



Faculté de Technologie  
Département d'Architecture



Thème :  
Étude et optimisation de l'éclairage naturel dans les espaces  
d'exposition

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master II en Architecture  
« Spécialité Architecture »

Préparé par :  
CHENNIT Kenza

<b>Dr. SARAOUI Selma</b>	<b>MCB</b>	<b>Département architecture de Bejaia</b>	<b>Président de jury</b>
<b>Dr. KHADRAOUI Mohamed Amine</b>	<b>MCB</b>	<b>Département architecture de Bejaia</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr. CHABANE Djamel</b>	<b>PR</b>	<b>Département architecture de Bejaia</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. MERZOUG Ferhat</b>	<b>MCB</b>	<b>Département architecture de Bejaia</b>	<b>Invité</b>

## ***Dédicace***

*Je dédie ce mémoire à ...*

*A mes chers parents Hocine et Naima Pour leurs accompagnements, leur soutien et leur patience tout en long de mes études.*

*A mes chers sœurs Mounira et Kahina, à mon cher frère Youba, à la mémoire de ma grand-mère DJABALLI Tassaadit et mes adorables petites nièces Asma et Hana.*

*A l'ensemble de personnels et visiteurs de cas d'étude pour leurs accueils et leurs contributions.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation et la réussite de ce travail.*

## **Remerciements**

*En premier lieu, je remercie Dieu de m'avoir donné la force, le courage et la patience d'accomplir ce travail, d'avoir guidé mes pas durant tout mon parcours scolaire et universitaire.*

*Je remercie ma famille, mes parents, mes sœurs, et mon frère d'avoir toujours été là pour moi, de m'avoir soutenu dans toutes les circonstances et de m'avoir fourni les meilleures conditions afin que je puisse mener mon projet d'études à termes.*

*Je tiens à remercier spécialement CHENNIT Farid, ton aide m'a été précieuse et je tiens à te remercier chaleureusement et j'espère pouvoir t'aider à mon tour en retour.*

*Ensuite, je remercie notre encadreur Dr. KHADRAOUI Mohamed Amine, ses encouragements et ses conseils nous ont poussé à donner le meilleur de nous afin de faire un travail bien mené.*

*Je désire aussi remercier Madame SARAOUI Selma Epse ATTAR, pour ses recommandations, ses conseils avisés et sa gentillesse.*

*Enfin, j'adresse mes fidèles remerciements aux membres de jury et à tous ceux qui se sont et se seront intéressés à cette recherche.*

## **Résumé**

Cette présente recherche est une étude de l'éclairage naturel dans les espaces d'exposition, qui vise à exposer une stratégie pour l'utilisation de la lumière du jour et de la durabilité dans l'architecture. Les dommages causés par la lumière de jour dans les musées ont poussé de nombreux architectes à délaissier les qualités intrinsèques de la lumière naturelle au bénéfice d'un éclairage artificiel plus approprié aux conditions des musées. La lumière a le pouvoir de changer la sensation de l'espace et de donner une perception du temps. C'est un élément disponible dans la nature qui peut économiser de l'énergie, promouvoir la santé et améliorer l'expérience artistique. Au départ il y a eu une description des caractéristiques de l'éclairage naturel, le confort, les types d'éclairage naturel et un contexte historique est utilisé pour étudier comment la lumière naturelle a été utilisée dans la contemporanéité. Compte tenu des avantages et des défis liés à l'introduction de la lumière naturelle dans les galeries des musées, son utilisation contrôlée améliore l'expérience des œuvres exposées et de l'espace. Les différentes typologies d'éclairage naturel et leurs paramètres de conception ont un impact direct sur le confort visuel des usagers. Ensuite, la présentation de cas d'étude, une étude empirique avec une approche quantitative effectuée avec des prises de mesure in situ et une approche qualitative avec une enquête par questionnaire pour évaluer la satisfaction des visiteurs de l'espaces envers la lumière naturelle et le confort visuel. Et finir avec une simulation numérique pour évaluer et optimiser l'éclairage naturel dans un espace d'exposition. Les résultats de cette recherche confirment que l'éclairage zénithal avec un pourcentage de ratio de 60% assure une répartition homogène de la lumière naturelle dans l'espace d'exposition et limite les problèmes d'inconfort visuel par éblouissement. L'éclairage latérale par la façade sud capte le maximum de lumière naturelle en hiver, mais peut créer des espaces qui souffre d'éblouissement à cause des valeurs très élevées d'éclairement à proximité des ouvertures. Le confort visuel dans les espaces d'exposition est lié aux types d'éclairage utilisé, les dimensions de l'ouvertures, le pourcentage et les caractéristiques de vitrage et les dimensions de locale.

### **Mots clés :**

L'éclairage naturel, le confort visuel, les espaces d'expositions, l'éclairage latérale, l'éclairage zénithal.

## **Abstract**

This research is a study of daylighting in exhibition spaces, which aims to outline a strategy for the use of daylight and sustainability in architecture. The damage caused by daylight in museums has caused many architects to abandon the intrinsic qualities of natural light in favor of artificial lighting more appropriate to museum conditions. Light has the power to change the feeling of space and to give a perception of time. It is an element available in nature that can save energy, promote health and enhance the artistic experience. Initially there was a description of the characteristics of daylighting, comfort, types of daylighting and a historical context is used to study how daylighting has been used in contemporary times. Considering the benefits and challenges of introducing daylight into museum galleries, its controlled use enhances the experience of the works on display and the space. The different types of daylighting and their design parameters have a direct impact on the visual comfort of users. Then, the presentation of case studies, an empirical study with a quantitative approach carried out with in situ measurements and a qualitative approach with a questionnaire survey to evaluate the satisfaction of visitors to the space with natural light and visual comfort. And finally, a numerical simulation to evaluate and optimize the daylighting in an exhibition space. The results of this research confirm that zenithal lighting with a percentage ratio of 60% ensures a homogeneous distribution of natural light in the exhibition space and limits the problems of visual discomfort by glare. Side lighting from the south façade captures the maximum amount of natural light in winter, but can create spaces that suffer from glare because of the very high illuminance values near the openings. Visual comfort in exhibition spaces is related to the types of lighting used, the size of the openings, the percentage and characteristics of glazing and the size of the space.

### **Key words :**

Natural lighting, visual comfort, exhibition spaces, lateral lighting, zenithal lighting.

## ملخص

هذا البحث هو دراسة للإضاءة الطبيعية في مساحات المعارض، والتي تهدف إلى تحديد استراتيجية لاستخدام ضوء النهار والاستدامة في الهندسة المعمارية. لقد دفع الضرر الناجم عن ضوء النهار في المتاحف العديد من المهندسين المعماريين إلى التخلي عن السمات الأصلية للضوء الطبيعي لصالح الإضاءة الصناعية الأكثر ملاءمة لظروف المتاحف. يتمتع الضوء بالقدرة على تغيير الإحساس بالمساحة وإدراك الوقت. وهو عنصر متاح في الطبيعة يمكن أن يوفر الطاقة، ويعزز الصحة ويعزز التجربة الفنية. في البداية كان هناك وصف لخصائص الإضاءة الطبيعية والراحة وأنواع الإضاءة الطبيعية والسياق التاريخي يستخدم لدراسة كيفية استخدام الضوء الطبيعي في المعاصرة. ونظرا للفوائد والتحديات التي ينطوي عليها إدخال الضوء الطبيعي إلى معارض المتاحف، فإن استخدامه الخاضع للتحكم يعزز تجربة المعارض والمساحة. تؤثر أنواع الإضاءة الطبيعية المختلفة ومعلمات تصميمها تأثيرا مباشرا على راحة المستخدمين البصرية. ثم تقديم حالات الدراسة، والدراسة التجريبية بالاستعانة بنهج كمي يتم وفقا للقياسات الموقعية والنهج النوعي في دراسة المسح الاستطلاعية لتقييم رضا زوار الفضاء عن ارتياحهم للضوء الطبيعي والراحة البصرية. والانتهاج من ذلك محاكاة رقمية لتقييم الإضاءة الطبيعية وتحسينها في مساحة المعرض. وتؤكد نتائج هذا البحث أن الإضاءة العلوية بنسبة 60% تضمن توزيعا متجانسا للضوء الطبيعي في مساحة المعرض، كما تحد من مشاكل عدم الراحة البصرية بسبب الوهج. تلتقط الإضاءة الجانبية عبر الواجهة الجنوبية أقصى كمية من الضوء الطبيعي في فصل الشتاء، ولكنها قد تخلق مساحات تعاني من الوهج بسبب قيم الإضاءة العالية جدا بالقرب من الفتحات. ترتبط الراحة البصرية في مساحات المعارض بأنواع الإضاءة المستخدمة وأبعاد الفتحات والنسبة المئوية وخصائص الزجاج وأبعاد الغرفة.

## الكلمات المفتاحية

الإضاءة الجانبية، الإضاءة الطبيعية، الراحة البصرية، مساحات المعرض، الإضاءة العلوية.

# Tables des matières

Dédicace .....	i
Remerciements.....	ii
Résumé .....	iii
Tables des matières .....	iv
Liste des tableaux .....	viii
Liste des figures .....	viii
Nomenclatures.....	x

## **Chapitre introductif**

Introduction .....	01
1. Problématique.....	02
2. Les hypothèses .....	03
3. Contexte et objectifs de la recherche.....	03
4. Analyse conceptuelle.....	03
5. Méthodologie .....	04
6. Structure du mémoire .....	05

## **La partie théorique**

### **Chapitre I : l'éclairage naturel et le confort visuel**

Introduction .....	06
1. La lumière naturelle .....	07
1.1 Source de la lumière naturelle .....	07
1.1.1 Le rayonnement électromagnétique.....	08
1.1.2 Le soleil source principale .....	08
1.1.3 Le ciel source secondaire.....	09
2. Type du ciel.....	10
2.1 Le ciel couvert uniforme.....	10
2.2 Le ciel couvert standard.....	11
2.3 Le ciel clair avec soleil .....	11
2.4 Le ciel clair sans soleil.....	11
3. Les caractéristiques physiques de la lumière naturelle .....	12
4. La propagation de la lumière naturelle :.....	14
4.1 L'absorption.....	14

4.2 La réflexion.....	14
4.3 La transmission.....	15
5. Le facteur de lumière du jour (FLJ) .....	15
6. Stratégie de la lumière naturelle .....	16
7. Le confort visuel.....	18
7.1 Définition .....	18
7.2 Les paramètres du confort visuel.....	19
7.2.1 Le niveau d'éclairage .....	20
7.2.2 La distribution lumineuse .....	20
7.2.3 Les ombres gênantes.....	20
7.2.4 Une vue vers l'extérieur .....	21
7.2.5 Un rendu de couleur correct .....	21
7.2.6 Une teinte de lumière agréable .....	22
7.2.7 L'absence d'éblouissement.....	22
7.3 Les paramètres qui influent sur le confort visuel .....	23
Conclusion.....	25
<b><u>Chapitre II : l'éclairage dans les espaces d'exposition</u></b>	
Introduction .....	26
1. Étymologie et définition du musée.....	27
2. Évolution de l'architecture des musées.....	27
3. Types d'ouvertures de la lumière du jour et connexion avec l'environnement extérieur .....	30
3.1 Eclairage latérale .....	32
3.1.1 Les fenêtres .....	32
3.1.2 Les claires-voies.....	34
3.2 Eclairage zénithal .....	35
3.2.1 Skylight.....	36
3.2.2 Les toitures en dents de scie ou sheds.....	36
3.2.3 Les lanterneaux .....	37
3.2.4 Les verrières et les dômes .....	37
4. L'éclairage artificiel .....	38
4.1 Développement des lampes .....	38
4.2 Techniques d'éclairage .....	38
Conclusion.....	43

## La partie pratique

### **Chapitre III : Etude empirique de l'éclairage naturel**

Introduction .....	44
1. Présentation de la ville .....	44
1.1 Situation.....	44
2.2 Heures d'ensoleillement à Bejaia .....	44
3. Présentation de cas d'étude .....	46
3.1 La situation .....	46
3.2 Orientation et ensoleillement :.....	47
3.3 La description du musée .....	47
4. Etude quantitative.....	48
4.1 Protocole de prise de mesure .....	48
4.2 Choix des points de mesures : .....	49
5. Résultats de Prise de mesures :.....	50
5.1 Résultat de prise de mesure pour le 15 décembre 2021 à 09H :.....	50
5.2 Résultat de prise de mesure pour le 15 décembre 2021 à 12H :.....	52
5.3 Résultat de prise de mesure pour le 15 décembre 2021 à 15H :.....	54
6. Etude qualitative.....	56
6.1 Définition du questionnaire .....	56
6.2 La population du questionnaire .....	56
6.3 Description du questionnaire .....	56
7. Présentation et interprétation des résultats du questionnaire .....	57
Conclusion.....	62

### **Chapitre IV : la simulation numérique de l'éclairage latéral et zénithal**

Introduction : .....	63
1. Présentation du logiciel utilisé « DIAL+ » : .....	63
2. Les étapes principales de travail.....	64
3. La simulation du cas d'étude.....	66
3.1 les scénarios .....	67
3.1.1 Scénario 01 : l'éclairage latérale.....	67
3.1.2 Scénario 02 : l'éclairage zénithale .....	69
Conclusion.....	71
Conclusion générale .....	72

Recommandations .....	73
Les limites de la recherche .....	74
Perspectives de recherche.....	74
Bibliographie.....	75
Annexe A .....	78
Annexe B.....	79
Annexe C.....	82

## Liste des tableaux

Tableau 3.1 : fiche technique du musée almoudjahid .....	59
--	----

## Liste des figures

Figure 01 : schéma de l'analyse conceptuelle.....	13
Figure 02: schéma de la structure du mémoire.....	14
Figure 1.1: les ondes électromagnétiques du soleil.....	17
Figure 1.2 : Illustration de la pénétration de la lumière du jour à travers un modèle réduit .....	18
Figure 1.3 : Classification des rayonnements électromagnétiques .....	18
Figure 1.4 : Le spectre solaire .....	19
Figure 1.5 : Type du ciel .....	21
Figure 1.6 : Les grandeurs photométriques .....	23
Figure 1.7 : Les différents modes de réflexion.....	25
Figure 1.8 : Les différents modes de transmission.....	26
Figure 1.9 : Les composants du facteur de lumière du jour .....	27
Figure 1.10 : stratégies de la lumière naturelle .....	28
Figure 1.11 : Le niveau d'éclairement .....	31
Figure 1.12 : les ombres gênantes .....	32
Figure 1.13 : Une vue vers l'extérieur.....	33
Figure 1.14 : Rendu des couleurs corrects .....	33
Figure 1.15 : Une teinte de lumière agréable .....	34
Figure 1.16 : l'absence d'éblouissement .....	35
Figure 1.17 : Pièce avec couleur chaude couleur froide.....	35
Figure 1.18 : Ouvertures latérales et zénithales .....	37
Figure 2.1 : Lumière naturel dans un espace d'exposition.....	40
Figure 2.2 : Les neuf muses de la mythologie grecque .....	41
Figure 2.3 : Pietro Antonio Martini, Exposition de l'Académie Royale, 1787 .....	42
Figure 2.4: Kimbell Art Museum, Texas .....	43
Figure 2.5 : Centre Georges Pompidou, Paris.....	44
Figure 2.6 : Eclairage latérale et Eclairage zénithal.....	45
Figure 2.7 : Les fenêtres .....	46
Figure 2.8 : Musée des juifs de Berlin .....	47
Figure 2.9 : les claires-voies.....	48
Figure 2.10: New Art Gallery Walsall, Angleterre .....	49
Figure 2.11 : Différents types d'éclairage zénithal .....	50
Figure 2.12 : Panthéon, Rome – Italie, et Luminaire zénithal contemporain .....	51
Figure 2.13 : Light shed Bouddhiste au bord de l'eau Lieu de culte, Tangshan, Hebei, Chine	51
Figure 2.14 : les lanterneaux .....	52
Figure 2.15 : La bourse de commerce, Paris .....	53
Figure 2.16 : Musée régionale de Drenthe, pays bas.....	54
Figure 2.17 : Kelvin Grove, Royaume-Uni.....	55
Figure 2.18 : Mise en relief .....	56

Figure 2.19 : Réduction d'ombre portée du visiteur .....	56
Figure 2.20 : Eclairage des vitrines sans éblouir.....	57
Figure 2.21 : Positionnement des appareils d'éclairage.....	57
Figure 2.22 : Souligner les murs et les œuvres .....	58
Figure 2.23 : la disposition des appareils d'éclairage mural .....	59
Figure 3.1 : Situation de la ville de Bejaia par rapport à l'Algérie et la wilaya de Bejaia.....	62
Figure 3.2 : durée d'ensoleillement .....	62
Figure 3.3 : Les rayonnements mensuels .....	63
Figure 3.4 : rayonnement global quotidien .....	63
Figure 3.5 : Musée almoudjahid.....	64
Figure 3.6 : Plan de situation et plan de masse .....	64
Figure 3.7 : Ensoleillement du musée .....	65
Figure 3.8 : Façade sud et store vénitien vertical .....	66
Figure 3.9 : logiciel falsecolor et le site convertio .....	67
Figure 3.10 : Instrument de prise de mesure .....	67
Figure 3.11 : Choix des points de mesure .....	68
Figure 3.12 : Résultats de prise de mesures à 09H.....	69
Figure 3.13 Résultats de prise de mesures à 09H.....	70
Figure 3.14 : Résultats de prise de mesures à 12H.....	71
Figure 3.15 : Résultats de prise de mesures à 12H.....	72
Figure 3.16 : Résultats de prise de mesures à 15H.....	73
Figure 3.17 : Résultats de prise de mesures à 15H.....	74
Figure 3.18 : Représentation du sexe et de l'âge.....	76
Figure 3.19 : Le niveau du confort visuel .....	77
Figure 3.20 : L'uniformité de la lumière naturelle.....	77
Figure 3.21 : La présence de la lumière naturelle dans l'espace d'exposition.....	78
Figure 3.22 : La présence des rayons solaires directs .....	78
Figure 3.23 : Les sources d'éblouissement .....	79
Figure 3.24 : Les taches solaires et ombres gênantes.....	79
Figure 3.25 : Le besoin en protection solaire et la fatigue visuel.....	80
Figure 3.26 : Un objet qui gêne la pénétration de la lumière naturelle .....	81
Figure 3.27 : Le choix de la couleur de carrelage et la texture .....	81
Figure 3.28 : Le choix de la couleur des murs .....	82
Figure 4.1 : logo du logiciel de simulation DIAL+.....	84
Figure 4.2 : étape 01 de la simulation numérique .....	86
Figure 4.3 : étape 02 de la simulation numérique .....	86
Figure 4.4 : étape 03 de la simulation numérique .....	87
Figure 4.5 : étape 04 de la simulation numérique.....	87
Figure 4.6 : facteur de lumière du jour .....	89
Figure 4.7 : l'autonomie lumineuse.....	90
Figure 4.8 : facteur de lumière du jour .....	91
Figure 4.9 : l'autonomie lumineuse .....	92

## **Nomenclature**

### **Abréviations**

RT2012 : la réglementation thermique 2012

ICOM : International Council Of Museums

HDR : High Dynamic Range

### **Indices**

$E_h$  : éclairage du plan horizontal (en lux).

