écart d'éclairement entre les points au niveau des deux axes. Il est à noter aussi que la lumière fournie au niveau de l'axe AA par les deux configurations est plus homogène que celle fournie par l'axe BB.

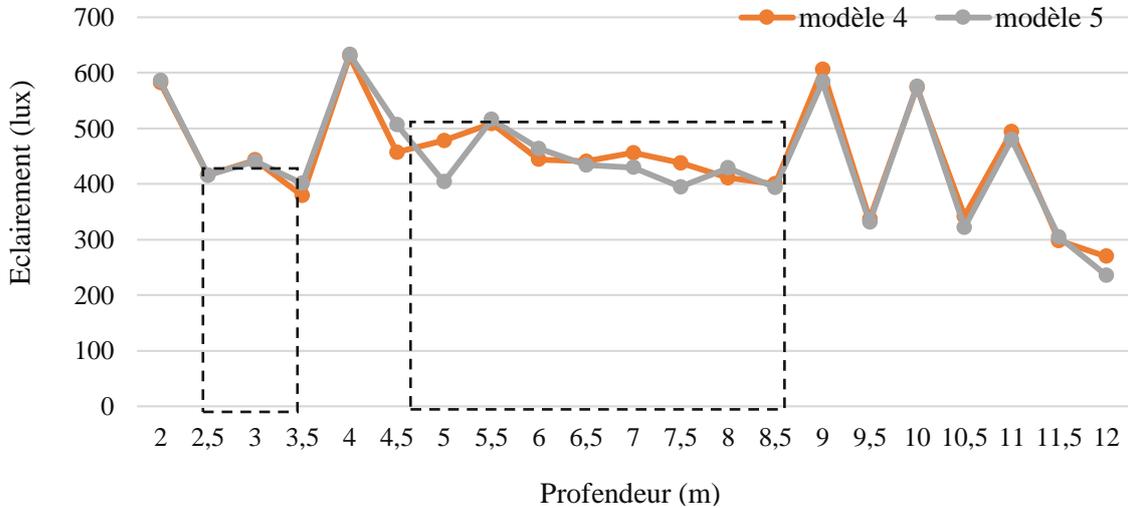


Figure 5.16 : Simulation du modèle '4' et '5' au niveau de l'axe AA (Source : Auteur)

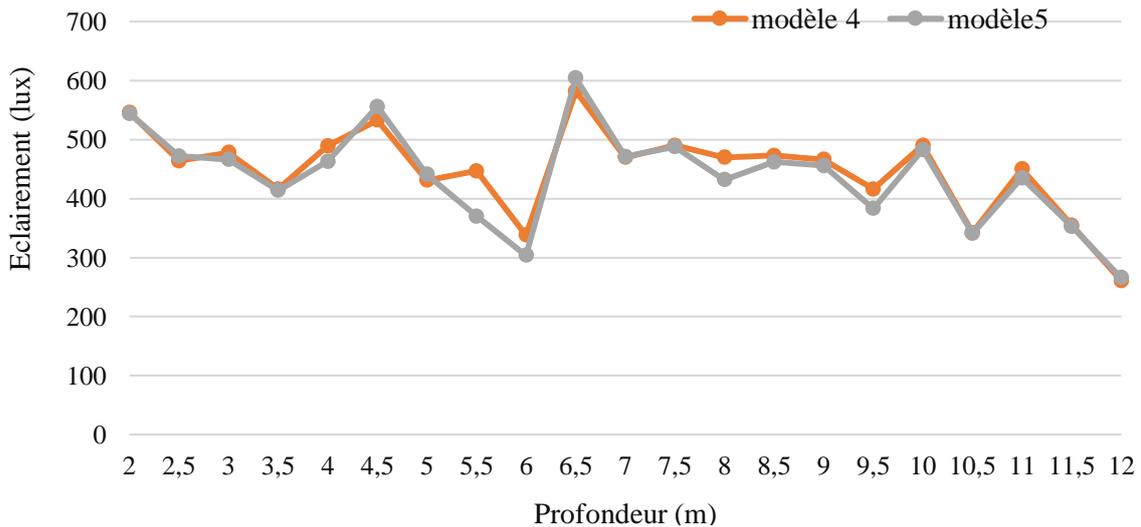


Figure 5.17 : Simulation du modèle '4' et '5' au niveau de l'axe BB (Source : Auteur)

5. 2. 3. d. La simulation du modèle '6' et '7'

L'analyse des résultats des modèles 6 et 7 de PAI sont aussi identiques à ceux obtenus par les modèles simulés précédemment (1, 2, 3, 4 et 5). Ils permettent de couvrir la même zone de confort lumineux et de fournir un niveau d'éclairement compris entre 297lux et 629lux qui s'étale régulièrement dans deux zones de largeur différentes. On constate aussi une petite

différence d'éclairement entre ces deux modèles et le modèle 6 est le meilleur en termes de rapprochement des valeurs d'éclairement. On observe également que la lumière au niveau de l'axe BB atteint des valeurs optimum pour l'éclairage d'un bureau mais sa distribuée reste non homogène par rapport à l'axe AA.

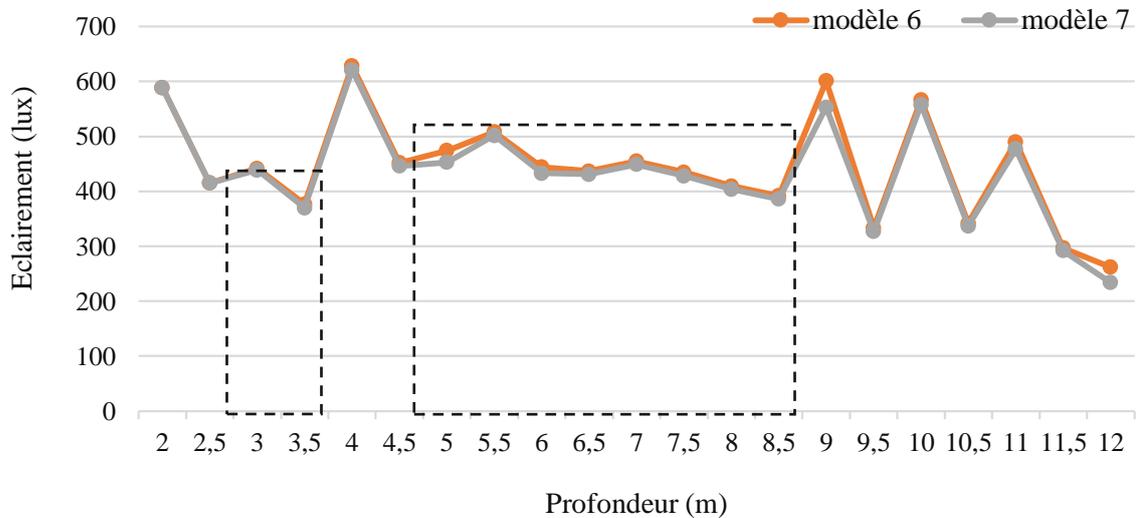


Figure 5.18 : Simulation du modèle '6' et '7' au niveau de l'axe AA (Source : Auteur)

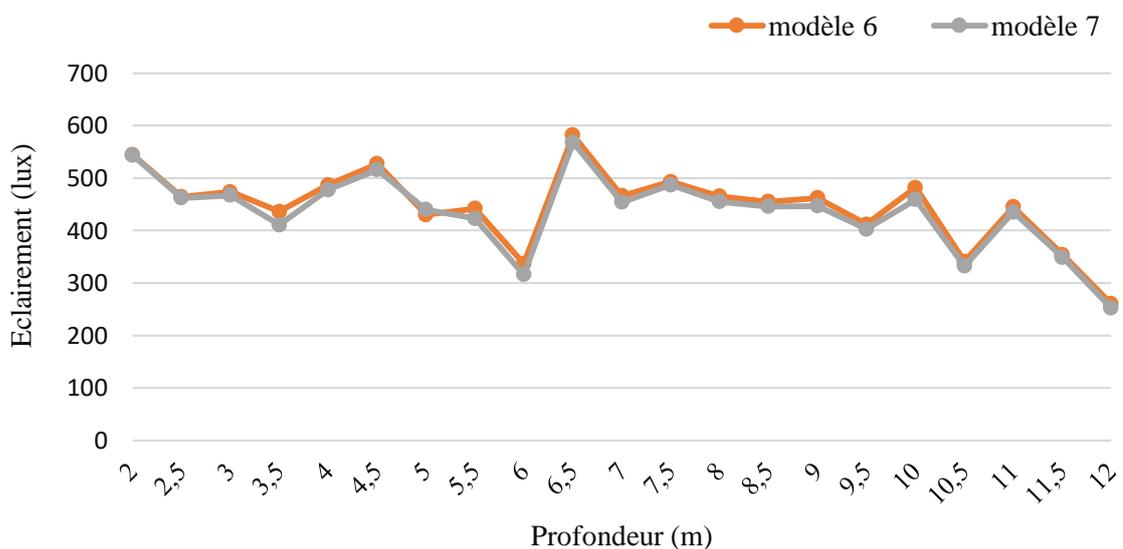


Figure 5.19 : Simulation du modèle '6' et '7' au niveau de l'axe BB (Source : Auteur)

5. 2. 3. e. La simulation du modèle '8' et '9'

Les valeurs d'éclairages obtenues par les modèles 8 et 9 de PAI sont très proches aux résultats antérieurs. La zone de confort lumineux reste toujours la même et le niveau d'éclairage acquis est situé entre 292lux et 625lux. Au niveau de l'axe AA, les deux modèles donnent des résultats très rapprochés et le modèle 8 est le plus performant dans cet

axe. Par contre, la distribution lumineuse au niveau de l'axe BB est perturbée par le grand écart d'éclairage entre les différents points et le modèle 8 dans ce cas est le meilleur car il permet une bonne répartition de la lumière.

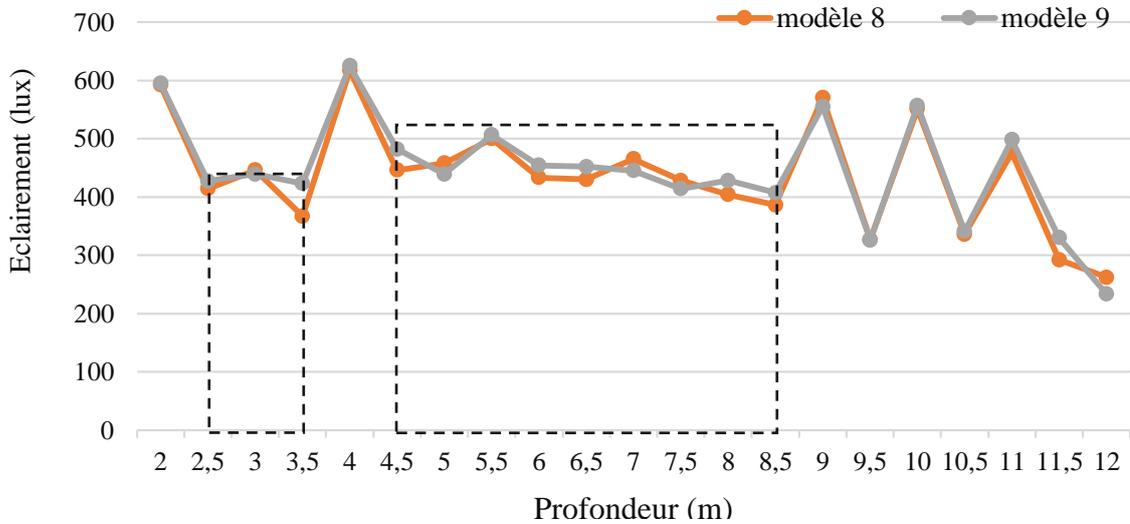


Figure 5.20 : Simulation du modèle '8' et '9' au niveau de l'axe AA (Source : Auteur)

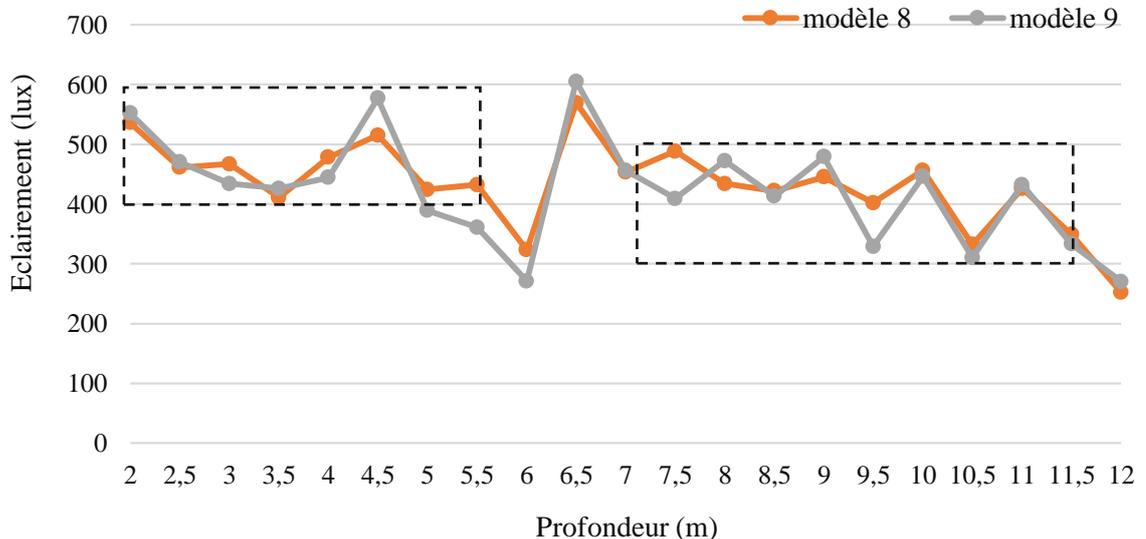


Figure 5.21 : Simulation du modèle '8' et '9' au niveau de l'axe BB (Source : Auteur)

5. 2. 3. f. La simulation du modèle '10' et '11'

Les résultats de la simulation ont montré que les modèles 10 et 11 de PAI suivent une logique similaire que les autres modèles qui ont été déjà analysés et la zone de confort visuel s'étale sur la même surface. Par rapport à l'axe AA, les deux modèles éclairent de la même manière le local avec un éclairage compris entre 282lux et 618lux. Par contre, l'analyse des graphes au niveau de l'axe BB indique que le modèle 10 offre une courbe plus stable et plus uniforme

que le modèle 11 et l'écart d'éclairage entre les différents points du local est faible ce qui permet d'avoir une uniformité de la répartition de la lumière.

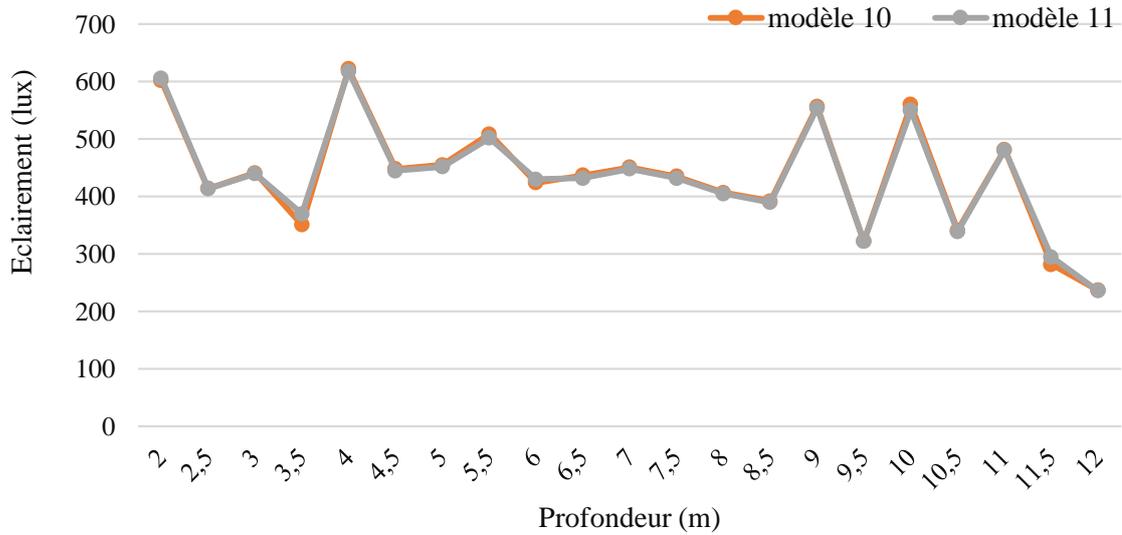


Figure 5.22 : Simulation du modèle '10' et '11' au niveau de l'axe AA (Source : Auteur)

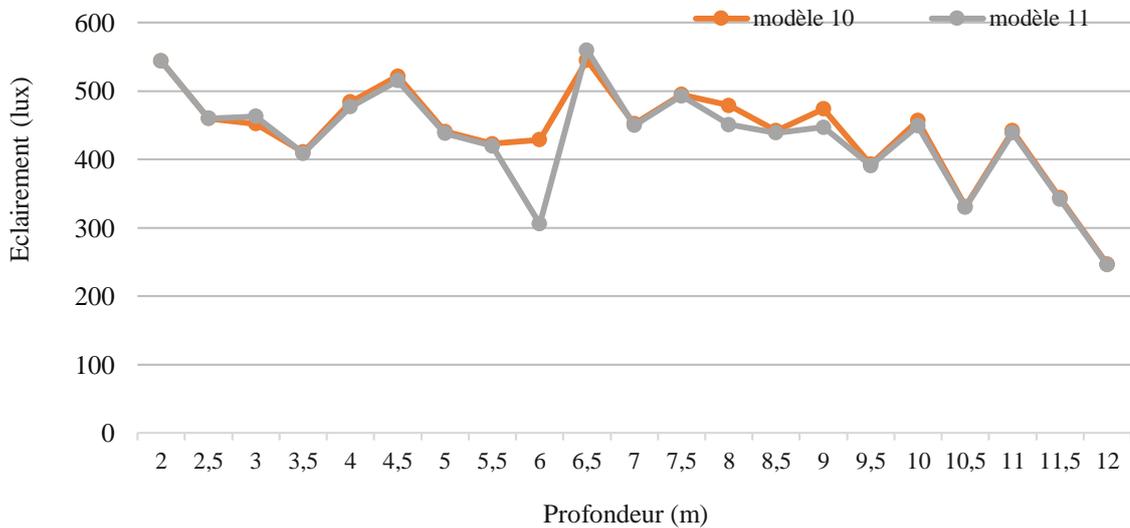


Figure 5.23 : Simulation du modèle '10' et '11' au niveau de l'axe BB (Source : Auteur)

5. 2. 3. g. La simulation du modèle '12'

Il est clair que les graphes du modèle 12 du PAI suivent la même distribution de la lumière dans le local au niveau des deux axes. La zone de confort est toujours identique aux modèles précédents. Cependant, l'analyse de la courbe de l'éclairage le long de l'axe AA montre qu'il est plus homogène et compris entre 292lux et 614lux alors que le niveau d'éclairage acquit par ce modèle dans l'axe BB se trouve entre 339lux et 551lux.

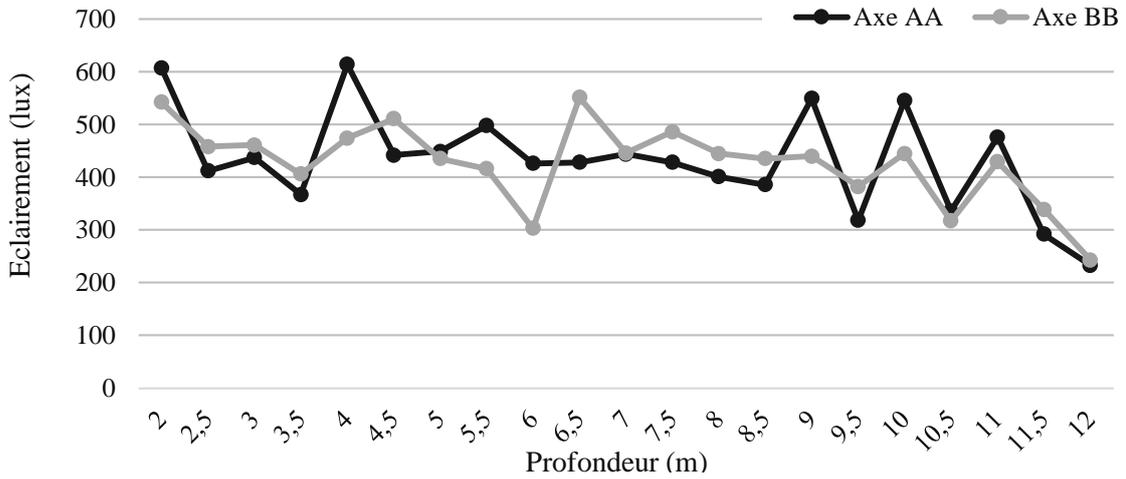


Figure 5.24 : Simulation du modèle '12' au niveau de l'axe AA et BB (Source : Auteur)

5. 2. 3. h. Comparaison des 12 Modèles de PAI

Après avoir étudié le rendement de chaque modèle indépendamment, une analyse plus approfondie est nécessaire pour déterminer le ou les modèles du plafond anidolique intégré qui pourraient améliorer effectivement les performances lumineuses d'un local d'une profondeur de 12m. A partir des résultats des figures suivantes 5.24 et 5.25, on peut observer trois zones de différents niveaux de distribution lumineuse. La première se caractérise par une lumière très forte qui se diminue rapidement en s'éloignant de la fenêtre, ce qui signifie que cette dernière constitue la principale source d'éclairage. La deuxième occupe le milieu de l'espace avec un éclairage uniforme compris entre 300lux et 500lux mais au niveau de l'axe BB, cette zone est réduite, car l'emplacement de cette dernière se trouve au milieu du local et n'est pas au milieu de la fenêtre. Le fond du local est éclairé par une lumière non stable et mal répartie mais avec une bonne quantité située entre 250lux et 500lux.

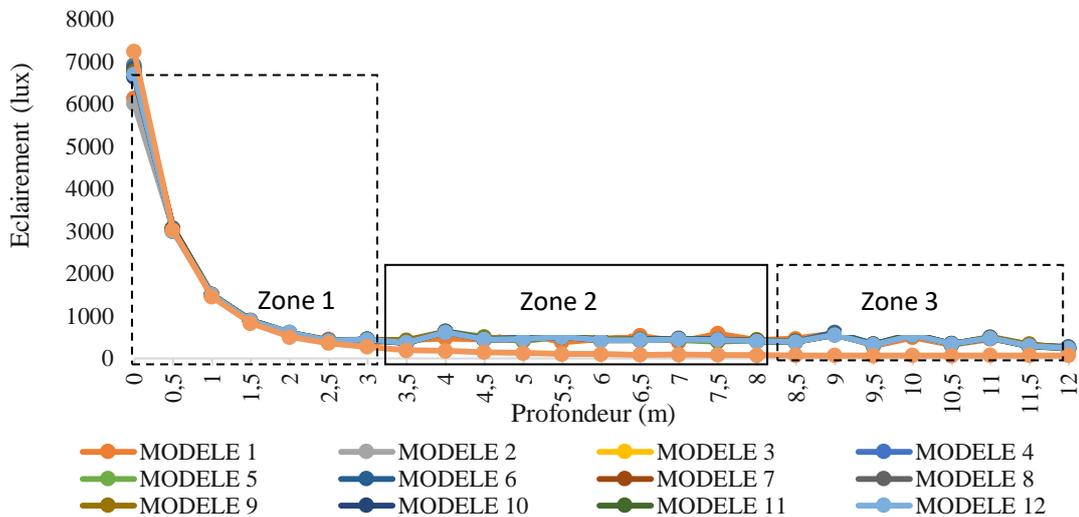


Figure 5.25 : Simulation des douze modèles de PAI au niveau de l'axe AA (Source : Auteur)

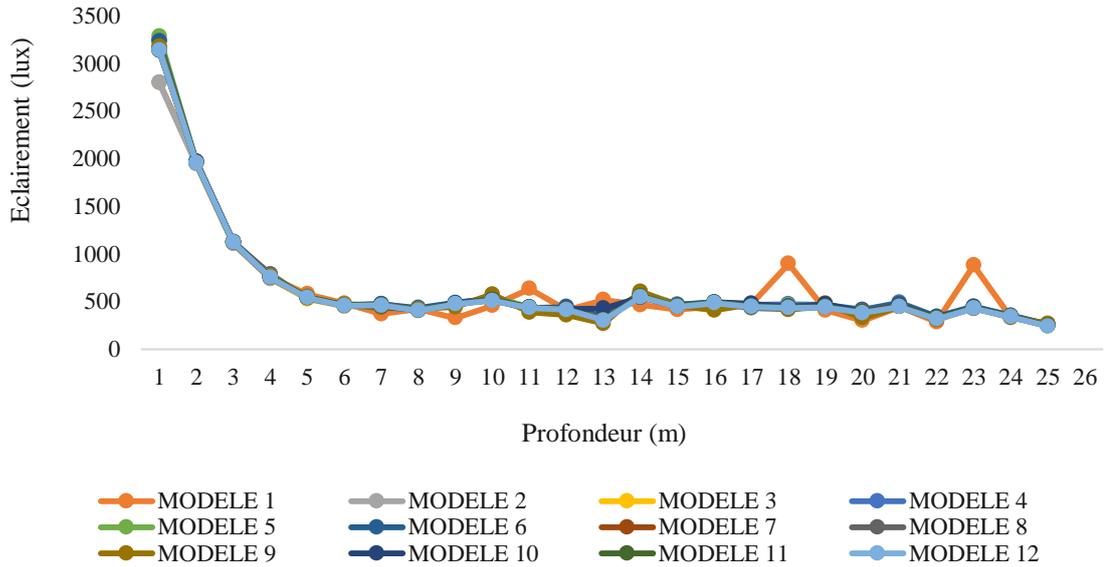


Figure 5.26 : Simulation des douze modèles de PAI au niveau de l'axe BB (Source : Auteur)

A partir de ces observations, on peut déduire que le système du plafond anidolique intégré contribue essentiellement à l'éclairage de la deuxième et la troisième zone. De plus, une analyse plus détaillée entre 3m et 8m de profondeur au niveau des deux axes a été proposé afin de mieux comprendre le comportement et le rendement quantitatif de chaque modèle. L'objectif est de faire ressortir les configurations optimales parmi les douze modèles de PAI.

Les données présentées dans les figure 5.26 et 5.27 ont montré une tendance très similaire pour la distribution de la lumière dans les douze modèles bien qu'il y'avait une légère différence pour les niveaux d'éclairage. La zone de confort est identique, elle couvre 83% de la surface totale du local et l'éclairage à partir de 2m est compris entre 250lux et 600lux. On remarque aussi que les niveaux d'éclairages sont très rapprochés bien que la largeur de conduit lumineux (la hauteur de faux plafond) diffère de 0.44m à 1.54m ainsi que la largeur de l'ouverture d'entrée varie de 0.44m à 0.77m. Cela est dû, du fait que plus l'ouverture est devenue plus grande, plus la lumière subit un nombre important de réflexion, ce qui diminue la quantité de lumière à l'arrivé de light duct.

Cependant, au niveau des deux axes, il est clair que la performance la plus basse est constatée dans le modèle 1 et le modèle 5 tandis que le modèle 3, 7, 10 et 11 apparaissent les plus optimales. La sélection de ces modèles était basée d'une part sur l'uniformité de répartition de la lumière et d'autre part sur l'écart entre le niveau l'éclairage le plus fort et le plus faible. Par rapport aux autres modèles, le local est éclairé de la même manière avec un écart d'éclairage qui est parfois très important atteint 200lux entre le modèle 1 et le modèle 5.

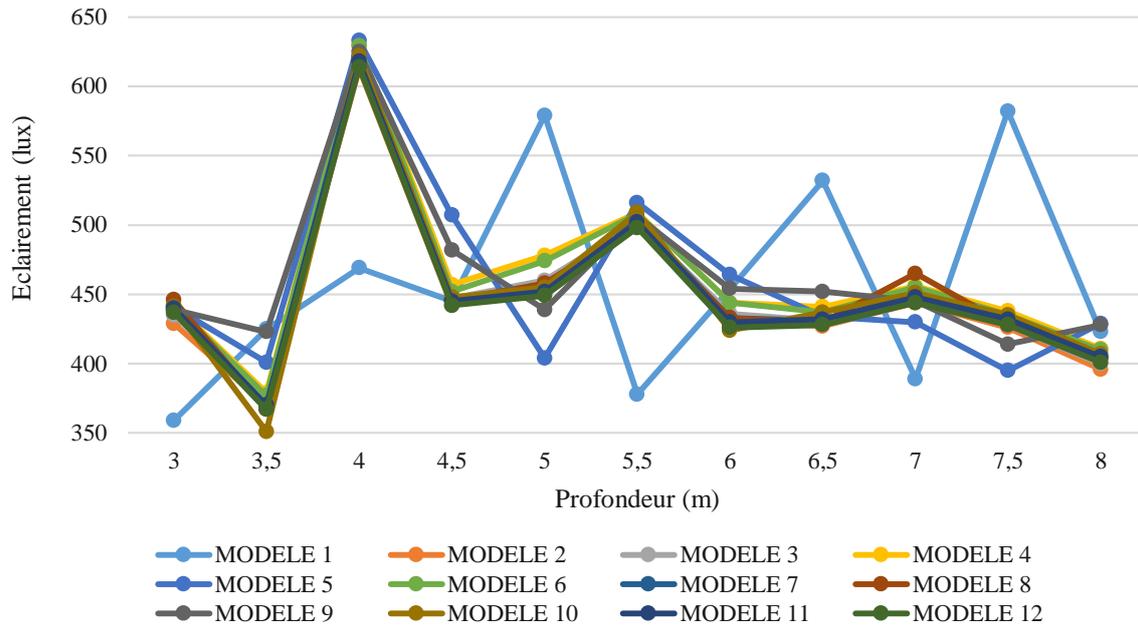


Figure 5.27 : Simulation des douze modèles au niveau de l'axe AA à partir de m3 de la Fenetre (Source : Auteur)

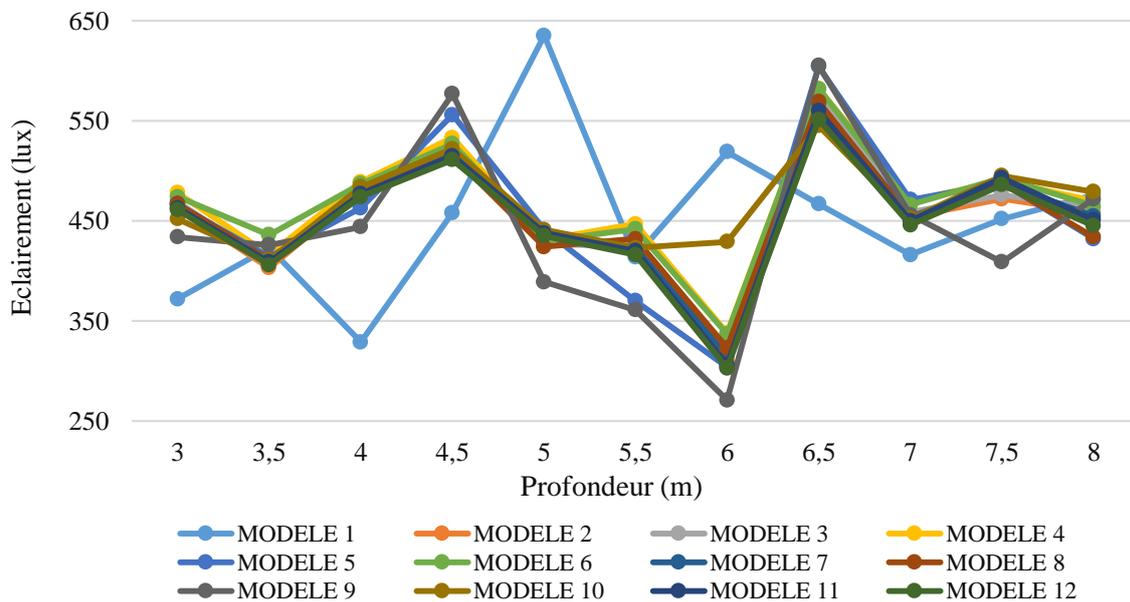


Figure 5.28 : Simulation des douze modèles au niveau de l'axe BB à partir de m3 de la Fenetre (Source : Auteur)

Une deuxième investigation sur les quatre modèles 3,7, 10 et 11 de PAI, qui ont été sélectionnés au cours de l'étude précédente, a été établie pour choisir celui le plus performant. Les résultats de calcul ont montré que ces modèles éclairent l'espace de la même manière à l'exception du modèle 11 qui sort de l'ordinaire au niveau de l'axe BB. Le tableau 5.3 montre aussi une comparaison quantitative des niveaux d'éclairage obtenus par des quatre

configurations de PAI. On peut observer que le modèle 3 donne de bons résultats car, d'une part, l'écart entre les valeurs d'éclairage maximales et minimales est le plus faible de l'ordre de 244lux et d'autre part, l'éclairage moyen reçu au niveau de l'axe AA et BB est similaire, ce qui conduit à l'homogénéité de la répartition de la lumière dans toute la surface du local.

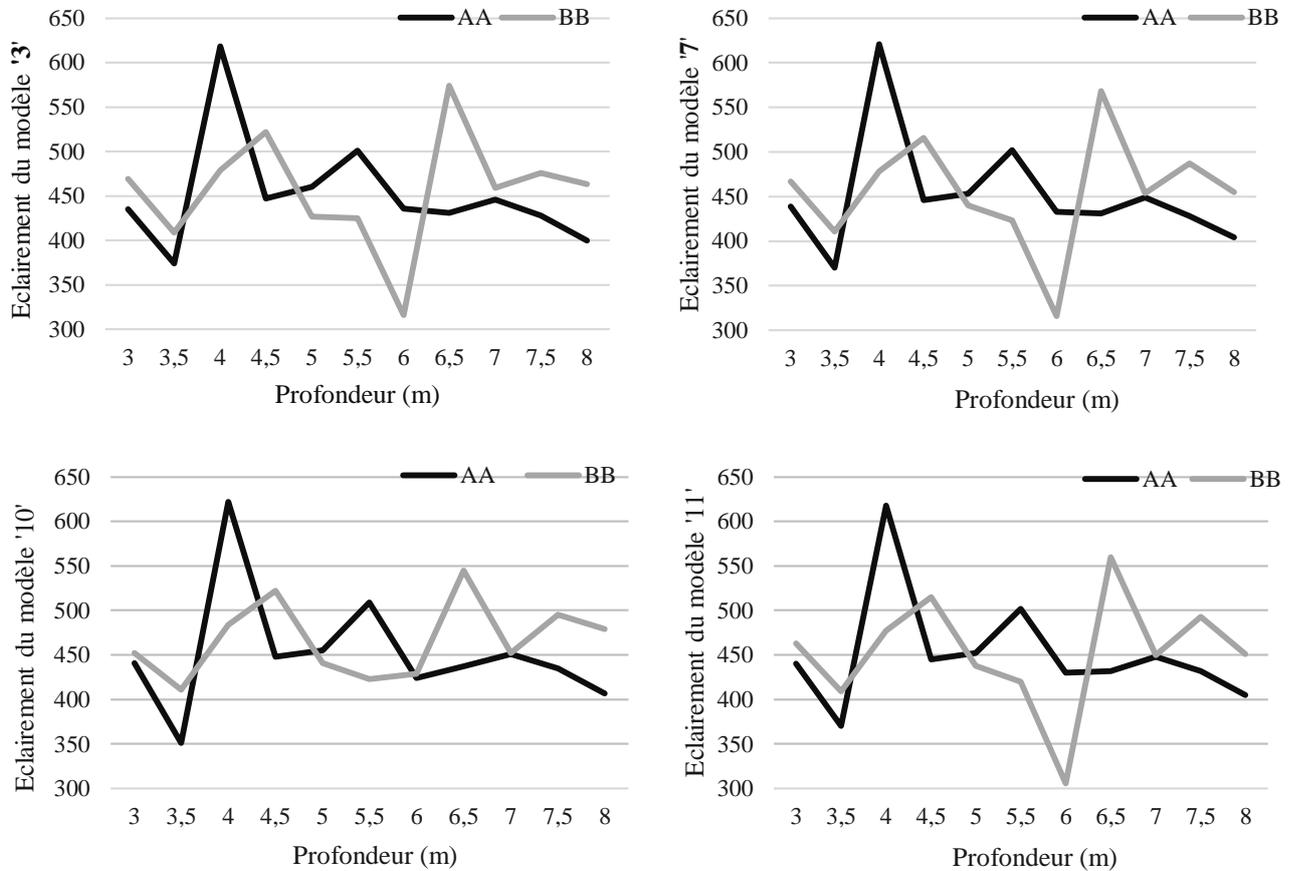


Figure 5.29 : Comparaison du rendement quantitatif des modèles 3, 7, 10 et 11 au niveau de l'axe BB (Source : Auteur)

Tableau 5.3 : Comparaison des résultats obtenus par les modèles 3, 7, 10 et 11 (Source : Auteur)

Modèles	Modèle 3	Modèle 7	Modèle 10	Modèle 11
Le niveau d'éclairage max, min	374 < E < 618	316 < E < 621	351 < E < 622	306 < E < 618
Eclairage moyen dans l'axe AA	452lux	457lux	452lux	452lux
Eclairage moyen dans l'axe BB	456lux	456lux	466lux	452lux

On en conclut que, du point de vue quantitative, cette étude confirme que le modèle 3 de système de plafond anidolique intégré, qui présente les caractéristiques suivantes : $a=0.64m$, $a^{\prime}=0.32m$, $l_m=0.36m$, $l^{\prime}_m= 0.65m$, $L=0.41m$, $\theta=0.49^{\circ}$, $f_{int}=0.56m$ et $F_{ext}=0.46m$ est le plus optimal. Il permet, sous des conditions climatiques et lumineuses spécifiques, d'assurer un bon niveau d'éclairage et une bonne répartition de la lumière du jour sans que sa configuration (dimensions) influe sur l'aspect architectural du bâtiment.

5. 2. 4. Les modèles de système anidolique intégré 'SAI'

Un troisième test a été proposé afin d'étudier la performance du système anidolique intégré (SAI) et la possibilité d'utiliser ce dernier dans un climat chaud sous des conditions lumineuses spécifiques. Pour ce fait, douze configurations de SAI ont été utilisés dans cette simulation. Ce système est installé au-dessus de la fenêtre à une hauteur de 3m et composé d'un collecteur parabolique extérieur et de deux miroirs paraboliques intérieurs qui réfléchissent la lumière captée qui vient de l'extérieur vers le plafond qui la redirige vers le fond. Les dimensions de ces modèles sont similaires à celles utilisés pour simuler les plafonds anidolique intégré et qui ont été calculé précédemment (voir tableau 5.1).

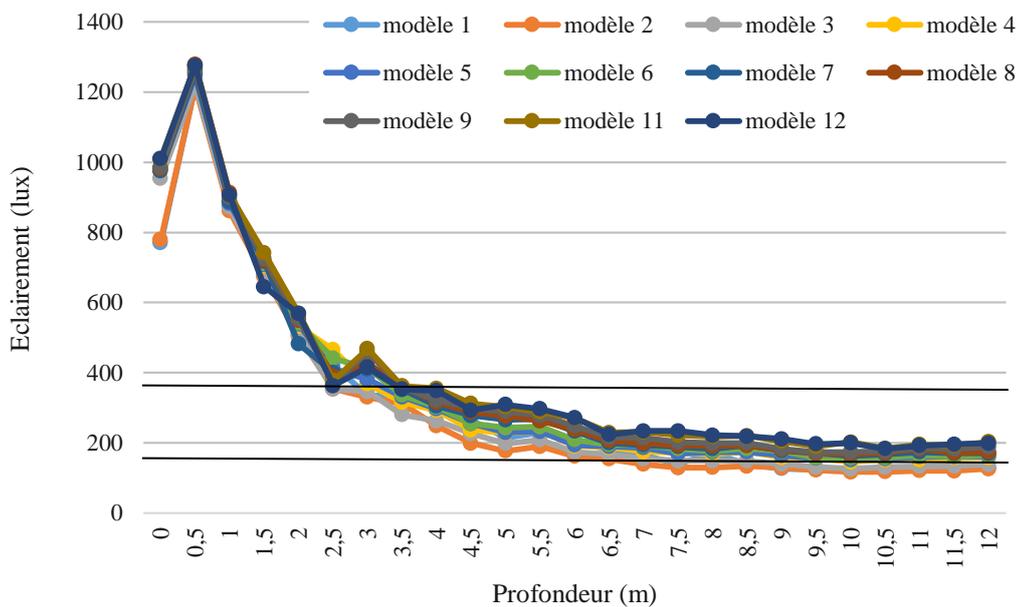


Figure 5.30 : Comparaison des douze modèles de système anidolique intégré (Source : Auteur)

Les résultats présentés dans la figure 5.30 montrent que les dimensions du système influencent considérablement le niveau d'éclairage transmis au fond du local. Plus la largeur de l'orifice d'entrée est grande plus la quantité de lumière transporter est importante. Les graphes montrent une différence de 80lux entre le modèle 1 (petite ouverture) et le modèle

12 (grande ouverture). Il est à constater également que la zone de confort constitue environ 30% seulement de la surface totale du local qui est inférieur à celle obtenue par le plafond anidolique intégré (85%). Cette zone se situe entre 2m et 6m de la fenêtre et partir de delà le niveau d'éclairage est au-dessous de 300lux. Cette simulation indique aussi que le modèle 11 du SAI a donné les valeurs d'éclairage les plus élevés par rapport aux autres mais elle reste insuffisante pour assurer le confort visuel pour l'usage des bureaux.

5.2.5. Comparaison du rendement de PAI, SAI et modèle de référence

L'analyse des figures montrent une différence remarquable entre les niveaux de l'éclairage que reçoit le local avec les deux modèles anidolique. Dans les trois premiers mètres de la fenêtre, on constate une convergence des courbes de PAI, de SAI et du modèle de référence qui ensuite divergent marquant un écart considérable. Cela signifie que l'ouverture est la source principale de la lumière et les deux modèles anidolique ne contribuent pas à l'éclairage de cette zone. De plus, dans cet intervalle (de 0m à 3m), le modèle de référence reçoit un éclairage compris entre 7000lux et 250lux qui ensuite diminue laissant plus de trois quart de l'espace avec un éclairage au-dessous de 200lux. Donc, la quantité de lumière reçue par ce modèle est insuffisante pour assurer le confort visuel des usagers et conduit fortement à l'éblouissement.

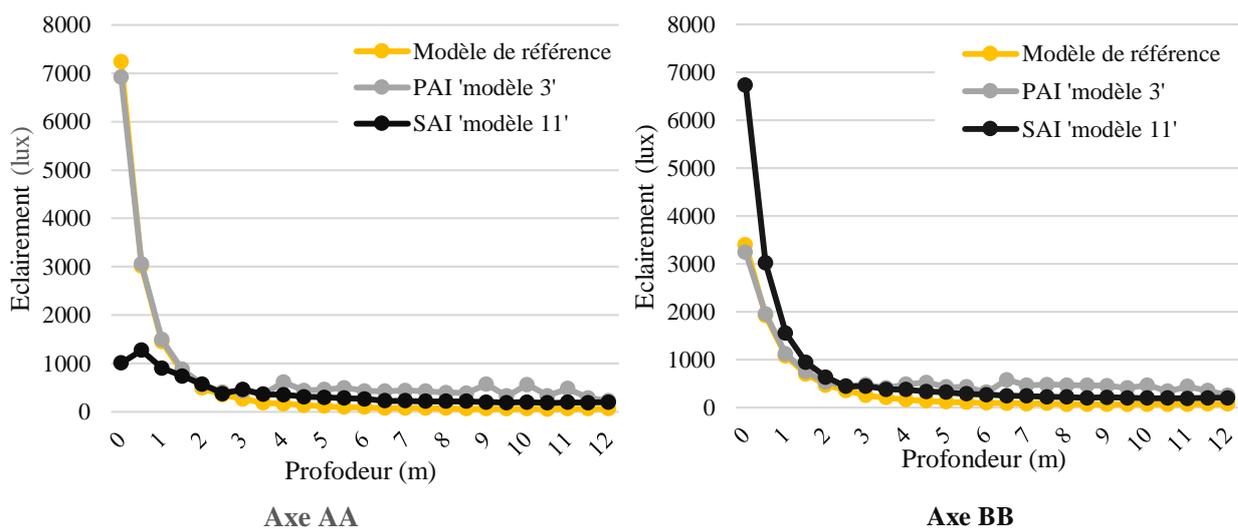


Figure 5.31 : Comparaison entre le rendement du modèle 3 de PAI, du modèle 11 de SAI et le modèle de référence au niveau de l'axe AA et BB (Source : Auteur)

A partir de 3m de profondeur, il est clair que les valeurs d'éclairage du modèle de référence sont très faibles par rapport au deux modèles anidolique. L'écart atteint 200lux avec le SAI et plus de 400lux avec le PAI. On remarque également que le SAI permet d'augmenter le niveau

d'éclairage au fond du local et ces valeurs sont doublées par rapport au modèle de référence, mais elles restent inférieures à 300lux. Les résultats montrent aussi que le PAI modelé augmente de manière significative le niveau d'éclairage surtout au fond du local où les valeurs sont 8 fois plus élevée à 9 m de la fenêtre. Il permet aussi d'atteindre des valeurs d'éclairage comprises entre 300lux et 500lux. Cette simulation confirme la capacité du plafond anidolique intégré pour éclairer naturellement les espaces de grande profondeur tout en assurant une bonne répartition de l'éclairage et une atmosphère lumineuse satisfaisante et confortable pour l'usage du bureau.

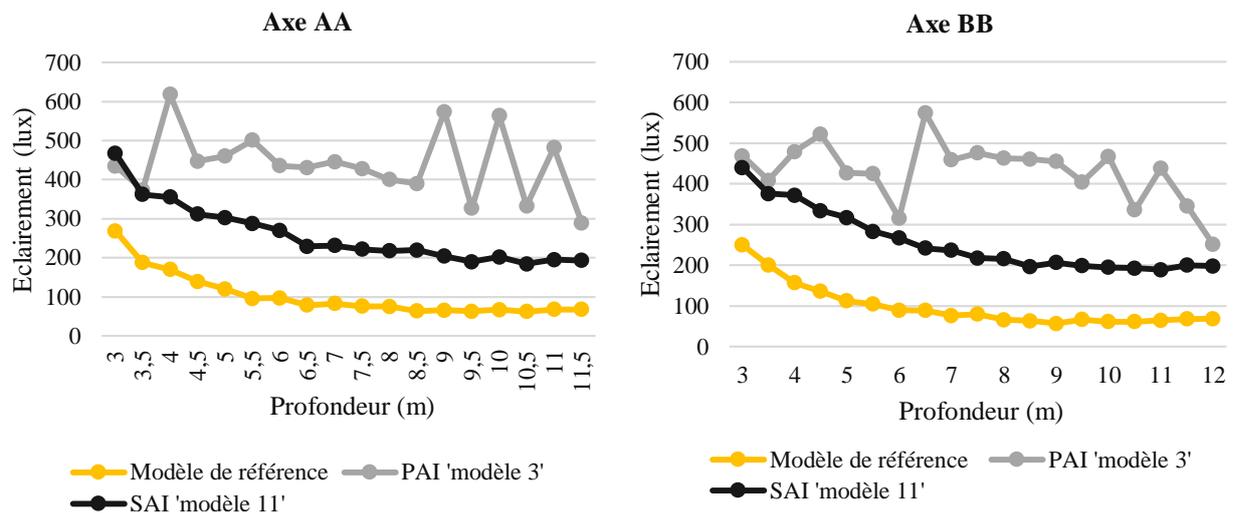


Figure 5.32 : Comparaison entre le rendement du modèle 3 de PAI, du modèle 11 de SAI et le modèle de référence à partir de 3m de profondeur (Source : Auteur)

5. 3. Les formules mathématiques spécifiques au système modélisé ‘PAI modèle 3’

Afin de faciliter l'évaluation de la lumière naturelle dans un espace équipé d'un modèle particulier du plafond anidolique intégré, et dans des conditions géométriques et lumineuses spécifiques, on a eu recours à un logiciel de programmation Matlab (Matlab, 2012). Le programme Curve Fitting Tool (cftool) de MATLAB a été utilisé dans le but de faire ressortir une formule mathématique permettant de connaître le niveau de l'éclairage dans n'importe quel point de notre modèle construit. Il est à noter que les formules mathématiques présentées ci-dessous concernent seulement les points contenant dans les deux courbes passant par les axes AA et BB et qui sont déjà été défini au cours de l'étude précédente. Pour cela, et afin d'aboutir à des résultats fiables, on a identifié deux formules dont chacune correspond à un axe donné (axe AA et axe BB). Dans la fenêtre de commande (Command Window), on fait entrer toutes les données qui concernent le niveau d'éclairage de chaque axe (tableau 8 et 9) et la profondeur qui correspond à chaque points de mesure. Le programme cftool nous a

permet de tracer la courbe, qui est présenté dans l'interface graphique, reliant tous les points ploter et il suffit de choisir le type de modèle et le polynomial (de 1 à 9) pour trouver la courbe qui passe pratiquement sur l'ensemble de points afin de pouvoir déterminer la formule mathématique adéquate pour chaque axe. Les coefficients présentés dans les deux formules mathématiques suivantes sont fiable à 95%. Pour la courbe AA, le modèle utilisé est de type linéaire avec un polynomial de 7 alors que au niveau de la courbe BB, le modèle est toujours linéaire mais avec un polynomial de 8.

5. 3. 1. La formule de la courbe AA

Tableau 5.4 : Valeurs d'éclairément données par le modèle 3 de PAI, axe AA (Source : Auteur)

profondeur	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Axe AA	6923	3054	1493	879	567	410	435	374	618	447	460	501	436
profondeur	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	
Axe AA	431	446	428	400	390	574	327	564	333	482	289	232	

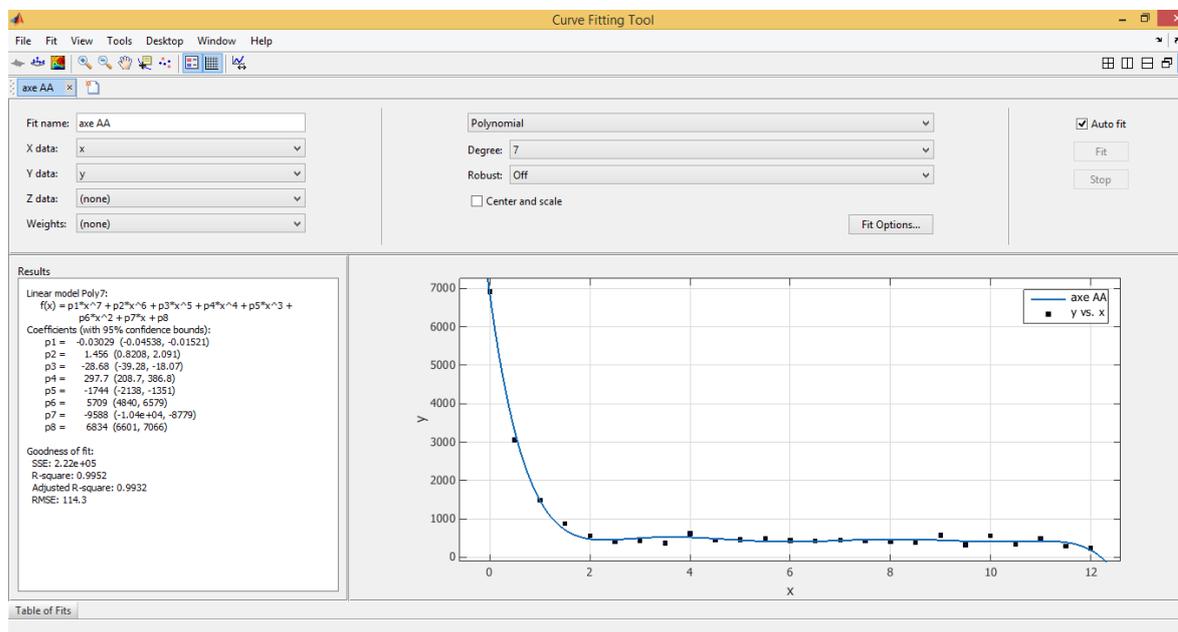


Figure 5.33 : Courbe de l'éclairément en fonction de la profondeur obtenu par Matlab : Axe AA (Source : Auteur)

$$f(x) = p1*x^7 + p2*x^6 + p3*x^5 + p4*x^4 + p5*x^3 + p6*x^2 + p7*x + p8 \quad (9)$$

$$p1 = -0.03029 (-0.04538, -0.01521)$$

$$p2 = 1.456 (0.8208, 2.091)$$

$$p3 = -28.68 (-39.28, -18.07)$$

$$p4 = 297.7 (208.7, 386.8)$$

$$p5 = -1744 (-2138, -1351)$$

p6 = 5709 (4840, 6579)
 p7 = -9588 (-1.04e+04, -8779)
 p8 = 6834 (6601, 7066)

5. 3. 2. La formule de la courbe BB

Tableau 5.5 : Valeurs d'éclairément données par le modèle 3 de PAI, axe BB (Source : Auteur)

profondeur	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Axe BB	3241	1954	1116	747	528	456	469	409	479	522	427	425	316
profondeur	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	
Axe BB	574	459	476	463	461	455	405	467	336	438	346	251	

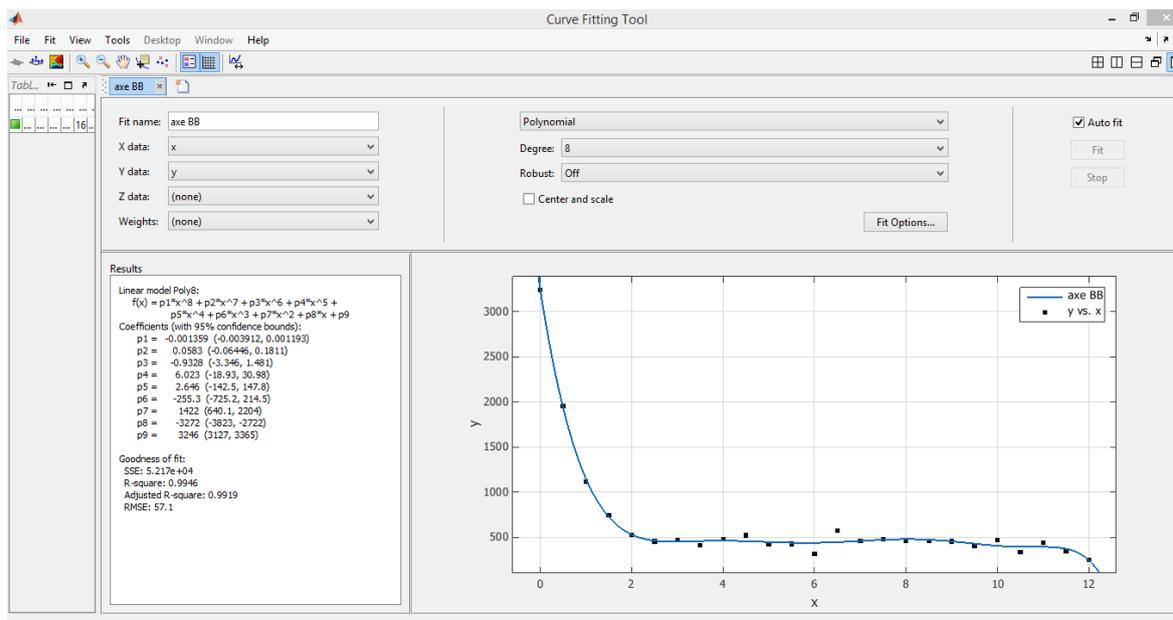


Figure 5.34 : Courbe de l'éclairément en fonction de la profondeur obtenu par Matlab : Axe BB (Source : Auteur)

$$f(x) = p1*x^8 + p2*x^7 + p3*x^6 + p4*x^5 + p5*x^4 + p6*x^3 + p7*x^2 + p8*x + p9 \quad (10)$$

p1 = -0.001359 (-0.003912, 0.001193)
 p2 = 0.0583 (-0.06446, 0.1811)
 p3 = -0.9328 (-3.346, 1.481)
 p4 = 6.023 (-18.93, 30.98)
 p5 = 2.646 (-142.5, 147.8)
 p6 = -255.3 (-725.2, 214.5)
 p7 = 1422 (640.1, 2204)
 p8 = -3272 (-3823, -2722)
 p9 = 3246 (3127, 3365)

Conclusion

La première lecture des résultats des tests effectués sur les différents modèles du plafond anidolique intégré, du système anidolique et du modèle de référence ont montré que le système de PAI est très performance pour les locaux (les bureaux) de grande profondeur. Les valeurs d'éclairement qui ont été enregistré allant de 200 lux à 500lux ce qui est considéré, selon les normes et les recommandations de l'éclairage intérieur des bureaux, comme acceptable et satisfaisante.

Les résultats de la première étude qui a été accentuée sue le modèle de référence indiquent que l'éclairage est mal réparti et la plus grande quantité de la lumière se trouve à proximité de l'ouverture. L'espace est divisé en trois zones, une zone passive couvrant 29% de la surface totale de l'espace, une zone de confort qui est très restreinte de l'ordre de 8% seulement et une zone non passive qui couvre 71%. A partir de 3m de profondeur, l'éclairement reçu à l'intérieur du modèle est inférieur à 300lux et le fond du local reçoit une lumière très faible de l'ordre de 60lux ce qui nécessite l'utilisation de l'éclairage électrique.

Les calculs résultants de la simulation numérique des modèles du plafond anidolique intégré 'PAI' ont montré une tendance très similaire pour la distribution de la lumière dans les douze modèles bien qu'on a constaté une légère différence par rapport au niveau d'éclairement. La zone non passive est disparu et la zone du confort est identique pour l'ensemble des configurations et devient plus grande par rapport à celle du modèle de référence, elle couvre 83% de la surface totale du local. On remarque aussi que les valeurs d'éclairéments sont très rapprochées et ne dépendent pas de la largeur de conduit lumineux. Pour cela, une investigation plus détaillée sera d'une grande utilité sur les quatre modèles 3, 7,10 et 11 de PAI qui semblent être performants dont la sélection de ces derniers a été basée d'une part, sur l'uniformité de répartition de la lumière et d'autre part, sur l'écart entre le niveau l'éclairement le plus fort et celui le plus faible. On observe aussi que le PAI type 3 donne de bons résultats ; l'écart entre les valeurs d'éclairément maximales et minimales est le plus faible de l'ordre de 244lux et l'éclairément moyen reçu au niveau des deux axes est similaire, ce qui assure l'homogénéité de la répartition de la lumière dans toute la surface du local.

Les résultats du test effectué sur les modèles du système anidolique intégré 'SAI' montrent que la zone de confort dans les différentes configurations de ce système constitue environ 30% de la surface totale du local qui est inférieure à celle obtenue par le plafond anidolique intégré (85%). De plus, l'analyse des graphes obtenus montre que les dimensions du SAI

Chapitre 5 : Vers un modèle spécifique de système anidolique

influencent considérablement le niveau d'éclairage transmis au fond du local. Ces constats indiquent que l'addition de SAI permet d'améliorer le niveau d'éclairage en comparaison avec le modèle de référence mais le niveau d'éclairage recommandé n'est pas encore atteint dans ces conditions.

Donc, de point de vue quantitative, on conclut que cette étude confirme que le système de plafond anidolique intégré, qui présente les caractéristiques suivantes : $a=0.64\text{m}$, $a^{\wedge}=0.32\text{m}$, $l_m=0.36\text{m}$, $l^{\wedge}_m=0.65\text{m}$, $L=0.41\text{m}$, $\theta=0.49^{\circ}$, $f_{\text{int}}=0.56\text{m}$ et $F_{\text{ext}}=0.46\text{m}$ est le plus optimal. Les résultats confirment qu'il améliore de manière significative le niveau d'éclairage surtout au fond du local où les valeurs sont 8 fois plus élevée à 9 m de la fenêtre.

Références

Autodesk Ecotect Analysis-©Autodesk, Inc.2011.

Daich, S., Saadi, M.Y., Zemmouri, N., & Daiche, A.M. (2014). Modeling Light Shelf Systems for a Sustainable Interior Sunlight Environment under Specific Climate Conditions. *DCA Conference, ISBN 978-1-4951-2763-2, pp. 348-351, 2014.*

Daich, S. (2011). Simulation et Optimisation du Système Light Shelf sous des Conditions Climatiques Spécifiques. *Thèse de magistère, Université de Biskra, Algérie.*

MATLAB, 2012. www.mathworks.com/help (2012/01/31). Möller, G., Detert, M., Boes, R. 2012. Air entrainment due to vortices: State-of-the-art, Proc. 2ndIAHR European.

NASA SSE program (<http://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/>).

Scartezzini, J.L., & Courret, G. (2002). Anidolic daylighting systems. *Solar Energy, 73*, 123-135.

Welford, W.T., & Wilson, R. (1989). Nonimaging Optics. *Academic Press, USA, 1989*

Wittkopf, S.K., Grobe, L.O., Geisler-Moroder, D., Compagnon, R., Kampf, J., Linhart, F., & Scartezzini, J.L. (2010). Ray tracing study for non-imaging daylight collectors. *Solar Energy, 84*, 986-996.

CHAPITRE 6

LA PROCEDURE EXPERIMENTALE

Introduction

L'étude des phénomènes lumineux dans un espace architectural peut être réalisée au moyen de plusieurs outils et méthodes d'investigation et d'analyse. La méthode d'expérimentation est l'une des méthodes fréquemment utilisée pour évaluer les performances d'éclairage naturel pour les bâtiments neufs ou rénovés. Elle peut être utilisée dans la première phase de la conception d'un bâtiment afin de créer un éclairage qui correspond aux exigences lumineuses de ce dernier comme elle peut être un moyen très efficace pour donner des solutions à un éclairage mal conçu ou insuffisant dans le cas des bâtiments existants par exemple. Les modèles physiques sont des outils très fiables qui permettent de visualiser l'aspect physique de la lumière naturelle à l'intérieur d'un bâtiment. Ils sont souvent utilisés dans le processus de la conception d'un système d'éclairage naturel tandis qu'ils permettent l'étude de son rendement dans des situations multiples. L'utilité de recourir à cette méthode d'évaluation et d'analyse est due au fait aux propriétés physiques de la lumière naturelle ; les mesures photométriques, en termes d'éclairement ou de luminance prises à l'intérieur d'un modèle d'échelle physique sont très proche à celles qui existent dans un bâtiment à grande échelle (Baker, Fanchiotti et Steemers, 1993). La lumière suit le même comportement quelle que soit l'échelle de l'espace, elle est identique à celle du bâtiment réel en quantité et en qualité comme elle ne nécessite pas de corrections de mise à l'échelle. De plus, la réalisation de la maquette ne demande ni un coût élevé pour la réalisation ni un temps important pour l'apprentissage et la construction. En outre, des observations visuelles directes à l'intérieur du modèle construit est possible qui permettent de fournir des informations sur le contraste et l'éblouissement dans l'espace étudié.

Les maquettes de simulation de l'effet physiologique de la lumière naturelle ont connu une grande utilisation ces dernières années surtout avec le développement des instruments de mesure. Plusieurs recherches ont montré leurs efficacités et ont confirmé la fiabilité de leurs résultats qui sont proches de celles que l'on retrouvera dans le local existant et que l'on ressentira dans la réalité. Elles permettent d'étudier à la fois l'aspect quantitatif et même qualitatif de l'éclairage dans un espace architectural même dans les conditions les plus délicates (configurations compliquées, situations multiples...etc.).

Afin d'aboutir aux objectifs assignés par cette étude, notre procédure expérimentale est constituée en **deux étapes** :

Dans la première, nous allons construire deux modèles physiques d'échelle différentes. Le premier est un modèle réduit de 1:12 alors que le deuxième est un modèle physique à grande échelle de 1:4. Dans cette partie, on va présenter toutes les étapes de la réalisation de nos modèles expérimentaux, les matériaux utilisés, les tests de fiabilité effectués...etc.

Dans la deuxième étape, nous allons proposer une description de l'expérimentation qui consiste à donner une idée générale sur l'environnement de l'expérience en termes de date, d'heure, de conditions de ciel, de l'environnement immédiat...etc. A la fin de cette partie, on présentera toutes les informations qui concernent les mesures à effectuer en termes de type de mesure (quantitative ou qualitative), les instruments de mesure à utiliser, la technique de prise de mesure à adopter, les étapes de traitement des données obtenues et les outils nécessaires à l'interprétation des résultats.

6.1. Les objectifs de l'expérimentation

Notre expérimentation a pour but de répondre à trois objectifs :

- Le premier concerne l'évaluation quantitative de la performance du Plafond Anidolique Intégré (PAI) modélisé sous des conditions climatiques et lumineuses réelles de la ville de Biskra. Cette étude sera faite par la prise des mesures d'éclairement (lux) à l'intérieur du modèle physique construit et qui servent à analyser le rendement de ce système d'une part et de valider les résultats donnés par l'expérimentation simulée (chapitre 5) d'autre part.
- Le deuxième objectif concerne le calcul d'indice d'éblouissement (D.GI.P) dans les modèles d'étude par la prise de photos de type image sphérique qui seront traitées par la suite afin d'analyser les contrastes et l'éblouissement présents dans différents champs visuels.
- Le dernier consiste à réaliser une enquête par le recours au questionnaire et des participants afin de valider les mesures photométriques prises et d'étudier les appréciations émotionnelles des sujets par rapport à un environnement lumineux réel dans un modèle physique.

6.2. La réalisation des modèles expérimentaux

6.2.1. Les modèles expérimentaux : Avantages et inconvénients

Le modèle réduit est un outil de design très simple, très didactique qui peut être compris très facilement et qui permet de réaliser des études précises avec un petit budget. Il a prouvé son efficacité pour l'étude du comportement de la lumière naturelle dans le bâtiment dans plusieurs recherches et expériences. Le modèle réduit offre plusieurs avantages ; c'est une manière très facile d'étudier l'éclairage naturel dans un local ayant des formes complexes que nous ne pouvons pas simuler par des logiciels. Une maquette permet aussi d'étudier rapidement l'effet de variation de la géométrie, des coefficients de réflexion ou des couleurs des matériaux utilisés et donner une bonne impression visuelle de l'environnement lumineux. De plus, les modèles réduits sont utilisés pour étudier les performances de nouveaux concepts en éclairage naturel ainsi que les caractéristiques de nouveaux matériaux. La maquette peut servir à étudier la pénétration de la lumière dans le bâtiment ainsi que l'ensoleillement. Pour cela, il faut que le modèle soit modélisé et réalisé avec une grande précision surtout au niveau des ouvertures, en accordant une attention à l'étanchéité à la lumière, aux coefficients de réflexion, à l'aspect visuel et à la précision d'exécution. Ceci, alors que l'étude de l'ensoleillement ne demande pas toute cette précision car elle se fait généralement sur un modèle de masse (échelle de 1/100) et tient uniquement compte de la volumétrie du bâtiment. L'avantage le plus important de l'utilisation de la maquette est la possibilité de fournir des données qualitatives et quantitatives.

Au cours de l'étude de l'éclairage naturel dans le bâtiment par un modèle réduit, nous rencontrons plusieurs obstacles. L'un des problèmes est le choix des matériaux utilisés, car nous ne pouvons pas réduire les matériaux qu'on utilise en réalité comme le brique, le vitrage...etc. De plus, L'utilisation de matériaux réels à l'échelle dans la réalisation des maquettes peut provoquer des erreurs dans les résultats quantitatifs. Le problème majeur se pose dans la difficulté d'intégrer et de modéliser l'éclairage artificiel dans les modèles réduits. Les modèles étudiant la lumière peuvent donner des résultats qualitatifs et quantitatifs très précis. En tenant compte de la perception visuelle humaine, on ne discerne aucune différence visuelle entre la réalité et un modèle réduit. Lorsqu'on construit la maquette d'un local de manière précise, tout en respectant sa géométrie, les caractéristiques de ses parois intérieures (couleurs, matériaux ...etc.) et de son mobilier. On retrouvera la même quantité et qualité de lumière que celle que l'on a dans le local réel (sous des conditions de ciel identiques). L'impression visuelle que l'on aura sera très proche à celle que l'on ressentira dans le local réel.

6. 2. 2. Description du modèle expérimental

Le modèle de test proposé est un bureau de forme rectangulaire de 6 m de largeur, de 12 m de profondeur et de 3.5 m de hauteur. Il présente deux ouvertures sur le petit côté orienté vers le nord. Chacune est de 1.2 m de largeur et de 1.2 m de hauteur, situées à 0.9 m du niveau du sol. Le toit du modèle est composé d'un faux plafond de 0.64 m de hauteur et installé à 2.86 m du sol. Le système de plafond anidolique intégré est installé à 3.16 m au sol. Sa partie extérieure sort de 0.41 m en saillie alors que sa partie intérieure, qui comprend le conduit lumineux et les ouvertures de sorties s'étend sur toute la profondeur de la salle. Le revêtement des surfaces intérieures du plancher, des murs et du plafond doit refléter la lumière d'une manière diffuse idéale alors que les surfaces intérieures du PAI doivent réfléchir la lumière de manière directionnelle. Le facteur de réflexion de tous les matériaux utilisés pour la construction des modèles était testé et présenté dans le point 6.2.2.a et 6.2.2.b.

Afin d'obtenir des résultats précis, il y a plusieurs règles à respecter pour la construction des modèles réduits. Certaines de ces règles sont universelles et d'autres dépendent des appareils de mesure et d'observation, les conditions du ciel sous lequel l'étude est réalisée et les objectifs de la recherche. Dans notre champ d'investigation, nous avons suivi les normes de la commission internationale d'éclairage (CIE).

Les différentes dimensions des modèles choisis (le modèle de référence et le modèle expérimentale) sont présentées dans les figures 6.1, 6.2 et 6.3.

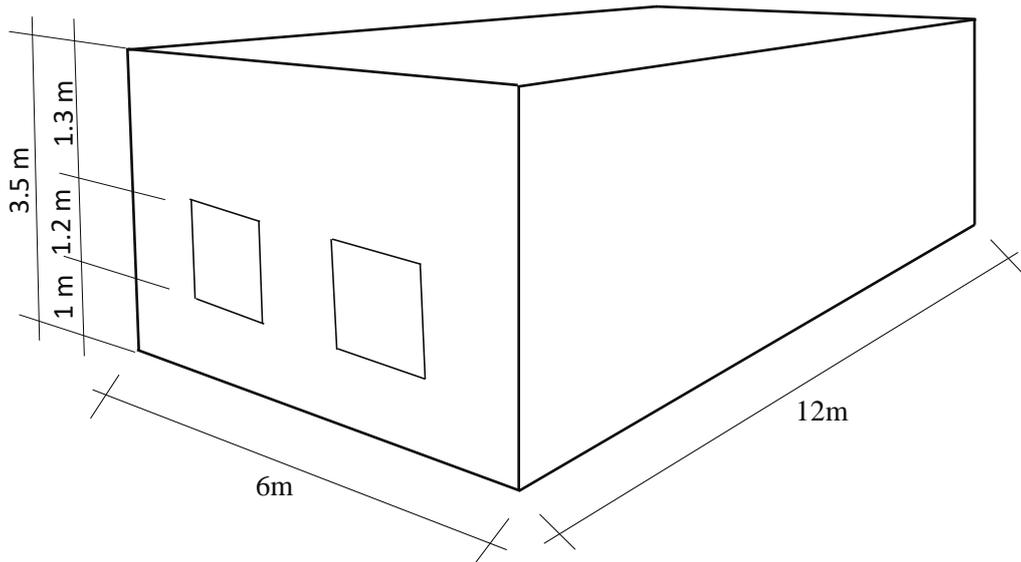


Figure 6.1 : Le modèle expérimental (Source : Auteur)

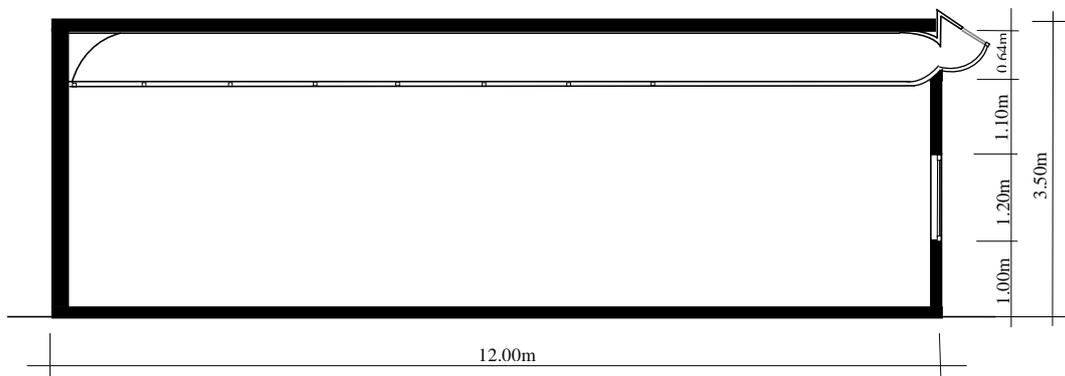


Figure 6.2 : Coupe sur le modèle de test (Source : Auteur)

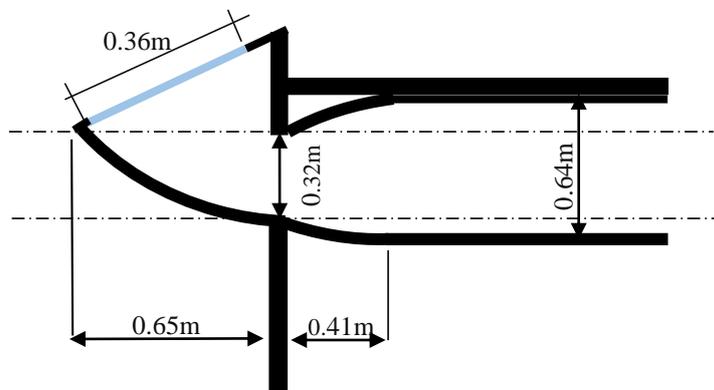


Figure 6.3 : Dimensions du PAI (Source : Auteur)

L'étude proposée dans ce chapitre se base, dans un premier lieu, sur la réalisation de deux modèles physiques de tailles différentes, l'un est d'échelle de $1/12$, l'autre est plus grand de

l'ordre de $\frac{1}{4}$. L'objectif de cette expérience est de fournir des valeurs quantifiables qui nous permettent d'évaluer le rendement de PAI sous des conditions spécifiques.

6.2.2. a. La réalisation du modèle réduit (Echelle 1/12)

Le premier test consiste à utiliser une maquette de un douzième afin d'obtenir une idée générale sur l'éclairage à l'intérieur du local. La maquette est réalisée à l'aide de carton mousse de 1 cm d'épaisseur ; ce dernier est recouvert sur ses deux faces d'un carton blanc de 1.5 mm. Ce matériau présente l'avantage d'être facile à découper et permet de créer des chicane dans les angles. Il a été utilisé pour la réalisation du sol, des parois et de la toiture. Cette dernière représente l'élément le plus exposé à la lumière, surtout à travers sa face extérieure. Pour cela, la toiture présente un débord de 1 cm sur tous les côtés par rapport au plan, afin d'éviter les infiltrations latérales de la lumière. De plus, pour assurer l'étanchéité du modèle réduit à la lumière, nous avons choisi de couvrir toute l'enveloppe de la maquette avec un papier noir de 2 mm pour éliminer les éventuelles pénétrations de la lumière à travers la jonction entre les coins, la toiture, les trous ou même le socle de la maquette. A la fin, deux trous dans la paroi qui se trouve en face de la fenêtre ont été proposés, le premier se trouve à 1 cm du sol (échelle 1 :12) et sert à passer le fil de luxmètre. Le deuxième trou se trouve à la hauteur de l'œil (1.6 m à l'échelle réelle, 13.3 cm à l'échelle de la maquette) pour installer la caméra. La hauteur de la sonde du luxmètre est de 7.5 cm à l'échelle de la maquette (1 :12).

Les facteurs de réflexion des parois de chaque carton utilisés sont : le sol = 0.40 %, parois = 0.50 %, plafond = 0.96 % et ont été testés et comparés avec ceux utilisés dans la simulation (tableau 6.1).

Tableau 6.1 : La réflexion des cartons utilisés dans le modèle réduit de 1/12 (Source : Auteur)

Les éléments testés	Eclairage reçu (lux)	Eclairage réfléchi (lux)	La réflexion (%)	La réflexion de la simulation (%)	Type de réflexion
Les parois	7540	3920	52	50	Diffuse
Le plafond	2100	2016	94	96	Directionnelle
Le sol	12700	4953	39	40	Diffuse

Les différentes étapes de la réalisation de la maquette ainsi que le résultat du premier test de vérification sont montrés dans les photos présentées dans les figures suivantes :

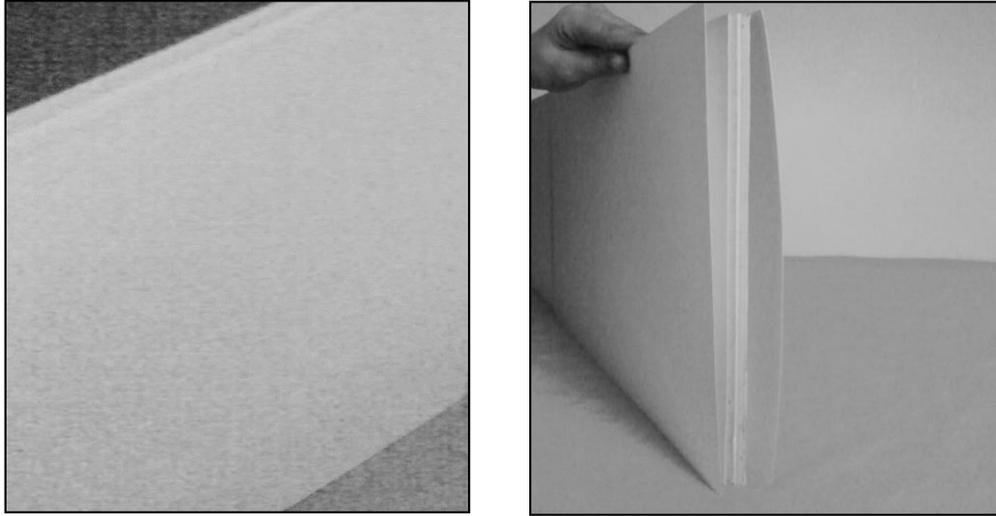


Figure 6.4 : La réalisation de la maquette. Etape 1 : construction des parois avec un papier mousse et les recouvrir d'un papier blanc afin d'assurer une bonne étanchéité (Source : Auteur)



Figure 6.5 : La réalisation de la maquette. Etape 2 : La composition des parois, les recouvrir d'un autocollant noir et la réalisation du toit et du faux plafond (Source : Auteur)



Figure 6.6 : La réalisation de la maquette. Etape 3 : La réalisation du plafond anidolique intégré (Source : Auteur)

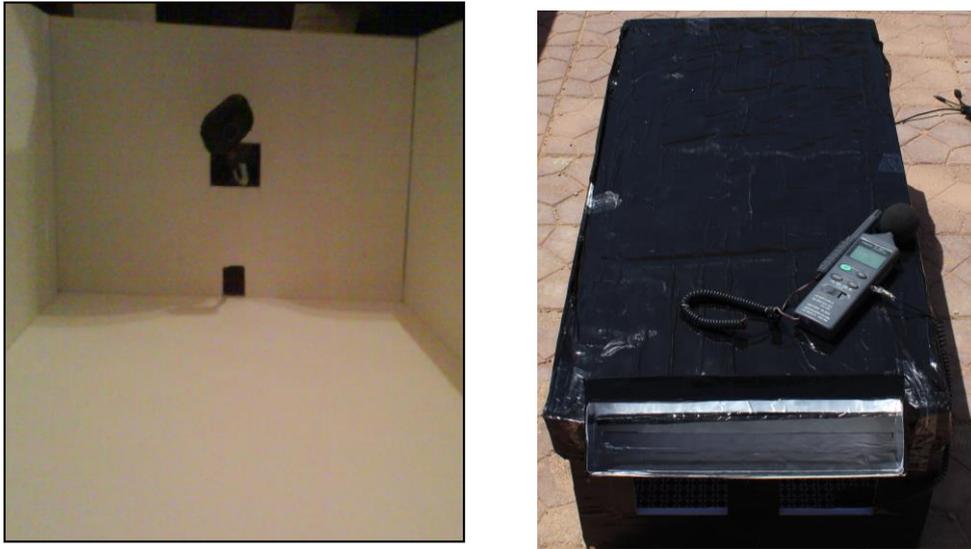


Figure 6.7 : La réalisation de la maquette. Etape 4 : La réalisation des trous pour les instruments utilisés et pour effectuer les mesures (Source : Auteur)



Figure 6.8 : La réalisation de la maquette : Le modèle final (Source : Auteur)

6.2.2. b. La réalisation du modèle à grande échelle (Echelle de 1/4)

Le modèle expérimental à grande échelle est de taille de $\frac{1}{4}$ qui a été construit totalement en bois. Cedernier offre plusieurs avantages et ses caractéristiques diffèrent en fonction de différents facteurs. Ses propriétés varient selon le type d'arbre, les conditions de croissance et le taux d'humidité et ses propriétés varient également selon les différentes directions. Dans notre cas d'étude, ce matériau est disponible et facile à façonner (il est facile de fabriquer des formes cylindriques bien finies). Il présente aussi l'avantage d'avoir des parois totalement étanches à la lumière, c'est à dire que les plaques de bois ne transmettent pas de la lumière d'un côté à l'autre, donc, on n'a pas besoin de couvrir ou peindre le modèle pour assurer son

étanchéité ce qui réduit les tâches et minimise le coût de réalisation. Le document graphique, qui est fait à l'échelle de 1 sur 20, comporte les différents plans, façades et l'élément anidolique. Ces supports nous ont aidés à la construction du modèle physique de manière précise (voir figure 6.9).