$L$  : luminance moyenne du ciel en (cd /m<sup>2</sup>).

$L_\alpha$  : luminance du ciel à une hauteur angulaire  $\alpha$  par rapport à l'horizontale (cd/m<sup>2</sup>).

$L_z$  : luminance zénithale (cd/m<sup>2</sup>).

### **Symboles**

$\Pi$  : constante d'Archimède

$L_m$  : lumen

$(\phi)$  : Le flux lumineux

$S(\lambda)$  : la répartition spectrale lumineuse

$V(\lambda)$  : la sensibilité spectrale relative à l'œil humain.

$E$  : l'éclairage

$I$  : l'intensité lumineuse

$(\Omega)$  : angle solide

$S_r$  : stéradians

# **Chapitre introductif**

## Introduction

*« L'architecture est le jeu savant, correct et magnifique des volumes assemblés sous la lumière... » (Corbusier, 1923).*

La lumière a toujours été considérée par les architectes comme un élément important pour la conception architectural, et qu'elle est génératrice et révélatrice de leurs œuvres. La relation entre la lumière naturelle et l'architecture à évaluer en influençant diverses tendances qui marquent l'histoire de la création architecturale, un matériau qui a été utilisé différemment et pour différentes raisons pendant toutes les périodes de l'histoire. Constructeurs et architectes cherchés à apporter des solutions aux besoins liés à la lumière naturelle, que ce soit les exigences de la quantité de la lumière naturelle nécessaire pour éclairer un espace, ou comment mettre en évidence des aspects ou des détails spécifiques de l'espace à concevoir pour créer une atmosphère lumineuse clairement définie (Gallas, 2013).

Dans l'architecture contemporaine, nous avons vu l'utilisation exagérée de systèmes artificiel et la conceptualisation de bâtiments géométriques en verres à l'aide de murs rideaux, mais le paradoxe est que non seulement cela ne favorise pas la communication avec l'extérieure, mais crée au contraire des obstacles insurmontables, nous avons atteint théoriquement un atmosphère intérieure contrôlée qui devient souvent plus inconfortable que l'extérieur, et l'effet architectural n'est pas aussi bon que le climat. Les bâtiments éclairés naturellement ne sont pas seulement des solutions techniques pour résoudre les problèmes d'efficacité énergétique et

même des solutions esthétiques intégrées au bâtiment, mais elle doit être une partie importante d'une philosophie qui reflète l'attitude plus responsable et sensible des êtres humains envers l'environnement dans lequel ils vivent (Lieberman, 1991).

Comme la qualité de la lumière du musée a une grande influence sur la perception et l'expérience des visiteurs, il est plus confortable et plus satisfaisant de faire l'expérience de l'art sous la lumière naturelle que sous un éclairage artificiel. De plus, en raison du changement de la nature de la lumière du jour, chaque expérience de visiteur sera unique. L'utilisation de la lumière naturelle peut offrir un bon confort visuel dans l'espace et permettre une acuité visuelle tout en conservant le naturel de l'apparence et en affichant les objets sous leurs forme authentique (Iordanidou, 2017). L'œil humain est particulièrement adapté au riche spectre de la lumière naturelle. Par conséquent, si elle est correctement contrôlée, cette dernière est généralement meilleure que la lumière artificielle pour exposer des œuvres d'art. Il permet également de rester en contact avec le monde extérieur, le climat, l'évolution du temps et le bonheur de l'environnement intérieur, évitant ainsi le sentiment d'être enfermé (Thévenet, 2012).

L'utilisation intelligente de la lumière du jour est l'apanage d'une architecture de qualité et met en valeur chaque objet. Cependant, la lumière du jour ne crée pas seulement un sentiment de bonheur, elle économise également de l'énergie et minimise l'utilisation de la lumière artificielle. Dans les bâtiments dédiés à l'art et à la culture, en plus de la qualité de la lumière, les aspects conservateurs doivent également être pris en compte (Zumtobel, sd).

## **1. Problématique**

L'existence humaine est étroitement liée à la lumière. Ce dernier constitue l'élément de base de la vie sur terre, le générateur. Elle représente une part indéniable de nos recettes quotidiennes, et nous affecte d'un point de vue physique et psychologique. La lumière du jour avec ses changements constants est d'une grande importance pour les aspects biologique, visuels et émotionnels. L'introduction de la lumière du jour dans les musées crée un intérieur dynamique qui, peut également contribuer à atténuer la fatigue et à prolonger la durée de la visite.

Considérant que la lumière naturelle est un phénomène complexe, plusieurs types d'informations liées aux projets architecturaux sont nécessaires, ce qui a conduit de nombreux architectes à ignorer la qualité inhérente de la lumière naturelle et ont tendance à utiliser un éclairage artificiel qui peut mieux répondre aux besoins des musées.

Dans ce cadre il est nécessaire de se questionner :

- **Quelle est l'impact de l'éclairage naturel sur les espaces d'exposition ?**
- **Comment optimiser l'éclairage naturel et qu'elles sont les stratégies à envisager pour assurer un confort visuel optimal dans les espaces d'exposition ?**

## **2. Les hypothèses**

Afin de répondre aux questions de la problématique un ensemble des hypothèses ont été proposées :

- Utiliser un éclairage naturel dans les espaces d'expositions peut-être le meilleur moyen pour assurer un confort visuel.
- L'éclairage zénithal et latéral sont deux modes d'éclairage muséographique qui peuvent assurer une meilleure présentation et conservation des œuvres exposées.

## **3. Contexte et objectifs de la recherche**

Ce travail présente une approche quantitative dont l'objectif principale est d'étudier et optimiser l'éclairage naturel dans les espaces d'exposition en rapport avec les caractéristiques climatiques et lumineuses de la ville de Bejaia. D'autres objectifs sont fixés et sont résumés dans les points suivants :

- Mettre en évidence l'éclairage naturel dans les espaces d'exposition.
- Déterminer le rapport entre les dimensions de la lumière et l'espace architecturale afin d'assurer un confort visuel optimal dans les espaces d'expositions.
- L'utilisation de l'éclairage naturel pour la diminution de la consommation énergétique.

## **4. Analyse conceptuelle**

L'analyse conceptuelle de la recherche résulte des concepts de l'hypothèse et de l'observation de la réalité sur le thème choisi, et que l'on va chercher à modéliser et de les rendre comme phénomènes mesurables. Les variables indépendantes et dépendantes ont été dégagées :

- Le type de mode d'éclairage et les caractéristiques des dispositifs utilisés ont probablement un impact sur le confort visuel des occupants et l'efficacité énergétique du bâtiment.

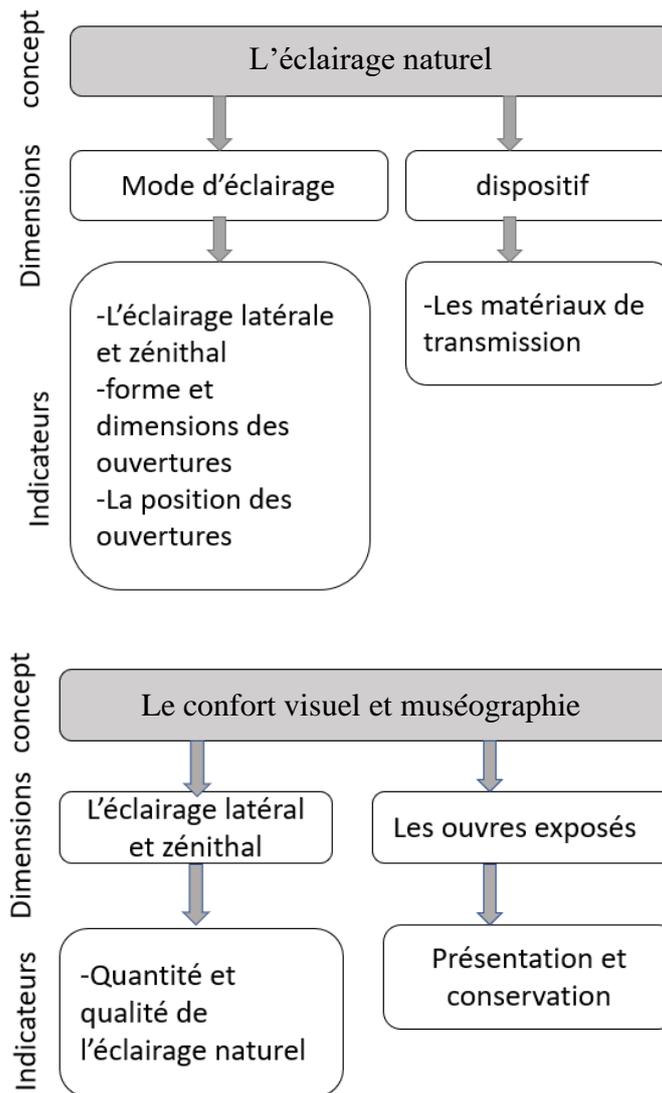


Figure 01 : Schéma de l'analyse conceptuelle (source : Auteur, 2021)

## 5. Méthodologie

Pour répondre aux différentes problématiques et vérifier les hypothèses proposées dans cette recherche, nous allons préconiser une démarche méthodologique basée sur deux parties :  
**Etude théorique :** présente un corpus théorique contenant les principales définitions et concepts du sujet sélectionné, qui s'appuie sur une recherche bibliographique et documentaire de diverses sources, qui permet la compréhension des éléments les plus importants se rapportant au sujet de recherche, dont la lumière naturelle en architecture, gérer l'éclairage naturel dans les espaces d'expositions.

**Etude pratique :** consacré à l'approche empirique ; une approche qualitative et quantitative et une simulation numérique de l'éclairage naturel dans les espaces d'expositions sur le logiciel DIAL+.

## 6. Structure du mémoire

Cette recherche est divisée en deux parties, la première s'articule autour de deux chapitres et la deuxième partie est constituée de deux chapitres qui commence par une introduction et qui se termine par une conclusion.

**La partie théorique** précédée par une introduction générale dont laquelle on a défini une introduction, problématique, hypothèses, contexte et objectifs de la recherche, analyse conceptuelle, méthodologie, et la structure du mémoire.

Cette partie constitue le bagage théorique nécessaire pour notre étude ; elle est composée de deux chapitre : le **premier chapitre** comporte les différentes connaissances de base et les notions fondamentales de l'éclairage naturel et le confort visuel. Le **deuxième chapitre** traite le sujet de l'éclairage naturel dans les espaces d'expositions.

**La partie pratique** qui comporte deux chapitres, le **troisième chapitre** sur la représentation de cas d'étude et le **quatrième chapitre** sur la simulation numérique, elle consiste à étudier l'éclairage naturel dans un espace d'exposition, d'interpréter les résultats et puis la proposition d'un ensemble de recommandations pour l'amélioration de l'utilisation de l'éclairage naturel.

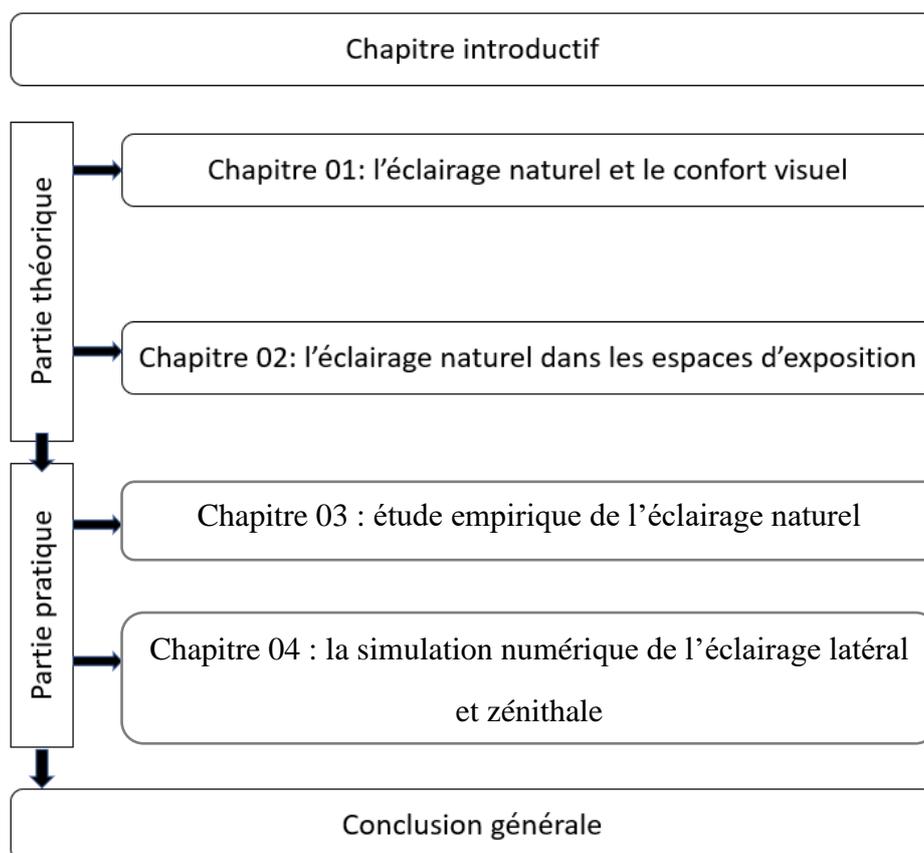


Figure 02 : Schéma de la structure du mémoire (source : auteur, 2021)

# **La partie théorique**

## **Chapitre I :**

### **L'éclairage naturel et le confort visuel**

## Introduction

L'idée de la lumière comme composante intégrale de toute vie et de toute création était déjà une évidence dès le début. La lumière du soleil est notre principale source et notre principal fournisseur de lumière, de chaleur et d'énergie, et elle entretient non seulement toute vie sur Terre, mais aussi la planète elle-même. Non seulement il fournit aux plantes l'énergie nécessaire à la photosynthèse, qui à son tour soutient toute la vie animale et humaine, mais il est également la source d'une grande partie de nos connaissances, car la plupart des apprentissages se font à travers nos yeux (Moscoso, 2016).

La lumière du soleil est composée de diverses énergies qui sont transmises à la Terre sous forme d'ondes électromagnétiques. Seule une fraction de ces ondes touche réellement la surface de la Terre, et uniquement un pour cent environ du spectre électromagnétique global serait perçu par l'œil. Cette partie du spectre électromagnétique visible, qui comprend toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, du violet (la plus courte longueur d'onde) au rouge (la plus longue longueur d'onde), est la composante la plus importante du fonctionnement et de l'évolution de l'être humain. Notre vie, notre santé et notre bien-être sont véritablement dépendants du soleil. (Adel-Tawfiq, 2005).