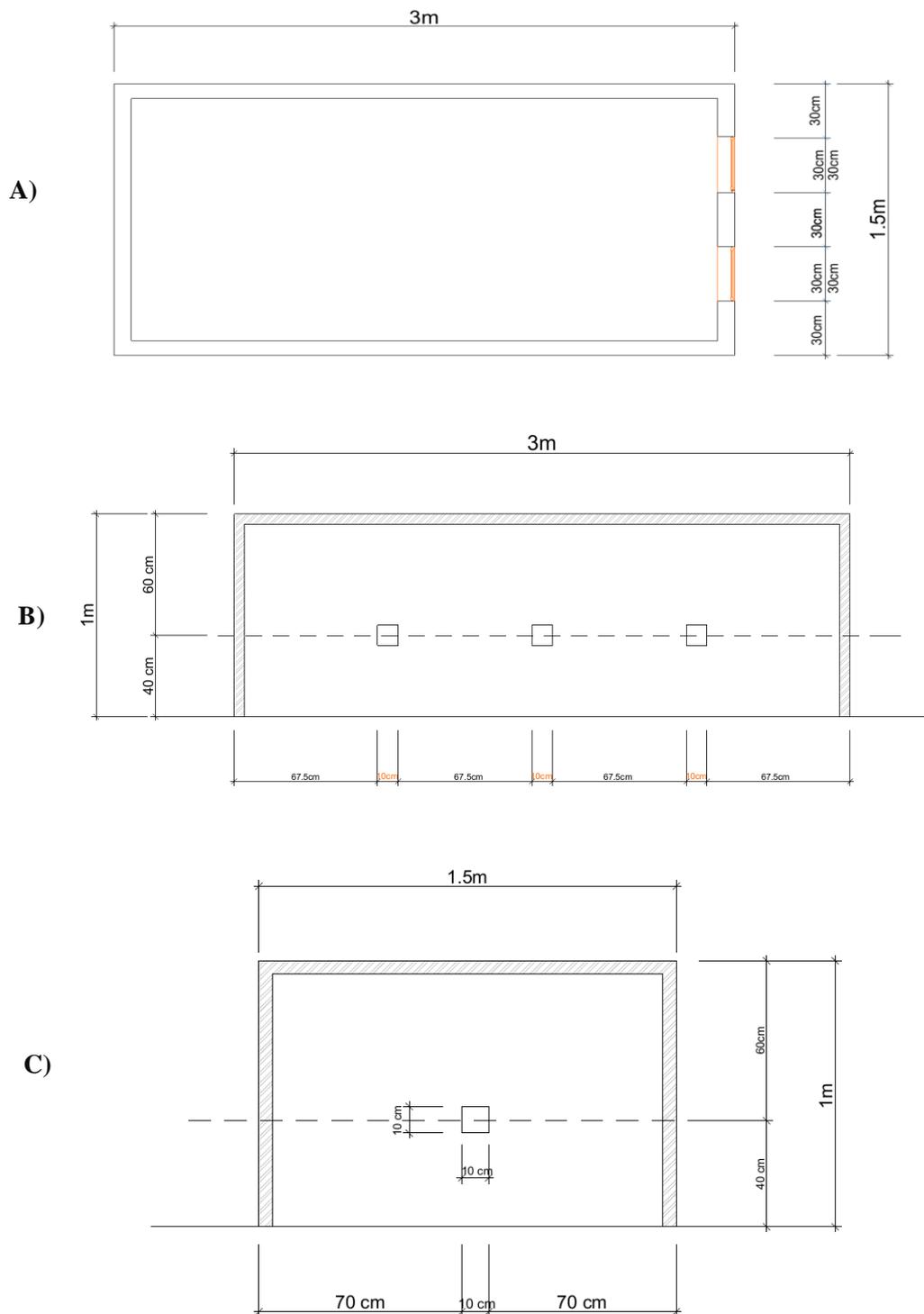


Figure 6.9 : Le document graphique du modèle à grande échelle : A, plan du modèle ; B, façade latérale ; C, façade postérieure (Source : Auteur)

6.2.2. b1. La réalisation des parois latérales

Pour les parois latérales, le traitement était fait seulement sur la face intérieure. Chaque face est constituée de deux parties : une première inférieure, située entre le sol et le système anidolique et une deuxième supérieure qui représente le conduit lumineux, elle se trouve entre le faux plafond et le toit. Un papier blanc a été monté sur les parois inférieures qui se situent au-dessous du système anidolique ($R_{\text{parois inférieure}} = 51\%$) et sa qualité était choisie selon le facteur de réflexion afin qu'il s'accorde avec celui utilisé dans le modèle de 1/12 et la simulation ($R_{\text{simulation}} = 50\%$, $R_{\text{modèle 1/12}} = 52\%$). Dans le but d'assurer une bonne propagation de la lumière dans le plafond anidolique et plus précisément dans le conduit lumineux, les parois étaient recouvertes par un papier aluminium de haute réflexion ($R_{\text{CL}} = 95\%$).



Figure 6.10 : Revêtement du petit côté du modèle physique (Source : Auteur)



Figure 6.11 : Revêtement du grand côté du modèle physique (Source : Auteur)



Figure 6. 12 : L'assemblage des parois (Source : Auteur)

6.2.2. b2. La réalisation du sol

Pour le revêtement du sol, on a opté pour un autocollant d'une couleur beige dont le maillage est d'échelle de un sur quatre. Le facteur de réflexion de ce dernier est de 41 %, très proche de celui utilisé dans le modèle 1/12 ($R_{\text{sol modèle 1/12}} = 39 \%$) ainsi que dans la simulation ($R_{\text{sol simulation}} = 40 \%$). Son installation était faite de manière précise afin d'éviter les réflexions dues au pliage du revêtement lors de la fixation.



Figure 6.13 : Le revêtement du sol (Source : Auteur)

6.2.2. b3. La réalisation du plafond et du faux plafond

Cette étape nécessite de couvrir les six faces intérieures du conduit lumineux par un papier aluminium hautement réfléchissant, celui utilisé pour le revêtement des parties supérieures des parois latérales ($R_{\text{f int du CL}} = 95 \%$) alors que la face intérieure du faux plafond a été recouverte par un papier blanc, celui utilisé pour la couverture des parois latérales mais avec un facteur de réflexion plus grand ($R_{\text{f int du faux plafond}} = 90 \%$).

Au niveau de la paroi qui constitue le faux plafond, on a effectué des coupures faites sur trois lignes, chaque ligne se compose de sept fentes qui constituent les light duct (les sorties de la lumière depuis le conduit lumineux). Chaque fente est de 1.5 cm de largeur et 25 cm de longueur. Dans le sens longitudinal, l'espacement entre ces fentes est de 1.15 m alors que dans le sens transversal est de 0.75 m. La première rangée de ces light duct est située à 4.05 m de parois équipée de plafond anidolique intégré.



Figure 6.14 : Le revêtement de la face intérieure (en blanc) et la face extérieure (en aluminium) du faux plafond (Source : Auteur)



Figure 6.15 : Le revêtement de la face intérieure du plafond en aluminium (Source : Auteur)

6.2.2. b4. L'étanchéité du modèle à la lumière

La fiabilité d'une étude de l'éclairage dans un modèle physique nécessite qu'elle soit construite de telle sorte qu'elle empêche la transmission de la lumière à travers ses parois. Pour cela, nous avons choisi de couvrir les zones extérieures situées entre les différentes parois de la maquette

avec un papier noir et un autocollant noir afin d'éliminer les éventuelles pénétrations de la lumière à travers la jonction entre les coins, la toiture, le sol ainsi que les trous utilisés pour la prise des mesures et des photos (figure 6.16 et figure 6.17). Puis, nous avons effectué un test dans le but de vérifier l'efficacité de cette solution. Les résultats du test présentés dans la figure 56 confirment que notre modèle est bien étanche à la lumière car la valeur d'éclairement intérieur atteint 0 lux après avoir fermé toutes les ouvertures existantes dans la maquette.



Figure 6.16 : Les matériaux utilisés pour l'étanchéité de la maquette à la lumière (Source : Auteur)



Figure 6.17 : A gauche, les trous de mesure ; A droite ; le traitement de la jonction entre les parois (Source : Auteur)

6.2.2. b5. La réalisation du plafond anidolique intégré

Au cours du travail de simulation, nous avons trouvé que le plafond anidolique intégré a les caractéristiques suivantes : largeur de l'orifice d'entrée = 0.64 m, largeur de l'orifice de sortie = 0.32 m, largeur de l'élément en saillie = 0.65 m, la profondeur de l'élément anidolique intérieur = 0.41 m, largeur de l'ouverture vitrée = 0.63 m, distance focale intérieure = 0.56 m, distance focale extérieure = 0.49 m est le plus performant pour les conditions climatiques et

lumineuses de la ville de Biskra. Cette expérience a pour objectif de confirmer l'efficacité de ce système de plafond anidolique intégré modélisé sous conditions climatiques et lumineuses réelles de la ville Biskra.

Les figures suivantes (figure 6.18) présentent les étapes a, b et c du traitement des faces externes et internes afin qu'elles soient identiques à celles simulées. Après avoir assemblé les six pièces composant le plafond anidolique intégré (A), nous avons renforcé la face extérieure de l'élément anidolique par un autocollant noir afin d'empêcher toute pénétration de la lumière à travers ces petites lames (B) puis, un revêtement en aluminium ($R_{f \text{ int de l'EA}} = 0.96 \%$) est nécessaire pour le bon rendement du système (C).

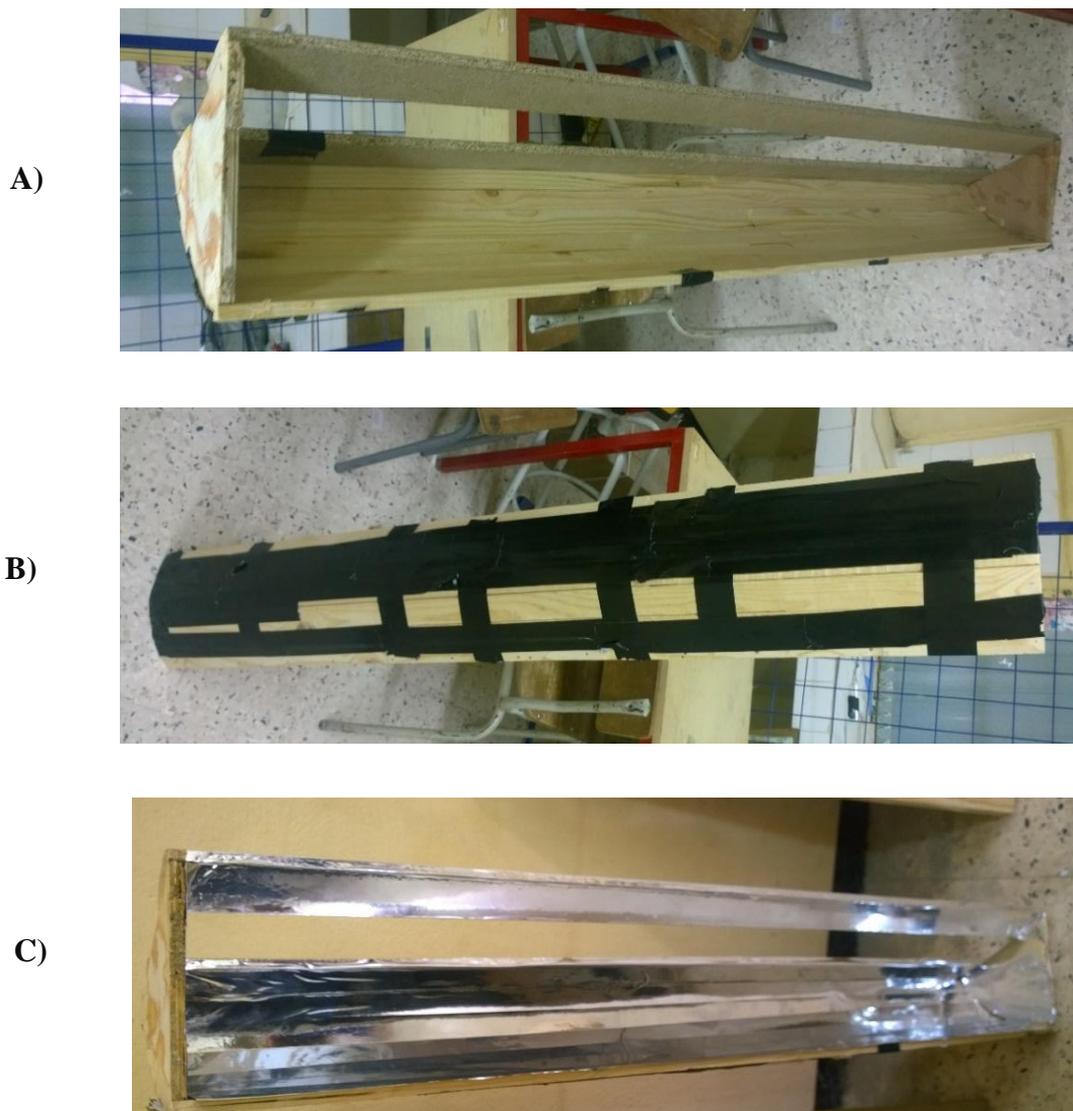


Figure 6.18 : La réalisation du PAI : A, l'assemblage des différentes composantes de système ; B, le renforcement de l'étanchéité de la face extérieure ; C, la couverture de la face intérieure par un papier aluminium (Source : Auteur)

6.2.2. b6. L'aménagement intérieur et le modèle final

La modélisation des mobiliers est très importante dans l'analyse quantitative et qualitative de l'éclairage sur un modèle réduit, la disposition du mobilier, sa couleur ainsi que les matériaux utilisés pour le modéliser influencent la répartition de la lumière dans la pièce et participent également à l'ambiance lumineuse. Pour cette raison, nous avons proposé d'intégrer trois unités de mobilier composées d'une table et d'une chaise qui sont réalisées en mesure de l'échelle de la maquette et qui sont disposées sur les trois directions : au sud (au centre et en face de la fenêtre), à l'est et au nord. Le mobilier a été fixé dans le modèle afin d'éviter son déplacement lors de la prise de mesure et l'orientation de la maquette.



Figure 6.19 : La modélisation du mobilier intérieur (Source : Auteur)

La dernière étape de la réalisation de ce modèle à grande échelle est la fixation des roues au niveau du socle de la maquette pour permettre sa mobilité et la prise des mesures dans différentes orientations.



Figure 6.20 : A gauche, la fixation des roues ; A droite, le modèle physique final (Source : Auteur)

6.2.2. c. Le test de fiabilité des modèles construits

Avant de passer aux mesures, on a proposé un premier test qui a été effectué sur les deux modèles dont l'objectif est de vérifier l'étanchéité de ces derniers à la lumière extérieure, c'est-à-dire que la lumière ne passe pas à travers les différentes parois. Pour cela, nous avons fermé toutes les ouvertures existantes, celles des deux fenêtres, de l'emplacement des appareils de mesure et du plafond anidolique intégré, par un papier mousse recouvert avec un papier noir. La deuxième étape est la mise des deux modèles à l'extérieur et la mesure du niveau d'éclairage intérieur. Le résultat indique la valeur de 0 lux qui est notre but recherché ce qui rend nos deux modèles physiques très fiable pour la prochaine étude.



Figure 6. 21 : Le test de fiabilité des modèles construits (Source : Auteur)

De plus, afin de tester la capacité du conduit lumineux à transporter la lumière depuis l'extérieur vers l'intérieur, un autre test a été proposé à l'aide de l'appareil photo. Les images présentées dans la Fig.44 et Fig.55 montrent l'efficacité de ce dispositif à canaliser la lumière plus profondément dans le modèle même si les éléments anidoliques n'ont pas encore été installés.



Figure 6. 22 : A gauche, la distribution de la lumière dans le conduit lumineux ; A droite, la distribution de la lumière à l'intérieur du modèle (Source : Auteur)

6.3. Description de l'expérience et les mesures à effectuer

Les modèles construits (modèle de référence et les deux modèles de test (modèle réduit et le modèle physique à grande échelle) étaient expérimentés dans des conditions climatiques et lumineuses réelles de la ville de Biskra. Les modèles portent les mêmes caractéristiques géométriques et photométriques que le modèle utilisé dans la simulation numérique et qui sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 6.2 : Les caractéristiques géométriques et photométriques des modèles physiques

Caractéristiques des modèles	Dimensions (m)	
La géométrie du modèle	Largeur (L)	6
	Hauteur (H)	3.5
	Profondeur (P)	12
La géométrie de la fenêtre	Largeur (l)	1.2
	Hauteur (h)	1.2
	Hauteur au sol	0.9
La géométrie de Plafond Anidolique Intégré (PAI)	Largeur de l'orifice d'entrée (a)	0.64
	Largeur de l'orifice de sortie (a)	0.32
	Largeur d'élément en saillie (a)	0.65
	Profondeur de l'élément anidolique intérieur (a)	0.41
	Largeur de l'ouverture (a)	0.63
	Distance focale intérieure (f_{int})	0.56
	Distance focale extérieure (f_{ext})	0.49
Les propriétés photométriques intérieures (Réflexion %)	<u>Murs</u> : -Modèle1/12 :	52%
	-Modèle1/4 :	51%
	<u>Sol</u> : -Modèle1/12 :	39%
	-Modèle1/4 :	41%
	Plafond intérieur	90%
	PAI	95%

L'expérience a eu lieu le 04 janvier 2017 sous des conditions de ciel clair avec soleil dans un site dégagé. Les mesures étaient effectuées durant les heures normales de travail de 9h00 jusqu'à 17h00 avec un intervalle de 2 heures entre chaque deux mesures (9h, 11h, 13h, 15h et 17h). Au cours de cette expérimentation, nous avons eu recours à trois instruments de mesure : un luxmètre, un appareil photo et un dispositif Fish Eye. Deux modèles de Luxmètre étaient utilisés qui nous ont permis d'obtenir des valeurs d'éclairement intérieures et extérieures en lux. Le premier modèle est de type VOLTRAFIT. MS 4 IN 1 #DT 8822 Environment Mètre et le deuxième est un Luxmètre numérique de type Chauvin Arnoux CA-811. Les caractéristiques de ces deux modèles sont :

- Afficheur 3½ digits (2000 points)
- Gamme de mesure du luxmètre Chauvin Arnoux : 20 lux à 20000 lux
- Mesure des éclairagements par photodiode au silicium.
- Résolution : 0,01 lux
- Fonctions Hold/Rétro-éclairage/lux ou fc/Max
- Précision $\pm 3\%L + 10$ points
- Correction spectrale C.I.E. et correction d'incidence
- Sonde déportable pour des mesures en toutes circonstances
- Gaine de protection antichoc
- Dimensions : 173 x 60,5 x 38mm - masse : 214g

Le deuxième instrument est un appareil photo de type CANON EOS 1200D. Ses principales caractéristiques sont :

- Image fixe 18 MP
- Film 1080p Full HD
- Objectifs Canon EF et EF-S
- Capteur CMOS
- Image Processeur Digic 4
- Stockage SD / SDHC / SDXC
- Système AF 9 points Système AF
- Écran LCD LCD de 7,7 cm (3,0 ")
- Batterie Li-ion Batterie LP-E10 (500 photos env.)



Figure 6.23 : A droit, luxmètre ; à gauche, appareil photo et Fish Eye (Source : Auteur)

De plus, un dispositif 'Fish Eye', SIGMA 4.5 mm F2.8 EX DC CIRCULAR FISHEYE HSM (180°) était utilisé pour la prise des images sphériques de l'environnement lumineux intérieur.

La performance globale du Plafond Anidolique Intègre était analysée pendant une journée typique en étudiant l'effet de ce système sur l'amélioration de l'environnement lumineux intérieur. Notre expérience consiste à prendre deux types de mesure : **des mesures quantitatives** et **d'autres qualitatives**.

6.3. 1. Les mesures quantitatives

Ces mesures sont de deux types, il s'agit de celles d'éclairement et de luminance qui ont été prises dans les modèles physique sous les mêmes conditions dans le but de faire une série de comparaison qui permet de répondre aux objectifs soulignés. Les valeurs d'éclairement intérieur étaient prises sur un plan de travail horizontal situé à 0.80 m du sol et évalué sur deux axes AA et BB. Chaque axe se compose de 15 points de mesures afin de couvrir toute la surface du local. L'intervalle entre deux points de mesures dans le sens longitudinal est de 0.8 m et 1.5 m dans le sens transversal (voir la figure 6.24 et 6.25). Le rendement du Plafond Anidolique Intégré était évalué par la prise des valeurs d'éclairement qui ont été réalisées manuellement et simultanément à l'intérieur des deux modèles. Des mesures de l'éclairement extérieur étaient simultanément prises afin d'évaluer l'atmosphère lumineuse extérieure et d'étalonner par la suite les valeurs d'éclairement intérieur obtenues par la mesure.



Figure 6.24 : L'intervalle entre les points de mesure dans le sens transversal (Source : Auteur)

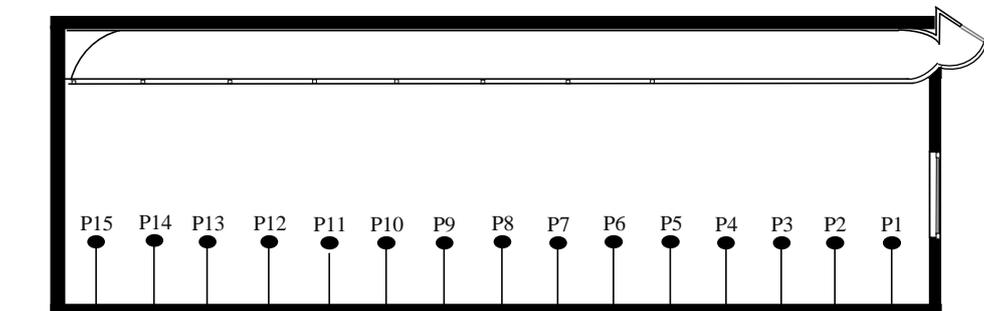


Figure 6.25 : L'intervalle entre les points de mesures dans le sens longitudinal (Source : Auteur)

Les mesures d'éclairement étaient prises en suivant les étapes suivantes :

- La prise de mesures de l'éclairement intérieur sur le modèle de référence (sans PAI) au niveau des deux axes en l'orientant vers le nord.

- La prise de mesures de l'éclairage intérieur sur deux modèles au niveau des deux axes en orientant le grand modèle vers le nord. L'objectif est d'étudier l'effet de l'échelle du modèle physique sur l'éclairage intérieur.
- La prise de mesures de l'éclairage intérieur sur deux axes en orientant le grand modèle vers le nord. L'objectif est de valider les résultats du modèle simulé.
- La prise de mesures de l'éclairage extérieur lors de mesure de l'éclairage intérieur afin d'évaluer l'environnement lumineux extérieur et étalonner les mesures intérieures.
- L'effet de l'orientation de la façade sur la performance du système de PAI était testé en tournant le modèle de $\frac{1}{4}$ vers le Nord, le Sud, l'Est et l'Ouest et les mesures étaient effectuées sur l'axe central seulement.

Des mesures de luminance ont été également proposées dans cette expérience afin d'étudier et d'analyser le phénomène de l'éblouissement dans les modèles d'étude. Ces mesures étaient obtenues, grâce à l'image sphérique en utilisant un appareil photo 'CANON 1200D' et un dispositif Fish Eye. Les images étaient prises le même jour de l'expérience et faites dans deux positions 1 et 4 afin d'étudier le rendement de ce système par rapport aux quatre orientations et dans les quatre positions (1, 2, 3 et 4) dans le but d'évaluer la performance de notre système de PAI à réduire l'éblouissement par rapport au modèle de référence.

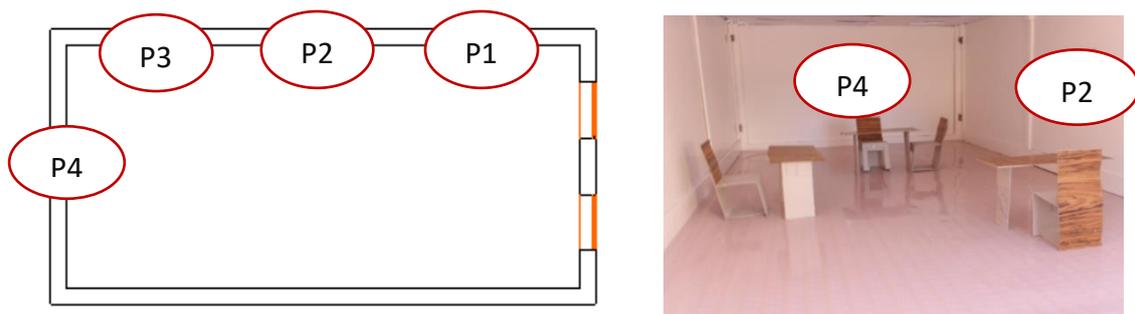
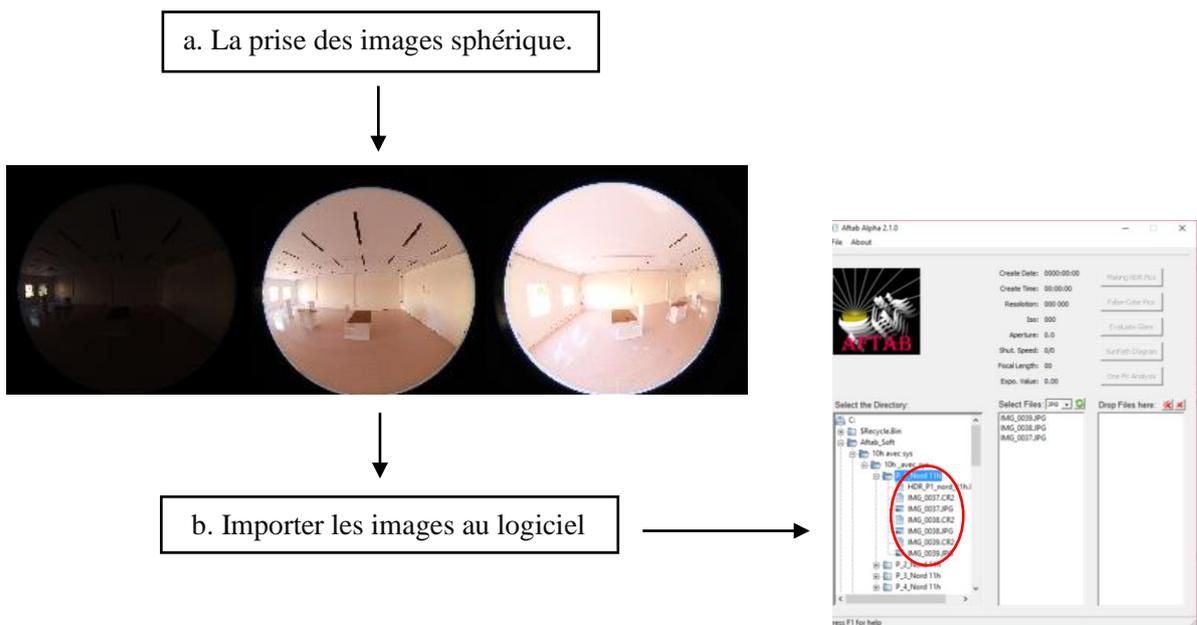


Figure 6. 26: A gauche, plan du modèle montrant la position des quatre positions ; A droite, perspective intérieure montrant la position et la hauteur des points P2 et P4 .(Source : Auteur)

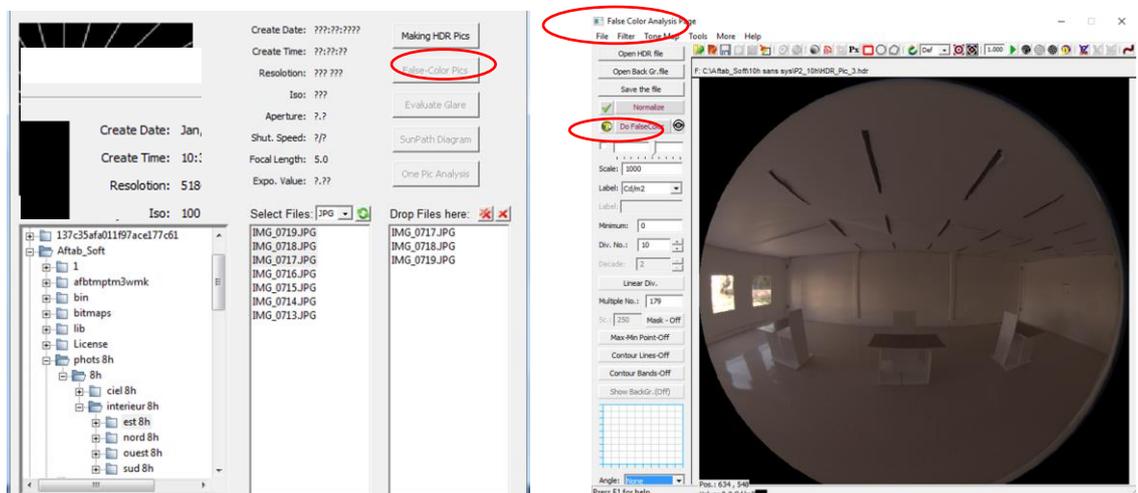
L'éblouissement sera évalué par le calcul des valeurs de Daylight Glare Index Probability (D.GI.P) à partir des images grâce au logiciel 'Aftab Alpha 2.1.0' en suivant les étapes suivantes (figure 6.27) :

- La prise des images sphériques dans différentes situations à l'aide de l'appareil photo et du dispositif Fish Eye.
- L'obtention de trois images avec différents niveaux de luminosité pour chaque prise de photo.

- La superposition de ces trois images afin de les convertir en une image de type HDR à l'aide de logiciel Aftab Alpha 2.1.0.
- Cette image HDR va être étalonnée par rapport à une valeur de luminance qui a été prise lors de l'expérience en utilisant un luxmètre équipé d'un cône.
- Après cette étape, on a obtenu une image HDR étalonnée qui sera analysée par le logiciel Aftab Alpha 2.1.0 en choisissant la fonction 'False-Color pics' et celle de Evaluate Glare'. Ces dernières permettent d'obtenir des valeurs de luminance en cd/m^2 ainsi que celles de D.G.I.P qui seront nécessaires pour notre investigation.

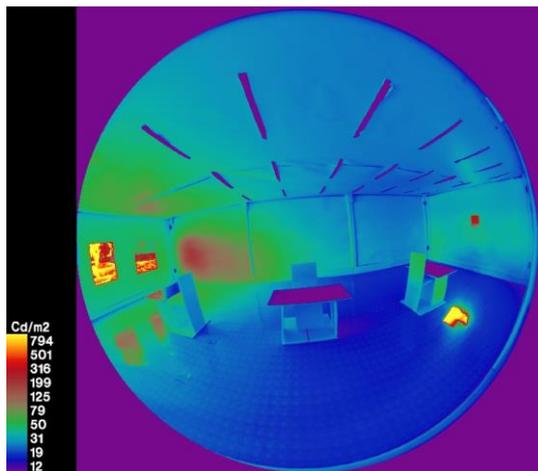


Etape 1. Introduction des 3 images au logiciel

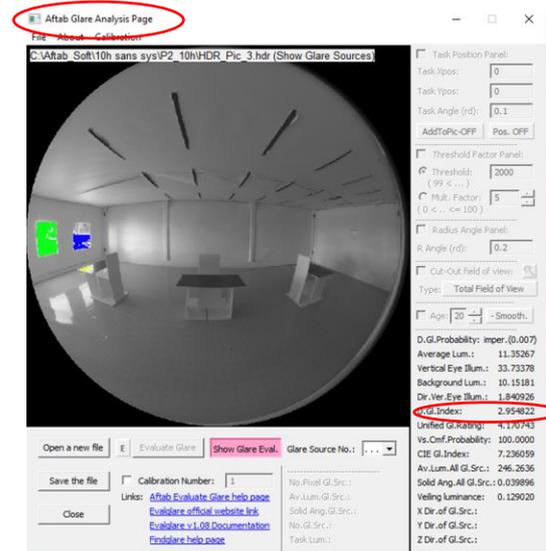


2. Fonction 'Image HDR'

3. Fonction 'False-Color'



4. Image 'False-Color' avec échelle des niveaux de luminance



5. Fonction 'Evaluate Glare' à partir de l'image HDR

Figure 6.27 : Les étapes de traitement des images sphériques prises à l'intérieur du modèle physique (Source : Auteur)

6.3. 2. Les mesures qualitatives

Les mesures de type qualitatif consistent à recueillir des informations subjectives sur l'éclairage et l'ambiance lumineuse à l'intérieur des deux modèles physiques (le modèle de référence et le modèle de test) à partir des appréciations émotionnelles des sujets. L'objectif de cette étude est d'une part, d'évaluer l'aspect qualitatif de l'éclairage naturel qu'apporte le Plafond Anidolique Intégré dans un espace et d'autre part, de valider les résultats tirés de l'étude quantitative.

Ces données ont été obtenues grâce à une enquête, qui s'est déroulée le même jour de l'expérience (04/01/2017) sous des conditions climatiques et lumineuses identiques où les soixante-deux participants étaient interrogés dans les quatre positions. L'enquête est faite en développant un questionnaire composé de 15 questions regroupées dans quatre facteurs qui traitent le confort visuel dans le modèle, la satisfaction des sujets vis-à-vis de l'éclairage ambiant, la spaciosité de l'espace et la sensibilité des participants à l'éblouissement (le formulaire du questionnaire est présenté en détail dans le chapitre 4 : Méthodologie).

Après avoir recueilli ces mesures, une analyse statistique à l'aide du logiciel spécialisé 'IBM SPSS 24.0' est nécessaire afin de pouvoir interpréter les résultats. Le traitement de ces données qualitatives est entamé par une série de tests afin de vérifier la fiabilité des questions posées ainsi que l'échelle utilisée pour passer par la suite à l'analyse descriptive en faisant appel à différentes techniques statistiques afin de faciliter la lecture des résultats.

Conclusion

Ce chapitre a comme objectif de présenter et d'expliquer le protocole (procédures et étapes) qui a été proposé dans cette recherche afin de pouvoir recueillir toutes les informations nécessaires en termes de données quantitatives et qualitatives afin d'évaluer la performance du système de plafond anidolique intégré dans des conditions spécifiques. Pour cela, notre investigation est structurée comme suit :

- La réalisation des modèles expérimentaux, qui est considérée comme l'étape la plus importante dans ce travail de recherche. La modélisation des différents éléments composant les modèles (parois, sol, plafond, ouvertures, PAI, revêtement intérieur des parois, aménagement utilisé...etc.) a été faite en respectant les normes internationales de la construction des maquettes destinées à ce type d'étude. Les modèles ont des échelles différentes et notre étude a été focalisée sur celui de 1:4 qui a été réalisé totalement en bois alors que le faux plafond et les éléments anidoliques ont été revêtus par un papier aluminium de haut réflectance.
- Des mesures de type quantitatif ont été prises manuellement par un luxmètre dans les modèles afin d'obtenir des valeurs d'éclairage intérieur. De plus, lors de prise de ces dernières, des photos sous forme d'image sphérique ont été également capturées dans différents champs visuels à l'intérieur du modèle de référence et de celui de test. Ces images ont été introduites et traitées par la suite par le logiciel 'Aftab Alpha' afin d'obtenir des valeurs de type de 'D.G.I.P' qui permettent d'analyser l'indice d'éblouissement probablement présent dans les modèles d'étude.
- Durant la même période, des données de type qualitatif ont été aussi recueillies grâce au recours à l'enquête. Cette dernière est réalisée en invitant des participants à évaluer l'éclairage et l'atmosphère lumineuse à l'intérieur des modèles physiques dans des positions différentes, en répondant à un formulaire de questionnaire qui a été développé (voir chapitre 4). Les observations qualitatives émotionnelles des sujets sont introduites dans un logiciel de traitement statistiques des données 'IBM SPSS 24.0' et analysées par la suite par le recours aux différentes techniques statistiques afin de pouvoir interpréter les résultats obtenus.

Références

AFTAB Alpha 2.1.0. Software por Majid Miri e Elmia Ashtari. Outubro de 2015. Stockholm, Sweden. Disponível em: <[http:// http://aftabsoft.net/](http://http://aftabsoft.net/)>. Acesso em: 10 de agosto de 2016.

Baker, N., Fanchiotti, A., & Steemers, K. (1993). Daylighting in Architecture: a European reference book. *Commission of the European Communities, DG XII for Science, Research and Development, James and James, Brussels, 1993.*

IBM Corp. Released 2016. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 24.0. Armonk, NY: IMB Corp.

CHAPITRE 7

EVALUATION QUANTITATIVE

Introduction

L'intérêt principal de ce chapitre est de faire une étude quantitative, à travers l'analyse des paramètres physiques de la lumière résultants des travaux antécédentes, de la performance du système de Plafond Anidolique Intégré (PAI) en termes de confort visuel, d'ambiance lumineuse et d'efficacité énergétique afin de confirmer l'utilité de l'installation de ce système dans un espace à usage spécifique (bureau) dans des conditions spécifiques de la ville de Biskra.

Le travail présenté dans ce chapitre sera structuré en **quatre parties** :

Dans la première, on va présenter tous les résultats quantitatifs, exprimés en éclairement (lux), qu'on a recueillis au cours des investigations précédentes : les simulations numériques des modèle de référence et celui du test et la simulation expérimentale (modèles physiques sans et avec PAI et le modèle réduit).

La deuxième partie est nécessaire pour déterminer les caractéristiques de l'environnement lumineux extérieur au cours de la période de mesure afin de pouvoir valider les résultats. La validation sera faite d'une part, entre les deux modèles physiques de petite et de grande échelle et d'autre part, entre les valeurs de l'éclairement intérieur résultants de la simulation informatique et celles obtenues par la simulation expérimentale (mesures in situ).

La troisième partie se focalise sur l'évaluation quantitative de la performance du plafond anidolique intégré dans des conditions différentes qui sera vérifiée en trois étapes complémentaires. Au début, nous allons proposer une analyse de niveau d'éclairement intérieur basée sur l'étude de : 1) l'effet de l'ajout de système de PAI sur l'amélioration de l'éclairage intérieur par la comparaison des résultats obtenus par le modèle physique à grande échelle sans et avec PAI, 2) l'uniformité de l'éclairement intérieur, 3) le rendement du système par rapport aux temps, aux saisons, à l'orientation et à l'autonomie d'énergie.

Dans la dernière partie, nous allons déterminer les valeurs de luminance dans le modèle de test dont l'intérêt est d'évaluer l'éblouissement comme paramètre physique de confort visuel dans des situations différentes. Dans cette partie, nous va recourir à l'image sphérique comme outil d'analyse de l'environnement lumineux à l'intérieur de notre modèle.

7. 1. Présentation des résultats

Dans la première partie de notre étude pratique sous la thématique de la modélisation d'un système anidolique spécifique pour la ville de Biskra, nous avons recouru à la simulation numérique qui nous a conduits à modéliser un système anidolique qui répond aux besoins d'éclairage intérieur et également adéquat au niveau de l'éclairage extérieur. Pour l'éclairage intérieur des bureaux, l'AFE (1993), IESNA (2000), la norme NBN EN 12464-1(2002) ainsi que le travail de Wittkopf S K et al (2006) recommandaient d'avoir un éclairage intérieur compris entre 300 lux et 500 lux. En se référant à ce niveau d'éclairage et après avoir analysé les résultats tirés par la première investigation (simulation), nous avons constaté que le système de Plafond Anidolique Intégré 'Type 3' (voir chapitre 5) est une configuration optimale qui a donné de bons résultats en termes de niveau d'éclairage et de la distribution lumineuse dans le local avec un éclairage moyen de l'ordre de 450 lux qui est un niveau souhaitable pour l'éclairage des bureaux. Une deuxième investigation, basée essentiellement sur un travail d'expérimentation, était proposée afin de valider les résultats de la simulation et de faire une analyse plus approfondie sur l'environnement visuel intérieur. Notre expérience était structurée en deux étapes, la première consiste à fournir des mesures d'éclairage qui ont été prises sur les deux modèles physiques au niveau de deux axes et faites selon deux scénarios : sans et avec Plafond Anidolique Intégré. Les mesures étaient prises sur un plan de travail horizontal situé à 0.8 m de sol et faites sur une grille d'analyse de 0,8 m x 1,5 m ce qui générerait 122 valeurs d'éclairage intérieur. Ensuite, L'espace était divisé en trois zones, dans le but de faciliter l'analyse et l'interprétation des résultats : la zone près de la fenêtre (F), le centre de l'espace (C) et le fond de la pièce (P).

La deuxième étape avait comme objectif d'évaluer les ambiances lumineuses intérieures sous différentes conditions lumineuses. Elle consistait à prendre des photos pendant la période d'étude (9h, 11h, 13h, 15h et 17h) dans les quatre orientations (nord, sud, est et ouest) ce qui nous génère 80 images sphériques. L'analyse de ces dernières était basée essentiellement sur l'étude de l'éblouissement.

Les tableaux 7.1, 7.2 et 7.3 présentent les résultats des mesures individuelles des niveaux d'éclairage extérieur ainsi qu'à l'intérieur des modèles utilisés : le modèle de référence (sans PAI), le modèle réduit avec PAI (Ech 1:12) et le modèle à grande échelle de 1:4 avec PAI. Lors de la période de l'expérimentation et vu l'insuffisance des instruments de mesure, l'éclairage extérieur n'était pas fixe. Il change légèrement dans chaque prise de mesure ce qui nous a

conduits à faire un étalonnage en fonction des niveaux d'éclairément extérieur et nous avons pris la valeur de 42570 lux comme une valeur de référence pour la détermination du niveau d'éclairément intérieur.

Tableau 7. 1 : Valeurs d'éclairéments mesurés à partir du modèle de référence (Source : Auteur)

Les points de mesure à partir de l'ouverture	Distance depuis l'ouverture (m)	Eclairément intérieur en lux (axe AA)	Eclairément intérieur en lux (axe BB)	Eclairément extérieur (lux)
1	0,8	1925	1787	43556
2	1,6	1356	1402	46000
3	2,4	826	671	45210
4	3,2	245	264	41200
5	4	234	209	42200
6	4,8	166	148	39000
7	5,6	132	112	39110
8	6,4	110	100	41000
9	7,2	98	94	46900
10	8	91	88	41562
11	8,8	84	79	46100
12	9,6	69	66	44500
13	10,2	65	61	42600
14	11	61	55	41800
15	11,8	74	63	40500

Tableau 7. 2 : Valeurs d'éclairéments mesurés à partir du modèle de 1/12 équipé d'un PAI (Source : Auteur)

Les points de mesure à partir de l'ouverture	Distance depuis l'ouverture (m)	Eclairément intérieur en lux (axe AA)	Eclairément intérieur en lux (axe BB)	Eclairément extérieur (lux)
1	0,8	1561	1675	43556
2	1,6	1042	1613	46000
3	2,4	1238	1205	45210
4	3,2	1067	1034	41200
5	4	875	902	42200
6	4,8	704	731	39000
7	5,6	508	668	39110
8	6,4	491	513	41000
9	7,2	492	433	46900
10	8	479	423	41562
11	8,8	472	412	46100
12	9,6	452	335	44500
13	10,2	423	404	42600
14	11	422	395	41800
15	11,8	313	399	40500

Tableau 7.3 : Valeurs d'éclairéments mesurés à partir de modèle de 1/4 équipé d'un PAI (Source : Auteur)

Les points de mesure à partir de l'ouverture	Distance depuis l'ouverture (m)	Eclairément intérieur en lux (axe AA)	Eclairément intérieur en lux (axe BB)	Eclairément extérieur (lux)
1	0,8	1599	1700	43556
2	1,6	1066	1640	46000
3	2,4	1265	1225	45210
4	3,2	1087	1046	41200
5	4	896	916	42200
6	4,8	720	740	39000
7	5,6	520	680	39110
8	6,4	500	520	41900
9	7,2	500	441	46900
10	8	490	431	41562
11	8,8	480	419	46100
12	9,6	460	340	44500
13	10,2	430	411	42600
14	11	430	400	41800
15	11,8	320	345	40500

Le tableau suivant 7.4 présente les résultats de la simulation numérique faite sur un modèle identique en respectant les mêmes caractéristiques géométriques et photométriques et on a reconstitué les mêmes conditions de la simulation expérimenté en termes de date, heure, plan de travail...etc.

Tableau 7.4 : Valeurs d'éclairéments obtenues par la simulation informatique (Source : Auteur)

Points de mesure/Distance depuis l'ouverture	Eclairément intérieur (axe AA) en lux	Eclairément intérieur (axe BB) en lux
1 (0,8m)	1284	1366
2 (1,6m)	907	1402
3 (2,4m)	1153	1108
4 (3,2m)	1068	1031
5 (4m)	791	813
6 (4,8m)	740	779
7 (5,6m)	552	723
8 (6,4m)	657	687
9 (7,2m)	403	355
10 (8m)	441	396
11 (8,8m)	428	375
12 (9,6m)	385	283
13 (10,2m)	411	396
14 (11m)	559	515
15 (11,8m)	398	435

Le tableau 7.5 présente toutes les valeurs d'éclairage intérieur étalonnées en fonction de l'éclairage extérieur obtenu dans les trois modèles au niveau des deux axes en fonction de la distance depuis l'ouverture où la fenêtre et le système anidolique sont installés.

Tableau 7.5 : Valeurs d'éclairages intérieurs étalonnées des trois modèles (Source : Auteur)

Les points de mesure à partir de l'ouverture (Distance depuis l'ouverture en m)		Eclairage intérieur étalonné Modèle 1/12 (valeurs en lux)		Eclairage intérieur étalonné Modèle ¼ (valeurs en lux)		Eclairage intérieur étalonné du modèle de référence (valeurs en lux)	
		Axe AA	Axe BB	Axe AA	Axe BB	Axe AA	Axe BB
1	0,8	1302	1334	1418	1397	1606	1490
2	1,6	928	949	1461	1437	1208	1249
3	2,4	1171	1196	1158	1139	781	634
4	3,2	1099	1120	1077	1065	252	272
5	4	810	829	848	835	217	193
6	4,8	772	789	811	801	182	162
7	5,6	565	579	757	743	147	125
8	6,4	677	690	717	707	152	138
9	7,2	413	420	370	364	82	79
10	8	460	470	413	406	87	84
11	8,8	438	445	389	382	78	73
12	9,6	392	397	294	289	60	57
13	10,2	424	432	412	405	65	61
14	11	567	578	538	531	82	74
15	11,8	412	421	454	446	97	83

7. 2. L'analyse de l'éclairage extérieur

Durant notre étude expérimentale et lors de la prise des mesures sur les modèles physiques, on a constaté une variation du niveau d'éclairage extérieur comprise entre 39000 lux et 46000 lux. Cette variation est causée par le nombre important des mesures effectuées (105 mesures) ainsi que l'insuffisance en luxmètres pour prendre toutes les mesures en même temps. Pour cette raison, et en vue de faire une évaluation précise de l'éclairage intérieur, nous avons recouru à l'étalonnage des quinze valeurs de l'éclairage extérieur mesurées et en considérant la valeur de 42750 lux comme une valeur de référence pour les modèles physiques. Par rapport à la simulation numérique, et à partir de la valeur de référence obtenue, on a considéré la valeur de 42500 lux comme un input (éclairage extérieur) au cours de ce calcul. Ce niveau d'éclairage extérieur indique que le ciel était considéré comme clair car, l'éclairage extérieur était compris entre 24000 lux et 100000 lux. Ce type est considéré comme idéal pour

les études de l'éclairage et était confirmé par des recherches ultérieures (voir chapitre 4 : Méthodologie).

Tableau 7.6 : Valeurs d'éclairagements intérieurs étalonnées des trois modèles (Source : Auteur)

Les points de mesure	Eclairage extérieur (lux)	Eclairage extérieur étalonné (lux)	Eclairage extérieur de la simulation (lux)
1	51256	42750lux	42500lux
2	48000		
3	45210		
4	41500		
5	46200		
6	39000		
7	38410		
8	31000		
9	50900		
10	44562		
11	46100		
12	49500		
13	42600		
14	31800		
15	32500		

7. 2. 1. La validation des résultats

Le travail de validation a pour objectif, d'une part d'étudier l'effet de l'échelle de la maquette sur la propagation de la lumière à l'intérieur des deux modèles physiques de tailles différentes, dont l'un est trois fois plus grand que l'autre et d'autre part de confirmer la fiabilité de la simulation numérique, par la comparaison des résultats numériques avec celles obtenus par les mesures individuelles, pour le dimensionnement d'un système d'éclairage naturel adéquat. Dans le but de mieux comparer les résultats, nous avons eu recours au calcul du taux de variation qui s'exprime en pourcentage et qui représente, en statistique, la variation entre la valeur finale et la valeur initiale (VF- VI) relativement à la valeur initiale, le résultat est multiplié par cent. Dans notre cas, pour la validation d'échelle, les valeurs initiales et finales représentent le niveau d'éclairage en un point donné au niveau des modèles 1:4 et 1:12 alors que pour la validation d'outil, les valeurs représentent le niveau d'éclairage à un point donné obtenu par la modèle numérique et le modèle expérimental (1 :4).

7.2.1. a. Validation entre le modèle réduit et le modèle à grande échelle

L'analyse des résultats était faite selon deux axes : l'axe central BB qui se trouve au centre de l'espace et l'axe AA qui se situe au centre de la fenêtre et à 1.5 m de l'axe BB et de la paroi

latérale. A partir des figures 7.1 et 7.2, il est clair que les deux graphes sont presque superposés et les valeurs d'éclairage obtenues par les deux modèles au niveau des deux axes sont très rapprochées avec un écart maximum de 32 lux dans l'axe AA et 24 lux dans l'axe BB.

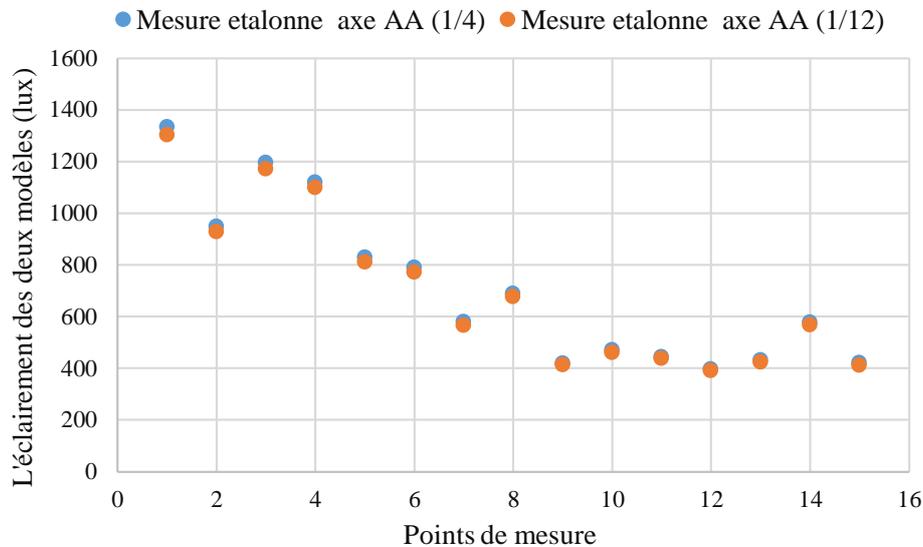


Figure 7. 1 : Validation des résultats obtenus dans les deux modèles au niveau de l'axe AA (Source : Auteur)

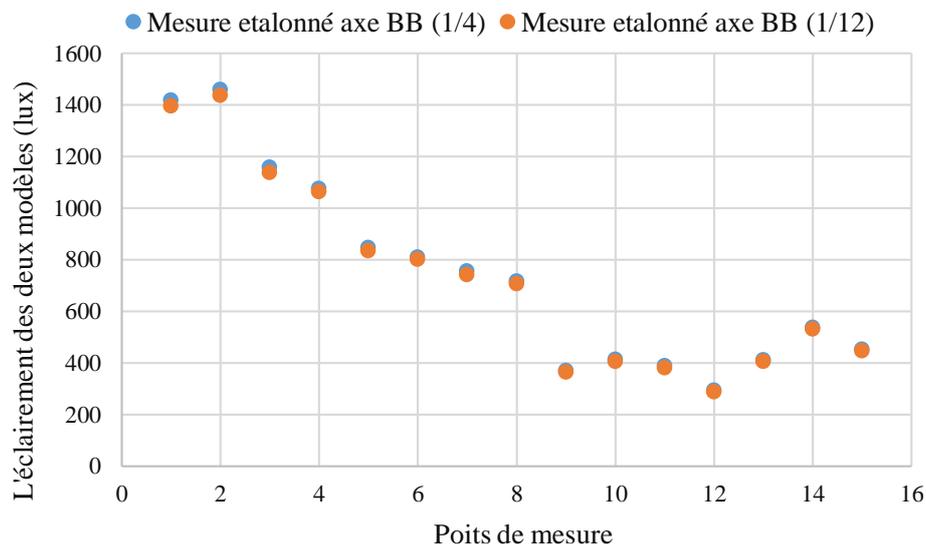


Figure 7.2 : Validation des résultats obtenus dans les deux modèles au niveau de l'axe BB (Source : Auteur)

Afin de mieux analyser et valider ces résultats, nous avons recouru au calcul du taux de variation TV. Les résultats sont présentés dans la figure 7.3. L'analyse du taux de variation dans les deux modèles et au niveau de quinze points de mesure montre qu'il y a une bonne corrélation entre ces deux résultats. Dans l'axe AA, le TV est compris entre $\pm 1.6\%$ et $\pm 2.4\%$ avec un taux de variation moyen de $\pm 2\%$ alors que dans l'axe central BB, le taux de variation moyen est de

l'ordre de $\pm 1.6\%$ avec un TV situé entre $\pm 1.1\%$ et $\pm 1.6\%$. On constate également que le graphe qui représente le TV de l'axe BB est plus stable que celui de l'axe AA. Cela est dû à la position de l'axe par rapport à la fenêtre car l'axe qui se trouve au centre de l'ouverture (AA) reçoit un éclairage direct depuis l'extérieur, qui change au fil de temps, alors que l'axe central (BB) reçoit un éclairage qui provient indirectement de l'ouverture. Cette étude confirme que l'échelle de la maquette, dans les recherches destinées à l'éclairage intérieur des bâtiments, n'influe pas sur la quantité de la lumière qu'elle reçoit. Elle est pratiquement identique quel que soit l'échelle du modèle physique.

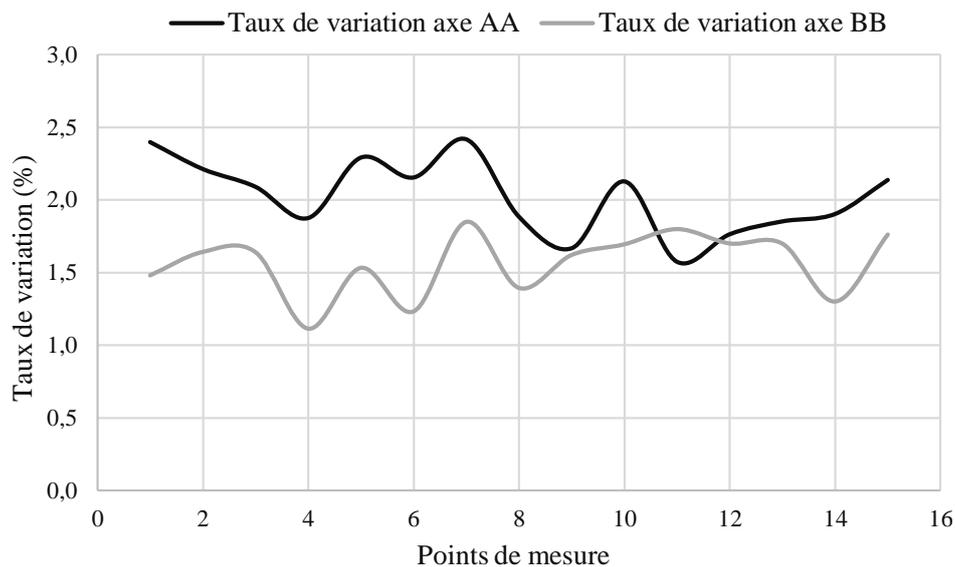


Figure 7.3 : Le taux de variation de l'éclairage dans les deux modèles (axe AA et BB) (Source : Auteur)

7.2.1. b. Validation entre la simulation et les mesures sur site

Pour confirmer la validité des résultats de la simulation numérique nous avons procédé à une étude comparative entre les valeurs calculées par cette dernière et ceux obtenues par les mesures sur un modèle à grande échelle. Notons que les deux modèles (numérique et physique) portent les mêmes caractéristiques géométriques et photométriques et les deux expériences étaient effectuées dans des conditions similaires. A partir de la figure 7.4 et 7.5, on remarque que les deux graphes suivent la même allure avec un niveau d'éclairage qui diffère d'un résultat à l'autre dans chaque point. L'écart d'éclairage est remarquable dans les mesures prises dans la zone près de la fenêtre ce qui est dû au fait que l'éclairage extérieur, pendant l'expérience sous un ciel réel, change d'un moment à l'autre alors que dans la simulation numérique, la valeur de l'éclairage extérieur est constante tout au long des mesures. L'écart maximum est

de l'ordre de 52 lux pour l'axe AA et 59 lux pour l'axe BB avec un écart moyen pour les deux axes de l'ordre de 32 lux qui reste toujours acceptable.

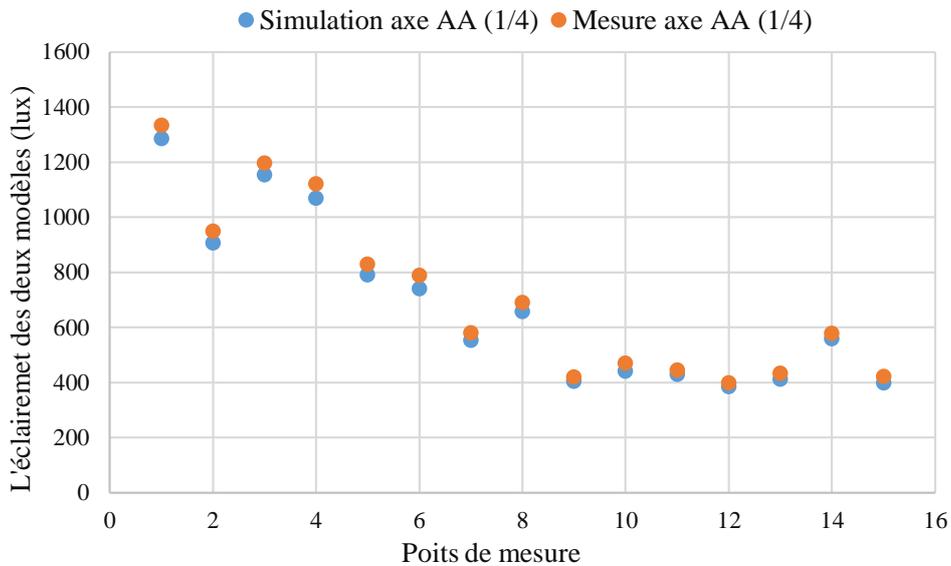


Figure 7.4 : Validation mesures/simulation au niveau de l'axe AA (Source : Auteur)

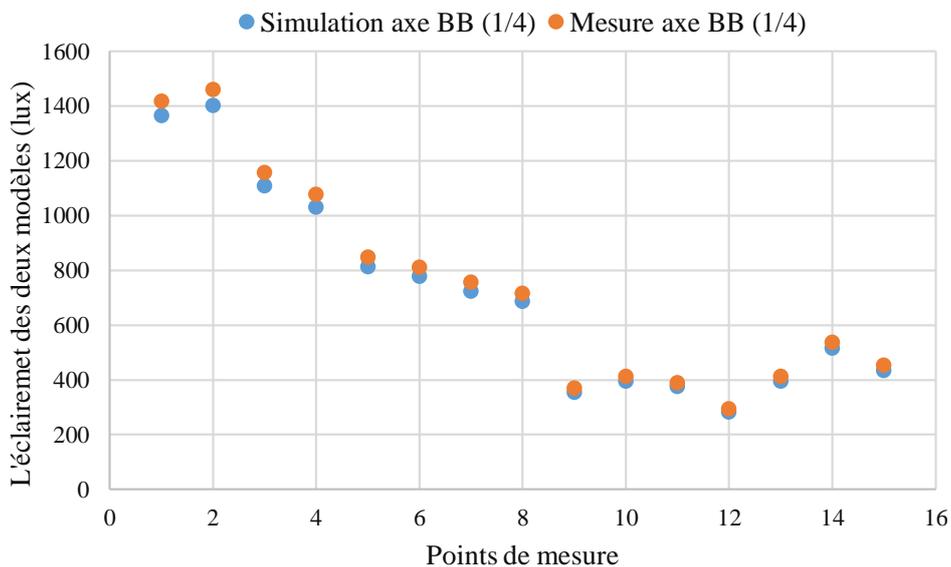


Figure 7.5 : Validation mesures/simulation au niveau de l'axe BB (Source : Auteur)

De plus, l'analyse du taux de variation (figure 7.6) indique que l'axe central est plus équilibré que l'axe latéral. Il est compris entre $\pm 3\%$ et $\pm 6.2\%$ pour l'axe AA avec un taux de variation moyen de $\pm 4.5\%$ alors qu'au niveau de l'axe BB, il est plus faible de l'ordre de $\pm 4.1\%$ qui est situé entre $\pm 3.6\%$ et $\pm 4.5\%$. Suite à ces résultats, on en conclut qu'il y a une concordance entre les résultats numériques et ceux issus des mesures sur site ce qui confirme la fiabilité du logiciel Ecotect pour étudier et évaluer l'éclairage à l'intérieur d'un environnement construit.

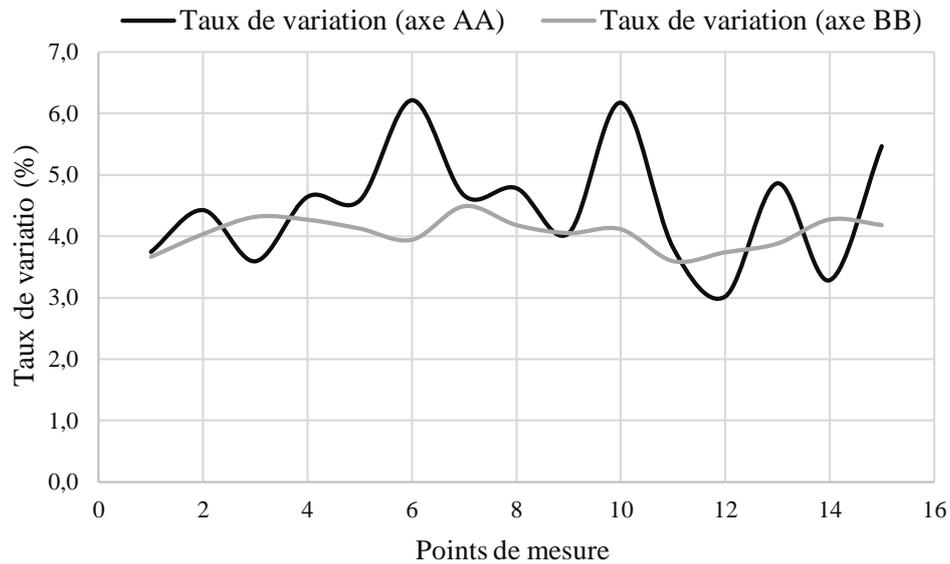


Figure 7.6 : Le taux de variation de l'éclairage (simulation et mesure) (Source : Auteur)

7. 3. Evaluation quantitative de la performance de PAI

L'investigation de la performance de Plafond Anidolique Intégré (PAI), dans le sens quantitatif, était faite par l'analyse des paramètres physiques du confort visuel : le niveau d'éclairage intérieur, les valeurs de luminance et l'étude de l'éblouissement. L'objectif de cette étude est de vérifier que le PAI peut être une solution d'éclairage naturel efficace sous des conditions spécifiques et réduit également tout risque d'inconfort visuel.

7. 3. 1. Evaluation du niveau d'éclairage

Notre système anidolique était modélisé de sorte qu'il s'adapte aux caractéristiques climatiques et lumineuses de la ville de Biskra et qu'il répond aussi aux exigences lumineuses intérieures de l'espace étudié (bureau) en termes de niveau d'éclairage recommandé. L'évaluation du niveau d'éclairage était faite dans des situations différentes :

- Sans et après l'ajout de système,
- L'uniformité de l'éclairage,
- Son rendement par apport aux temps, aux saisons, aux orientations ainsi que sa contribution pour réduire les dépenses énergétiques destinées à l'éclairage.

7. 3. 1. a. Sans et avec PAI

A partir des résultats présentés ci-dessous, on constate que le modèle équipé d'un PAI est mieux éclairé que celui de référence. Le modèle de référence est au-dessous du niveau de confort visuel recommandé pour l'usage des bureaux. Il reçoit un éclairage trop élevé dans la zone située près de la fenêtre (F) qui diminue rapidement au fond (P) avec un éclairage inférieur

à 60 lux. La zone centrale (C) est exclue. Le PAI améliore de manière significative l'éclairage intérieur, il permet de réduire la quantité de lumière reçue par la fenêtre (F), d'avoir une zone centrale (C) qui se caractérise par un éclairage moyen de l'ordre de 700 lux et d'avoir aussi une large zone située au fond (P) qui reçoit un bon niveau d'éclairage compris entre 294 lux et 578 lux. La zone de confort visuel couvre 60 % de la surface totale.

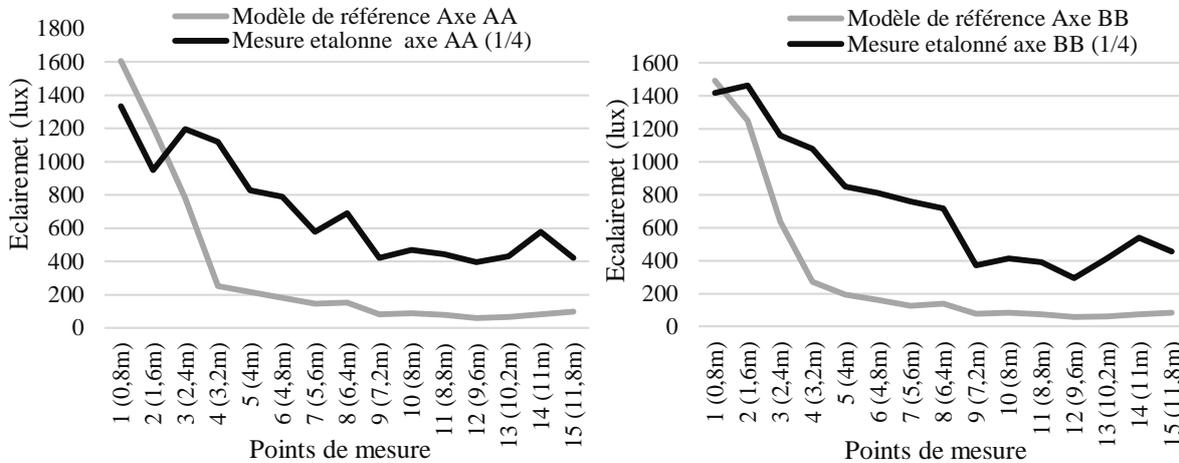


Figure 7.7 : Valeurs d'éclairements obtenues par le modèle de référence et le modèle : A gauche, axe AA ; A droite, axe BB (Source : Auteur)

Tableau 7.7 : La distribution de l'éclairage dans les trois zones dans les deux modèles (Source : Auteur)

Les zones		Modèle de référence	Modèle avec PAI
La zone près de l'ouverture (F)	La largeur de la zone considérée	3.2m	3.2m
	L'éclairage min et max (lux)	217 ≤ E ≤ 1606	1077 ≤ E ≤ 1418
Le centre du modèle (C)	La largeur de la zone considérée	0m	3.2m
	L'éclairage min et max (lux)	-	579 ≤ E ≤ 848
Le fond du modèle (P)	La largeur de la zone considérée	8.8m	5.6m
	L'éclairage min et max (lux)	57 ≤ E ≤ 193	294 ≤ E ≤ 578

On remarque également, qu'à douze mètre de la fenêtre, l'éclairage du modèle équipé d'un PAI, est cinq fois plus élevé par rapport au modèle de référence pour l'axe AA et plus de quatre fois pour l'axe BB. Cette amélioration est due au principe de fonctionnement de PAI qui permet de rejeter une quantité de lumière, grâce à son élément anidolique extérieur ce qui réduit par conséquent le niveau d'éclairage au niveau de la fenêtre et de canaliser une autre quantité

jusqu'aux orifices de sortie se situant à l'intérieur grâce au conduit lumineux. On en conclut que, pour notre cas d'étude, cette simulation expérimentée à l'aide d'un modèle physique à grande échelle avait confirmé l'efficacité de ce système d'éclairage naturel pour illuminer de manière suffisante et efficace des espaces ayant une grande profondeur.

7. 3. 1. b. Par rapport à l'uniformité de l'éclairage

Le modèle expérimental (modèle physique de 1:4 équipé d'un système anidolique) se démarque par un éclairage uniforme dans tout le local. L'éclairage moyen est de l'ordre de 700 lux tout au long de l'axe AA avec un petit écart de 41 lux par rapport à l'axe BB. Le tableau 7.8 donne une idée sur l'éclairage moyen reçu dans chaque zone. A partir de ces résultats, il est clair que l'éclairage au niveau des deux axes est bien réparti dans les trois zones, depuis les fenêtres et le système anidolique jusqu'au fond. L'écart entre deux zones adjacentes est approximativement de l'ordre de 300 lux ce qui conduit à avoir une meilleure uniformité et un bon niveau d'éclairage qui correspond aux normes recommandées.

Tableau 7.8 : L'uniformité de l'éclairage dans les trois zones (Source : Auteur)

	Eclairage moyen au niveau de l'axe AA	Eclairage moyen au niveau de l'axe BB
La zone (F)	1150 lux	1270 lux
La zone (C)	722 lux	783 lux
La zone (P)	451 lux	410 lux

7. 3. 1. c. Par rapport au temps

L'évaluation de la performance de notre système anidolique durant la période située entre 9h et 16h montre que le niveau d'éclairage intérieur dépend fortement de la quantité d'éclairage extérieur disponible qui change d'une heure à l'autre (voir figure 7.8). On constate également que les sept graphes d'éclairage obtenus suivent la même allure avec un écart régulier d'éclairage moyen de 80 lux, surtout au niveau de la zone centrale (c) et celle du fond (P). Une analyse plus approfondie des résultats indique que, pendant la période de 11h, midi et de 14h, notre système de PAI ne permet pas d'atteindre les valeurs d'éclairage recommandées pour les bureaux (300 lux à 500 lux) surtout au niveau de la zone (C) et (P). Cette période critique se produit lorsque l'éclairage extérieur est supérieur à 35000 lux et correspond à celle lorsque le soleil est au zénith. Les résultats montrent aussi que le local est illuminé par un éclairage excessif dépassant les 800 lux dans les surfaces où les sorties de light duct sont installées. Cette situation peut générer un environnement lumineux inconfortable surtout que

l'écart de l'éclairement entre deux points de mesure atteint 500 lux au centre du local. Pour améliorer les conditions lumineuses pendant ces trois heures critiques, une modification par rapport aux sorties de light duct était proposée. La nouvelle configuration consiste, selon le plan proposé ci-dessous (figure 7.9), à utiliser quatre sorties de light duct au lieu de sept et les trois autres sorties seront fermées pendant cette période. Les nouveaux résultats présentés dans la figure 7.10 indiquent que, pendant la période de 9h et 16h, une amélioration de l'éclairage intérieur était remarquée. Le niveau d'éclairement est devenu plus acceptable et compris entre 200 lux et 600 lux. Cette solution apparait efficace, car dans des conditions de faible éclairement extérieur, toutes les sorties de light duct peuvent être utilisées afin d'apporter le maximum de lumière et au contraire, dans le cas de fort éclairement extérieur, on a le choix de fermer ou d'ouvrir les sorties selon les besoins.

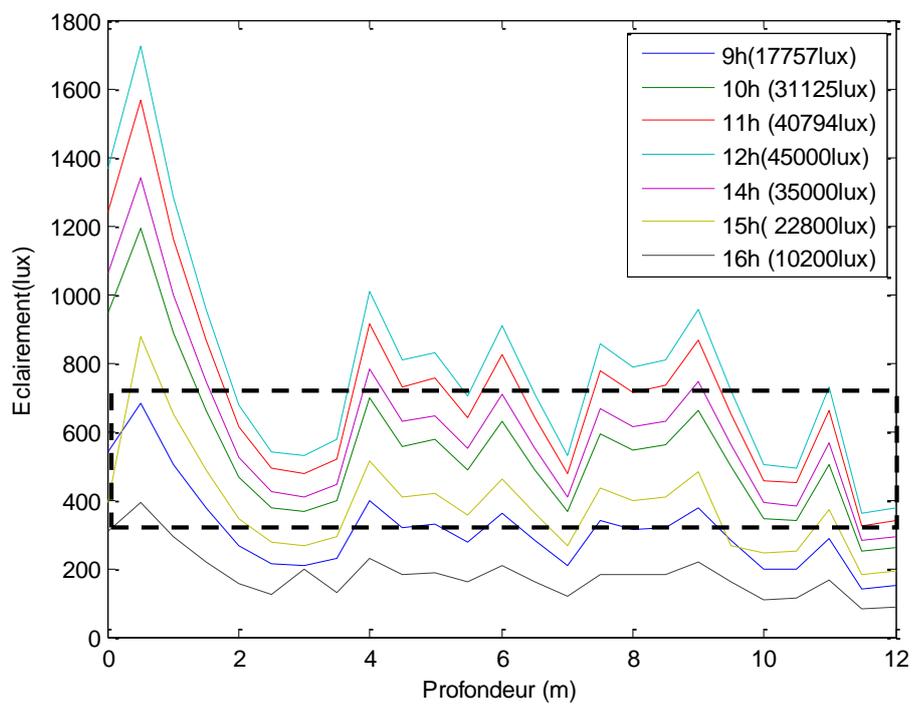


Figure 7.8 : Rendement journalier du PAI avec sept sorties de light duct (Source : Auteur)

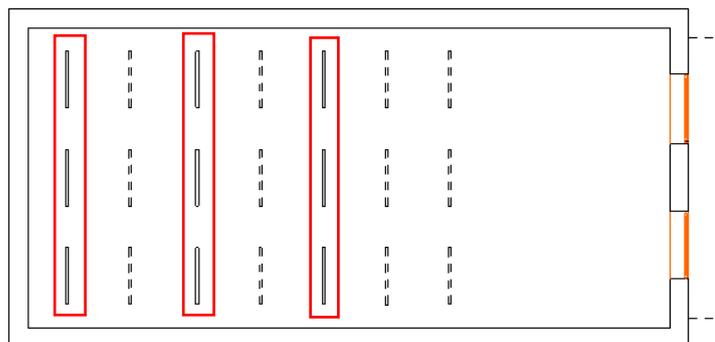


Figure 7.9 : Plan d'un local équipé d'un PAI avec trois sorties de light duct (Source : Auteur)

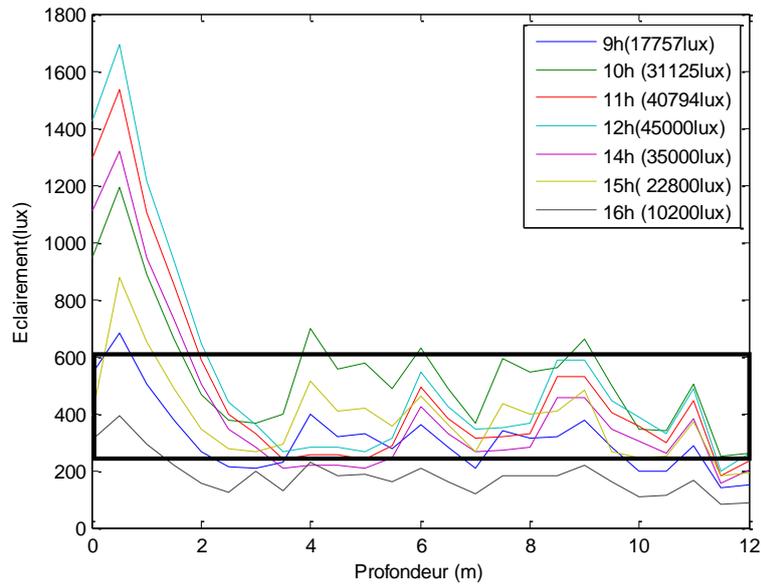


Figure 7.10 : Rendement journalier avec quatre sorties de light duct (Source : Auteur)

7. 3. 1. d. Par rapport aux saisons

L’analyse du rendement du PAI relative aux saisons montre qu’en été et aux mi- saisons, les trois graphes suivent la même allure avec un éclairage intérieur compris entre 250 lux et 850 lux alors qu’en hiver, la lumière ne suit pas le même comportement car l’angle d’incidence du rayonnement lumineux est trop élevé par rapport aux autres périodes et l’éclairage se situe entre 200 lux et 500 lux. Sa performance optimale est atteinte aux mi- saisons avec un éclairage moyen de l’ordre de 400 lux. Suite à ces résultats, on en conclut que ce système offre un bon rendement annuel avec une gamme acceptable d’éclairage suffisant pour effectuer des tâches visuelles sous un climat chaud et fortement lumineux (ville de Biskra).

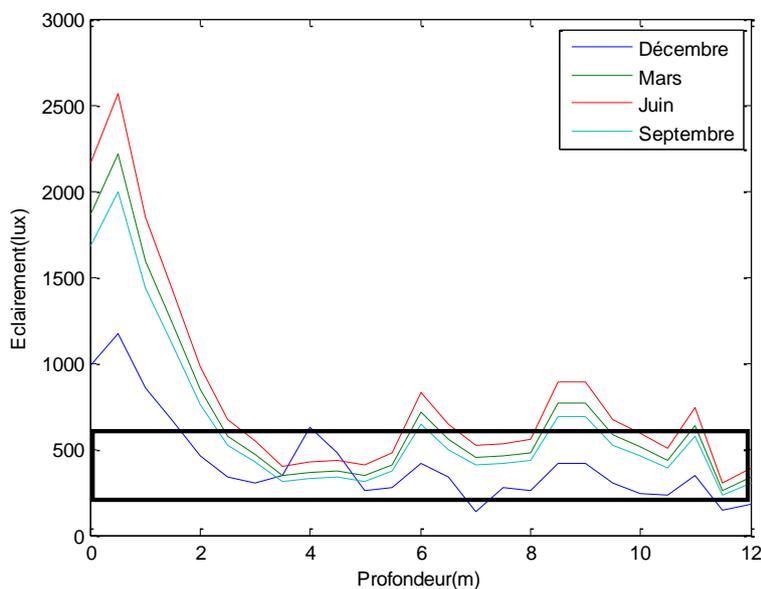


Figure 7.11 : Rendement saisonnier de PAI (Source : Auteur)

7.3.1.e. Par rapport à l'orientation

L'étude de l'effet de l'orientation sur la performance de notre Plafond Anidolique Intégré était faite le 24 mai 2016 à 9h30 dans un site parfaitement dégagé à l'université de Biskra. L'éclairage extérieur était de 26460 lux. Huit mesures d'éclairage intérieur étaient prises simultanément, sur un plan de travail de 0.8 m au sol, dans les quatre orientations : Nord, Sud, Est et Ouest. Les résultats présentés dans la figure 7.12 montrent que par rapport à l'orientation nord, sud et ouest, le modèle testé reçoit un éclairage très rapproché compris entre 300 lux et 500 lux et l'orientation nord est la meilleure en termes de quantité et de qualité de l'éclairage intérieur (500 lux en moyenne sans tâches solaires intérieures). Au niveau de ces orientations, le système joue le rôle d'un régulateur qui permet d'avoir une homogénéité de la distribution lumineuse dans tout le local. Par contre, à l'est, on constate que le modèle reçoit une grande quantité de lumière qui atteint 1000 lux. Cela est dû au fait que les mesures ont été prise le matin au moment où le soleil était bas ce qui conduit à introduire une quantité importante à l'intérieur par les deux fenêtres latérales et l'ouverture zénithale du système. On conclut que sous des conditions similaires, l'orientation nord donne les meilleurs résultats du point de vue uniformité car elle représente le côté le plus éclairé de la voûte céleste avec une lumière plus stable qui permet d'apporter la lumière jusqu'à 12 m de profondeur.

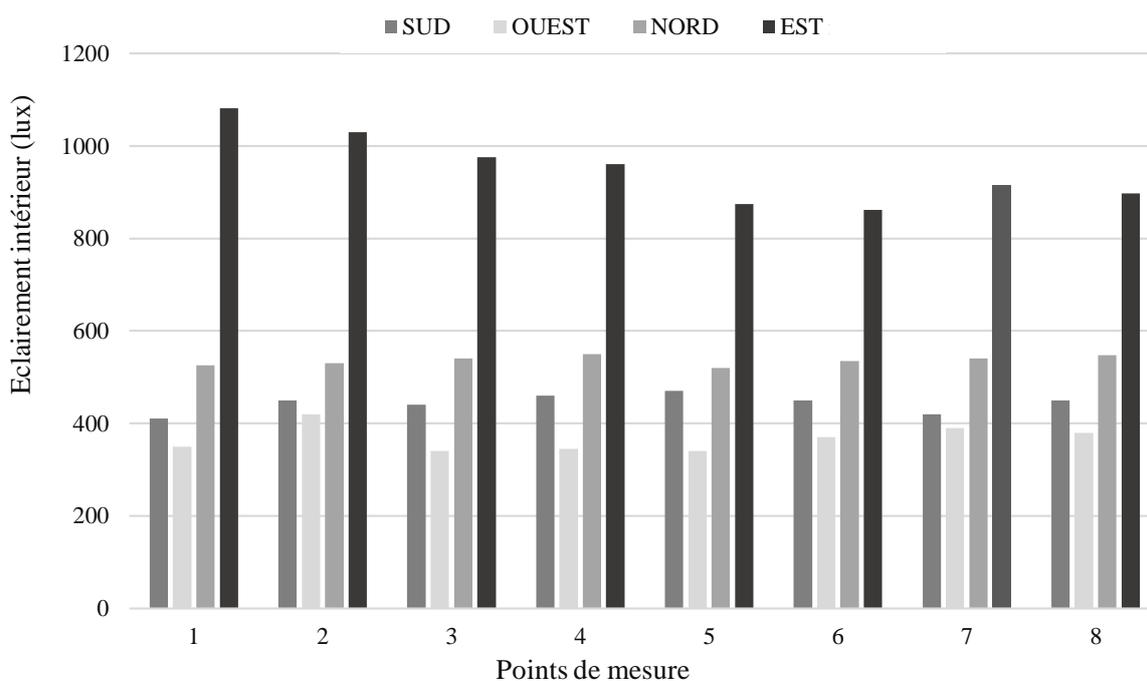


Figure 7.12 : Effet de l'orientation sur le rendement d'un PAI dans un modèle physique (Source : Auteur)

7. 3. 1. f. Par rapport à l'autonomie d'énergie

Cette étude consiste à évaluer l'autonomie de l'éclairage annuelle (DA) que le système du plafond anidolique intégré (PAI) peut fournir, dans un local de grande profondeur et sous des conditions climatiques et lumineuses spécifiques, afin d'estimer les économies d'énergie électrique. L'autonomie de l'éclairage est le synonyme d'économies d'énergie. Pour cela, une simulation sous Ecotect était proposée et faite en deux scénarios : sans et avec PAI. Le calcul de DA couvre toute la période du travail qui est située entre 8h du matin jusqu'à 18h et considère un niveau de 300 lux comme une valeur d'éclairement minimale requise dans tous le local. A partir de la figure 7.13, il est clair que le modèle avec PAI est le meilleur en termes d'autonomie d'énergie par rapport au modèle de référence. Les résultats montrent que, dans la surface éclairée par les light duct du système et qui s'étend de 3 m de l'ouverture jusqu'à 11 m de profondeur, l'autonomie d'énergie annuelle est importante comprise entre 46 % et 66 %. Elle atteint dans certaines zones 80 % d'économie d'énergie. Par contre, l'autonomie qu'offre le modèle de référence est très faible de l'ordre de 19 % seulement et on constate également que plus de trois quart de l'espace est caractérisé par une autonomie nulle qui doit être compensée par un éclairage électrique.

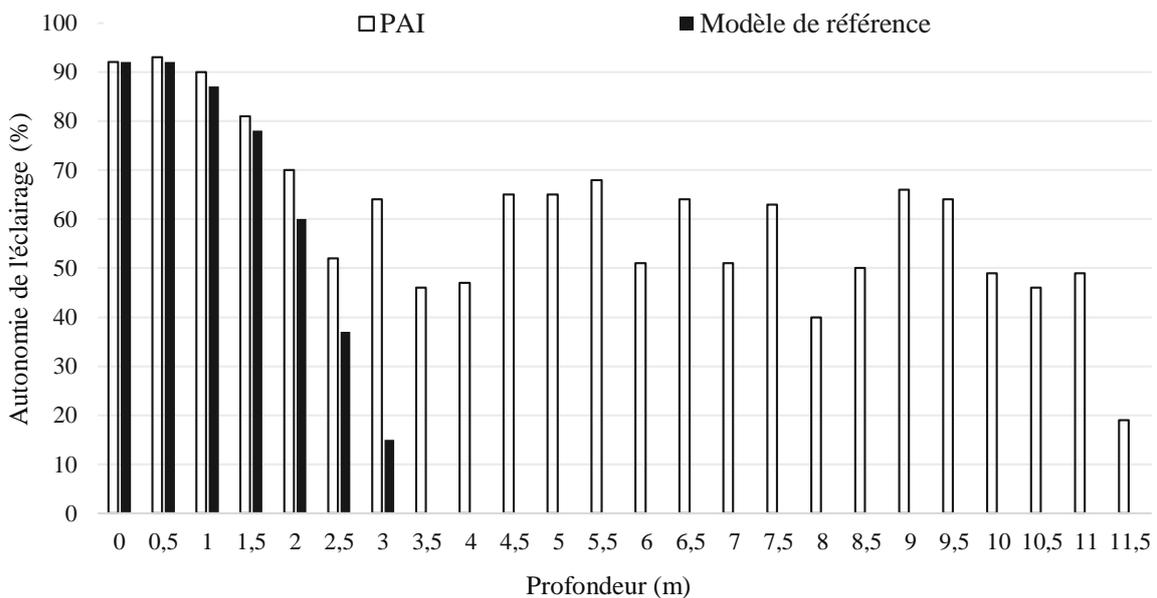


Figure 7.13 : L'autonomie d'énergie donnée par le modèle 3 de PAI (Source : Auteur)

De plus, une deuxième investigation était proposée dans l'intérêt de confirmer l'efficacité de ce système en termes d'économie d'énergie que les systèmes d'éclairage électrique (On/Off Switching et le système Dimming Switch) peuvent fournir. L'analyse du graphe 7.14 indique que, pour un facteur de lumière de jour annuel moyen de 1.83 %, qui correspond à un

éclairage moyen de 500 lux, le système d'éclairage électrique On/Off Switching reste éteint environ 50 % durant l'année et plus de 70 % d'autonomie de l'éclairage peut être obtenue si le mode électrique utilisé est le système Dimming Switch.

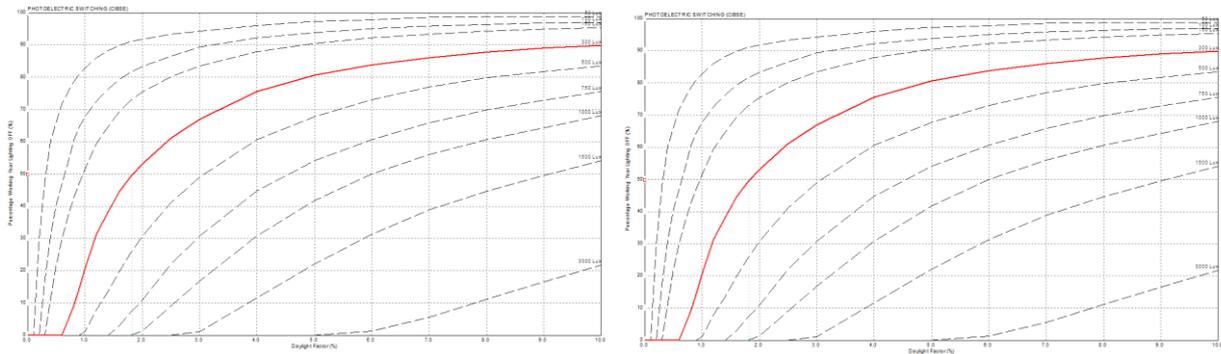


Figure 7.14 : A gauche, l'AEA du système On/Off Switching ; A droite, l'AEA du système Dimming Switch (Source : Auteur à l'aide de Ecotect)

Cette étude indique que le PAI améliore effectivement la pénétration et la distribution de la lumière du jour dans les espaces de grande profondeur pendant la période du travail et durant toute l'année. Il permet non seulement d'atteindre les valeurs d'éclairage recommandées pour l'usage des bureaux mais il conduit aussi à faire des économies substantielles en termes d'électricité. 60 % de l'énergie destinée pour l'éclairage électrique pouvait être gagnée avec ce système, ce qui réduit considérablement la facture énergétique annuelle.

7. 4. Evaluation de l'éblouissement

L'étude qui a été faite par Magali Bodart et Coralie Cauwerts (2016) avait montré que le DGP peut être évalué dans un modèle physique à condition qu'on respecte la géométrie et les données photométriques des parois du modèle étudié. Dans notre investigation, le Daylight Glare Index Probability (D. GI. P) est calculé à partir des images sphériques à l'aide du logiciel Aftab Alpha 2.1.0. Les images sphériques ont été prise à l'intérieur d'un modèle physique de 1:4 dans quatre positions différentes. Trois d'entre eux se trouvent sur la paroi latérale : la première se situe près des ouvertures, la deuxième au centre de la paroi, la troisième est loin des ouvertures alors que la quatrième position se trouve au centre du petit côté situé en face de la paroi des ouvertures (voir la figure 7.15). La caméra et l'objectif Fish-eye ont été installés à une hauteur de la vue d'une personne à 64 cm à l'échelle de 1:4. Cette étude a eu lieu le 4 Janvier 2017 de 9h jusqu'à 11h dans un site dégagé à l'université de Biskra sous un ciel serin (26450 lux).

L'objectif de la présente investigation est d'évaluer, dans des conditions lumineuses réelles, d'une part la performance de notre Plafond Anidolique Intégré et d'autre part l'effet de l'orientation sur la performance de ce dernier dans des situations différentes.

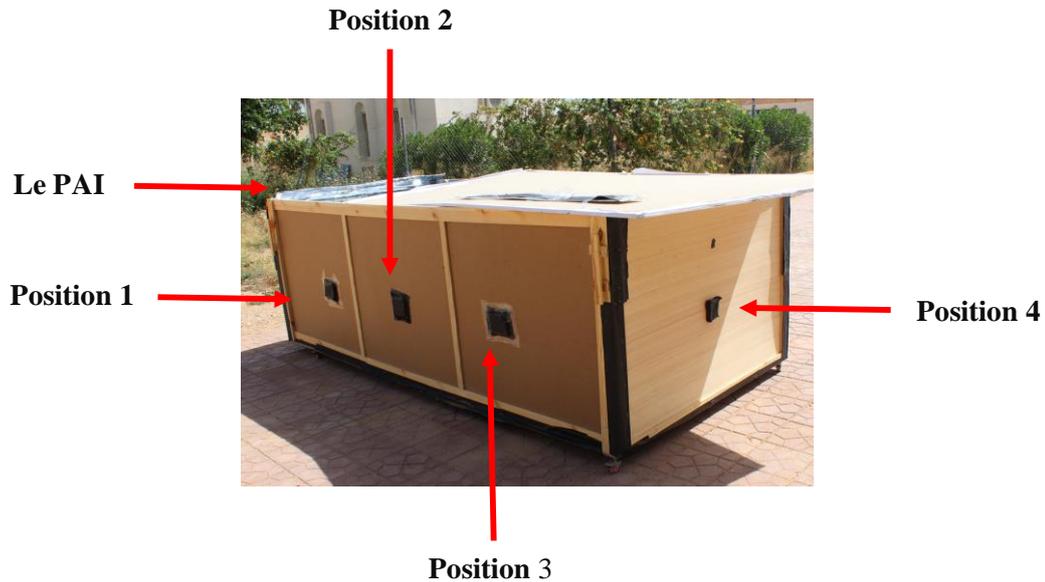


Figure 7.15 : Les quatre positions de prise des images sphériques (Source : Auteur)

7. 4. 1. Evaluation relative à la performance du système

La performance du PAI a été étudiée en analysant les valeurs de Daylight Glare Index Probability (D.G.I.P) calculées à partir des images sphériques ainsi que le nombre et le positionnement des sources d'éblouissement par rapport au champ visuel. Cette étude a été faite dans les modèles physiques (modèle de référence 'sans PAI' et modèle de test 'avec PAI') au niveau des quatre positions (P1, P2, P3 et P4). Les résultats sont présentés dans la figure 7.16, 7.17, 7.18 et 7.19.

NB : L'expérience était faite à 9h sous un ciel clair avec un éclairage extérieur de 18000 lux et les deux modèles étaient orientés au nord.

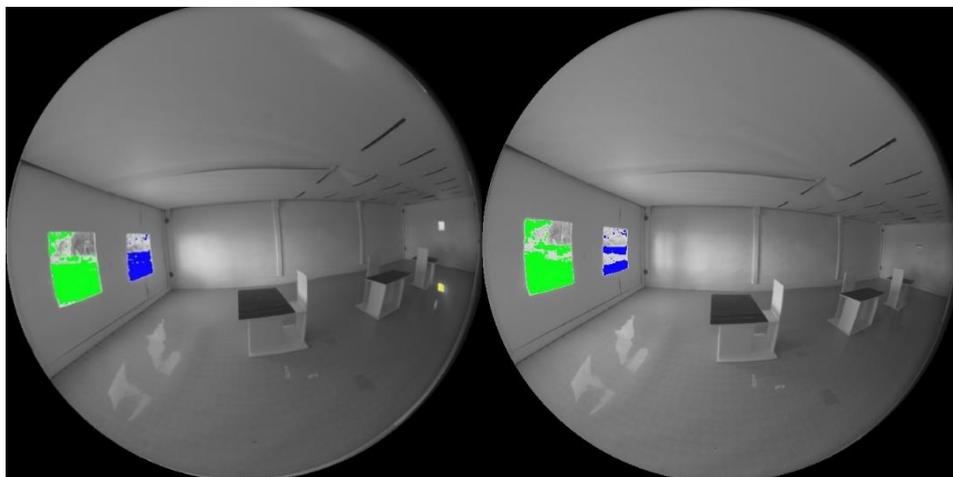


Figure 7.16 : Position 1 : A gauche : modèle avec système ; A droite, modèle sans système (Source : Auteur)

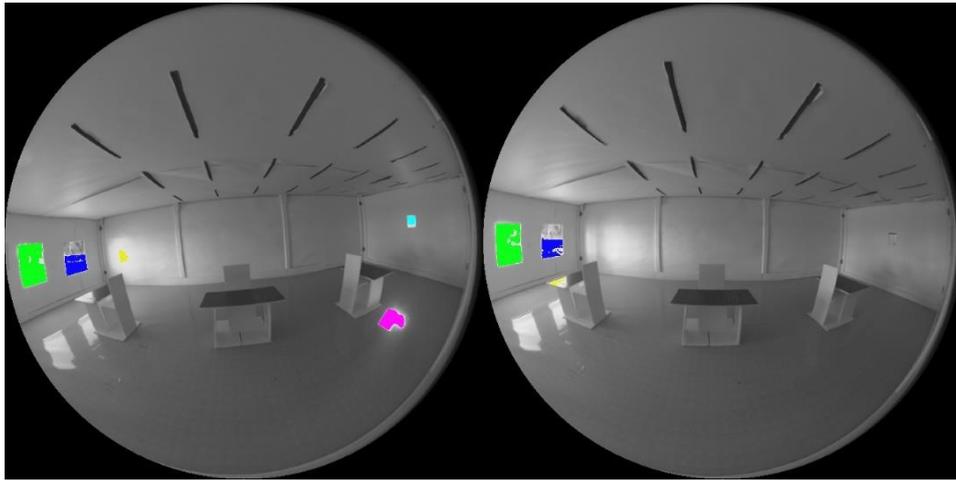


Figure 7.17 : Position 2 : A gauche : modèle avec système ; A droite, modèle sans système (Source : Auteur)

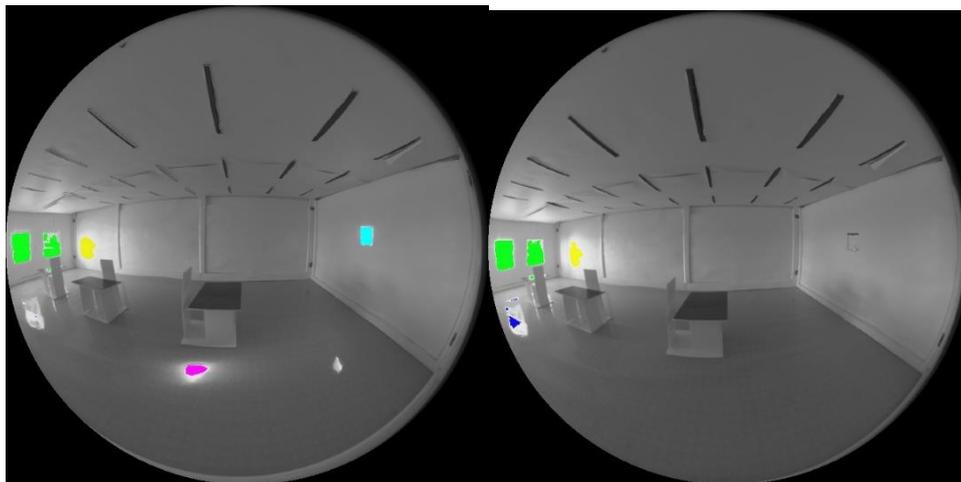


Figure 7.18 : Position 3 : A gauche : modèle avec système ; A droite, modèle sans système (Source : Auteur)

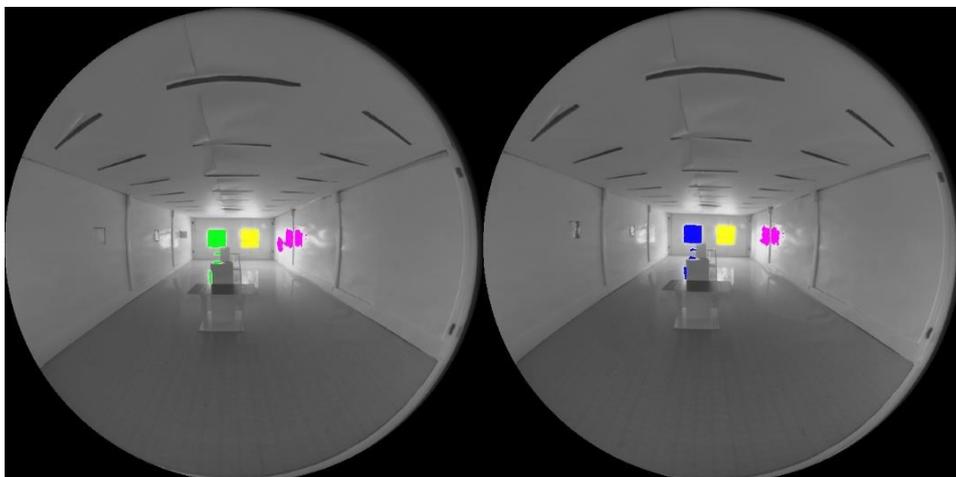


Figure 7.19 : Position 4 : A gauche : modèle avec système ; A droite, modèle sans système (Source : Auteur)

Le tableau suivant présente les caractéristiques des sources éblouissantes ainsi que le pourcentage d'indice d'éblouissement (D. GI. P) calculé à partir des images sphériques par le logiciel Aftab Alpha 2.1.0 pour chaque position dans les deux scénarios (sans et avec PAI) :

Tableau 7.9 : Les valeurs de D. GI. P ainsi que les caractéristiques de la source d'éblouissement obtenus dans les deux modèles dans les quatre positions (Source : Auteur)

		Position 1	Position 2	Position 3	Position 4
Modèle de référence	Le D. GI. P (%)	57%	41.7%	43.5%	48.2%
	Nombre de sources d'éblouissement	6	3	5	6
	Positionnement de la source éblouissante	Fenêtres	Fenêtres Parois Est	Fenêtres Parois Est	Fenêtres Parois Est Sol
Modèle de test	Le D. GI. P (%)	2.6%	1%	0.7%	1.2%
	Nombre de sources d'éblouissement	4	3	5	8
	Positionnement de la source éblouissante	Fenêtres	Fenêtres Parois Est	Fenêtres Parois Est Sol	Fenêtres Parois Est Sol

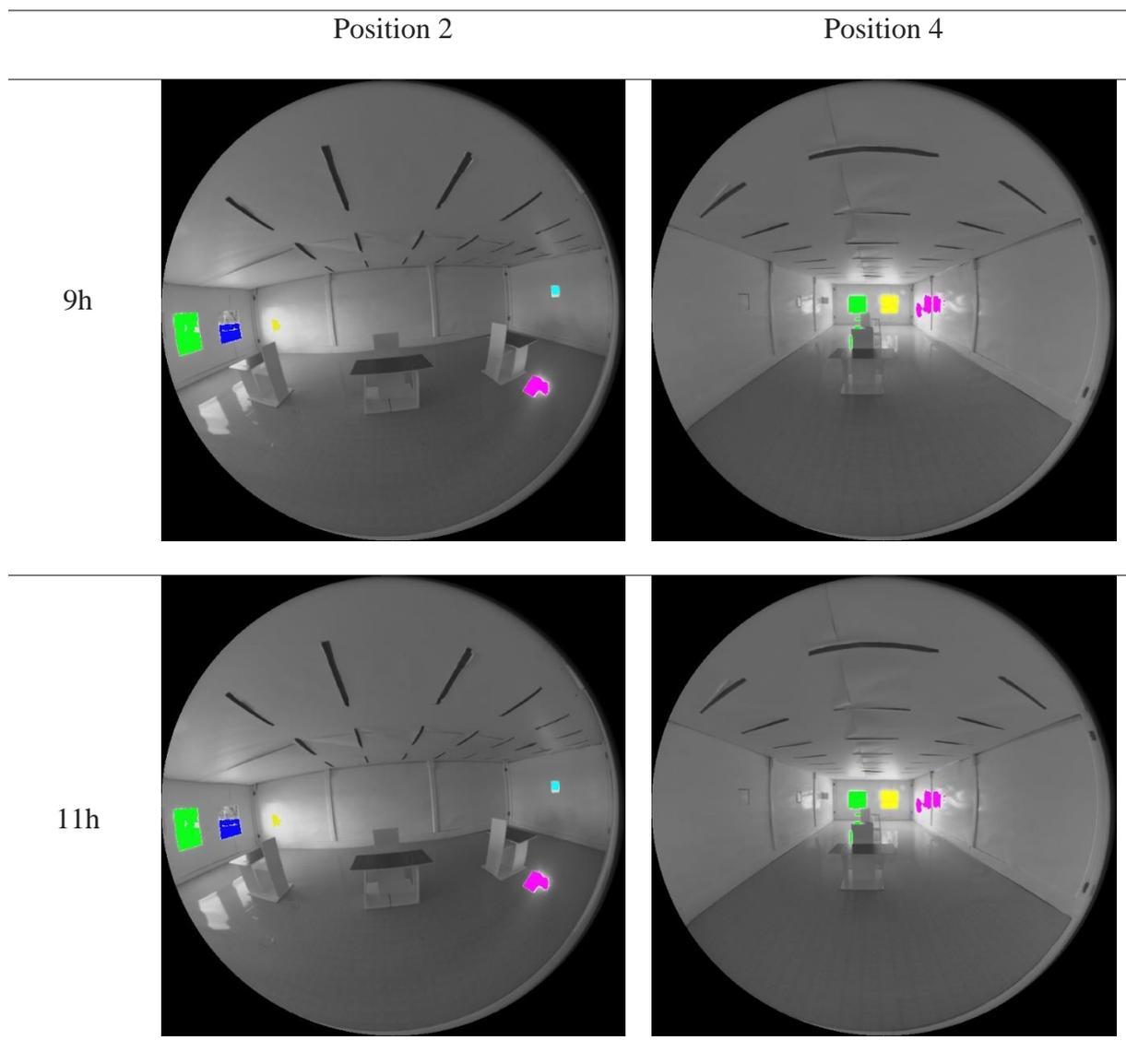
A partir de l'observation des images sphériques et de l'analyse des résultats enregistrés dans le tableau 7.9, il est clair que le modèle de test réduit de manière significative le risque d'éblouissement dans tout le local quel que soit la position de l'observateur. Selon le travail de Jakubiec et Reinhart (2012), le D. GI. P du modèle de référence est au dessus des valeurs recommandées pour le confort visuel, il est compris entre 43.5 % et 57 % et se situe entre juste inconfortable et juste intolérable alors que le D. G I. P du modèle de test est inférieur à 3 % ce qui le rend juste perceptible. On constate également que le nombre des surfaces éblouissantes considérées comme une source de gêne visuelle n'est pas proportionnel au pourcentage d'indice d'éblouissement (D. GI. P). De plus, on remarque que, dans les deux scénarios, les sources d'éblouissement se situent principalement au niveau des deux fenêtres orientées au nord ainsi que la zone qui se trouve près d'elles (la paroi latérale orientée vers l'Est et le sol). Cela est due à la profondeur du local qui rend la différence entre l'éclairage du fond et celui proche de la fenêtre importante même après l'ajout du PAI mais avec un degré moindre. On en conclut que, sous des conditions similaires, l'intégration d'un PAI dans un espace de 12 m de profondeur orienté au nord permet de maintenir un bon niveau de confort visuel résultant d'un risque minimum d'éblouissement qui est réduit à 34 % en moyenne par rapport au modèle de référence.

7. 4. 2. Evaluation relative aux orientations

La deuxième évaluation a pour but d'étudier l'effet de l'ajout de PAI sur la qualité lumineuse intérieure par le calcul du pourcentage d'indice d'éblouissement (D.GI. P) au niveau des quatre orientations et à différentes heures de la journée (à 9h, 11h, 13h, 15h et à 17h). La prise des images était faite dans deux positions différentes : P2 qui se trouve au centre de la paroi latérale et P4 qui est située au centre du petit côté en face des ouvertures.

NB : cette investigation était faite de 9:30h à 10h et l'éclairement extérieur était de l'ordre de 20000 lux.

7. 4. 2. a. Par rapport à l'orientation Nord



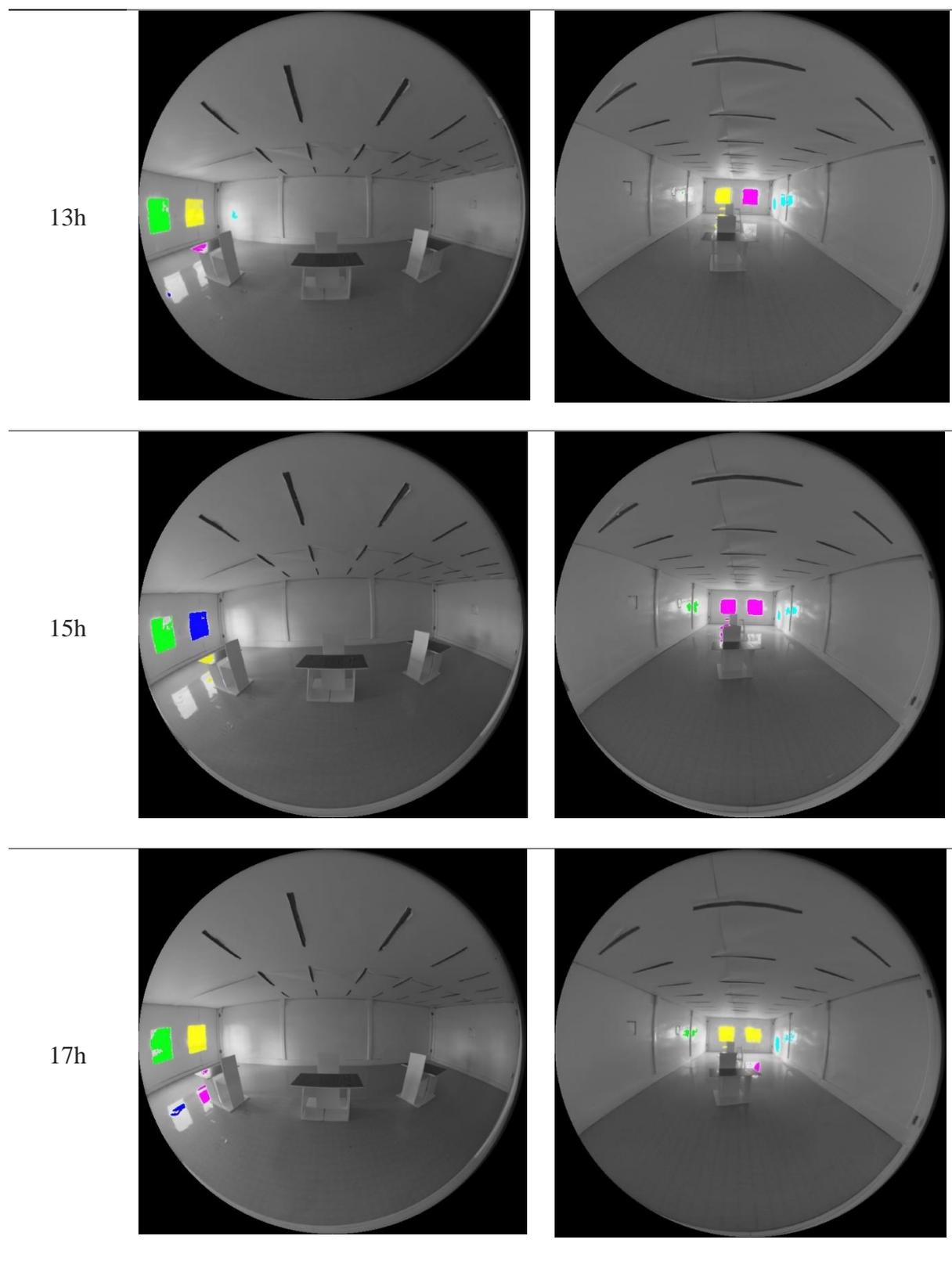


Figure 7.20 : Images sphériques traitées prises au Nord dans P2 et P4 aux différentes heures : A gauche, position 2 ; A droite, position 4 (Source : Auteur)

Les résultats en termes de valeurs de D. GI. P calculés ainsi que le nombre et la position des surfaces éblouissantes obtenus au nord sont présentés dans le graphe 7.21 et le tableau 7.

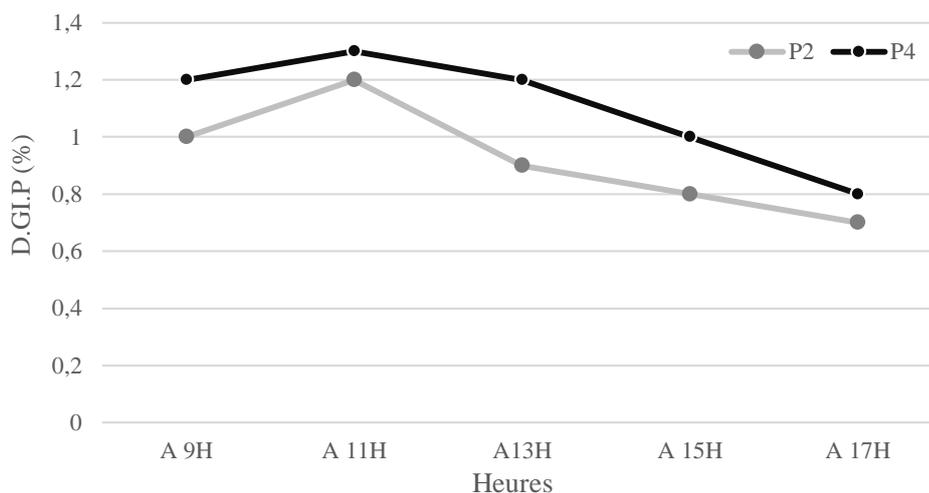


Figure 7.21 : Le D. GI.P calculé au nord dans P2 et P4 aux différentes heures (Source : Auteur)

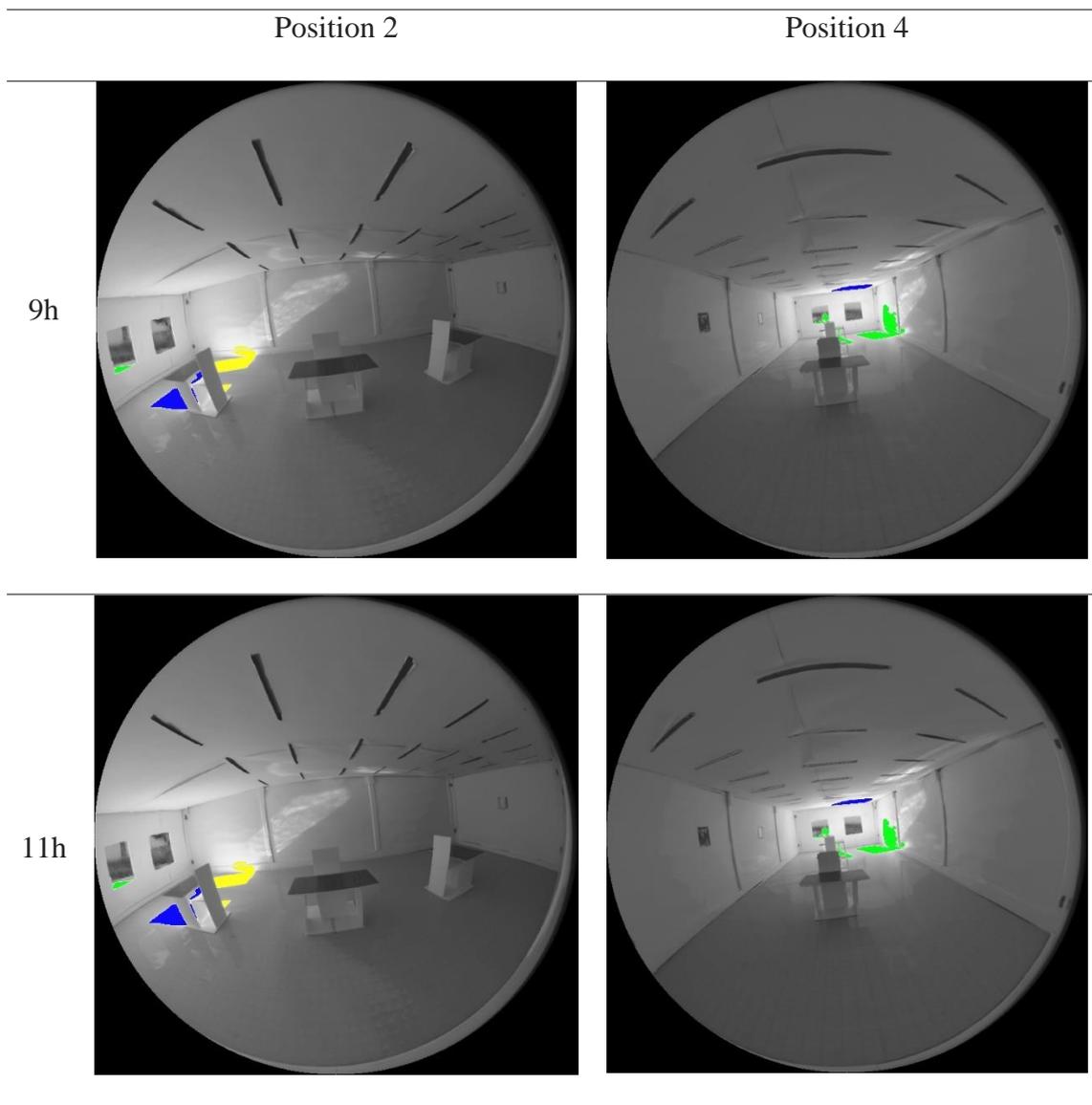
Tableau 7.10 : Les caractéristiques de la source d'éblouissement obtenu dans la position 2 et 4 au niveau de l'orientation Nord (Source : Auteur)

		9h	11h	13h	15h	17h
Position 2	Nombre de sources d'éblouissement	3	3	5	5	6
	Position de la source éblouissante	Fenêtres Parois Est	Fenêtres Parois Est	Fenêtres Parois Est Sol	Fenêtres Sol	Fenêtres Sol
Position 4	Nombre de sources d'éblouissement	8	8	9	10	10
	Position de la source éblouissante	Fenêtres Parois Est Sol	Fenêtres Parois Est Sol	Fenêtres Parois Est Sol	Fenêtres Parois Est et Ouest Sol	Fenêtres Parois Est et Ouest Sol

Les résultats montrent que les valeurs de D.G.I.P enregistrées dans P2 et P4 sont très rapprochées et comprises entre 0.7 % et 1.3 %, valeurs qui sont considérées comme juste imperceptibles et permettent d'avoir un environnement visuel satisfaisant (selon les normes). De plus, dans les deux positions, le risque d'éblouissement le matin est plus important qu'à l'après midi. Le D.G.I.P est compris entre 1 % et 1.3 % le matin, il diminue à l'après midi pour être situé entre 0.7 % et 1 %. Cela est dû à la distribution de la luminance dans la voûte céleste, surtout que le jour d'expérimentation était caractérisé par un ciel clair avec soleil. On constate

également que le nombre de surfaces éblouissantes au niveau de P4 est plus important que celui de P2 et les valeurs de D.GI.P obtenues au niveau de ce dernier sont moins élevées. Ce constat nous permet de dire, qu'au niveau de cette configuration nord, la relation entre le nombre de surfaces éblouissantes et le pourcentage d'éblouissement produit est proportionnel. Les sources considérées comme éblouissantes se trouvent dans la même position durant les différentes heures de l'étude à l'exception de la P2 qui marque une surface éblouissante plus étalée qui se répartit sur la paroi est et ouest. De manière générale, cette étude nous a permis de conclure qu'un modèle équipé d'un PAI orienté vers le nord, permet de créer une atmosphère intérieure visuellement confortable sans aucun risque d'éblouissement même s'il se présente avec un faible pourcentage.

7. 4. 2. b. Par rapport à l'orientation Sud



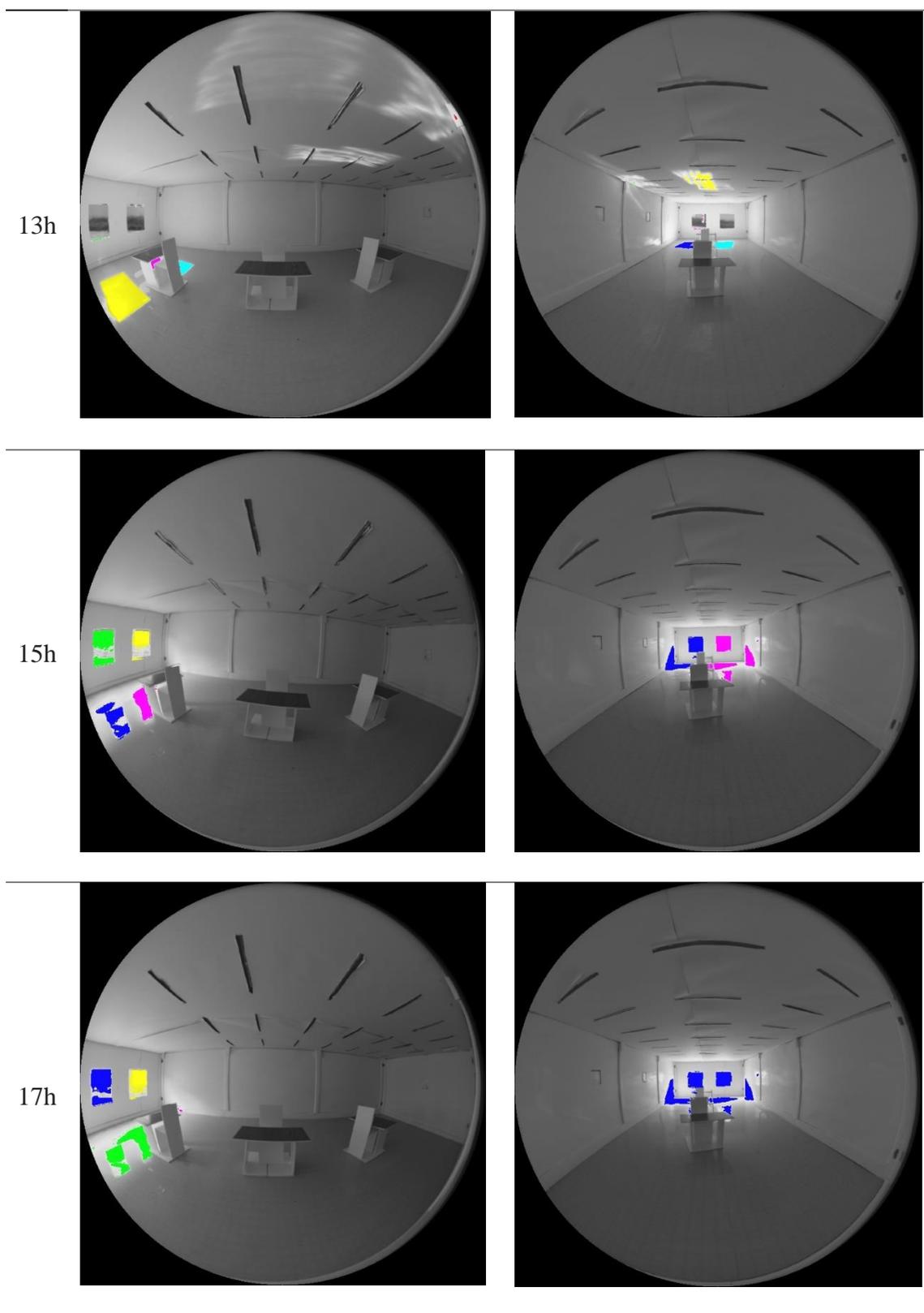


Figure 7.22 : Images sphériques traitées prises au Sud dans P2 et P4 aux différentes heures : A gauche, position 2 ; A droite, position 4 (Source : Auteur)

Les résultats du calcul numérique sont présentés ci-dessous :

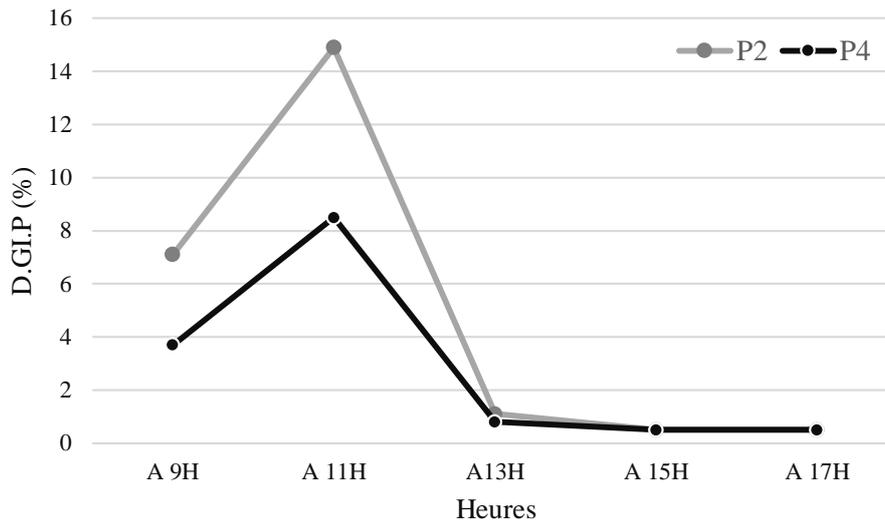


Figure 7.23 : Le D. GI.P calculé au sud dans P2 et P4 aux différentes heures (Source : Auteur)

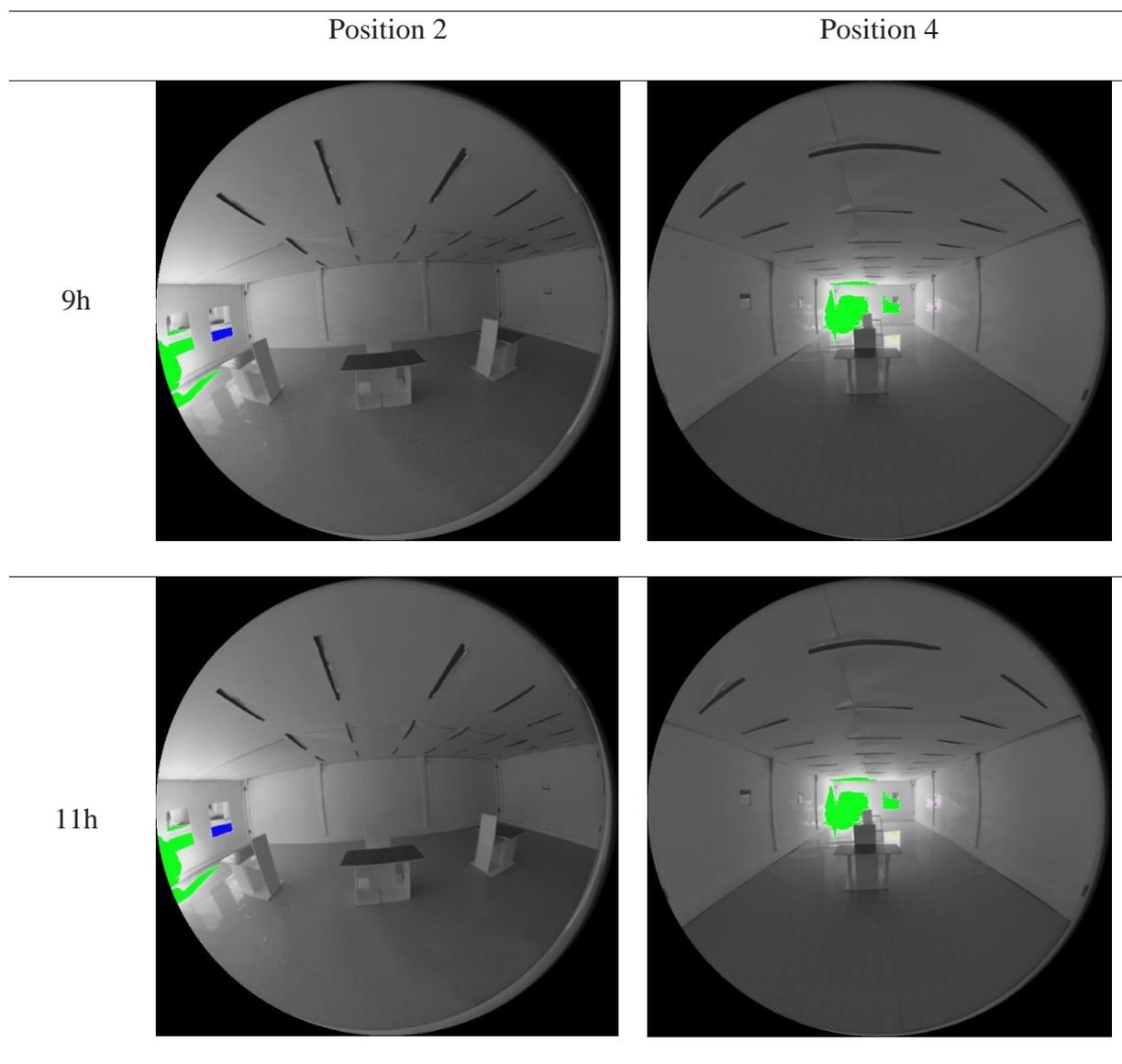
Tableau 7.11 : Les caractéristiques de la source d'éblouissement obtenues dans la position 2 et 4 au niveau de l'orientation Sud (Source : Auteur)

		9h	11h	13h	15h	17h
Position 2	Nombre de sources d'éblouissement	6	6	4	6	5
	Position de la source éblouissante	Fenêtres Sol Parois Ouest	Fenêtres Sol Parois Ouest	Fenêtres Sol	Fenêtres Sol	Fenêtres Sol Parois Ouest
Position 4	Nombre de sources d'éblouissement	5	5	5	8	9
	Position de la source éblouissante	Fenêtres Parois Ouest Sol	Fenêtres Parois Ouest Sol	Plafond Sol Fenêtres	Fenêtres Parois Est et Ouest Sol	Fenêtres Parois Est et Ouest Sol

Par rapport à l'orientation sud, l'analyse des données indique que le PAI confirme sa performance lumineuse d'éclairer naturellement sans produire des effets visuels indésirables. Les résultats montrent que le pourcentage des indices d'éblouissement calculés dans des deux positions est considéré, selon les études, comme satisfaisant car il n'atteint pas 35 %. Le graphe démontre qu'au début de la journée, les valeurs de D. GI. P obtenues au niveau de P2 (7.1 %-14.9 %) sont plus importantes que celles données par la P4 (3.7 %-8.5 %). A midi, les deux

graphes se rapprochent pour qu'ils se superposent à la fin de la journée avec une valeur stable de l'ordre de 0.5 %. L'écart de D.GI.P enregistré entre le matin et l'après-midi résulte de la rotation du modèle vers le sud, là où le soleil est présent. De plus, contrairement au nord, les résultats montrent que le pourcentage d'indice d'éblouissement obtenu est indépendant du nombre des surfaces éblouissantes et ces dernières sont réparties sur une surface plus grande qui s'étale sur les feux fenêtres, le sol, la paroi est et ouest et le plafond. On en conclut que le PAI a démontré un bon rendement au sud avec un risque minimum de présence d'éblouissement avec des valeurs de D.GI.P qui sont au-dessous de la norme recommandée ($\leq 35\%$) même si ces dernières atteignent parfois des valeurs 14 fois plus élevées que celles obtenues au nord.

7. 4. 2.3. Par rapport à l'orientation Est



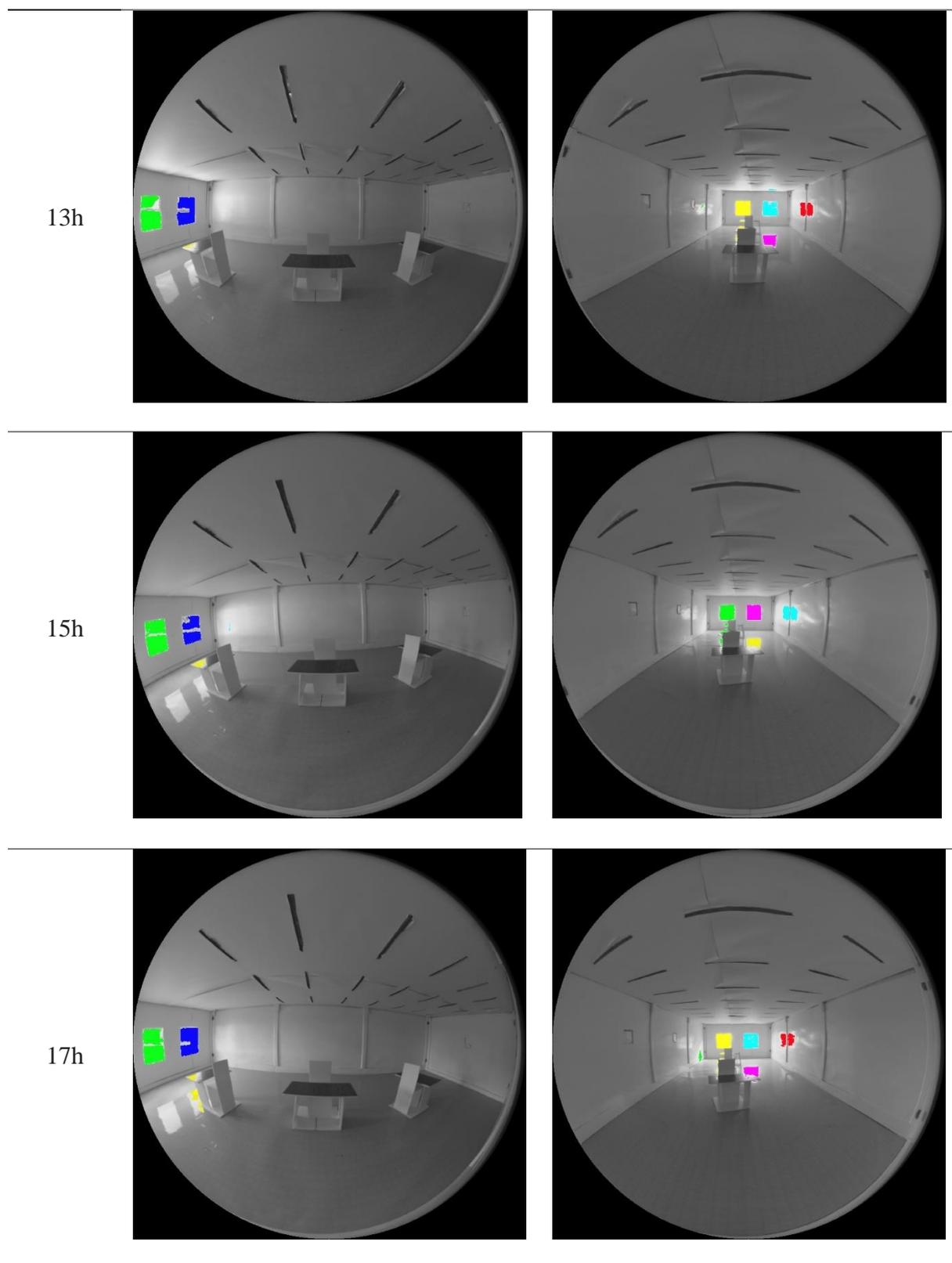


Figure 7.24 : Images sphériques traitées prises à l'Est dans P2 et P4 aux différentes heures : A gauche, position 2 ; A droite, position 4 (Source : Auteur)

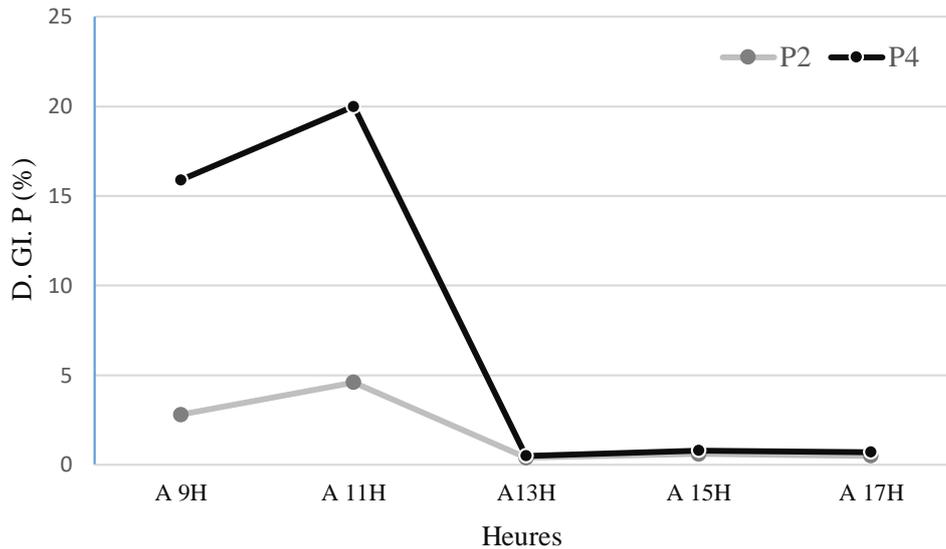


Figure 7.25 : Le D. GI.P calculé à l'Est dans P2 et P4 aux différentes heures (Source : Auteur)

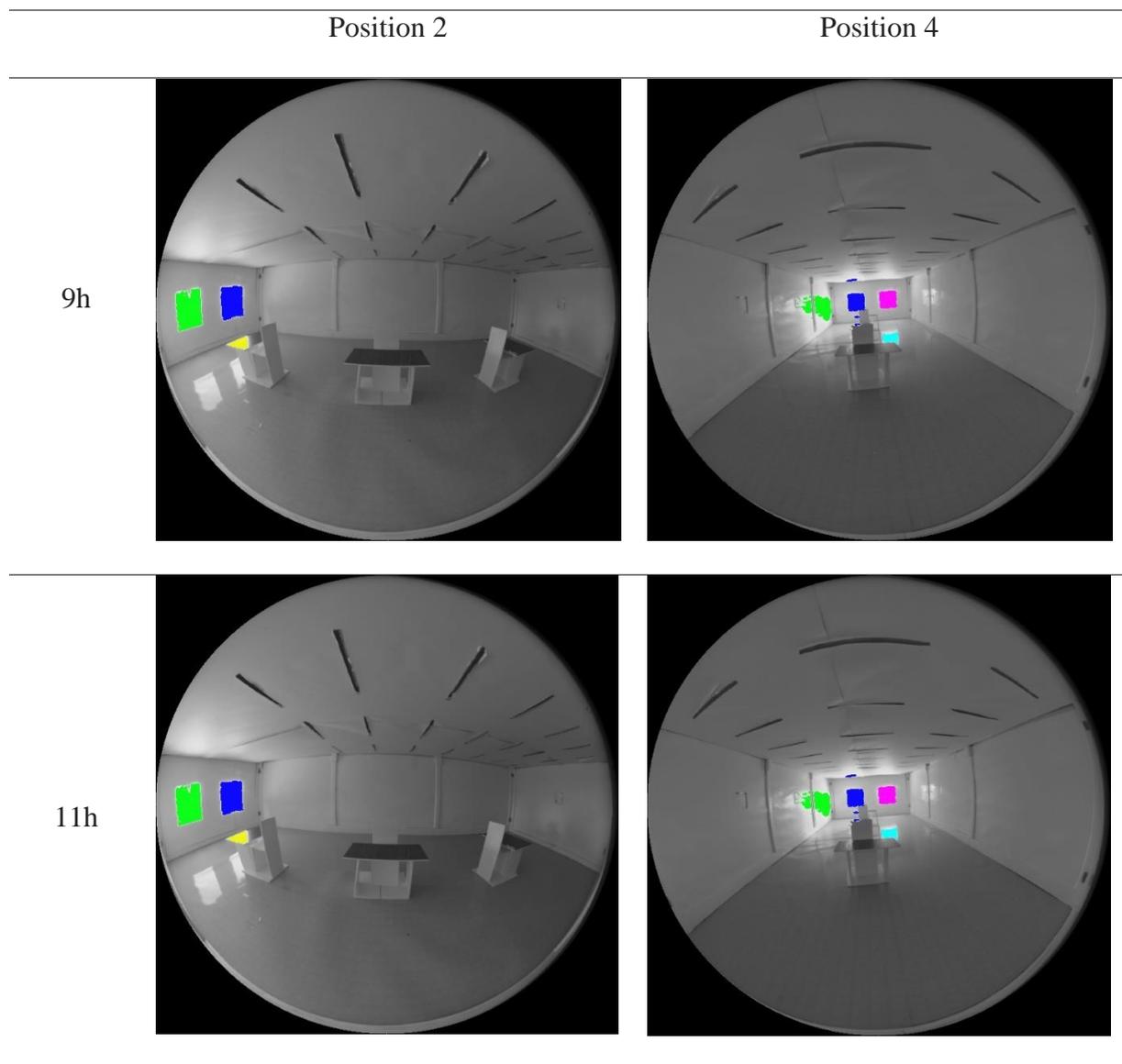
Tableau 7.12 : Les caractéristiques de la source d'éblouissement obtenu dans la position 2 et 4 au niveau de l'orientation Est (Source : Auteur)

		9h	11h	13h	15h	17h
Position 2	Nombre de sources d'éblouissement	4	4	3	3	5
	Position de la source éblouissante	Fenêtres Sol Parois Est	Fenêtres Sol Parois Est	Fenêtres Sol	Fenêtres Sol	Fenêtres Sol
Position 4	Nombre de sources d'éblouissement	4	4	9	7	8
	Position de la source éblouissante	Fenêtres Parois Nord, Est Sol, Plafond	Fenêtres Parois Nord, Est Sol, Plafond	Fenêtres Parois Est, Sud, Nord Sol	Fenêtres Parois Est, Sud Sol	Fenêtres Parois Est, Sud, Nord Sol

Selon les résultats obtenus, il est clair que le pourcentage d'indice d'éblouissement calculé à l'est est situé dans une gamme très acceptable (selon les normes). Les valeurs de D. GI. P obtenues sont comprises entre 0.4 % et 20 %. A partir du graphe 7.25, on remarque que, comme au sud, les deux courbes de P2 et P4 sont parallèles et convergent par la suite à partir de 13h pour atteindre des valeurs très basses (jusqu'à 0.4 %). On constate également qu'à 9h et à 11h, il y'a une différence remarquable entre le D. GI. P calculé au niveau des deux positions. Le risque d'éblouissement dans la position 4 est cinq fois plus élevé que celui produit au niveau de

la position 2. De plus, l'observation des images sphériques a montré que, comme au sud, le pourcentage d'indice d'éblouissement ne dépend pas du nombre des sources éblouissantes mais par l'intensité de la source elle-même. A l'est, les sources qui provoquent le risque d'éblouissement sont distribuées sur une zone plus large par rapport aux configurations précédentes (nord et sud). Elles se situent au niveau des fenêtres, le sol, le plafond et la façade est, nord et sud. Cela est dû au fait qu'au cours de l'expérience (période hivernale), le soleil était bas, ce qui conduit à produire des tâches dans multiples directions. Comme synthèse préliminaire, on peut dire que le système de PAI fonctionne parfaitement lorsqu'il est orienté vers l'est et permet de générer des valeurs de D. GI. P qui ne dépassent pas les 20 % comme cas extrême et par conséquent, conduit à un confort visuel optimal.

7. 4. 2. d. Par rapport à l'orientation Ouest



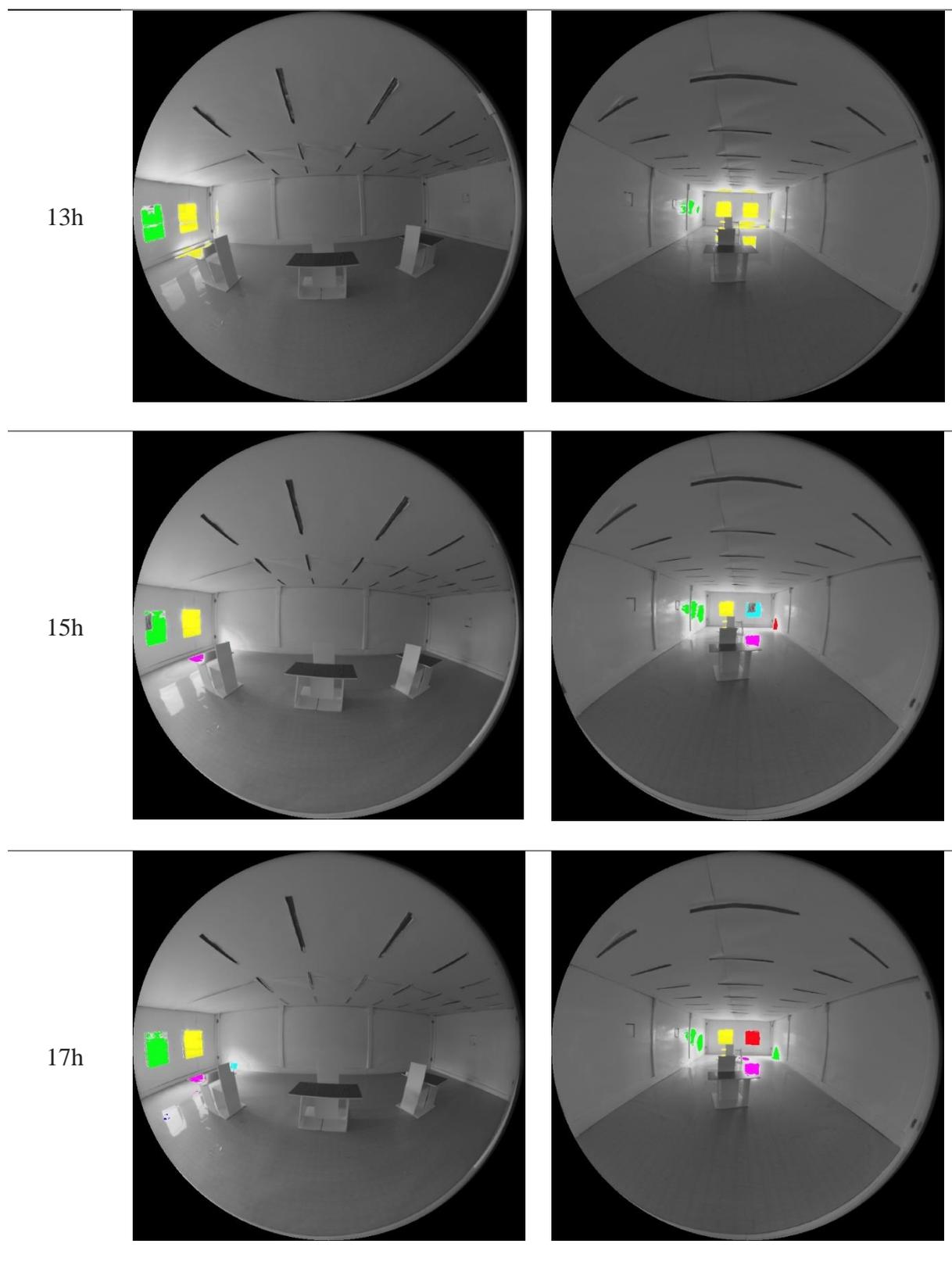


Figure 7.26 : Images sphériques traitées prises à l'Est dans P2 et P4 aux différentes heures : A gauche, position 2 ; A droite, position 4 (Source : Auteur)

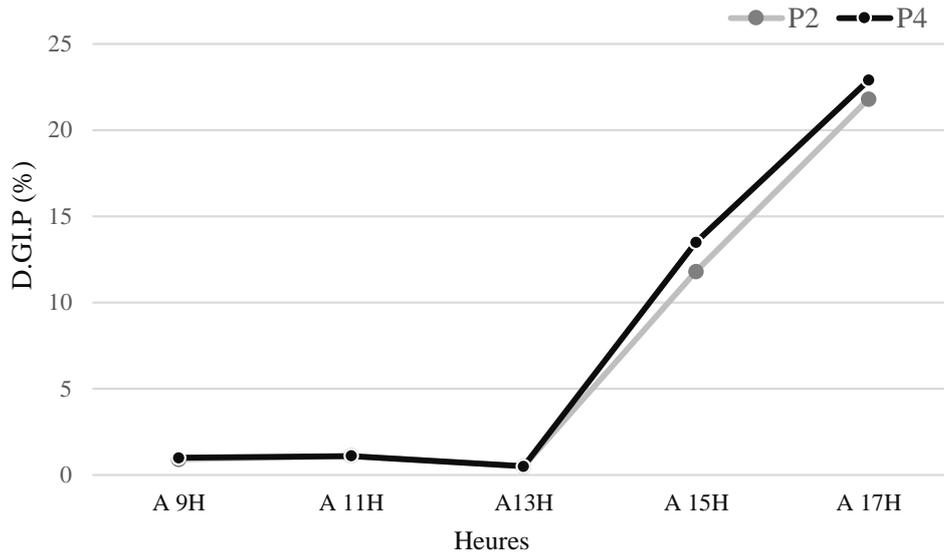


Figure 7.27 : Le D. GI.P calculé à l'Ouest dans P2 et P4 aux différentes heures (Source : Auteur)

Tableau 7.13 : Les caractéristiques de la source d'éblouissement obtenu dans la position 2 et 4 au niveau de l'orientation Ouest (Source : Auteur)

		9h	11h	13h	15h	17h
Position 2	Nombre de sources d'éblouissement	3	3	4	3	5
	Position de la source éblouissante	Fenêtres Sol	Fenêtres Sol	Fenêtres Sol Parois Nord	Fenêtres Sol	Fenêtres Sol
Position 4	Nombre de sources d'éblouissement	7	7	14	9	10
	Position de la source éblouissante	Fenêtres Parois : Nord, Sud, Ouest Sol Plafond	Fenêtres Parois : Nord, Sud Sol Plafond	Fenêtres Parois : Nord, Sud, Ouest Sol Plafond	Fenêtres Parois : Nord, Sud, Ouest Sol	Fenêtres Parois : Nord, Sud, Ouest Sol

A l'inverse des résultats précédents, les courbes de P2 et P4 obtenues en orientant le modèle vers l'ouest suivant la même allure et elles sont presque superposées. Les valeurs de D. GI. P enregistrées sont comprises entre 0.5 % comme une valeur minimale et 22.9 % comme une valeur maximale. Bien que le pourcentage d'indice d'éblouissement commence à être important au niveau de cette orientation, mais il reste toujours inférieur au seuil pour avoir un risque d'éblouissement (<35 % selon la référence). De plus, dans la période située entre 9h et 13h, les

valeurs de D. GI. P calculées sont presque négligeables et qui augmentent par la suite jusqu'à ce qu'elles atteignent leur valeurs maximales à 17 % (21.8 % pour la P2 et 22.9 % pour la P4). L'analyse du tableau 7.13 montre que le pourcentage d'indice d'éblouissement n'est pas lié aux nombre des surfaces considérées comme éblouissantes. On constate également que les sources d'éblouissement dans la position 2 sont limitées seulement au niveau des ouvertures, du sol et une petite surface dans la paroi nord alors qu'au niveau de la position 4, cette zone critique devient plus large et s'étale pour qu'elle soit située aux ouvertures, au sol, au plafond et dans la paroi nord, sud et ouest.

On en conclut que le système de PAI marque une bonne performance même s'il est orienté vers l'ouest ce qui produit un environnement visuel confortable avec un éblouissement juste perceptible qui ne provoque aucune gêne visuelle.

Conclusion

L'étude proposée dans ce chapitre a comme objectif d'évaluer quantitativement la performance du système de Plafond Anidolique Intégré par le recours à la simulation numérique et expérimentale sous un climat lumineux réel de la ville de Biskra. Cette étude est structurée en trois parties : 1) Un travail de validation : d'une part, entre le modèle réduit et le modèle physique et d'autre part, entre la simulation et les mesures sur site, 2) Une évaluation quantitative de la performance de PAI et 3) Une étude de l'éblouissement comme l'un des principaux critères déterminant le confort visuel. Les résultats de la validation de l'échelle du modèle réduit ont indiqué qu'un taux de variation moyen (TV_{moyen}) de $\pm 1.8\%$ a été enregistré entre un modèle de 1:4 et celui de 1:12 ce qui prouve que la quantité de la lumière reçue à l'intérieur de la maquette n'est pas liée à la taille de cette dernière. Elle est pratiquement identique quel que soit l'échelle du modèle physique. La deuxième validation a montré qu'il y a une concordance entre les résultats numériques et ceux issus des mesures sur site. L'écart maximum d'éclairement obtenu par les deux outils est de l'ordre de 52 lux pour l'axe AA et 59 lux pour l'axe BB et le TV_{moyen} était de l'ordre de $\pm 4.5\%$ pour l'axe latéral et $\pm 4.1\%$ pour l'axe central. Ces valeurs confirment la fiabilité de logiciel Ecotect pour étudier l'éclairage à l'intérieur d'un environnement construit.

La comparaison du rendement de notre système avec celui d'une fenêtre classique montre que l'éclairage du modèle de référence est au-dessous du niveau du confort visuel recommandé pour l'usage des bureaux. Il reçoit un éclairage mal réparti qui n'atteint pas le fond avec l'absence de zone de confort visuel. Par contre, le modèle de test permet d'avoir une large zone de confort caractérisée par un éclairage compris entre 300 lux et 500 lux et qui couvre 60 % de la surface totale. De plus, le modèle expérimental se démarque par un éclairage uniforme et bien réparti dans tout le local. Les résultats indiquent aussi qu'à douze mètres de la fenêtre, l'éclairage du modèle équipé d'un PAI est cinq fois plus élevé par rapport à celui de référence. Cette étude confirme l'efficacité de PAI pour illuminer de manière suffisante et efficace des espaces ayant une grande profondeur. L'analyse du rendement de PAI durant la période située entre 9h et 16h, montre que le niveau d'éclairement intérieur dépend fortement de la quantité d'éclairement extérieur disponible qui change d'une heure à l'autre. La conception de ce dernier permet, par conséquence, de s'adapter avec le changement de la luminance du ciel. Les sorties de light duct peuvent être utilisées en cas d'un faible éclairage extérieur afin d'éclairer suffisamment le local et également être fermées dans le cas d'un éclairage excessif. De plus, les résultats concernant le rendement du système au cours de l'année montrent que ce dernier offre un bon

rendement pendant les saisons avec un éclairage moyen acceptable compris entre 200 lux et 500 lux suffisant pour effectuer des tâches dans un environnement visuel confortable pour un climat chaud et fortement lumineux.

L'étude de l'effet de l'orientation sur la performance du Plafond Anidolique Intégré a montré que ce système joue le rôle d'un régulateur qui permet d'avoir une homogénéité de la distribution lumineuse dans tout le local avec un éclairage intérieur situé entre 300 lux et 500 lux quel que soit l'orientation. Les résultats confirment aussi que, sous un climat chaud, l'orientation nord est la meilleure en termes de quantité et de qualité de lumière reçue (500 lux en moyenne sans taches solaires intérieures) car elle fournit une lumière plus stable qui permet d'apporter la lumière jusqu'à 12 m de profondeur. Une étude complémentaire a été proposée dans le but d'analyser l'autonomie de l'éclairage annuelle que le système du plafond anidolique intégré peut fournir. Les résultats montrent que l'autonomie qu'offre le modèle de référence est très faible de l'ordre de 19 % par rapport au modèle de test qui atteint 60 %. De plus, l'étude avait montré que pour un facteur de lumière de jour annuel moyen de 1.83 %, qui correspond à un éclairage moyen de 500 lux, le système d'éclairage électrique On/Off Switching reste éteint d'environ 50 % durant l'année et plus de 70 % d'autonomie de l'éclairage peut être gagnée si le mode électrique utilisé est le système Dimming Switch. On en conclut que le PAI permet de faire des économies substantielles en termes d'électricité et permet également de réduire la facture énergétique annuelle dans les espaces de grande profondeur pendant la période du travail et durant toute l'année.

L'évaluation du phénomène de l'éblouissement à l'intérieur d'un modèle physique équipé d'un Plafond Anidolique Intégré, dans des conditions lumineuses réelles, a montré que le modèle du test réduit de manière significative le risque d'éblouissement à 34 % en moyenne par rapport au modèle de référence quelle que soit la position de l'observateur. L'analyse des valeurs de D. GI. P a montré que le risque d'éblouissement est présent de 45 % dans le modèle de référence et de 3 % seulement dans le modèle du test. Ces pourcentages, selon les normes, rend ce phénomène juste inconfortable et juste intolérable dans le modèle sans système intégré et juste perceptible dans le modèle avec PAI. De plus, les résultats prouvent que le PAI permet d'éliminer le risque d'éblouissement durant les différentes heures de la journée quelle que soit l'orientation du système, les valeurs de D. GI. P enregistrées au niveau des quatre orientations sont inférieures à 35 %. L'analyse des résultats avait indiqué que les pourcentages d'indices d'éblouissement obtenus au nord sont très rapprochés et stables pendant les différentes heures de calcul alors qu'au niveau de l'orientation sud, est et ouest, le D. GI. P change de manière

significative entre le matin et l'après (cinq fois plus fort). A partir des images sphériques et des résultats obtenus, il est clair qu'au niveau de toutes les orientations à l'exception de celle du nord, le pourcentage d'indice d'éblouissement (D. GI. P) ne dépend pas du nombre des surfaces éblouissantes considérées comme une source de gêne visuelle mais il est lié à l'intensité lumineuse de la source elle-même. Par contre, le nombre des sources éblouissantes dépend de la position de l'observateur. Les images ont montré également qu'au niveau de la position 4, qui est située en face des fenêtres, les zones lumineuses sont plus nombreuses et s'étalent sur une large surface (sol, fenêtres, plafond et parois) alors que, par rapport à la position latérale (P2) le nombre ainsi que la surface qu'elles couvrent sont moindre.

De manière générale, on en conclut que le modèle équipé d'un PAI orienté vers le nord permet de créer une atmosphère intérieure visuellement confortable sans aucun risque d'éblouissement avec une lumière stable satisfaisante en quantité et en qualité.

Références

AFTAB Alpha 2.1.0. Software por Majid Miri e Elmia Ashtari. Outubro de 2015. Stockholm, Sweden. Disponível em: <[http:// http://aftabsoft.net/](http://http://aftabsoft.net/)>. Acesso em: 10 de agosto de 2016.

Association Française de l'Éclairage : Recommandations relatives à l'éclairage intérieur des lieux de travail, AFE, 1993.

Autodesk Ecotect Analysis-©Autodesk, Inc.2011.