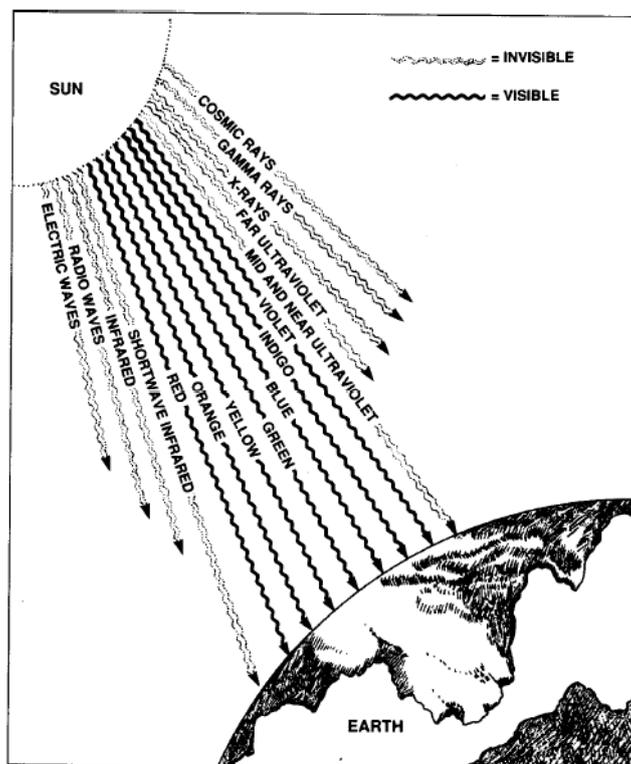


Figure 1.1 : Les ondes électromagnétiques du soleil

(Source : Lieberman, 1991)

## 1. La lumière naturelle

La lumière est une sensation purement humaine, comme le son, le goût, l'odeur et la chaleur. Il faut quelque chose pour stimuler les sens, dans ce cas, le rayonnement électromagnétique qui tombe sur la rétine de l'œil. Par conséquent, la lumière peut être considérée comme une combinaison de rayonnement et de notre réponse au rayonnement. La luminosité de la lumière que nous percevons dépend de l'environnement. Si l'œil est maintenu dans une faible lumière pendant un certain temps, il devient plus sensible et apparaît plus brillant que la normale dans une certaine quantité de lumière (Tourre, 2007). C'est pourquoi il existe une description mathématique standardisée de la sensibilité visuelle. Ces unités interdépendantes décrivent le flux lumineux, son intensité dans l'espace, la luminance au point et la luminance d'une surface. Ces unités sont à la fois physiques et psychologiques, car elles dépendent à la fois des propriétés physiques du rayonnement électromagnétique et de notre perception. Le flux lumineux décrit le flux total d'une lumière provenant d'une source lumineuse (Tregenza & Loe, 1998).

### 1.1 Source de la lumière naturelle

Nous discuterons des sources de lumière naturelle dans les espaces architecturaux. La principale source de lumière est bien sûr le soleil, le ciel est une source secondaire de lumière naturelle (Biron, 2008).



Figure1.2 : Illustration de la pénétration de la lumière du jour à travers un modèle réduit

(Source : Derek, 2004)

La distribution de la lumière dans un espace dépend de la répartition des sources lumineuses et de la réflexion des parois. Elle est d'autant meilleure que les réflexions de chaque paroi sont élevées et uniformément réparties (couleurs uniformes).

### 1.1.1 Le rayonnement électromagnétique

Les rayonnements électromagnétiques se déplacent rapidement dans le vide. Ils peuvent être assimilés à des ondes ou à des particules qui se propagent en ligne droite. Ils se définissent par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde  $\lambda$ .

La figure montre une division de ces radiations suivant leur longueur d'onde (De Herde & Liebard, 2005).

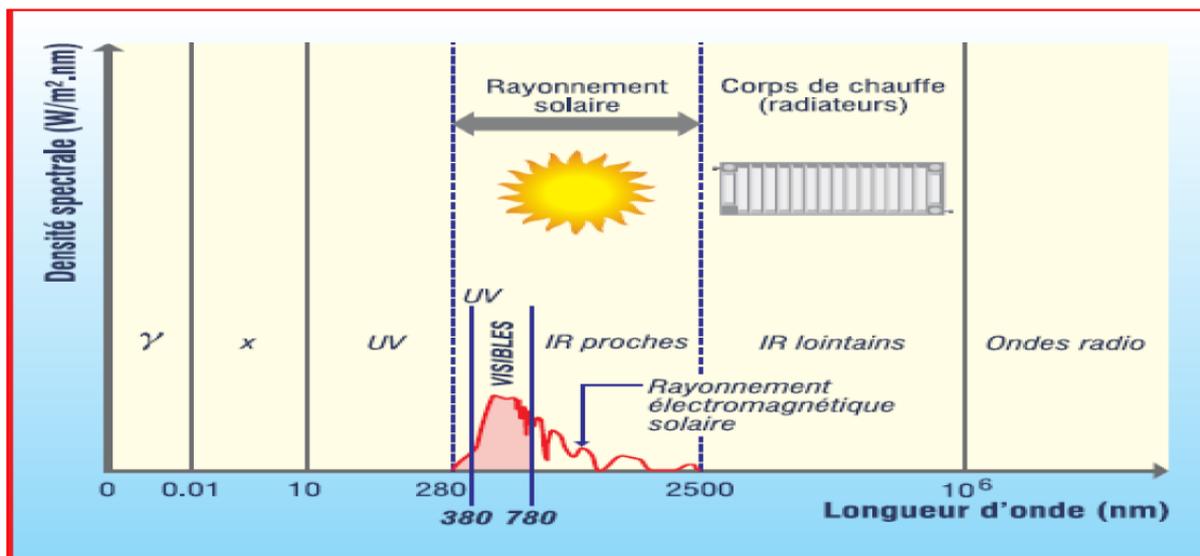


Figure 1.3 : Classification des rayonnements électromagnétiques

(Source : De Herde & Liebard, 2005)

« Le rayonnement solaire ne correspond qu'à une partie du spectre des ondes électromagnétiques. Le soleil dégage autour de lui une énergie de 66 millions de W/m<sup>2</sup>, produite par des réactions nucléaires en chaîne. Seul une fraction de cette énergie atteint les limites de notre atmosphère. Elle vaut 1353 W/m<sup>2</sup> et est appelée constante solaire. L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que cette valeur car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15 %) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6 %). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc » (De Herde & Liebard, 2005).

### 1.1.2 Le soleil source principale

Le soleil est une boule de gaz incandescents qui émet lumière et chaleur radiante. La lumière solaire est blanche. Son spectre est complet et continu ; il est composé de radiation de

longueurs d'onde allant de 0.3 à 2.6 microns 'le maximum du spectre de la lumière solaire coïncide avec le maximum de la courbe des sensibilités de l'œil, radiations vert-jaune de longueurs d'onde 0.55 micron' (Sigrid & De Herde, 2003).

Son indice optimal de rendu des couleurs (IRC) est de 100, sur une échelle allant de 0 à 100. La lumière solaire varie de manière continue la journée en intensité de flux lumineux comme en direction, ainsi qu'au rythme de rotation de la terre autour du soleil, les saisons résultant de son inclinaison. Quand le Nord est plus rapproché du Soleil que le Sud, c'est l'été dans l'hémisphère nord et l'hiver dans l'hémisphère sud. Dans les régions de l'équateur, le jour et la nuit sont d'égale longueur (Narboni, 2006).

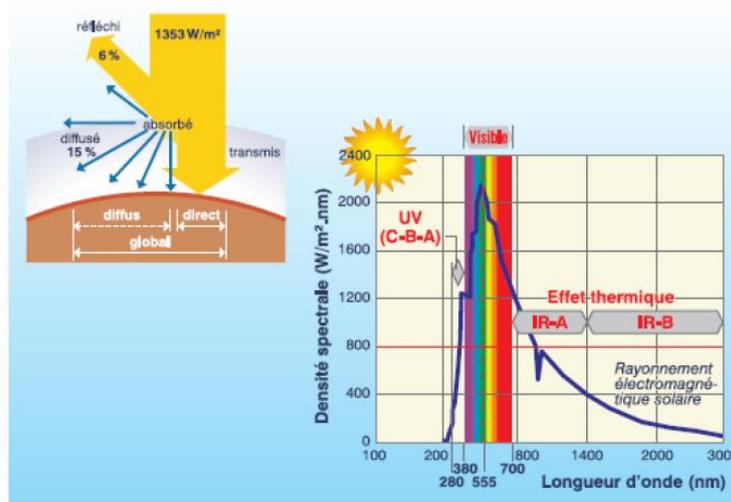


Figure 1.4 : Le spectre solaire (Source : De Herde & Liebard, 2005)

Le spectre solaire est distribué en trois catégories de rayonnement :

- Les ultraviolets (UVA et UVB) dont la longueur d'onde est située entre 280 et 380 nm. Ils assurent environ 5 % de la totalité du rayonnement solaire.
- La partie visible du spectre. Elle correspond à la portion du rayonnement solaire comprise entre 380 et 780 nm. C'est dans ce champ visible que l'énergie solaire est la plus intense. Il correspond à 50% de la somme globale du rayonnement solaire.

Infrarouge (IRA et IRB) qui correspondent à des longueurs d'onde allant de 700 à 2500 Nm. Elles comptent pour environ 45% du spectre solaire. (De Herde & Liebard, 2005).

### 1.1.3 Le ciel source secondaire

La portion du rayonnement solaire qui est à la fois absorbée et ré illuminés par l'atmosphère constitue ce que nous appelons l'éclairage du ciel.

La présence de lumière naturelle est en fonction de la position du soleil dans le ciel qui dépend de l'heure de la journée et de la situation géographique du milieu concerné - mais aussi des conditions climatiques (couverture nuageuse), de la pollution, du relief, de l'orientation de la surface... Devant cette multitude de conditions atmosphériques existantes, des ciels standards ont été fixés pour faciliter l'étude de l'éclairage naturel. Ces ciels sont tous définis par la répartition de leur luminance sur la voûte céleste (Roditi, 2011).

## 2. Type du ciel

Vu la multitude de conditions météorologiques existantes, des ciels standards ont été établis pour les études d'éclairage naturel. Chacun de ces ciels est caractérisé par la répartition de sa luminance sur la voûte céleste.

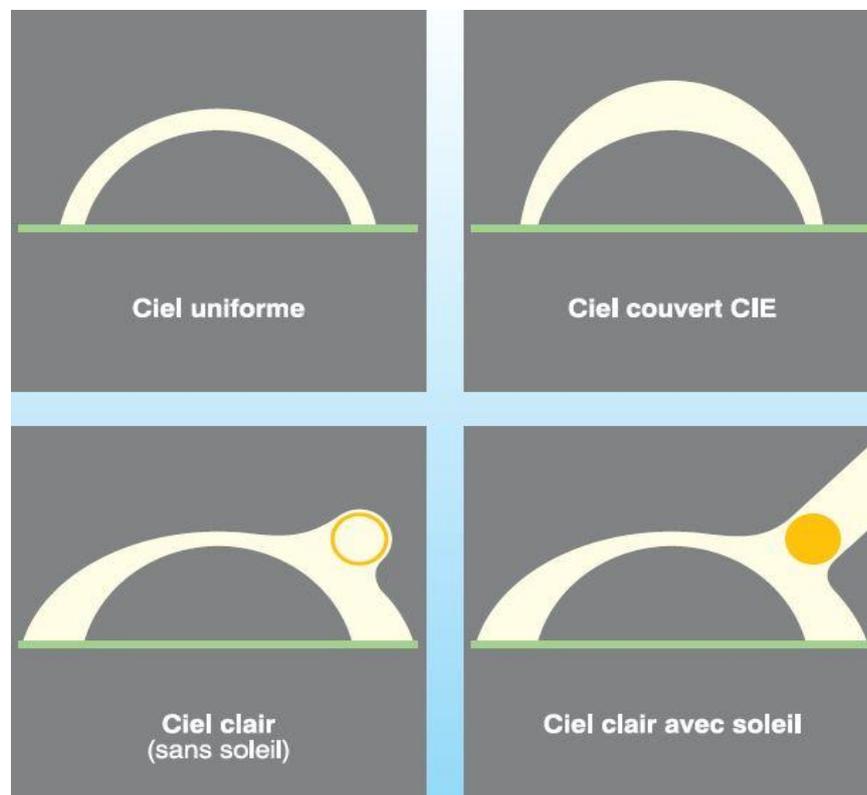


Figure 1.5 : Type du ciel (Source : De Herde & Liebard 2005)

### 2.1 Le ciel couvert uniforme

Il s'agit du premier modèle utilisé dans les études de lumière naturelle et se caractérise par une luminosité uniforme qui n'est pas affectée par les paramètres géométriques. Cette situation correspond à un ciel couvert de nuages épais ou à une atmosphère poussiéreuse où le soleil est invisible. Dans ce cas, la relation entre la luminosité uniforme du ciel et l'éclairement d'une surface horizontale dégagée est donnée par la formule (De Herde & Liebard 2005).

$$E_h = \pi L$$

$E_h$  : éclairement du plan horizontal (en lux). L'éclairement d'une surface est le rapport du flux lumineux reçu par l'aire de cette surface.

$L$  : luminance moyenne du ciel en (cd /m<sup>2</sup>).

## 2.2 Le ciel couvert standard

Le modèle standard de ciel nuageux est le plus proche de la réalité. Pour cela, la luminosité varie selon sa position sur le dôme céleste, et sa valeur au zénith est trois fois celle à l'horizon. Le modèle correspond à un ciel avec des nuages clairs couvrant le soleil. Cette relation définie est connue sous le nom de formule de (De Herde et Liebard, 2005).

$$L_\alpha = \frac{L_z(1 + 2\sin\alpha)}{3}$$

Avec :  $L_\alpha$  luminance du ciel à une hauteur angulaire  $\alpha$  par rapport à l'horizontale.

$L_z$  : luminance zénithale.

## 2.3 Le ciel clair avec soleil

Dans le cas d'un ciel clair, la meilleure stratégie consiste à ne considérer que le rayonnement solaire direct, qui a une luminosité d'environ 100 000 cd / m<sup>2</sup> et dont la position correspond aux heures et aux jours. En outre, l'albédo du reste du dôme céleste et du sol ainsi que les surfaces externes à proximité doivent également être considérés comme des sources indirectes. L'albédo est la fraction du rayonnement solaire réfléchi par une surface ou le rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente (dans ce cas, le sol), qui dépend des propriétés du sol, de sa température et de sa capacité à réfléchir le rayonnement solaire. Un ciel clair et la lumière du soleil permettent d'étudier le rôle de l'ombre et de la lumière et les effets de l'éblouissement. Sous un ciel clair, la coupole du ciel diminue de luminosité en s'éloignant du soleil (De Herde & Liebard, 2005).

## 2.4 Le ciel clair sans soleil

C'est le type de ciel dont les valeurs de luminance changent en suivant les paramètres géométriques et la position du soleil. Le ciel clair émet un rayonnement diffus qui varie en fonction de la position du soleil mais sans intégrer le rayonnement solaire direct (De Herde & Liebard, 2005).

### 3. Les caractéristiques physiques de la lumière naturelle

Les grandeurs photométriques sont à la base de toutes les mesures en éclairage et il en existe quatre fondamentales :

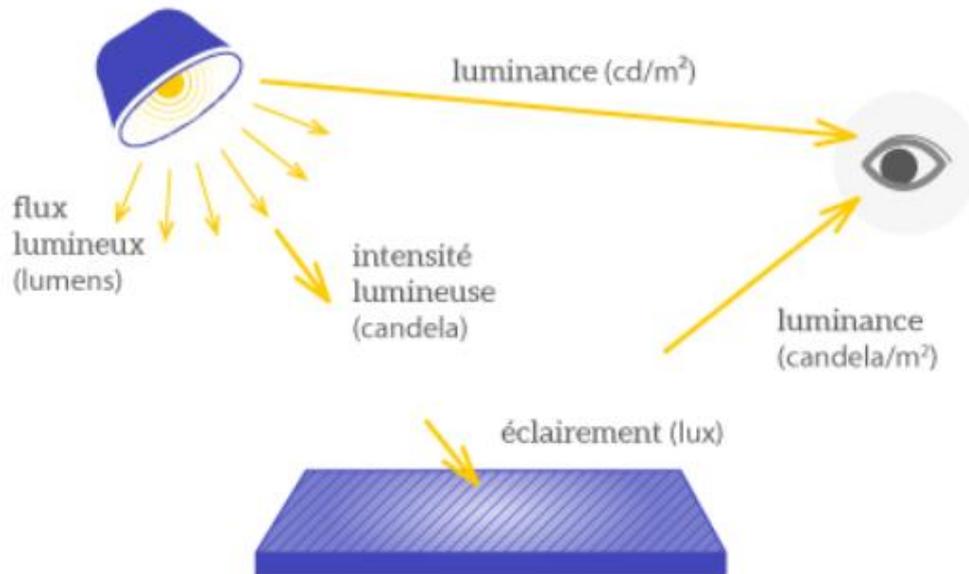


Figure 1.6 : Les grandeurs photométriques

(Source : <https://leclairage.fr/guide-de-leclairage/>)

- **Le flux lumineux**

Selon Reiter et De Herde, 2004 : « *Le flux lumineux ( $\phi$ ) exprimé en Lumen (lm), est la puissance énergétique émise par une source sous sa forme visible* ». Il correspond au rayonnement prenant en compte la sensibilité de l'œil humain et ayant une longueur d'onde comprise dans le domaine visible (380 -700 nm). Le flux lumineux d'une source est calculé en fonction du flux énergétique émis par la source et de la sensibilité de l'œil pour chacune des longueurs d'ondes du domaine visible.

$$\Phi = 683 \cdot \int_{380nm}^{700nm} S(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

$S(\lambda)$  est la répartition spectrale lumineuse correspondant à l'énergie émise pour chacune des longueurs d'onde du domaine visible.  $V(\lambda)$  est la sensibilité spectrale relative à l'œil humain. La valeur 683 lm/W correspond à la valeur maximale de sensibilité de l'œil pour un rayonnement monochromatique.