Bodart, M., & Cauwerts, C. (2017). Assessing daylight luminance values and daylight glare probability in scale models. *Building and Environment*, 113, 210-219.

EN 12464-1, 2002. Light and lighting – Lighting at work places – Part I: Indoor Work Places. European Standard. ISBN number: 0580411281.

IESNA (2000). The IESNA Lighting Handbook, 9th ed. New York: IESNA (Illuminating Engineering Society of North America).

Jakubiec, J.A., & Reinhart, C.F. (2012). The adaptive zone - A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces. *Lighting research and Technology*, 44(2), 149-170.

Wittkopf, S.K., Yuniarti, E., & Soon, L.K. (2006). Prediction of energy savings with anidolic integrated ceiling across different daylight climates. *Energy and Buildings* 38, 1120-1129.

CHAPITRE 8

ENQUÊTE SUR LA QUALITÉ LUMINEUSE INTÉRIEURE DANS UN MODÈLE PHYSIQUE

Introduction

Le recours à l'enquête en faisant appel à des effectifs et un formulaire de questionnaire est une méthode efficace permettant d'étudier l'aspect visuel d'un espace construit. Cette méthode a prouvé son efficacité même dans le cas d'un modèle physique de taille réduite, elle permet de donner des sensations réelles sur l'environnement lumineux intérieur. Le principal intérêt de ce chapitre porte sur l'évaluation de la qualité lumineuse à l'intérieur d'un modèle physique selon deux scénarios et au niveau de quatre positions différentes, par l'intermédiaire d'un formulaire de questionnaire composé de quinze questions regroupées en quatre facteurs (voir chapitre méthodologie) ainsi que des mesures photométriques en termes de D.G.I.P (%).

Les questions du formulaire construit demandent des réponses subjectives sur les aspects qualitatifs de l'environnement visuel intérieur récoltées par soixante-deux participants tandis que les mesures quantitatives permettent de fournir des valeurs numériques en termes d'indice d'éblouissement calculées à partir des images sphériques prises dans les mêmes conditions de l'enquête. Les données quantitatives et qualitatives résultantes de ces deux expériences vont être étudiées et analysées par le logiciel SPSS 24.0. L'analyse statistique sera initiée par un test de fiabilité afin d'étudier la corrélation interne entre toutes les variables de type qualitatif et un test de normalité pour celles de type quantitatif 'D.G.I.P'.

Après avoir vérifié la fiabilité de l'échelle utilisée, on va procéder à une analyse statistique des données requises. Cette dernière consiste à recourir à l'Analyse des Correspondances Multiples 'ACM' et le test de Spearman pour étudier la corrélation entre les questions ayant un caractère qualitatif tandis que le test 'ANOVA' est utilisé dans le cas des variables mixtes (qualitatives et quantitatives). Les variables qualitatives parfaitement corrélées sélectionnées par ces tests ainsi que la variable quantitative vont être étudiées et analysées par la suite par différentes techniques statistiques dans le but d'évaluer la contribution du système de Plafond Anidolique Intégré à améliorer la qualité lumineuse intérieure selon les appréciations des participants.

Les résultats de cette enquête seront présentés dans ce présent chapitre sous forme de tableaux et de graphiques et seront analysés en détail dans le 'Chapitre 9' : 'Résultats et discussions'.

8.1. Méthode

L'intérêt principal de cette étude est d'évaluer la qualité de la lumière naturelle qu'apporte un système de plafond anidolique intégré (PAI) par l'utilisation d'un modèle physique de '1 :4'. L'enquête a été réalisée en janvier 2017 et consistait à inviter soixante-deux étudiants en architecture à remplir un questionnaire et évaluer selon quinze paires d'antonymes et quatre questions autonomes la qualité de l'environnement lumineux intérieur dans deux scénarios différents : le premier consistait à évaluer l'éclairage dans un modèle de référence alors que dans le deuxième, le modèle était équipé d'un Plafond Anidolique Intégré (modèle de test). Dans chaque enquête, les participants doivent répondre au même formulaire, composé de quinze questions, dans quatre positions différentes : *P1*, *P2*, *P3* et *P4* du modèle physique. Dans les deux expériences, le modèle physique était orienté vers le nord.

L'expérience a commencé par une explication verbale de 5 minutes visant à expliquer aux participants la procédure expérimentale ainsi que les objectifs de l'enquête. L'expérience a ensuite été initiée en demandant aux 32 sujets de regarder à travers les ouvertures du modèle de référence et d'évaluer l'environnement lumineux en répondant aux questions au niveau de *P1*, *P2*, *P3* et *P4*. À l'aide d'une caméra et d'un dispositif fish-eye, des images sphériques étaient prises en même temps au niveau des quatre ouvertures afin d'obtenir des valeurs quantitatives de Daylight Glare Index Probability (D.GI.P). La même procédure expérimentale était effectuée pour la deuxième enquête (modèle de test) : une brève explication, l'enquête avec les 32 sujets qui reste de l'échantillonnage et la prise des images sphériques.

La durée totale de l'enquête était d'environ deux heures et pendant laquelle, on a mesuré le niveau d'éclairement extérieur chaque quinze minutes afin d'étudier le climat lumineux extérieur durant les deux phases de l'expérience,

8.1.1. Le questionnaire développé

Le questionnaire utilisé dans cette enquête comprenait au total quinze questions, dont la majorité est à choix multiples, auxquelles les participants devaient répondre en utilisant une échelle à sept degrés de Likert avec des oppositions sémantiques. Les participants doivent répondre aux questions en choisissant un chiffre de 1 à 7, où 1 correspondait au score le plus négatif et 7 au score le plus positif. Les adjectifs opposés utilisés dans cette enquête ont été tirés des recherches précédentes d'Arsenault et al (2012), de Konis K S (2011), de Paredes C M (2016), de Davis R G (2006), de Mehrabian et Russell (1974) et de Akashi et Boyce (2006) et choisis avec soin afin d'assurer la clarté de l'information.

Le formulaire développé était également basé sur quatre facteurs qualitatifs clés : **évaluation**, **satisfaction** de l'éclairage, **spaciosité** de l'espace et **sensibilité** à l'éblouissement.

8.1.2. Les mesures photométriques

Durant notre enquête, des mesures photométriques extérieures en termes d'éclairement (lux) et intérieures en termes de luminance (cd/m^2) étaient prises. L'éclairement extérieur était mesuré chaque 15 minute pendant environ deux heures en utilisant un luxmètre. En comparant le niveau d'éclairement calculé au début et à la fin de l'expérience, on constate que ce dernier change de 33100 lux à 29800 lux. L'écart obtenu est de l'ordre de 3300 lux qui ne conduit pas à produire un grand changement significatif par rapport au niveau d'éclairement que reçoit le modèle physique et donc, il n'influe pas sur les réponses des participants. De plus, des valeurs de luminance et de D.G.I.P étaient calculées à partir des images sphériques prises au niveau des quatre ouvertures du modèle de test et du celui de référence au même moment de l'enquête. Ces mesures photométriques étaient introduites par la suite dans la feuille de saisie afin de les utiliser dans l'analyse statistique.

8.1.3. Les participants

L'échantillonnage de sujets (effectif total) proposés lors de l'enquête exploratoire était composé de 62 étudiants. Ils étaient des étudiants en architecture de troisième cycle. Ils avaient une formation et un niveau de formation similaires. L'âge des personnes interrogées était situé entre 21 ans et 26 ans. La majorité des participants, qui représente 90.3 %, avait de 21 à 23 ans. L'échantillonnage était composé de 56.5 % de femme alors que 43.5 % représente le pourcentage des hommes. La majorité des sujets qui participaient à l'enquête n'avait aucune correction visuelle (74.2 %). Les autres portaient des verres de correction (25.8 %). Les statistiques montrent aussi que 82.2 % des étudiants proviennent du même climat lumineux : (Biskra (53.2 %), El oued (17.7 %), Touggourt (6.5 %) et Ouargla (4.8 %)) alors que 17.8 % des sujets vivait dans des climats différents : (Alger (1.6 %), Jijel (1.6 %), Batna (1.6 %), M'sila (1.6 %), Guelma (1.6 %), Tébessa (1.6 %), Tizi ouzo (1.6 %), Jordanie (1.6 %)).

8.1.4. La procédure statistique

Les données résultantes de l'enquête ont été codées avec précision et analysées à l'aide du logiciel SPSS 24.0. L'analyse statistique des résultats était entamée par une série de tests afin de vérifier la fiabilité de l'échelle des variables nominales et ordinales ainsi que la normalité des variables numériques. Le premier test effectué consiste à calculer le coefficient alpha de Cronbach afin d'évaluer la cohérence globale des questions psychométriques ou

dichotomiques. Ce test était utilisé aussi pour estimer la cohérence interne entre deux échelles. Le deuxième test, celui de normalité pour les variables quantitatives, qui vise à tracer la courbe qui détermine la distribution des observations. Si la courbe est symétrique, nous devons vérifier la valeur- p par le recours au test de Kolmogorov-Smirnov et celui de Shapiro-Wilk (Lefebvre, 2011). Afin de valider le test de normalité, la valeur- p obtenue doit être inférieure ou égale à 0.05.

Après avoir vérifié la fiabilité et la normalité de toutes les variables de type nominal, ordinal et échelle, nous avons ensuite procédé à l'analyse statistique des variables qualitatives par le recours à l'analyse des correspondances multiples (ACM). Cette dernière était utilisée afin de déterminer la relation entre toutes les variables qualitatives à travers le coefficient de corrélation de Spearman. Ce coefficient est une mesure non paramétrique de la dépendance statistique entre deux variables et qui évalue à quel point une relation peut être décrite en utilisant une fonction monotone. Cette étude va nous permettre de ressortir toutes les variables qui ont une valeur- p inférieure ou égale à 0.05 ce qui indique que ces dernières sont corrélées significativement. Une fois cette investigation est faite, nous allons ensuite analyser ces variables par rapport aux deux scénarios par le recours aux nuages de points et à la boîte à moustache.

De plus, la corrélation entre les variables quantitatives et qualitatives était faite par le test 'ANOVA' qui considère que ces dernières sont corrélées de manière significative si la valeur- p résultante est inférieure ou égale à 0.05. Pour cela, l'analyse par le nuage de points était proposée afin d'étudier la relation entre la variable quantitative, les variables qualitatives et les deux scénarios.

8.2. Les résultats

8.2.1. Les tests de vérification

8.2.1. a. Test de fiabilité d'échelle

Les questions impliquant des évaluations perceptives ont été testées par le coefficient Alpha de Cronbach en omettant celles qui concernent l'environnement physique objectif. La fiabilité des questions qui traitent le sentiment des participants vis-à-vis de la qualité de la lumière et qui représentent en total vingt-deux items : dix items pour les réponses à échelle, 8 items pour celles à choix multiple et 4 items pour celles à choix unique sont présentées dans les tableaux 8.1, 8.2 et 8.3. Selon les études menées par Yildirim et al (2007) et Tavakol et Dennick (2011), la valeur acceptable du coefficient alpha est située entre 0,60 et 0,95. Les coefficients obtenus dans notre étude par l'analyse statistique étaient respectivement de 0.95, 0.62 et 0.47. On constate que les

valeurs d'Alpha sont situées entre 0.60 et 0.95 pour les réponses à échelle et celles à choix multiple ce qui représente une bonne fiabilité et une bonne cohérence interne des échelles alors que le coefficient obtenu pour les réponses à choix unique est inférieurs à 0,60. Cette faible valeur de coefficient alpha est due au nombre limité de questions utilisées (seulement quatre par rapport aux deux premiers tests).

Dans l'ensemble, les échelles utilisées dans l'enquête peuvent donc être considérées comme fiables.

Tableau 8.1: Statistique de fiabilité : réponses à échelle (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Statistiques de fiabilité		
Alpha de Cronbach	Alpha de Cronbach basé sur des éléments standardisés	Nombre d'éléments
,952	,952	60

Tableau 8.2 : Statistique de fiabilité : réponses à choix multiple (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Statistiques de fiabilité		
Alpha de Cronbach	Alpha de Cronbach basé sur des éléments standardisés	Nombre d'éléments
,636	,623	8

Tableau 8.3: Statistique de fiabilité : réponses à choix unique (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Statistiques de fiabilité		
Alpha de Cronbach	Alpha de Cronbach basé sur des éléments standardisés	Nombre d'éléments
,473	,478	4

8.2.1. b. Test de la normalité

Le test de normalité était précédé par un test de fréquence des données qui permet de tracer la distribution des observations. A partir de l'histogramme de fréquence présenté dans la figure 8.1, les résultats montrent une courbe symétrique avec une moyenne de 22.19. Ces résultats étaient vérifiés par la suite par deux tests : celui de Kolmogorov-Smirnov et celui de Shapiro-

Wilk (figure 8.2). Le test de normalité avait montré que, pour les deux tests, la valeur- p obtenue est de l'ordre de 0.00 (tableau 8.4) ce qui confirme que la variable quantitative testée (le D.GI.P) est significative.

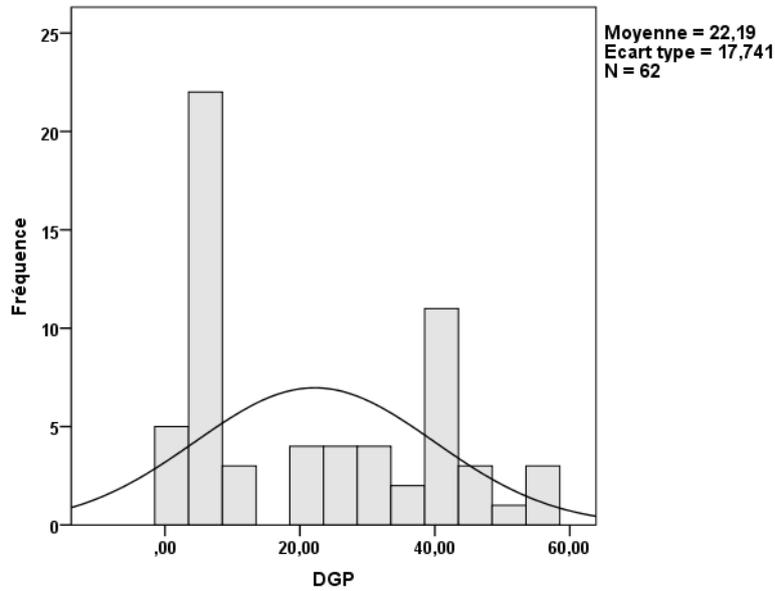


Figure 8.1 : Test de fréquence (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Tableau 8.4 : Valeurs- p obtenue par le test de Kolmogorov et Shapiro (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Tests de normalité						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistiques	ddl	Sig.	Statistiques	ddl	Sig.
DGP	,224	62	,000	,870	62	,000

a. Correction de signification de Lilliefors

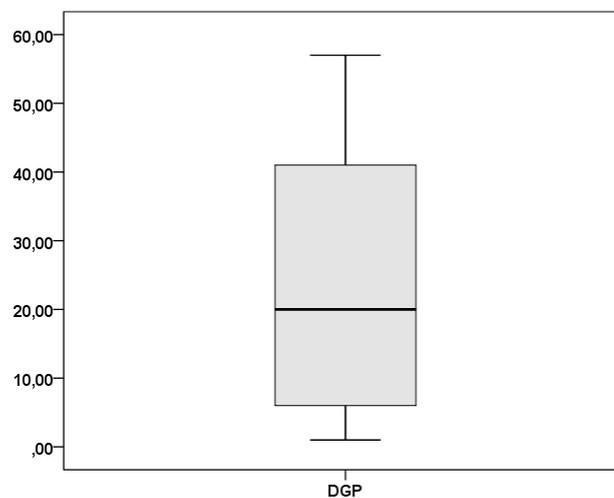


Figure 8.2 : Test de normalité de Kolmogorov et Shapiro (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

8.2.2. Étude de la corrélation entre les variables qualitatives

Une variable statistique est qualitative si ses valeurs, ou modalités, s'expriment de façon littérale ou par un codage sur lequel les opérations arithmétiques n'ont pas de sens et lorsqu'elles ne peuvent pas s'exprimer par une mesure ou par un nombre. L'objectif de cette étude est d'une part, de définir la relation entre les différentes variables qualitatives par le recours à l'Analyse des Correspondances Multiples 'A.C.M' et d'autre part, de déterminer le coefficient de corrélation à travers le test de Spearman. Ces deux tests vont être faits par rapport aux quatre situations différentes : Position 1 'P1', Position 2 'P2', Position 3 'P3' et Position 4 'P4' et vont nous aider à retirer les variables non significatives qui peuvent interrompre les résultats de la prochaine analyse statistique. Les variables qualitatives parfaitement corrélées sélectionnées par ces tests vont être étudiées et analysées par la suite par différentes techniques statistiques dans le but d'évaluer la contribution de système de Plafond Anidolique Intégré à améliorer la qualité lumineuse intérieure selon les appréciations des participants.

8.2.2. a. Au niveau de la Position 'P1'

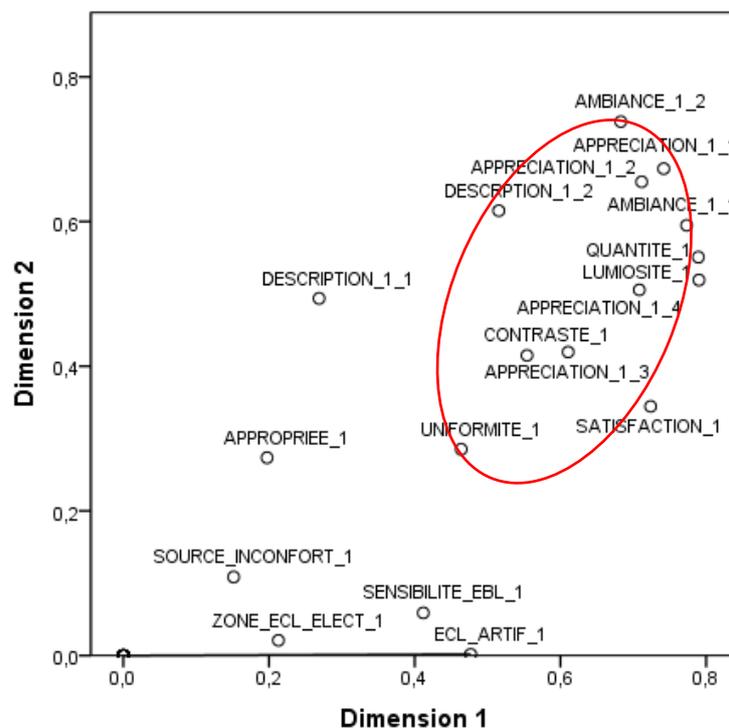


Figure 8.3 : ACM pour la Position 'P1' (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Les résultats de l'A.C.M des variables qualitatives présentés dans la figure 8.3 au niveau de la première position avaient montré qu'il y a deux groupes d'ensembles des variables. Le premier se caractérise par un nuage de points très concentré qui regroupe la majorité des variables : Ambiance_1 et ambiance_2, appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3 et appréciation_4,

contraste, description_2, quantité, luminosité, satisfaction et uniformité. Le deuxième est composé d'un nuage de faible concentration, il comprend quatre variables (source d'inconfort, zone d'éclairage électrique, éclairage artificiel et sensibilité à l'éblouissement) qui sont très rapprochées entre elles mais elles sont loin des nuages concentrés alors que les deux variables restantes (description_1 et approprié) sont dispersées loin des deux groupes de forte et de faible concentration.

A partir de ces constats, on peut dire que le groupe de forte concentration semblent avoir une corrélation significative qui sera vérifié par le test de Spearman. Ce dernier permet de mesurer sur les mêmes sujets la corrélation entre deux variables ordinales et les corrélations possibles sont présentées deux à deux sous forme de tableau croisé. Les corrélations significatives sont accompagnées d'étoiles (*). Plus il y a d'étoiles, plus la valeur-*p* est petite.

8.2.2. a1. Test de Spearman 'PI'

Afin de faciliter l'analyse des résultats du test de Spearman, qui sera effectué sur les variables sélectionnées par le test ANOVA, nous avons classé ces dernières en trois groupes selon le degré de rapprochement de nuage de points. Le premier groupe se compose de Satisfaction_1 et Uniformite_1. Le deuxième comprend appréciation_1_3, appréciation_1_4, contraste, luminosité et quantité alors que le troisième inclut appréciation_1_1, appréciation_1_2, ambiance_1_1, ambiance_1_2 et description _1_2. L'objectif de ce test est de déterminer les corrélations entre les différentes variables et voir si la relation entre ces dernières est significative (très proche de 1). Les résultats sont présentés dans les tableaux 8.5, 8.6 et 8.7.

Tableau 8.5 : Test de Spearman pour la Position 'PI' : Groupe 1 (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Corrélations		Satisfaction_1	Uniformite_1
Rho de Spearman	Satisfaction_1	Coefficient de corrélation	1
		Sig. (bilatérale)	,690**
		N	62
Uniformite_1	Uniformite_1	Coefficient de corrélation	,690**
		Sig. (bilatérale)	,000
		N	62

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

Tableau 8.6 : Test de Spearman pour la Position 'P1' : Groupe 2 (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Corrélations

		Appréciation _1_3	Appréciation _1_4	Contraste _1	Lumiosite _1	Quantite _1	
Rho de Spearman	Appréciation _1_3	Coefficient de corrélation	1,000	,634**	,441**	,668**	,647
		Sig. (bilatéral)	.	,000	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62
Appréciation_1_4	Appréciation_1_4	Coefficient de corrélation	,634**	1,000	,571**	,704**	,661**
		Sig. (bilatéral)	,000	.	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62
Contraste_1	Contraste_1	Coefficient de corrélation	,441**	,571**	1,000	,468**	,477**
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	.	,000	,000
		N	62	62	62	62	62
Lumiosite_1	Lumiosite_1	Coefficient de corrélation	,668**	,704**	,468**	1,000	,742**
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	.	,000
		N	62	62	62	62	62
Quantité _1	Quantité _1	Coefficient de corrélation	,647**	,661**	,477**	,742**	1,000
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	,000	.
		N	62	62	62	62	62

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

Tableau 8.7: Test de Spearman pour la Position 'P1' : Groupe 3 (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Corrélations

		Appréciation _1_1	Appréciation _1_2	Ambiance _1_1	Ambiance _1_2	Description _1_2	
Rho de Spearman	Appréciation _1_1	Coefficient de corrélation	1,000	,731**	,684**	,684**	,433**
		Sig. (bilatéral)	.	,000	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62
Appréciation _1_2		Coefficient de corrélation	,731**	1,000	,632**	,528**	,400**
		Sig. (bilatéral)	,000	.	,000	,000	,001
		N	62	62	62	62	62
Ambiance _1_1		Coefficient de corrélation	,684**	,632**	1,000	,757**	,409**
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	.	,000	,001
		N	62	62	62	62	62
Ambiance _1_2		Coefficient de corrélation	,684**	,528**	,757**	1,000	,353**
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	.	,005
		N	62	62	62	62	62
Description _1_2		Coefficient de corrélation	,433**	,400**	,409**	,353**	1,000
		Sig. (bilatéral)	,000	,001	,001	,005	.
		N	62	62	62	62	62

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

Selon les résultats présentés dans les tableaux ci-dessous, il est clair qu'au niveau de la position 1, il y'a une corrélation significative et positive entre les variables qualitatives dans les trois groupes car, toutes les valeurs-*p* obtenues sont inférieure à .005. On constate également que le coefficient de corrélation diffère dans chaque croisement ce qui nous a conduits à composer cinq paires de variable. Une corrélation maximale était enregistrée entre *ambiance_1* et

ambiance_2 avec un coefficient de corrélation de .76, entre quantité et luminosité (.75) et entre appréciation_1 et appréciation_2 (.73) alors que la corrélation entre la satisfaction et l'uniformité et celle entre appréciation_3 et appréciation_4 est de l'ordre de (.64). De plus, le test avait montré que les variables description_1_2 et contraste ont le même degré de corrélation avec l'ensemble des variables. On en conclut que par rapport à la position 1, toutes les variables qualitatives sélectionnées ont une relation significative entre elles et le degré de corrélation est très fort qui atteint 76 %. Afin d'évaluer l'ambiance lumineuse dans le modèle physique dans les deux scénarios au niveau de la P1, une analyse plus approfondie a été proposée pour l'ensemble de ces variables.

8.2.2. b. Au niveau de la Position 'P2'

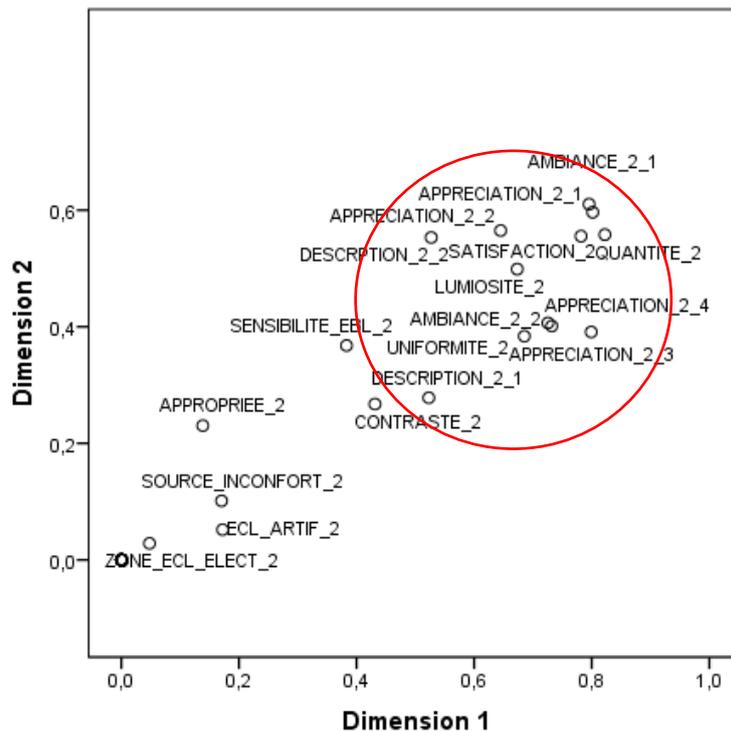


Figure 8.4 : ACM pour la Position 'P2' (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

A partir de l'A.C.M qui a été effectué au niveau de la position 2 (figure 8.4), on remarque que les nuages de points se concentrent formant un groupe principal composé des variables suivantes : ambiance_1 et ambiance_2, appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3 et appréciation_4, contraste, description_1 et description_2, quantité, luminosité, satisfaction, uniformité et sensibilité à l'éblouissement. On constate également l'apparition d'un groupe secondaire de très faible concentration qui regroupe les variables qui concernent : source d'inconfort, approprié, zone d'éclairage électrique et éclairage artificiel. Selon le regroupement ainsi que le degré de concentration des variables, il est plus intéressant d'étudier les relations

existantes avec celles du groupe principal afin de déterminer les coefficients de corrélations entre ces dernières.

8.2.2. b2. Test de Spearman 'P2'

L'analyse des résultats obtenus au niveau du tableau 8.8 et 8.9 avait confirmé que la corrélation entre toutes les variables sélectionnées est significative car, toutes les valeurs-*p* sont inférieures ou égales à ,000. De plus, les résultats du test de Spearman nous a permis de regrouper les variables en cinq paires selon le coefficient de corrélation obtenu qui sont : appréciation_1 et appréciation_2 (,72), appréciation_3 et appréciation_4 (,76), ambiance_1 et ambiance_2 (,71), description_1 et description_2 (,62). Le faible coefficient était enregistré entre luminosité et sensibilité (,42). En outre, on constate que les quatre variables restantes qui concernent ; satisfaction, uniformité, quantité et contraste présentent un coefficient de corrélation très rapproché avec l'ensemble des variables. Donc, dans la prochaine étude, les cinq paires ainsi que les quatre variables vont être analysés en fonction des scénarios et les évaluations des sujets afin d'étudier l'environnement lumineux intérieur d'un espace équipé d'un PAI.

Tableau 8.8 : Test de Spearman pour la Position 'P2' : Groupe 1 (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Corrélations			Contraste _2	Quantité _2	Uniformité _2	Satisfaction _2
Rho de Spearman	Contraste _2	Coefficient de corrélation	1,000	,546**	,451**	,530**
		Sig. (bilatéral)	.	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62
Quantité _2	Quantité _2	Coefficient de corrélation	,546**	1,000	,713**	,858**
		Sig. (bilatéral)	,000	.	,000	,000
		N	62	62	62	62
Uniformité _2	Uniformité _2	Coefficient de corrélation	,451**	,713**	1,000	,720**
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	.	,000
		N	62	62	62	62
Satisfaction _2	Satisfaction _2	Coefficient de corrélation	,530**	,858**	,720**	1,000
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	.
		N	62	62	62	62

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

Tableau 8.9 : Test de Spearman pour la Position 'P2' : Groupe 2 (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Corrélation

		Appréciation _2_1	Appréciation _2_2	Appréciation _2_3	Appréciation _2_4	Ambiance _2_1	Ambiance _2_2	Description _2_1	Description _2_2	Luminosité _2	Sensibilité _Ebl_2	
Rho de Spearman	Appréciation_2_1	Coefficient de corrélation	1,000	,724**	,800**	,709**	,706**	,752**	,331**	,212	,601**	,392**
		Sig. (bilatéral)	.	,000	,000	,000	,000	,000	,009	,098	,000	,002
		N	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
	Appréciation_2_2	Coefficient de corrélation	,724**	1,000	,653**	,505**	,575**	,526**	,265*	,291*	,614**	,351**
		Sig. (bilatéral)	,000	.	,000	,000	,000	,000	,037	,022	,000	,005
		N	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
	Appréciation_2_3	Coefficient de corrélation	,800**	,653**	1,000	,762**	,689**	,666**	,421**	,347**	,653**	,410**
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	.	,000	,000	,000	,001	,006	,000	,001
		N	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
	Appréciation_2_4	Coefficient de corrélation	,709**	,505**	,762**	1,000	,703**	,644**	,325**	,331**	,650**	,342**
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	.	,000	,000	,010	,009	,000	,007
		N	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
Ambiance_2_1	Coefficient de corrélation	,706**	,575**	,689**	,703**	1,000	,712**	,298*	,301*	,656**	,415**	
	Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	,000	.	,000	,019	,017	,000	,001	
	N	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	
Ambiance_2_2	Coefficient de corrélation	,752**	,526**	,666**	,644**	,712**	1,000	,299*	,369**	,575**	,333**	
	Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	,000	,000	.	,018	,003	,000	,008	
	N	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	
Description_2_1	Coefficient de corrélation	,331**	,265*	,421**	,325**	,298*	,299*	1,000	,623**	,419**	,416**	
	Sig. (bilatéral)	,009	,037	,001	,010	,019	,018	.	,000	,001	,001	
	N	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	
Description_2_2	Coefficient de corrélation	,212	,291*	,347**	,331**	,301*	,369**	,623**	1,000	,476**	,537**	
	Sig. (bilatéral)	,098	,022	,006	,009	,017	,003	,000	.	,000	,000	
	N	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	
Luminosité	Coefficient de corrélation	,601**	,614**	,653**	,650**	,656**	,575**	,419**	,476**	1,000	,426**	

	Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,001	,000	.	,001
	N	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
Sensibilité_ Ebl_2	Coefficient de corrélation	,392**	,351**	,410**	,342**	,415**	,333**	,416**	,537**	,426**	1,000
	Sig. (bilatéral)	,002	,005	,001	,007	,001	,008	,001	,000	,001	.
	N	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62

** La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

8.2.2. c. Au niveau de la Position 'P3'

Par rapport à l'étude de la corrélation entre les variables au niveau de la position 3, la figure 8.5 montre une forte concentration de nuages de points qui inclut les variables suivantes : ambiance_1 et ambiance_2, appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3 et appréciation_4, description_2, quantité, luminosité, satisfaction, uniformité. Les autres variables (contraste, description_1, sensibilité à l'éblouissement, approprié, source d'inconfort, zone d'éclairage électrique, éclairage artificiel) sont loin des nuages concentrés et sont dispersées ce qui forme un groupe de faible concentration. L'analyse des correspondances multiples, au niveau de la P3, nous a permis de sélectionner les variables qui peuvent avoir une corrélation significative, on parle de celles du groupe de forte concentration qui vont être confirmées par le test de Spearman.

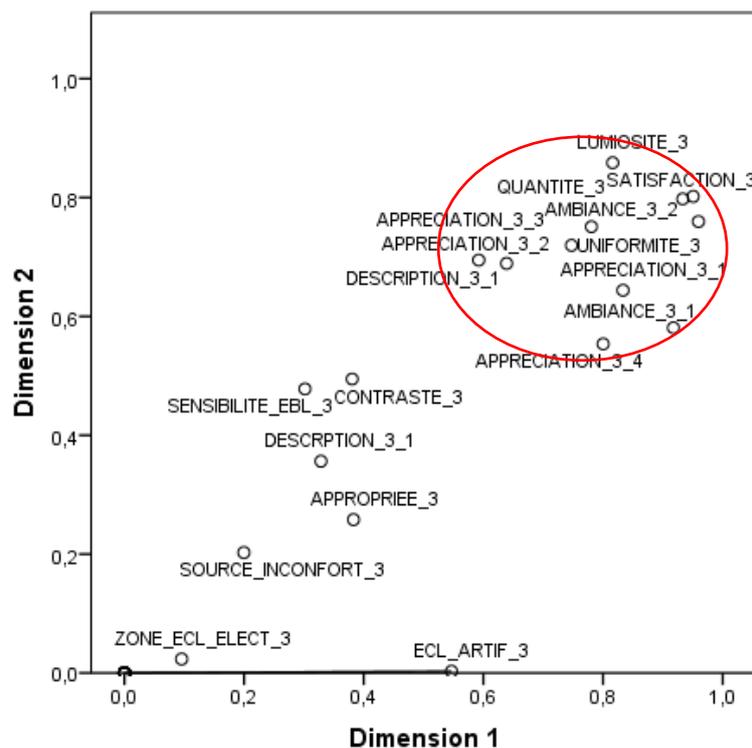


Figure 8.5 : ACM pour la Position 'P3' (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

8.2.2. c3. Test de Spearman 'P3'

Le test de Spearman avait révélé que toutes les corrélations entre les différentes variables sont significatives, la valeur-*p* obtenue est toujours inférieure ou égale 0.000 (voir tableau 8.10 et 8.11). La comparaison des coefficients de corrélations de toutes les variables avait montré que certaines d'entre elles peuvent être regroupées en paires selon le degré de corrélation. Il s'agit de : appréciation_1 et appréciation_2 (.79), appréciation_3 et appréciation_4 (.68), ambiance_1 et ambiance_2 (.73) et description_2 et luminosité (.69). Les trois variables qui restent (satisfaction, uniformité et quantité) ont des degrés de corrélation très rapprochés.

Pour la prochaine analyse, ces quatre paires ainsi que les trois variables seront prise en compte dans le but d'évaluer l'ambiance lumineuse générée par un PAI au niveau de position 3.

Tableau 8.10 : Test de Spearman pour la Position 'P3' : Groupe 1 (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Corrélations

			Satisfaction _3	Uniformite _3	Quantite _3	Description _3_1	Luminosité _3
Rho de Spearman	Satisfaction _3	Coefficient de corrélation	1,000	,707**	,745**	,497**	,652**
		Sig. (bilatéral)	.	,000	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62
	Uniformite _3	Coefficient de corrélation	,707**	1,000	,604**	,537**	,577**
		Sig. (bilatéral)	,000	.	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62
	Quantite _3	Coefficient de corrélation	,745**	,604**	1,000	,517**	,720**
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	.	,000	,000
		N	62	62	62	62	62
	Description_ _3_1	Coefficient de corrélation	,497**	,537**	,517**	1,000	,697**
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	.	,000
		N	62	62	62	62	62
	Luminosite_ _3	Coefficient de corrélation	,652**	,577**	,720**	,697**	1,000
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	,000	.
		N	62	62	62	62	62

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

Tableau 8.11: Test de Spearman pour la Position 'P3' : Groupe 2 (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Corrélations			Appreciation_3_1	Appreciation_3_2	Appreciation_3_3	Appreciation_3_4	Ambiance_3_1	Ambiance_3_2
Rho de Spearman	Appréciatio n_3_1	Coefficient de corrélation	1,000	,793**	,644**	,535**	,655**	,509**
		Sig. (bilatéral)	.	,000	,000	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62	62
	Appreciation_3_2	Coefficient de corrélation	,793**	1,000	,667**	,647**	,743**	,577**
		Sig. (bilatéral)	,000	.	,000	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62	62
	Appréciatio n_3_3	Coefficient de corrélation	,644**	,667**	1,000	,683**	,616**	,647**
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	.	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62	62
	Appréciatio n_3_4	Coefficient de corrélation	,535**	,647**	,683**	1,000	,639**	,527**
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	.	,000	,000
		N	62	62	62	62	62	62
	Ambiance_3_1	Coefficient de corrélation	,655**	,743**	,616**	,639**	1,000	,731**
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	,000	.	,000
		N	62	62	62	62	62	62
	Ambiance_3_2	Coefficient de corrélation	,509**	,577**	,647**	,527**	,731**	1,000
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	,000	,000	.
		N	62	62	62	62	62	62

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

8.2. 2. d. Au niveau de la Position 'P4'

L'analyse des correspondances multiples au niveau de la position 4 (figure 8.6) avait montré que les variables : ambiance_1, ambiance_2, contraste, appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3 et appréciation_4, description_2, quantité, luminosité, satisfaction, uniformité marquent une forte concentration par rapport au reste qui se dispersent sur une surface plus large. Les variables sélectionnées, qui se démarquent par un groupement très fort, vont subir au test de Spearman afin de déterminer le coefficient de corrélation entre ces dernières.

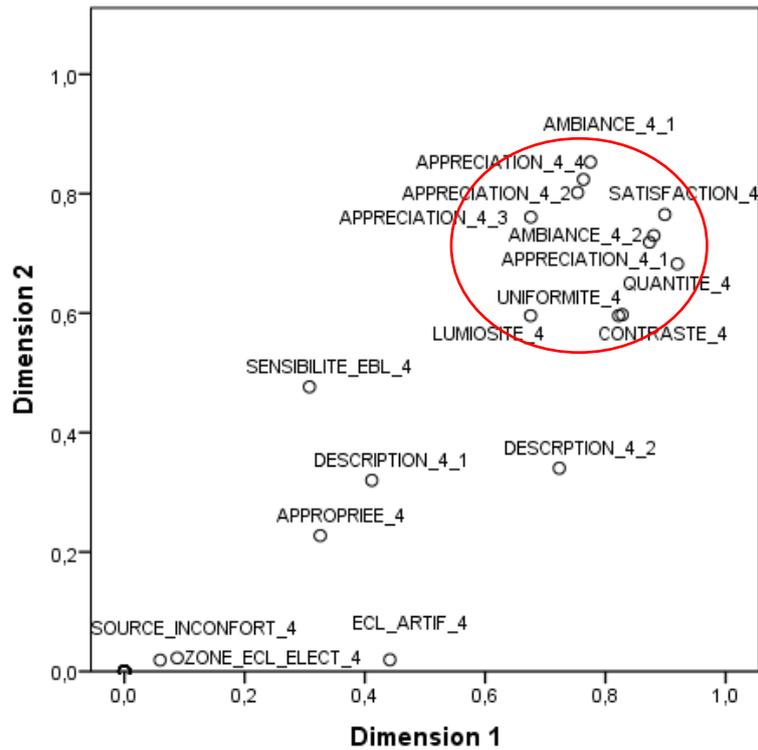


Figure 8.6 : ACM pour la Position 'P4' (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

8.2.2. d4. Le test de Spearman 'P4'

Ce test avait confirmé que les variables tirées par l'A.C.M sont corrélées significativement et la valeur- p obtenue dans chaque croisement des variables est toujours inférieure à 0.000.

Tableau 8.12 : Test de Spearman pour la Position 'P4' : Groupe 1 (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Corrélations			Uniformité _4	Satisfaction_ 4	Quantité _4
Rho de Spearman	Uniformite_4	Coefficient de corrélation	1,000	,804**	,735**
		Sig. (bilatéral)	.	,000	,000
		N	62	62	62
	Satisfaction_4	Coefficient de corrélation	,804**	1,000	,866**
		Sig. (bilatéral)	,000	.	,000
		N	62	62	62
	Quantite_4	Coefficient de corrélation	,735**	,866**	1,000
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	.
		N	62	62	62

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

Tableau 8.13 : Test de Spearman pour la Position 'P4' : Groupe 2 (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Corrélations

			Appreciation _4_1	Appreciation _4_2	Appreciation _4_3	Appreciation _4_4	Ambiance _4_1	Ambiance _4_2	Luminosité _4	Contraste _4
Rho de Spearman	Appreciation _4_1	Coefficient de corrélation	1,000	,763 **	,680 **	,842 **	,730**	,797 **	,729 **	,755 **
		Sig. (bilatéral)	.	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62	62	62	62
Appreciation _4_2	Appreciation _4_2	Coefficient de corrélation	,763**	1,00 0	,669 **	,690 **	,747**	,805 **	,632 **	,667 **
		Sig. (bilatéral)	,000	.	,000	,000	,000	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62	62	62	62
Appreciation _4_3	Appreciation _4_3	Coefficient de corrélation	,680**	,669 **	1,00 0	,725 **	,636**	,666 **	,561 **	,545 **
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	.	,000	,000	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62	62	62	62
Appreciation _4_4	Appreciation _4_4	Coefficient de corrélation	,842**	,690 **	,725 **	1,00 0	,773**	,786 **	,706 **	,664 **
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	.	,000	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62	62	62	62
Ambiance _4_1	Ambiance _4_1	Coefficient de corrélation	,730**	,747 **	,636 **	,773 **	1,000	,785 **	,794 **	,621 **
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	,000	.	,000	,000	,000
		N	62	62	62	62	62	62	62	62
Ambiance _4_2	Ambiance _4_2	Coefficient de corrélation	,797**	,805 **	,666 **	,786 **	,785**	1,00 0	,667 **	,758 **
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	,000	,000	.	,000	,000
		N	62	62	62	62	62	62	62	62
Luminosité _4	Luminosité _4	Coefficient de corrélation	,729**	,632 **	,561 **	,706 **	,794**	,667 **	1,00 0	,566 **
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.	,000
		N	62	62	62	62	62	62	62	62
Contraste _4	Contraste _4	Coefficient de corrélation	,755**	,667 **	,545 **	,664 **	,621**	,758 **	,566 **	1,00 0
		Sig. (bilatéral)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.
		N	62	62	62	62	62	62	62	62

** . La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

De plus, ces résultats nous ont permis de définir la relation entre toutes les variables à travers le coefficient de corrélation. A partir de cet indicateur, on a pu regrouper les variables en paires

selon le degré de corrélation, il s'agit de : appréciation_1 et appréciation_2 (.76), appréciation_3 et appréciation_4 (.72), ambiance_1 et amabianec_2 (.78) et luminosité et contraste (.56), alors que le coefficient du reste des variables (satisfaction, uniformité et quantité) était très rapproché.

8.2.3. Les variables quantitatives

La variable est dite quantitative lorsqu'elle est présentée par un nombre et résulte d'une mesure ou d'un comptage. Durant notre expérience, une seule mesure photométrique intérieure était prise, celle d'indice d'éblouissement qui a été calculé à partir des images sphériques prises dans les quatre positions. Cette variable sera utilisée dans les statistiques descriptives afin de faire une comparaison entre ce qui est considéré comme mesure (D.G.I.P) et ce que les sujets sentent en réalité (observations de l'environnement lumineux) sous les mêmes conditions lumineuses extérieures. L'intérêt de cette analyse est de confirmer ou infirmer l'efficacité du Plafond anidolique intégré à éclairer uniformément un espace de grande profondeur.

8.2.4. Les variables quantitatives et qualitatives

Pour l'analyse des variables quantitatives et qualitatives, nous avons eu recours au test ANOVA qui permet d'illustrer les différents cas de figures donnant lieu à des corrélations positives ou négatives entre la variable numérique (D.G.I.P) et l'ensemble des variables qualitatives qui ont été sélectionnées auparavant afin de pouvoir entamer les statistiques descriptives.

8.2.4. a. Le test ANOVA pour la 'P1'

Les résultats du test ANOVA au niveau de la première position avaient révélé que trois variables qualitatives sur 18 sont corrélées significativement avec le D.G.I.P calculé avec une valeur-*p* inférieure ou égale à .05. La forte corrélation était enregistrée avec la variable appréciation_1 (.019) alors que la variable appréciation_2 et satisfaction avaient une corrélation de .032 et de .045.

Tableau 8.14 : Test ANOVA pour la Position 'P1' (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

ANOVA		Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Satisfaction_1	Inter-groupes	125,421	34	3,689	1,899	,045
	Intragroupes	52,450	27	1,943		
	Total	177,871	61			
Uniformite_1	Inter-groupes	101,477	34	2,985	1,217	,302
	Intragroupes	66,200	27	2,452		

	Total	167,677	61			
Quantite_1	Inter-groupes	125,485	34	3,691	1,385	,194
	Intragroupes	71,950	27	2,665		
	Total	197,435	61			
Contraste_1	Inter-groupes	93,652	34	2,754	1,008	,497
	Intragroupes	73,783	27	2,733		
	Total	167,435	61			
Appreciation_1_1	Inter-groupes	113,408	34	3,336	2,204	,019
	Intragroupes	40,867	27	1,514		
	Total	154,274	61			
Appreciation_1_2	Inter-groupes	115,775	34	3,405	2,022	,032
	Intragroupes	45,467	27	1,684		
	Total	161,242	61			
Appreciation_1_3	Inter-groupes	88,268	34	2,596	1,396	,188
	Intragroupes	50,200	27	1,859		
	Total	138,468	61			
Appreciation_1_4	Inter-groupes	105,077	34	3,090	1,365	,204
	Intragroupes	61,117	27	2,264		
	Total	166,194	61			
Ambiance_1_1	Inter-groupes	73,055	34	2,149	,902	,616
	Intragroupes	64,300	27	2,381		
	Total	137,355	61			
Ambiance_1_2	Inter-groupes	84,219	34	2,477	,913	,603
	Intragroupes	73,217	27	2,712		
	Total	157,435	61			
Description_1_2	Inter-groupes	93,438	34	2,748	1,249	,278
	Intragroupes	59,417	27	2,201		
	Total	152,855	61			
Lumiosite_1	Inter-groupes	97,501	34	2,868	1,359	,208
	Intragroupes	56,967	27	2,110		
	Total	154,468	61			

8.2.4. b. Le test ANOVA pour la 'P2'

Au niveau de la deuxième position, on constate une faible relation entre la variable quantitative avec l'ensemble des variables de type qualitatif à l'exception de celle de contraste qui se

démarque par une corrélation de l'ordre de .04 et celle d'appréciation_2 avec une corrélation de .34.

Tableau 8.15 : Test ANOVA pour la Position 'P2' (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

ANOVA		Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Satisfaction_2	Inter-groupes	73,902	34	2,174	1,173	,338
	Intragroupes	50,033	27	1,853		
	Total	123,935	61			
Uniformite_2	Inter-groupes	81,125	34	2,386	1,444	,165
	Intragroupes	44,617	27	1,652		
	Total	125,742	61			
Quantite_2	Inter-groupes	99,843	34	2,937	1,574	,114
	Intragroupes	50,367	27	1,865		
	Total	150,210	61			
Contraste_2	Inter-groupes	70,742	34	2,081	1,937	,040
	Intragroupes	29,000	27	1,074		
	Total	99,742	61			
Appreciation_2_1	Inter-groupes	88,367	34	2,599	1,647	,093
	Intragroupes	42,617	27	1,578		
	Total	130,984	61			
Appreciation_2_2	Inter-groupes	82,268	34	2,420	1,998	,034
	Intragroupes	32,700	27	1,211		
	Total	114,968	61			
Appreciation_2_3	Inter-groupes	70,827	34	2,083	1,447	,163
	Intragroupes	38,867	27	1,440		
	Total	109,694	61			
Appreciation_2_4	Inter-groupes	85,942	34	2,528	1,633	,097
	Intragroupes	41,800	27	1,548		
	Total	127,742	61			
Ambiance_2_1	Inter-groupes	71,192	34	2,094	1,164	,345
	Intragroupes	48,550	27	1,798		
	Total	119,742	61			
Ambiance_2_2	Inter-groupes	88,885	34	2,614	1,282	,255
	Intragroupes	55,050	27	2,039		
	Total	143,935	61			
Description_2_1	Inter-groupes	54,550	34	1,604	1,058	,445
	Intragroupes	40,950	27	1,517		
	Total	95,500	61			
Description_2_2	Inter-groupes	68,822	34	2,024	1,348	,214
	Intragroupes	40,533	27	1,501		
	Total	109,355	61			

8.2.4. c. Le test ANOVA pour la 'P3'

La troisième position était aussi caractérisée par des rapports de corrélation supérieures à .05 pour la majorité des variables quantitatives sauf celle de satisfaction qui a enregistré une corrélation significative de .03 et celle de ambiance_2 avec une valeur-*p* de .04.

Tableau 8.16 : Test ANOVA pour la Position 'P3' (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

		ANOVA				
		Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Satisfaction_3	Inter-groupes	89,808	34	2,641	1,956	,038
	Intragroupes	36,467	27	1,351		
	Total	126,274	61			
Uniformite_3	Inter-groupes	99,676	34	2,932	1,614	,102
	Intragroupes	49,033	27	1,816		
	Total	148,710	61			
Quantite_3	Inter-groupes	85,474	34	2,514	1,498	,141
	Intragroupes	45,300	27	1,678		
	Total	130,774	61			
Appreciation_3_1	Inter-groupes	89,017	34	2,618	1,347	,214
	Intragroupes	52,467	27	1,943		
	Total	141,484	61			
Appreciation_3_2	Inter-groupes	95,748	34	2,816	1,271	,262
	Intragroupes	59,800	27	2,215		
	Total	155,548	61			
Appreciation_3_3	Inter-groupes	97,019	34	2,853	1,735	,072
	Intragroupes	44,417	27	1,645		
	Total	141,435	61			
Appreciation_3_4	Inter-groupes	99,598	34	2,929	1,277	,259
	Intragroupes	61,950	27	2,294		
	Total	161,548	61			
Ambiance_3_1	Inter-groupes	84,967	34	2,499	1,450	,162
	Intragroupes	46,533	27	1,723		
	Total	131,500	61			
Ambiance_3_2	Inter-groupes	92,268	34	2,714	1,918	,043
	Intragroupes	38,200	27	1,415		
	Total	130,468	61			
Descrption_3_2	Inter-groupes	87,576	34	2,576	1,691	,082
	Intragroupes	41,133	27	1,523		
	Total	128,710	61			
Lumiosite_3	Inter-groupes	69,434	34	2,042	1,197	,318
	Intragroupes	46,050	27	1,706		
	Total	115,484	61			

8.2.4. d. Le test ANOVA pour la 'P4'

L'analyse des résultats obtenus par ce test au niveau de cette position avait montré que plus de 55% des variables qualitatives sont corrélées significativement avec la variable numérique (D.GI.P). On trouve : uniformité (.02), satisfaction (.05), quantité (.02), contraste (.01), appréciation_1 (.01), appréciation_2 (.01), appréciation_3 (.00), appréciation_4 (.00), ambiance_1 (.01) et ambiance_2 (.02). Donc, la position 'P4' sera représentative pour les statistiques exploratoires vu le nombre des corrélations existantes.

Tableau 8.17 : Test ANOVA pour la Position 'P4' (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

		ANOVA				
		Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Sensibilite_Ebl_4	Inter-groupes	111,869	34	3,290	1,045	,458
	Intragroupes	85,050	27	3,150		
	Total	196,919	61			
Lumiosite_4	Inter-groupes	140,119	34	4,121	1,488	,146
	Intragroupes	74,800	27	2,770		
	Total	214,919	61			
Description_4_1	Inter-groupes	133,524	34	3,927	1,052	,450
	Intragroupes	100,750	27	3,731		
	Total	234,274	61			
Description_4_2	Inter-groupes	158,805	34	4,671	1,466	,155
	Intragroupes	86,050	27	3,187		
	Total	244,855	61			
Ambiance_4_1	Inter-groupes	182,904	34	5,380	2,382	,011
	Intragroupes	60,967	27	2,258		
	Total	243,871	61			
Ambiance_4_2	Inter-groupes	156,751	34	4,610	2,157	,021
	Intragroupes	57,717	27	2,138		
	Total	214,468	61			
Appreciation_4_3	Inter-groupes	177,734	34	5,227	4,004	,000
	Intragroupes	35,250	27	1,306		
	Total	212,984	61			
Appreciation_4_4	Inter-groupes	161,808	34	4,759	2,651	,005
	Intragroupes	48,467	27	1,795		
	Total	210,274	61			
Appreciation_4_1	Inter-groupes	172,538	34	5,075	2,390	,011
	Intragroupes	57,333	27	2,123		
	Total	229,871	61			
Appreciation_4_2	Inter-groupes	164,389	34	4,835	2,313	,014
	Intragroupes	56,450	27	2,091		
	Total	220,839	61			
Contraste_4	Inter-groupes	153,386	34	4,511	2,435	,010
	Intragroupes	50,033	27	1,853		

	Total	203,419	61			
Quantite_4	Inter-groupes	163,786	34	4,817	2,060	,028
	Intragroupes	63,133	27	2,338		
	Total	226,919	61			
Satisfaction_4	Inter-groupes	152,720	34	4,492	1,861	,050
	Intragroupes	65,167	27	2,414		
	Total	217,887	61			
Appropriée_4	Inter-groupes	124,536	34	3,663	1,042	,461
	Intragroupes	94,883	27	3,514		
	Total	219,419	61			
Uniformité_4	Inter-groupes	132,671	34	3,902	2,058	,029
	Intragroupes	51,200	27	1,896		
	Total	183,871	61			

8.3. L'analyse descriptive et les techniques statistiques

La statistique exploratoire, qui a été utilisée dans plusieurs recherches (Xue et al, 2014 ; Arsenault et al, 2012 ; Gou et al, 2014) a pour objet de recueillir des observations des sujets à travers les variables qualitatives qui ont été sélectionnées par l'A.C.M et par le test de Spearman et de traduire ces observations en valeurs numériques qui permettent d'avoir des renseignements sur l'environnement lumineux intérieur dans le modèle physique. Cette analyse des données regroupe les méthodes qui consistent à faire une description des données étudiées à travers leur présentation, leur représentation graphique ainsi que le calcul de résumés numériques. Pour étudier la liaison entre deux variables, nous allons utiliser des techniques statistiques dont leurs choix dépendent principalement du type des variables considérées (quantitatives ou qualitatives). De plus, la sélection de ces dernières est basée également sur les travaux similaires qui ont été analysés dans le chapitre 4 : La méthodologie.

Notre étude consiste à utiliser quatre techniques statistiques de SPSS. En premier lieu, nous allons recourir aux diagrammes en boîtes parallèles (Box-Plot) qui sont couramment utilisés dans les statistiques descriptives bivariées au cas d'une variable quantitative et d'une autre qualitative. Il s'agit d'un graphique très simple qui résume la série à partir de ses valeurs extrêmes, de ses quartiles et de sa médiane. La boîte est la partie du graphique comprise entre le premier et troisième quartile. La médiane est représentée par un trait horizontal situé à l'intérieur de la boîte. Les moustaches se trouvent dans les parties, basse et haute du graphique (Baccini, 2010). En deuxième lieu, des graphiques en barres seront représentés. Ces derniers permettent de donner une vision d'ensemble des observations réalisées. Le diagramme comporte un axe horizontal, sur lequel, figurent les observations de la variable considérée, c'est-

à-dire les modalités possibles d'une variable discrète, et un axe vertical, sur lequel chacune des hauteurs est proportionnelle à l'effectif. En outre, les histogrammes sont le troisième type de représentations des données proposé. Il permet d'analyser les deux types de variables (quantitative et qualitative) dans le même graphique. Ce graphique consiste à donner les observations de la variable qualitative considérée en fonction de la fréquence des effectifs.

La dernière technique utilisée est nommée nuage de points qui est appliquée généralement pour représenter les observations simultanées de deux variables de type quantitatif. Cette technique permet d'afficher le diagramme de dispersion de deux variables dont les axes correspondent aux variables sélectionnées. De plus, une dispersion en trois axes (deux verticaux et un horizontal) est proposée dans le but d'analyser deux variables numériques avec l'ensemble des observations réalisées. Pour cela, les variables qualitatives ordinales sont transformées en variables numériques (échelles) afin de pouvoir exécuter ce graphique.

Conclusion

Les données obtenues par cette expérience qui a été faite dans un modèle physique dans deux scénarios (sans et avec PAI) par la participation de 62 sujets, ont été tout d'abord vérifiées par une série de tests avant de passer à l'étude de la corrélation entre les variables et à l'analyse statistique. Le test de fiabilité des questions qui traitent le sentiment des participants vis-à-vis de la qualité de la lumière (variables nominales et ordinales) montre que le coefficient Alpha de Cronbach se situe entre 0.60 et 0.95 ce qui signifie que les échelles utilisées dans l'enquête peuvent donc être considérées comme fiables. De plus, le test de normalité qui a été fait sur les variables numériques montre une courbe symétrique avec une moyenne de 22.19 et que la valeur- p obtenue est de l'ordre de 0.00 ce qui confirme que la variable quantitative testée (le D.G.I.P) est significative.

L'étude de la corrélation entre les variables qualitatives, qui a comme objectif de définir la relation entre ces dernières (A.C.M) et de déterminer le degré de corrélation (test de Spearman) afin de retirer celles qui marquent des relations non significatives dans la prochaine étude. Les résultats de l'analyse des correspondances multiples au niveau des quatre positions montrent la constitution d'un groupe composé pratiquement des mêmes variables qualitatives qui se démarque par une forte concentration des variables. Il s'agit de celle d'ambiance_1 et ambiance_2, appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3 et appréciation_4, contraste, description_2, quantité, luminosité, satisfaction et uniformité pour la première position ; d'ambiance_1 et ambiance_2, appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3 et appréciation_4, contraste, description_1 et description_2, quantité, luminosité, satisfaction, uniformité et sensibilité à l'éblouissement pour la deuxième position, d'ambiance_1 et ambiance_2, appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3 et appréciation_4, description_2, quantité, luminosité, satisfaction, uniformité pour la troisième position et celles d'ambiance_1, ambiance_2, contraste, appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3 et appréciation_4, description_2, quantité, luminosité, satisfaction, uniformité pour la quatrième position.

De plus, les résultats du test de Spearman effectués sur l'ensemble des positions montrent clairement l'existence d'une corrélation significative et positive entre toutes les variables sélectionnées (toutes les valeurs- p obtenues sont inférieures à .005) tandis que le degré de corrélation varie selon la position. Pour la $P1$, il atteint 76 %, pour la $P2$, il est compris entre 62 % et 76 %, pour la $P3$, le coefficient de corrélation obtenu se trouve entre 68 % et 79 %, pour la $P4$, il est situé entre 56 % et 78 %.

Les résultats du test ANOVA qui a comme but d'étudier la corrélation entre les variables qualitatives, qui ont été sélectionnées par l'investigation précédente (ACM et Spearman) et la variable quantitative en termes de D.GI.P (%) ont révélé qu'au niveau des trois positions (1, 2 et 3) une faible relation entre la variable quantitative avec l'ensemble des variables de type qualitatif a été enregistré alors que dans la quatrième position, 55 % des variables qualitatives sont corrélées significativement avec la variable numérique (D.GI.P) ce qui la rend représentative. Les valeurs- *p* enregistrées dans toutes les positions sont inférieures ou égales à .05, on trouve celle d'appréciation_1 (.019), d'appréciation_2 (.032) et de satisfaction (.045) pour la première position, celle de contraste (.04) et d'appréciation_2 (.34) pour la deuxième position, celle de satisfaction (.03) et d'ambiance_2 (.04) pour la troisième position et celle d'uniformité (.02), de satisfaction (.05), de quantité (.02), de contraste (.01), d'appréciation_1 (.01), d'appréciation_2 (.01), d'appréciation_3 (.00), d'appréciation_4 (.00), d'ambiance_1 (.01) et d'ambiance_2 (.02) pour la quatrième position.

Ce chapitre est clôturé par une définition de la statistique exploratoire ainsi que les différentes techniques statistiques proposées dans la prochaine étude et qui seront appliquées sur l'ensemble des variables sélectionnées précédemment. Les différentes variables ainsi que les techniques choisies sont résumées et illustrées dans le tableau suivant :

Tableau 8.18 : Tableau récapitulatif des techniques statistiques utilisées dans les quatre positions (Source : Auteur fait à l'aide de SPSS)

Les positions	Les techniques statistiques proposées				
	Box-Plot	Histogrammes	Diagramme en barres	Dispersion (double axe)	Dispersion (trois axe)
'P1'	Satisfaction	Appréciation_1	Luminosité	D.GI.P / Effectif	D.GI.P / Effectif avec : Satisfaction Appréciation_1 Appréciation_2
	Uniformité	Appréciation_2	Description_2		
	Contraste	Appréciation_3			
	Quantité	Appréciation_4			
		Ambiance_1 Ambiance_2			
'P2'	Satisfaction	Appréciation_1	Description_2	D.GI.P / Effectif	D.GI.P / Effectif avec : Contraste Appréciation_2
	Uniformité	Appréciation_2	Luminosité		
	Contraste	Appréciation_3			
	Quantité	Appréciation_4			
		Ambiance_1 Ambiance_2			
	Satisfaction	Appréciation_1 Appréciation_2	Description_1 Description_2	D.GI.P / Effectif avec :	

Chapitre 8 : Enquête sur la qualité lumineuse intérieure dans un modèle physique

'P3'	Uniformité Quantité	Appréciation_3 Appréciation_4 Ambiance_1 Ambiance_2	D.GI.P / Effectif	Satisfaction Ambiance_2
'P4'	Satisfaction Uniformité Quantité Contraste	Appréciation_1 Appréciation_2 Appréciation_3 Appréciation_4 Ambiance_1 Ambiance_2	D.GI.P / Effectif	Luminosité D.GI.P / Effectif avec : Satisfaction Uniformité Contraste, Quantité Appréciation_1 et 2 Appréciation_3 et 4 Ambiance_1 et 2

Références

- Akashi, Y., & Boyce, P. R. (2006). A field study of illuminance reduction. *Energy and Building*, 588-599.
- Arsenault, H., Hebert, M., & Duboi, M. C. (2012). Effects of glazing colour type on perception of daylight quality arousal, and switch-on patterns of electric light in office rooms. *Building and environment*, 56, 223-231.
- Baccini, A. (2010). Statistique Descriptive Multidimensionnelle. *Publications de l'Institut de Mathématiques de Toulouse*.
- Davis, R. G. (2006). Cognitive and Perceptual Factors in Lighted Architectural Environments. *PhD Thesis*.
- Gou, Z., Lau, S. S.Y., & Ye, H. (2014). Visual alliesthesia: The gap between comfortable and stimulating illuminance settings. *Building and Environment*, 82, 42-49.
- IBM Corp. Released 2016. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 24.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- Konis, K.S. (2011). Effective Daylighting: Evaluating Daylighting Performance in the San Francisco Federal Building from the Perspective of Building Occupants. *PhD Thesis. University of California: Berkeley; 2011*.
- Lefebvre, M. (2001). Probabilité statistique et applications. *Presses Internationales Polytechnique, 2001, Canada, ISBN 978-2-553-01554-0*.
- Mehrabian, A., & Russell, J. A. (1974). An approach to environmental psychology (pp. 216–217). *USA: The Massachusetts Institute of Technology*.
- Paredes, C. M. (2016). Daylighting and Architectural Quality, Aesthetic Perception of Daylit Indoor Environments. *PhD Thesis, NTNU, 2016:25, ISBN 978-82-326-1394-6*.
- Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). Making sense of Cronbach's alpha. *Int J Med Educ*, 2, 53-55.
- Xue, P., Mak, C.M., & Cheung, H.D. (2014). The effects of daylighting and human behavior on luminous comfort in residential buildings: A questionnaire survey. *Building and Environment*, 81, 51-59.
- Yildirim, K., Akalin-Baskaya, A., & Celebi, M. (2007). The effects of window proximity, partition height, and gender on perceptions of open-plan offices. *J Environ Psychol*, 27(2), 154-165.

CHAPITRE 9

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer l'environnement lumineux à l'intérieur du modèle physique équipé d'un plafond anidolique intégré en analysant les graphes résultant de la statistique descriptive qui a été abordé dans le chapitre précédent (chapitre 8). Cette étude sera structurée en trois parties complémentaires selon le type de variable étudiée ainsi que la technique statistique utilisée :

- **La première partie** consiste à évaluer les quatre facteurs fondamentaux qui composent notre questionnaire : Evaluative, Satisfaction, Spaciosité et Sensibilité à l'éblouissement en adaptant les techniques suivantes : Box-plot, graphique d'histogrammes et les diagrammes en barres. Pour le premier facteur, et selon les tests effectués précédemment, on a fait sortir quatre variables liées au confort visuel, au niveau de l'éclairage et à la précision. Il s'agit de : la satisfaction, l'uniformité, la quantité et le contraste qui vont être analysés à travers les graphiques de Box-Plot dans les deux scénarios (modèle de référence et modèle de test). Pour le deuxième facteur, nous avons eu recours aux graphiques d'histogrammes qui nous ont permis d'évaluer toutes les variables relatives à la satisfaction en termes de l'éclairage ambiant et de l'ambiance générale par rapport aux deux scénarios. On parle de : appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3, appréciation_4, ambiance_1 et ambiance_2. A la fin de cette première partie, on a proposé le diagramme en barres afin d'étudier les variables de description_1, description_2 et de luminosité qui sont en rapport avec les facteurs de spaciosité et de la sensibilité à l'éblouissement.
- **La deuxième partie** consiste à analyser les variables quantitatives de D.G.I.P et celle des sujets (effectifs) par l'utilisation de la représentation graphique de dispersion de points à double axes pour l'ensemble de l'espace au niveau des deux modèles d'étude.
- **La dernière partie** de ce chapitre est proposée pour analyser à la fois les variables de type qualitatif et quantitatif. Pour cela, un test 'Anova' a été effectué dans le but d'étudier les corrélations entre ces différentes variables ; celles qui représentent des relations significatives seront analysées sous forme de graphique de dispersion de points à triple axes.

9.1. Analyse des variables qualitatives

9.1.1. Analyse du facteur ‘Evaluative’

Par rapport à ce facteur, des graphiques sous forme de Box-Plot ont été proposés afin d’étudier l’effet de l’ajout d’un système de plafond anidolique intégré sur l’amélioration du confort lumineux intérieur. Cette étude concerne l’évaluation des indices relatifs au : confort visuel (à travers les variables de satisfaction de d’uniformité), niveau d’éclairage intérieur (à travers la variable de quantité) et la précision (à travers celle du contraste). Chaque variable sera représentée par un graphique et la lecture de ce dernier sera faite en analysant les observations données par les sujets dans les quatre positions pour les deux scénarios.

Dans le graphique de Box-Plot, le premier scénario, qui représente le modèle de référence, regroupe les sujets numérotés de 0 à 31 et les observations de ce dernier se trouvent au-dessous du trait discontinu alors que le deuxième, celui du modèle de test, regroupe les participants numérotés de 31 à 62 et ces évaluations sont représentées au-dessus du trait discontinu.

9.1.1. a. La satisfaction

La première lecture des résultats a révélé que les gens sont satisfaits de leur environnement lumineux lorsque le modèle est équipé d’un plafond anidolique intégré dans l’ensemble du local et le degré de satisfaction varie selon les positions desquelles les participants donnaient leurs évaluations.

Une analyse plus approfondie était proposée au niveau de chaque position. Les résultats sont représentés par la figure 9.1 et le tableau 9.1.

Tableau 9.1 : Satisfaction par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

Fréquence	Scénario _1				Scénario _2				
	Satisfaction								
		1	2	3	4	1	2	3	4
Valide	1	3	3	7	8	0	0	0	4
	2	2	4	8	4	0	1	3	2
	3	8	9	9	7	5	8	10	5
	4	4	5	5	7	2	4	3	2
	5	7	6	2	2	9	13	6	10
	6	1	4	0	2	9	4	5	4
	7	6	0	0	1	6	1	4	4
Total		31	31	31	31	31	31	31	31

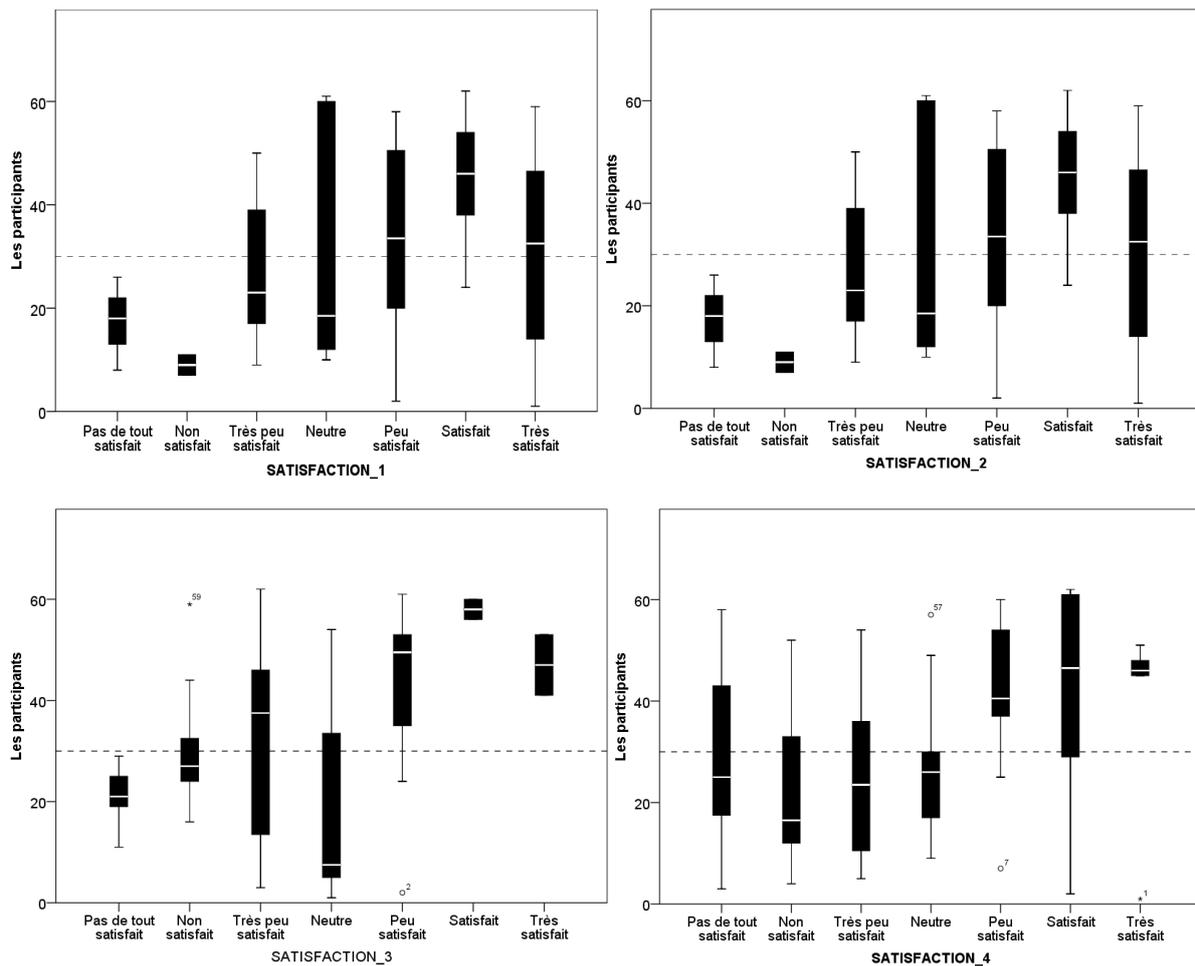


Figure 9.1 : Satisfaction par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

9.1.1. a1. Satisfaction : position '1'

Les résultats montrent que les observations données sur l'éclairage du modèle de référence sont plus ou moins positives et les gens sont satisfaits de la lumière présente dans cette zone. Les données du tableau 9.1 indiquent que 45 % des sujets ont donné des évaluations : très satisfait, satisfait et peu satisfait, 13 % étaient neutres et 42 % n'étaient pas satisfaits et donnaient des évaluations négatives : très peu satisfait, non satisfait et pas du tout satisfait. Ces résultats sont très raisonnables car cette position est celle qui se trouve près des ouvertures et qui est éclairée seulement par ces dernières. Par rapport au modèle de test, il est clair que les gens étaient satisfait vis-à-vis l'environnement lumineux. Les statistiques montrent que 78 % des participants ont donné des évaluations positives, 6 % étaient neutre et 16 % seulement jugeaient que l'éclairage n'était pas satisfait. De plus, le graphique du Box-Plot indique que le degré de satisfaction diffère d'un scénario à l'autre. Les observations négatives qui concernent 'pas du tout satisfait' et 'non satisfait' étaient limitées seulement pour le modèle de référence alors que les cinq échelles restantes étaient choisies par les participants dans les deux sessions mais avec

un degré de concentration différent : la plupart des réponses de ‘très peu satisfait’ et ‘neutre’ étaient obtenues dans le modèle de référence alors qu’au niveau des trois échelles positives, les réponses étaient focalisées pour évaluer le modèle de test.

9.1.1. a2. Satisfaction : position ‘2’

Selon les statistiques effectuées, les résultats avaient montré que les sujets étaient moins satisfaits de la lumière dans cette zone par rapport à la zone ‘1’ mais on constate également que les gens étaient plus satisfaits de l’éclairage lorsque l’espace est équipé d’un PAI. Les participants n’étaient pas satisfaits de l’éclairage présent dans le modèle de référence et les réponses données étaient comme suit : 51.6 % négatives, 16 % neutre et 32.4 % positives. Par contre, les résultats révèlent que les sujets étaient très satisfaits de l’environnement lumineux créé par le PAI, les observations positives représentent 60.1 % des réponses, 12.8 % étaient neutres et 27.1 % jugeaient que l’éclairage n’était pas satisfaisant. Le graphique de box plot montre que les évaluations négatives qui représentent la première et la deuxième échelle étaient données par les sujets de la première session seulement. Alors que le reste de l’échelle d’évaluation était observé dans les deux sessions avec un degré de concentration différent : pour le niveau ‘très peu satisfait’ et ‘neutre’, la plupart des répondants appartiennent à la première session. Alors que pour les trois échelles qui représentent les évaluations positives, la concentration des réponses converge vers le deuxième scénario (avec PAI).

9.1.1. a3. Satisfaction : position ‘3’

Cette position se trouve au fond du modèle à 8 m à 12 m des ouvertures. Les résultats de l’analyse descriptive montrent que les sujets ont tendance de préférer l’éclairage du modèle de test : plus de 51 % des gens étaient satisfaits, 9.6 % étaient neutres et 41.9 % voyaient que la lumière dans cette zone est insuffisante. En outre, les statistiques montrent que la majorité des observations données dans le modèle de référence étaient négatives de l’ordre de 77.4 % et 6.5 % seulement jugeaient que la lumière dans cette zone est satisfaisante, le reste étaient neutre. De plus, les résultats du graphique de box plot étaient différents dans cette position. On a constaté que les six échelles à partir de ‘pas du tout satisfait’ jusqu’à ‘satisfait’ étaient utilisées par les participants dans les deux modèles. On remarque aussi que la plupart des gens dont les réponses étaient négatives ou neutres appartiennent à la première session qui est destinée à évaluer l’éclairage dans le modèle de référence alors que les trois échelles positives étaient essentiellement choisies par les sujets de la deuxième session, notons que le degré de ‘très satisfait’ était utilisé seulement pour évaluer la lumière du modèle équipé d’un PAI.

9.1.1. a4. Satisfaction : position '4'

Au niveau de cette position, les sujets peuvent observer les trois zones en même temps ce qui nous a donné une idée sur la satisfaction vis-à-vis de l'éclairage dans tout l'espace, depuis la fenêtre jusqu'au fond. Les résultats confirment encore une fois que le PAI améliore la qualité de la lumière intérieure, ce qui rend les gens satisfaits de cet éclairage. Il est clair, à partir des données du tableau 9.1 que plus de 58 % des sujets étaient satisfaits, 6.4 % étaient neutres et 35.5 % jugeaient que la lumière dans l'ensemble du modèle n'est pas satisfaisante. Par contre, les participants voyaient que l'éclairage du modèle de référence n'est pas satisfaisant, 61.3 % des réponses étaient négatives alors que 16.1 % seulement étaient plus au moins satisfaits. Le graphique de box plot montre que les participants intervenants dans les deux sessions avaient utilisé les cinq premières échelles (de 'pas du tout satisfait' à 'peu satisfait') alors que les gens qui ont répondu par 'satisfait' et 'très satisfait' appartiennent uniquement à la deuxième session. La majorité des sujets qui ont répondu par 'pas du tout satisfait', 'non satisfait' et 'neutre' étaient destinés à étudier l'éclairage du modèle sans système anidolique intégré alors que les trois observations positives ainsi que celle de 'très peu satisfait' se concentrent dans les réponses des participants de la deuxième session (modèle avec PAI).

9.1.1. a5. Satisfaction : Synthèse

On en conclut que :

- Par rapport à la position '1', les statistiques exploratoires avaient confirmé que, vu le rapprochement de cette zone de la fenêtre, le système de plafond anidolique intégré ne contribue pas à l'éclairage de cette dernière car, elle est éclairée seulement par les ouvertures indépendamment de ce système.
- Par rapport à la position '2', on peut déduire que le système de PAI avait contribué de manière significative à l'éclairage de cette zone qui s'étale de 4 m à 8 m de largeur et plus de 60 % des participants sentaient que l'éclairage général de cette zone est satisfaisant.
- Par rapport à la position '3', l'analyse descriptive montre que, malgré la profondeur de cette zone, les participants interrogés avaient observés que l'éclairage ambiant est de manière générale satisfaisant même si le pourcentage des réponses positives n'est pas vraiment important (51 %).
- Par rapport à la position '4', on peut dire que les sujets étaient satisfaits de l'environnement lumineux généré par le plafond anidolique intégré, 58 % avaient confirmé l'efficacité de ce dispositif à améliorer l'éclairage dans l'ensemble du local.