- **L'éclairement lumineux**

Selon Reiter et De Herde, 2004 : L'éclairement lumineux correspond au flux lumineux ( $\Phi$ ) reçu par unité de surface (S). Il est exprimé en lux (lx). 1 lux équivaut à un flux lumineux de 1 lumen (lm) couvrant uniformément une surface de 1 mètre carré.

$$E = \Phi / S \text{ avec } 1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} / \text{m}^2$$

Il existe une relation qui relie la notion de l'éclairement E (lx) à celle de l'intensité lumineuse I (cd) où l'éclairement est égal au rapport entre l'intensité lumineuse et la distance au carré entre la source et la surface à éclairer ( $d^2$ ).

$$E = I / d^2$$

Cette formule fait intervenir l'angle d'inclinaison ( $\alpha$ ) entre la direction de la source et la surface éclairée quand ces deux éléments ne sont pas perpendiculaires.

$$E = (I / d^2) \cos \alpha \gg$$

Ce genre de paramètre permet au concepteur de déterminer la quantité de lumière contenue dans un espace architectural. Les valeurs d'éclairement sont une source de référence que les architectes utilisent pour ajuster leurs suggestions architecturales et pour atteindre des résultats d'éclairement bien définis (Steane, 2011).

### **L'intensité lumineuse**

Selon Reiter et De Herde (2004) : L'intensité lumineuse (I) correspond au flux lumineux ( $\Phi$ ) émis par unité d'angle solide ( $\Omega$ ) dans une direction donnée. L'unité de mesure de l'intensité lumineuse est le candela (cd).

$$I = \Phi / \Omega$$

L'angle solide ( $\Omega$ ) d'un cône est le rapport de la surface (S) découpée sur une surface sphérique (ayant son centre au sommet de ce cône) au carré du rayon de la sphère (r). Il s'exprime en stéradians (sr) (Reiter, De Herde, 2004).

$$\Omega = S / r^2$$

Le stéradian est l'angle solide qui découpe une surface, d'une aire égale  $r^2$ , d'une sphère de rayon (r). L'angle solide maximal est à  $4\pi$ . L'intensité lumineuse d'une valeur de 1 candela est égale au flux lumineux de 1 lumen rayonné dans un angle solide de 1 stéradian. »

$$1 \text{ candela} = 1 \text{ lumen} / 1 \text{ stéradian}$$

- **La luminance**

La luminance est définie comme étant le rapport entre l'intensité lumineuse émise par une source lumineuse dans une direction donnée et la surface apparente de cette source dans la même direction. Elle traduit la sensation visuelle suggérée par une source de lumière principale (soleil) ou secondaire 'surfaces éclairées' (Reiter & De Herde, 2004). Ce paramètre donne au concepteur la possibilité de mesurer l'aspect visible de la lumière qui éclaire l'espace architectural et son degré d'éblouissement, ce qui l'aide à accomplir ses objectifs en ce qui concerne la qualité de la lumière (Gallas, 2013).

## 4. La propagation de la lumière naturelle :

### 4.1 L'absorption

Sous une lumière naturelle, un objet absorbe plus ou moins ses composants ; s'il les absorbe tous, il est de couleur noire ; s'il les reflète tous, il est de couleur blanche. Un objet rouge est donc un objet qui réfléchit le rouge et absorbe les autres composants de la source lumineuse qui l'éclaire (De Herde & Liebard, 2005).

### 4.2 La réflexion

Il y a quatre modalités de réflexion de la lumière sur une surface (Liebard & De Herde, 2005).

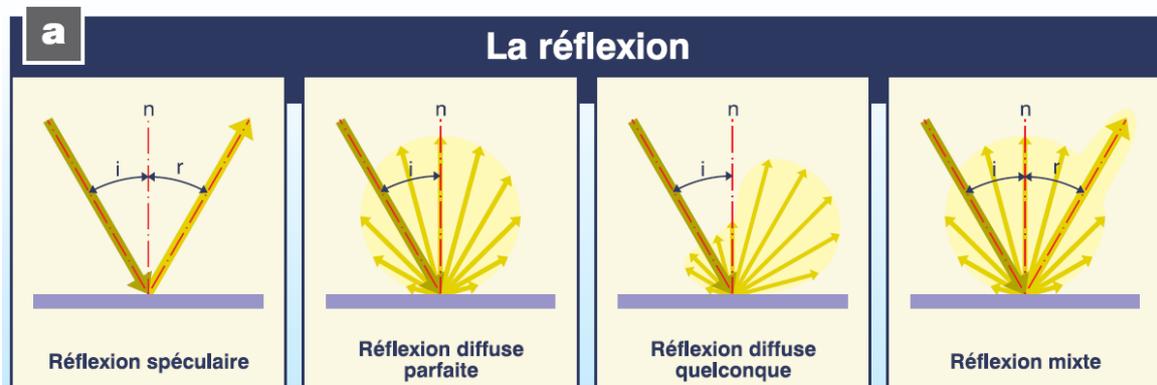


Figure 1.7 : Les différents modes de réflexion (Source : Liebard & De Herde, 2005)

- ✓ **La réflexion spéculaire** : La lumière est retournée à un degré de réflexion équivalent à l'angle d'incidence du rayon lumineux.
- ✓ **La réflexion diffuse parfaite** : la lumière réfléchie est distribuée dans toutes les directions.
- ✓ **La réflexion diffuse quelconque** : la lumière se répartit de manière aléatoire.
- ✓ **La réflexion mixte** : La lumière est réfléchie de manière diffuse mais favorise tout de même une direction précise (Liebard & De Herde, 2005).

### 4.3 La transmission

Il y a quatre modes de transmission de la lumière (Liebard & De Herde, 2005)

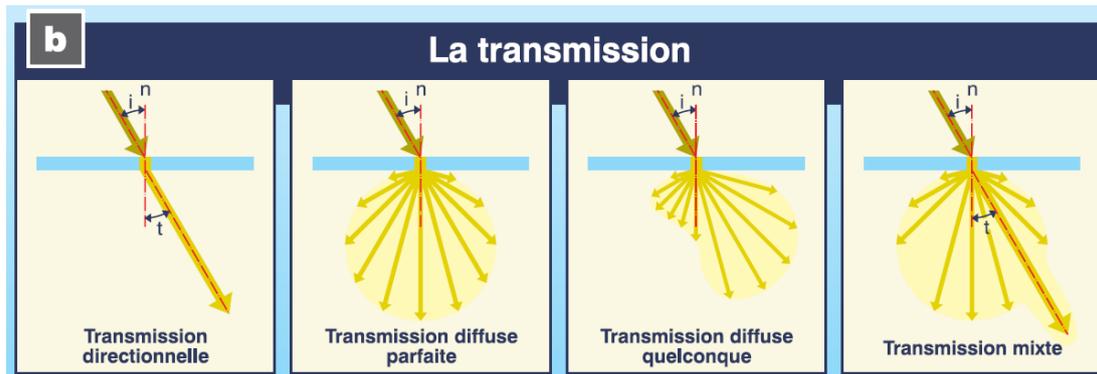


Figure 1.8 : Les différents modes de transmission

(Source : Liebard & De Herde, 2005)

- ✓ **La transmission directionnelle** : La lumière est transmise suivant un angle identique à l'angle d'incidence du rayon lumineux.
- ✓ **La transmission diffuse parfaite** : la lumière transmise est distribuée dans toutes les directions.
- ✓ **La transmission diffuse quelconque** : la lumière est réparti de manière arbitraire
- ✓ **La transmission mixte** : La lumière est transmise de façon diffuse mais favorise une direction précise (Liebard & De Herde, 2005).

### 5. Le facteur de lumière du jour (FLJ)

Selon Reiter et De Herde (2004) : Le facteur de lumière du jour est le rapport d'éclairement naturel inférieur reçu en un point. En éclairage naturel la notion d'éclairement est parfois remplacée par la notion de facteur de lumière du jour.

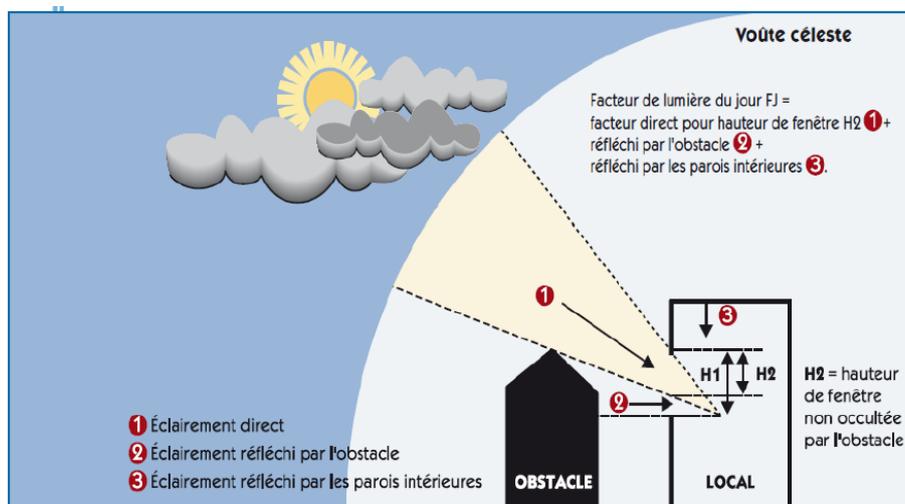


Figure 1.9 : Les composants du facteur de lumière du jour (Source : INRS4, 2012)

Ce facteur est le quotient de la lumière du jour intérieure reçue en un point (généralement le plan de travail ou le niveau du sol) par l'éclairement extérieur simultanément sur une surface horizontale, dans un site entièrement dégagé, par ciel couvert. Il est exprimé en % (Liebard & De Herde, 2005).

Dans un ciel couvert (ciel normalisé par la Commission Internationale de l'Illumination), les valeurs du facteur de lumière du jour sont indépendantes de l'orientation des fenêtres, de la saison et de l'heure de la journée. Cependant, dès lors que l'on connaît le facteur de lumière du jour en un point d'un espace, on peut alors déterminer l'éclairement existant en ce point, à tout moment de l'année, par ciel couvert, à travers l'éclairement horizontal extérieur (Zemmouri, 2011).

## 6. Stratégie de la lumière naturelle

Eclairer passivement fait partie des objectifs à atteindre pour réduire l'impact du bâtiment sur l'environnement. La RT2012 qui, met l'accent sur la réduction des consommations d'énergies, encourage effectivement à laisser une plus grande part à la lumière naturelle pour diminuer celle de l'éclairage artificiel et donc les consommations d'énergies. Et pour avoir une bonne répartition de la lumière afin d'assurer le confort visuel.

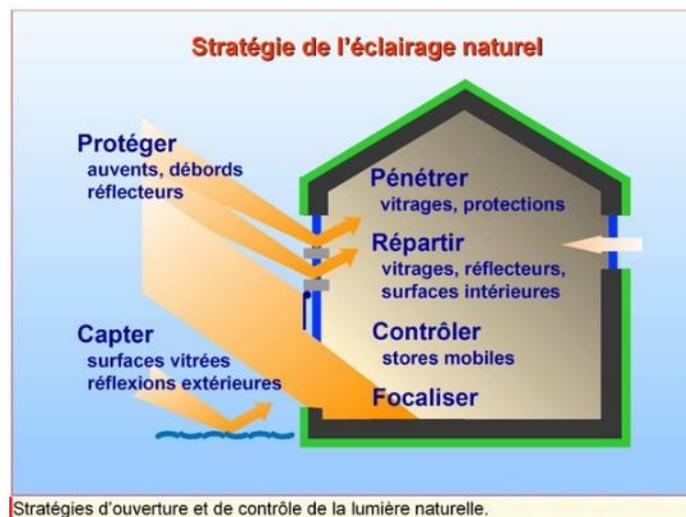


Figure 1.10 : stratégies de la lumière naturelle

(Source : Liebard & De Herde, 2005)

- **Capter**

Capter la lumière du jour, c'est la récupérer afin de pouvoir éclairer un bâtiment de manière naturelle. La lumière naturelle n'est ni fixe ni toujours égale dans sa qualité et son intensité. Elle est principalement liée à l'emplacement choisi, à la latitude et à l'altitude du lieu envisagé ainsi qu'à la pollution atmosphérique qui y règne. Pour un immeuble dont

l'emplacement est déterminé, la quantité de lumière naturelle disponible varie en fonction des facteurs suivants :

- ✓ Du type de ciel
- ✓ Du moment de l'année,
- ✓ De l'heure
- ✓ De l'orientation de l'ouverture
- ✓ De l'inclinaison de l'ouverture (De Herde & Reiter, 2003).

- **Transmettre**

De l'environnement physique du bâtiment : immeubles environnants, type de sol, végétation, Transmettre la lumière naturelle, c'est promouvoir sa diffusion à l'intérieur d'une pièce. La pénétration de la lumière dans un espace est influencée par les propriétés des ouvertures comme leur taille, leur forme, leur position et le matériau de transmission choisi. Le matériau de transmission utilisé peut être transparent ou translucide (De Herde et Reiter, 2003).

- **Distribuer**

Distribuer la lumière naturelle, c'est orienter et véhiculer les rayons lumineux de sorte à créer une répartition harmonieuse de la lumière naturelle dans le bâtiment.

Une distribution harmonieuse de la lumière naturelle dans un bâtiment peut être privilégiée par diverses approches basées sur :

- ✓ Le type de distribution lumineuse (direct, indirecte),
- ✓ La répartition des ouvertures,
- ✓ L'agencement des parois intérieures,
- ✓ Le matériau des surfaces du local,
- ✓ Les zones de distribution lumineuse,
- ✓ Les systèmes de distribution lumineuse (De Herde & Reiter, 2003).

- **Se protéger**

Se protéger de la lumière naturelle signifie bloquer en partie ou totalement le rayonnement lumineux. Pour obtenir un confort visuel, il est essentiel de se protéger contre l'éblouissement.

Le principe de fonctionnement de la protection solaire peut être basé sur de nombreux phénomènes physiques :

- ✓ L'absorption (surplombs, mur de refends, ...),
- ✓ La réflexion (light shelves, ...),
- ✓ La réfraction (prismes, ...), (De Herde & Reiter, 2003).

- **Contrôler**

Contrôler la lumière naturelle revient à maîtriser la quantité et la répartition de la lumière dans un local en tenant compte de l'évolution des conditions climatiques et des exigences des utilisateurs.

Les solutions d'éclairage naturel se divisent en trois catégories :

- ✓ Le recours à des systèmes d'éclairage naturel modifiables, comme les éléments de contrôle amovibles.
- ✓ Le réglage de l'installation d'éclairage artificiel en conformité avec la lumière naturelle existante.
- ✓ La maîtrise du flux de la lampe en suivant la présence de la lumière naturelle. (De Herde & Reiter, 2003).

## **7. Le confort visuel**

### **7.1 Définition**

L'environnement visuel fournit un sentiment de confort quand il est possible de percevoir les objets avec clarté et sans aucune fatigue dans une atmosphère agréable et colorée. Le confort visuel peut aussi être considéré comme la bonne réception d'un message en provenance de l'environnement visuel. Il repose sur la quantité, la distribution et la qualité de la lumière. Ces trois paramètres sont principalement liés aux cinq principaux paramètres physiques suivants (Kay & Afacan, 2017) :

- L'éclairement,
- La luminance,
- Le contraste,
- L'éblouissement,
- Le spectre lumineux.

S'ajoutent à ceux-ci des paramètres liés à la personne : l'âge, l'acuité visuelle, le temps disponible pour l'exécution de la tâche, et des paramètres propres à l'objet en question, comme sa taille, par exemple (Magali & De Herde, 2002).

Selon l'association Haute Qualité Environnementale : « Elle définit le « confort visuel » comme étant le dixième cible du projet de construction de haute qualité environnementale. Ses critères de référence en termes d'éclairage sont les suivants :

- Éclairage naturel optimal en termes de confort et de dépenses énergétiques.
- Éclairage artificiel satisfaisant et en appoint de l'éclairage naturel.

- Relation visuelle suffisante avec l'extérieur. »

Et selon Mudri (2002), il implique « l'absence de gêne qui pourrait provoquer une difficulté, une peine et une tension psychologique, quel que soit le degré de cette tension ».

Dans un environnement virtuel, la visibilité nette des objets et sans fatigue apporte un sentiment de confort et de sécurité à celui qui observe. Une deuxième explication du confort visuel est la réception correcte du message de l'environnement virtuel (Bodart, 2002). Elle est garantie par un éclairage convenable du champ visuel, en évitant les contrastes trop marqués, y compris les éblouissements (Roulet, 2004).

## **7.2 Les paramètres du confort visuel**

Selon De Herde et Liebard (2005) : L'environnement visuel nous procure un sentiment de confort lorsque nous pouvons voir les objets clairement et sans fatigue dans une atmosphère agréable et colorée. L'obtention d'un environnement visuel confortable dans une pièce favorise le bien-être des occupants. A l'inverse, un éclairage trop faible ou trop fort, mal distribué dans l'espace ou dont le spectre lumineux est mal approprié à la sensibilité de l'œil ou à la perception des couleurs, entraîne une fatigue plus ou moins longue à expirer, couvre Même les troubles visuels, accompagnés d'une sensation d'inconfort et de performances visuelles réduites.

Le confort visuel relève d'une association de paramètres physiques : l'éclairement, la luminance, le contraste, l'éblouissement et le spectre lumineux, auxquels s'ajoutent les spécificités de l'environnement et du lieu visuel à accomplir, comme la taille des éléments à observer et le temps imparti pour la vision. Le confort visuel est, en outre, des facteurs physiologiques et psychologiques relatifs à l'individu tels que son âge, son acuité visuelle ou la possibilité de regarder à l'extérieur.

Les paramètres de confort visuel pour lesquels l'architecte a un rôle déterminant sont les suivants:

- Le niveau d'éclairement de la tâche visuelle ;
- Une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace ;
- Les rapports de luminance présents dans le local ;
- L'absence d'ombres gênantes ;
- La mise en valeur du relief et du modèle des objets ;
- Une vue vers l'extérieur ;
- Un rendu des couleurs correct ;
- Une teinte de lumière agréable ;
- L'absence d'éblouissement ».

### 7.2.1 Le niveau d'éclairage

La figure suivante représente le niveau d'éclairage.

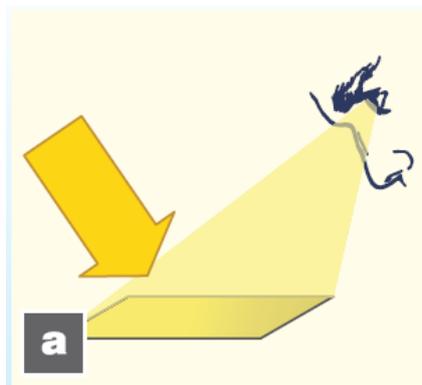


Figure 1.11 : Le niveau d'éclairage (Source : Liebard & De Herde, 2005)

L'éclairage moyen conseillé est généralement fixé en tenant compte de la fonctionnalité de la pièce et de la précision du repérage visuel qui doit être effectué. Les niveaux d'éclairage recommandés doivent être modulés en prenant en compte le contraste de luminance entre l'élément observé et son arrière-plan (De Herde & Liebard, 2005).

### 7.2.2 La distribution lumineuse

La distribution lumineuse consiste à utiliser un éclairage adapté au local ni très fort ni très faible pour avoir un éclairage uniforme dans toute la pièce qui vas aider à faire les taches plus facilement et éviter la fatigue des yeux aussi le contraste. La répartition de la lumière à l'intérieur d'un local dépend essentiellement de la répartition des sources de lumière et aussi de coefficients de la réflexion des parois de ce local. Afin de mieux répartir la lumière naturelle dans un lieu de travail nécessitant la lumière du jour, il est recommandé de disposer les plans de travail auprès des ouvertures avec un aménagement des mobiliers réfléchi pour qu'ils ne fassent pas un écran (Liebard & De Herde, 2005).

### 7.2.3 Les ombres gênantes

La figure suivante illustre les ombres gênantes.

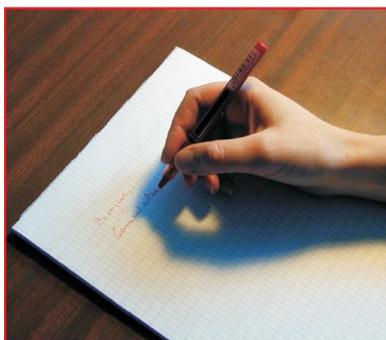


Figure 1.12 : les ombres gênantes (Source : Liebard & De Herde, 2005)

Selon Liebard, De Herde (2005) ; c'est les ombres qui sont créés par la présence d'un élément entre la tache visuelle et la source lumineuse sont mauvaise pour la vision puisqu'elles diminuent fortement les contrastes.

#### 7.2.4 Une vue vers l'extérieur

La figure suivante démontre une vue vers l'extérieur.



Figure 1.13 : Une vue vers l'extérieur (Source : <https://immobilier-swiss.ch/>)

Les baies vitrées ont un rôle esthétique incontestable dans la mesure où elles associent les paysages extérieurs à l'ambiance visuelle d'un espace donné (Liebard et De Herde, 2005)

#### 7.2.5 Un rendu de couleur correct

La figure suivante présente un rendu de couleur correct.

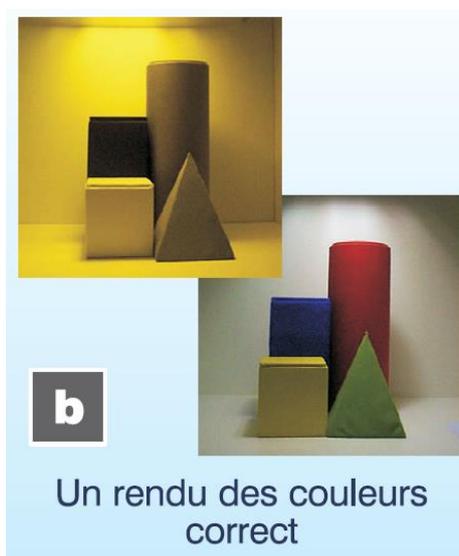


Figure 1.14 : Rendu des couleurs corrects (Source : Liebard & De Herde, 2005)

Toute source lumineuse, qu'elle soit naturelle ou artificielle présente un spectre lumineux qui lui est particulier. Visible de forme continue de forme continue le mélange des diverses radiations qui constituent ce spectre, forme par définition la lumière dite (blanche) c'est la seule qui permet à l'œil d'apprécier avec la plus grande exactitude , la couleur des objets et les plus

déliçates de leurs nuances étant donné que l'œil est conçu pour la lumière émise par les sources artificielles doit avoir la même composition spectrale que celle du soleil et du ciel pour que la vision des couleurs ne soit pas altérée, car un corps coloré réfléchit sélectivement les radiations colorées qu'il reçoit. Le système visuel regroupe ces différentes radiations réfléchies et donne une sensation de couleur. La couleur ainsi perçue est donc intimement dépendante du spectre lumineux émis, c'est-à-dire de (l'indice de rendu de couleur) (Liebard & De Herde, 2005).

### 7.2.6 Une teinte de lumière agréable

La figure suivante montre une teinte de lumière agréable.

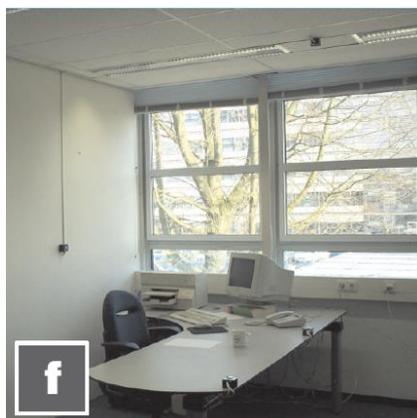


Figure 1.15 : Une teinte de lumière agréable (source : Liebard et De Herde, 2005)

La radiation colorée émise par les objets peut engendrer des effets psychophysiologiques sur le système nerveux, c'est ainsi que les couleurs de grande longueur d'onde (rouge, orange) ont un effet stimulant, tandis que celle de courte longueur d'onde (bleu, violet) ont un effet calmant. Et les couleurs intermédiaires (jaune et vert) ont, tout comme le blanc, un effet tonique et favorable à la concentration (Liebard & De Herde, 2005).

### 7.2.7 L'absence d'éblouissement

La figure suivante illustre l'éblouissement et son influence sur le confort visuel.

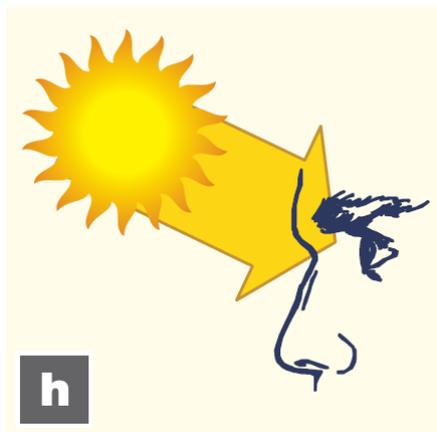


Figure 1.16 : l'absence d'éblouissement (Source : Liebard & De Herde, 2005)

L'éblouissement est causé par une luminosité excessive et intense des plans situés dans la direction de la vision ou par un contraste lumineux trop élevé entre des plans adjacents. Il entraîne des situations d'inconfort visuel important pour l'individu (Liebard & De Herde, 2005).

### 7.3 Les paramètres qui influent sur le confort visuel

- **Les couleurs**



Figure 1.17 : Pièce avec couleur chaude couleur froide

(Source : <https://www.benjaminmoore.com/fr-ca>)

(a) Pièce avec couleur chaude

(b) Pièce avec couleur froide

La couleur émise par les objets et l'environnement affecte l'état psychophysiologique et le système nerveux des habitants de la pièce, car elle affecte directement l'atmosphère de la vie. Les couleurs avec des longueurs d'onde plus longues telles que le rouge et l'orange stimulent le métabolisme, tandis que les couleurs avec des longueurs d'onde relativement plus courtes telles que le bleu et le violet sont apaisantes. Et les couleurs intermédiaires comme le vert, le jaune et même le blanc ont un bon effet tonique sur les activités concentrées. Les couleurs sombres, en particulier les gris, semblent déprimantes. Enfin, on peut dire que la couleur contribue à modifier la taille apparente des surfaces et des volumes. La lumière chaude est composée des ondes des couleurs rouge et orange, et les objets qui ont la couleur chaude sont plus agréables lorsqu'on les éclaire avec une lumière pareille (chaude) et vice versa, en plus que la lumière chaude tend à noircir les objets qui ont des couleurs froides (Trouve, 1991).

- **Les matériaux**

Tout dépend de la direction de la lumière et de la position de l'observateur, et la perception de la matière dont est fait l'objet est à chaque fois différente. Alors que la lumière est considérée comme un matériau de construction, les matériaux solides sont essentiels pour comprendre le comportement de la lumière, car ils affectent directement les propriétés de la

lumière : quantité, qualité, direction, etc., et donc l'ambiance de la vie. Les matériaux ont deux caractéristiques essentielles pour étudier la lumière : leur finition (mate ou brillante) et leur couleur. La combinaison de ces paramètres se traduit à chaque fois par un changement d'ambiance qui répond aux besoins du concepteur et/ou de l'occupant de l'espace. Cela est dû au rôle clé joué par la lumière naturelle, selon son intensité, son angle d'incidence, sa qualité, accentuant la texture et la couleur de ce matériau (Matallah, 2015).

- **La forme de la pièce**

La lumière naturelle est propre et directe dans les pièces fermées et diffusée dans les pièces ouvertes. Si nous allumons juste les murs de la pièce, nous avons rendu perceptible la géométrie de la pièce, l'atmosphère devenait plus contrainte par ces murs lumineux, plus ils étaient éclairés, plus ils apparaissaient plus grands que les murs sombres. Dans l'obscurité, en revanche, les limites de la pièce disparaissent en raison de l'absence de reflets lumineux (Kaya et Afacan, 2017).

- **L'orientation des espaces**

Il semble que l'effet d'orientation soit perceptible dans la création d'un confort visuel intérieur. Selon (Matallah, 2015), dans les bâtiments, il faut envisager de localiser les espaces où l'utilisateur se trouve la majeure partie de la journée, ainsi que les espaces où les tâches qui nécessitent un éclairage élevé sont ombragées, en les exposant au soleil dans un Répond aux exigences de lumière naturelle et assure un confort visuel maximal.

- **Les ouvertures**

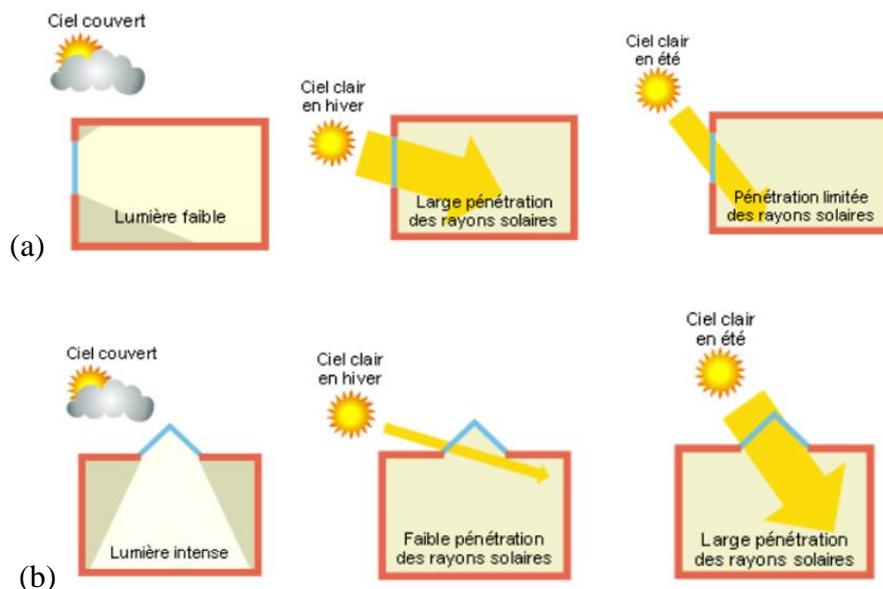


Figure 1.18 : Ouvertures latérales et zénithales (source : <https://energieplus-lesite.be/>)

(a) Ouvertures latérales

(b) Ouvertures zénithales

Pour pouvoir éclairer la pièce à la lumière du jour, les designers sont revenus sur des saillies ajourées sur la façade ou le toit pour établir un rapport avec l'extérieur. Le choix entre les différents types d'ouvertures se fait en fonction du volume de l'espace et de sa fonction

### **Conclusion**

La lumière du jour peut maximiser les performances visuelles, mais si elle n'est pas contrôlée correctement, elle peut entraîner des problèmes d'adaptation visuelle tant pour les visiteurs que pour les travailleurs à l'intérieur des galeries. Elle affectera également la capacité des visiteurs à apprécier les œuvres d'art. Les conditions dans lesquelles l'acuité visuelle peut être réduite sont l'éblouissement, les zones à fort contraste, les reflets et les ombres. L'éblouissement direct ou indirect peut entraîner une gêne, une distraction ou même réduire la capacité à voir les objets exposés. L'œil humain réagit à l'endroit le plus lumineux du champ de vision. Des différences de luminosité extrêmes obligent l'œil à s'adapter en permanence, ce qui peut entraîner une fatigue oculaire. Pour gérer ces changements de luminosité, la conception de la lumière du jour doit viser à assurer un éclairage ambiant suffisant dans toute la pièce. Par ailleurs, les ombres et les reflets peuvent altérer ou réduire la perception des œuvres d'art et causer des distractions. Une conception et des dispositifs appropriés de contrôle de la lumière du jour peuvent minimiser les ombres et créer des conditions optimales pour la visualisation des objets exposés. Il faut choisir des matériaux et des finitions intérieures à faible réflectance pour éliminer les reflets gênants.

## **Chapitre II :**

# **L'éclairage dans les espaces d'exposition**

## Introduction

La prise en compte de la lumière naturelle dans les espaces d'expositions comporte certains points à discuter lorsque certaines théories ont des accords différents. Pour illustrer certains points positifs qui défendent son utilisation repose sur le fait que la plupart des œuvres ancienne ont été exposées avec la lumière naturelle pendant des siècles. Donc c'est naturel et rhétorique pour continuer à l'utiliser. L'autre point est la variation de la lumière de jour et la continuité visuelle avec l'extérieur divertissent le public pendant leur expérience dans les galeries d'art ou dans les musées. Aussi l'éclairage artificiel libère du CO2, c'est donc plus durable et raisonnable d'utiliser la lumière naturelle (Yuri, 2019).

La relation avec le monde extérieur garantit que les personnes se sentent bien et que le bâtiment s'intègre dans le contexte, ce qui contribue à améliorer la qualité de l'expérience des visiteurs. La lumière du jour permet aux gens de sentir le changement de temps et d'avoir un contact avec le monde extérieur. En ce sens, l'espace d'exposition n'a pas pour vocation d'isoler l'observateur du monde réel et de situer l'art dans une boîte fermée en essayant de créer une atmosphère parallèle où l'art s'exprime.

En termes d'inconvénients, il est souligné que la lumière du jour est difficile à contrôler, ce qui est en partie vrai. Elle a une énorme variation tout au long de la journée, des saisons d'année et selon le lieu. Mais avec certaines méthodes de contrôle et de surveillance, il est gérable et très satisfaisant. Il a un rayonnement UV, qui n'est pas bon pour les illustrations, mais il y a beaucoup d'options à utiliser Filtres UV dans les fenêtres. Lumière du jour mal conçue génère des dégradations, des coûts élevés et augmente l'éblouissement mais avec la planification cela peut être résolu (Yuri, 2019).



Figure 2.1 : Lumière naturel dans un espace d'exposition (source : Maccheroni,2018)

## 1. Étymologie et définition du musée

Le musée, en tant qu'organisation culturelle, trace une longue histoire dans le temps. Le mot musée trouve ses origines de la Grèce antique. Il dérive du mot grec « Μουσείον », qui correspond à « siège des Muses ». Les neuf Muses étaient des déesses qui protégeaient les arts et étaient des sources d'inspiration, selon la mythologie grecque. L'usage ultérieur de la dérivation latine renvoie à des lieux de recueillement et de discussion philosophique. Ce rôle de musée-sanctuaire dans la Grèce antique, comme espace spirituel associant arts et sciences, est une avant-garde dans la culture intellectuelle des sociétés (Lewis, 2000).



Figure 2.2 : Les neuf muses de la mythologie grecque  
(Source : <https://mythologica.fr/grec/pic/muses2.jpg>)

De nos jours, tel que défini par le Conseil international des musées (ICOM) :

*« Un musée est une institution permanente, à but non lucratif, au service de la société et de son développement, ouverte au public, qui acquiert, conserve, recherche, communique et expose le patrimoine matériel et immatériel de l'humanité et de son environnement à des fins d'éducation., étude et plaisir ».*

Les musées sont des institutions qui exposent le passé et le présent des sociétés pour l'éducation et le plaisir. Leurs fonctions et leur public évoluent constamment, mais au fil du temps, leurs principales tâches incluent la collecte, la conservation et l'exposition. Le rôle de l'architecture dans la conception des musées vient de la formation de l'espace et de l'exposition des objets, mais doit également créer une histoire.