9.1.1. b. L'uniformité

Les premiers constats tirés des données du tableau 9.2 et des graphiques présentés dans la figure 9.2 montrent que les participants sentaient que la lumière présente dans le modèle équipé d'un PAI est plus uniforme et donnait des évaluations plus positives par rapport à celles du modèle de référence. L'analyse des données dans chaque position est présentée ci-dessous :

Tableau 9.2 : Uniformité par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

Fréquence	Scénario _1				Scénario _2				
	Uniformité								
	1	2	3	4	1	2	3	4	
Valide	1	3	3	7	8	0	0	0	4
	2	2	4	8	4	0	1	3	2
	3	8	9	9	7	5	8	10	5
	4	4	5	5	7	2	4	3	2
	5	7	6	2	2	9	13	6	10
	6	1	4	0	2	9	4	5	4
	7	6	0	0	1	6	1	4	4
Total	31	31	31	31	31	31	31	31	

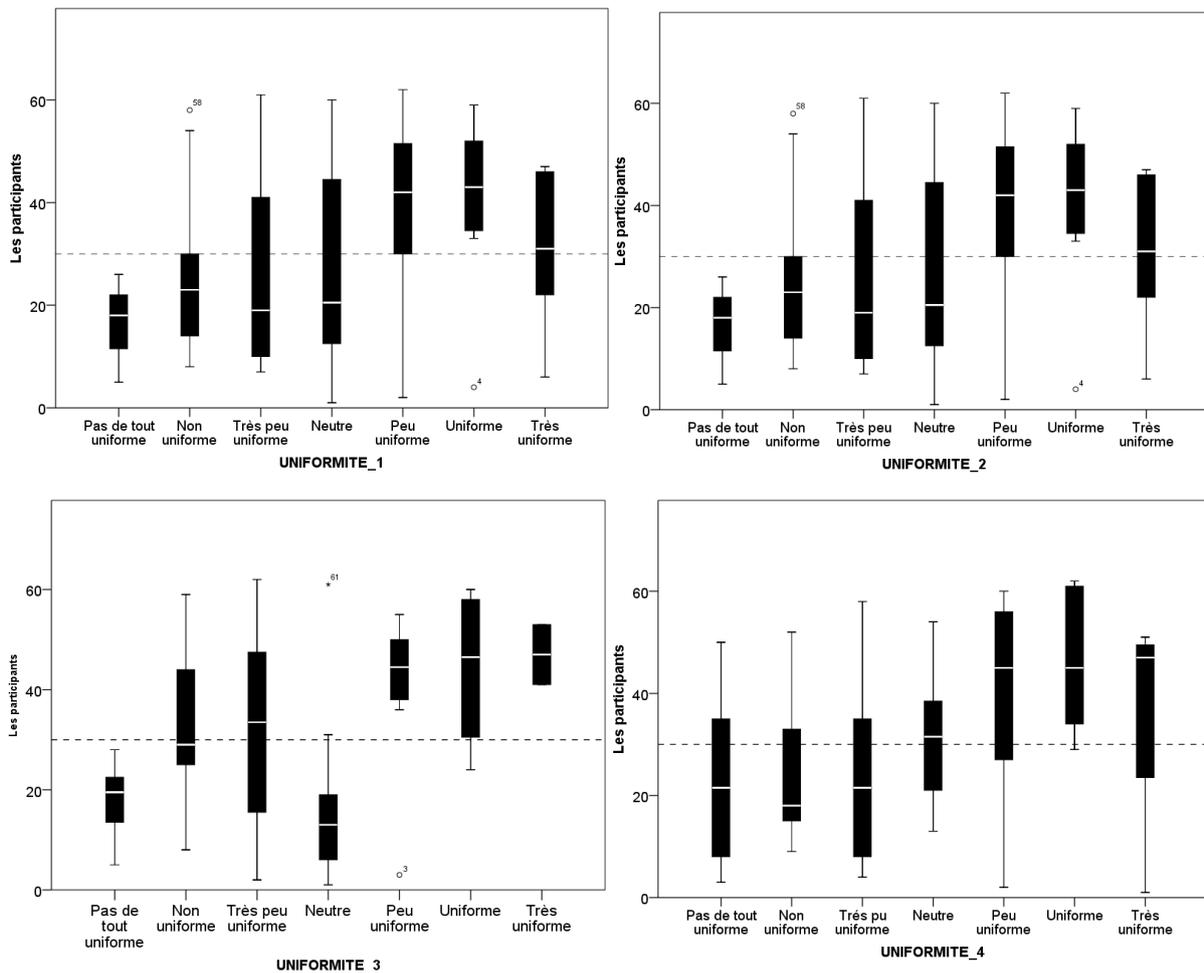


Figure 9.2 : Uniformité par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

9.1.1. b1. Uniformité : Position ‘1’

L’analyse des observations des participants concernant la question de l’uniformité au niveau de la première position avait montré que pour le modèle de référence, le pourcentage des réponses positives et négatives était très rapproché de l’ordre de 41 % et 45 % alors que 12 % entre eux répondaient par neutre. Les réponses recueillies du modèle du test avaient montré que plus de 77 % des sujets ont donné des évaluations positives, 6.4 % neutre et 16.2 % voyaient que l’éclairage n’était pas uniforme. Le graphique de box plot avait indiqué que la première échelle d’évaluation négative ‘pas du tout uniforme’ était donnée seulement par les trente premiers sujets alors que la sixième échelle ‘uniforme’ on la trouve uniquement dans les observations de la deuxième session. On constate également que les échelles de : (-) 2,3, neutre, 5 et 7 (+) étaient utilisées dans les deux scénarios et le degré de leurs concentrations diffère selon le modèle étudié : la concentration des réponses négatives et celle de neutre était observées dans le modèle de référence alors que les évaluations positives étaient choisies par les sujets qui évaluent l’uniformité dans le modèle de test.

9.1.1. b2. Uniformité : Position ‘2’

Les résultats de la deuxième position indiquent que, pour le modèle de référence, plus de 51 % des évaluations étaient négatives, 16.2 % étaient neutres et 32.2 % de l’effectif ont observé que cette zone n’est pas éclairée uniformément. Pour le modèle avec plafond anidolique, les statistiques avaient révélé que 58 % des sujets voyaient que l’éclairage est uniforme, 12.9 % répondaient par neutre tandis que 29 % jugeaient que la répartition de la lumière dans cette zone n’est pas uniforme. Le graphique de Box plot avait montré que cinq échelles d’évaluation sur sept étaient utilisées dans les deux scénarios, on parle de : (-) 2, 3, neutre, 5 et 7 (+). On constate également que, dans le premier scénario, le pourcentage des réponses négatives et neutres est plus important et la première échelle ‘pas du tout uniforme’ était donnée uniquement par ce groupe. De plus, les évaluations données par les deux échelles positives ainsi que celle de ‘très uniforme’ étaient concentrées dans le deuxième scénario.

9.1.1. b3. Uniformité : Position ‘3’

L’analyse des résultats du modèle de référence au niveau de la troisième position montre clairement que les sujets n’étaient pas satisfaits de l’uniformité de l’éclairage dans cette zone : 77.4 % avaient utilisés les trois échelles négatives (de 1 à 3), 16.2 % étaient neutres et 6.4 % seulement voyaient que la lumière se répartit uniformément. Concernant l’analyse des données du modèle du test, les résultats indiquent que le pourcentage des réponses positives et négatives se trouve dans la même fourchette (entre 41 % et 48 %) alors que 9 % seulement étaient neutres.

Par contre, le graphique de Box plot montre que les échelles positives 5 et 7 sont utilisées par les sujets du deuxième scénario à l'exception de celles de 'très peu uniforme' et 'uniforme' qui ont été choisies par les deux échantillonnages mais la concentration des réponses converge vers le modèle du test. La première et la deuxième échelle d'évaluation négative ainsi que celle de neutre ont été sélectionnées par les sujets dans le modèle de référence.

9.1.1. b4. Uniformité : Position '4'

La comparaison des résultats obtenus dans les deux sessions montre que les participants observent l'uniformité de l'éclairage dans le local équipé d'un PAI. Pour le modèle de test, plus de 58 % ont donné des évaluations positives, 6.4 % étaient neutres et 35.4 % ont choisi des réponses négatives. Pour le modèle de référence, la majorité des observations (plus de 61 %) étaient négatives et 16.2 % seulement jugeaient que l'éclairage est uniforme, le reste était neutre. De plus, l'analyse du graphique de Box plot confirme ces résultats, toutes les échelles négatives ont été utilisées uniquement dans le premier scénario tandis que celle de neutre et les trois échelles positives restantes ont été sélectionnées seulement lors de l'évaluation de l'uniformité de la lumière dans le modèle de test.

9.1.1. b5. Uniformité : Synthèse

On en conclut que :

- Par rapport à la position '1', l'analyse de description avait montré que l'uniformité était observée dans le modèle de test (77 %) alors que les évaluations positives et négatives de l'éclairage du modèle de référence étaient très rapprochées.
- Par rapport à la position '2', on constate que le PAI a joué un rôle important dans la répartition de la lumière car, plus de 58 % des sujets observaient l'uniformité dans le modèle de test et plus de 51 % des participants voyaient que la distribution de l'éclairage est non uniforme.
- Par rapport à la position '3', les résultats montrent que, pour le modèle de référence, la majorité des réponses (77 %) étaient négatives et jugeaient que l'éclairage n'est pas uniforme tandis que les données obtenues du modèle de test indiquent que les évaluations étaient rapprochées mais le pourcentage des réponses positives est plus important.
- Par rapport à la position '4', les observations données au niveau du modèle du test confirment la performance de plafond anidolique intégré à assurer une distribution plus uniforme de l'éclairage dans les espaces de grande profondeur, plus de 58 % des sujets ont donné des réponses positives.

9.1.1. c. La quantité

Une première lecture des résultats présentés dans le tableau 9.3 ainsi que les graphiques de Box plot de la figure 9.3 avaient montré que la quantité de lumière présente dans le modèle de test est jugée plus importante que celle qui se trouve dans le modèle de référence. Une analyse détaillée dans chaque position est présentée ci-dessous :

Tableau 9.3 : Quantité par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

Fréquence	Scénario _1				Scénario _2				
	Quantité								
	1	2	3	4	1	2	3	4	
Valide	1	3	4	6	12	0	0	1	2
	2	4	7	7	6	1	0	5	4
	3	6	10	8	7	6	9	10	4
	4	7	2	8	2	4	5	4	3
	5	1	4	2	2	10	10	6	10
	6	2	3	0	1	5	6	4	5
	7	8	1	0	1	5	1	1	3
Total	31	31	31	31	31	31	31	31	

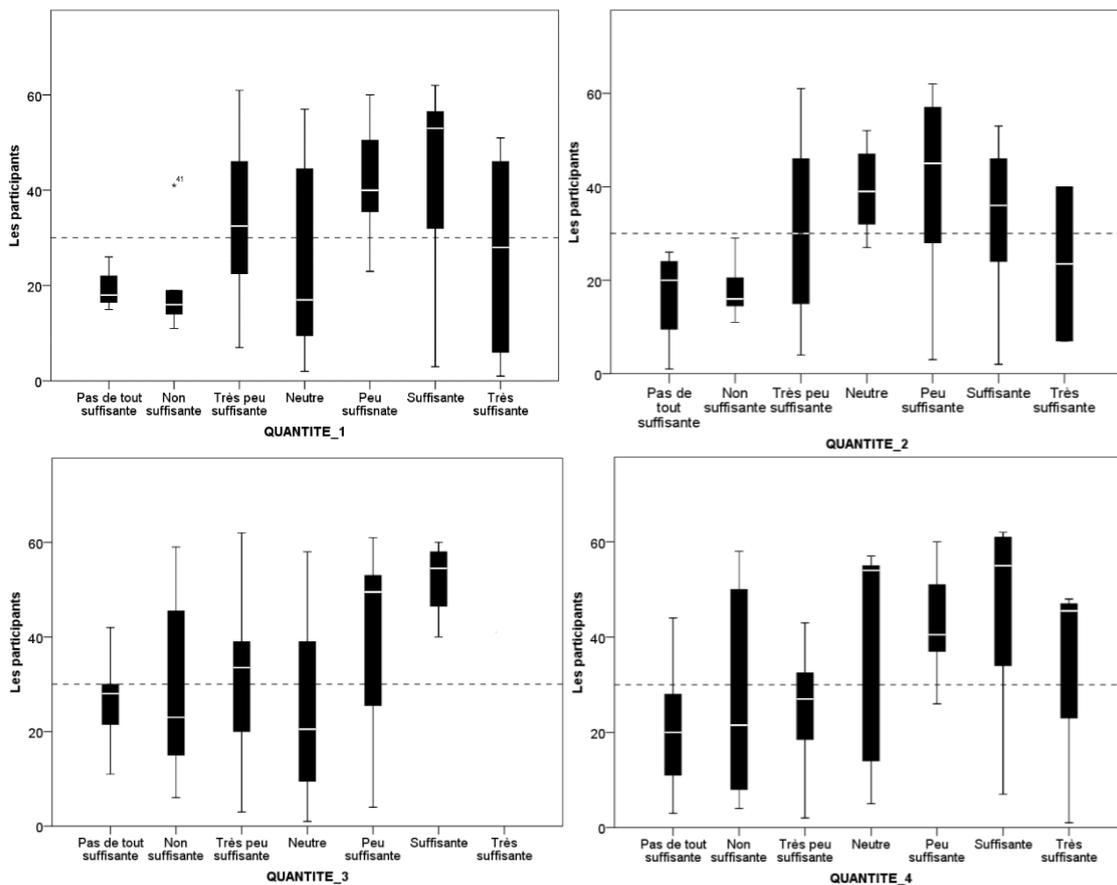


Figure 9.3 : Quantité par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

9.1.1. c1. Quantité : Position '1'

Par rapport à la variable 'quantité', 42 % des sujets qui ont évalué l'éclairage du modèle de référence avaient observé que la quantité de la lumière présente au niveau de la première position est insuffisante (malgré son rapprochement des ouvertures), 22.5 % étaient neutres et 35 % voyaient que l'éclairage intérieur peut être suffisant. Par contre, 64.6 % des participants au questionnaire du deuxième scénario (modèle avec PAI) avaient confirmé la suffisance de la lumière dans cette zone alors que 22.5 % seulement voyaient que la quantité d'éclairage disponible n'est pas adéquate. Le graphique de Box plot de la position '1' montre que la première et la deuxième échelle d'évaluation négative étaient exclusivement utilisées dans le premier scénario (sans système) tandis que les cinq échelles restantes ont été choisies par les sujets des deux sessions mais avec un pourcentage de réponses différent. La majorité des réponses neutres était donnée par les observateurs du modèle de référence alors que le pourcentage des évaluations données par la troisième échelle ainsi que par les trois autres positives étaient plus importantes dans le deuxième scénario (avec système).

9.1.1. c2. Quantité : Position '2'

Par rapport à cette zone centrale, il est clair à partir des résultats que la quantité de lumière présente dans le modèle de test est plus importante et considérée comme suffisante par plus de 54 % des participants en comparaison avec l'éclairage du modèle de référence qui a été jugé insuffisant avec un pourcentage de 67.7 %. L'analyse du graphique de Box plot confirme encore une fois que les échelles d'évaluations négatives ('pas du tout suffisante' et 'non suffisante') ont été utilisées uniquement dans le premier scénario tandis que les réponses positives de 'peu suffisante' et 'suffisante' et celle de neutre ont été choisies dans le deuxième scénario. On constate également que l'échelle '3' de 'très peu suffisante' dans les deux sessions par le même pourcentage.

9.1.1. c3. Quantité : Position '3'

Par rapport à la troisième position, les statistiques montrent que 67.7 % des sujets n'étaient pas satisfaits de la quantité de lumière disponible dans le modèle de référence et 6.5 % seulement considéraient que l'éclairage est suffisant. La même observation a été constatée pour le modèle de test mais avec un pourcentage différent : 51.6 % des participants voyaient que la lumière est insuffisante alors que 35.5 % observaient que la quantité d'éclairage est suffisante. Le reste avait répondu par neutre. Le graphique de Box plot montre que la plupart des échelles d'évaluation ont été utilisées dans les deux scénarios à l'exception de celle de 'suffisante' que l'on a trouvée seulement au niveau du modèle de test. De plus, le pourcentage des réponses

varie d'un scénario à l'autre selon l'échelle utilisée. Pour le modèle de référence, la majorité des réponses données étaient négatives et un nombre important des sujets avaient choisi 'pas du tout suffisante', 'non suffisante' et 'neutre'. Par contre, l'évaluation de l'éclairage du modèle de test indique que les sujets avaient recouru à l'échelle de 'très peu suffisante' et celle de 'peu suffisante'. Il est à noter que pour cette position, la septième échelle de 'très suffisante' n'était pas sélectionnée dans les deux scénarios.

9.1.1. c4. Quantité : Position '4'

L'analyse des données au niveau de cette position va nous permettre d'avoir des informations sur la quantité de lumière disponible dans l'ensemble du modèle. Les statistiques confirment que le PAI peut être une solution efficace pour assurer une quantité suffisante de lumière de jour et montrent que plus de 58 % des réponses étaient positives et 32.2 % ont donné des observations négatives. Contrairement, un grand nombre qui ont participé dans la première session (sans système) avaient confirmé l'insuffisance de l'éclairage dans le local : 80.6 % ont donné des réponses négatives contre 12.9 % seulement qui supposaient que la lumière est suffisante. Le reste ont été neutres. Le graphique de Box plot indique que les sept échelles d'évaluation étaient utilisées dans les deux sessions mais avec un pourcentage de concentration différent. Les échelles de '1', '2' et '3' étaient sélectionnées bien plus par les sujets de la première session tandis que les trois échelles positives et celle de neutre, la concentration des réponses était vers le modèle de test.

9.1.1. c5. Quantité : Synthèse

On en conclut que :

- Par rapport aux positions '1', '2' et '4', l'analyse des données avaient montré que les sujets étaient très satisfaits de la quantité de la lumière existante dans le modèle du test, le pourcentage des réponses positives est compris entre 64.6 % et 54.9 % selon la position de l'observateur. Par contre, par rapport à la position '3', on a constaté que 51.6 % des participants ont observé que la quantité d'éclairage est insuffisante.
- Par rapport aux résultats du modèle de référence, il est clair que, de n'importe quelle position, les sujets et le pourcentage des évaluations négatives augmentent avec la profondeur du local qui atteint les 80.6 % au niveau de la quatrième position.

9.1.1. d. Le contraste

Les premiers résultats de l'analyse descriptive de la variable 'contraste' montrent que les gens qui ont participé à l'évaluation du modèle du test avaient pu définir le contraste entre les

différents éléments composant le local par l'utilisation des adjectifs positifs contrairement à ceux du modèle de référence qui n'ont pas pu définir le contraste dans l'ensemble de l'espace. Une analyse approfondie dans chaque position est proposée dans la figure 9.4 et le tableau 9.4).

Tableau 9.4: Contraste par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

Fréquence	Scénario _1				Scénario _2				
	Contraste								
	1	2	3	4	1	2	3	4	
Valide	1	3	1	2	3	2	1	1	7
	2	2	4	8	6	1	0	2	5
	3	6	11	6	8	1	5	7	1
	4	9	9	11	12	4	5	5	3
	5	6	6	3	0	12	12	8	4
	6	3	0	1	1	6	8	5	6
	7	2	0	0	1	5	0	3	5
Total	31	31	31	31	31	31	31	31	

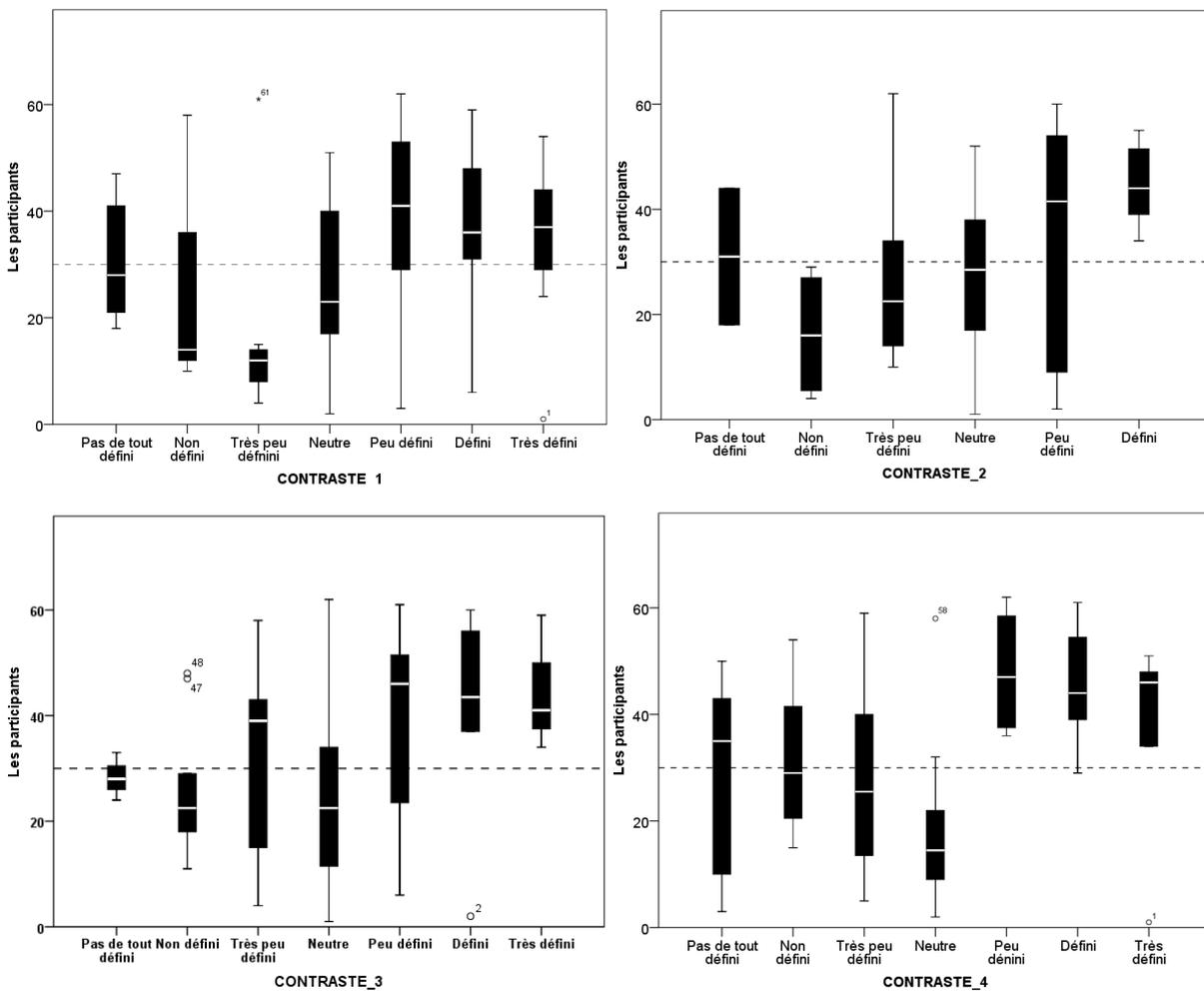


Figure 9.4 : Contraste par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

9.1.1. d1. Contraste : Position '1'

Les résultats obtenus au niveau du premier scénario avaient montré que le pourcentage des réponses positives et celles négatives sont identiques de l'ordre de 35.5 % et le pourcentage des évaluations neutres était important et atteint 29 %. Par contre, on a remarqué qu'au niveau du modèle de test, 74.2 % des participants avaient pu définir le contraste dans le modèle et 12.9 % seulement ont donné des observations négatives. Le graphique de box plot indique que la majorité des échelles d'évaluation étaient choisies au niveau des deux scénarios à l'exception de celle de 'très peu défini' qui a été utilisé uniquement pour l'évaluation du contraste dans le modèle de référence. On constate également que le pourcentage des réponses diffère d'un scénario à l'autre, on trouve que les échelles négatives sont les plus utilisées par les participants de la première session tandis que les observations positives ont été choisies plus par les sujets qui participent à la deuxième session (modèle de test).

9.1.1. d2. Contraste : Position '2' et '3'

Au niveau de ces deux positions, on remarque que les résultats de l'analyse statistique étaient très rapprochés. Par rapport au modèle de référence, les résultats sont identiques : 51.6 % des sujets n'avaient pas défini le contraste dans le local, entre 29 % et 35 % étaient neutres et entre 13 % et 19 % seulement ont donné des observations positives. Pour le modèle de test, le pourcentage des évaluations positives est toujours plus important que celui des réponses négatives. Entre 51.7 % et 64.6 % des sujets avaient pu définir le contraste dans le modèle tandis qu'entre 32.2 % et 19.3 % voyaient que le contraste n'est pas du tout défini. Dans ces deux positions, 16.1 des participants répondaient par 'neutre'. L'interprétation des graphiques de Box plot avait confirmé les premiers résultats présentés ci-dessus où on a constaté que les évaluations positives '5', '6' et '7' étaient les plus utilisées dans le deuxième scénario alors que les trois échelles négatives ainsi que celle de 'neutre' ont été les plus choisies au niveau du modèle de référence.

9.1.1. d3. Contraste : Position '4'

Au niveau du modèle de référence, on a enregistré 51.6 % des réponses positives, 6.5 % de négatives et presque la moitié des sujets avaient répondu par 'neutre'. Par rapport au modèle de test, on constate que le pourcentage des observations positives et négatives est très rapproché et se situe entre 41.9 % et 8.7 % alors que 9.4 % seulement des sujets étaient neutres. Les graphiques de Box plot montrent que pour le modèle de référence, c'est les mêmes échelles d'évaluation négative qui ont été choisies pour évaluer le contraste à l'exception de celle de 'pas du tout défini' qui a été utilisé le plus par les sujets de la deuxième session. Pour le modèle

équipé d'un PAI, ce sont les échelles de 'peu défini', 'défini' et très défini' qu'on trouve dans les réponses des sujets qui participent au deuxième scénario.

9.1.1. d4. Contraste : Synthèse

On en conclut que :

- Pour les quatre positions et au niveau du modèle de référence, les participants n'avaient pas pu définir le contraste et le pourcentage des évaluations négatives augmente en profondeur. Il est à signaler que le pourcentage des réponses neutres était important car il atteint 38 %.
- Pour le modèle de test, les sujets étaient satisfaits de l'éclairage intérieur et avaient pu définir le contraste entre les différentes parois de l'espace bien que le pourcentage des évaluations positives diminuent aussi en profondeur, on a enregistré 74.2 % au niveau de la première position qui diminue jusqu'à 48.7 % dans la quatrième position.

9.1. 2. Analyse du facteur 'satisfaction'

La présente analyse est proposée afin d'étudier le facteur de 'satisfaction', qui constitue une grande partie de notre questionnaire et qui regroupe toutes les variables relatives à l'éclairage ambiant et à l'ambiance générale de l'espace. L'évaluation de ce dernier sera faite en analysant les variables suivantes : appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3, appréciation_4, ambiance_1 et ambiance_2, en faisant recours aux graphiques d'histogrammes. Cette représentation graphique permet de nous donner des informations sur la fréquence des sujets dans chaque échelle d'évaluation dans les deux scénarios.

9.1. 2. a. Appréciation_1

Cette variable consiste à évaluer les appréciations des participants vis-à-vis de l'environnement lumineux intérieur dans les deux modèles d'étude par l'utilisation des adjectifs suivants : agréable/désagréable selon sept échelles d'évaluation. Les résultats sous forme de graphiques d'histogrammes sont présentés dans la figure 9.5. A partir de ces résultats, il est clair que les évaluations ainsi que la fréquence des sujets dans les deux scénarios varient selon la position de l'observateur. Par rapport au modèle de référence, le choix des réponses négatives et la fréquence augmentent en profondeur : à la 'P1', 12 sujets voyaient que l'éclairage est désagréable, 2 étaient neutres et 14 personnes étaient satisfaites. Cette satisfaction est due au rapprochement de cette zone des ouvertures. A la 'P2', 17 participants ont jugé que l'environnement lumineux est désagréable et 7 autres voyaient que la lumière est agréable. A la 'P3' et la 'P4', la même fréquence de 21 personnes avaient choisi des réponses négatives

pour décrire l'éclairage intérieur. Donc, de manière générale, les participants dans cette session n'étaient pas satisfaits de la lumière présente dans le modèle et la plupart des adjectifs utilisés tournent autour de 'très désagréable', 'peu désagréable' et 'désagréable'. Par rapport au modèle de test, on ne constate l'existence d'aucune logique dans les réponses des sujets ainsi que la fréquence des répondants même si l'analyse descriptive montre que, dans l'ensemble, les sujets appréciaient la lumière comme agréable. A la 'P1' et la 'P4', la fréquence des réponses positives était importante et comprise entre 25 et 19 contre une seule fréquence pour les observations négatives pour la première position et 10 pour la dernière. A la 'P2' et 'P3', on remarque que les participants ont donné des observations similaires et 14 personnes dans les deux positions voyaient que l'espace est caractérisé par une lumière qui peut être agréable.

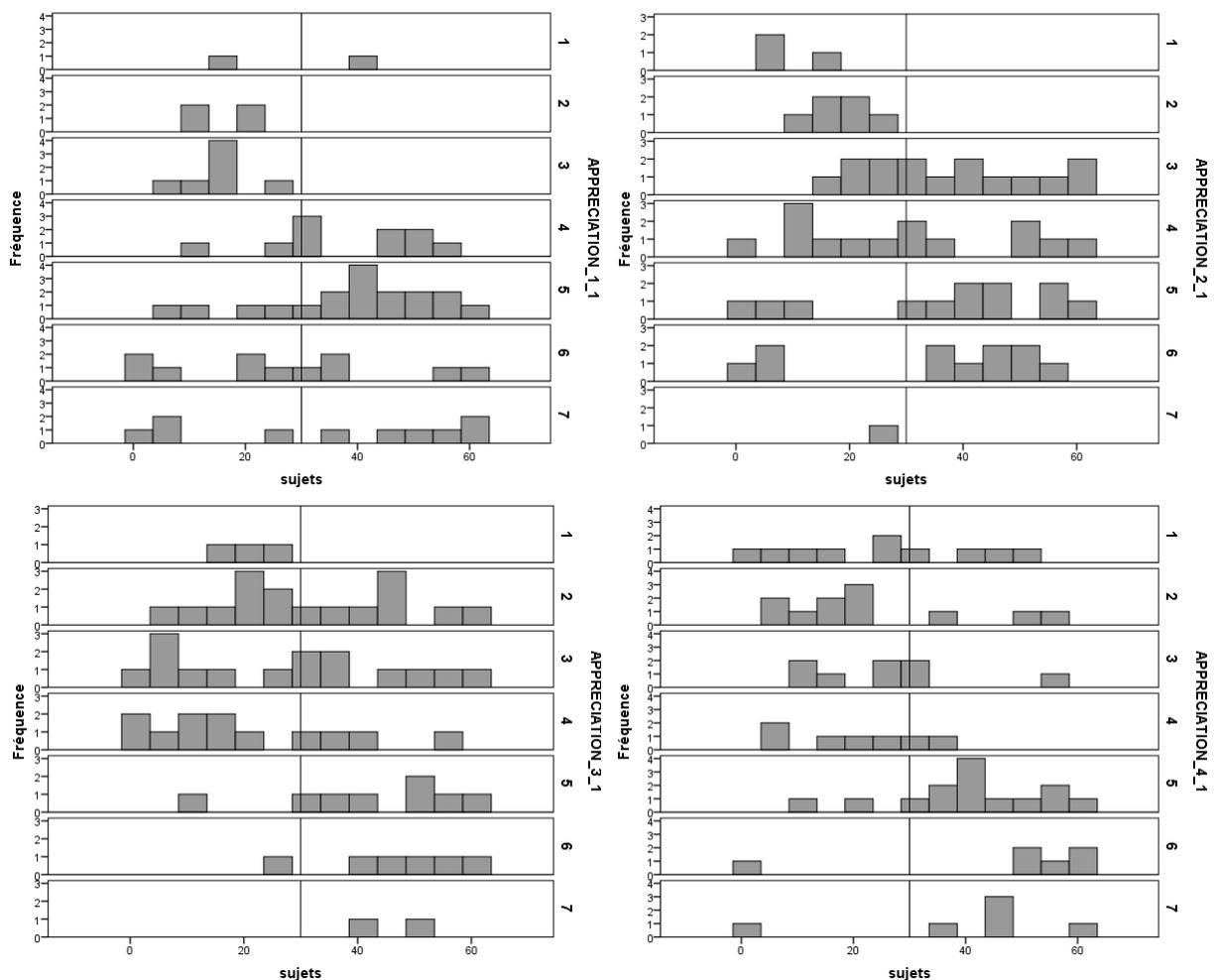


Figure 9.5 : *Appréciation_1* par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

9.1.2. b. Appréciation_2

Pour la variable 'appréciation_2', les participants ont été demandé d'évaluer si l'éclairage à l'intérieur des deux modèles est ennuyeux ou stimulant. Les graphiques d'histogramme

présentés dans la figure 9.6 montrent que les appréciations données par les sujets pour cette variable ont les mêmes données pour celle de ‘appréciation_1’. Par rapport au modèle de référence, les statistiques indiquent qu’un nombre important de personnes utilisaient l’adjectif ennuyeux pour décrire la lumière dans cet espace et on remarque également que la fréquence des réponses négatives augmente avec la profondeur du modèle. A la première position, le nombre des observations positives et négatives était égal de l’ordre de 14 fréquences tandis qu’à la position ‘2’, ‘3’ et ‘4’, les participants ont tendance de choisir avec une grande fréquence, qui atteint 23 à la troisième position, les adjectives suivants : ‘très ennuyeuse’, ‘ennuyeuse’ et ‘peu ennuyeuse’ alors que les adjectifs de stimulantes étaient utilisés par un petit nombre. Par rapport au modèle de test, les résultats indiquent que la majorité des gens qui ont participé à cette étude appréciaient la lumière comme stimulante ou la fréquence atteint 24 au niveau de la première position et 17 dans la quatrième. La fréquence des réponses positives dans la ‘P2’ et la ‘P3’ est la même de l’ordre de 14. Un nombre restreint de sujets, compris entre 3 et 12, qui appréciaient l’éclairage comme ennuyeux.

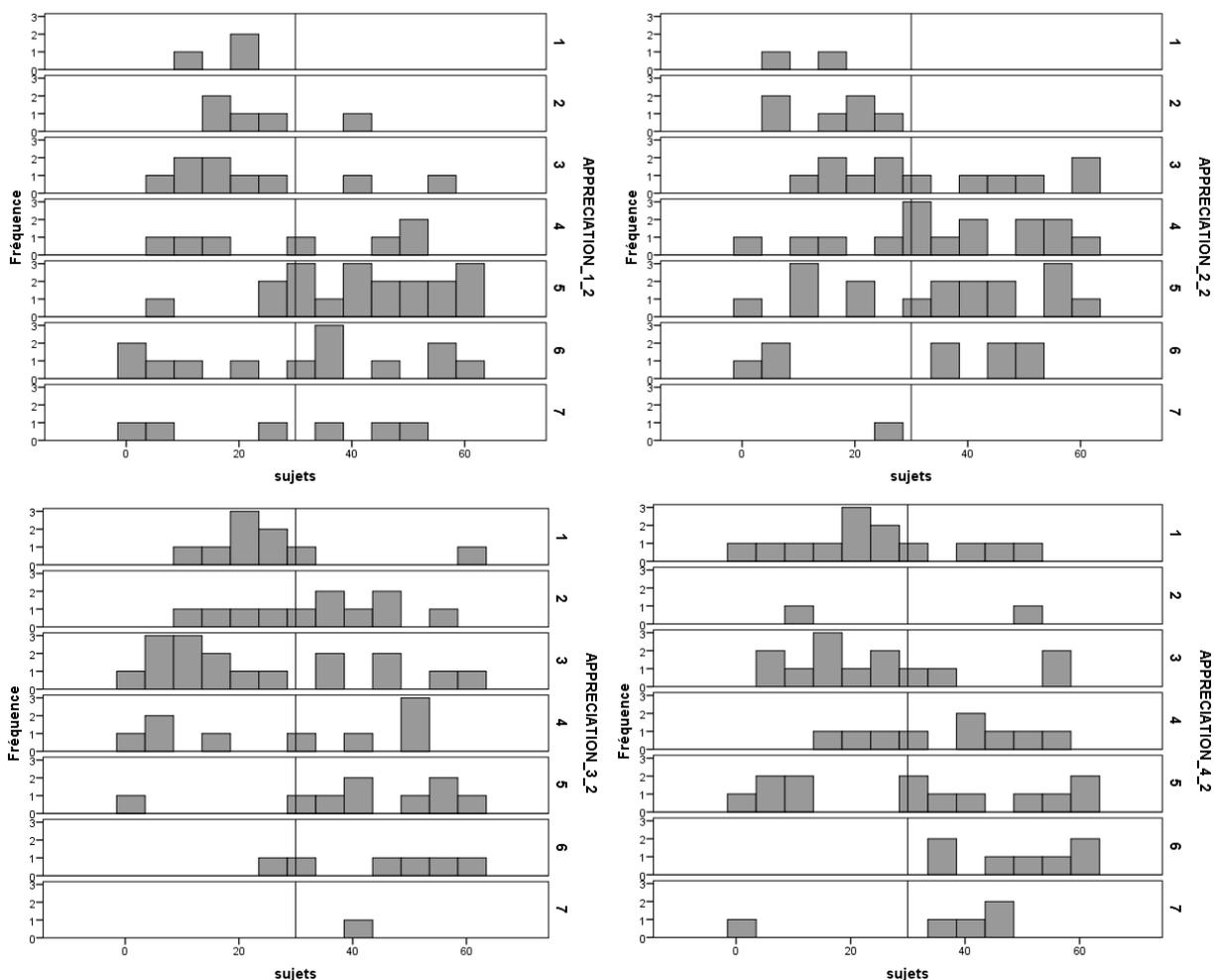


Figure 9.6 : Appréciation_2 par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

9.1.2. c. **Appréciation_3**

L'objectif à travers cette variable est d'étudier, selon les appréciations des participants, l'éclairage à l'intérieur des deux modèles par l'utilisation des adjectifs de chaotique et ordonné. Les résultats obtenus par le modèle de référence montrent que, pour les quatre positions, la fréquence des réponses négatives qui décrivent l'espace par 'chaotique', 'peu chaotique' et 'chaotique' est importante et augmente en profondeur. a la 'P2' et la 'P3', plus de deux tiers des sujets évaluaient la distribution de la lumière par chaotique. Une fréquence de 1 à 10 sujets observaient l'ordonnement de la lumière dans cet espace. Pour le modèle de test, c'est le contraire, les participants voyaient que la distribution de la lumière est ordonnée et la fréquence des réponses positives est comprise entre 13 et 23 et augmente également en profondeur. Les observations négatives constituent une petite partie des réponses des sujet où on a enregistré une fréquence maximale de 10 dans la première position qui diminue par la suite jusqu'à 6 personnes seulement.

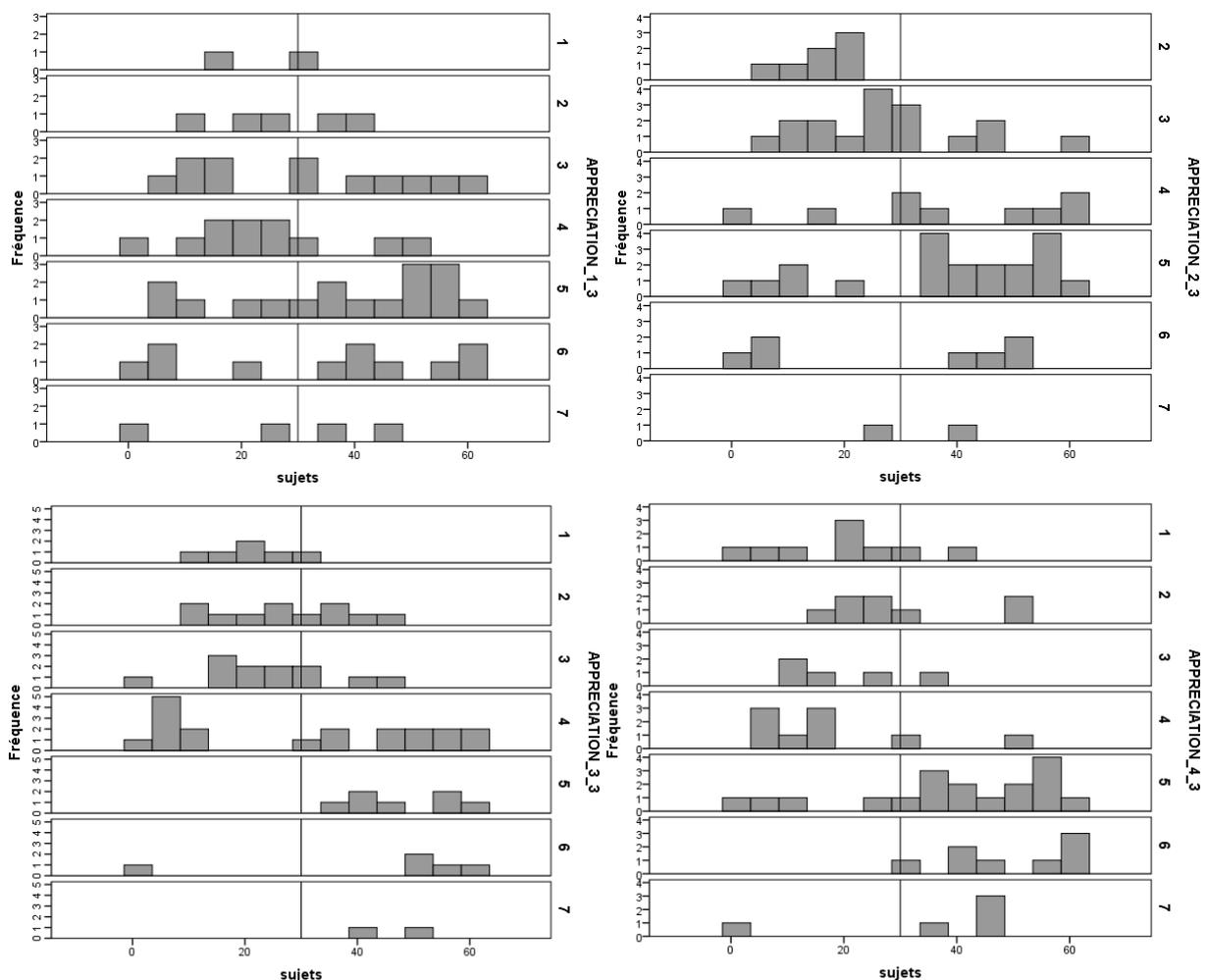


Figure 9.7 : *Appréciation_3* par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

9.1.2. d. **Appréciation_4**

La variable ‘appréciation_4’ était choisie afin de déterminer si l’éclairage présent dans l’espace étudié est passif ou actif. L’analyse statistique des données du modèle de référence indique qu’un nombre important des participants avaient utilisé les trois échelles qui tournent autour de ‘passive’ et la fréquence de ces échelles d’évaluation est plus importante à la troisième et à la quatrième position qui est supérieure à 20. Concernant les réponses positives, on a constaté qu’au niveau de la première position, les gens observaient la lumière comme active dans l’espace tandis que dans les trois autres positions, une fréquence restreinte des participants située entre 2 et 6 était enregistrée. Les graphiques d’histogrammes montrent que dans la position ‘1’, ‘2’ et ‘3’, la majorité des sujets avaient décrit la lumière dans le modèle de test par active. La fréquence de cette évaluation positive était comprise entre 17 et 19 tandis que dans la troisième position, 16 personnes interrogées appréciaient la lumière comme passive alors que 12 autres la voyaient comme active.

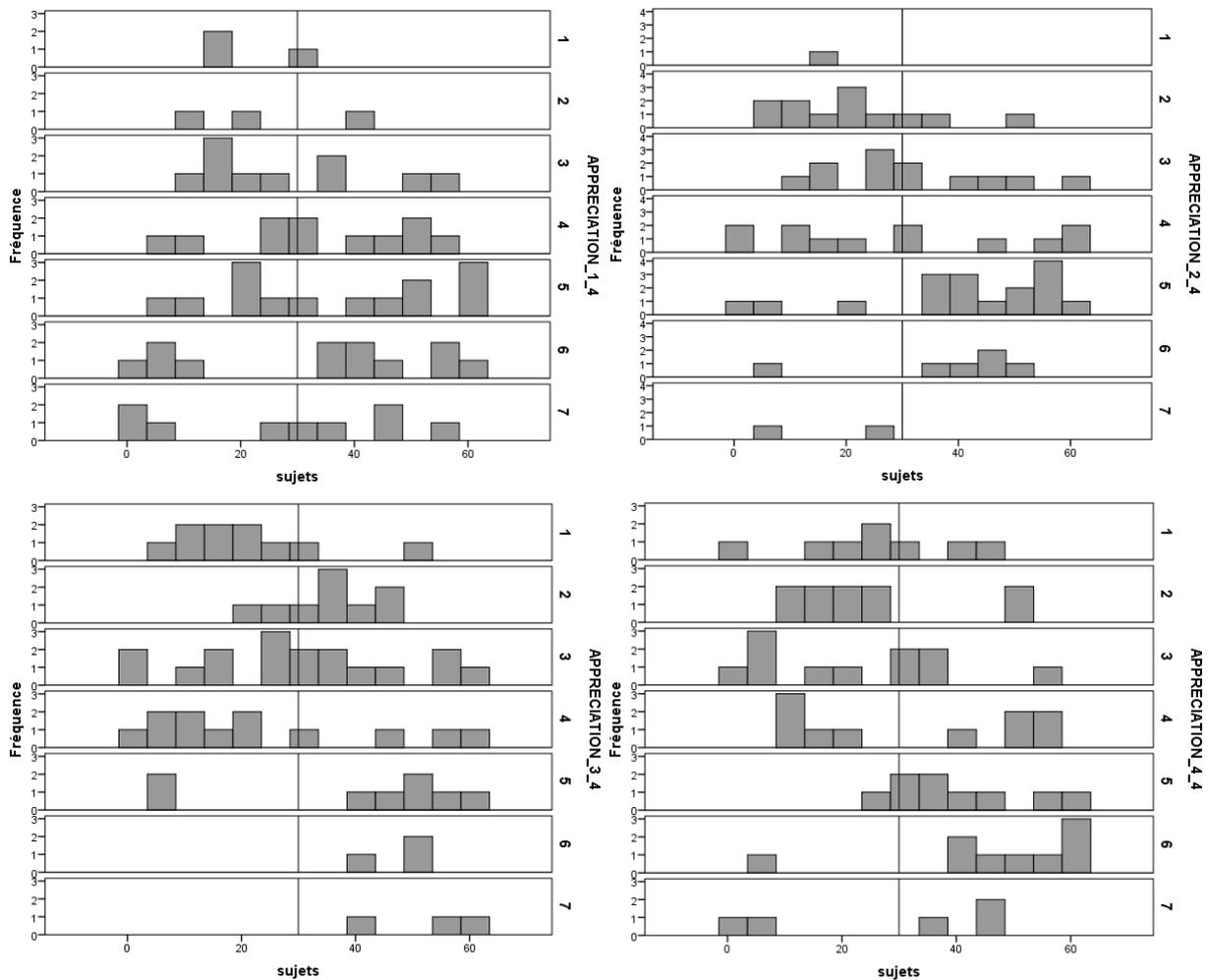


Figure 9.8 : Appréciation_4 par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

9.1.2. e. **Ambiance_1**

Pour étudier l'appréciation des sujets vis-à-vis de l'ambiance générale présente dans les deux modèles d'étude, on a eu recours à deux paires d'adjectifs, le première est celui de sombre-claire qu'on va analyser dans ce point alors que le deuxième sera l'objectif du point suivant. Pour le modèle de référence, c'est toujours les évaluations négatives qui dominant sur l'ensemble des réponses à l'exception de la première position où les évaluations positives et négatives sont très rapprochées. Le choix des adjectifs liés à sombre commence à être importante à partir de la deuxième position et une fréquence de 18 à 21 personnes voyaient que l'ambiance générale de la salle est sombre. L'analyse des résultats au niveau du modèle équipé d'un PAI montre que la fréquence aux réponses positives était importante de l'ordre de 20 personnes dans la première position qui diminue par la suite lorsqu'on s'éloigne des ouvertures pour atteindre 15 sujets. Malgré cette diminution, il est clair que les participants appréciaient l'ambiance dans l'ensemble du modèle comme claire quel que soit la position de l'observateur car, plus de la moitié des sujets choisissaient des échelles qui varient entre 'peu claire', 'claire' et 'très claire'.

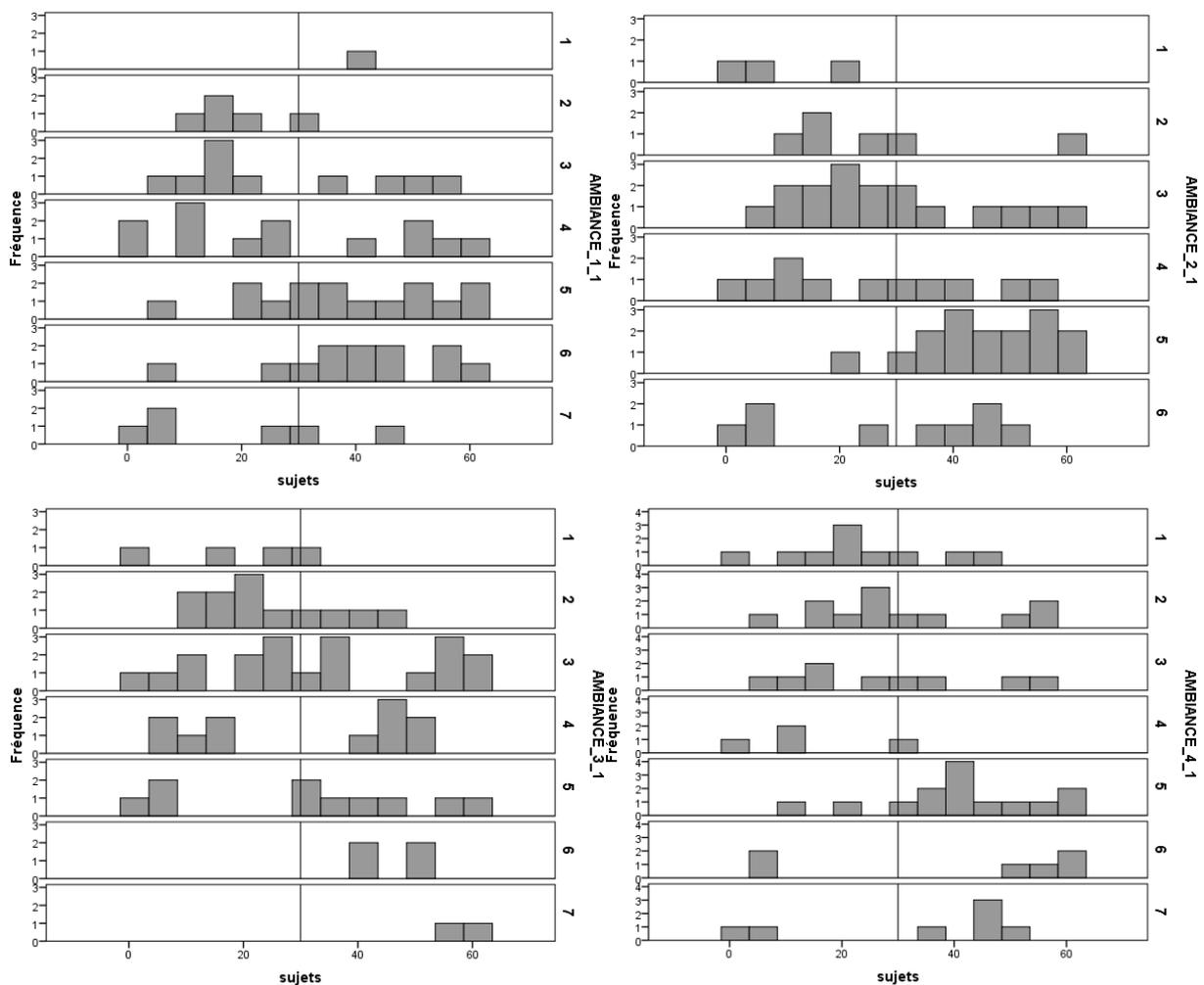


Figure 9.9 : Ambiance_1 par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

9.1.2. f. Ambiance_2

Le deuxième adjectif qui a été utilisé pour caractériser l’ambiance lumineuse dans les modèles physiques concerne celui de désagréable-plaisante (agréable). Comme était déjà constaté dans l’analyse des variables précédentes, les résultats confirment que l’ambiance lumineuse présente dans le modèle de référence est jugée comme désagréable tandis qu’elle est considérée comme plaisante dans le modèle de test. Les statistiques indiquent que, dans les quatre postes d’observation, un grand nombre des participants choisissaient des réponses négatives de ‘très désagréable’, ‘désagréable’ et ‘peu désagréable’ avec une fréquence qui augmente au fur et à mesure de la profondeur de la salle. Cette dernière est de l’ordre de 12 à la ‘P1’, 18 à la ‘P2’, 21 à la ‘P3’ jusqu’à ce qu’elle atteigne un seuil maximal de 25 dans la quatrième position alors que la fréquence aux réponses positives dans ce premier scénario est très limitée où on a enregistré une fréquence maximale de 10 et une autre minimale de l’ordre de une seule dans la ‘P3’.

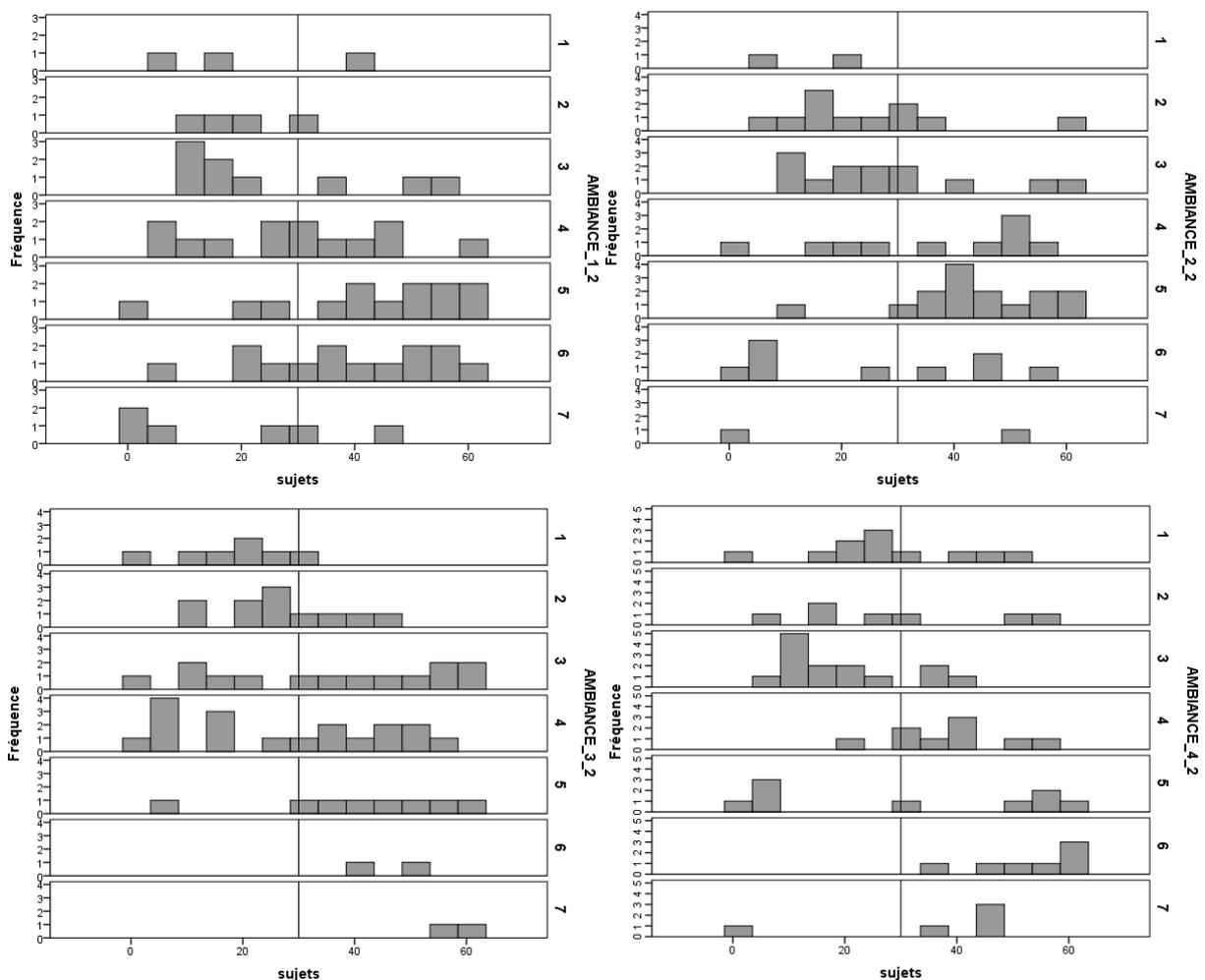


Figure 9.10 : Ambiance_2 par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

Pour le modèle du test, il est évident que la plupart des sujets appréciaient l'ambiance générale dans l'espace comme agréable et plaisante dans les positions '1', '2' et '4' bien que la fréquence aux réponses positives n'est pas vraiment important qui est de 19 comme une valeur maximale. Pour la troisième position, et comme il était déjà observé précédemment, la fréquence aux réponses négatives est plus importante à celle des positives, les personnes interrogées constataient que l'ambiance présente dans cette zone est désagréable.

9.1.2. g. 'Satisfaction' : Synthèse

Par rapport à ce deuxième facteur de 'satisfaction' ('pleasantness') qui a été étudié à travers six variables dans le but d'évaluer l'éclairage ambiant ainsi que l'ambiance générale dans les deux modèles au niveau de quatre positions. Cette investigation à l'aide des statistiques descriptives nous a permis de conclure que :

- Pour le modèle de référence, les trente-et-un participants confirmaient que l'éclairage du modèle ainsi que l'ambiance lumineuse n'étaient pas satisfaisante. Les adjectifs les plus utilisés étaient : désagréable pour les variables de appréciation_1 et ambiance_2, ennuyeuse (appréciation_2), chaotique (appréciation_3), passive (appréciation_4) et sombre (ambiance_1) et la fréquence moyenne des sujets à ces réponses négatives (trois échelles négatives) est toujours supérieure à celle qui représente les observations positives : 18 pour désagréable (appréciation_1), ennuyeuse, chaotique et passive, 17 pour celles de sombre et 19 pour les échelles de désagréable (ambiance_2).
- Pour le modèle équipé d'un plafond anidolique intégré, les participants présentaient une belle appréciation vis-à-vis de l'éclairage ambiant et de l'atmosphère lumineuse intérieure. Les sujets avaient recouru aux trois échelles positives des adjectifs suivants : 'agréable', 'stimulante', 'ordonnée', 'claire' et 'passive' afin d'exprimer leur satisfaction et leur sensation. La fréquence moyenne de ces observations positives confirme ces résultats, on trouve qu'une moyenne de 18 personnes choisissaient les adjectifs de 'agréable' 'ordonnée', 19 préféraient celle de 'stimulante', 14 utilisaient l'adjectif de 'agréable' (ambiance_2) et 15 sujets en moyenne avait choisi celle de 'claire'.

9.1.3. Analyse du facteur 'spaciosité' et 'sensibilité à l'éblouissement'

La troisième partie de ce chapitre consiste à évaluer les facteurs liés à la spaciosité et à la sensibilité à l'éblouissement par le recours au diagramme en barres qui nous permet de donner la fréquence des sujets dans les différentes échelles d'évaluation pour chaque variable étudiée.

Sous ces deux facteurs, se trouvent trois variables : description_1, description_2 et luminosité dont chacune va être analysée en détail, selon les résultats du test de Spearman, dans les points suivants :

9.1.3. a. Description_1

La variable ‘description_1’ était proposée pour étudier la spaciosité des deux modèles d’étude par l’utilisation des adjectifs qui décrivent l’espace comme ‘étroit’ ou ‘spacieux’, distribuées en sept échelles d’évaluation dont trois sont négatives, une neutre et trois autres positives. Pour cette variable, le test de Spearman a révélé que seule la position 3 avait marqué une corrélation significative et l’analyse de cette dernière (variable) par le diagramme en barres a montré que les sujets voyaient que le modèle du test est plus spacieux que celui de référence. Les résultats présentés dans la figure 9.11 indiquent aussi que 18 personnes avaient jugé que le modèle de test est spacieux contre 04 personnes seulement pour le modèle de référence. Pour le choix des réponses négatives, on constate que 15 participants avaient eu recours à ces dernières pour évaluer le modèle référence tandis que 08 participants les ont choisi pour décrire la spaciosité du modèle du test.

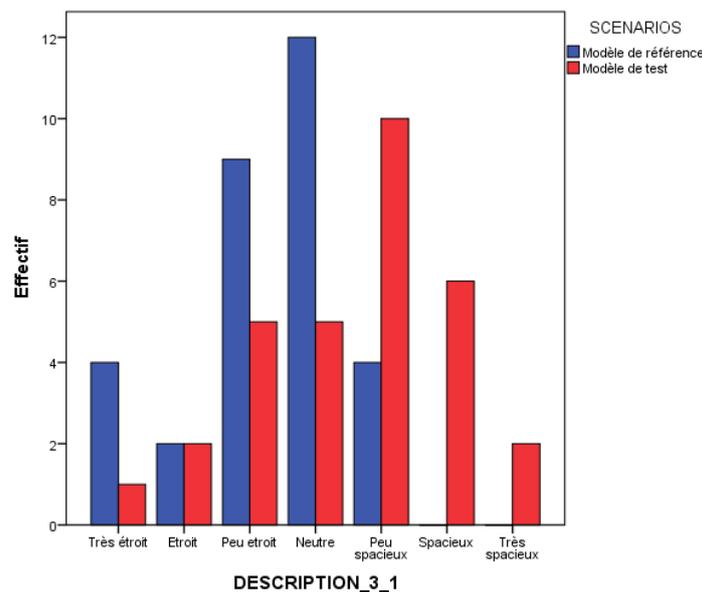


Figure 9.11 : Description_1 pour P3 par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

9.1.3. b. Description_2

La variable de description_2 consiste à déterminer si l’espace dans les deux modèles d’étude est ‘ouvert’ ou ‘fermé’ afin de confirmer les résultats obtenus par la variable description_1 en terme de spaciosité du l’espace. Il est à noter que le test de ‘Spearman’ qui a été effectué précédemment avait montré que la variable de description_2 présente une corrélation

significative avec l'ensemble des variables au niveau de trois positions 1, 2 et 3 ce qui limite notre analyse statistique de cette variable à ces trois derniers qui seront présentés sous forme de diagramme en barres (figure 9.12). La comparaison des résultats avait montré, qu'au niveau de positions sélectionnées pour l'étude, les participants observaient le modèle de test comme plus ouvert que l'espace de référence. Les données statistiques révèlent que pour le modèle de test, la fréquence des sujets aux réponses positives qui décrivent l'espace comme ouvert est importante de l'ordre de 20 qui diminue à 16 dans la troisième position tandis que, pour le modèle de référence, la fréquence enregistrée des personnes interrogées aux réponses négatives augmente dans chaque position jusqu'à quelle atteigne 19 dans la dernière (P3).

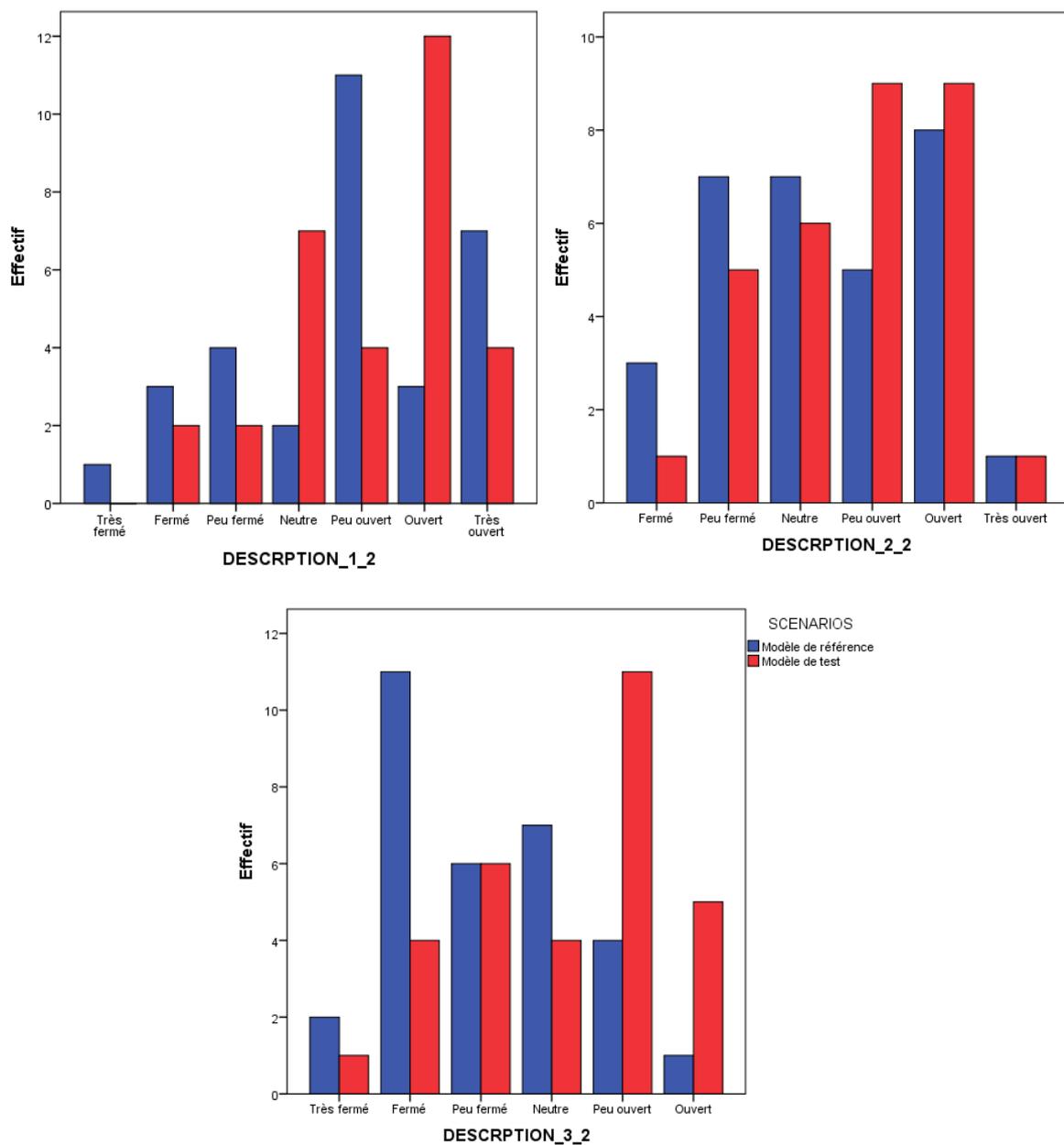


Figure 9.12 : Description_2 pour P1, P2 et P3 par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

9.1.3. c. Luminosité

La variable de ‘luminosité’ était proposée afin d’étudier le degré de luminosité dans l’ensemble de l’espace dans les deux modèles au niveau de la position 1, 2 et 3 qui ont été déjà sélectionnées par le test de ‘Spearman’. L’évaluation de la luminosité était faite en utilisant deux antonymes d’adjectifs : ‘sombre’ et ‘brillant’.

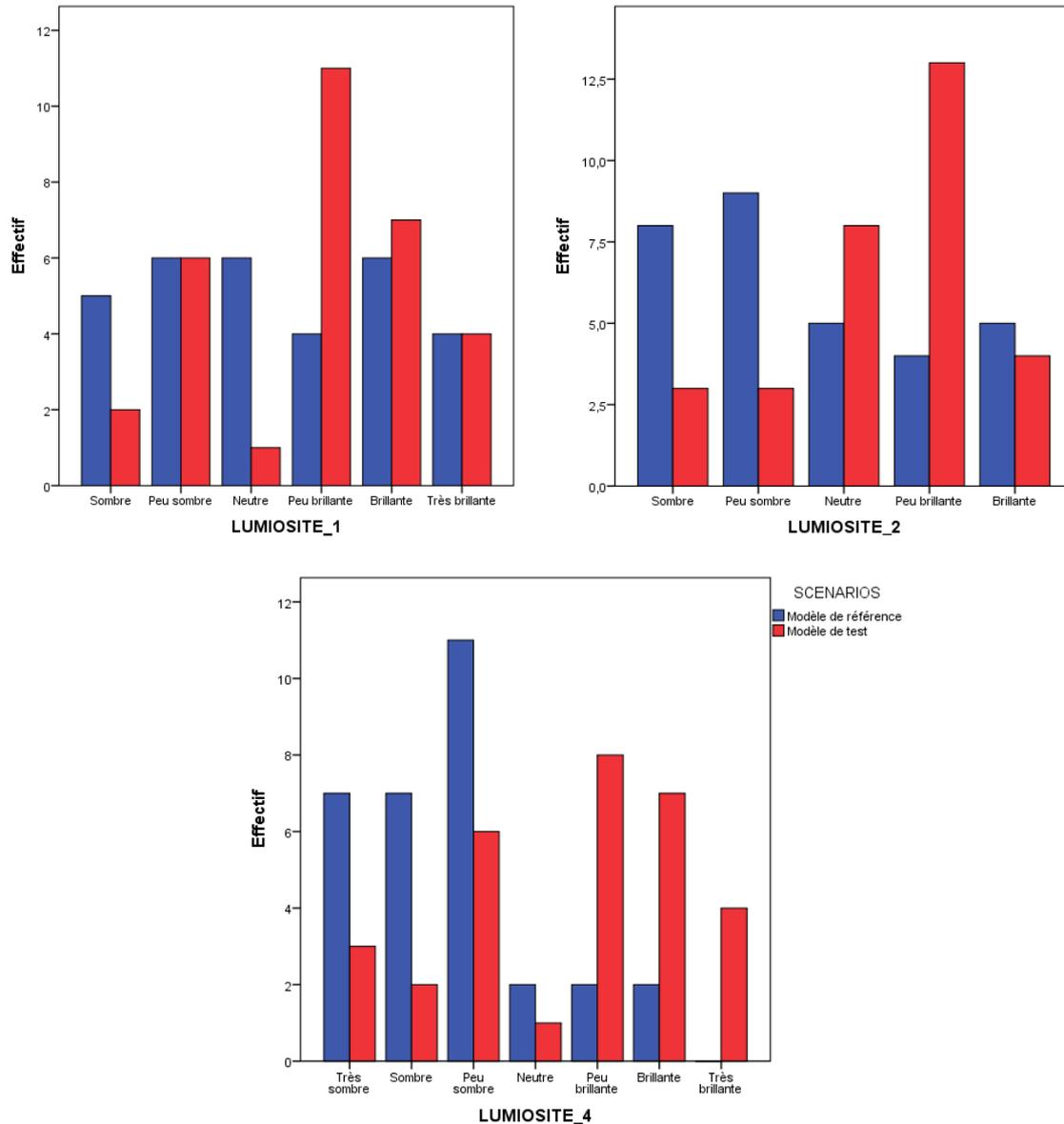


Figure 9.13 : Luminosité pour P1, P2 et P4 par rapport aux scénarios (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

Les résultats présentés dans les diagrammes en barres dans la figure 9.13 indiquent que les participants étaient satisfaits du degré de la luminosité dans le modèle de test et une fréquence comprise entre 17 et 22 le considère comme ‘peu brillant’, ‘brillant’ et ‘très brillant’. On constate également une faible fréquentation aux observations négatives qui ne dépasse pas 10 comme une valeur maximale. Par contre, les sujets qui ont participé pour évaluer la luminosité

dans le modèle de référence avaient caractérisé l'espace comme sombre avec une faible fréquence des réponses positives qui diminue en profondeur (4 effectifs dans la troisième position) alors que la fréquence des évaluations négatives était importante et augmente avec la profondeur de l'espace. Elle est de l'ordre de 11 au niveau de 'P1', 17 au niveau de de 'P2' et atteint 25 dans la troisième position.

9.1.3. d. 'Spaciosité' et 'sensibilité à l'éblouissement' : Synthèse

L'analyse descriptive du facteur de 'spaciosité' et celui de 'la sensibilité à l'éblouissement' à travers des variables liées à la description et à la luminosité de l'espace par les diagrammes en barres révèle que :

- Pour le facteur de 'spaciosité', les participants confirmaient que le modèle équipé d'un PAI est considéré comme plus ouvert et plus spacieux que le modèle de référence bien que le degré de la satisfaction diffère d'une position à une autre et la différence est très remarquable dans la troisième position qui est considérée comme celle qui détermine la performance du Plafond Anidolique Intégré. Par rapport à la variable description_1 qui a été étudiée au niveau de la troisième position seulement, il est clair que le modèle de test apparaît plus spacieux que le modèle de référence (18 personnes interrogées sur 31 confirmaient ce constat). Par rapport à la variable description_2, plus de 20 sujets observaient que l'espace équipé d'un PAI est plus ouvert que celui de référence au moyen des positions 1, 2 et 3.
- Pour le facteur de 'sensibilité à l'éblouissement', les résultats confirment que le modèle de test (avec PAI) est plus lumineux que celui de référence. Les statistiques montrent que plus de 17 participants avaient eu recours aux adjectifs positifs pour décrire le degré de luminosité à l'intérieur du modèle de test tandis que pour l'évaluation de la luminosité du modèle de référence, les plupart des réponses des sujets interrogés décrit l'espace comme 'peu sombre', 'sombre' et 'très sombre'. Donc, à partir de ces constats, on peut dire que le système de plafond anidolique intégré permet d'améliorer la luminosité dans les locaux profonds et le degré de luminosité est très rapproché dans les différents champs visuels, ce qui traduit la performance de notre PAI à assurer une homogénéité de la distribution lumineuse dans l'ensemble du modèle.

9. 2. Analyse des variables quantitatives

Deux variables de type quantitatif ont été utilisées dans cette analyse. Il s'agit des valeurs de D.G.I.P calculé pour chaque position ainsi que celle de l'effectif (l'ensemble des participants).

La représentation et l'analyse des résultats seront faites à partir de graphique de dispersion de points à double axes qui est couramment utilisé pour ce type d'étude. Les résultats présentés dans la figure 9.14.

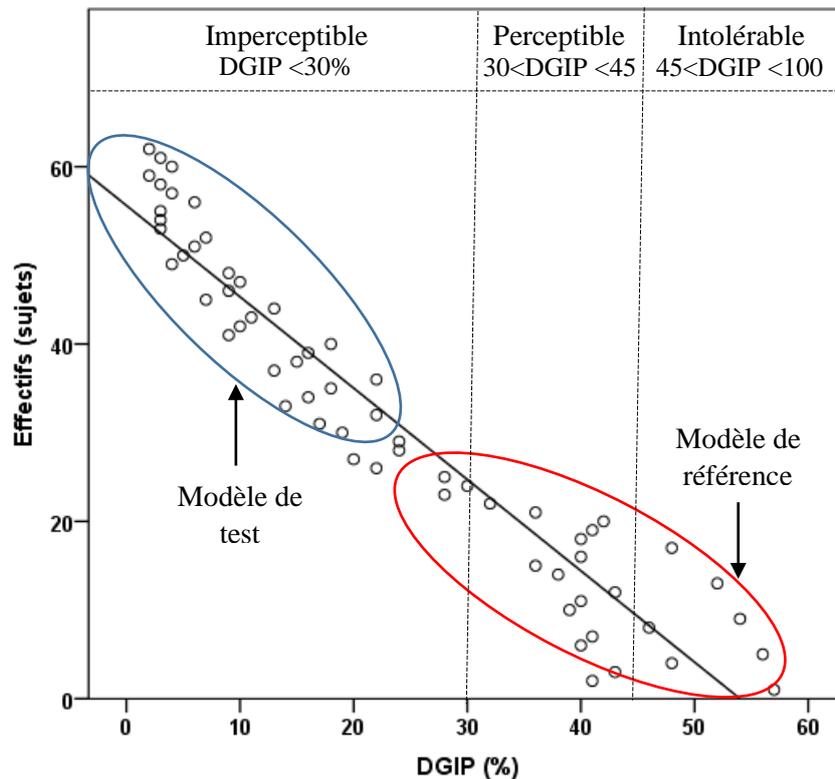


Figure 9.14 : Graphique de dispersion de points pour les variables DGIP et effectif (Source : Auteur réalisé sous SPSS 24.0)

Le graphique de dispersion de points indique clairement que le phénomène d'éblouissement à l'intérieur du modèle de test est considéré, selon les normes, comme imperceptible tandis qu'il est perçu comme perceptible et intolérable dans le modèle de référence. Toutes les valeurs de D.G.I.P enregistrées dans le modèle équipé d'un PAI sont inférieures à 30 % alors que dans le modèle avec fenêtres classiques elles sont comprises entre 30 % et 58 %. Ces résultats confirment la capacité de ce système anidolique à réduire considérablement le problème d'éblouissement qui est considéré comme l'une des sources principales de l'inconfort visuel dans les bureaux.

9.3. Analyse des variables quantitatives et qualitatives

L'analyse statistique des données de caractéristiques différentes (quantitative et qualitative) nécessite le recours au test 'Anova' qui permet d'étudier toutes les relations intergroupes et intragroupe existantes entre les différentes variables afin de déterminer les variables qualitatives qui présentent des corrélations significatives avec celles de type quantitatif. Le test révèle que,

dans chaque position, les variables qualitatives suivantes avaient enregistrés des valeurs- P inférieures ou égales à .005. Il s'agit de : satisfaction, appréciation_1 et appréciation_2 pour la première position, contraste et appréciation_2 pour la deuxième position, satisfaction et ambiance_2 pour la position_3 et satisfaction, uniformité, contraste, quantité, appréciation_1, appréciation_2 , appréciation_3, appréciation_4, ambiance_1 et ambiance_2 pour la quatrième position. Ces variables vont être représentées sous forme de graphique de dispersion de points à triples axes et analysées en fonction des observations des sujets et le D.G.I.P calculées.

9.3.1. Analyse des résultats au niveau de 'PI'

Au niveau de cette première position, l'analyse a été faite par rapport à trois variables qualitatives en fonction des sujets (les deux scénarios) et les valeurs de D.G.I.P (%) calculés. Les résultats sont présentés dans les graphiques de la figure 9.15.

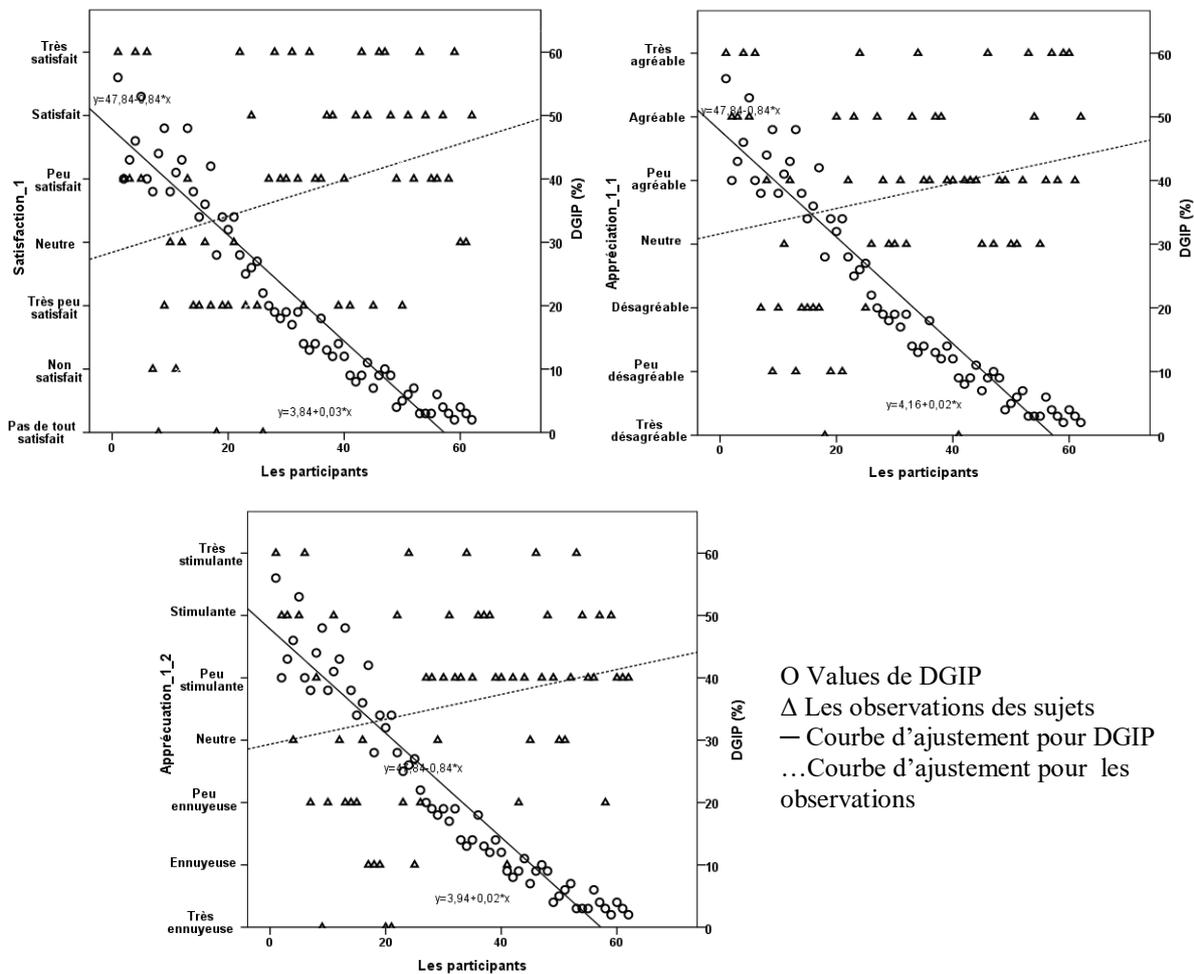


Figure 9.15 : Graphiques de dispersion de points pour les variables qualitatives et le D.G.I.P dans la 'PI' (Source : Auteur réalisés sous SPSS 24.0)

Pour le modèle de référence, les valeurs quantitatives calculées en termes de D.G.I.P (%) sont comprises entre 20 % et 58 % ce qui signifie que l'éblouissement est présent dans ce local est

considéré comme perceptible et intolérable. Les graphiques indiquent également que les évaluations qualitatives obtenues par les sujets montrent qu'ils n'étaient pas satisfaits de leur environnement lumineux intérieur, leurs appréciations étaient entre 'peu satisfait' - 'pas du tout satisfait', 'peu agréable' - 'très désagréable' et 'peu stimulante' - 'très ennuyeuse'. Par contre, les résultats obtenus par le modèle de test montrent que ce dernier se caractérise par des valeurs faibles de D.G.I.P situées entre 03 % et 20 % ce qui indique que l'éblouissement n'est pas perceptible dans cet espace. De plus, les observations données par les sujets décrivent le local comme 'satisfait' - 'très satisfait', 'peu satisfait' - 'très satisfait', 'peu agréable' - 'très agréable' et 'peu stimulant' - 'très stimulant'.