## 2. Évolution de l'architecture des musées

Le premier musée du monde ouvert au public est considéré comme les musées du Capitole. En 1471, le pape Sixte IV a fait don d'un groupe de sculptures en bronze antiques pour le peuple de Rome. Les collections forment plus tard un ensemble de musées d'art et d'archéologie. C'est cependant au XVIII<sup>e</sup> siècle que sont fondés la plupart des musées publics,

dont le Louvre et le British Museum. Concernant l'architecture, la majorité de ces musées étaient logés dans des bâtiments dont la fonction première au moment de la construction était différente 'souvent étaient autrefois des palais' (Chrysavgi, 2017).

La structure typologique de ces bâtiments a eu un effet sur l'exposition des artefacts. Avec des pièces principales reliées entre elles et de longs couloirs, cela a créé une continuité linéaire sur la séquence de visualisation. Ce n'est qu'en 1779, lorsque le premier musée public construit à cet effet a ouvert ses portes en Allemagne. C'était le musée Fridericianum à Kassel, conçu par l'architecte Simon Louis du Ry. Bien que construit comme un bâtiment pionnier, il a été essentiellement conçu comme une modification de la conception du palais (Fridericianum, 2015).



Figure 2.3 : Pietro Antonio Martini, Exposition de l'Académie Royale, 1787

(Source : <https://www.alamyimages.fr/>)

Ces premiers musées comptaient sur la lumière naturelle pour leurs espaces d'exposition. Pendant la journée, la lumière naturelle pénétrait dans les galeries par les fenêtres et les ouvertures du toit. Dans la plupart des cas, le rythme répétitif des grandes ouvertures dans les façades a créé une lumière uniforme pour l'intérieur, éclairant suffisamment les peintures et les sculptures qui étaient les principaux objets d'exposition. L'apparence des objets se modifiait tout au long de la journée, en fonction de la façon dont la lumière naturelle était dirigée par l'architecture de l'espace. C'était en 1857, lorsque le Victoria and Albert Museum de Londres fut le premier musée à utiliser la lumière artificielle dans les galeries, changeant à jamais l'avenir de l'éclairage des musées. Les musées devinrent plus accessibles au public ; avec l'introduction de l'éclairage au gaz et à l'électricité dans les galeries, les musées pourraient également étendre leurs heures d'ouverture au soir (Andrikopoulos, 2016).

Au début du XXe siècle, de nombreux nouveaux musées ont été créés, non seulement en Europe mais dans le monde entier. Cependant, au cours du second semestre, les premières recherches sur les dommages causés par la lumière aux expositions ont commencé à être menées, ce qui a conduit de nombreux musées à se tourner vers l'éclairage artificiel comme principale source d'éclairage et même à exclure la lumière naturelle. En 1945, un rapport de l'IES (États-Unis) suggérait que : « *Les galeries éclairées naturellement sont désormais techniquement obsolètes pour la plupart des types d'expositions et risquent de diminuer à l'avenir. Aucune combinaison satisfaisante d'éclairage naturel et artificiel pour les galeries d'art n'est possible, car le partenaire naturel de la combinaison varie considérablement en chromaticité et en quantité, d'un jour à l'autre et d'une saison à l'autre, et changera fréquemment de couleur et de quantité dans une matière de minutes* » (Cannon, 2000).

Cependant, l'architecture des musées a continué avec succès à intégrer la conception de l'éclairage naturel dans les galeries des musées, répondant aux directives de conservation et garantissant des conditions d'exposition optimales pour les œuvres d'art. De nouveaux types de collections ont été mis en place et de nombreux espaces ont été intégrés au programme fonctionnel, tels que des bibliothèques, des amphithéâtres, des cafétérias, etc. La conception de musées est devenue un domaine très exigeant de l'architecture et visait à recréer une expérience culturelle. En même temps que la construction de nouveaux édifices, de nombreux bâtiments historiques ont été adaptés pour accueillir des musées. Les architectes ont développé des musées avec une conception sophistiquée de la lumière du jour et une tentative d'améliorer les conditions d'observation (Chrysavgi, 2017).



Figure 2.4: Kimbell Art Museum, Texas

(Source: [https://cdn.stylepark.com/articles/\\_transformationContent12/B\\_South-Gallery](https://cdn.stylepark.com/articles/_transformationContent12/B_South-Gallery))

Au cours des dernières décennies, le rôle civique des musées en tant que symboles des villes et des cultures a désigné leur identité architecturale comme une valeur clé de la conception. Dans certains cas, l'architecture a été l'œuvre d'art elle-même, créant un lieu d'attraction et d'attention de masse. Les architectes chamboulent les prévisions en créant de nouvelles formes de musées. Parfois, la conception architecturale innovante a une forte approche humaniste et cherche à repenser la relation du musée au contexte urbain. Le Centre Pompidou a fait œuvre de pionnier ; il a introduit un nouveau type d'espace d'exposition privilégiant la modularité et s'affranchissant des limites de la pièce, mais surtout c'était un musée pour le peuple. Le design provocateur visait à démolir l'image des musées en tant que « temples de l'art » et à les faire apparaître plus ouverts et accessibles au public. La transparence est le facteur clé de la conception qui a engendré ce sentiment (Chrysavgi, 2017).



Figure 2.5 : Centre Georges Pompidou, Paris  
(Source : <https://www.alamyimages.fr/>)

L'utilisation de façades vitrées dans les musées modernes accueille les visiteurs et renforce le sentiment d'ouverture sur l'environnement extérieur. Avec l'avancée de la technologie, à la fois dans les matériaux et les systèmes de contrôle, de nombreuses conceptions innovantes ont été introduites dans l'architecture des musées avec un contrôle total de la pénétration de la lumière naturelle.

### **3. Types d'ouvertures de la lumière du jour et connexion avec l'environnement extérieur**

Le type d'ouvertures utilisées dans les galeries a un effet considérable sur la manière dont la lumière naturelle est distribuée dans l'espace et sur le sentiment de connexion avec le monde extérieur. La conception des ouvertures doit être perçue comme une étape capitale du processus architectural et elle est souvent associée au mouvement architectural (style) sous lequel le

bâtiment est conçu, car elles font partie intégrante des principes esthétiques mis en avant. Le sentiment d'ouverture sur l'extérieur permet de prendre conscience de l'environnement au-delà des galeries. Il est généré par l'existence de vues et par les variations de la lumière naturelle associées aux changements de temps, de météo et de saison.

Une décision de conception primordiale et très importante est l'orientation des ouvertures, afin d'assurer la meilleure utilisation de la lumière du jour et d'éviter la lumière directe du soleil dans les galeries ; c'est également l'étape initiale d'une conception durable. L'orientation des ouvertures et leur relation avec la course du soleil influent sur la quantité, la qualité et la distribution de la lumière du jour. L'orientation affecte la quantité de gain solaire et permet de contrôler la pénétration de la lumière du soleil, tout en fournissant un éclairage naturel suffisant dans les espaces intérieurs (CIBSE, 1999). La lumière provenant de l'orientation nord est moins intense et est suggérée pour être utilisée dans l'architecture des musées. Par conséquent, l'orientation des ouvertures est directement liée à la sélection des systèmes d'ombrage (Iordanidou, 2017).

La figure suivante représente les typologies de base d'ouverture de la lumière naturelle ;

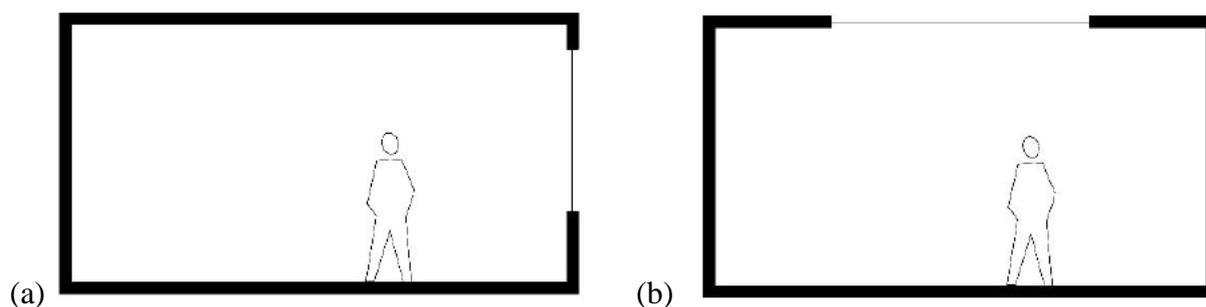


Figure 2.6 : Eclairage latérale et Eclairage zénithal

(Source : Iordanidou, 2017)

(a) Eclairage latérale

(b) Eclairage zénithal

Il existe deux typologies de base d'ouvertures de lumière naturelle : l'éclairage latéral et l'éclairage zénithal. Leur géométrie architecturale, leur orientation, leur emplacement et leur quantité sont essentiels pour la distribution de l'éclairement à l'intérieur des pièces. D'autres paramètres importants sont les caractéristiques des surfaces dans l'espace. La lumière réfléchie peut optimiser l'efficacité de l'éclairage mais peut aussi potentiellement créer un inconfort visuel. Le choix de la typologie doit garantir à la fois des conditions d'exposition optimales et des aspects de préservation sûrs pour chaque exposition (Iordanidou, 2017)

### 3.1 Eclairage latérale

Il existe deux principaux types d'ouvertures à éclairage latéral : les fenêtres et les claires-voies

#### 3.1.1 Les fenêtres

Les fenêtres sont la forme la plus courante d'éclairage naturel utilisée dans la plupart des types de bâtiments, car elles apportent lumière, vue et ventilation.

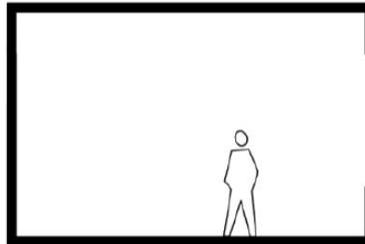


Figure 2.7 : Les fenêtres (Source : Iordanidou, 2017)

Dans les musées, elles ont été utilisées historiquement dans de nombreuses galeries, mais principalement parce que la fonction de musée a été donnée à des bâtiments existants. Dans de nombreux cas, les ouvertures ont ensuite été bloquées par des rideaux intérieurs (toujours fermés) ou même en plaçant des murs d'exposition devant elles, pour des raisons de préservation ou de conservation. Cette typologie est peut-être la plus difficile à utiliser dans les galeries de musées, car elle peut laisser passer la lumière directe du soleil dans l'espace ou créer des zones à fort contraste. Comme nous l'avons vu, les principes d'éclairage à l'intérieur des galeries exigent de minimiser la pénétration de la lumière du soleil ainsi que de fournir un ombrage et un contrôle de l'éblouissement adéquats. Avec une conception et des systèmes d'ombrage appropriés, la lumière directe du soleil peut être contrôlée ou éliminée (Iordanidou, 2017).

En outre, l'emplacement des objets exposés est également essentiel pour assurer le confort visuel des visiteurs. L'intensité de la lumière à travers les fenêtres peut mettre en valeur certains objets, mais les pièces sensibles doivent être placées à distance des ouvertures. Les sculptures peuvent être placées à proximité et face aux ouvertures, car les motifs d'ombrage les feront paraître plus dynamiques. Pour les peintures/photos, en revanche, la position face aux ouvertures peut poser des problèmes de réflexion et il est préférable de les placer perpendiculairement aux fenêtres et de les suspendre avec une inclinaison (Cuttle, 2007).

Les ouvertures des fenêtres laissent passer la lumière naturelle à l'intérieur d'un espace, mais peuvent également offrir une vue sur l'environnement extérieur. Elles peuvent capturer des vues sur le cadre urbain ou la nature autour du bâtiment ; parfois même, elles utilisent cette vue comme cadre pour l'art exposé. Les différentes tailles, formes et positions des fenêtres ont un

effet direct sur la relation qu'un espace peut avoir avec l'extérieur. Des façades entièrement vitrées ou de petites fenêtres peuvent toutes deux éclairer une pièce, mais avoir un impact différent sur l'expérience des visiteurs. Plus la surface des fenêtres est grande, plus le degré d'ouverture qu'elles procurent est élevé. Les architectes, conscients de la corrélation entre la conception géométrique des surfaces de la pièce et l'impression de taille globale de la pièce, utilisent les fenêtres pour provoquer des sentiments et donner un caractère spécial à l'espace (Matusiak, 2006).



Figure 2.8 : Musée des juifs de Berlin (source : <https://shinde.co/>)

La figure ci-dessus montre un type de fenêtre que l'architecte a utilisé pour la pénétration de la lumière naturelle d'une manière a créé une ambiance pour le visiteur par leur formes irrégulières.



Figure 2.9 : Musée d'art moderne MOMA, New York (source : Iordanidou, 2017)

La figure ci-dessus montre une répartition homogène de la lumière naturelle dans l'ensemble de l'espace d'exposition sans éblouissement ni ombres gênantes avec une façade entièrement vitrée, donnant un espace agréable qui peut améliorer le rendu de couleur pour les œuvres exposés et réduit considérablement les coûts en énergie

### 3.1.2 Les claires-voies

La figure ci-dessous montre un éclairage latéral de type claire-voie ;

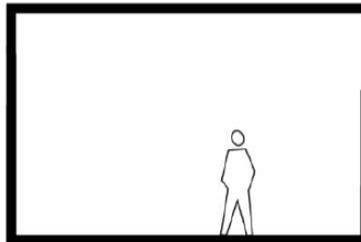


Figure 2.10 : les claires-voies (Source : Iordanidou, 2017)

Les claires-voies sont des ouvertures latérales placées plus haut dans le mur. Elles permettent une pénétration plus profonde de la lumière et minimisent la probabilité d'éblouissement, car elles sont placées plus haut que le niveau des yeux. En combinant des claires-voies dans des directions opposées, la distribution de la lumière peut devenir uniforme dans l'espace. Cependant, comme ils sont situés plus haut que le niveau de l'œil, la vue est limitée au ciel ou aux environs plus élevés, mais peut également être absente. Par conséquent, le sentiment d'ouverture qu'elles procurent est plus faible que celui des fenêtres (Guimarães, 2019).



Figure 2.11: New Art Gallery Walsall, Angleterre (source: <https://outsidein.org.uk>)

Pour les deux types, la sensation d'ouverture dépend étroitement des dimensions des ouvertures, des dimensions relatives (largeur, hauteur) de la galerie, de leur nombre et de leur

orientation. La combinaison d'ouvertures dans différentes directions génère une plus grande connexion avec l'environnement extérieur (Iordanidou, 2017).

### 3.2 Eclairage zénithal

La figure suivante illustre les différents types d'éclairage zénithal.

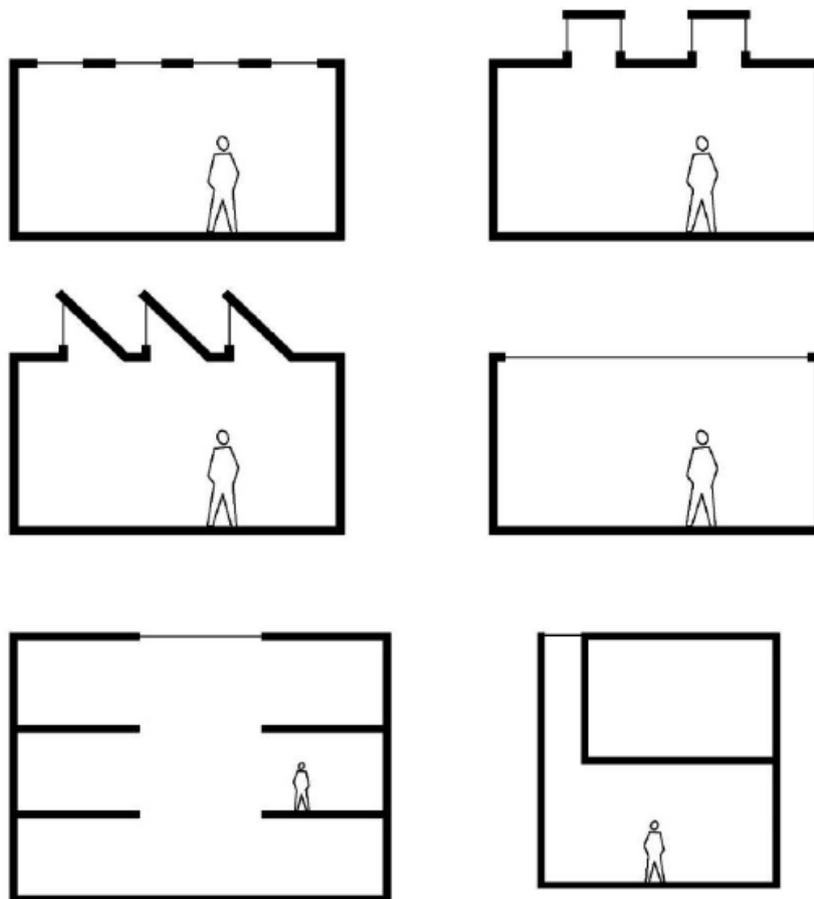


Figure 2.12 : Différents types d'éclairage zénithal (source : Iordanidou, 2017)

L'éclairage par le haut est indiqué pour obtenir un éclairage ambiant et uniforme et réduire la probabilité d'éblouissement. Les ouvertures au plafond offrent la possibilité d'avoir des ouvertures, sans interférer avec le plan d'organisation de l'espace et laissent la surface totale du mur disponible pour l'affichage. Comme pour l'éclairage latéral, la forme, la taille, le nombre et le positionnement des ouvertures définissent la distribution de la lumière dans l'espace. Pour obtenir un éclairage uniforme, les ouvertures doivent être réparties équitablement dans l'espace. Il existe de nombreux types différents d'ouvertures d'éclairage par le haut, tels que les puits de lumière, les toits à lumière du jour globale, et les atriums (Iordanidou, 2017).