9.3.2. Analyse des résultats au niveau de 'P2'

Pour cette position, les variables qualitatives utilisées étaient le contraste et l'appréciation_2. Les résultats présentés dans la figure 145 montrent que les valeurs de D.G.I.P calculées dans le modèle de référence sont plus élevées que celles obtenues dans le modèle de test. Elles se trouvent entre 18 % et 58 % et la majorité des valeurs se trouvent entre 35 % et 58 % ce qui marque la présence de l'éblouissement qui est fortement perceptible et/ou intolérable tandis que, dans le modèle équipé d'un plafond anidolique intégré, le D.G.I.P calculé est faible et considéré comme imperceptible pour toutes les mesures, il est compris entre 03 % comme valeurs minimale et 18 % comme valeur maximale. Les résultats en termes des observations qualitatives montrent que les évaluations données pour décrire le modèle de référence tournent autour de 'neutre' - 'très peu défini' et 'ennuyeuse' - 'peu ennuyeuse' alors que pour le modèle avec PAI, elles sont de 'peu défini', 'défini' et 'très défini' et 'peu stimulante' - 'très stimulante'.

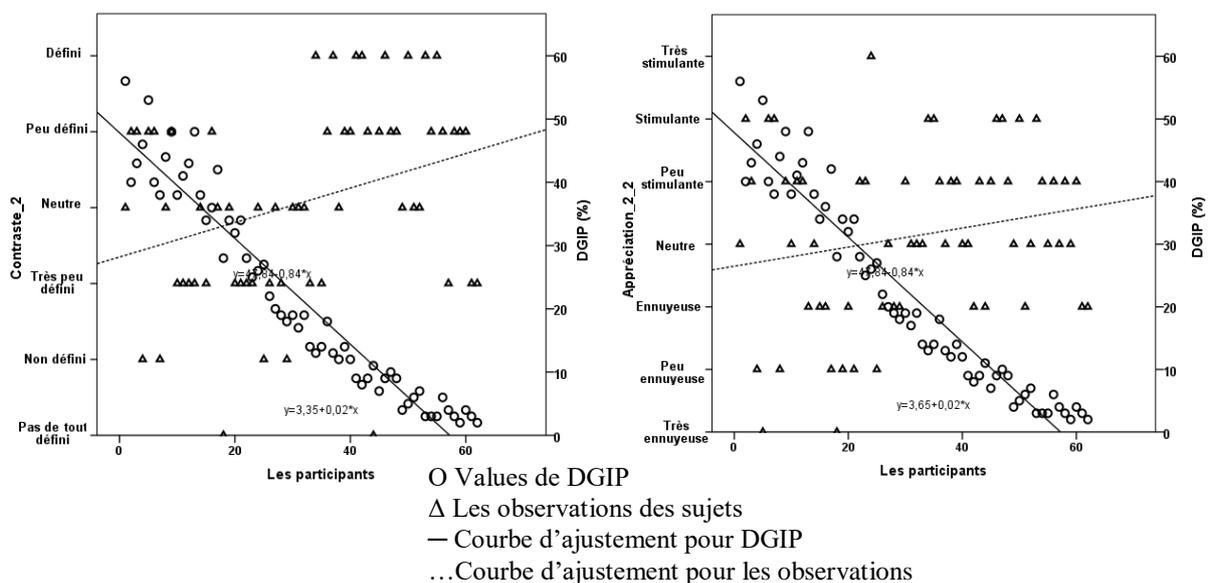


Figure 9.16 : Graphiques de dispersion de points pour les variables qualitatives et le D.G.I.P dans la 'P2' (Source : Auteur réalisés sous SPSS 24.0)

9.3.3. Analyse des résultats au niveau de 'P3'

Pour la troisième position, l'analyse a été faite pour la variable qualitative de 'satisfaction' et celle de 'ambiance_2' seulement et les résultats révèlent que la majorité des sujets n'étaient pas satisfaits de l'environnement lumineux dans les deux modèle d'investigation bien que la différence entre les valeurs de D.G.I.P entre ces deux derniers est remarquable. Pour le modèle de référence, le D.G.I.P calculé est compris entre 18 % et 57 % ce qui rend les réponses des participants négatives ('non satisfait'- 'très peu satisfait' et 'désagréable'- 'neutre' -'peu plaisante'). Pour le modèle de test, la plupart des observations données étaient de 'très peu satisfait'- 'peu satisfait' 'peu plaisante' et 'peu désagréable'- 'neutre' -'peu plaisante' bien qu'on a enregistré de faibles valeurs de D.G.I.P situées entre 2.5 % et 18 %. Un nombre restreint de sujets voyaient que l'éclairage de l'espace est satisfaisant et plaisant.

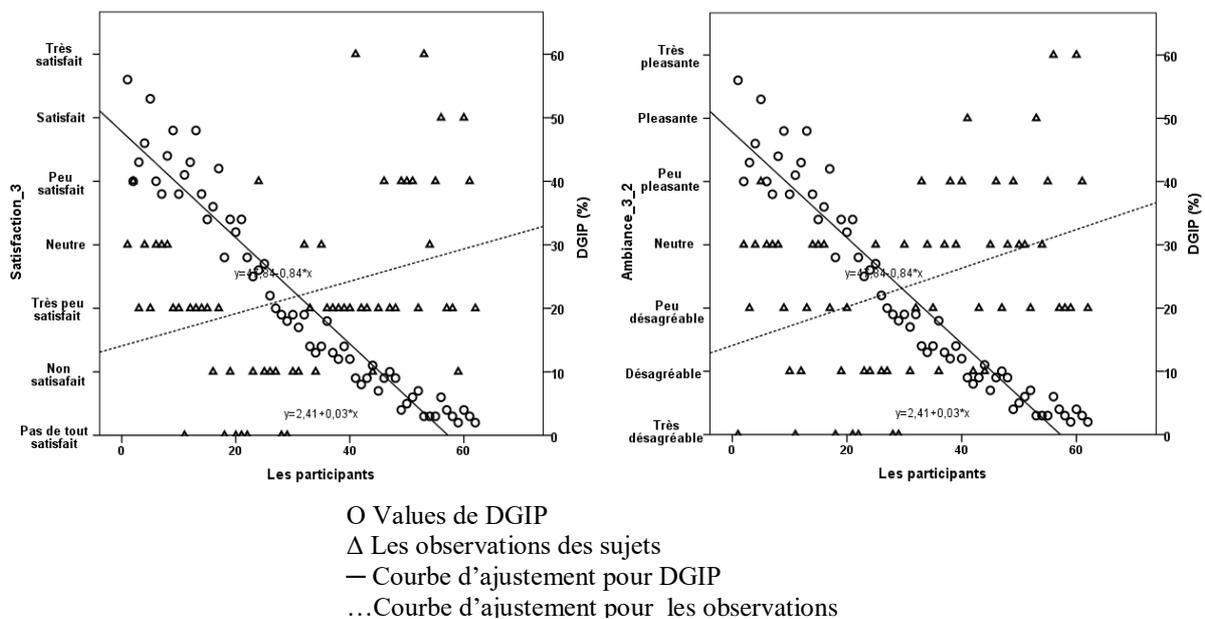


Figure 9.17 : Graphiques de dispersion de points pour les variables qualitatives et le D.G.I.P dans la 'P3' (Source : Auteur réalisés sous SPSS 24.0)

9.3.4. Analyse des résultats au niveau de 'P4'

Pour cette position, dix variables qualitatives avaient montré des corrélations significatives avec la variable quantitative. Il s'agit de : satisfaction_4, uniformité_4, quantité_4, contraste_4, appréciation_4_1, appréciation_4_3, appréciation_4_3, appréciation_4_4, ambiance_4_1 et ambiance_4_2. Une première lecture des graphes montre clairement qu'un nombre important des participants avaient donné des appréciations positives lorsque le D.G.I.P présente des valeurs faibles inférieures à 20 %. Les résultats concernant la variable de satisfaction, d'uniformité, de quantité et de contraste montrent clairement que les sujets avaient apprécié

positivement l'éclairage dans le modèle équipé d'un PAI par rapport à celui dans le modèle de test lorsque les valeurs de D.G.I.P sont comprises entre 2 % et 18 %. Les échelles choisies varient de (très satisfait, satisfait et peu satisfait), de (très uniforme, uniforme et peu uniforme), de (très suffisante, suffisante et peu suffisante) et de (très défini, défini et peu défini). Tandis que les observations négatives correspondent à des valeurs de D.G.I.P situées entre 28 % et 57 % qui ont été choisies par les participants du modèle de référence.

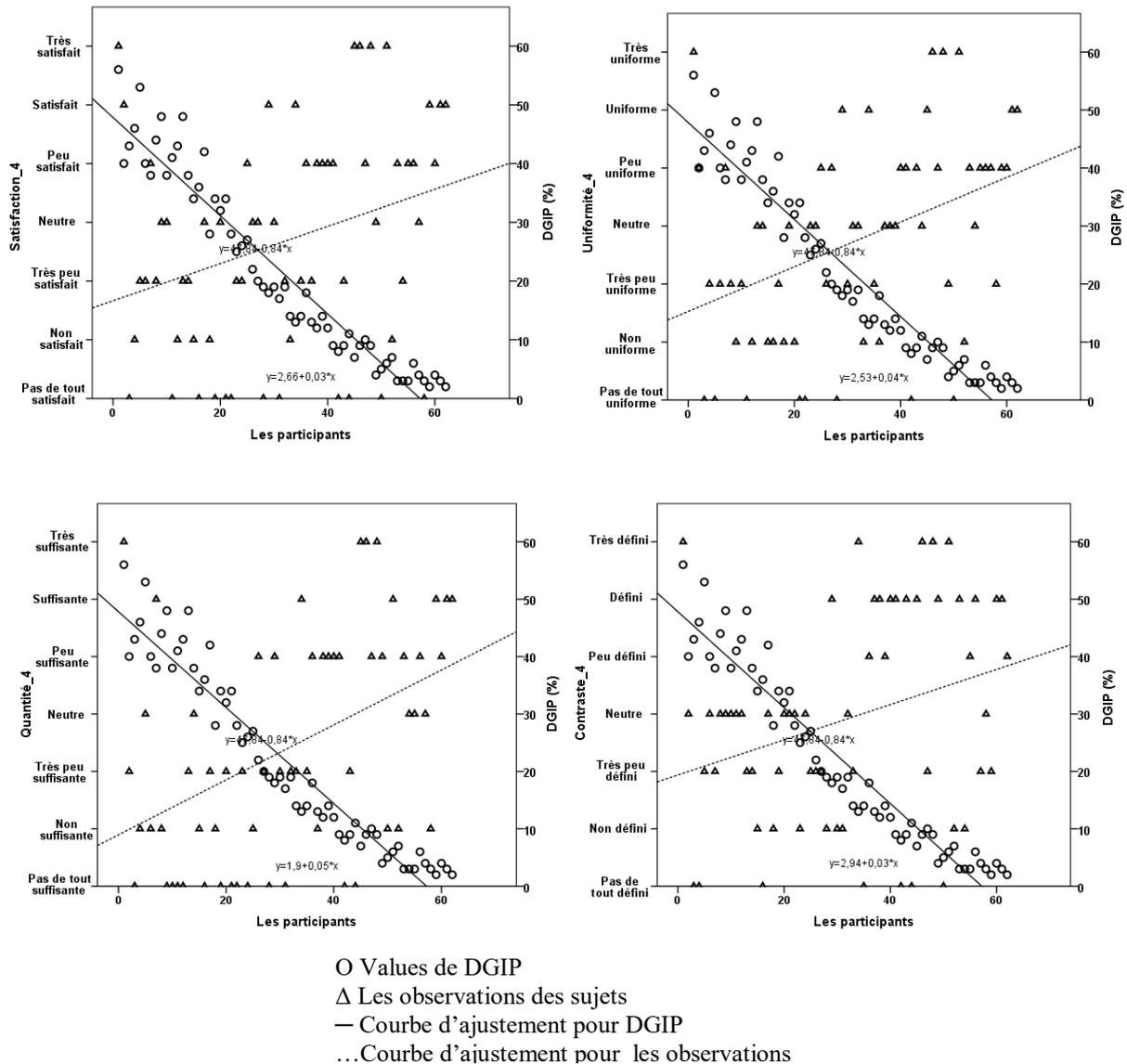


Figure 9.18 : Graphiques de dispersion de points pour les variables qualitatives (satisfaction, uniformité, quantité et contraste) et le D.G.I.P dans la 'P4' (Source : Auteur réalisés sous SPSS 24.0)

Pour les quatre questions qui concernent l'appréciation de l'éclairage dans le modèle d'étude, il est clair que les échelles positives d'évaluations sont utilisées seulement par les sujets qui évaluent la lumière dans le modèle de test et qui correspondent à de faibles valeurs d'indice d'éblouissement qui n'atteignent pas 20 % tandis que dans le modèle de référence, ces valeurs

sont comprises entre 32 % et 58 %. Un nombre important des participants appréciait le modèle de test comme stimulant, ordonné et actif alors que d'autres l'ont décrit comme peu agréable.

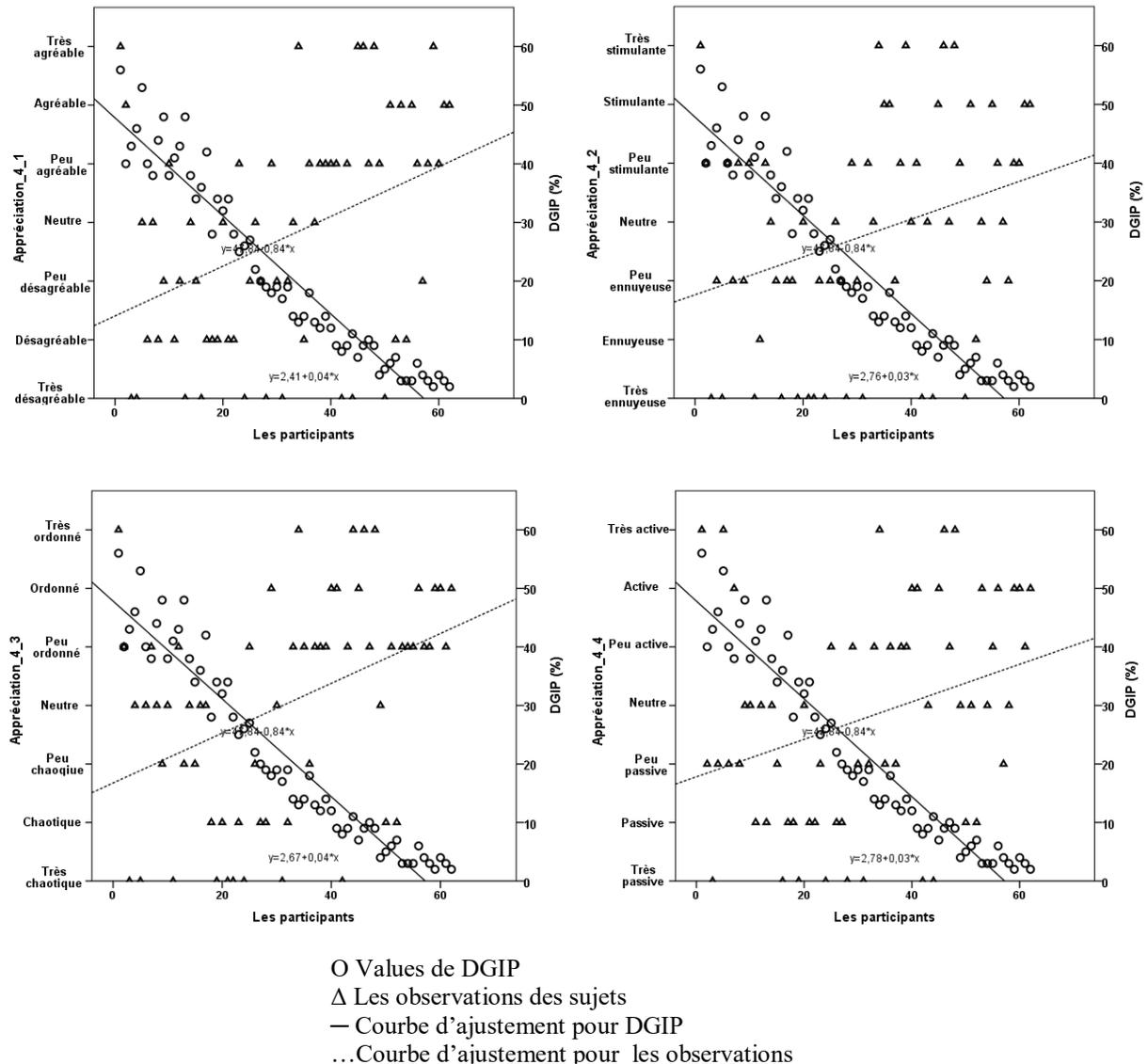


Figure 9.19 : Graphiques de dispersion de points pour les variables qualitatives (appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3 et appréciation_4) et le D.G.I.P dans la 'P4' (Source : Auteur réalisés sous SPSS 24.0)

Pour la variable ambiance_1 et ambiance_2, les graphiques indiquent également que les participants ont été satisfaits de l'éclairage présent dans le modèle du test. La majorité des réponses positives données varient de 'peu gai' et 'agréable' et qui correspondent à des faibles pourcentages d'indice d'éblouissement qui ne dépassent 18 % alors que l'ambiance générale présente dans le modèle de référence est décrite comme 'sombre' et 'peu désagréable' par la plupart des sujets et qui correspond à des valeurs élevées de D.G.I.P qui se situent entre 32 % et 56 %.

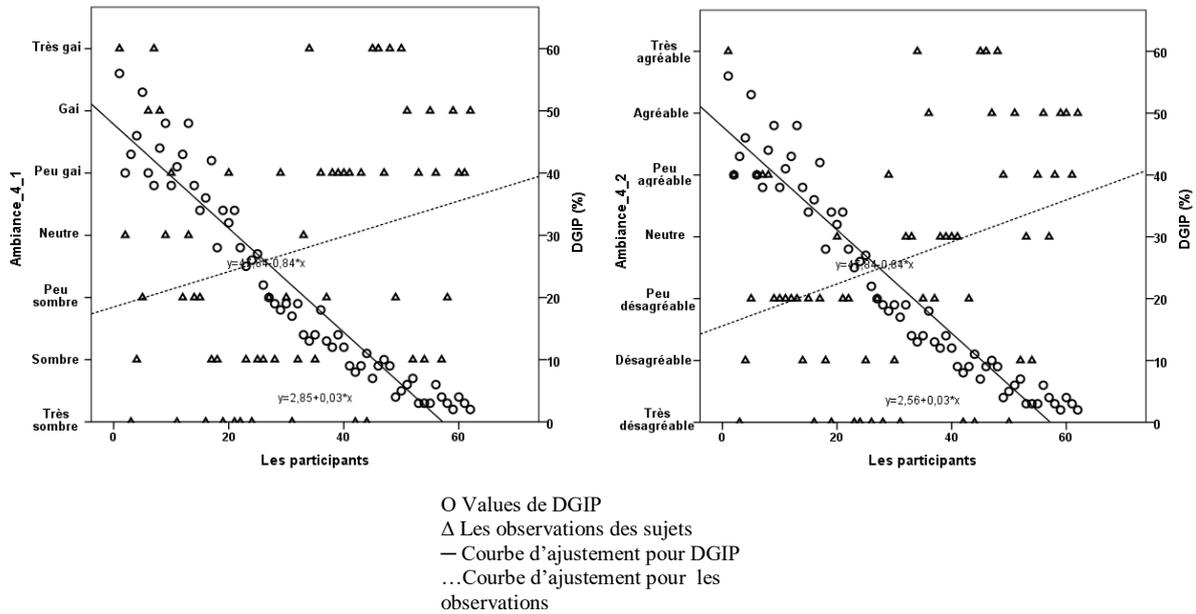


Figure 9.20 : Graphiques de dispersion de points pour les variables qualitatives (ambiance_1, ambiance_2) et le D.G.I.P dans la 'P4' (Source : Auteur réalisés sous SPSS 24.0)

9.3.5. Analyse des variables quantitatives et qualitatives : Synthèse

Ces résultats montrent clairement qu'au niveau des quatre positions, les participants préféraient l'éclairage que fournit le système de plafond anidolique intégré dans l'espace par rapport à celui présent dans le modèle de référence. De plus, plus la valeur de D.G.I.P est faible (inférieure à 20 %), plus les gens sont satisfaits de leurs environnement lumineux intérieur et recourent à des échelles d'évaluation de l'ordre de 6 et 7 pour décrire l'éclairage de l'espace. Ces résultats confirment que les données quantitatives calculées dans les deux modèles correspondent aux observations qualitatives réelles données par les participants ainsi que la fiabilité des réponses des sujets et du questionnaire construit.

Conclusion

Le principal objectif de ce chapitre est d'analyser les évaluations émotionnelles subjectives des participants par rapport à l'environnement lumineux à l'intérieur d'un modèle physique dans deux scénarios. Pour faciliter l'étude de ces dernières, chaque facteur composant le questionnaire a été analysé en utilisant la technique statistique la plus appropriée. Le graphique de Box-plot a été utilisé pour analyser le facteur d'évaluation qui regroupe les variables de satisfaction, d'uniformité, de quantité et de contraste. Les résultats de cette analyse ont révélé que les gens sont satisfaits de leur environnement lumineux lorsque le modèle est équipé d'un plafond anidolique intégré ; les réponses positives des observateurs ont confirmé que la distribution de la lumière est plus uniforme et suffisante en quantité avec un contraste bien défini. De plus, nous avons constaté que le degré de satisfaction varie selon les positions par lesquelles les participants ont donné leurs évaluations :

Par rapport à la position '1' ; les statistiques ont démontré que dans le deuxième scénario où le PAI est installé, 77.41 % des sujets sont satisfaits et observaient l'uniformité dans la distribution lumineuse, 64.51 % ont constaté que l'éclairage est suffisant et 74.19 % ont bien défini le contraste alors que les résultats tirés de l'analyse statistique du modèle de référence ont montré que le pourcentage des réponses positives est de l'ordre de 45.16 % pour les questions de satisfaction et d'uniformité et 35.48 % des sujets ont constaté que la quantité de lumière est suffisante et le contraste est défini.

Par rapport à la position '2', les statistiques nous ont conduit à déduire que le système de PAI a contribué de manière significative à l'éclairage de l'espace, 58.06 % des sujets sont satisfaits de l'éclairage et de l'uniformité de la distribution lumineuse, 54.83 % sont satisfaits de la quantité de lumière présente et 64.51 % ont pu définir le contraste. Par contre, les participants n'étaient pas satisfaits de l'éclairage du modèle de référence et le pourcentage des évaluations positives donné pour les quatre variables a diminué qui est compris entre 19.35 % et 32.25 %.

Par rapport à la position '3', l'analyse descriptive a montré que pour le 'Scé_2', 45.16 % des sujets sont satisfaits de l'éclairage intérieur de manière générale, 51.61 % observent l'uniformité et ont pu définir le contraste et 35.48 % ont jugé que la quantité de lumière est suffisante. Pour le 'Scé_1', le pourcentage des sujets qui ont recouru aux réponses positives est très faible de l'ordre de 6.45 % pour évaluer la satisfaction, l'uniformité et la quantité et 12.90 % des participants ont pu définir le contraste dans le local.

Par rapport à la position '4', on peut dire que les participants ont confirmé la performance du PAI, les appréciations subjectives positives augmentent à 58.06 % pour les variables de satisfaction, d'uniformité et de quantité et 48.38 % pour celle de contraste alors qu'elles restent faibles dans le modèle de référence pour l'ensemble des variables analysées qui se situe entre 6.45 % et 16.12 %.

Les graphiques sous forme d'histogrammes sont la deuxième technique statistique qui a été utilisé pour évaluer les appréciations subjectives des participants pour le facteur de satisfaction qui regroupe les variables relatives à l'éclairage ambiant et à l'ambiance générale de l'espace. Il s'agit de : appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3, appréciation_4, ambiance_1 et ambiance_2. L'interprétation des résultats de l'analyse descriptive de ces dernières nous a permis de déduire que les participants préfèrent l'éclairage et l'ambiance lumineuse créés par le plafond anidolique intégré. Les sujets ont recouru aux trois échelles positives des adjectifs suivants : 'agréable', 'stimulante', 'ordonnée', 'claire' et 'passive' afin d'exprimer leur satisfaction et leurs sensations.

La fréquence moyenne de ces observations positives confirme ces résultats, on trouve qu'une moyenne de 18 personnes choisissent les adjectifs de 'agréable' et 'ordonnée', 19 préfèrent celle de 'stimulante', 14 utilisent l'adjectif de 'agréable' (ambiance_2) et 15 sujets en moyenne choisissent celle de 'claire'. Par contre, dans le premier scénario, les sujets ont recouru aux adjectifs négatifs pour décrire l'ambiance générale du modèle et les statistiques ont confirmé que la fréquence moyenne des réponses négatives sont très importante de l'ordre de 18 pour désagréable (appréciation_1), ennuyeuse, chaotique et passive, 17 pour celle de sombre et 19 pour les échelles de désagréable (ambiance_2).

Les résultats de l'analyse statistique des évaluations des participants par rapport au facteur de 'spaciosité' et de 'sensibilité à l'éblouissement', par les diagrammes en barres, ont démontré que le modèle de test a été considéré comme plus ouvert, plus spacieux et plus lumineux que celui de référence. Une étude plus approfondie a montré que pour les variables de description_1 et description_2 qui étudient la spaciosité de l'espace, 18 personnes interrogées sur 31 confirment que le modèle de test apparait plus spacieux et plus de 20 sujets ont considéré l'espace équipé de PAI comme ouvert et ont recouru à des évaluations positives. Pour le facteur de 'sensibilité à l'éblouissement', les résultats ont confirmé que le PAI a contribué de manière efficace à améliorer la luminosité de l'espace et le degré de luminosité est très rapproché dans les différents champs visuels étudiés (position 1, 2 et 3).

Les statistiques montrent également qu'une fréquence moyenne de 20 participants était enregistrée dans le deuxième scénario où les sujets avaient eu recours aux adjectifs positifs pour décrire le degré de luminosité à l'intérieur du modèle de test alors que les participants du premier scénario ont considéré l'espace de référence comme sombre dont on a constaté une fréquence importante aux échelles négatives surtout en profondeur ou la fréquence atteint 25 sujets dans la troisième position.

Le graphique de dispersion de points à double axes, qui a été utilisé pour évaluer et analyser les variables quantitatives de type de D.G.I.P (%) et celle de l'effectif (l'ensemble des participants) nous a permis de dire que le système de plafond anidolique intégré a prouvé sa performance à réduire le phénomène d'éblouissement à l'intérieur de l'espace. Les résultats ont montré que les valeurs de D.G.I.P enregistrées dans le modèle de test sont inférieures à 30 % ce qui est considéré, selon les normes, comme imperceptible tandis qu'il est perçu comme perceptible et intolérable dans le modèle de référence où l'indice d'éblouissement calculé est compris entre 30 % et 58 %. Pour une évaluation fiable des variables qualitatives et quantitatives nous nous sommes focalisés seulement sur les variables qualitatives qui sont corrélées significativement avec celles de type quantitatif.

Le résultat du test Anova a montré, que pour la première position, il existe trois variables qualitatives (satisfaction, appréciation_1 et appréciation_2), deux pour la deuxième position (contraste et appréciation), deux pour la troisième position (satisfaction et ambiance_2) et dix variables qualitatives pour la quatrième position (satisfaction, uniformité, contraste, quantité, appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3, appréciation_4, ambiance_1 et ambiance_2). Selon les résultats de ce test, ces variables ont été analysées en fonction des observations des sujets ainsi que des valeurs de D.G.I.P en utilisant le graphique de dispersion de points à triples axes. L'interprétation de ces graphiques au niveau des quatre positions a montré que les gens sont satisfaits de leur environnement lumineux lorsque le D.G.I.P présente des valeurs inférieures à 20 %. Pour le modèle de test, toutes les valeurs de D.G.I.P enregistrées sont comprises entre 02 % et 20 % (éblouissement imperceptible) et les participants ont recouru à des appréciations positives (échelle 6 et 7) pour évaluer l'éclairage du modèle alors que pour le modèle de référence, les valeurs d'indice d'éblouissement calculées se situent entre 18 % et 58 % (éblouissement perceptible et intolérable) et les sujets ont choisi les échelles négatives de 1, 2 et 3 pour donner leurs appréciations vis-à-vis de l'éclairage.

Sur la base de ces résultats, on peut déduire que durant toute l'enquête (les deux scénarios), les données quantitatives calculées ont confirmé les appréciations qualitatives des sujets et ont prouvé la performance du système de plafond anidolique intégré et sa capacité à créer une atmosphère lumineuse satisfaisante dans un climat chaud et fortement lumineux ce qui confirme la fiabilité de notre étude.

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse avait comme objectif de construire un environnement lumineux satisfaisant pour les usagers d'un bureau à travers l'intégration de l'un des systèmes de réorientation de la lumière du jour, qui est le système du Plafond Anidolique Intégré (PAI). Cette étude nous a permis de générer les principales conclusions qui touchent à la fois la partie théorique de la thèse, qui est composée de quatre chapitres, ainsi que le volet partie pratique, qui est constituée de cinq chapitres.

On en conclut de la partie théorique, qui avait comme but de recueillir tout le bagage théorique nécessaire pour notre investigation, que sous le climat spécifique de la ville de Biskra, les systèmes de transport de la lumière naturelle sont les plus performants car ils utilisent à la fois la composante directe et diffuse et permettent d'éclairer naturellement des espaces ayant une grande profondeur sans qu'ils conduisent à l'inconfort visuel et à la surchauffe en été. Notre recherche sur ces systèmes a démontré que le plafond anidolique intégré est plus efficace que les conduits lumineux et les tubes solaires. Ces systèmes anidoliques sont classés parmi les systèmes d'éclairage intégré en façade les plus efficaces. Ils conduisent réellement à des économies d'énergie en électricité qui peuvent atteindre jusqu'à 30 % d'économie. Ils sont conçus selon le principe de l'optique non imageante, comme ils peuvent être classés en trois types selon la largeur et la profondeur du tube lumineux. On trouve les plafonds anidoliques intégrés, les systèmes anidoliques intégrés et les stores solaires anidoliques. Le rendement du plafond anidolique intégré dépend du revêtement de ces composants et plus précisément de l'élément anidolique qui est revêtu dans la plupart des cas de tôle d'aluminium anodisée à haut pouvoir de réflexion ($\rho_r = 0.9$), afin d'atteindre un rendement lumineux maximal. L'efficacité du transfert lumineux du plafond anidolique dépend également de l'angle d'incidence du rayon lumineux. Dans le pré dimensionnement du système, il est indispensable de prendre en considération le secteur angulaire d'entrée optimal ($D_{\text{entrée}} :] 0, -82^\circ [$) qui dépend de l'angle avec lequel les rayons du soleil frappent perpendiculairement l'ouverture d'entrée et le secteur angulaire de sortie qui doit se conformer aux contraintes d'ergonomie visuelle. Ainsi, il est recommandé que la largeur en saillie doit être comprise entre 0,5 m et 1,3 m et pour la mise en œuvre de ce type de système, la hauteur sous plafond doit être supérieure à 2.70 m.

L'évaluation de la qualité de l'environnement lumineux dans les bureaux peut être faite en étudiant l'aspect visuel et l'aspect non visuel de la lumière. La conception d'un environnement lumineux satisfaisant et plaisant pour l'usage des bureaux nécessite d'appliquer des normes et des recommandations pour les niveaux d'éclairement qui doivent être compris entre 300 et 500

lux sur un plan de travail situé au moins à 0.8 m au sol. De plus, il faut assurer une certaine uniformité de luminance, d'une part, entre le champ visuel en position de travail et au repos et d'autre part, entre les différentes surfaces voisines. Les niveaux d'éclairage conseillés doivent être nuancés en fonction du contraste de luminance entre l'élément observé et son arrière-fond. Les recommandations typiques supposent un rapport de 1:3 entre la tâche visuelle et son environnement immédiat, un rapport de 1:10 entre la tâche visuelle et d'autres surfaces plus proches dans le champ visuel, et un rapport de 1:20 pour les surfaces les plus éloignées du champ visuel. Un rapport 1:40 entre la tâche et toutes les surfaces dans le champ de vision est généralement considéré comme la valeur maximale admissible.

Pour un meilleur aboutissement des résultats et atteindre les objectifs, on a eu recours à deux méthodes : en premier lieu, on a utilisé une expérimentation simulée à l'aide des logiciels informatiques et des modèles physiques. La simulation numérique était proposée afin de modéliser le système anidolique pour qu'il s'adapte le mieux aux caractéristiques climatiques et lumineuses de la ville de Biskra alors que la simulation par le modèle physique avait comme objectif d'obtenir des données de type quantitatif en termes d'éclairage et d'indice d'éblouissement 'DGIP' afin d'évaluer quantitativement et qualitativement l'environnement lumineux intérieur. Par rapport à la deuxième méthode, on a opté pour une enquête par questionnaire qui a été effectuée dans les modèles physiques en faisant appel à des sujets afin de collecter des données de type qualitatif obtenues à partir des appréciations subjectives de l'environnement lumineux intérieur dans deux scénarios différents (sans et avec PAI). L'espace modélisé est un bureau de 6 m x 12 m x 3.5 m avec les caractéristiques photométriques suivantes : R_{murs} : 51 %, R_{sol} : 41 %, $R_{plafond}$: 90 % et R_{PAI} : 95 %. La simulation numérique a été faite par 'Ecotect Software et les mesures ont été prises dans un plan de travail situé à 0.8 m du sol sur une grille de 50 cm x 50 cm alors que la simulation expérimentale a été faite sur deux modèles physiques d'échelles différentes (1:12 et 1:4) où chaque modèle porte les mêmes caractéristiques géométriques et photométriques du modèle de simulation.

La première lecture des résultats de la simulation numérique effectuée sur les différents modèles du plafond anidolique intégré, du système anidolique et du modèle de référence a montré que le système de PAI avait une bonne performance pour les locaux (les bureaux) de grande profondeur. Les calculs résultants de la simulation des modèles du plafond anidolique intégré 'PAI' ont démontré une tendance très similaire pour la distribution de la lumière dans les douze modèles bien qu'il y avait une légère différence par rapport au niveau de l'éclairage. La zone non passive a disparu et la zone de confort est identique pour l'ensemble des configurations,

elle couvre 83 % de la surface totale du local. On remarque aussi que les valeurs d'éclairage sont très rapprochées et ne dépendent pas de la largeur du conduit lumineux. De plus, on a observé que PAI type '3' donne de bons résultats, l'écart entre les valeurs d'éclairage maximales et minimales est le plus faible, de l'ordre de 244 lux et l'éclairage moyen reçu au niveau des deux axes est similaire, ce qui assure l'homogénéité de la répartition de la lumière dans tout le local. Donc, du point de vue quantitatif, on conclut que cette étude confirme que le système de plafond anidolique intégré, qui présente les caractéristiques suivantes : $a = 0.64$ m, $a^{\circ} = 0.32$ m, $l_m = 0.36$ m, $l^{\circ}_m = 0.65$ m, $L = 0.41$ m, $\theta = 0.49^{\circ}$, $f_{int} = 0.56$ m et $F_{ext} = 0.46$ m est le plus optimal. Les résultats montrent qu'il améliore de manière significative le niveau d'éclairage surtout au fond du local où les valeurs sont 8 fois plus élevées à 9 m de la fenêtre.

Notre protocole expérimental est structuré en trois étapes complémentaires. En premier lieu, on a réalisé les modèles expérimentaux en modélisant les différents éléments qui les composent (parois, sol, plafond, ouvertures, PAI, revêtement intérieur des parois, aménagement utilisé...etc.) et en suivant les normes internationales de la construction des maquettes. Les modèles avaient des échelles différentes, mais notre étude était focalisée sur celui de 1:4 qui était réalisé totalement en bois, le faux plafond et les éléments anidoliques étaient revêtus par un papier aluminium de haut réflectance. En deuxième lieu, des mesures de type quantitatif étaient prises manuellement par un luxmètre, dans les modèles afin d'obtenir des valeurs d'éclairage intérieur. De plus, lors de prise de ces derniers, des photos, sous forme d'images sphériques, étaient également capturées dans différents champs visuels à l'intérieur du modèle de référence et de celui du test. Ces images étaient introduites et traitées par la suite à l'aide du logiciel 'Aftab Alpha' afin d'obtenir des valeurs de type de 'D.G.I.P' qui permettent d'analyser l'indice d'éblouissement probablement présent dans les modèles d'étude. Enfin, durant la même période de prise de mesures, des données de type qualitatif étaient aussi recueillies grâce au recours à l'enquête. Cette dernière était réalisée en invitant 62 participants à évaluer l'éclairage et l'atmosphère lumineuse à l'intérieur des modèles physiques dans deux scénarios et dans des positions différentes, en répondant à un formulaire de questionnaire qui a été développé à partir de quatre dimensions: 1. l'évaluation visuelle; 2. l'appréciation; 3. la précision; 4. la sensibilité à l'éblouissement. Après avoir consulté les réponses des participants du prétest et pris toutes les recommandations en considération, on a formulé le questionnaire définitif qui se compose de quinze questions et structuré en quatre parties qui s'enchaînent de manière logique afin d'aboutir aux objectifs. La première contient des informations générales sur l'expérience qui sera remplie par l'enquêteur, la deuxième comporte les renseignements personnels des

enquêtés, la troisième est une partie informationnelle, alors que la quatrième, qui est la plus importante, comporte les quinze questions auxquelles les sujets doivent répondre. Les parties 2, 3 et 4 seront remplies par les participants. Ce formulaire sera distribué en utilisant le mode auto administration. Les appréciations subjectives sont introduites dans un logiciel de traitement statistique des données 'IBM SPSS 24.0' qui permet d'effectuer des analyses multiples sur l'ensemble des variables quantitatives et qualitatives comme le test ANOVA, le test de Spearman, ACM ainsi que les différents tests de fiabilité et de normalité. L'interprétation des résultats obtenus par l'analyse exploratoire sera faite à travers différentes techniques statistiques dont le choix dépend des objectifs de l'enquête. Dans notre cas, on a utilisé le diagramme de Box-plot (boîte à moustaches), les histogrammes, le diagramme en barres et le diagramme en dispersion de points.

L'étude quantitative de la performance du système de Plafond Anidolique a débuté par une validation d'échelle et d'outils utilisés dans l'expérimentation suivie par une étude quantitative et par une évaluation de l'éblouissement. Les résultats de la validation de l'échelle des modèles réduits montrent que la quantité de lumière reçue à l'intérieur de la maquette n'est pas liée à la taille de cette dernière, un taux de variation moyen (TV_{moyen}) de $\pm 1.8\%$ a été enregistré entre un modèle de 1:4 et celui de 1:12 ce qui prouve qu'en plus, on a constaté qu'il y a une concordance entre les résultats numériques et ceux issus des mesures sur site. L'écart maximum d'éclairement obtenu par les deux outils est de l'ordre de 52 lux pour l'axe AA et 59 lux pour l'axe BB et le TV_{moyen} était de l'ordre de $\pm 4.5\%$ pour l'axe latéral et $\pm 4.1\%$ pour l'axe central. La comparaison des valeurs d'éclairement obtenues dans le modèle de test indique que le système de PAI offre un éclairage cinq fois plus fort par rapport à celui de référence, compris entre 300 lux et 500 lux, avec une lumière plus uniforme et bien répartie dans tout le local. L'analyse du rendement de PAI durant la période située entre 9h et 16h, montre que le niveau d'éclairement intérieur dépend fortement de la quantité d'éclairement extérieur disponible qui change d'une heure à l'autre. De plus, les résultats concernant le rendement du système au cours de l'année montrent que ce dernier offre un bon rendement pendant les saisons avec un éclairage moyen acceptable compris entre 200 lux et 500 lux. L'étude de l'effet de l'orientation sur la performance du PAI a montré que ce système joue le rôle d'un régulateur qui permet d'avoir une homogénéité de la distribution lumineuse dans tout le local avec un éclairage intérieur situé entre 300 lux et 500 lux quelle que soit l'orientation. Les résultats confirment aussi que, sous un climat chaud, l'orientation nord est la meilleure en termes de quantité et de qualité de lumière reçue.

L'étude de l'autonomie de l'éclairage annuelle montre que l'autonomie qu'offre le modèle de test atteint 60 % et pour un facteur de lumière de jour annuel moyen de 1.83 %, qui correspond à un éclairage moyen de 500 lux, le système d'éclairage électrique On/Off Switching reste éteint d'environ 50 % durant l'année et plus de 70 % d'autonomie de l'éclairage peut être gagnée si le mode électrique utilisé est le système Dimming Switch.

L'évaluation du phénomène de l'éblouissement à l'intérieur d'un modèle a montré que le modèle de test réduit de manière significative le risque d'éblouissement à 34 % en moyenne quelle que soit la position de l'observateur, l'orientation de l'ouverture et durant les différentes heures de la journée. Il est considéré comme juste perceptible. A partir des images sphériques et des résultats obtenus, il est clair que, au niveau de toutes les orientations à l'exception de celle du nord, le pourcentage d'indice d'éblouissement (D. GI. P) ne dépend pas du nombre des surfaces éblouissantes considérées comme une source de gêne visuelle mais il est lié à l'intensité lumineuse de la source elle-même. Par contre, le nombre de sources éblouissantes dépend de la position de l'observateur.

Les données obtenues par l'enquête sont tout d'abord vérifiées par le coefficient Alpha de Cronbach et le test de normalité afin de confirmer la fiabilité de l'échelle utilisée ainsi que la variable quantitative. L'étude de la corrélation entre les variables qualitatives par l'analyse des correspondances multiple (A.C.M) montre que les variables se concentrent dans un groupe composé de d'ambiance_1 et ambiance_2, appréciation_1, appréciation_2, appréciation_3 et appréciation_4, contraste, description_2, quantité, luminosité, satisfaction et uniformité. De plus, les résultats du test de Spearman effectué sur l'ensemble des positions montrent clairement l'existence d'une corrélation significative et positive entre toutes les variables sélectionnées (toutes les valeurs-*p* obtenues sont inférieures à .005) et le degré de corrélation varie selon la position (P1 :76%, P2 :62%-76%, P3 : 68%-79% et P4 : 56%-78%).

Les résultats du test ANOVA qui a comme but d'étudier la corrélation entre les variables qualitatives, qui ont été sélectionnées par l'ACM et le test de Spearman et la variable quantitative en termes de D.GI.P (%) ont révélé qu'au niveau des trois positions 1, 2 et 3, une faible relation entre ces variable a été constatée alors que dans la quatrième position, 55 % des variables qualitatives sont corrélées significativement avec la variable numérique (D.GI.P) et toutes les valeurs- *p* enregistrées dans toutes les positions sont inférieures ou égales à .05 ce qui les rend représentatives.

Les résultats de l'enquête en termes d'évaluations subjectives montrent que les réponses positives des observateurs ont confirmé que la distribution de la lumière est plus uniforme et suffisante en quantité avec un contraste bien défini. Les données analysées par le graphique de Box-plot démontrent que le système de PAI a contribué de manière significative à l'éclairage de l'espace ; 59.67 % des sujets étaient satisfaits de l'éclairage et 61.28 % de l'uniformité de la distribution lumineuse, 53.22 % étaient satisfaits de la quantité de lumière présente et 59.67 % avaient pu définir le contraste. Les graphiques sous forme d'histogrammes montrent aussi que les participants préféraient l'éclairage et l'ambiance lumineuse créés par le PAI. Les sujets ont recouru aux trois échelles positives des adjectifs suivants : 'agréable', 'stimulante', 'ordonnée', 'claire' et 'passive' afin d'exprimer leur satisfaction et leurs sensations. La fréquence moyenne de ces observations positives confirme ces résultats ; on trouve qu'une moyenne de 18 personnes ont choisit les adjectifs 'agréable' et 'ordonnée', 19 préféraient celui de 'stimulante', 14 utilisaient l'adjectif de 'agréable' (ambiance_2) et 15 sujets en moyenne ont choisi celui de 'claire'. De plus, les résultats de l'analyse statistique des évaluations des participants par rapport au facteur de 'spaciosité' et de 'sensibilité à l'éblouissement', par les diagrammes en barres, ont démontré que plus de 60 % des participants considéraient l'espace équipé du PAI comme plus ouvert, plus spacieux et plus lumineux que celui de référence. L'interprétation des graphiques de dispersion des points à double axes a montré que les gens étaient satisfaits de leurs environnement lumineux lorsque le D.G.I.P présente des valeurs inférieures à 20 %. Pour le modèle du test, toutes les valeurs de D.G.I.P enregistrées étaient comprises entre 02 % et 20 % (éblouissement imperceptible) et les participants ont recouru à des appréciations positives (échelle 6 et 7).

Sur la base de ces résultats, on en conclut que le système de plafond anidolique intégré développé dans cette étude et qui présente les caractéristiques suivantes : $a=0.64$ m, $a^{\circ}=0.32$ m, $l_m=0.36$ m, $l^{\circ}_m= 0.65$ m, $L=0.41$ m, $\theta=0.49^{\circ}$, $f_{int}=0.56$ m et $F_{ext}=0.46$ m, a prouvé sa performance lumineuse et énergétique pour des conditions climatiques et lumineuses de la ville de Biskra. Son efficacité atteint douze mètres de profondeur tout en éliminant le risque d'éblouissement.

Limites, perspectives et axes futurs

L'objectif voulu par ce travail de recherche est de modéliser un système de plafond anidolique intégré sous des conditions climatiques spécifiques à la ville de Biskra pour créer un environnement lumineux confortable qui s'adapte à l'usage du bureau afin d'optimiser l'utilisation de la lumière naturelle dans un espace de grande profondeur ce qui conduit impérativement à réduire l'utilisation de l'éclairage électrique pendant la journée. Parmi les limites rencontrées dans notre investigation, il y a l'absence d'un modèle réel de système de plafond anidolique intégré dans notre ville ce qui nous a obligé à recourir à des études faites sous différents climats lumineux. De plus, vu les dimensions importantes de notre modèle expérimental, un prototype réel était difficile à construire ce qui nous a conduit à réaliser un modèle physique de taille réduite.

Notre recherche a été concentrée sur le choix du système plafond anidolique intégré en matière de configuration, de dimensions, d'orientation, et d'installation. Pour cela, des études de type quantitatif et qualitatif ont été proposées ce qui nous a permis de répondre à notre problématique et nos besoins en matière d'éclairage naturel. Des recherches supplémentaires seront d'une grande utilité et pourront compléter les résultats obtenus, il s'agit de l'étude de :

- 1) La performance énergétique et les gains thermiques : cette piste apparaît importante à étudier ; elle consiste à assembler l'étude du confort visuel avec le confort thermique, surtout que l'installation du système de plafond anidolique intégré a montré au cours de notre recherche qu'il a la capacité d'empêcher les rayons solaires directs de rentrer à l'intérieur du local ce qui peut réduire la température intérieure du local de quelques degrés et par conséquent, éviter ainsi la surchauffe durant la période d'été. De plus, une étude sur les ambiances thermiques peut être possible par une simulation expérimentale associée à une enquête.
- 2) L'aspect économique en termes de construction, de coûts et d'entretien. Les résultats de notre recherche ont montré la performance de ce système en matière d'éclairage naturel et de consommation électrique mais l'installation de ce dernier nécessite un coût de fabrication plus ou moins élevé ainsi que pour l'entretien et la maintenance. Pour cette raison, une étude sur les différents matériaux de construction et les méthodes d'entretien sera nécessaire pour optimiser les frais de fabrication et faire des économies pour les opérations de maintenance.
- 3) Les aspects structurels tels que l'implication des recommandations pour la sécurité en cas d'intempéries ou d'incendie, ce qui nécessite une étude supplémentaire.

Bibliographie

- Abdou, O.A. (1997). Effects of Luminous Environment on Worker Productivity in Building Spaces. *Journal of Architectural Engineering*, 3 (3), 124-132.
- Achard, G. (1984). Eclairagisme – Notions fondamentales et matériel d'éclairage, ENTPE, Vaulx-en-Velin, vol.1, 294, ISBN 2-86834-029-9, 1984.
- AFTAB Alpha 2.1.0. Software por Majid Miri e Elmia Ashtari. Outubro de 2015. Stockholm, Sweden. Disponível em: <[http:// http://aftabsoft.net/](http://http://aftabsoft.net/)>. Acesso em: 10 de agosto de 2016.
- Aizlewood, M. E. (1993). Innovative daylighting systems: An experimental evaluation. *Lighting Research and Technology*, 25 (4), 141-152.
- Akashi, Y., & Boyce, P. R. (2006). A field study of illuminance reduction. *Energy and Building*, 588-599.
- Alrubaiha, M.S., Zaina, M.F.M., Alghoulb, N.L.N. Ibrahima, S.M.A., & Elayebb, O. (2013). Research and development on aspects of daylighting fundamentals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 494–505.
- Anca, D., Galasieu, C., & Reinhart, F. (2008). Current daylighting design practice: a survey. *Building Research & Information*, 36 (2), 159-174.
- Aries, M.B.C., Begemann, S.H.A., Zonneveldt, L., & Tenner, A.D. (2005). Retinal illuminance from vertical daylight openings in offices. *Right Light 5. Nice, France*.
- Arsenault, H., Hebert, M., & Duboi, M. C. (2012). Effects of glazing colour type on perception of daylight quality arousal, and switch-on patterns of electric light in office rooms. *Building and environment*, 56, 223-231.
- Association Française de l'Eclairage : Recommandations relatives à l'éclairage intérieur des lieux de travail, AFE, 1993.
- 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.
- Autodesk Ecotect Analysis-©Autodesk, Inc.2011.
- Ayers, M. J., & Carter, D. J. (1995). Remote source electric lighting systems: A review. *Lighting Research and Technology*, 27, 1-15.
- Baccini, A. (2010). Statistique Descriptive Multidimensionnelle. *Publications de l'Institut de Mathématiques de Toulouse*.
- Baker, N., & Steemers, K. (2002). Daylight Design of Buildings. *James & James, London*.
- Baker, N., Fanchiotti, A., & Steemers, K. (1993). Daylighting in Architecture: a European reference book. *Commission of the European Communities, DG XII for Science, Research and Development, James and James, Brussels, 1993*.
- Baroncini, C., Boccia, O., Chella, F., & Zazzini, P. (2010). Experimental analysis on a 1:2 scale model of the double light pipe, an innovative technological device for daylight transmission. *Solar Energy* 84, 296–307.
- Berson, D.M., Dunn, F.A., & Takao, M. (2002). Photo transduction by retinal ganglion cell that set the circadian clock. *Science*, 295, 1070-1073.

- Bjorset, H.H., Frederiksen, E. (1979). A proposal for recommendations for the limitation of the contrast reduction in office lighting. *Proc. of the CIE 19th Session (Kyoto), 1979, pp.310-314.*
- Blok, K. (2005). Enhanced policies for the improvement of electricity efficiencies. *Energy Policy, 33(13), 1635–1641*
- Bodart, M., & Cauwerts, C. (2017). Assessing daylight luminance values and daylight glare probability in scale models. *Building and Environment, 113, 210-219.*
- Bodart, M., Deneyer, A., & Moenssens, N. (2008). Guide précis d'aide à la construction des modèles réduits pour utilisation et mesures sous ciel artificiel de la CSTC. *CSTC, PP.23, 2008.*
- Boubekri, M., & Boyer, L.L. (1992). Effect of window size and sunlight presence on glare.
- Boubekri, M. (2008). Daylighting, Architecture, and Health: Design Strategies. *Oxford: Architectural Press.*
- Boyce, P. R., & Eklund, N. H. (1995). Evaluating Lighting Quality. *Proc. Of the 3rd European Conf. on Energy-Efficient Lighting (Newcastle upon Tyne, UK, June 95), pp.189-196, 1995.*
- Boyce, P. R. (1996). Numerical Criteria – a help or a hindrance in lighting design: Visual performance criteria. *Proc. of the CIBSE National Lighting Conf. (Bath), pp.62-64, 1996.*
- Boyce, P., Eklund, N., Mangum, S., Saalfeld, C., & Tang, L. (1995). Minimum acceptable transmittance of glazing. *Lighting Research and Technology, 27(3), 145-152.*
- Boyce, P., Hunter, C., & Howlett, O. (2003). The benefits of daylight through windows. *New York: Lighting Research Center: Rensselaer Polytechnic Institute; 2003.*
- Boyce, P.R., Veitch, J.A., Newsham, G.R., Jones, C.C., Heerwagen, J., Myera, M., & Hunter, C.M. (2006). Lighting quality and office work: two field simulation experiments. *Lighting Research and Technology, 38, (3), 191-223.*
- Boyce, P. R. (2003). Human Factors in Lighting. *2nd ed. London and New York: Taylor & Francis.*
- Boyce, P. R. (1996). Illuminance selection based on visual performance-and other fairy stories.
- Boyce, P.R., Hunter, C., & Howlett, O. (2003). The benefits of daylight through windows. *Troy (NY): Lighting Research Center.*
- Boyce, P.R. (1981). Human Factors in Lighting. *London: Applied Science.*
- Brainard, G.C., Hanifin, J.P., (2006). Photons, clocks, and consciousness. *Journal of Biological Rhythms, 20 (4), 314-325.*
- Brainard, G.C., Hanifin, J.P., Greeson, J.M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E., & Rollag, M.D. (2001). Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *The Journal of Neuroscience, 21 (16), 6405-6412.*
- Building Research Establishment: Office lighting for good visual task conditions, Digest 256, Garston, 1981.
- Bülow-Hübe, H. (2001). Energy-Efficient Window System Effects on Energy Use and Daylight in Buildings. *Division of Energy and Building Design, Lund University, Sweden*
- Cajochen, C., Münch, M., Kobińska, S., Kräuchi, K., Steiner, R., Oelhafen, P., Orgül, S., & Wirz-Justice, A. (2005). High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 90 (3), 1311-1316.*

- Carter, D. J., & Al Marwae, M. (2009). User Attitudes Toward Tubular Daylight Guidance Systems. *Lighting Research and Technology*, 41, 71-88.
- Chartered Institution of Building Services Engineers, Areas for visual display terminals, ed.: CIBSE, London, 1989.
- Chauvel, P., Collins., Dogniaux., & Longmore. (1982). Glare from Windows: current views of the problem. *Lighting Research & Technology*, 14(1), 31-46.
- Chaves, J. (2008). Introduction to Nonimaging Optics. *CRC Press. ISBN 978-1-4200-5429-3*
- Choi, J. H., Beltranb, L.O., & Kimc, H.S. (2012). Impacts of indoor daylight environments on patient average length of stay (ALOS) in a healthcare facility. *Building and Environment*, 50, 65–75.
- Chung, T.M., & Ng, R.T.H. (2009). Variation of calibration factor over time for high dynamic range photography in a single daylit interior scene. *Proceedings of the 6th Lux Pacific: Light without Borders. Bangkok, Thailand: Pacific Rim Lighting Societies, 2009.*
- CIBSE 1997. CIBSE Code for interior lighting 1994: Additions and corrections 1997. ISBN 0 900953 64 0.
- CIE (2004). Ocular lighting effects on human physiology and behaviour. *CIE Publ. 158, Vienna*
- CIE (1987). CIE/IEC. International Lighting Vocabulary. *CIE 1987; 17: 4.*
- CIE (2002). The correlation of models for vision and visual performance. *CIE 2002; 145.*
- Clanton, N. (1996). Daylighting Increases Productivity While Cutting Costs. *Energy User News*, 21 (11), 34.
- Commission Internationale de l’Eclairage: Guide on Interior lighting. *CIE 29.2, 1986.*
- Commission Internationale de l’Eclairage: Vision and the visual display unit work station. *CIE 60, 1984.*
- Courret, G. (1999). Anidolic Daylighting Systems. *Department of Architecture, EPFL, Lausanne, Switzerland, PhD dissertation no. 2026.*
- Courret, G., Scartezzini, J.L., Francioli, D., & Meyer, J.J. (1998). Design and assessment of an anidolic light-duct. *Energy and Buildings*, 28, 79-99.
- Cowling, I., Coyne, S., & Bradley, G. (1990). Light in Brisbane Office Buildings -a Survey. *Brisbane: Centre for Medical and Health Physics, Queensland University of Technology.*
- Cuttle, C. (1983). People and windows in workplaces. *In Proceedings of the People and Physical Environment Research Conference, Wellington, New Zealand, 8–11 June 1983.*
- Daich, S., Saadi, M. Y., Zemmouri, N., Eugenio, M., Piga, B. E. A., & Daiche, A.M. (2016). Evaluation quantitative et qualitative du système anidolique sous un climat chaud et aride. *Proceedings of 3rd International Congress on Ambiances. Greece; 2016.p. 219-226.*
- Daich, S., Saadi, M.Y., Zemmouri, N., & Daiche, A.M. (2014). Modeling Light Shelf Systems for a Sustainable Interior Sunlight Environment under Specific Climate Conditions. *DCA Conference, ISBN 978-1-4951-2763-2, pp. 348-351, 2014.*
- Daich, S. (2011). Simulation et Optimisation du Système Light Shelf sous des Conditions Climatiques Spécifiques. *Thèse de magistère, Université de Biskra, Algérie.*

- Daich, S., Zemmouri, N., Morello, E., Piga, B. E., Saadi, M. Y., & Daiche, A. M. (2017). Assessment of Anidolic Integrated Ceiling effects in interior daylight quality under real sky conditions. *Energy Procedia*, 122, 811-816.
- Daich, S., Zemmouri, N., Saadi, M. Y., Eugenio, M., & Piga, B. E. A. (2015). Modeling of an anidolique daylight system for a luminous integrated environment. *Advance Building Skins, Bern, Switzerland, ISBN: 978-3-98120538-1, pp.366-371.*
- Damelincourt, J.J., Zissis, G., Corbé, C., & Paule, B. (2010). Eclairage d'intérieur et ambiances visuelles (2010), *Cachan: Lavoisier, ISBN : 2743019115, 9782743019112.*
- Davis, R. G. (2006). Cognitive and Perceptual Factors in Lighted Architectural Environments. *PhD Thesis.*
- Daylight in Buildings (2000): *A Source Book on Daylighting Systems and Components, a report of the International Energy Agency SHC Task 21/ECBCS Annex 29 (July 2000).*
- Denan, Z. (1999). Assessment and modification of daylight prediction and estimation tools for Malaysian practice. *Master Thesis, Universiti Teknologi Malaysia.*
- DIN 5035: Part 6, Artificial lighting of interior. *Deutsches Institute fur Normung, Berlin, 1983*
- Directive 2010/31/EU. Energy performance of buildings; 2010
- Dubois, M.C., Cantin, F., & Johnsen, K. (2007). The effect of coated glazing on visual perception: a pilot study using scalemodels. *Lighting Research and Technology*, 39(3), 283-299.
- Edmonds, I. R., Moore, G. I., & Smith, G. B. (1995). Daylighting enhancement with light pipes coupled to laser-cut light-deflecting panels. *Lighting Research and Technology*, 27, 27-35.
- Edmonds, I. R. (1993). Performance of laser cut light deflecting panels in daylighting applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 29(1), 1-26.
- Egan, M. D. (1983). Concepts in Architectural Lighting. *McGraw-Hill Book Company. ISBN 0-07-019054-2.*
- Einhorn, H.D. (1969). A new method for the assessment of discomfort glare. *Lighting Research Technology*, 1(4), 235.
- Elmer, W.B. (1980). The Optical Design of Reflectors. *New York: John Wiley & Sons Inc.*
- EN 12464-1, 2002. Light and lighting – Lighting at work places – Part I: Indoor Work Places. *European Standard. ISBN number: 0580411281.*
- Erhorn, H., De Boer, J., & Dirksmoller, M. (1998). ADELIN- An integrated approach to lighting simulation. *Proceedings of international daylighting conference "Daylighting '98", Ottawa, Ont., Canada; 1998.*
- Erikson, C., & Kiiller, R. (1983). Non-visual effects of office lighting. *In: CIE 20th Session (Vol.1). Commission Internationale de L'Eclairage, Amsterdam: pp.D602/601-604.*
- Figueiro, M., Rae, M. S., & Rae, A. C. (2002). Daylight and productivity: A possible link to circadian regulation. *Research Report, Troy, NY: Rensselaer Politic Institute.*
- Fischer, D. (1973). A luminance concept for working interiors, *J.Illum.Eng.Soc*, 2 (2), 92-98.
- Fisekis, K., Davies, M., Kolokotroni, M., & Langford, P. (2003). Prediction of discomfort glare from windows. *Lighting Research and Technology*, 35(4), 360-371.

- Fletcher, B.A. (1975). History of architecture. *18th Edition*. New York, NY: Charles Scibner's Sons.
- Freewan, A. (2016). Using Tubular Daylighting Systems to Improve Illuminance Level in Double Loaded Corridors in Educational Buildings. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 10(2).
- Gai, H., & Chung, T.M. (2011). Improving the quality of high dynamic range images. *Lighting Research and Technology*, 43, 87-102.
- Hansen, G., Veronica., & Edmonds, Ian. (2003). Natural Illumination of deep-plan office buildings: light pipe strategies. In: *ISES Solar World Congress 2003, 14-19 June 2003, Goteborg, Sweden*.
- Gibson, J.J. (1966). The Sense Considered as Perceptual Systems. Boston. *Houghton Mifflin Company*.
- Gligor, V. (2004). Luminous environment and productivity at workplaces. *Thesis (Licentiate)*, Helsinki University of Technology, Espoo.
- Goodrich, R. (1979). How People Perceive Their Office Environment. *New York: Citiban*
- Gordon, J.M. & Kashin, P. (1994). Achieving Uniform Efficient Illumination with Multiple Asymmetric Compound Parabolic Luminaires. *Optical Engineering*, 33 (1), 267-272.
- Gordon, J.M. & Rabl, A. (1992). Nonimaging Compound Parabolic Concentrator-Type Reflectors with Variable Extreme Direction. *Appl. Opt*, 31 (34), 7332-7338.
- Gordon, J.M., Kashin, P., & Rabl, A. (1992). Nonimaging Reflectors for Efficient Uniform Illumination. *Appl. Opt*, 31 (28), 6027-6035.
- Gou, Z., Lau, S.S.Y., & Ye, H. (2014). Visual alliesthesia: The gap between comfortable and stimulating illuminance settings. *Building and Environment*, 82, 42-49
- Goulding, J. R., Lewis, O., & Steemers, T. C. (1994). Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook, B.T. Batsford Limited for the Commission of the European Communities, London.
- Grandjean, E. (1985). Ergodesign. In *Behaviour and Information Technology - BIT*, 4 (1), 75-76.
- Greenup, P.J. (2004). Development of Novel Technologies for Improved Natural Illumination of High Rise Office Buildings. *PhD Thesis*.
- Groupe d'Etude et de Réalisations pour l'Amélioration des Conditions de Travail : Manuel d'analyse des ambiances lumineuses dans les lieux de travail-Méthode ergonomique, GERACT, Toulouse, P.119, 1984.
- Guth, S. K. (1963). A Method for the Evaluation of Discomfort Glare. *Illuminating Engineering*, July 1963, Pg. 351.
- Hansen, V. G. (2006). Innovative daylighting systems for deep-plan commercial buildings. *PhD Thesis*.
- Hayman, S., Ruck, N., Johnsen, K., Selkowitz, S., Lee, E., Jakobiak, R., Scartezzini, J.L., & Kaase, H. (2000). Concept paper for IEA SHC Task 31: Daylighting buildings in the 21st Century. Integrating Sustainable Energy Savings with Human Needs. Brisbane. International Energy Agency. *Solar Heating and Cooling Programme*.
- Heschong Mahone Group. (2003). Windows and Offices: A Study of Worker Performance and the Indoor Environment. *Sacramento: California Energy Commission*.

- Hopkinson, R. G., Petherbridge, P., & Longmore, J. Daylighting. *Heinemann, London (UK), 1996, pp: 606.*
- Hopkinson, R.G., & Bradley, R.C. (1965). Glare from very large sources. *Journal of the illumination Engineering Society, 55 (5), 228-297.*
- Hopkinson, R. G. (1960). A study of glare from very large sources. *Illuminating Engineering, 55, 255-294.*
- Hopkinson, R. G. (1957). Evaluation of glare. *Illuminating Engineering, 305-316.*
- Hopkinson, R.G. & Collins, J.B. (1970). *The Ergonomics of Lighting, Macdonald & Co.*
- Hopkinson, R.G. (1972). Glare from daylighting in buildings. *Applied Ergonomics, 3(4), 206-215.*
- http://lesowww.epfl.ch/anglais/Leso_a_frame_sof.html.
- <http://www.iea.org/>.
- <http://www.ledacademy.net/wp-content/uploads/2015/03/lesson2.pdf>.
- Hughes, P.C. (1983). An Examination of the Beneficial Action of Natural Light on the Psychobiological System of Man. *In: CIE 20th Session. International Commission on Illumination CIE. pp. D603.*
- IBM Corp. Released 2016. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 24.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- IEA (2000). Daylighting in buildings. *IEA SHC Task 21/ECBCS Annex 29 Final Report, 2000. (International Energy Agency).*
- IESNA (2000). *The IESNA Lighting Handbook, 9th ed. New York: IESNA (Illuminating Engineering Society of North America).*
- IESNA (1993). *Lighting Handbook-Reference & Application, ed.: REA M, IESNA (Illuminating Engineering Society of North America).*
- Jakubiec, J.A., & Reinhart, C.F. (2012). The adaptive zone - A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces. *Lighting research and Technology, 44(2), 149-170.*
- Page, J., Scartezzeni, J.L., Kaempf, J., & Morel, N. (2007). On-site performance of electrochromic glazing coupled to an anidolic daylighting system. *Solar Energy, 81, 1166-1179.*
- Kampf, J. (2000). Parametric anidolic shape generator. *In :Concent.pl, Deconcent_inf.pl, Deconcent_sup.pl, (Eds), Solar Energy and Building Physics Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne.*
- Kesten, D., Fiedler, S., Thumm, F., Löffler, A., & Eicker, U. (2009). Evaluation of Daylight Performance in Scale Models and a Full Scale Mock-Up Office. *Published in: Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Energy Technologies, Aachen, Germany, 2009.*
- Kiiller, B., & Lindsten, C. (1992). Health and Behavior of Children in Class rooms with and with windows. *Journal of Environmental Psychology, 12, 305-317.*
- Kisch, k. L. M. (1996). New Systems for Better Daylight Utilization. *Proceedings of Solar Energy in Architecture and Urban Planning, Berlin, German.*
- Kleindienst, S., & Andersen, M. (2006). Improving Daylighting in Existing Buildings: Characterizing the Effect of Anidolic Systems. *Renewable Energy-Key to Climate Recovery.*

- Ko, D. H., Elnimeiri, M., & Clark, R. J. (2008). Assessment and prediction of daylight performance in high-rise office buildings. The structural design of tall and special buildings. *Build*, 17, 953–976.
- Konis, K.S. (2011). Effective Daylighting: Evaluating Daylighting Performance in the San Francisco Federal Building from the Perspective of Building Occupants. *PhD Thesis. University of California: Berkeley*.
- Konstantzos, I., & Tzempelikos, A. (2014). Daylight Glare Probability Measurements and Correlation With Indoor Illuminances In A Full Scale Office With Dynamic Shading Controls. *3rd International High Performance Buildings Conference at Purdue, July 14-17, 2014*.
- Kristensen, P. E. (1994). Daylighting technologies in non-domestic buildings. *Renewable Energies in Europe; International Journal of Solar Energy*, 15, 55-67.
- Kurtay, C., & Esen, O. (2016). The Efficiency of Light Shelves According to Latitudes in Office Buildings. *Gazi University Journal of Science* 29(4), 711-721.
- Laboratoire de lumière naturelle. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 1998*.
- Lancashire, D.S., & Fox, A.E. (1996). Lighting: the way to building efficiency. *Consulting-specifying engineer; 1996. p.34*
- Larson, L. (1964). Lighting and its design. *New York: Whitney Library of Design*.
- Lau, J.J.H. (1972). Use of scale models for appraising lighting quality. *Lighting Research Technology*, 4, 254-262.
- Laura, B., Cesarano, A., Iuliano, G.F., & Spada, G. (2008). DAYLIGHT GLARE: A REVIEW OF DISCOMFORT INDEXES. *Paper presented at visual quality and energy efficiency in indoor lighting: Today for tomorrow, International Workshop, Rome, Italy, March 31, 2008*.
- Laurentin, C., Berrutto, V., & Fontoynt, M. (2000). Effect of thermal conditions and light source type on visual comfort appraisal. *Lighting Research Technology*, 32, 223-233.
- Lechner, N. (1991). Heating, cooling, and lighting, Design Methods for Architects. *New York: John Wiley and Sons*.
- Lefebvre, M. (2001). Probabilité statistique et applications. *Presses Internationales Polytechnique, 2001, Canada, ISBN 978-2-553-01554-0*.
- Leslie, R.P. (1994). What Makes Daylighting Successful? *CADDET Energy Efficiency Newsletter, Vol. 4*.
- leso.epfl.ch.
- Li, H. W. (2006). Daylight and energy implications for CIE standard skies. *Energy Conversion and Management*, 48, 745-755.
- Lieberman, J. (1991). Light-Medicine of the Future: How we can Use it to Heal Ourselves Now. *Bear and Co. Publ., Santa Fe, USA, 1991*.
- Lim, B.P., Rao, K.R., Tharmaratnam, K., & Maltar, A.M. (1979). Environmental Factors in the design of building fenestration. *London: Applied Science*.
- Linhart, F., Scartezzini, J.L., Courret, G., Francioli D., & Meyer, J.J. (2010). Minimizing lighting power density in office rooms equipped with anidolic daylighting systems. *Sol Energy*, 84, 587-95.

- Linhart, F., Wittkopf, S.K., Müncha, M., & Scartezzini, J.L. (2009). Recent Research on Anidolic Daylighting Systems: Highly Reflective Coating Materials and Chronobiological Properties. *Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB), EPFL, 1015 Lausanne, Switzerland and Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS), NUS, Singapore, 2009.*
- Linhart, F., Wittkopf, S.K., & Scartezzini, J.L. (2010). Performance of anidolic daylighting systems in tropical climates- parametric studies for identification of main influencing factors. *Sol Energy*, 84, 1085-1094.
- Littlefair, P.J. (1995). Computer assessment of the daylighting performance of light shelves. *Lighting Research & Technology*, (27)2, 69-74.
- Loe, D.L., Rowlands, E. (1996). The art and science of lighting: a strategy for lighting design. *Lighting Research and Technology*, 28 (4), 153-164
- Longmore, J. (1968). BRS Daylight Protractors. *Department of the Environment, Building Research Station, London: Her majesty's Stationery Office.*
- Lucas, R. M., & Ponsonby, A. (2002). Ultraviolet radiation and health: Friend and Foe. *The Medical Journal of Australia*, 177, 594-598.
- Maamari, F., & Fontoynt, M. Analytical tests for investigating the accuracy of lighting programs. *Lighting Research & Technology*, 35 (3) (2003), pp. 225-242
- Marwae, M. A., & Carter, D. J. (2006). A Field Study of Tubular Daylight Guidance Installations. *Lighting Research and Technology*, 38, 241-258.
- MATLAB, 2012. www.mathworks.com/help (2012/01/31). Möller, G., Detert, M., Boes, R. 2012. Air entrainment due to vortices: State-of-the-art, Proc. 2ndIAHR European.
- Matterson, M. L. G., Ferrà, J. O., Salom, J., & Portilla, J. H. (2013). Dynamic Daylight Simulation And Visual Comfort Survey In Mediterranean Climate. Case Study In Office Building. In: *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. France; 2013.p.3010-3018.*
- Mayhoub, M. S., & Carter, D. J. (2011). The Costs and Benefits of Using Daylight Guidance to Light Office Buildings. *Building and Environment*, 46, 698-710.
- Mehrabian, A., & Russell, J. A. (1974). An approach to environmental psychology. pp. 216–217, *USA: The Massachusetts Institute of Technology.*
- Meijer, F., Itarda, L., & Sunikka-Blankb, M. (2009). Comparing European residential building stocks: performance, renovation and policy opportunities. *Building Research & Information*, 37(5-6), 533-551.
- Mitsunaga, T., & Nayar, S.K. (1999). Radiometric self-calibration. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Ft. Collins, CO, USA: IEEE, 1999.*
- Moeck, M. (2007). Accuracy of luminance maps obtained from high dynamic range images. *Leukos*, 4, 99-112.
- Mohelnikova, J. (2009). Tubular Light Guide Evaluation. *Building and Environment*, 44, 2193-2200.
- Molinelli, J.F., & Boyer, L.L. (1987). Measurements and comparisons of light shelf performance in two Texas office buildings. *Proc. of the 5th Symposium on Improving Building Energy Efficiency in Hot and Humid Climates. pp. 10-19. Houston, TX.*

- Molteni, S., Courret, G., Paule, B., Michel, L., & Scartezzini, J.L. (2000). Design of anidolic zenithal lightguides for daylighting of underground spaces. *Solar Energy*, 69, 117-129.
- Moore, E. O. (1981). A prison environment's effect on health care service demands. *Journal of Environmental Systems*, 11, 17-34.
- Muhs, J. D. (2000). Design and Analysis of Hybrid Solar Lighting and Full-Spectrum solar energy systems. *Proceedings of American Solar Energy Society "Solar2000 Conference", Madison, Wisconsin*.
- Müller, H. (1996). Erprobung elner anpassungsfähigen Fassade für die ganzjährige Solarenergienutzung (Testing of a flexible facade for usage of solar energy through the year). *Bauphysik 1/96, Verlag Ernst & Sohn, Berlin (1996)*.
- Myriam, B.C., Aries, G., & Newsham, R. (2008). Effect of daylight saving time on lighting energy use: A literature review. *Energy Policy*. Volume 36(6), 1858-1866.
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, 38, 905-913.
- Nair, M.G., Ramamurthy, K., & Ganesan, A.R. (2014). Classification of indoor daylight enhancement systems. *Lighting Research and Technology*, 46, 245-267.
- NASA SSE program (<http://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/>).
- Ne'eman, E. (1984). A comprehensive approach to the integration of daylight and electric light in buildings. *Energy and Buildings*, 6(2),97-108
- Newsham, G.R., Aries, M.B.C., Mancini, S., & Faye, G. (2008). Individual control of electric lighting in a daylight space. *Lighting Research and Technology*, 40, 25-41.
- NF X35-103 : Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail, AFNOR, Paris, 1990.
- Nicklas, M., & G, Bailey. (1996). Daylit Students Shine Brighter. *SunWorld*, 20 (3), 13-15.
- Oakley, G., Riffat, S., & Shao, L. (2000). Daylight Performance of Light pipes. *Solar Energy*, 69, 89-98.
- Ochoa, C.E., & Capeluto, I.G. (2006). Evaluation visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates, *Build Environ*, 41, 1128-1135.
- Page, J., Scartezzini, J.-L., Kaempf, J., & Morel, N. (2007). On-site performance of electrochromic glazings coupled to an anidolic daylighting system. *Solar Energy*, 81(9), 1166-1179.
- Paredes, C. M. (2016). Daylighting and Architectural Quality, Aesthetic Perception of Daylit Indoor Environments. *PhD Thesis, NTNU, 2016:25, ISBN 978-82-326-1394-6*.
- Pauley, S. M. (2004). Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Medical Hypotheses*, 63, 588-596.
- Penney, T.R., & Althof, J. (1990). American Trends in Commercial Buildings. In: *Int. Conf. on Water and Energy Conservation in Commercial Buildings. Brisbane, Oct 17-20, pp. 116-125*.
- Perry, M.J. (1985). A flexible system for visual performance studies. *Lighting, Research and Technology*, 17 (1), CIBSE.