### 3.2.1 Skylight

Est celle qui vient d'en haut, il s'agit d'une ouverture dans le toit qui éclaire un espace intérieur.



Figure 2.13 : Panthéon, Rome – Italie, et Luminaire zénithal contemporain

(Source : <https://fr.123rf.com/>)

(a) Panthéon, Rome – Italie

(b) Luminaire zénithal contemporain

L'espace intérieur sans ouvertures dans les parois verticales et éclairé d'en haut transforme l'extérieur en une réalité extraterrestre. C'est quand vous passez d'un rapport vision-illumination à l'un des seuls l'éclairage, dans lequel, en plus, parfois le Source de lumière. Les ouvertures du couvercle proposent un rapport abstrait avec l'extérieur, presque irréel, énigmatique, secret, protégé (Torres, 1993).

### 3.2.2 Les toitures en dents de scie ou sheds

Les sheds sont composés d'une surface translucide, qui recueille la lumière naturelle et la transmet dans la pièce, et d'une surface inclinée opaque appelée "rampant", qui distribue la lumière du jour dans la pièce (Schiler, 1992).



Figure 2.14 : Light shed Bouddhiste au bord de l'eau Lieu de culte, Tangshan, Hebei, Chine

(Source : <https://www.dezeen.com>)

La conception des sheds doit se faire en respectant les trajectoires solaires locales, de sorte qu'il n'y a pas d'ensoleillement direct. Ainsi, ils doivent être conçus avec l'orientation sud et afin d'obtenir un masque dans le diagramme de trajectoire solaire qui cache toutes les trajectoires. Les sheds orientés au sud peuvent non seulement favoriser l'accès à la lumière naturelle indirecte, qui évite le réchauffement indésirable, mais permet également la génération d'énergie dirigée vers le Nord, une situation d'orientation plus favorable pour la réception du rayonnement solaire directement sur les panneaux photovoltaïques (Guimaraes, 2019).

### 3.2.3 Les lanterneaux

Les lanterneaux correspondent à un type d'éclairage zénithal qui consiste à surélever une partie du toit sur un élément translucide ou transparent.

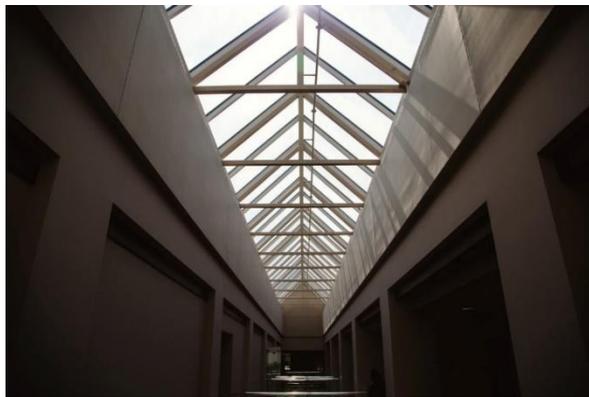


Figure 2.15 : les lanterneaux (source : <https://www.lalanguefrancaise.com>)

Cette disposition permet d'éliminer les effets directionnels de l'ensoleillement rencontrés dans les sheds en raison de la lumière pénétrant dans deux directions juxtaposées. La valeur du FLJ est ainsi symétrique par rapport à l'axe entre les deux supports. Pour éviter le risque d'éblouissement, il est préférable d'essayer de ne pas avoir de surfaces translucides orientées vers le sud (Simon, 2007).

### 3.2.4 Les verrières et les dômes

La figure suivante représente une dome en verre



Figure 2.16 : La bourse de commerce, Paris (source : <https://www.paris.fr/>)

Leur utilisation ne nécessite pas de construction lourde et répond au besoin d'un indice de vitrage égal à 10%. L'inconvénient le plus notable du verre et du dôme est l'abaissement, afin d'éviter l'éblouissement, l'angle par rapport à la hauteur de l'utilisateur de l'espace ne doit pas être inférieur à 30° (Terrier et Vandevyver, 1999).

#### **4. L'éclairage artificiel**

L'éclairage artificiel peut être définie comme un récepteur actif qui convertie la puissance électrique en énergie lumineuse.

Il est le complément nécessaire et parfois indispensable de l'éclairage naturel. En plus de compenser le cas échéant la lumière naturelle, et en particulier la nuit, l'éclairage artificiel est un facteur d'ambiance important de l'architecture d'un espace (Faure, 2006).

##### **4.1 Développement des lampes**

Le premier prototype de lampe électrique a été présenté en 1835 par James Bowman Lindsay. Le développement technologie des lampes n'a cessé d'évoluer depuis ce temps. En 1962, Nick Holonyak met au point la première LED à spectre visible utilisable. Face à l'efficacité énergétique, la technologie LED reste la plus prometteuse. Elle présente aujourd'hui le meilleur rendement lumineux. Les lampes à sodium haute pression présentent aussi un bon rendement lumineux qui peut atteindre 150 lm/W mais son indice de rendu des couleurs est mauvais. De ce fait elles sont plus utilisées dans les éclairages publics que dans les bâtiments (Togora, 2017).

##### **4.2 Techniques d'éclairage**

En évitant les projections de lumière sur les murs environnants, les objets exposés peuvent être encadrés pour un impact maximal. Les objets statiques peuvent être animés de leurs pour attirer l'attention du visiteur sur le lieu d'exposition. Les grandes expositions murales peuvent être complétées par un éclairage mural unifié, également conçu pour créer une atmosphère plus sereine. Pour un éclairage mural uniforme, les luminaires doivent être correctement positionnés afin d'éviter tout éblouissement indésirable et de limiter le potentiel d'ombres projetées par les visiteurs (Feilo, 2016).

###### **✓ Rapport de contraste**

L'intensité du contraste entre les zones sombres et claires définit l'ambiance de l'espace d'exposition. Un contraste important entre la lumière et l'obscurité, par le biais d'un éclairage d'accentuation, fait étinceler le centre d'intérêt et dirige tous les regards vers l'objet en question. (Feilo, 2016).



Figure 2.17 : Musée régionale de Drenthe, pays bas (Source : Feilo, 2016)

La figure ci-dessus montre comment mettre en valeur un objet exposé avec un contraste ; un objet éclairé dans un environnement sombre et cela pour attirer l'attention du visiteur, cette technique peut être utilisée pour les objets de valeurs

✓ **Eclairage d'accentuation ou bain de lumière**

Un éclairage intense d'objet, ne laissant aucun doute au visiteur sur ce qui constitue le centre d'intérêt.



Figure 2.18 : Kelvin Grove, Royaume-Uni (Source : Feilo, 2016)

Un éclairage localisé directionnel utilisé pour dramatiser les espaces et mettre en lumière les caractéristiques de l'œuvre exposé, cette technique peut être utilisée pour valoriser un détail. L'arrangement des sources lumineuses de manière à mettre en valeur certaines zones ou certains objets est appelé éclairage d'accentuation. Le but, ici, est de créer un contraste avec l'éclairage principal, de manière à mettre en exergue un certain point

✓ **Mise en relief**

La mise en relief joue un rôle essentiel pour faire ressortir la beauté naturelle d'un objet et lui donner vie sous les yeux du visiteur. L'éclairage directionnel permet un contraste profond

entre les parties sombres et lumineuses de la section exposée, complété par une lumière de faible intensité pour obtenir le niveau de contraste idéal pour de meilleurs résultats (Feilo, 2016).



Figure 2.19 : Mise en relief (Source : Feilo, 2016)

La figure ci-dessous représente une mise en relief d'un objet exposé pour permettre une visibilité maximale et assurer la stabilité tout en mettant le visiteur à distance.

✓ **Réduire l'ombre portée du visiteur**

La figure suivante illustre comment on peut réduire l'ombre portée du visiteur.

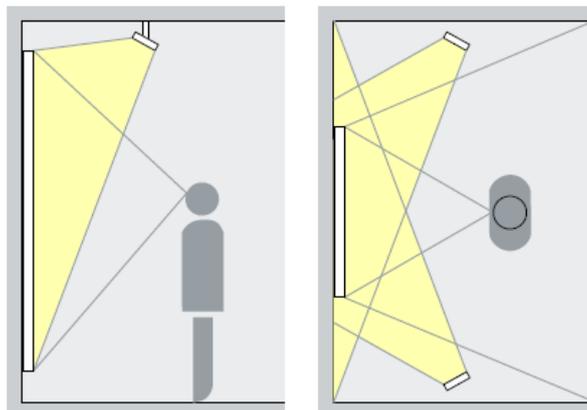


Figure 2.20 : Réduction d'ombre portée du visiteur (Source : ERCO, 2012)

Deux projecteurs placés sur le côté éclairent le tableau sans être ébloui par des reflets ni projeter d'ombres sur le tableau lorsque le spectateur fait face à l'œuvre (ERCO, 2012).

✓ **Eclairer les vitrines sans éblouir**

La figure suivante propose comment éclairer les vitrines sans provoquer d'éblouissement.

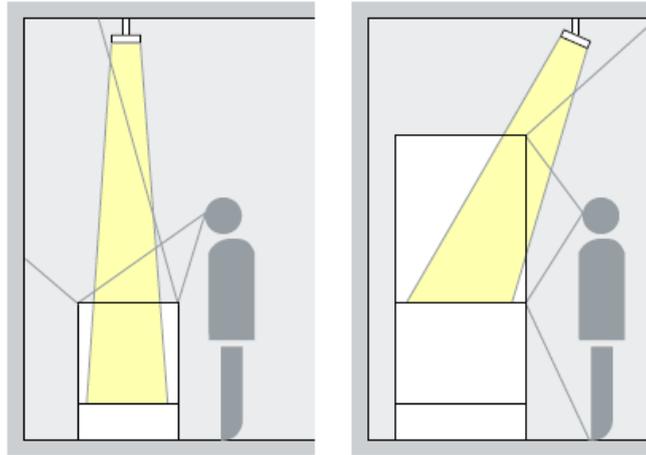


Figure 2.21 : Eclairage des vitrines sans éblouir (source : ERCO, 2012)

Les vitrines peuvent aussi être éclairées par des projecteurs positionnés à l'extérieur, à condition que les projecteurs soient placés à l'extérieur de la surface réfléchissante du point de vue de l'observateur (ERCO, 2012).

✓ **Bien positionner les appareils d'éclairage**

La figure suivante montre le bon positionnement des appareils d'éclairage ;

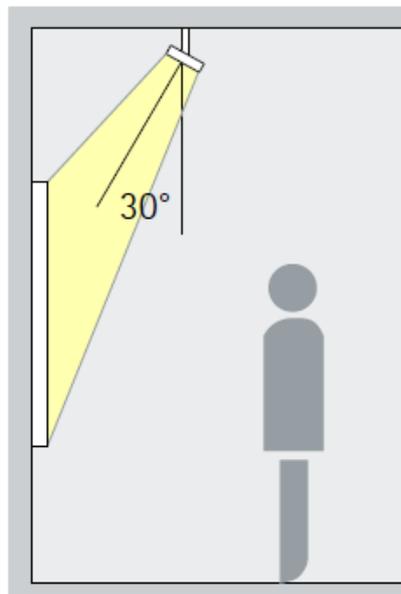


Figure 2.22 : Positionnement des appareils d'éclairage (Source : ERCO, 2012)

Pour éclairer tableaux et sculptures, le meilleur angle d'incidence de la lumière est de 30°. En utilisant un angle plus grand, si l'appareil est éloigné de l'objet à éclairer, il est possible pour l'observateur de voir son ombre projetée sur le tableau lorsqu'il est devant lui. En revanche, des angles plus fermés produisent une lumière rasante, projetant des ombres allongées sur le tableau (ERCO, 2012).

✓ **Souligner les murs et les œuvres**

La figure suivante montre comment souligner les murs et les œuvres.

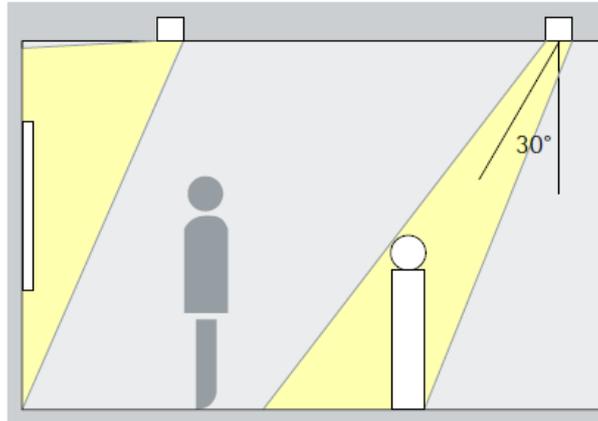


Figure 2.23 : Souligner les murs et les œuvres (Source : ERCO, 2012)

L'éclairage équilibré des salles et des expositions provient d'un éclairage mural uniforme, donnant une impression de clarté, et d'un éclairage d'accentuation, façonnant la sculpture (ERCO, 2012).

✓ **Bien disposer les appareils d'éclairage mural**

La figure suivante montre la disposition des appareils d'éclairage murale pour une répartition homogène de la lumière ;

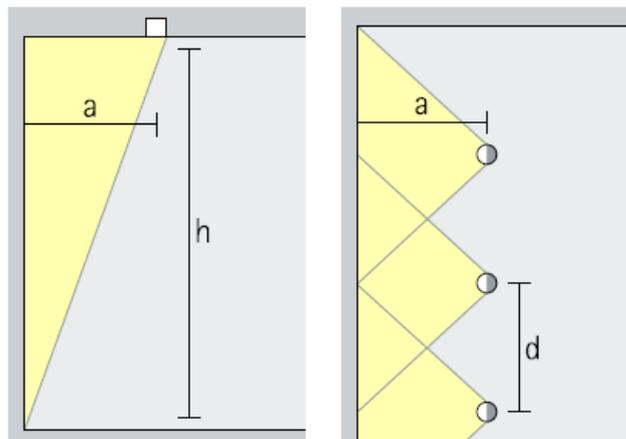


Figure 2.24 : la disposition des appareils d'éclairage mural (Source : ERCO, 2012)

La distance au mur pour les lèche-mur doit être d'un tiers de la hauteur du plafond de façon à ce que la lumière soit distribuée équitablement sur le mur. La distance entre les luminaires doit être équivalente à la distance au mur (ERCO, 2012).

## Conclusion

La disponibilité de la lumière du jour joue un rôle important dans la perception d'un espace et a un impact important sur le confort visuel et le bien-être des usagers de l'espace. En outre, le fait de disposer d'une solution d'éclairage naturel adaptée à l'usage du bâtiment peut réduire la consommation d'énergie globale, puisque le besoin d'appareils électriques est réduit. Pourtant, ce n'est que récemment, en raison de l'intérêt croissant pour la durabilité, que la conception de la lumière du jour a été abordée de manière plus critique. Jusqu'alors, nous étions confrontés à un échec dans l'adoption de bonnes stratégies de lumière naturelle, qui était masqué par l'acceptation généralisée de l'éclairage artificiel.

Néanmoins, pour intégrer pleinement et avec succès les stratégies de lumière du jour dans un bâtiment, celles-ci doivent être traitées comme un critère de conception dès le début de la conception. Par ailleurs, la performance de l'éclairage naturel fait partie des facteurs que les architectes sont le plus intéressés à optimiser. Afin d'utiliser plus efficacement la lumière du jour, il est essentiel de mettre la lumière là où c'est nécessaire. Cette approche minimise les problèmes de confort visuel et le confort thermique et aide à éviter la création d'ambiances lumineuses monotones qui résulte de l'illumination.

La position de la fenêtre sur un mur ou un plafond affecte comment la lumière sera distribuée et quelle relation elle aura avec les tâches, les activités et les expériences dans l'espace. Les fenêtres basses, par exemple, permettent de prendre avantage de la lumière réfléchi par le sol, qui peut être redirigé des surfaces extérieures et des sols pour apporter de la lumière profondément dans l'espace (en supposant que la couleur claire des surfaces utilisées et que le sol n'est pas recouvert d'objets). La fenêtre basse offre un contact direct avec paysage. Les fenêtres mi-hauteur sont populaires à combiner vues, lumière réfléchi et emplacement optimal pour la ventilation dans proximité avec l'occupant. À mesure que la fenêtre se lève, il en va de même intimité. Les fenêtres hautes déplacent la relation visuelle de terre au ciel, tout en permettant à la lumière de pénétrer profondément dans l'espace. Dans ce cas, la surface sous la fenêtre peut être projetée dans l'ombre qui peut créer des contrastes entre le mur et la fenêtre.

**La partie pratique**

**Chapitre III :**

**Etude empirique de l'éclairage naturel**

## Introduction

Cette recherche consiste à étudier l'éclairage naturel en effectuant une évaluation quantitative et qualitative de l'environnement lumineux dans un espace d'exposition dans le but d'évaluer le confort visuel. Dans ce travail, le choix du cas d'étude s'est porté sur un espace d'exposition situé dans un musée dans la ville de Bejaia, la position de ce dernier sur les hauteurs de la ville de Bejaia dans un environnement naturel et très calme lui a permis d'avoir une façade sud dégagée sans aucun obstacle pour la pénétration de la lumière naturelle.

### 1. Présentation de la ville

#### 1.1 Situation

Bejaia est une commune algérienne, située en bordure de la mer Méditerranée, à 220 km à l'est d'Alger. Elle est le chef-lieu de la wilaya de Bejaia et de la daïra de Bejaia.