- Rabl, A., & Gordon, J.M. (1994). Reflector Design for Illumination with Extended Sources: The Basic Solutions. *Appl. Opt.*, 33 (25), 6012-6021.
- Rabl, A. (1976). Comparison of Solar Concentrators. *Solar Energy*, 18 (2), 93-111.
- Rea, M.S., & Ouellette, M.J. (1991). Relative visual performance: a basis for application. *Lighting Research and Technology*, 23(3), 135-144.
- Reinhart, C.F., & Fitz, A. (2006). Findings from a survey on the current use of daylight simulations during building design. *Energy & Buildings*, 38(7), 824-35.
- Reinhart, C. F., & Walkenhorst, O. (2001). Dynamic RADIANCE-based Daylight Simulations for a full-scale Test Office with outer Venetian Blinds. *Energy & Buildings*, 33(7), 683-697.
- Riegel, R.J., Windheim, L.S., Davy, K.V., & Shanus, M.D. (1983). Case Study: Lockheed Building 157-an Innovative Deep Daylighting Design for Reducing Energy Consumption. In: *Advances in Energy Cost Savings for Industry and Buildings*. Atlanta, Georgia: Fairmont Press Inc.
- Ries, H.R., & Winston, R. (1994). Tailored Edge-Ray Reflectors for Illumination. *J. Opt. Soc. Am.*, 11 (4), 1260-1264.
- Roche, L., Dewey, E., & Littlefair, P. (2000). Occupant reactions to daylight in offices. *Lighting Research & Technology*, 32(3), 119-126.
- Roshan, M., Kandar, M. Z. B., Nikpur, M., Mohammadi, M.P., & Ghasemi, M. (2013), Investigating the performance of Anidolic Daylighting System with respect to Building Orientation in Tropical Area. *ESTIJ An International Journal of Engineering Science and Technology*, 3 (1), 2250-3498.
- Roy, G.G. (2000). A comparative study of lighting simulation packages suitable for use in architectural design. *Perth: Murdoch University, School of Engineering; 2000*.
- Ruck, N. (1985). Beaming daylight into deep rooms. *Building Res. Pract.*13, 144-147.
- Ruck, N., & Smith, S. C. J. (1982). Solar beam lighting as an energy conservation using a prismatic panel. *Proceedings of Proc. Conf. Daylighting and Energy Conservation, University of New South Wales. Australia*.
- Ruck, N., Aschehoug, O., Aydinly, S., Christoffersen, J., Courret, G., Edmonds, I., Jakobiak, R., Kischkoweit-Lopin, M., Klinger, M., Lee, E., Michel, L., Scartezzini, J.-L. & Selkowitz, S. (2000) Daylighting in Buildings. *A Source book on Daylighting Systems and Components, International Energy Agency (IEA) Task 21. Solar Heating and Cooling Programme, Energy Conservation in Buildings & Community System Lawrence Berkeley National Laboratory, California*.
- Scartezzini, J. L., Michel, L., Courret, G., Suter, T., Giaccari, I., & SA, F. (2000). Intégration de dispositifs anidoliques d'éclairage naturel en façade (2000). *Laboratoire d'Énergie Solaire et de Physique du Bâtiment, EPFL (LESO-PB-CONF-2000-010)*.
- Scartezzini, J. L. et al. (1994). Office Lighting. *Publication of RAVEL Swiss action programme, EDMZ, Bern, Switzerland*.
- Scartezzini, J. L. (1994). Eclairage des bureaux. *Publ. Ravel, 108p., ISBN 3-905233-44-4, 1994*.
- Scartezzini, J.L., & Courret, G. (2002). Anidolic daylighting systems. *Solar Energy*, 73, 123-135.
- Schiler, M., and Japee, S. (2001). Vital signs: Interior Illuminance, daylight controls and occupants response, vital signs.

- Schweiker, M., & Shukuya, M. (2009). Comparison of theoretical and statistical models of air-conditioning-usage behaviour in a residential setting under Japanese climatic conditions. *Build. Environ*, 44, 2137-2149.
- Shao, L., & Riffat, S. B. (2000). Daylighting using light pipes and its integration with solar heating and natural ventilation. *Lighting Research and Technology*, 32, 133-139.
- Smiley, F. (1996). Students delight in daylight. *International Association for Energy Efficient Lighting Newsletter*, 5 (2), 11–12.
- Sorenson, K. (1987). A modern glare index method. In: *Proceedings CIE 21st Session. 1987; Venice. Paris: CIE*.
- Stein, B. (2006). Mechanical and electrical equipment for buildings. *Hoboken, N.J.: Wiley, 2006*.
- Suk, J.Y. (2014). Absolute Glare and Relative Glare Factors: Predicting and Quantifying Levels of Interior Glare and Exterior Glare Caused by Sunlight and Daylight. *Lighting Research and Technology*, 33 (3), 145-161.
- Suk, J.Y., Schiler, M., & Kensek, K. (2013). Development of New Daylight Glare Analysis Methodology using Absolute Glare Factor and Relative Glare Factor. *Energy and Buildings*, 64, 113-122.
- Szokolay, S.V. (1980). Environmental science handbook for architect and builders. *London: The Construction Press*.
- Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). Making sense of Cronbach's alpha. *Int J Med Educ*, 2, 53-55.
- Thapan, K., Arendt, J., & Skene, D.J. (2001). An action spectrum for melatonin suppression: evidence for anovel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *The Journal of Physiology*, 535 (1), 261- 267.
- Trashani, B. (2016). New Daylight Technologies For Sustainable Design Case Study - Mother Tereza Hospital In Tirana. *Master Thesis, 2016*.
- Tsangrassoulis, A., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1996). Theoretical and experimental analysis of daylight performance for various shading systems, *Energy and Buildings* 24, 223-230.
- Tsikaloudaki, K., Anagnostou, S., & Nichoritis, K. (2008). Investigating the performance of anidolic vertical openings under real conditions in Greece. In: *25th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Dublin; 2008*
- Tzempelikos, A., & Athienitis, A.K. (2007). The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy*, 81, 369-382.
- Van Bommel, W.J.M., & Van den Beld, G.J. (2004). Lighting for work: a review of visual and biological effects. *Lighting Research and Technology*, 36 (4), 255-269.
- Van Den Wymelenberg, K.G. (2008). Daylight Dialect. *Architectural Lighting*, pp.28–29
- Veitch, J. A., & Newsham, G. R. (2000). Preferred luminous conditions in open-plan offices: Researchand practice recommendations. *Lighting Research and Technology*, 32, 199-212
- Veitch, J.A. (2005). Light, Lighting and Health. Issues for Consideration. *Leukos*, 2 (2), 85-96.
- Veitch, J.A., & Newsham, G.R. (1998). Determinants of lighting quality I: State of the Science. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 27 (1), 92-106.

- 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 build*, 28 (2), 205-218.
- Ward Larson, G., & Shakespeare, R. (1998). *Rendering with Radiance: the art and science of lighting visualisation*. San Francisco: Morgan Kaufmann; 1998.
- Welford, W.T., & Wilson, R. (1989). *Nonimaging Optics*. Academic Press, USA, 1989.
- Welford, W.T., & Winston, R. (1978). *The Optics of Nonimaging Concentrators*. London: Academic Press Inc. Ltd.
- 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.
- Winston, R., & Ries, H. (1993). Nonimaging Reflectors as Functionals of the Desired Irradiance. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 10 (9), 1902-1908.
- Winston, R. (1991). Nonimaging Optics. *Sci. Am.*, 264 (March), 52-57.
- Wittkopf, S.K., Grobe, L.O., Geisler-Moroder, D., Compagnon, R., Kampf, J., Linhart, F., & Scartezzini, J.L. (2010). Ray tracing study for non-imaging daylight collectors. *Solar Energy*, 84, 986-996.
- Wittkopf, S.K., Yuniarti, E., & Soon, L.K. (2006). Prediction of energy savings with anidolic integrated ceiling across different daylight climates. *Energy and Buildings* 38, 1120-1129.
- Wotton, E., & B, Barkow. (1983). An Investigation of the Effects of Windows and Lighting in Offices. In: *Int. Daylighting Conf. Phoenix*.
- Wright, H.R., Lack, L.C., & Partridge, K.J. (2001). Light emitting diodes can be used to phase delay the melatonin rhythm. *Journal of Pineal Research*, 31, 350-355.
- Xue, P., Mak, C.M., & Cheung, H.D. (2014). The effects of daylighting and human behavior on luminous comfort in residential buildings: A questionnaire survey. *Building and Environment*, 81, 51-59.
- Yildirim, K., Akalin-Baskaya, A., & Celebi, M. (2007). The effects of window proximity, partition height, and gender on perceptions of open-plan offices. *J Environ Psychol*, 27(2),154-165.
- Zhang, X., Muneer, T., & Kubie, J. (2002). A Design Guide for Performance Assessment of Solar Light-Pipes. *Lighting Research and Technology*, 34, 149-169.

Publications

Articles scientifiques

- I. Daich, S., Zemmouri, N., Morello, E., Piga, B. E., Saadi, M. Y., & Daiche, A. M. (2017). Assessment of Anidolic Integrated Ceiling effects in interior daylight quality under real sky conditions. *Energy Procedia*, 122, 811-816.
- II. Yacine, S. M., Nouredine, Z., Piga, B. E., Morello, E., & Safa, D. (2017). Towards a new model of light quality assessment based on occupant satisfaction and lighting glare indices. *Energy Procedia*, 122, 805-810.
- III. Yacine, S. M., Nouredine, Z., Piga, B. E., Morello, E., & Safa, D. (2017). Developing neural networks to investigate relationships between lighting quality and lighting glare indices. *Energy Procedia*, 122, 799-804.

Présentations orales

- IV. Daich, S., Saadi, M.Y., Eugenio, M. Piga, B.E.A. Zemmouri, N., and Daiche, A. M., (2017). Effects of Anidolic Integrated Ceiling in interior daylight distribution for deep spaces under high exterior illuminance levels. PLEA conference, Edinburgh, UK, P: 3199-, 3- 5 July 2017.
- V. Daich, S., Saadi, M. Y., Zemmouri, N., Eugenio, M., Piga, B. E. A., & Daiche, A.M. (2016). Evaluation quantitative et qualitative du système anidolique sous un climat chaud et aride. *Proceedings of 3rd International Congress on Ambiances. Greece; 2016.p. 219-226.*
- VI. Daich, A.M., Mazouz, S., Daich, S., Saadi, M.Y. Toward a tool to optimize the daylighting into the process of architectural design –Reverse approach–. Proceedings of the 3rd IBPSA-England Conference BSO 2016, Great North Museum, Newcastle, 12th-14th September 2016.
- VII. Daich, S., Zemmouri, N., Saadi, M. Y., Eugenio, M., & Piga, B. E. A. (2015). Modeling of an anidolique daylight system for a luminous integrated environment. *Advance Building Skins, Bern, Switzerland, ISBN: 978-3-98120538-1, pp.366-371.*



CISBAT 2017 International Conference – Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale, CISBAT 2017 6-8 September 2017, Lausanne, Switzerland

Daylighting & Electric Lighting (Green Lighting)

Assessment of Anidolic Integrated Ceiling effects in interior daylight quality under real sky conditions

Safa Daich^{a*}, Nouredine Zemmouri^a, Eugenio Morello^b, Barbara E A Piga^b, Mohamed Yacine Saadi^a, Ahmed Motie Daiche^a

^a*LaCoMoFa, University of Biskra, Biskra 07000, Algeria*

^b*LabSimUrb, Politecnico Di Milano, Milano 20133, Italy*

Abstract

The goal of this research is to demonstrate, according to subjective and objective evaluations, that a passive Anidolic Integrated Ceiling (AIC) is able to provide an adequate illumination level for optimal visual and task performance in deeper office spaces and to prove its effectiveness in enhancing interior daylighting quality. A quantitative study was performed by calculating the D.G.I.P from spherical images in an office room, while a qualitative evaluation was achieved by using questionnaire survey. Experimental results confirmed that the AIC significantly improves luminous comfort by providing a uniform luminance distribution throughout space. Responses obtained from 62 subjects show that 64.51% of participants were satisfied with their daylighting. In addition, ANOVA test results showed that there is a significant correlation between quantitative and qualitative evaluations of the interior daylight distribution.

© 2017 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the CISBAT 2017 International Conference – Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale

Keywords: Daylighting; indoor daylight quality; AIC; D.G.I.P; questionnaire survey; high luminous sky.

* Corresponding author. Tel.: +213-550-872-587; fax: +213-537-203.
E-mail address: daichsafa@gmail.com

1. Introduction

Luminous comfort has been considered as a subjective condition of visual well-being induced by the visual environment [1]. Several studies in this field have shown that this aspect involves an interaction between human behavior and the quality of the light environment, and that well-being is related to the satisfaction of people with their luminous environment [2, 3, 4]. However, visual comfort and the quality of indoor daylighting are influenced by several parameters and the degree of satisfaction differs according to three main factors: external factors (environmental and contextual factors), psychological factors and individual factors (physiological and cultural factors) [5]. Lighting design quality in indoor environment in office spaces has been widely studied [6, 7, 8, 9]. Successful daylighting design should guarantee a sufficient quantity of light to ensure a comfortable environment appropriate for its use and the visual performance of users as well as a pleasant indoor atmosphere adequate for visual tasks. However, a deep plan office building cannot be illuminated with a simple window and advanced daylighting systems are necessary to ensure a good interior illuminance level. The Anidolic Integrated Ceiling (AIC) is one of the daylighting strategies in buildings designed to redirect and redistribute the natural light deeper in space; its main objectives are to improve the luminous comfort of users and to enhance the interior daylighting quality by reducing glare discomfort [10,11]. This system has proved its efficiency to increase the illuminance level in office buildings under different climates conditions [6, 12, 13, 14].

Visual comfort has been commonly studied by using different tools in order to evaluate the indoor daylighting quality through a qualitative or quantitative approach or both. Results from different studies focusing on assessment of daylighting in buildings have confirmed that physical models can be used to evaluate the performance of daylighting systems [15, 16]. These can provide photometric measurements and also give a visualization of glare and contrast in the studied space [17, 14]. The objective of the present paper is to study the Anidolic Integrated Ceiling effect on the enhancement of the interior daylighting quality by comparing quantitative measurements with subjective evaluations.

2. Experimental protocol

The measurements were conducted in the city of Biskra, Algeria (latitude: 34.48, longitude: 5.44N) in January under real climate conditions. Research performed by Daich et al [6] has shown that this region is characterized mainly by intermediate sky cover conditions which approximate 40% and that it has a very high exterior horizontal illuminance level especially during summer seasons, reaching 83000lux. This study was carried out using a physical scale model (1:4) and the quantitative and the qualitative assessment of the AIC were performed in this model for two scenarios. The first one, the reference case, was a typical office room with dimensions of 6m (width) x 12m (depth) x 3.5m (height) with the following surface reflectance: wall 50%, floor 40% and ceiling 92%. In the second simulation, we added an AIC located on the shorter wall oriented north with a reflectance of 96%. The anidolic ceiling was designed with regards to the geographical characteristics of the city of Biskra and we have used the mathematical model given by Welford and Winston [18]. The simulations were done in January under clear sky conditions.

3. Questionnaire

3.1. Survey Procedure

During the photometric measurement period, a questionnaire survey was carried out with 62 participants (30 male, 32 female) and conducted in two sessions. In the first one, thirty-one subjects were exposed to the reference model, while in the second one, thirty-one other subjects were asked to evaluate daylighting in the test model. During the experience, participants perceived daylighting in three viewspots of the physical models (see Fig.1) and gave their opinion on the effect of AIC on interior lighting in the space and judged the different light settings by rating. The survey had two objectives. The first one was to collect subjective information about indoor daylight quality, and the second one was to compare the survey responses with D.G.I.P results in order to study the correlation between objective and subjective evaluations.



Fig. 1. Physical model with viewspots positions

In this investigation, two questions out of twenty were selected according to the study objectives. One question related to satisfaction with daylighting and the second about the pleasantness perceived by the subjects. The questions used in the survey were based on many studies [19, 20] and are listed below:

Table 1. Questions used in the survey.

Factors	Questions	Survey Scale						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Evaluative	1- Overall, how satisfied are you with your level of visual comfort in the office?	very dissatisfied			Neutral		very satisfied	
Pleasantness	2- The light in this office is pleasant?	unpleasant			Neutral		pleasant	

4. Results and analysis

4.1. Measurement results

The visual comfort is closely related to glare [21] and a recent research has shown that the daylight glare probability can be assessed by using scale models [17]. For this, three viewspots given in Fig. 1 were made on the west façade of the model at the eye level in order to take photographic images (HDR Image) of the whole space. The HDR images were calibrated in Evalglare and Aftab Alpha in order to calculate the D.G.I.P and predict the appearance of discomfort glare in these spaces. The D.G.I.P analyses were done according to the scale given by Jakubiec and Reinhart [22]. At the same time, measurements in terms of illuminance level were monitored in three points on the work plane of 0.85m. The results are presented in Fig.2 and Fig.3.

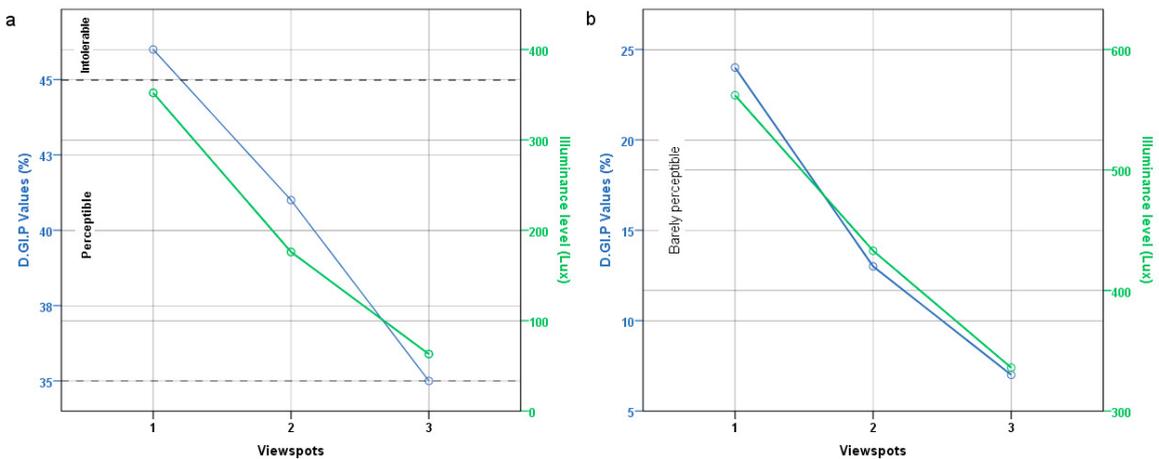


Fig. 2. (a) reference model; (b) test model.

The graphs illustrated in Fig. 2 present results of the illuminance level measured and the D.G.I.P values calculated from the HDR images in the three points in the two scenarios. The illuminance values monitored in the models have shown that the Anidolic Integrated Ceiling improves the daylight level; the illuminance values in these points are comparatively situated between 300lux and 600lux. Therefore, the daylight distribution seems to be more homogeneous by reducing the difference of the illuminance level between the window area and the rear part of the room. Moreover, the results have shown that the probability of glare is considerably reduced when the AIC is installed. The D.G.I.P values recorded in the different viewspots are less than 30%, the glare is considered as imperceptible for the whole space. In addition, the D.G.I.P values calculated in the reference model vary according to the view position. The graphs showed that the discomfort glare is intolerable (46%) in the first viewspot and considered as perceptible in the center and in the depth of the space (41% and 35%).

4.2. Survey results

The graphs given in Fig. 3 and Fig. 4 present the level of satisfaction and pleasantness of the participants toward the interior daylight environment in the scenarios and in the different visual fields. It is clear from the results that the participants felt more satisfied and pleasant with the luminous environment of the test model. Therefore, the graphs can indicate that the level of satisfaction reported by the subjects was the same with the pleasantness level in the two models and the degree of the positive responses to the two questions decreases with the room depth.

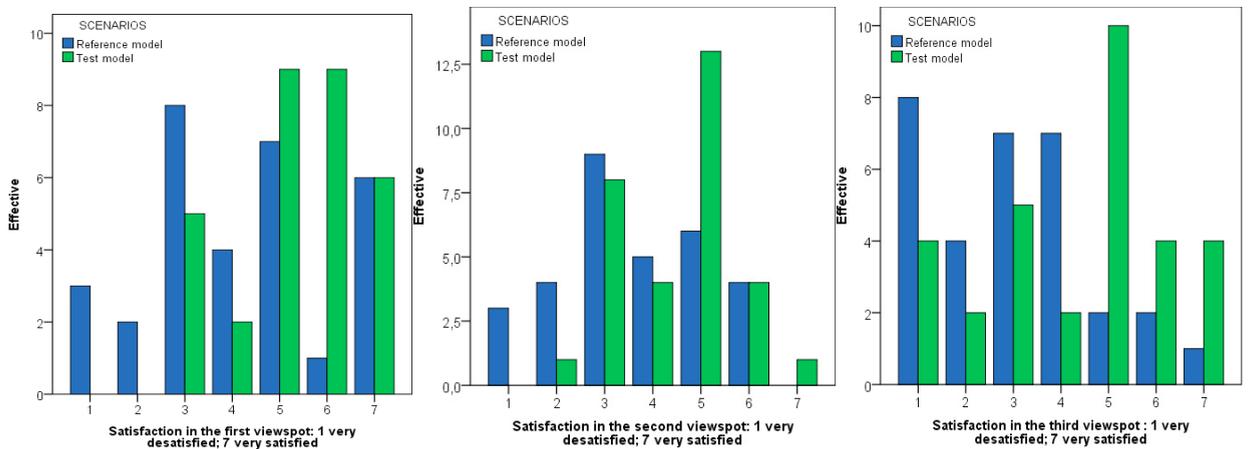


Fig.3. Subjects satisfaction in the two scenarios

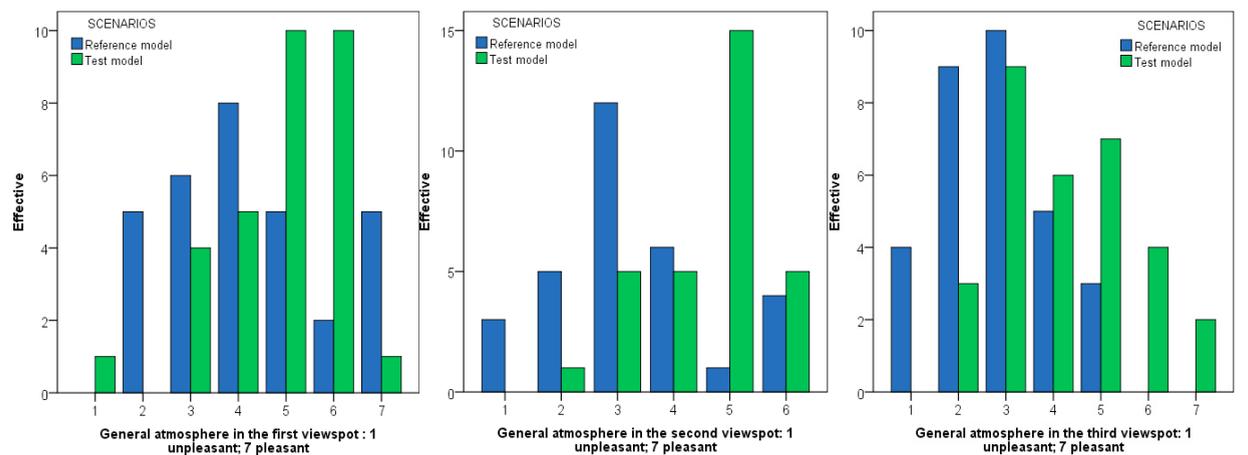


Fig.4. Subjects general atmosphere evaluations in the two scenarios

The comparison of collected data illustrated in Fig.3 showed that in the test model, 77% of the subjects were more satisfied with the quality of daylighting in the first position and 58% in the second and the third position while in the reference model, the participants were more dissatisfied with the luminous comfort: 41% in the first viewspot, 51% in the second and 61% in the third viewspot. In addition, the responses of the pleasantness factor given in Fig.4 showed that the participants preferred the ambiance generated by the AIC. Some 67% were pleasant in the near part of the window, 64% in the middle and 41.9% in the rear part of the room and as a consequence, the subjects were dissatisfied with the atmosphere of the reference model, 35% of participants were dissatisfied with the general atmosphere of the space in the zone near the windows, 61% in the center and 74% in the depth.

4.3. Correlation between subjects' responses and DGP results

In order to study the relationship and the correlation between the D.G.I.P calculated values, satisfaction and pleasantness from the subjects' responses, a statistic 'Anova one way' test was used. The test reveals no correlation between the glare calculated and pleasantness responses in the three viewspots; the p-values are greater than .05. In addition, the test showed that there is a very strong correlation between the D.G.I.P variable and the responses of the subjects regarding satisfaction with daylighting only in the third position; the p-value is .031. From Fig.5 and Fig.6, it can be seen that the daylight quality in the test model was perceived as more satisfying than in the reference room. It is also apparent from the graphs that this index has a big effect on subjects' satisfaction. The degree of satisfaction gradually increased when the D.G.I.P level decreased by more than 30%. However, the comparison of the results given in Fig.6 shows that in the test model the subjects gave positive evaluations and were more satisfied when the D.G.I.P was between 5% and 15%. It can clearly be seen in Fig.5 that the D.G.I.P values monitored in the reference model are situated between 28% and 61% and the results indicate that the majority of participants perceived that the daylighting quality of the room is insufficient when the D.G.I.P level was between 35% and 55%.

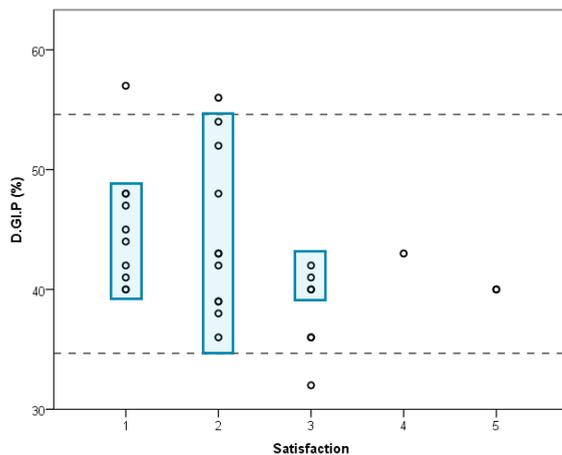


Fig. 5. D.G.I.P and daylight satisfaction in the reference model.

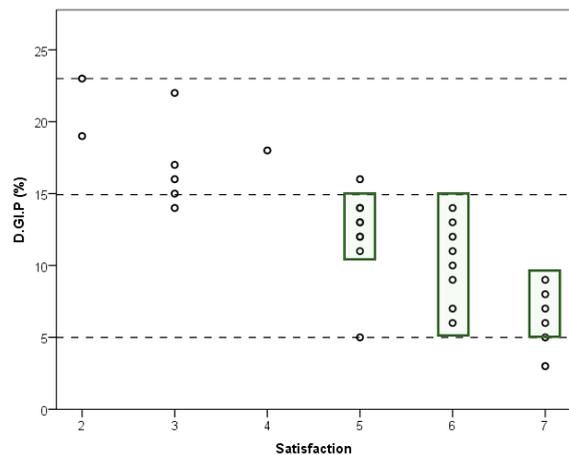


Fig. 6. D.G.I.P and daylight satisfaction in the test model.

5. Conclusion

The results presented lead to the conclusion that the use of anidolic integrated ceilings in deep office buildings under high luminous sky conditions provides a comfortable and pleasant luminous environment by providing a more homogeneous daylight distribution and by reducing discomfort glare. Quantitative results in terms of illuminance level showed that the AIC regulates the daylight distribution in the model and met the requirements of more than 300lux for the whole space while the passive area in the reference room is very restricted. The D.G.I.P values calculated from the spherical images showed that the AIC reduces significantly the probability of glare; it is considered as barely perceptible for all positions but in the reference model the D.G.I.P values varied between intolerable and perceptible. The study has confirmed that a survey is a valid way to study the effects of an AIC on interior daylighting quality,

human behavior and satisfaction in a physical scale model and also to provide more information for improved understanding between measurements and subjects' responses. We conclude from the questionnaire results that the participants were more satisfied (average of 64.33%) and more pleased (average of 53%) with the daylight quality. It is clear that the general ambiance in the test room and the degree of positive response strongly depend on the visual field of the observer which decreases with depth. It also appears that the D.G.I.P values showed a very strong correlation with the response of the subjects regarding satisfaction with daylighting (p-value is .031). Participants satisfaction increased with reducing glare discomfort level and the satisfaction with daylight can be maximized for the level of D.G.I.P (5% to 15%).

References

- [1] EN12665 Light and Lighting Basic Terms and Criteria for Specifying Lighting Requirements; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2011.
- [2] Aries M B C, Veitch J A, Newsham G R. Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. *Journal of Environmental Psychology* 2010; 30(4):533-541.
- [3] Kaplan R. The nature of the view from home e psychological benefits. *Environmental Behavior* 2001;33(4):507-542.
- [4] Haynes B P. Office productivity: a theoretical framework. *Journal of Corporate Real Estate* 2007;9(2):97-110.
- [5] Schweiker M, Shukuya M. Comparison of theoretical and statistical models of air-conditioning-usage behaviour in a residential setting under Japanese climatic conditions. *Building and Environment* 2009;44:2137-2149.
- [6] Daich S, Zemmouri N, Saadi M Y, Eugenio M, Piga B E A. Modeling of an anidolique daylight system for a luminous integrated environment. In: *Advance Building Skins Conference*. Bern;2015.p.366-371.
- [7] Matterson M L G, Ferrà J O, Salom J, Portilla J H. Dynamic Daylight Simulation And Visual Comfort Survey In Mediterranean Climate. Case Study In Office Building. In: *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*. France;2013.p.3010-3018.
- [8] Arsenault H, Hebert M, Duboit M C. Effects of glazing colour type on perception of daylight quality arousal, and switch-on patterns of electric light in office rooms. *Building and environment* 2012;56:223-231.
- [9] Roche L, Dewey E, Littlefair P. Occupant reactions to daylight in offices, *Lighting Research and Technology* 2000;32(3):119-126.
- [10] Wittkopf S K, Yuniarti E, Soon L K. Prediction of Energy Savings with Anidolic Integrated Ceiling across different Daylight Climate, *Energy and Buildings* 2006; 38: 1120-1129.
- [11] Courret G, Scartezzini J L, Francioli D, Meyer J J, Design and assessment of an anidolic light-duct, *Energy and Buildings* 1998; 28: 79-99.
- [12] Ochoa C E. Assessment of indirect daylighting systems for deep office spaces. *Technion-Israel Institute of Technology, Faculty of Architecture and Town Planning*. Israel;2004.
- [13] Daich S, Saadi M Y, Zemmouri N, Eugenio M, Piga B E A, Daiche AM. Evaluation quantitative et qualitative du système anidolique sous un climat chaud et aride. In: *Ambiances, tomorrow. Proceedings of 3rd International Congress on Ambiances*. Greece; 2016.p. 219-226
- [14] Baker N, Fanchiotti A, Steemers K. *Daylighting in Architecture: a European reference book*. Commission of the European Communities, Directorate--General XII for Science Research and Development. Research and Development, James and James 1993.
- [15] Tsikaloudaki K, Anagnostou S, Nichoritis K. Investigating the performance of anidolic vertical openings under real conditions in Greece. In: *25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Dublin; 2008.
- [16] Wienold J, Christoffersen J, Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and buildings* 2006; 38(7):743-757.
- [17] Bodart M, Cauwerts C. Assessing daylight luminance values and daylight glare probability in scale models. *Building and Environment* 2017;113:210-219.
- [18] Welford WT, Winston R. *High Collection Nonimaging Optics*. San Diego: Academic Press; 1989.
- [19] Arsenault H, Hebert M, Dubois MC. Effects of glazing colour type on perception of daylight quality, arousal, and switch-on patterns of electric light in office rooms. *Building and Environment* 2012;56:223-231.
- [20] Konis KS. *Effective Daylighting: Evaluating Daylighting Performance in the San Francisco Federal Building from the Perspective of Building Occupants*, PhD thesis. University of California: Berkeley; 2011.
- [21] Hopkinson R G, Petherbridge, J. Longmore, *Daylighting*, Heinemon, London (UK), 1996, pp:606
- [22] Jakubiec JA, Reinhart CF. The adaptive zone - A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces. *Lighting research and Technology* 2012;44(2):149-170.



CISBAT 2017 International Conference – Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale, CISBAT 2017 6-8 September 2017, Lausanne, Switzerland

Indoor Environment Quality (User Comfort, Health and Behaviour)

Towards a new model of light quality assessment based on occupant satisfaction and lighting glare indices

Saadi Mohamed Yacine^a*, Zemmouri Nouredine^a, Barbara E. A. Piga^b, Eugenio Morello^b, Daich Safa^a

^aLACOMOFA, laboratory, Department of architecture, university of Biskra 07000, Algeria

^bLaboratorio di Simulazione Urbana 'Fausto Curti', polytechnic of Milan 20133, Italy

Abstract

This study looks at the effect of daylighting on human performance. It includes a focus on glare index combined with the actual feeling of users of the classroom as a way to assess indoor lighting quality. The main objective of this research is to understand the impact of daylighting from windows on the glare sensation and also to determine which glare index is the closest to human visual sensation under local daylighting conditions in Biskra, Algeria with highly luminous climate. The study used High Dynamic Range (HDR) photography, Evaglare and Aftab Alpha software to calculate the two glare metrics Daylight Glare, Index (DGI) and the Daylight Glare Probability (DGP). A survey was also used with 90 occupants under different lighting conditions (different configurations) in a design classroom. In order to link the mathematical model and the human assessment of glare, statistical regression analysis was used. We established a statistically compelling connection between daylighting and student performance.

© 2017 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the CISBAT 2017 International Conference – Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale

Keywords: Glare metrics, HDR photography, Daylighting assessment, Machine learning, Statistical regression.

* Corresponding author. Tel.: +39-333-522-4542; fax: +213-53-72-03.

E-mail address: saadiarchitecture@gmail.com

1. Introduction

Daylighting has been used throughout history as a primary light source in buildings, so the principles of light are not new. However, the use of natural light has advantages and disadvantages; aesthetically and physically this pendulum between the extremes has been covered by architectural design throughout many decades. Glare is one of the major factors affecting visual comfort [1]. Some previous studies have proved that visual comfort is mainly achieved by avoiding glare as well as controlling the uniformity, shadows and veiling reflections so it should be avoided in general for visual tasks and especially for more visually demanding tasks such as computer screens and office work [2]. In recent years, several objective and subjective indices and indicators of glare have been developed, also significant progress has been made towards the development of computational methods that holistically evaluate the performance of occupant comfort [3]. Various tools and methods for glare assessment exist [4, 5, 6], but the most frequently used are glare indices including DGP (Daylight Glare Probability), DGI (Daylight Glare Index), UGR (Unified Glare Rating), and CGI (CIE Glare Index). DGP and DGI were specifically developed for daylight glare, which needs to be treated differently from visual discomfort issue of electrical light sources [7]. According to the equations (1, 2), a similarity can be established between the two different glare indices, since all of them are based on background mean luminance, glare source luminance, glare source position, the solid angle of glare sources, vertical illuminance, and direct vertical illuminance. The aim of this paper is to compare the two glare indices ‘DGP’ and ‘DGI’, in order to determine which of these indicators is the most adapted for the glare assessment and lighting quality measured and quality felt by users [8].

$$DGI = 10 \cdot \log \left(0.478 \sum_i \frac{L_{s,i}^{1.6} \cdot \omega_{s,i}^{0.8}}{L_b + 0.07 \cdot \omega_{s,i}^{0.5} \cdot L_{s,i}} \right) \quad (1)$$

$$DGP = 5.87 \cdot 10^{-5} \cdot E_v + 0.092 \cdot \log \left(1 + \sum_i \frac{L_{s,i}^2 \cdot \omega_{s,i}}{E_v^2 \cdot P_i^2} \right) + 0.16 \quad (2)$$

Nomenclature

E_v	Total vertical eye illuminance (lux)
L_s	Luminance of the glare source (cd/m ²)
ω	Solid angle of the glare source (sr)
P	Weight factor based on position in a viewing hemisphere, the Position index

2. Methodology

The authors created three lighting conditions, natural light, artificial light and mixed light, in order to analyze the different users' glare perceptions in the classrooms. HDR photographs were developed in 90 different users' working positions in order to calculate the two glare indices (DGP, DGI) in each user's position using Evaglare and Aftab Alpha software. At the same time, a survey was administered to the 90 participants, 30 in each configuration. The questionnaire was repeated for the three configurations. Each of the 30 participants was exposed to the three lighting conditions of the design classroom and asked to answer questions, to evaluate their level of glare in space. The complete information was registered and used for different statistical analysis.

3. Experimental Procedure

3.1. Dynamic Range photography and glare indices

University students were exposed to three different light settings of the computer design classrooms: configuration 01 using natural light, 02 using artificial light (with black drapes), and 03 using artificial light and natural light (mixed light). There were thirty students in each configuration 12 male, 18 female. The total of (N= 90) participated voluntarily, students judged the different light settings by rating. The ninety different working positions were

photographed with series of three exposures levels using a 1200D canon EOS camera using circular Fisheye lens Sigma (4.5mm f/2.8 EX DC Circular Fisheye HSM), in order to generate the spherical 180° HDR images. We have chosen the high dynamic range images because these store a much larger range of luminance information [9] in a digital image than a conventional low dynamic range (LDR) photograph, and present a similar range of luminance to that experienced with the human visual system [10]. There have been many studies using HDR for research purposes such as luminance evaluation, glare evaluation, and daylighting analysis [9, 11]. To calculate glare indices and the luminance distribution within a field of view, a Aftab Alpha software was used for evaluating glare originating from daylight and artificial light.

3.2. Photometric measurements and development of model

Experimentation and measurements were carried out on a typical Mid-season day in the Month of May 2016, under specific local sky conditions [12]. For the measurement, we have used a light meter (Luxmètre_CA_813) to measure: 1) illumination on table 2) eye level illumination, and 3) illumination on the vertical screen. The Aftab Alpha software was used to assess the following information: 1) Average luminance, 2) Maximum luminance, and 3) background luminance on the visual field. We have entered the data previously cited in statistic software.

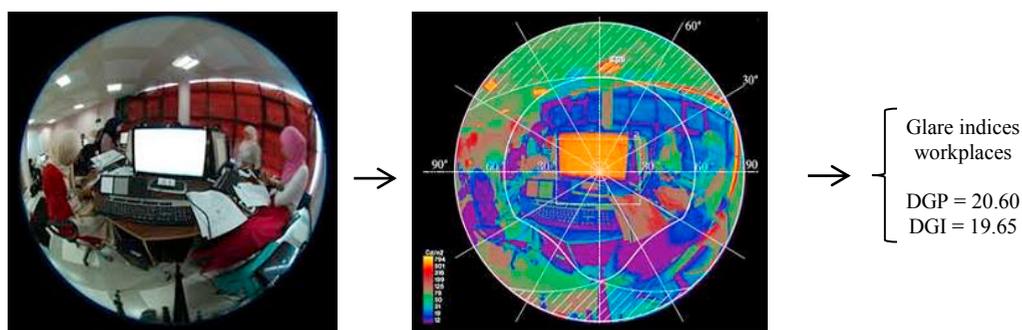


Fig. 1. Image processing / Glare indices

3.3. Data Analysis

In the literature, many different semantic glare rating scales are used that contain terms like visible, acceptable, comfortable and tolerable. However not always the same words are used, which can give different interpretations, and make the comparison between different glare indexes very difficult or even distort the reality of indicator. This is why in our study participants were asked to evaluate the different light settings by rating three qualitative factors: visual comfort, naturalness, and light level, each question was answered using numbers from (2+) to (2-), where (2+) corresponded to “fully agree” and (2-) corresponded to “fully disagree”, combined with factors: ‘extent lighting noise’ in design classroom, and glare ((exist), (does not exist)). For each light setting the questions listed in table 1 were asked.

Multiple linear regression has been used to investigate the relationship between continuous variables such as lighting levels or average illuminance levels. However, we are also interested in our study to understand how glare index value and model developed value are related with glare perceived by users (actual glare). Therefore, a logistic ordinal statistic regression has been adopted, in order to visualize the performance and reliability of results. The recent years have seen an increase in the use of Receiver Operating Characteristic (ROC) graphs in the machine learning community, due in part to the realization that simple classification accuracy is often a poor metric for measuring performance [13, 14]. The graphs are useful for organizing classifiers and visualizing the performance of a different models of glare prediction [15]. That is why in our study we have plotted ROC graphs, a very useful tool for organizing classifiers and visualizing.

Table 1. A part of questionnaire submitted to the ninety students

A- "Is there a discomfort caused by the presence of light in the computer room?"							
		Yes		No			
Question 1: How do you qualify the general atmosphere created by the light in the computer room?							
(Light level)	Very Dark	-2	-1	0	+1	+2	Very Bright
(Visual comfort)	Very boring	-2	-1	0	+1	+2	Very Stimulating
(Naturality)	Very Artificial	-2	-1	0	+1	+2	Very Natural
(Visual comfort)	Very Glaring	-2	-1	0	+1	+2	Very Comfortable

4. Results and analysis

Overall, the level of significance ended up being higher for the two variables 'Visual comfort' and 'Light level' than 'Naturality' for the evaluation of visual comfort in the computer design classroom. So, the statistical analysis shows two significant correlations. The first one, between Visual comfort ($p = 0.013$) and 'Naturality' the second, between Light level and 'Naturality' equal to ($p = 0.022$). In order to check the degree of correlation and the relationship between the results obtained (significant correlation) and the glare indices 'DGP' and 'DGI', a logistic and ordinal regression has been used.

The ordinal regression was used to develop the model for glare assessment, regression analysis based on 'DGI' and 'DGP' and photometric measurements such as illumination on a table, illumination on the vertical screen, average luminance and student glare perception in the classroom. The model developed is obtained as an excel sheet outcome of ordinal regression analysis, where the quality is evaluated based on photometric measurements and glare indices inputs. In order to evaluate the accuracy of the model author's used Receiver Operating Characteristics (ROC) are a way of graphically displaying true positives versus false positives across a range of models and of selecting the optimal model. The high sensitivity corresponds to high negative predictive, high specificity corresponds to high positive predictive. The obtained results of diagnostic accuracy are shown below:

4.2. For the variables glaring and comfortable

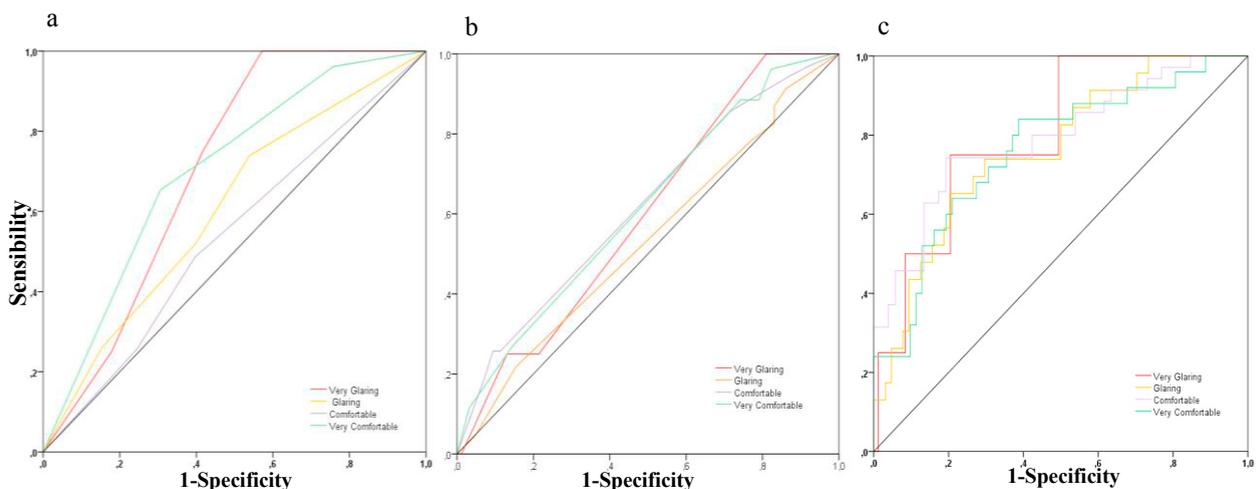


Fig. 2. (a) ROC graphs classifier DGP (Glaring vs Comfortable); (b) ROC graphs classifier DGI (Glaring vs Comfortable); (c) ROC graphs classifier Developed Model (Glaring vs Comfortable)

Comparing the different glare indexes, Fig. 2 shows that there is a big difference between the three methods of glare prediction. It can be observed that the curve Glaring / Comfortable for DGI is the closest to the reference line of the plot. This shows that the DGI has registered the maximum error pruning of the predicted discomfort with the poor performance of the decision. In addition, from Fig. 2, it can be seen that the area under a ROC of variables Glaring/ Comfortable for DGP is of higher overall accuracy than DGI. However, an area under a ROC of 'Very Glaring' is 0,705 (70%) and 'Very Comfortable' is 0,701. It shows that the DGP can predict these two variables with a better accuracy than the others variables. However, the developed model shows probabilities much higher than the two others, since the area under a ROC of the developed model is much higher, with minimum of 0,761 (probability of 76.10 %) for variable 'Very Comfortable' and maximum of 0,801 (probability of 80.10 %) for variable 'Very Glaring'.

Tab 2. Area under a ROC of variables (Glaring, Comfortable) for DGP, DGI and model developed

	<i>DGP</i>		<i>DGI</i>		<i>Developed Model</i>	
		Area		Area		Area
<i>Very Glaring</i>	Very Glaring	0,705	Very Glaring	0,598	Very Glaring	0,801
	Glaring	0,605	Glaring	0,532	Glaring	0,762
<i>Very Comfortable</i>	Comfortable	0,553	Comfortable	0,618	Comfortable	0,791
	Very Comfortable	0,701	Very Comfortable	0,615	Very Comfortable	0,761

4.1. For the variables Boring and Stimulating

Fig. 3 shows that there is a big similarity between DGP and DGI of glare prediction probabilities, however, it can be observed that the curves boring/ stimulating for DGP show the lowest probabilities with poor performance values to predict light quality assessment in computer design classrooms. In addition, from Fig. 3, we can see that the area under a ROC for DGI metrics is lower than 65%. for variables 'Stimulating, Boring' which is a reasonable prediction performance, however, we have obtained a result higher than 75 % for 'Very Boring and Very Stimulating' with the developed model, and the model shows much higher probabilities than the two glare indexes mentioned above, inasmuch as area under a ROC is between minimum (probability of 71.70 %) registered for variable 'Boring' and maximum of 0.903 (probability of 90.03 %) registered for variable 'Very Boring'. In general, it can be seen that the developed model shows a better overall accuracy.

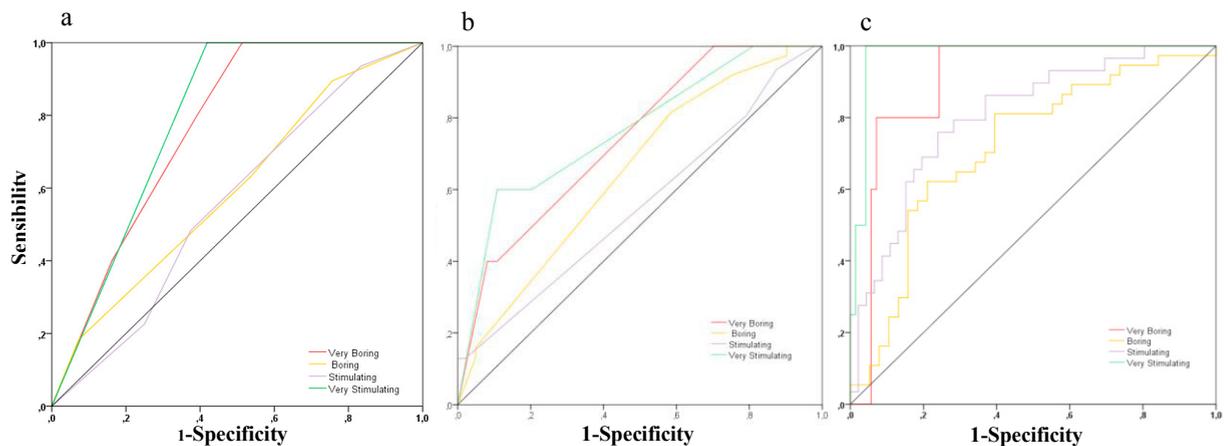


Fig. 3. (a) ROC graphs classifier DGP (Boring vs Stimulating); (b) ROC graphs classifier DGI (Boring vs Stimulating); (c) ROC graphs classifier Model Developed (Boring vs Stimulating)

Tab 3. Area under an ROC of variables (Boring, Stimulating) for DGP, DGI and model developed

	<i>DGP</i>		<i>DGI</i>		<i>Model Developed</i>	
		Area		Area		Area
<i>Very Boring</i>	Very Boring	0,764	Very Boring	0,741	Very Boring	0,903
	Boring	0,597	Boring	0,649	Boring	0,717
<i>Very Stimulating</i>	Stimulating	0,478	Stimulating	0,557	Stimulating	0,804
	Very Stimulating	0,791	Very Stimulating	0,765	Very Stimulating	0,975

5. Conclusion

The results from experiments by users in university computer design classrooms show that out of the three glare metrics DGP, DGI, and a developed model based on semantic rating scales, the DGI metrics is not the best for the assessment of Glaring/Comfortable but provides reasonable predictions for Boring/ Stimulating. By contrast, DGP predicts ‘Glaring’ better and Boring/ Stimulating worse. The developed model is the most robust of the three glare probabilities prediction metrics for both variables Glaring/Comfortable with probabilities prediction equal to 80.01% and 90.03% for the variables Boring/Stimulating. The authors generally recommend the use of the developed model for the assessment of light quality for indoor tasks such as computer screens and office work. We hope that this article advances the general knowledge about lighting quality felt by users, in university computer design classrooms using computer screens

References

- [1] Nazzal, Ali A. A new evaluation method for daylight discomfort glare. *International Journal of Industrial Ergonomics* 2005; 35:295-306.
- [2] Boyce, Peter R. Lighting research for interiors: the beginning of the end or the end of the beginning. *Lighting Research and Technology* 2004;36:283-293
- [3] Reinhart, Christoph F ,Wienold, Jan. The daylighting dashboard--A simulation-based design analysis for daylit spaces. *Building and environment* 2011; 46:386-396.
- [4] International Commission on Illumination (CIE), 1983. Discomfort glare in the interior working environment. CIE Publication 55.
- [5] T. Iwata, M. Tokura. Examination of the limitations of predicted glare sensation vote (PGSV) as a glare index for a large source: towards a comprehensive development of discomfort glare evaluation. *Lighting Research and Technology*, 30 (2) (1998), pp. 81–88.
- [6] Glare constant Gw for the evaluation of discomfort glare from windows. *Solar Energy*, 78 (1) (2005), pp. 105–111.
- [7] Suk, Jae Yong and Schiler, Marc and Kensek, Karen. Investigation of existing discomfort glare indices using human subject study data. *Building and Environment* 2017; 113: 121-130.
- [8] Daich Safa, Zemmouri Noureddine, Saadi Mohamed Yacine. A study of optimization of the light shelf system in hot and arid zones. *Proceedings of the 42nd ASES National Solar: American Solar Energy Society Baltimore (Maryland) USA; 2013 April 6-20; 2013.p173-178.*
- [9] Suk, J and Schiler, Marc. Investigation of Evalglare software, daylight glare probability and high dynamic range imaging for daylight glare analysis. *Lighting Research & Technology* 2013; 45: 450-463.
- [10] Daich Safa, Saadi Mohamed Yacine,Zemmouri, Nourddine, Morello Eugenio, Piga Barbara EA , Daiche Ahmed Motie. Evaluation quantitative et qualitative du système anidolique sous un climat chaud et aride. *Proceedings of 3rd International congress on ambiances Volos Greece: Ambiances tomorrow; 2016.*
- [11] Jakubiec, J Alstan and Reinhart, Christoph F. A concept for predicting occupants’ long-term visual comfort within daylit spaces. *Leukos*. 2016; 12:185-02.
- [12] Daich Safa. Simulation et optimisation du système light shelf sous des conditions climatiques spécifiques, cas de la ville de Biskra. Biskra: Université Mohamed Khider Biskra; 2011.
- [13] Provost, Foster J and Fawcett, Tom. Analysis and visualization of classifier performance: Comparison under imprecise class and cost distributions. *KDD*. 1996;97: 43-48.
- [14] Provost, Foster J and Fawcett, Tom and Kohavi, Ron. The case against accuracy estimation for comparing induction algorithms. *ICML*.1998;98:445-453.
- [15] Webb, Geoffrey I and Ting, Kai Ming. A response to Webb and Ting’s on the application of ROC analysis to predict classification performance under varying class distributions. *Machine Learning*.2005:33-38.



CISBAT 2017 International Conference – Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale, CISBAT 2017 6-8 September 2017, Lausanne, Switzerland

Daylighting & Electric Lighting (Green Lighting)

Developing neural networks to investigate relationships between lighting quality and lighting glare indices

Saadi Mohamed Yacine^a *, Zemmouri Nouredine^a, Barbara E. A. Piga^b, Eugenio Morello^b, Daich safaa^a

^aLACOMOFA, laboratory, Department of architecture, university of Biskra 07000, Algeria

^bLaboratorio di Simulazione Urbana 'Fausto Curti', polytechnic of Milan 20133, Italy

Abstract

The present work compares the ability of the two most used glare indices, the Daylight Glare Probability (DGP) and the International Commission on Illumination (CIE) Glare Index (CGI), using Multiple Correspondence Analysis (MCA) and Artificial Neural Networks (ANN). The research investigates the efficiency of indexes in predictive indoor lighting quality. This study was carried out by analyzing data from a survey administered to ninety students in real design classrooms in the city of Biskra, Algeria. The experiment was conducted using three different lighting indoor conditions: natural and artificial lighting and mixed lighting. The true prediction of the Daylight Glare Probability for the variable Comfortable was 60.60%, and for (CIE) Glare Index the prediction values were equal to 44.60% for the same variable.

© 2017 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the CISBAT 2017 International Conference – Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale

Keywords: Design classrooms; Survey; Multiple Correspondence Analysis; Glare index; Artificial Neural Network.

* Corresponding author. Tel.: +39-333-522-4542; fax: +213-53-72-03.

E-mail address: saadiarchitecture@gmail.com

1. Introduction

In modern societies, as a result of urbanization and industrialization, people spend more time indoors than ever before. It is estimated that on average people spend more than ninety percent of their time indoors [1, 2]. Indoor comfort, such as thermal and visual comfort, plays accordingly a significant role and has a large impact on the working efficiency and satisfaction. The indoor environments, including university study environments, should, therefore, be studied since their design and configuration does not only influence an individual's perception of work-related tasks but also affects its general emotional-motivational state, well-being, and productivity of users[3,4,5]. The impact of building simulation tools in quantifying issues, such as visual comfort and energy savings, continues to be seen as significant; lighting analysis trends and interest towards computationally generated models simulations and visualization increased with the availability of powerful and accurate software. These can rigorously simulate buildings and urban spaces for thermal, acoustic, lighting conditions there are different tools and methods for glare assessment, but the most used are glare indices including DGP (Daylight Glare Probability), DGI (Daylight Glare Index), UGR (Unified Glare Rating) and CGI (CIE Glare Index). In the present paper, authors describe a comparative analysis between DGP, the most used glare metrics for the prediction of glare in indoor spaces using artificial lighting and CGI the most recommended glare index used to predict glare in spaces illuminates by natural lighting [6]. The two glare index was compared with the real glare experienced by users in the computer design classrooms. The data were collected using survey administrated to ninety students (users of design classroom). The data was analyzed using Multiple Correspondence Analysis (MCA) and Artificial Neural Networks (ANN), in order to determine which of these glare indexes is the most efficient for glare assessment, in the design classroom in highly luminous climate.

2. Methodology

2.1. Case study

The experimentation was carried out in the real computer design classroom at the University of Biskra, which is located in the south EST. of Algeria, and characterized by a specific local luminous climate [7, 8]. The classroom has a quarter of circle chip, with a radius equal to 10.05 m, 3.87 m height. It receives daylight from North-EST facing unilateral windows 3 by 10 m, daylighting is supplemented by electric lighting from ceiling mounted fluorescent fixtures. In the classroom, there are five tables with six workspaces for each one, hence 30 workspaces in total. As illustrated in (Fig. 1).

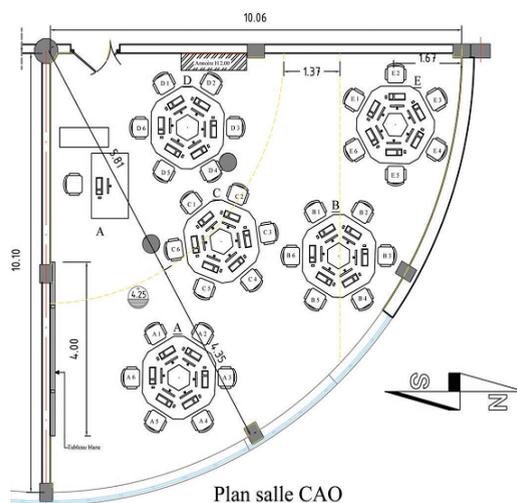


Fig. 1. Plan of the design computer class room

2.2. Processes

In order to assess the glare level in three different lighting class conditions, three different configurations of the design classroom were developed using exclusively: daylighting, electric lighting from the ceiling and the both of them, as illustrated in (Fig. 2).



Fig. 2. The same workplace under three different lighting configurations of class room.

In order to quantify the values of luminance and glare index DGP and CGI, at the eye level of users, a calibrated camera 1200D canon EOS was mounted on a tripod at 1.20 m high, equipped with a circular Fisheye lens Sigma (4.5mm f/2.8 EX DC Circular Fisheye HSM); this type of lens is recommended since it better resembles the human visual field [9, 10] suggests modified human visual field according to the total field of [11]. The fisheye HDR photography was analyzed with using Eva glare software for measuring DGI and CGI [12] in the different workplace spaces of a classroom. In the same time, a survey was administrated to ninety students, in order to assess their real discomfort glare during the task to ask the students: design using computer tool. Refer to the literature review seven questions [13, 14] were asked to the students. Seen table 1:

Table 1. A part of questionnaire asked to the students

Question A								
Is there a discomfort caused by the presence of light in your workplace space?								
Yes					No			
Question B								
How do you qualify the general atmosphere created by the light in workplace space?								
Lighting Factors			Unser's feeling affirmations					
1-	Light level	Very Dark	-2	-1	0	+1	+2	Very Bright
2-	Visual comfort	Very boring	-2	-1	0	+1	+2	Very Stimulating
3-	Naturality	Very Artificial	-2	-1	0	+1	+2	Very Natural
4-	Visual comfort	Very Glaring	-2	-1	0	+1	+2	Very Comfortable
5-	Precision	Blurry	-2	-1	0	+1	+2	Precise
		Not defined	-2	-1	0	+1	+2	Well defined
6-	Pleasantness	Unpleasant	-2	-1	0	+1	+2	Pleasant

2.3. Statistical and Neural Network analysis

The data collected in the ninety students' workplaces have been analyzed using statistic tool in order to compare the survey results with glare assessment using different glare indexes. Therefore, in the first step a Multiple

Correspondence Analysis was used in order to study the degree the correlation results between the seven variables of the questionnaire to relationships of several ordinal dependent variables.

To determine a reliable prediction DGP and CGI, an ANN model based on Pleasant and Comfortable variables selected in the first MCA study with significant correlation (p -value <0.05) was used. In the ANN modeling process, we divided the data in tow subsets: nearly 35% of the student for constructing the models (training subset) and the remaining 65 % for testing the model (as the validation subset). After evaluating the model, we applied Multiple Layer Perceptron (MLP) networks to determine relevant relationships and to determine which is the best glare index. In terms of reliable prediction performance of the DGP and CGI glare index. With ANN we used a three-layer MLP network with 4 variables (15 nodes) in the input layer, 3 nodes in the middle layer and 8 nodes in the output layer. The hidden layer had 3 neurons, determined as the optimal configuration giving the lowest error in the training and testing sets of data with minimal computing time [15, 16].

3. Results and discussion

3.1. Multiple correspondence analysis

Data collected from (Fig. 3) shows some pitfalls, which may exist when developing Multiple Correspondence Analysis models. Three of the seven variables tested (were not significant), these variables are: Naturality (r 0.20, P -value 0.65), Stimulating (r 0.15, P -value 0.82), Precise (r 0.15, P -value 0.82). Overall, we obtained a significant correlation between the remaining variables. In addition, we note that tow variables ‘Comfortable’, ‘Pleasantness’ (see Fig. 3) show much higher significant correlation than the others, with the p -value less than 0.01 and (r more than 0.85). So these two variables are the most representative of real discomfort sensation of the users.

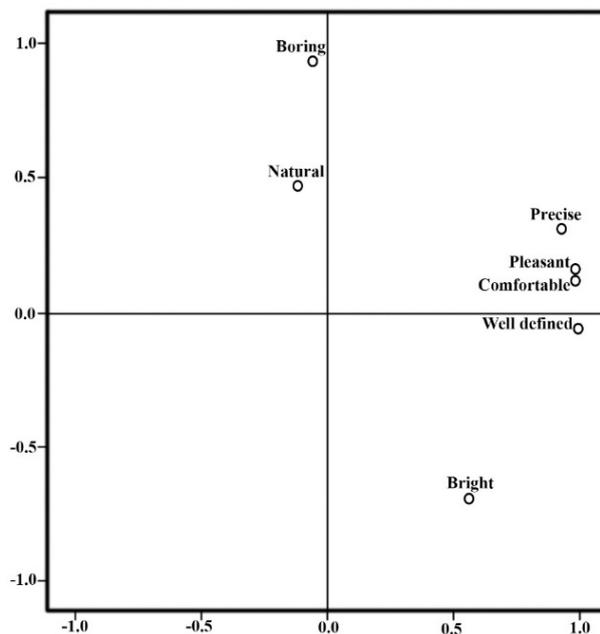


Fig. 3. Multiple correspondence analysis for design using computer.

3.2 Artificial neural network model

As regards the ANN network the architecture that was developed, included fourteen neurons for CGI and twelve neurons for DGP in the hidden layer. For DGP: the overall average of the relative errors are fairly constant across training 40.20%, with a value for Unpleasant/Pleasant equal to 43.10%, and 39.20% for Glaring/Comfortable, a percentage of 46.54 % was reached testing model with a value for Unpleasant /Pleasant equal to 43.10% and 39.20%, Glaring/Comfortable.

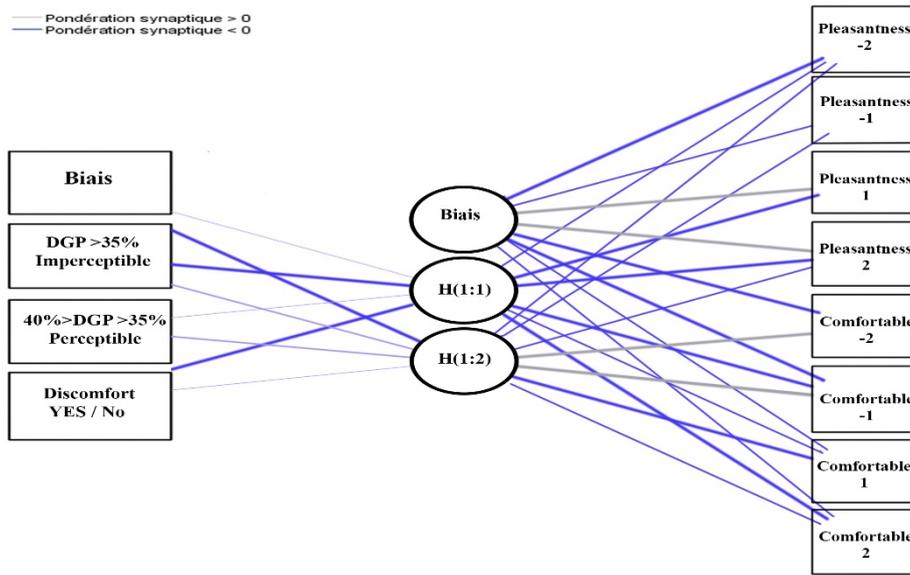


Fig. 4. Multi-layer perceptron network structure for DGP glare

However, we have obtained a different result with the CGI, so the percentage average overall relative error for training model was 65.10 %, with percentages of 55.60 % for Unpleasant /Pleasant, and 69.60 % for variables Glaring/Comfortable, In addition, referred to (see Fig. 4) average overall relative error for Testing model was 50.36 %, with percentages of 43.80 %for Unpleasant /Pleasant, and 56.30 % for variables Glaring/Comfortable. Both ANN model reasonable prediction which gives us some confidence that the model is not overtrained, and that the error in future cases, scored by the network will be close to the error reported in (Tab 2).

Tab 2. Summary training testing (MLP) Model for the DGP and CGI Glare index, model with ninety Students

DGP index			
Training	Sum of Squares Error		110.032
	Average Overall Relative Error		41.20%
	Relative Error for scale dependents	Unpleasant /Pleasant	43.10%
		Glaring / Comfortable	39.20%
Testing	Sum of Squares Error		46.546
	Average Overall Relative Error		43.20%
	Relative Error for scale dependents	Unpleasant /Pleasant	43.80%
		Glaring / Comfortable	39.50%
CGI index			
Training	Sum of Squares Error		109.382
	Average Overall Relative Error		65.10%
	Relative Error for scale dependents	Unpleasant /Pleasant	55.60%
		Glaring / Comfortable	69.60%
Testing	Average Overall Relative Error		35.518
	Average Overall Relative Error		50.36%
	Relative Error for scale dependents	Unpleasant /Pleasant	43.80%
Glaring / Comfortable		56.30%	

4. Conclusions

Multi-Layer Perceptron (MLP) and Neural Network Models, that were used to predict which is the closest glare index (DGP, CGI) to the real perception of the students, using glare indicators and survey in the computer design classrooms, under highly luminous climate. The model developed appears to perform reasonably well. Unlike traditional statistical methods, such as quantitative and categorical approach base on simple linear regression and correlation. The Neural Network Models provides the dynamic output as further data (lighting environment, users) is fed to it, while the ANN do not require performing and analyzing sophisticated statistical methods [17]. So based on the results from ANN and MLP models developed in the previous sections, the predictive value of the ANN model developed based on DGP is most robust, than the ANN model developed using CGI index, under the local luminous sky conditions in the city of Biskra, the DGP model predicts discomfort glare with a higher probabilities performance assessment of the real glare, with relative error for scale for variables Glaring/Comfortable equal to 39.20 % and percentage of 43.80% for variables Unpleasant/Pleasant. The authors recommend the use of the ANN model developed based on DGP, for the assessment of light quality indoor spaces under the local luminous climate. Finally, these results on the use of ANN for population analyses open new fields for their applications to architecture specifically for the assessment of the comfort and well-being indoors spaces.

References

- [1] Luongo, Julia Cristina. *Towards Defining Healthy Buildings: Investigating the Effect of Building Characteristics and Interventions on Indoor Air Microbial Exposures and Energy Efficiency*. Colorado: University of Colorado; 2016.
- [2] Steinemann, Anne and Wargocki, Pawel and Rismanchi, Beh. Ten questions concerning green buildings and indoor air quality. *Building and Environment* 2017; 112:351-358.
- [3] Hannah, Ryan. *The effect of classroom environment on student learning*. Michigan: Western Michigan University; 2013.
- [4] Werthamer Larsson, Lisa and Kellam, Sheppard and Wheeler, Leonard. Effect of first-grade classroom environment on shy behavior, aggressive behavior, and concentration problems. *American Journal of community psychology* 1991;19: 585-602.
- [5] Delvaeye, Ruben and Stroobant, Ludwig and Klein, Ralf and Hanselaer, Peter and D'Herdt, Peter and Breesch, Hilde and Ryckaert, Wouter. *Monitoring of Daylight Controlled Dimming Systems and Occupancy in Three Equivalent Classrooms*. CLIMA 2016-proceedings of the 12th REHVA World Congres. Aalborg: Aalborg University, Department of Civil Engineering; 2016.
- [6] Navvab, M. & Altland, G. Application of CIE glare index for daylighting evaluation. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Taylor & Francis 1997; 26: 115-128.
- [7] Daich Safa, Zemmouri Noureddine, Saadi Mohamed Yacine. *A study of optimization of the light shelf system in hot and arid zones*. Baltimore, USA: American Solar Energy Society; 2013.
- [8] Safa Daich. *Simulation et optimisation du système light shelf sous des conditions climatiques spécifiques, cas de la ville de Biskra*. université mohamed khider biskra; 2011.
- [9] Suk, Jae Yong and Schiler, Marc and Kensek, Karen. Investigation of existing discomfort glare indices using human subject study data. *Building and Environment* 2017; 113: 121-130.
- [10] Hirning, MB and Isoardi, GL and Cowling, Ian. Discomfort glare in open plan green buildings. *Energy and Buildings* 2014; 70: 427- 440.
- [11] Guth, Sylvester K. Computing visual comfort ratings for a specific interior lighting installation. *Illuminating Engineering* 1966; 61:634.
- [12] Suk, J and Schiler, Marc. Investigation of Evalglare software, daylight glare probability and high dynamic range imaging for daylight glare analysis. *Lighting Research & Technology* 2013; 45: 450-463.
- [13] Vischer, Jacqueline C. *Towards an environmental psychology of workspace: how people are affected by environments for work*. *Archit Sci Rev* 2008;51(2):97-108.
- [14] Galasiu, Anca D and Veitch, Jennifer A. Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review. *Energy Build* 2006;38:728-42.
- [15] Gelman, Andrew and Rubin, Donald B. Inference from iterative simulation using multiple sequences. *Statistical science* 1992; 45:457-472.
- [16] Lek, Sovan and Delacoste, Marc and Baran, Philippe and Dimopoulos, Ioannis and Lauga, Jacques and Aulagnier, Stéphane. Application of neural networks to modelling nonlinear relationships in ecology; *Ecological modelling* 1996;90: 39-52.
- [17] Molina, Isabel and Rao, JNK. Small area estimation of poverty indicators. *Canadian Journal of Statistics* 2010; 38: 369-385.



PLEA 2017 EDINBURGH

Design to Thrive

Effects of Anidolic Integrated Ceiling in interior daylight distribution for deep spaces under high exterior illuminance levels.

Safa Daich¹, Mohamed Yacine Saadi¹, Morello Eugenio², Barbara E.A Piga², Ahmed Motie Daiche¹, Nouredine Zemmouri¹

¹ LaCoMoFa, department of architecture, Biskra, Algeria;

² Laboratory of Urban Simulation 'Fausto Curti', department of architecture and urban studies, Milan, Italy

Abstract: The luminous performance of Anidolic Integrated Ceiling (AIC) is evaluated experimentally under real climate conditions by using physical scale models (scale ¼), for a 12m deep room. This passive system has proven its efficiency to optimize daylight distribution in deeper spaces, ensure visual comfort and reduce glare discomfort. The present paper gives a quantitative assessment of AIC and has two objectives. The first is to use photometrical measurements (desk height illuminance) in two physical models (reference model and test model) in order to confirm the effectiveness of this system to illuminate deeper in spaces. The second objective is to study its performance to reduce glare discomfort with regards to the building orientation under high exterior illuminance level by using spherical images. The quantitative evaluation in terms of illuminance level shows that the AIC improves the interior luminous environment, channels daylight to the depth and at 12m from the window, the horizontal illuminance reaches 300lux. Results from Daylight Glare Probability (DGP) analyzed, show that this system reduce significantly glare discomfort (more than 50%) and performs well for all orientations and the north one is the best under high exterior illuminance levels.

Keywords: Daylighting, Anidolic Integrated Ceiling, Quantitative evaluation, experimental procedure, DGP analysis, building orientation.

Introduction

Visual comfort is a subjective phenomenon that involves the perception of luminance in space. It is not just a question of quantity but also of quality and distribution. Contrast levels and glare can affect tremendously the interior luminous environment. Designers need to make wise and sustainable decisions in terms of daylighting to create pleasant interior spaces, good working conditions and in the meanwhile reduce energy consumption (Smiley, 1996). Performance and productivity will depend also on the interior daylighting conditions as reported by many researchers (Romm et al, 1998; Edwards et al, 2002; Heschong et al, 2002a; Heschong et al, 2002b). Daylight in hot and arid regions with deep clear blue skies, high level of sky brightness and excessive horizontal illuminance levels (Daich et al, 2016) is often a problematic issue for decisions. In order to achieve good living and working daylight conditions, we need to be able to choose design strategies that can be applied in similar luminous conditions. Many research projects during the last decade have concentrated efforts to produce lighting systems and technologies in order to control interior daylighting, such a system is the Anidolic Integrated Ceiling 'AIC'. This passive system was developed at

the Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB) in Switzerland (Courret, 1999) and its design was based on non-imaging optics theory (Welford and Wilson, 1989). The system comprises of an external collector integrated into the upper part of the facade, followed by a reflective light pipe equipped with two internal Anidolic elements in both extremities. The exit aperture is located at the rear part of the ceiling which redistributes the collected light (Santos, 2009).

Several studies had proved the effectiveness of this device to illuminate naturally deep buildings, control the daylight penetration in space, avoid glare and contribute effectively to the energy saving for artificial lighting (Marwwen, 2016; Roshan et al, 2013). The aim of the present research is to study the effect of using Anidolic Integrated Ceiling on the interior daylight distribution in deep office buildings under specific luminous conditions.

Methodology

The objective of the methodology is to evaluate, through experimental tests, the quantitative and the qualitative effect of specific Anidolic Integrated Ceiling (AIC) in interior daylight distribution, for the local daylight climate of Biskra, Algeria (latitude 34°48'). For this, two physical scale models were constructed and the performances analysis of the system were made through measurements and photographic support 'HDR images'.

Experimental models

Many studies had shown the usefulness of the use of the scale models to evaluate daylighting systems performances in buildings (Baker et al, 1993; Tsikaloudaki et al, 2008). For this, two identical physical models were built with a scale of 1:4 and have the purpose to test the AIC effect to enhance daylighting in a rectangular office room with 6 m wide, 12 m deep and 3.5 m high. One was used as the reference case, while the other was the test case, where the Anidolic Integrated Ceiling was installed in the smallest façade. The reference façades of the both case study are presented in fig.1. The models had identical interior photometric properties with the following surface reflectance: wall=50%, floor=40% and ceiling=92%. The AIC was designed with regards the geographical characteristics of the city of Biskra and we have used the mathematical model given by Welford and Winston (1989). The AIC reflectance is 96%.

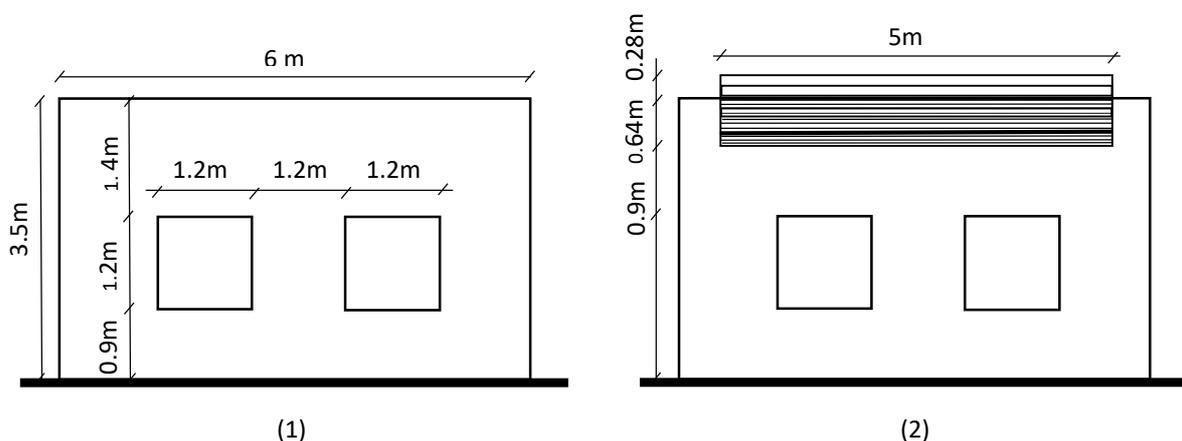


Figure 1. Reference façades for reference model (1) and test model (2)

Measurements and photographic images

Several measurements and photographic images were made with the physical scale models (reference and test model) under the same outside conditions. The measurements, in terms

of illuminance level, were taken in the central axis of the room at the level of working plan (0.9m) and performed for five measurements points A, B, C, D and E presented in figure 2.

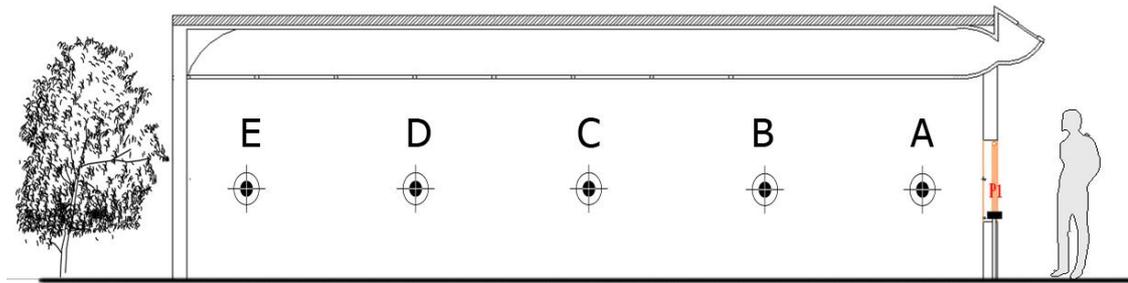


Figure 2. Test model section (AIC and measurement points)

The HDR images were taken from a viewspot of 10x10cm located in the center of the short wall facing the reference façades at the eye level (160cm) and taken for four periods of the day (at 9 am, 11 am, 3 pm and 5 pm) (see Fig.3). The HDR photographs were taken by using 1200D Canon EOS equipped with a circular Fisheye lens Sigma (4.5mm f/2.8 EX DC Circular Fisheye HSM). The Fisheye HDR images were analyzed in Evalglare software and Aftab Alpha software in order to calculate the DGP in the different situations. For the calibration of the HDR images captured from the physical model, Aftab Alpha software was used with its calibration protocol which consists in taking luminance measurements at a given point of the image to be a luminance of Reference for the other luminance points.

The effect of the orientation on the system performance was also studied by rotating the two scale models for the four orientation (north, south, east and west).



Figure 3. Physical scale model and Viewspot position

Local daylight climate characteristics

The measurements were conducted in the city of Biskra, Algeria (latitude: 34.48, longitude: 5.44N) in January under real climate conditions. The microclimate of this city is characterized by high temperature, exceeding 30°C in summer, little rainfall and sunny skies. Research has given by Daich et al (2014) shown that this region is characterized mainly by an intermediate sky cover conditions which approximate 40% and has a very high exterior horizontal illuminance level especially during summer seasons, reached 83000lux in May. Moreover, research was given by Daich et al (2015) has shown that the sky condition was set as a clear sky with the sun and high luminous level during the day.

Assessing the performance of AIC

The illumination levels prevailing in the two models during a typical day under clear sky conditions are compared in order to study the contribution of the AIC to increase of illumination at the rear part of the space, as well as on the uniformity of daylight distribution. The measurements have been performed according to the orientation and the depth of the room. The quantitative results are summarized in Fig. 4.

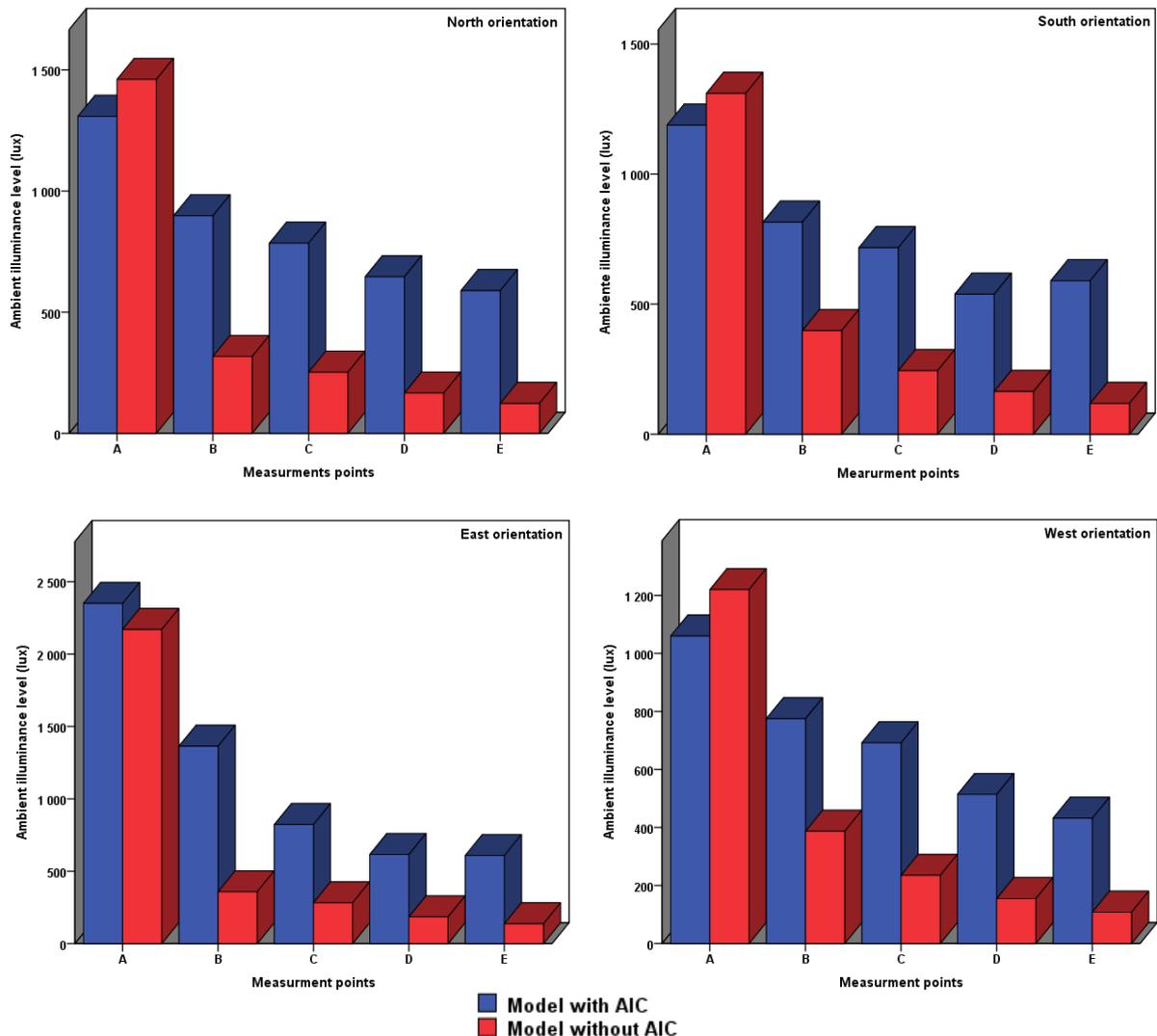


Figure 4. Desk height illuminance values monitored in the two physical models for all directions

According to the graphs, it's clear that the AIC perform well for all orientations and the daylight uniformity is approximately equal compared with the reference model. The system enhances the daylight levels in the depth and the quantity of light at points B, C, D and E are tripled for all orientations. The illuminance values in these points are comparatively situated between 400lux and 700lux. In addition, we can observe that the AIC decrease the illuminance level at point A with its exterior Anidolic element. Therefore, it is obvious that the horizontal illuminance level in north orientation is better than other in terms of quantity and quality of the interior daylighting.

DGP Analysis

Daylight Glare Probability (DGP) is a metric used to predict the appearance of discomfort glare in spaces. It takes account the overall brightness of the view, the position and the size of glare sources and visual contrast. In our investigation, the DGP values are calculated from HDR images which were captured in the two models for four periods of the day at 9:00 am, 11:00 am, 3:00 pm and 5:00 pm for all orientations. The results recorded are presented in Fig. 5 and Fig. 6.

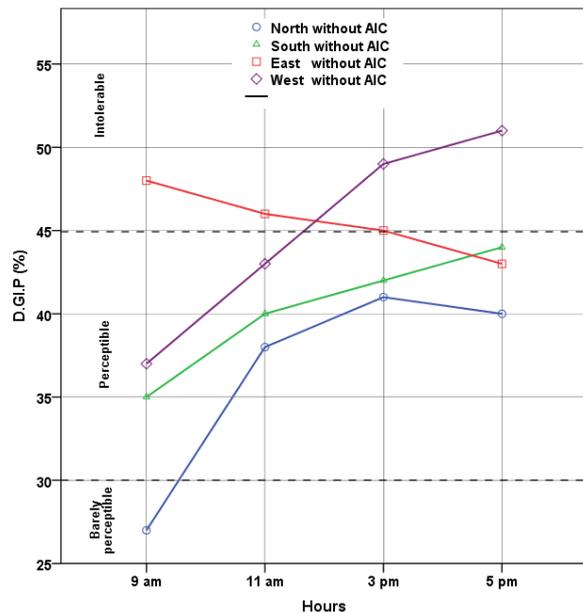


Figure 5. D.G.I.P calculated in the reference model

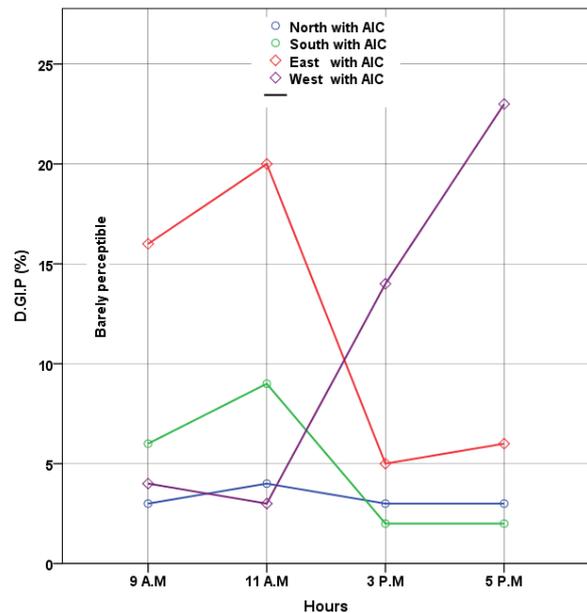


Figure 6. D.G.I.P calculated in the test model

Comparing the results of the two graphs show that the AIC reduce significantly the discomfort glare. Fig. 6 indicates that the DGP values recorded in the test model are less than 30% and the glare is imperceptible during the different hours of study. However, we found that the north orientation gives stable values of DGP during the day compared with the others directions. The maximum value of this index is obtained in morning (20% in the east) and in the afternoon (23% in the west). In addition, the DGP values calculated in the reference model varies according to the orientation and the time. The results have shown that its values are greater than 30% in the various study hours. Therefore, each orientation has a specific time when DGP is higher. The discomfort glare is intolerable in the east (at 9 am, 11 am) and in the west (at 3 pm, 5 pm). Its considers as perceptible at South (for the four periods), at North (at 11 am, 3 pm and 5 pm), at the east (at 3 pm, 5 pm) and at the west (at 9 am, 11 am). The glare is barely perceptible at the north during early morning.

Conclusion

The results of this study showed that the use of the Anidolic Integrated Ceiling is an excellent mean to enhance interior visual comfort in deep spaces in climates dominated by clear sky conditions and high exterior illuminance level. The system contributes to a better use of daylight for all orientations and the illuminance levels are tripled compared with the reference model. Moreover, the system contributes as a regulator, it can ensure a homogeneous of the daylight distribution in the room and reduce the amount of light

received by the window, by its external anidolic element, which consequently reduces the glare. These results as a whole indicate that the performance of AIC in north orientation is better than other under these specific climate conditions. However, the glare analysis results have shown that the AIC has shown a significant contribution to improve the indoor daylight quality and reduce the discomfort glare. It performs efficiently for all orientation and the DGP values are less than 30% for most of the time. In conclusion, this research confirms that an AIC can ensure great promises in terms of quantity and quality of daylighting in deep spaces (12m) and shows that the north orientation is the best from the point of view of uniformity of the daylight distribution as well as the visual comfort.

References

- Baker, N., Fanchiotti, A. and Steemers, K. (1993). *Daylighting in Architecture: a European reference book*. Commission of the European Communities, DG XII for Science. Research and Development, James and James, Brussels.
- Courret, G. (1999). *Systèmes Anidoliques d'Éclairage Naturel*. PhD. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Daich, S., Saadi, M.Y., Zemmouri, N. and Daiche, A.M., (2014). Modeling light shelf systems for a sustainable interior sunlight environment under specific climate conditions Design Communication Conference Atlanta 2014, Atlanta, USA, 1-4 October 2014.
- Daich, S., Zemmouri, N., Saadi. M. Y., Eugenio, M. and Piga, B.E.A., (2015), Modeling of an anidolique daylight system for a luminous integrated environment. Advance Building Skins Bern 2015, Bern, Switzerland, 3- 4 November 2015.
- Daich, S., Zemmouri, N., Saadi. M.Y., Eugenio. M. Piga. B.E.A. and Daiche, A. M., (2016). Evaluation quantitative et qualitative du système anidolique sous un climat chaud et aride. 3rd International Congress on Ambiances, Volos 2016, Volos, Greece, 21- 24 Septembre 2016.
- Edwards, L. and Torcellini, P. (2002). *A Literature Review of the Effects of Natural light on Building Occupants*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Freewan, A. (2016). Using Tubular Daylighting Systems to Improve Illuminance Level in Double Loaded Corridors in Educational Buildings. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 10 (2), pp.184-196,
- Heschong, L., Wright, R. L. and Okura, S. (2002a). Daylighting Impacts on Human Performance in School. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 31, pp.101-114.
- Heschong, L., Wright, R. L. and Okura, S. (2002b). Daylighting Impacts on Retail Sales Performance. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 31, pp. 21-25.
- Romm, J. and Browning, W. (1998) *Greening the Building and the Bottom Line: Increasing Productivity through Energy-Efficient Design*. NIST special publication, 888, pp.1-8.
- Roshan, M., Kandar, M.Z.B., Nikpur, M., Mohammadi, M.P. and Ghasemi, M. (2013). Investigating the performance of Anidolic Daylighting System with respect to Building Orientation in Tropical Area. *An International Journal of Engineering Science and Technology*, 3 (1), pp. 2250-3498
- Santos, S.D.P. (2009). *Advanced Daylighting Systems: Comparative Study of Prismatic Panels, Laser-Cut Panels and Channel Panels*, Master thesis. University of Lisbon.
- Smiley, F. (1996). Students delight in daylight, *International Association for Energy Efficient Lighting Newsletter*, 5 (2), pp. 11–12.
- Tsikaloudaki, K., Anagnostou, S. and Nichoritis, K. (2008). Investigating the performance of anidolic vertical openings under real conditions in Greece. *Passive and Low Energy Architecture*. PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22nd to 24th October 2008.
- Welford W. T. and Wilson R. (1989). *Non Imaging Optics*. Academic Press, New York.

Évaluation quantitative et qualitative du système anidolique sous un climat chaud et aride

Safa Daich, Mohamed Yacine Saadi, Nourddine Zemmouri, Eugenio Morello,
Barbara E.A. Piga, Ahmed Motie Daiche

► **To cite this version:**

Safa Daich, Mohamed Yacine Saadi, Nourddine Zemmouri, Eugenio Morello, Barbara E.A. Piga, et al.. Évaluation quantitative et qualitative du système anidolique sous un climat chaud et aride. Nicolas Rémy (dir.); Nicolas Tixier (dir.). Ambiances, tomorrow. Proceedings of 3rd International Congress on Ambiances. Septembre 2016, Volos, Greece, Sep 2016, Volos, Grèce. International Network Ambiances; University of Thessaly, vol. 1, p. 219 - 226, 2016. <hal-01414221>

HAL Id: hal-01414221

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01414221>

Submitted on 13 Dec 2016

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

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

Évaluation quantitative et qualitative du système anidolique sous un climat chaud et aride

Safa DAICH¹, Mohamed Yacine SAADI², Nouredine ZEMMOURI³, Eugenio MORELLO⁴, Barbara E A PIGA⁵, Ahmed Motie DAICHE⁶

1. Département d'architecture, Université de Biskra, Algérie, daichsafa@gmail.com
2. Département d'architecture, Université de Biskra, Algérie, saadiarchitecture@gmail.com
3. Département d'architecture, Université de Biskra, Algérie, pr.zemmouri@gmail.com
4. École polytechnique de Milan, Italie, eugenio.morello@polimi.it
5. École polytechnique de Milan, Italie, barbara.piga@polimi.it
6. Département d'architecture, Université de Biskra, Algérie, motie-d@hotmail.fr

Abstract. *The system presented in this study, called Anidolic integrated ceiling (AIC) is one of the advanced Day lighting systems used to capture, channel and distribute day lighting to the interior space. The present paper gives a quantitative and qualitative evaluation of anidolic integrated ceiling. This device was designed with regard of luminous climate of the city of Biskra (Algeria), installed in the north façade and their luminous performance is assessed experimentally by using scale model, for a 12m deep room. The results of this experimental analysis have shown that the Anidolic Integrated Ceiling offers a great potential for increasing the illuminance level in deep-plan building under hot and dry regions (intermediate sky conditions). In addition, the spherical image shown that the integration of this system provides a good ambiances result by uniform luminance distribution throughout the room which produces a visual satisfaction compared to the reference model.*

Keywords: *anidolic integrated ceiling, hot and dry climate, visual comfort, ambiances, spherical image, test model*

Introduction

Maintenir des conditions confortables pour les usagers d'un espace est une préoccupation des concepteurs. Il est bien connu que l'éclairage naturel intérieur influence énormément la performance et la productivité humaine. Il a été suggéré que l'utilisation de la lumière naturelle dans les bâtiments peut augmenter la productivité des occupants (Edwards et Tortellini, 2002). De plus, une bonne conception d'éclairage demande non seulement de fournir une quantité suffisante de lumière, mais aussi une distribution plus uniforme et bien répartie dans l'ensemble du local (Veitch et Newsham, 1998). Dans les bâtiments de grande

profondeur, le contraste entre la fenêtre lumineuse et le fond de l'espace est également susceptible de créer le phénomène d'éblouissement (Wittkopf et al, 2006). Les travailleurs près de la fenêtre seront obligés d'utiliser des stores pour se protéger de la lumière directe, ce qui rend l'éclairage électrique nécessaire. La stratégie d'éclairage adoptée dans les climats chauds s'appuie sur le contrôle de la pénétration du rayonnement solaire direct (Wittkopf, 2007). La ville de Biskra, qui est notre cas d'étude, est située dans le sud-est algérien (latitude : 34,48, longitude : 5,44 N) et possède un gisement solaire très important excédant 2190 kw/h/m²/an, selon la NASA. Le microclimat de la ville est caractérisé par un ciel ensoleillé, avec peu de précipitations et des températures élevées, supérieure à 30 ° c pendant près de la moitié de l'année. Elle se caractérise également par un ciel intermédiaire avec une couverture nuageuse qui avoisine les 40 % (Daich et al, 2015). De plus, cette ville a un très haut niveau d'éclairement horizontal extérieur surtout pendant l'été qui atteint 83 000 lux pendant le mois de mai (Daich, 2011). Trouver une solution optimale permettant de créer une ambiance lumineuse intérieure satisfaisante tout en veillant à se protéger des rayons indésirables nécessite le recours aux systèmes d'éclairage naturel. L'utilisation du plafond anidolique intégré est une excellente stratégie d'éclairage naturel adéquate aux régions à climat chaud permettant d'augmenter la transmission de la lumière du jour à l'intérieur d'un local tout en contrôlant la composante directe du soleil, d'assurer l'uniformité de la distribution lumineuse et de réduire l'éblouissement pour maintenir le confort des occupants. De plus, Wittkopf et al (2006) et Courret et al (1998), dans une étude comparative (sans et avec plafond anidolique), ont prouvé en outre que l'appréciation personnelle de l'ambiance lumineuse intérieure est plus élevée. Cette sensation est causée par une homogénéité de la distribution et de la bonne répartition de la luminance dans toute la pièce où le plafond anidolique est installé ainsi qu'une satisfaction visuelle des utilisateurs par rapport au modèle de référence. L'objectif de cette recherche est de modéliser un système de plafond anidolique adéquat aux conditions climatiques et lumineuses de la ville de Biskra et d'évaluer ensuite sa performance en termes de qualité lumineuse intérieure.

Description du plafond anidolique intégré

Le système de plafond anidolique intégré (PAI) est l'une des technologies d'éclairage naturel qui a été mis en place dans l'objectif de créer un environnement lumineux intérieur satisfaisant en matière de quantité de lumière et de qualité d'éclairage. Ce dispositif a été développé à l'énergie solaire en laboratoire physique du bâtiment (LESO-PB) de l'École Fédérale de Lausanne (EPFL) en Suisse (Courret, 1999). Le plafond anidolique est un système d'éclairage zénithal conçu pour être situé sur une façade verticale au-dessus de la fenêtre pour ne pas empêcher la vue vers l'extérieur. Le système comprend trois principales composantes : un collecteur sur le côté extérieur de la façade, un conduit de lumière miroir rectangulaire et un élément de distribution à l'extrémité du conduit (Linhart et al, 2010). Le collecteur anidolique zénithal est composé d'un miroir parabolique externe, qui rassemble la lumière du zénith du ciel et de deux miroirs paraboliques internes qui redistribuent la lumière collectée. Les courbes de ces miroirs internes sont conçues et positionnées selon le principe de bord-ray de l'optique non-imagerie, qui stipule que les rayons extrêmes qui entrent dans un système devraient être les mêmes rayons extrêmes sortant du

système (Roshan et al, 2013). Le conduit lumineux est intégré dans un plafond suspendu au milieu de la pièce, composé de deux miroirs de forme parabolique jouant le rôle de concentrateurs qui captent le flux lumineux entrant et le redistribuent sur une zone plus large. Les éléments anidoliques sont placés aux deux extrémités du conduit lumineux. Le PAI offre plusieurs avantages et le système fournit une lumière homogène pour les espaces de grandes profondeurs ; il bloque une grande partie de la composante directe qui contribue à l'éblouissement et cette lumière bloquée sera redirigée vers le centre et le fond de la pièce, entraînant sur un plan de travail, un éclairage élevé (Linhart et al, 2009). Il améliore également le confort visuel pour les occupants qui travaillent à côté de la fenêtre. Des recherches antérieures ont démontré l'efficacité de l'AIC pour augmenter le facteur de lumière du jour dans des locaux profonds sous un climat tropical et subtropical Roshan et al, 2013). La capacité de collecter et de redistribuer la lumière diffuse est l'un des plus grands avantages du système anidolique (Kleindienst et Andersen, 2006). Ce dispositif est adapté pour éclairer les pièces avec la lumière diffuse avec des conditions de ciel couvert à cause de sa partie externe qui recueille les rayons de lumière diffuse avec une grande efficacité. Son fonctionnement dépend essentiellement de l'angle d'incidence des rayons lumineux.

La méthodologie

L'objectif de ce papier est d'étudier les performances à la fois lumineuses et ambiantales du plafond anidolique afin d'éclairer les espaces ayant une grande profondeur, sous des conditions de ciel typique à Biskra. La méthodologie adoptée consiste, dans un premier lieu, à modéliser et optimiser un système de plafond anidolique spécifique à la ville de Biskra. Ensuite, une simulation informatique a été réalisée afin de vérifier la performance lumineuse de ce dispositif. Dans un deuxième lieu, nous avons opté pour un modèle réduit avec une échelle de $\frac{1}{4}$ de l'espace. Le modèle utilisé a 6 m de largeur, 12 m de longueur et 3,5 m de hauteur. Les coefficients de réflexion des parois sont : plafond : 92 %, sol : 40 %, parois latérales : 60 % et PAI : 96 %. Le modèle réduit a été choisi car il offre l'avantage de correspondre le mieux à des études qualitatives de l'espace intérieur ; pour une étude approfondie de l'aspect qualitatif, nous avons eu recours à l'image numérique HDR afin de tracer des cartes de distribution de la luminance à l'intérieur de l'espace et de l'étudier à l'aide d'un objectif fish-eye avec un angle de 180 ° (SIGMA 4.5mm CIRCULAR FISHEYE).

Les performances lumineuses du dispositif

Performances relatives au confort visuel

Une étude menée par (Roshan et al, 2013) avait montré que, dans des conditions de climat tropical, le PAI présenté dans la figure 2 et décrit comme étant de type 5 est la configuration la plus efficace en termes de diffusion et de répartition la lumière. En outre, (Courret et al, 1998) a montré que la partie la plus importante de l'AIC est la conception du collecteur. Pour cette raison et afin d'identifier le gabarit dimensionnel du système, nous avons utilisé d'une part, les caractéristiques

climatiques et lumineuses de Biskra et d'autre part, les modèles mathématiques donnés par Welford et Winston (1989).

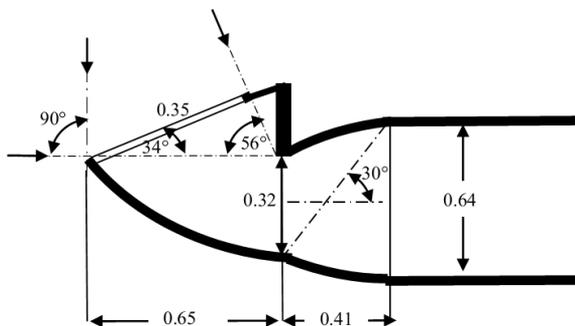


Figure 1. Les dimensions du système de plafond anidolique

Afin d'évaluer l'effet de PAI sur la distribution lumineuse intérieure, on a procédé à deux types de simulation. La première consiste à simuler le modèle de référence (sans PAI), pour la deuxième, on a ajouté le système sur le petit côté. Le plan de travail est situé à 0,9 m au sol et la simulation a eu lieu durant le mois de mai. Les résultats sont présentés dans la figure 2.

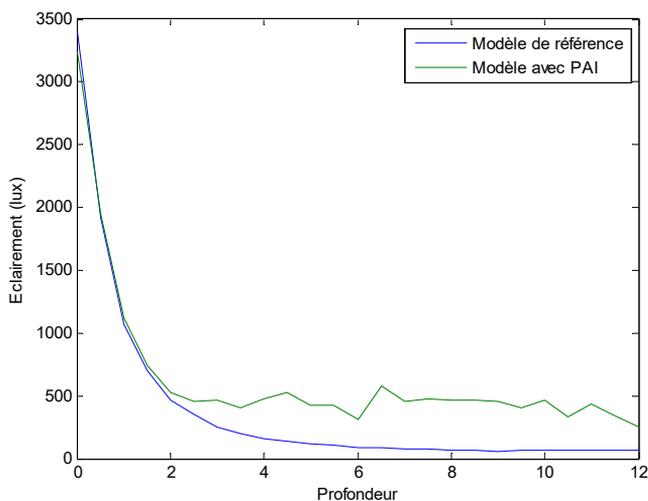


Figure 2. Comparaison du niveau d'éclairage

L'analyse des graphes a montré que le modèle de référence reçoit un éclairage compris entre 7000 lux et 250 lux qui ensuite diminue laissant plus de trois quarts de l'espace avec un éclairage au-dessous de 200 lux. À partir de 3 m de profondeur, il

est clair que les valeurs d'éclairage du modèle de référence sont très faibles par rapport au modèle équipé de plafond anidolique. L'écart atteint plus de 400 lux après avoir ajouté le PAI. Les résultats montrent aussi que le système modelé augmente de manière significative le niveau d'éclairage surtout au fond du local où les valeurs sont 8 fois plus élevées à 9 m de la fenêtre. Il permet aussi d'atteindre des valeurs d'éclairage comprises entre 300 lux et 500 lux qui s'étalent sur une grande surface du modèle. Dans le but de valider les résultats de la simulation, un modèle de taille réduite a été construit et testé sous un ciel réel. Le modèle a été réalisé à une échelle de 1/4 (figure 3) et a les mêmes caractéristiques géométriques et photométriques du modèle utilisé dans la simulation. Les valeurs d'éclairage ont été prises individuellement à l'aide de luxmètre. Les résultats de l'expérimentation donnent une bonne corrélation avec les résultats obtenus par la simulation (figure 3).

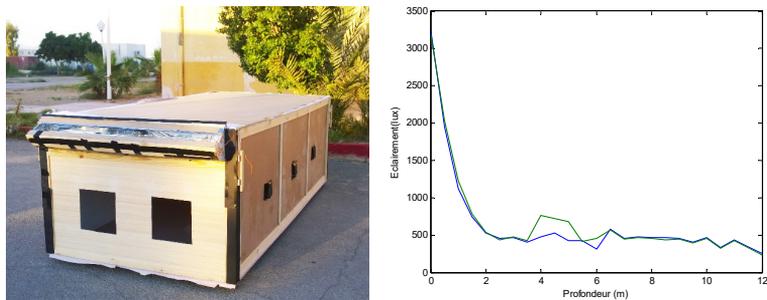


Figure 3. À gauche, le modèle construit ; à droite, la validation expérimentale

Performances relatives aux ambiances lumineuses

L'évaluation de l'ambiance lumineuse intérieure avait été étudiée sur un modèle réduit à l'aide d'une image sphérique sous un ciel réel. Les performances ambiantales ont été évaluées en deux expériences complémentaires. La première expérience avait comme objectif d'étudier la qualité lumineuse qu'apporte le plafond anidolique dans un espace architectural de 12 m de profondeur. Les résultats présentés dans la figure 4 montrent que ce système avait amélioré la qualité lumineuse intérieure d'un local en comparaison avec le modèle de référence. Le modèle équipé de PAI est plus éclairé avec une luminance homogène et bien répartie dans tout le modèle.

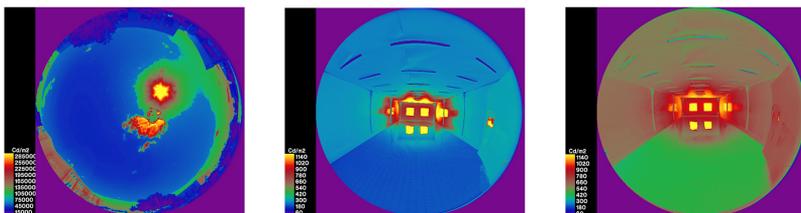


Figure 4. À gauche, la luminance du ciel ; au centre, la luminance du modèle de référence ; à droite, la luminance du modèle équipé de Plafond anidolique intégré (PAI)

La deuxième expérience a été proposée pour évaluer les ambiances lumineuses au cours de la journée. Les photos ont été prises à 10 h, à 12, à 14 et à 16 h.



Figure 5. L'ambiance lumineuse intérieure du modèle équipé de Plafond anidolique à 10 h



Figure 6. L'ambiance lumineuse intérieure du modèle équipé de Plafond anidolique à 12 h



Figure 7. L'ambiance lumineuse intérieure du modèle équipé de Plafond anidolique à 14 h



Figure 8. L'ambiance lumineuse intérieure du modèle équipé de Plafond anidolique à 16 h

Il est clair, à partir des figures 5, 6, 7 et 8 que l'atmosphère lumineuse du modèle avec PAI diffère d'une heure à l'autre et dépend essentiellement de la luminance du ciel.

Conclusions

L'intérêt principal de cette recherche est de développer un plafond anidolique spécifique pour les régions à climat chaud et aride (ville de Biskra) qui répond aux exigences visuelles et ambiantales de ce type de climat. Selon les résultats de la simulation et de l'expérimentation au moyen du modèle réduit, on a confirmé que le plafond anidolique améliore de manière significative les niveaux d'éclairement et d'uniformité de l'éclairage en comparaison avec le modèle de référence. Il est clair aussi que le climat lumineux extérieur, durant la journée, a une influence considérable sur les ambiances lumineuses à l'intérieur de l'espace, mais il a été démontré lors de notre expérience que le plafond anidolique intégré joue le rôle d'un régulateur de la distribution lumineuse. Donc, il est possible de conclure que le plafond anidolique intégré est un excellent moyen qui permet à la fois d'améliorer l'éclairage naturel dans les locaux profonds, d'assurer une uniformité de la distribution des luminances tout en réduisant le contraste et par conséquent, contribuer efficacement à réduire l'utilisation de l'éclairage électrique pendant les périodes diurnes.

Références

- Courret G. (1999), *Systèmes Anidoliques d'Éclairage Naturel*, Doctoral Thesis, 2026, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- Courret. G., Scartezzini. J.L., Francioli. D., Meyer.J.J. (1998), Design and assessment of an anidolic light-duct, *Energy and Buildings*, 28, pp. 79-99
- Daich S. (2011), *Simulation et Optimisation du Système Light Shelf sous des Conditions Climatiques Spécifiques*, Thèse de Magistère, Biskra, Algérie.
- Daich. S., Zemmouri. N., Saadi. M. Y., Eugenio. M., Piga. B. E. A., (2015), Modeling of an anidolique daylight system for a luminous integrated environment, *Advance Building Skins*, Bern, Switzerland, ISBN: 978-3-98120538-1, pp.366-371
- Edwards L., Torcellini P. (2002), *A Literature Review of the Effects of Natural light on Building Occupants*, Golden, Colorado, National Renewable Energy Laboratory, pp. 9-16
- Kleindienst. S., Andersen. M. (2006), Improving Day lighting in Existing Buildings: Characterizing the Effect of Anidolic Systems, *Renewable Energy*
- Linhart. F., Wittkopf. S.K., Munch. M., Scartezzini. J. L. (2009), Recent Research on Anidolic Day lighting Systems: highly Reflective Coating Materials and Chronobiological Properties, Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB)
- Linhart. F., Wittkopf. S. K., Scartezzini. J. L. (2010), Performance of Anidolic Day lighting Systems in Tropical Climates – Parametric Studies for Identification of main Influencing Factors, *Solar Energy*, 84, pp. 1085-1094
- NASA NASA SSE program (<http://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/>)
- Roshan. M., Kandar. M. Z. B., Nikpur. M., Mohammadi. M.P., Ghasemi. M. (2013), Investigating the performance of Anidolic Day lighting System with respect to

Building Orientation in Tropical Area, *ESTIJ An International Journal of Engineering Science and Technology*, 3 (1), pp. 2250-3498

Veitch J. A., Newsham G. R. (1998), Determinants of lighting quality I: State of the science, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 27 (winter), pp. 92-10

Wittkopf S. K. (2007), Daylight Performance of Anidolic Ceiling under different Sky Conditions, *Solar Energy*, 81, pp. 151-161

Wittkopf S. K., Yuniarti E, Soon L. K. (2006), Prediction of Energy Savings with Anidolic Integrated Ceiling across different Daylight Climates, *Energy and Buildings*, 38, pp. 1120-1129

Welford. W. T., Winston. R., (1989), *High Collection Nonimaging Optics*, San Diego: Academic Press

Auteurs

Daich safe, doctorante en architecture à l'université Mohamed khider de Biskra, laboratoire LACOMOFA, Algérie

Saadi mohamed yacine, doctorant en architecture à l'université Mohamed khider de Biskra, laboratoire LACOMOFA, Algérie

Zemmouri Noureddine, professeur à l'université Mohamed khider de Biskra, directeur de laboratoire LACOMOFA, Algérie

Eugenio morello, professeur au laboratoire de simulation urbaine à l'école polytechnique de milan, Italie

Piga e a barabra, docteur en architecture au laboratoire de simulation urbaine à l'école polytechnique de milan, Italie

Daiche ahmed motie, doctorant en architecture à l'université Mohamed khider de Biskra, laboratoire LACOMOFA, Algérie.

Annexe 1 - Le questionnaire développé

A1.1. Version Test

Questionnaire: Evaluation qualitative de l'éclairage naturel à l'intérieur d'un modèle physique

Partie 1:**Informations générales:**

Date et Heure: ____ / ____ / ____ Commencé à: _____ Terminé à: _____

Type du ciel : Couvert Partiellement couvert Clair

Eclairage extérieur: _____ lux

Partie 2:**Renseignements personnels:**

Nom: _____ Code : _____

Genre: M F

Age: _____

Lieu de naissance: _____

Portez-vous des verres correcteurs **Partie 3: Questionnaire**

1. La lumière naturelle dans cet espace est-elle appropriée à l'activité d'un bureau?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Pas de tout appropriée			Neutre	Très appropriée		

2. Dans l'ensemble, à quel point êtes-vous satisfaits de votre niveau de confort visuel dans ce bureau?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Pas de tout satisfait			Neutre	Très satisfait		

3. Comment appréciez-vous l'uniformité de la lumière naturelle dans cet espace?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Pas de tout uniforme			Neutre	Très uniforme		

4. La quantité de la lumière présente dans ce bureau est-elle suffisante?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très insuffisante			Neutre	Très suffisante		

5. Avez-vous besoin d'utiliser l'éclairage artificiel dans cet espace?

Oui Non

6. Si vous répondez oui, dans quelle zone(s)?

Zone 1 Zone 2 Zone 3

7. Est-ce que le contraste entre les différents composants de l'espace est bien défini?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Pas de tout défini

Neutre

Très défini

8. Comment vous appréciez la lumière dans ce bureau?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très désagréable

Neutre

Très agréable

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très Ennuyeuse

Neutre

Très stimulante

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très chaotique

Neutre

Très ordonné

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très passive

Neutre

Très active

9. L'ambiance générale présente dans ce bureau semble être:

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très sombre

Neutre

Très gai

10. L'ambiance générale présente dans ce bureau semble être:

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très désagréable

Neutre

Très plaisante

11. Comment décrivez-vous cet espace, est-il:

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très étroit

Neutre

Très spacieux

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très fermé

Neutre

Très ouvert

12. Quel est le degré de la luminosité dans l'ensemble de cet espace?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très sombre

Neutre

Très brillante

13. Dans quelle ouverture caractériseriez-vous le mieux la source d'inconfort visuel?

- Ouverture 1 (près de la fenêtre)
- Ouverture 2 (au milieu)
- Ouverture 3 (dans le fond)
- Ouverture 4 (façade sud)

14. Veuillez évaluer votre niveau de sensibilité à l'éblouissement ou à l'inconfort visuel?

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Très sombre

Neutre

Très lumineux

A1.2. Version Finale

Questionnaire: Evaluation qualitative de l'éclairage naturel à l'intérieur d'un modèle physique**Partie 1:****Informations générales:**

Date et Heure: ____ / ____ / ____ Commencé à: _____ Terminé à: _____

Type du ciel : Couvert Partiellement couvert Clair

Eclairage extérieur: _____ lux

Partie 2:**Renseignements personnels:**

Nom: _____ Code : _____

Genre: M F

Age: _____

Lieu de naissance: _____

Portez-vous des verres correcteurs: Oui Non

Profession/Occupation: _____

Partie 3:Scénarios 1. Modèle de référence Scénarios 2. Modèle de test (avec PAI) Ouverture : 1 2 3 4

Partie 4: Questionnaire

1. La lumière naturelle dans cet espace est-elle appropriée à l'activité d'un bureau?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Pas de tout appropriée			Neutre	Très appropriée		

2. Dans l'ensemble, à quel point êtes-vous satisfaits de votre niveau de confort visuel dans ce bureau?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Pas de tout satisfait			Neutre	Très satisfait		

3. Comment appréciez-vous l'uniformité de la lumière naturelle dans cet espace?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Pas de tout uniforme			Neutre	Très uniforme		

4. La quantité de la lumière présente dans ce bureau est-elle suffisante?

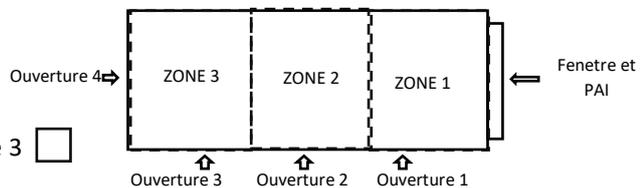
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très insuffisante			Neutre	Très suffisante		

5. Avez-vous besoin d'utiliser l'éclairage artificiel dans cet espace?

Oui Non

6. Si vous répondez oui, dans quelle zone(s)?

Zone 1 Zone 2 Zone 3



7. Est-ce que le contraste entre les différents composants de l'espace est bien défini?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Pas de tout défini			Neutre	Très défini		

8. Comment vous appréciez la lumière dans ce bureau?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très désagréable			Neutre	Très agréable		
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très Ennuyeuse			Neutre	Très stimulante		
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très chaotique			Neutre	Très ordonné		
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très passive			Neutre	Très active		

9. L'ambiance générale présente dans ce bureau semble être:

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très sombre			Neutre	Très gai		

10. L'ambiance générale présente dans ce bureau semble être:

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très désagréable			Neutre	Très plaisante		

11. Décrivez en 3 mots, avec ordre, l'ambiance générale dans cet espace?

1. _____ 2. _____ 3. _____

12. Comment décrivez-vous cet espace, est-il:

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très étroit			Neutre	Très spacieux		

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très fermé			Neutre	Très ouvert		

13. Quel est le degré de la luminosité dans l'ensemble de cet espace?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très sombre			Neutre	Très brillante		

14. Dans quelle ouverture caractériseriez-vous le mieux la source d'inconfort visuel?

- Ouverture 1 (près de la fenêtre)
- Ouverture 2 (au milieu)
- Ouverture 3 (dans le fond)
- Ouverture 4 (façade sud)

Ouverture 4 →

ZONE 3ZONE 2ZONE 1

↑↑↑

Ouverture 3Ouverture 2Ouverture 1

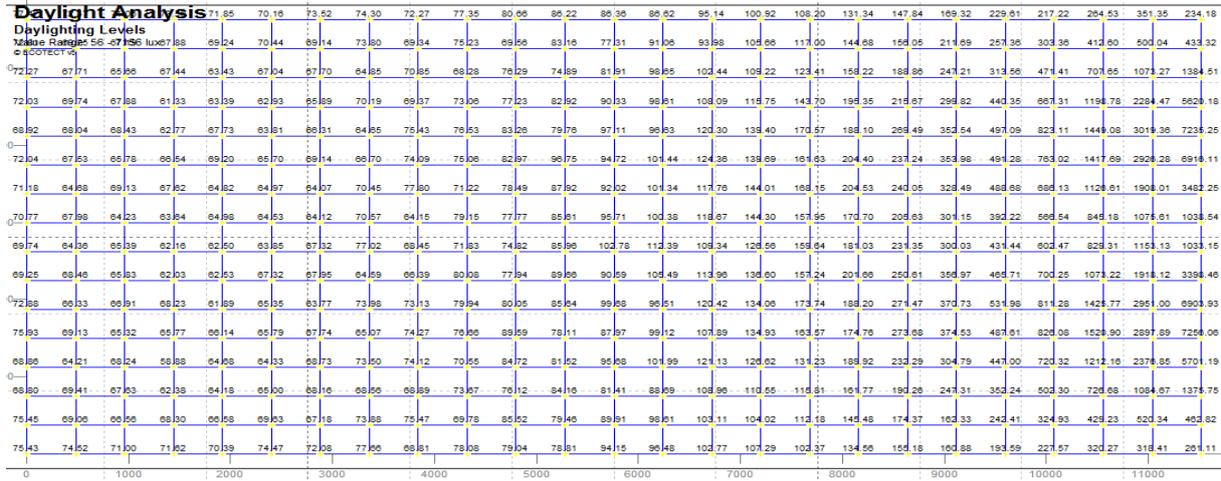
← Fenêtre et PAI

15. Veuillez évaluer votre niveau de sensibilité à l'éblouissement ou à l'inconfort visuel?

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
<input type="checkbox"/>						
Très sombre			Neutre	Très lumineux		

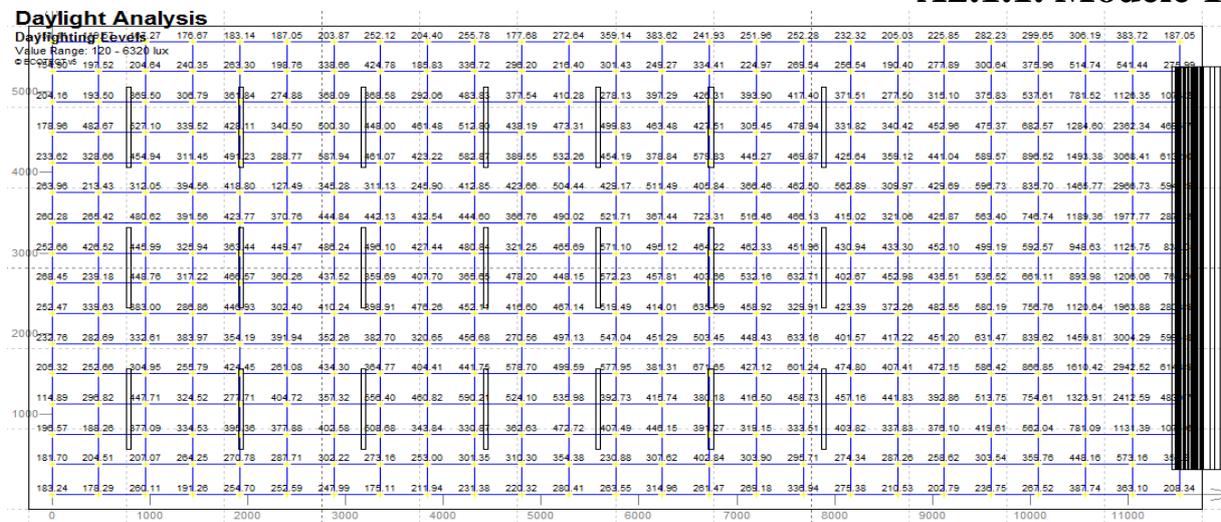
Annexe 2 - Résultats de la Simulation Numérique

A2.1. Résultats de Modèle de Référence

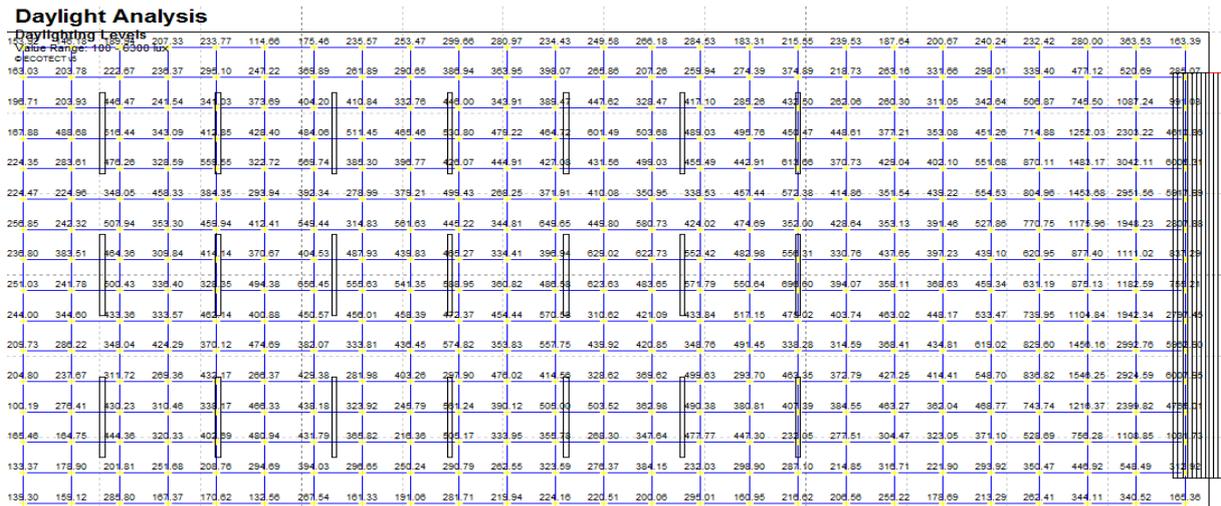


A2.1. Résultats de Modèle de Test

A2.1.1. Modèle 1



A2.1.2. Modèle 2



A2.1.3. Modèle 3

Daylight Analysis
Daylighting Levels
 Value Range: 100 - 750 lux
 Pct: 50.00

170.71	167.39	206.74	225.24	245.79	144.09	193.10	233.47	271.04	315.00	315.68	238.59	268.97	269.95	300.84	199.80	231.87	253.68	206.07	230.18	260.60	263.56	301.10	388.52	240.23
203.16	212.47	150.90	247.17	345.93	376.85	408.31	416.76	333.11	448.82	349.52	397.64	448.99	333.77	422.59	288.39	434.76	268.81	266.68	318.50	350.22	517.10	756.57	1104.42	1399.63
175.74	493.88	519.13	347.88	417.20	437.09	488.59	516.52	469.98	506.99	498.92	469.75	608.48	507.87	488.52	500.80	454.55	453.94	384.11	363.02	459.76	723.05	1262.70	2315.25	939.59
232.15	289.28	382.05	333.50	594.29	327.59	574.73	390.28	400.77	428.26	448.59	431.20	438.73	501.76	460.40	447.82	618.19	374.19	436.26	410.67	567.80	879.92	1493.56	3054.05	990.94
231.58	231.04	351.00	464.38	391.02	304.16	398.53	284.68	384.30	499.98	273.88	373.43	416.78	354.45	344.58	458.38	577.06	434.66	358.54	448.07	563.40	813.46	1464.57	2962.81	900.04
262.99	248.04	514.04	358.66	465.52	416.84	564.19	319.39	586.71	443.09	349.30	654.14	454.77	584.22	428.82	476.67	356.27	430.12	357.67	398.99	536.09	786.77	1184.97	1964.99	3279.67
243.94	388.51	469.30	315.24	418.13	370.06	408.37	492.88	444.13	447.27	333.80	401.36	634.09	626.96	555.85	487.73	566.78	337.85	444.96	406.27	446.55	630.09	907.55	1120.94	862.75
255.54	249.10	505.69	342.54	332.28	498.56	600.87	500.44	546.74	591.19	365.23	490.52	623.52	488.06	575.94	557.69	700.72	396.35	365.63	376.22	468.37	662.27	882.37	1153.77	942.27
251.58	346.77	438.94	336.74	461.72	405.73	455.71	481.64	483.92	474.89	458.32	574.38	316.00	425.35	437.80	522.20	478.63	408.14	469.78	458.38	538.07	747.70	1115.17	1954.42	329.15
217.82	291.69	353.01	426.89	374.98	480.45	387.61	336.66	442.59	573.84	358.67	563.02	444.89	425.35	350.69	496.52	341.55	318.22	376.14	442.85	627.27	838.28	1469.16	3004.65	960.12
213.21	244.78	317.56	273.66	434.82	295.76	432.15	287.34	403.78	303.14	476.77	419.38	334.81	385.83	501.91	298.71	468.55	378.04	457.77	430.56	557.73	646.31	1578.68	2936.48	968.24
108.07	281.91	524.62	316.52	342.89	471.70	440.47	326.55	245.99	583.08	395.08	508.52	508.33	368.19	494.81	382.95	418.82	390.44	486.14	371.75	476.66	754.02	1251.63	2419.90	863.13
173.37	172.11	450.21	329.58	409.29	484.43	437.28	372.58	219.05	617.39	335.56	361.43	274.46	352.49	481.04	453.35	237.71	282.10	313.17	331.67	380.47	538.93	796.33	1129.68	1303.69
142.73	167.70	209.44	257.68	214.68	301.88	396.08	302.55	256.12	252.92	266.16	329.43	283.62	390.26	254.44	308.50	293.46	220.95	322.36	231.06	304.37	359.73	459.92	556.64	421.27
163.85	166.66	293.19	175.22	179.09	141.43	270.04	170.24	196.80	284.21	225.51	231.40	229.52	208.01	302.23	170.15	223.42	216.38	263.76	191.55	241.35	278.97	403.98	356.63	251.58

A2.1.4. Modèle 4

Daylight Analysis
Daylighting Levels
 Value Range: 81 - 7181 lux
 Pct: 50.00

170.71	167.39	206.74	225.24	245.79	144.09	193.10	233.47	271.04	315.00	315.68	238.59	268.97	269.95	300.84	199.80	231.87	253.68	206.07	230.18	260.60	263.56	301.10	388.52	240.23
211.01	222.17	460.95	256.23	355.23	387.04	417.24	426.38	345.89	433.38	348.69	410.17	460.71	324.77	433.01	315.23	444.44	278.21	273.60	326.82	359.80	526.22	769.95	1119.46	1399.63
184.27	506.04	332.22	352.65	441.67	412.21	497.85	528.90	470.91	538.88	484.97	480.38	620.00	491.50	499.16	511.85	466.92	463.09	390.23	375.50	467.02	732.89	1271.97	2324.20	939.59
270.93	298.22	494.41	342.73	574.74	337.70	606.10	400.48	411.50	438.83	456.67	441.23	444.04	509.49	478.19	457.66	636.19	379.74	443.56	416.89	582.51	884.36	1501.45	3064.14	990.94
240.53	239.28	361.31	476.64	402.04	319.89	409.68	293.35	387.90	510.92	270.77	382.53	423.34	383.99	354.16	469.50	588.54	446.52	366.65	450.87	572.13	821.59	1473.72	2972.28	960.70
273.38	249.65	627.16	389.57	474.61	428.55	566.83	327.10	578.41	450.28	358.26	668.09	464.34	578.93	433.40	479.31	360.80	438.16	366.78	404.84	542.13	802.81	1189.74	1968.54	1334.48
249.14	393.98	480.89	322.10	443.43	389.30	419.58	500.54	450.39	471.16	348.81	410.95	647.93	618.85	679.78	498.05	571.82	339.17	448.70	402.51	464.35	638.77	921.75	1129.38	966.96
268.48	268.60	517.15	348.67	324.79	494.20	690.35	573.27	542.18	654.42	374.47	494.95	642.12	499.50	584.25	571.95	711.97	406.14	373.96	390.88	478.49	677.19	894.29	1197.35	966.96
261.25	356.91	450.43	342.72	490.74	416.91	466.17	473.55	470.45	460.55	470.40	562.87	338.15	447.96	431.85	533.44	468.85	416.25	478.06	464.97	546.42	756.79	1124.88	1964.71	1334.48
227.23	300.91	362.56	434.74	361.81	512.61	379.18	348.80	423.47	572.96	387.37	563.78	464.47	436.25	339.06	508.19	349.93	324.94	381.55	460.87	662.32	848.23	1474.85	3012.27	960.70
222.62	238.40	243.57	281.37	445.01	298.05	461.13	299.89	412.46	341.70	490.93	430.96	344.47	383.96	498.83	306.01	468.71	388.66	442.74	443.33	562.02	852.74	1596.49	2944.38	1334.48
811.19	274.23	445.49	326.27	350.22	458.30	448.92	335.54	257.82	583.89	427.33	520.56	519.79	382.83	606.40	394.60	396.59	396.60	498.80	380.86	483.66	762.77	1268.11	2429.25	1401.46
181.84	178.83	459.55	334.94	418.18	515.61	430.15	403.76	229.25	516.36	348.87	374.24	267.39	339.65	447.13	464.62	244.81	286.37	321.17	340.13	389.48	540.76	777.84	1136.85	1334.48
151.67	194.70	218.47	287.32	223.26	309.85	408.29	311.83	284.43	302.10	299.44	338.86	289.72	400.75	246.72	312.85	302.19	227.67	332.58	226.48	313.95	367.17	469.20	666.64	1334.48
154.72	178.24	303.46	183.74	194.93	150.00	284.74	167.13	206.18	294.98	233.45	224.33	250.78	200.77	311.86	178.84	215.38	223.68	272.78	196.84	263.50	287.45	431.31	968.11	261.29

A2.1.5. Modèle 5

Daylight Analysis
Daylighting Levels
 Value Range: 120 - 7220 lux
 Pct: 50.00

221.85	257.96	129.39	208.20	248.52	286.93	330.57	293.72	267.26	249.27	280.26	341.29	198.57	231.52	265.60	202.87	215.98	256.66	266.44	300.48	387.73	238.75			
209.14	220.48	357.22	242.57	352.36	390.91	392.92	420.98	374.75	477.37	386.72	428.93	437.05	374.64	467.80	291.87	482.01	270.51	300.50	326.06	364.71	526.62	768.43	1109.95	1272.58
182.83	501.85	334.22	351.49	423.23	441.59	498.71	464.96	477.32	511.38	492.02	524.62	591.40	510.70	502.28	512.77	471.87	472.62	388.53	374.55	466.42	730.25	1271.41	2324.78	939.59
236.62	305.94	480.21	322.84	576.00	331.12	594.77	394.04	429.77	385.07	430.50	434.81	464.03	516.12	404.25	507.54	633.69	401.61	441.85	416.29	586.17	888.92	1502.00	3063.67	960.70
238.82	237.43	356.88	466.73	398.13	312.46	403.95	286.85	370.75	505.66	280.20	379.82	384.70	383.92	362.03	429.30	584.62	464.20	383.49	449.72	571.36	828.53	1489.71	2971.45	960.70
262.39	243.69	518.99	348.25	472.89	402.97	616.13	385.92	586.31	460.98	315.72	644.83	480.85	571.35	436.56	477.98	356.52	427.45	364.52	396.86	541.37	806.71	1192.52	2006.04	1334.48
247.15	378.41	495.31	315.23	424.46	398.96	430.71	494.03	450.99	463.02	356.91	428.13	655.47	605.53	662.66	508.06	556.67	347.28	470.09	403.65	466.68	636.06	936.21	1128.91	1334.48
278.12	263.28	503.66	345.98	357.85	533.07	603.79	594.22	533.51	516.50	396.66	517.12	659.01	457.22	606.06	606.91	661.22	423.74	364.49	383.15	481.65	670.63	888.43	1202.33	1334.48
266.91	353.39	439.75	341.33	483.26	383.97	466.86	463.35	432.26	463.47	471.55	604.69	304.06	370.51	441.03	568.05	463.19	414.18	466.75	472.42	544.47	772.95	1123.53	1964.19	1334.48
221.89	269.35	356.85	445.41	381.80	489.38	417.79	317.49	461.29	551.08	369.12	617.38	427.67	454.94	359.81	489.96	391.19	322.58	361.38	436.39	642.44	849.88	1472.57	3007.71	960.70
220.92	251.97	335.75	279.12	481.69	276.60	401.58	285.96	453.75	333.42	519.87	401.93	384.36	418.91	491.79	304.14	516.65	365.18	489.07	448.37	559.59	853.36	1596.58	2944.13	960.70
116.29	271.96	327.07	324.31	346.44	446.27	446.27	330.70	261.99	606.00	398.91	538.60	518.45	389.97	501.78	410.79	418.47	405.87	498.76	373.60	482.97	768.90	1312.24	2419.37	1334.48
180.47	178.82	456.81	327.13	418.55	473.63	442.77	361.14	251.75	51															

A2.1.6. Modèle 6

Daylight Analysis

Daylighting Levels
Value Range: 81 - 7181 lux
Efficiency: 0.73

222.42	246.09	142.59	191.77	231.96	269.79	313.79	319.06	237.27	264.97	266.17	299.32	196.36	228.20	252.68	204.05	227.14	267.52	271.90	296.93	385.75	237.72			
208.55	220.90	459.79	256.54	354.32	383.45	416.39	419.89	341.47	441.71	349.13	410.45	479.67	324.10	429.85	314.39	444.80	271.19	272.85	326.96	358.31	523.94	704.35	1108.46	1271.08
183.97	503.80	528.54	352.47	441.50	413.38	493.63	509.31	466.90	514.84	484.34	480.38	616.67	484.42	499.64	511.88	458.86	463.27	388.37	374.30	466.60	731.81	1278.45	2323.46	6326.00
262.96	291.43	490.22	342.14	661.16	333.30	601.88	392.40	410.84	439.05	468.95	437.61	444.34	508.23	474.24	452.04	629.72	377.27	442.95	418.91	568.18	863.63	1501.07	3062.43	6840.76
238.39	238.45	359.59	472.22	400.14	324.35	409.73	288.03	383.35	506.71	270.18	381.94	423.31	383.56	349.38	468.88	581.95	450.45	389.96	448.69	574.23	819.96	1472.26	2969.16	6270.70
268.41	244.83	522.27	364.64	469.70	427.57	600.04	315.34	574.79	440.31	357.52	607.59	459.50	578.40	432.98	467.23	356.30	431.21	364.70	403.80	540.81	808.74	1188.74	1907.04	3270.40
247.84	381.90	480.28	316.64	443.77	389.78	419.10	491.78	445.70	467.37	344.62	410.55	643.45	618.29	578.19	493.18	563.46	337.02	447.94	398.19	463.43	637.81	927.32	1127.93	3996.63
266.77	258.23	511.82	347.83	311.18	493.78	690.02	560.13	528.62	598.66	369.01	494.00	641.67	493.84	588.75	598.82	708.73	408.74	361.11	392.13	471.88	663.29	892.95	1196.02	3623.59
260.05	354.78	448.81	341.42	483.62	412.95	462.46	465.34	466.78	483.10	466.45	582.17	337.65	442.36	430.41	527.02	487.78	436.96	474.12	464.14	545.40	754.79	1123.53	1963.16	3230.07
222.28	300.12	361.94	433.63	361.00	508.36	378.49	341.16	422.40	570.01	386.82	566.10	446.78	434.82	332.78	503.78	348.11	324.51	377.65	447.36	668.28	848.01	1469.22	3016.78	6591.66
221.15	237.31	342.83	280.84	444.05	291.17	451.16	280.19	411.62	341.06	488.47	426.96	343.81	383.47	482.74	303.37	484.19	388.24	436.96	448.74	560.64	851.81	1600.93	2942.81	6326.00
81.27	267.03	444.87	326.18	345.56	454.78	447.75	332.47	253.90	590.07	426.81	517.12	516.09	378.12	504.85	388.88	398.88	393.10	500.30	377.31	482.35	758.42	1267.57	2418.12	5391.63
180.58	177.33	458.57	328.80	418.32	514.55	426.93	392.05	226.56	516.78	347.77	367.66	268.56	333.21	443.57	460.26	244.07	267.58	318.01	333.67	368.16	538.50	776.24	1129.14	1271.08
147.20	193.11	214.63	266.17	228.91	304.08	404.71	303.55	263.56	300.78	302.26	338.22	288.17	399.96	243.09	311.92	298.65	224.31	324.03	224.67	312.49	364.60	467.24	564.43	472.80
162.88	174.03	300.08	180.07	193.58	148.54	285.42	163.23	204.71	293.20	226.71	220.19	249.21	198.47	310.68	175.56	211.79	222.00	271.38	193.60	269.25	283.13	441.17	365.44	256.81

A2.1.7. Modèle 7

Daylight Analysis

Daylighting Levels
Value Range: 120 - 6420 lux
Efficiency: 0.73

249.92	249.37	127.84	189.66	245.80	266.32	309.59	291.02	247.39	262.16	277.69	296.51	196.74	228.66	250.28	202.95	214.07	267.25	271.73	296.95	371.17	237.55			
200.70	216.60	463.01	247.96	348.84	373.88	405.46	410.58	337.75	419.23	346.95	406.51	450.30	337.51	423.17	289.70	438.02	278.24	274.23	321.96	358.04	522.37	764.08	1108.46	1271.08
180.87	490.32	519.07	348.35	418.07	447.69	468.20	502.11	468.13	523.95	496.76	473.55	598.41	503.50	488.95	497.75	451.04	457.46	389.40	368.28	462.38	728.52	1270.03	2323.46	6326.00
234.17	293.89	477.29	337.01	568.48	327.02	553.62	386.75	404.97	418.83	449.18	431.27	433.90	502.67	453.42	448.57	621.53	370.77	438.83	419.04	589.96	886.49	1500.78	3062.43	6840.76
236.27	234.24	346.94	465.20	395.40	320.38	368.41	281.26	378.09	499.14	274.26	378.12	416.19	368.81	342.46	463.11	580.30	448.88	363.72	447.94	570.02	819.31	1472.19	2968.56	6498.46
266.55	253.00	503.40	357.88	462.78	416.03	539.33	312.22	563.21	440.12	352.45	657.43	450.86	588.53	427.70	473.54	353.07	428.88	358.83	402.98	538.85	811.80	1191.35	2013.03	3330.85
244.68	383.90	473.81	308.77	420.67	377.21	389.87	480.53	440.06	417.71	337.02	401.33	629.17	624.27	565.98	487.08	558.43	339.00	447.80	406.20	463.47	634.40	930.63	1127.32	3696.63
261.50	251.64	501.65	338.54	327.80	501.63	649.23	551.98	532.90	609.19	359.99	488.63	632.18	481.66	578.00	564.09	697.28	401.54	359.48	377.67	471.59	684.21	892.57	1201.58	3623.59
253.66	349.38	435.40	333.84	455.43	403.91	447.63	446.25	455.06	467.70	454.27	568.47	316.53	423.16	440.23	516.21	478.96	411.86	467.63	462.43	544.31	754.03	1122.37	1962.88	3770.42
219.70	294.79	356.52	427.56	378.07	481.18	379.41	336.63	431.44	571.37	358.47	560.20	441.94	428.70	347.09	499.90	348.03	320.78	378.27	448.25	634.05	844.38	1468.62	3012.98	6498.46
216.63	249.57	318.15	276.73	438.65	274.16	418.86	276.84	405.67	300.89	478.62	419.55	339.34	398.02	500.49	300.17	468.71	382.27	463.03	459.68	563.43	851.44	1597.58	2942.81	6770.42
114.79	283.20	438.00	317.45	343.20	470.40	431.03	327.90	250.07	611.94	398.70	508.55	508.81	369.09	492.80	384.19	412.81	388.09	499.48	378.40	481.58	757.57	1278.68	2417.47	3330.77
178.46	176.58	451.69	324.15	412.09	482.93	415.66	364.56	222.84	508.14	342.90	362.95	276.00	350.40	481.15	454.22	241.88	284.95	316.08	332.45	387.85	547.83	823.50	1128.67	1248.40
146.01	191.05	213.02	262.74	218.74	302.10	380.05	299.51	260.14	296.61	282.00	333.51	286.53	394.54	268.92	308.24	294.35	222.76	322.88	238.52	311.53	362.50	467.10	570.25	452.89
174.75	172.33	295.96	178.10	162.23	147.26	267.09	169.97	202.44	289.39	227.53	238.26	235.37	213.27	309.31	174.63	228.85	220.72	269.37	196.00	272.72	282.85	448.25	368.19	251.05

A2.1.8. Modèle 8

Daylight Analysis

Daylighting Levels
Value Range: 61 - 6384 lux
Efficiency: 0.73

240.81	140.85	189.15	228.31	266.82	309.15	322.40	234.16	261.59	261.95	294.89	196.20	226.61	248.12	202.12	225.72	256.64	274.30	298.30	370.57	237.03				
206.19	215.07	453.28	247.39	348.86	377.43	400.36	408.10	335.39	414.76	338.63	407.43	448.83	316.58	421.68	310.39	437.62	274.58	270.69	321.28	357.18	521.57	763.26	1107.95	1632.41
180.44	489.98	516.55	344.90	430.28	412.94	458.26	501.66	457.41	538.64	478.73	468.57	597.95	469.98	483.60	487.04	448.68	456.92	385.81	387.83	481.47	730.13	1268.27	2322.75	6326.00
263.49	292.49	476.53	336.59	551.91	327.68	570.33	388.28	464.44	468.35	468.45	496.88	433.28	500.59	458.29	440.10	617.60	367.71	446.38	414.25	582.62	879.59	1497.62	3046.58	6840.76
238.55	234.80	343.81	464.36	364.89	324.80	388.84	298.38	368.18	498.74	262.57	363.45	412.66	377.97	344.36	463.61	577.53	450.32	363.07	447.13	569.19	818.26	1471.35	2948.08	6498.46
266.06	241.08	478.79	350.55	462.27	432.56	532.63	310.51	581.31	438.81	351.84	656.97	450.65	662.94	413.63	461.31	349.78	428.22	358.04	397.65	538.90	798.41	1181.70	1963.78	3230.24
244.27	376.72	464.02	306.47	433.83	376.89	391.16	504.09	438.44	472.07	338.60	396.27	628.66	698.97	560.26	488.59	564.85	331.59	440.74	394.27	460.23	630.42	930.18	1127.08	3696.63
260.99	251.10	499.68	336.33	312.29	486.63	660.89	543.06	490.08	585.73	380.62	483.98	610.19	475.38	562.32	561.92	662.89	401.10	346.13	368.71	466.44	667.61	891.46	1195.00	3441.33
232.21	348.49	426.62	332.29	456.06	402.05	445.65	422.05	494.17	468.63	463.78	568.07	322.88	430.09	424.07	614.71	479.13	411.30	467.00	461.69	536.17	790.51	1128.82	1965.82	3136.44
215.23	296.37	356.12	427.07	354.89	476.65	356.67	333.74	426.99	557.35	383.39	638.27	436.36	426.28	326.51	495.16	341.56	321.40	375.56	446.53	672.70	846.80	1471.23	2896.10	6770.42
216.16	249.08	337.25	276.30	436.88	289.25	435.91	277.55	405.35	366.39	478.47	420.31	335.24	375.54	470.50	295.56	475.23	381.66	430.54	411.19	557.08	850.70	1608.46	2926.43	6730.16
76.74	263.66	431.64	316.87	340.72	447.52	430.46	327.46	247.05	549.13	417.83	508.95	506.46	373.94	478.94	383.55	389.41	367.57	500.43	375.60	480.70	756.55	1232.41	2429.68	6326.00
178.04	177.42	437.26	323.75	406.88	503																			

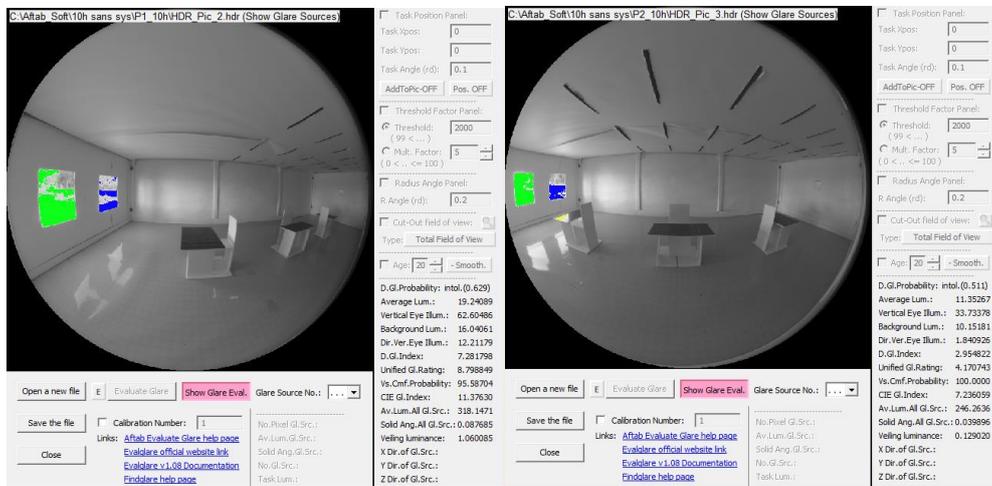
A2.1.12. Modèle 12

Daylight Analysis
 Daylighting Levels
 Value Range: 120 - 6420 lux
 Object: 24

171.20	182.51	193.82	219.20	248.47	124.33	188.70	244.58	285.86	309.15	290.81	246.92	281.81	277.21	294.27	196.21	226.88	249.89	199.81	212.40	256.81	287.77	298.32	381.32	236.97
205.80	214.39	152.29	246.90	347.70	368.04	400.18	408.15	335.44	411.82	345.97	408.15	449.85	334.14	421.76	285.27	431.82	271.21	270.76	321.32	357.22	521.85	783.33	1074.15	1231.09
177.20	490.00	514.34	348.01	411.56	440.98	468.58	501.72	483.89	533.80	505.25	481.58	596.02	430.39	883.87	454.34	444.66	451.51	381.49	385.99	480.75	725.89	1267.83	2281.11	5181.82
233.73	292.52	176.57	336.31	548.12	316.71	545.01	386.35	401.25	434.43	444.77	426.11	426.58	436.33	145.29	442.39	611.13	367.76	437.88	412.87	607.34	885.85	1454.18	2693.68	670.40
236.86	230.83	337.16	456.16	397.42	320.30	383.73	272.19	373.96	493.33	284.40	387.10	406.01	354.21	328.04	456.76	566.91	452.80	357.46	444.53	566.40	817.44	1469.99	2823.37	6411.69
266.29	251.81	492.86	341.68	465.01	396.15	523.91	305.89	544.76	425.96	347.74	633.29	445.83	572.86	408.86	484.95	341.64	419.50	351.89	357.71	536.09	821.27	1187.87	1964.13	3211.68
244.27	377.10	154.15	303.29	415.87	354.29	378.89	467.38	438.70	444.38	330.66	381.41	615.13	607.92	140.41	477.81	531.76	331.46	429.77	403.16	447.47	630.50	944.40	1118.77	995.30
266.99	246.99	191.34	320.73	302.35	465.17	640.90	626.72	617.63	616.33	350.28	467.11	695.80	466.74	564.73	666.64	671.89	396.19	356.83	371.04	465.50	702.04	867.86	1004.84	952.84
233.99	339.22	126.81	317.23	445.73	382.96	440.66	436.58	445.42	464.12	446.01	551.14	303.95	416.89	138.58	511.35	474.81	408.96	481.14	456.39	542.36	783.37	1121.50	1954.75	514.35
211.54	291.86	352.06	417.58	361.43	470.39	370.23	330.53	413.10	564.54	351.99	532.07	437.81	421.90	348.36	490.22	335.58	319.97	365.85	626.81	833.68	1464.65	2684.57	6414.01	
217.85	248.76	313.15	276.41	431.03	295.37	418.09	275.58	402.40	390.44	474.45	412.56	320.84	400.11	492.87	297.25	464.22	374.50	473.50	470.86	250.75	850.79	1604.18	2804.81	6884.38
114.29	281.19	831.83	316.61	335.05	446.16	430.03	327.51	246.01	564.24	336.00	504.41	506.53	366.68	192.46	383.26	411.50	387.83	509.83	374.17	480.04	754.61	1294.72	2344.61	525.81
176.04	176.52	161.31	323.79	406.43	460.77	415.26	384.07	220.00	513.77	341.82	365.42	272.94	350.04	480.17	450.84	241.28	284.06	316.44	331.83	388.94	547.03	843.76	1094.40	119.87
146.55	190.55	211.27	261.96	217.99	290.51	375.63	296.03	266.74	264.42	290.70	330.12	286.03	394.12	281.26	300.78	283.66	222.28	322.24	234.82	310.83	359.50	463.63	452.23	420.88
190.76	171.85	296.56	177.65	181.75	142.05	266.58	185.44	201.92	288.04	229.95	233.58	234.82	212.79	304.87	173.97	221.85	220.12	268.87	193.76	291.55	282.09	481.35	384.26	256.80

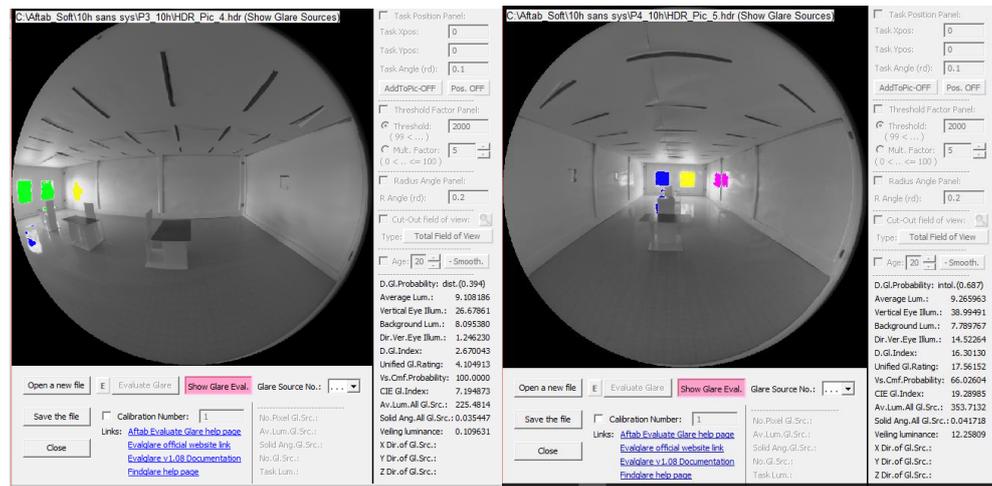
Annexe 3- Les Images Sphériques

A3.1. Modèle de Référence



Position-1

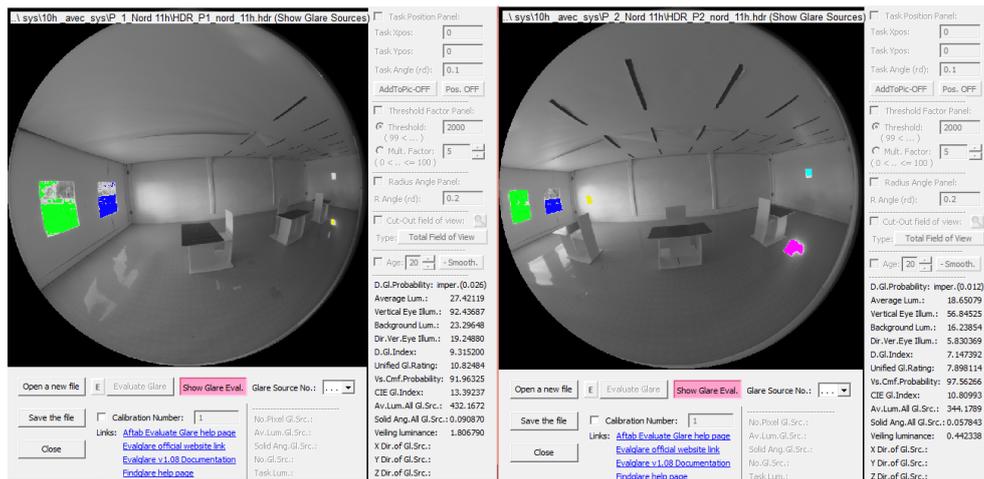
Position-2



Position-3

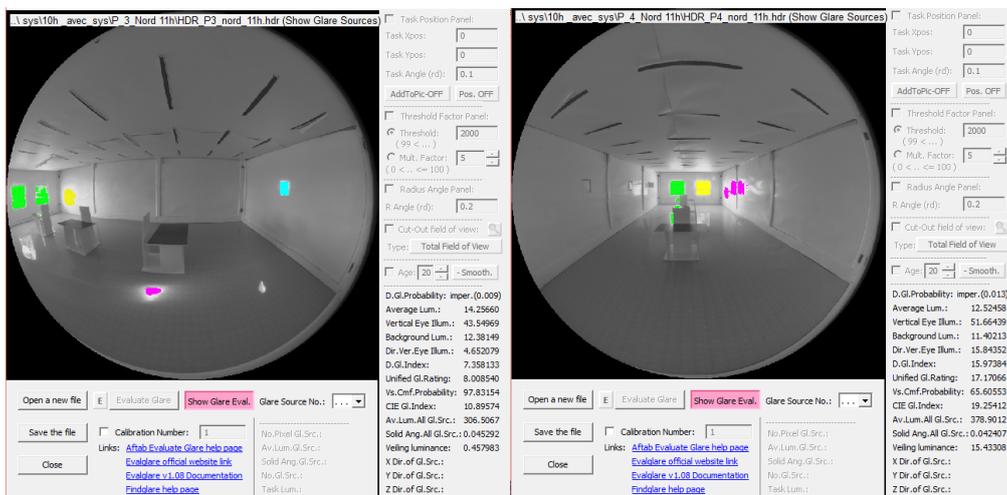
Position-4

A3.2. Modèle de Test



Position-1

Position-2



Position-3

Position-4

Annexe 4 : Statistique Descriptive

A4.1. L'Age des Participants

AGE		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	20	1	1,6	1,6	1,6
	21	23	37,1	37,1	38,7
	22	19	30,6	30,6	69,4
	23	14	22,6	22,6	91,9
	24	2	3,2	3,2	95,2
	25	2	3,2	3,2	98,4
	26	1	1,6	1,6	100,0
Total		62	100,0	100,0	

A4.2. Le Genre

GENRE

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	1	27	43,5	43,5	43,5
	2	35	56,5	56,5	100,0
	Total	62	100,0	100,0	

A4.3. La Performance Visuelle

PORTEZ_VOUS_DES_VERRES_CORRECTEURS

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	1	16	25,8	25,8	25,8
	2	46	74,2	74,2	100,0
	Total	62	100,0	100,0	

A4.4. Provenance des participants

LIEU_DE_NAISSANCE

		Fréquence	Pourcentage	Pourcentage valide	Pourcentage cumulé
Valide	alger	1	1,6	1,6	1,6
	batna	4	6,5	6,5	8,1
	biskra	33	53,2	53,2	61,3
	el oued	1	1,6	1,6	62,9
	eloued	10	16,1	16,1	79,0
	guelme	1	1,6	1,6	80,6
	JIJEL	1	1,6	1,6	82,3
	jorden	1	1,6	1,6	83,9
	msila	1	1,6	1,6	85,5
	ourgla	3	4,8	4,8	90,3
	tebessa	1	1,6	1,6	91,9
	tizi ouzzou	1	1,6	1,6	93,5
	tougourt	4	6,5	6,5	100,0
	Total	62	100,0	100,0	

Résumé

Plusieurs recherches ont prouvé que la lumière du jour offre plusieurs avantages sur l'être humain sur différents plans physiologique et psychologique. Dans les espaces de bureaux, un bon éclairage naturel permet de créer une atmosphère intérieure confortable, d'augmenter la productivité des employés et de réduire également la facture énergétique du bâtiment. L'objectif de notre étude est de modéliser un système de plafond anidolique pour assurer un environnement lumineux intérieur intégré. Pour cela, deux méthodes d'investigation et d'analyse ont été utilisées. La première est une méthode de simulation qui a comme but, d'une part de modéliser un système anidolique spécifique pour la ville de Biskra en recourant à la simulation numérique, et d'autre part, d'analyser l'aspect quantitatif et qualitatif qu'apporte le système dans un espace construit à l'aide d'un modèle physique. La deuxième méthode consiste à développer un questionnaire afin d'étudier les différentes appréciations subjectives des participants vis-à-vis de l'environnement lumineux à l'intérieur du modèle physique dans différents scénarios et situations. Les résultats de l'évaluation quantitative de la performance du système de plafond anidolique intégré (PAI) montrent que le modèle de test (modèle équipé d'un PAI) permet d'avoir une large zone de confort (60% de la surface totale) caractérisée par un éclairage compris entre 300 lux et 500 lux et à douze mètre de la fenêtre, l'éclairage de ce modèle est cinq fois plus élevé par rapport à celui de référence (modèle sans PAI). Les résultats montrent aussi que l'autonomie d'énergie qu'offre le modèle de référence est très faible de l'ordre de 19 % par rapport au modèle de test qui atteint 60 %. De plus, l'étude a montré que pour un facteur de lumière de jour annuel moyen de 1.83 % (500 lux), le système d'éclairage électrique On/Off Switching reste éteint d'environ 50 % durant l'année et plus de 70 % d'autonomie de l'éclairage peut être gagné si le mode électrique utilisé est le système Dimming Switch. De plus, l'évaluation du phénomène de l'éblouissement a démontré que le modèle de test réduit de manière significative le risque d'éblouissement à 34 % en moyenne par rapport au modèle de référence quelle que soit la position de l'observateur. Les résultats de l'évaluation qualitative issue du questionnaire montrent que les réponses positives des participants, par rapport au modèle de test, ont confirmé que la distribution de la lumière est plus uniforme et suffisante en quantité avec un contraste bien défini. Les statistiques démontrent également que le système de PAI a contribué de manière considérable à l'éclairage de l'espace, 59.67 % des sujets étaient satisfaits de l'éclairage et 61.28 % de l'uniformité de la distribution lumineuse, 53.22 % étaient satisfaits de la quantité de lumière présente et 59.67 % ont pu définir le contraste. Les résultats indiquent aussi que les participants ont préféré l'éclairage et l'ambiance lumineuse créés par le PAI. Les sujets ont recouru aux trois échelles positives des adjectifs suivants : 'agréable', 'stimulante', 'ordonnée', 'claire' et 'passive' afin d'exprimer leurs satisfaction et leurs sensations. De plus, 60 % des participants ont considéré l'espace équipé du PAI comme plus ouvert, plus spacieux et plus lumineux que celui de référence. L'interprétation des graphiques a montré que les gens étaient satisfaits de leur environnement lumineux lorsque le D.G.I.P présente des valeurs inférieures à 20 %. Pour le modèle de test, toutes les valeurs de D.G.I.P enregistrées étaient comprises entre 02 % et 20% (éblouissement imperceptible) et les participants ont recouru à des appréciations positives (échelle 6 et 7).

Les mots clés

Éclairage naturel, confort visuel, plafond anidolique intégré (PAI), modélisation, simulation numérique, simulation expérimentale, questionnaire.