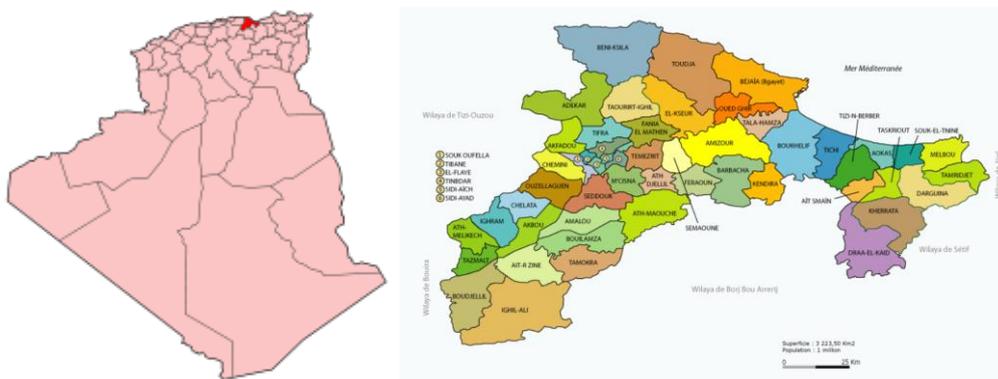


Figure 3.1 : Situation de la ville de Bejaia par rapport à l'Algérie et la wilaya de Bejaia

(Source : google images)

est une wilaya algérienne, située au nord-est du pays, dans la région de la Kabylie sur sa côte méditerranéenne.

#### 2.2 Heures d'ensoleillement à Bejaia

La figure suivante représente la durée d'ensoleillement à Bejaia.

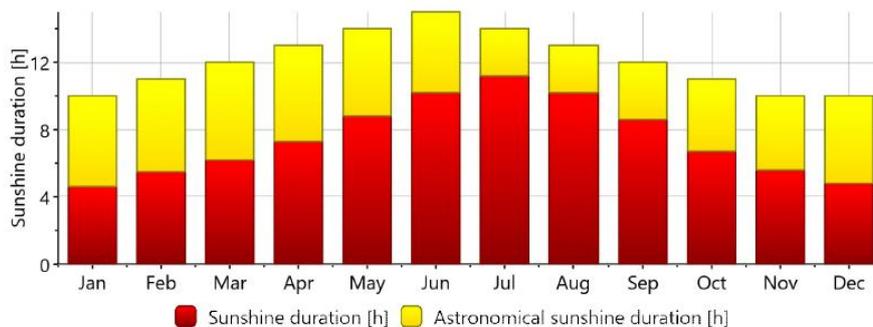


Figure 3.2 : durée d'ensoleillement (source : meteonorm, 2022)

En mois de juillet, le plus grand nombre d'heures d'ensoleillement quotidien est mesuré à Béjaïa en moyenne. En Juillet, il y a en moyenne 11 heures d'ensoleillement par jour et un total de 363.66 heures d'ensoleillement en Juillet.

En mois de janvier, le nombre d'heures d'ensoleillement quotidien le plus bas est mesuré à Béjaïa en moyenne. En Janvier, il y a en moyenne 5 heures d'ensoleillement par jour et un total de 208.27 heures d'ensoleillement.

Environ 3264.33 heures d'ensoleillement sont comptées à Béjaïa tout au long de l'année. Il y a en moyenne 107.21 heures d'ensoleillement par mois.

La figure suivante représente les rayonnements mensuels à Bejaia

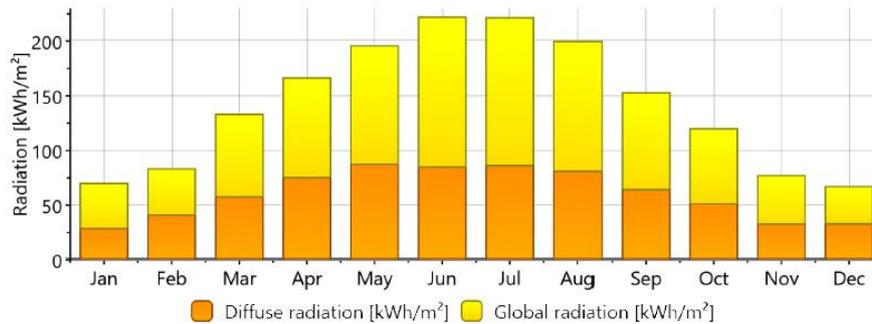


Figure 3.3 : Les rayonnements mensuels (source : meteonorm, 2022)

Les rayonnements diffus à Béjaia représente 80 Kwh/m<sup>2</sup> sur 220 Kwh/m<sup>2</sup> des rayonnement global en mois de juillet. Et 25 Kwh/m<sup>2</sup> sur 60 Kwh/m<sup>2</sup> des rayonnement global en mois de janvier.

La figure suivante représente les rayonnement global quotidien

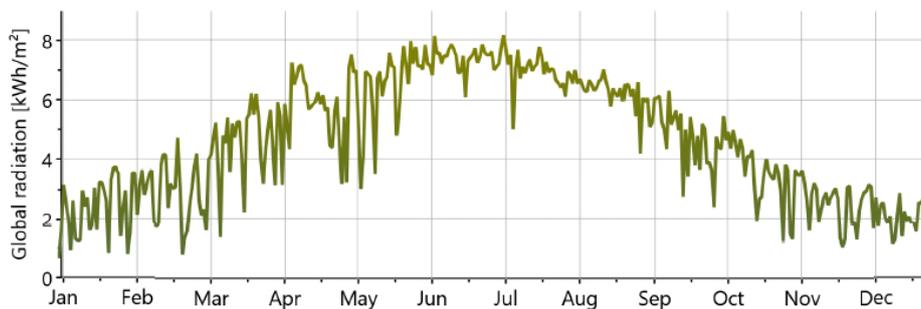


Figure 3.4 : rayonnement global quotidien (source : meteonorm, 2022)

Le rayonnement global quotidien à Bejaia varient selon les mois de l'année ou il atteint son apogée en mois de juin et juillet 8kWh/m<sup>2</sup>.

### 3. Présentation de cas d'étude

L'objectif de notre étude consiste à évaluer la quantité et la qualité de l'éclairage naturel dans un espace d'exposition au niveau du musée almoudjahid, dans le but de déterminer le niveau du confort visuel et l'éblouissement dues au comportement de la lumière du jours dans cette espace.

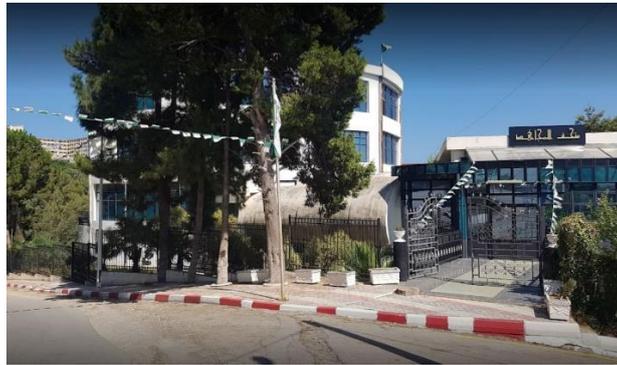


Figure 3.5 : Musée almoudjahid (source : Auteur, 2021)

- **Fiche technique**

Tableau 3.1 : fiche technique du musée almoudjahid (Source : Auteur, 2021)

Titre	Musée al Moudjahid
Situation	Sidi Ouali, Bejaia
Type de construction	Musée d'histoire
Maitre d'ouvrage	Ministère des Moudjahidine
Maitre de l'œuvre	Bureau d'étude POLYTEC, Bejaia
Année d'inauguration	2014

#### 3.1 La situation

La figure suivante montre le plan de situation et plan de masse du musée almoudjahid :

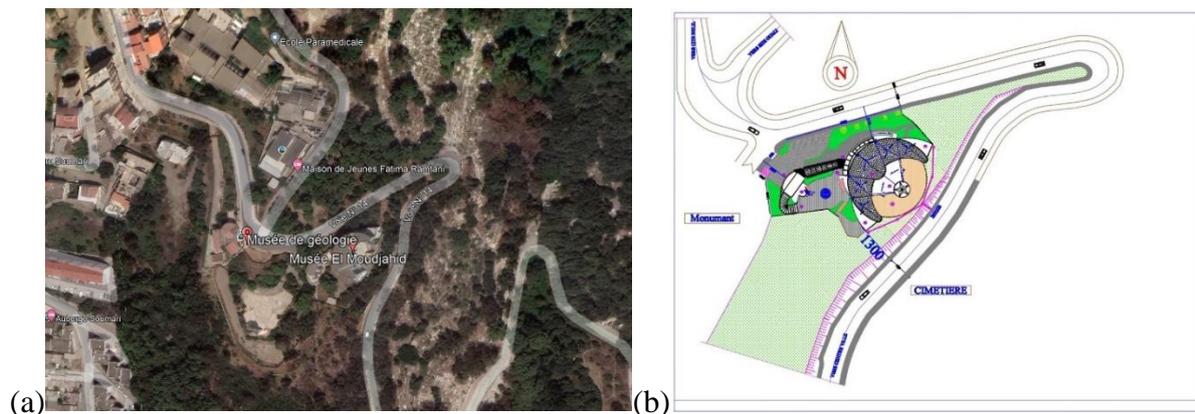


Figure 3.6 : Plan de situation et plan de masse (Source : google earth, 2022)

- (a) Plan de situation du musée almoudjahid
- (b) Plan de masse du musée almoudjahid

Le musée Al moudjahid de Bejaia, se situe au nord-ouest de la ville de Bejaia (à Sidi Ouali), accessible par la voie N° 14, il est entouré par la maison de jeune Fatima RAHMANI, musée de géologie, l'école paramédical de Bejaia, et la mosquée de Sidi OUALI.

### 3.2 Orientation et ensoleillement

Le musée est bien ensoleillé, avec une façade vitrée orientée sud-est.

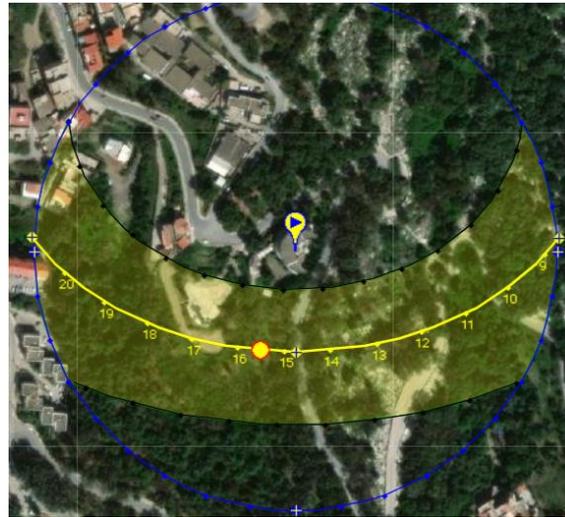


Figure 3.7 : Ensoleillement du musée (source : <https://www.sunearthtools.com>)

L'orientation sud-est du musée permet d'avoir des espaces lumineux la matinée et aussi une manière d'avoir des pièces naturellement chauffées par le soleil pour assurer à la fois le confort visuel et thermique.

### 3.3 La description du musée

Le terrain est d'une forme irrégulière. Au niveau des façades extérieures aucun dispositif de protection solaire. A l'intérieur, l'utilisation d'un dispositif de protection solaire ; store vénitien verticale.

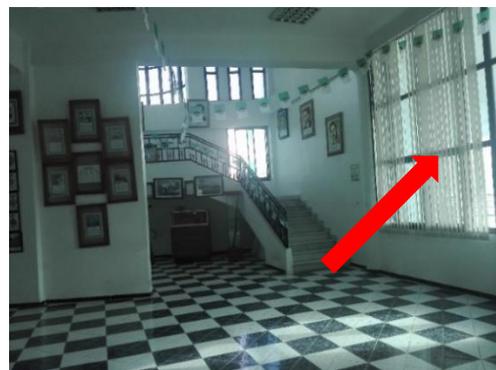


Figure 3.8 : Façade sud et store vénitien vertical

(Source : musée almoudjahid,2021 et auteur, 2021)

Les couleurs et texture utilisés sont plancher carrelage noir et blanc, des murs et plafond blancs.

## 4. Etude quantitative

### 4.1 Protocole de prise de mesure

Cette partie permet de constituer une base de données des mesures permettant de valider le logiciel de simulation, de dégager des semaines types « Design Week » et puis les journées types, et cela en prenant en comptes les dates qui marquent le début de chaque saison. Les semaines typiques sélectionnées pour les prises de mesures sur le cas d'étude pendant l'hiver, printemps, et été sont les suivantes :

- Entre le 18 et le 24 décembre 2021.
- Entre le 17 et le 23 mars 2022.
- Entre le 17 et le 23 juin 2022.

Les journées types sélectionnées pour la prise de mesure sont le 15 décembre pour la période hivernale, le 21 mars (équinoxe), et le 21 juin pour la période estivale. Le cas d'étude est testé sous l'éclairage naturel à des dates significatives, le 15 décembre (solstices d'hiver), le 21 mars (équinoxes), et le 21 juin (solstices d'été), et à trois moments de la journée ; 9h, 12h et 15h. Et cela sous quelques critères nécessaires pour le bon déroulement de l'opération de prise de mesures tels que les conditions naturelles ; mesure de l'éclairage naturel sans protection solaire et sans éclairage artificiel, et la faisabilité de mesure dans le bâtiment. Mais vu le temps imparti pour cette recherche on est dans l'obligation de choisir juste une journée pour la prise de mesure qui est le 15 décembre. Le cas d'étude se trouve au niveau de la ville de Bejaia, dans un site nature, les mesures ont été effectuées au niveau de la salle d'exposition. La méthode utilisée consiste à prendre des photos à des endroits précis en fonction de la disposition des ouvertures, pour ensuite les traitées sur le logiciel falsecolor après avoir convertis le format JPEG des photos en formats HDR sur le site <https://convertio.co/fr/>.



(a)



(b)

Figure 3.9 : logiciel falsecolor et le site convertio (source : <https://convertio.co/fr/>)

(a) Logiciel falsecolor (b) Le site convertio

- **Instrument de prise de mesure**

L'instrument utilisé pour la prise de mesure est un smartphone.



Figure 3.10 : Instrument de prise de mesure (source : Auteur, 2022)

#### 4.2 Choix des points de mesures

La figure suivante illustre le choix des points de mesures :

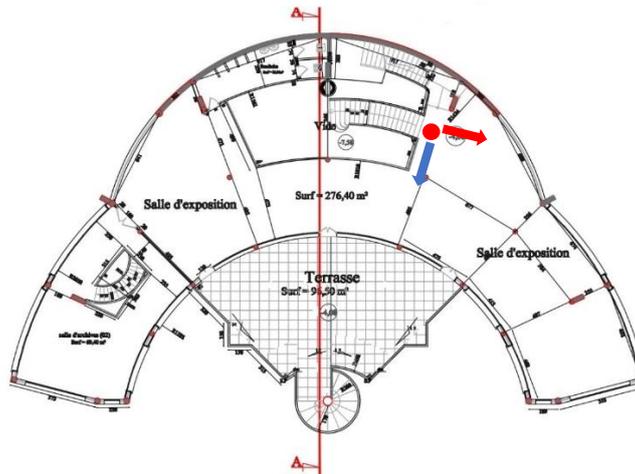


Figure 3.11 : Choix des points de mesure

(Source : musée almoudjahid traité par l'auteur, 2022)

On a effectué des prises de mesure suivant deux axes :

- Prendre une photo de manière à faire face aux ouvertures.
- Prendre une photo de manière à faire face aux objets exposés.

## 5. Résultats de Prise de mesures

### 5.1 Résultat de prise de mesure pour le 15 décembre 2021 à 09H

#### ❖ Face aux ouvertures



$L_{\max}$ : 187.5 cd/m<sup>2</sup>

$L_{\text{moy}}$ : 90.5 cd/m<sup>2</sup>

$L_{\min}$ : 12.5 cd/m<sup>2</sup>

Figure 3.12 : Résultats de prise de mesures à 09H (source : Auteur, 2022)

A partir de la figure ci-dessus, on remarque que la luminance est très élevée près des ouvertures au côté sud-est, et même au sol sur la surface intermédiaire de la salle d'exposition, ce qui fait qu'il y a la présence d'éblouissement sur ce côté. Plus on s'éloigne des ouvertures plus la luminance déminue.

On remarque aussi quelques taches solaires de valeur de luminance comprise entre 162.5 cd/m<sup>2</sup> et 187.5 cd/m<sup>2</sup> sur les objets exposés en face des ouvertures, donc il y a un éblouissement sur ces derniers et une gêne visuelle du visiteur, et cela sous l'influence de l'orientation sud-est et le manque de protections solaires extérieurs.

Par contre une luminance de valeur comprise entre 12.5 cd/m<sup>2</sup> et 37.5 cd/m<sup>2</sup> sur les espaces éloignés des ouvertures, et cela dû à l'absence d'une source lumineuse direct, et les objets exposés au milieu de l'espace d'exposition qui joues un rôle d'obstacle pour la pénétration de la lumière naturelle sur le sol et la partie inférieur de l'espace.

❖ Face aux objets exposés



$L_{\max}$ : 200 cd/m<sup>2</sup>                       $L_{\text{moy}}$ : 100 cd/m<sup>2</sup>                       $L_{\min}$ : 0 cd/m<sup>2</sup>

Figure 3.13 Résultats de prise de mesures à 09H (source : Auteur, 2022)

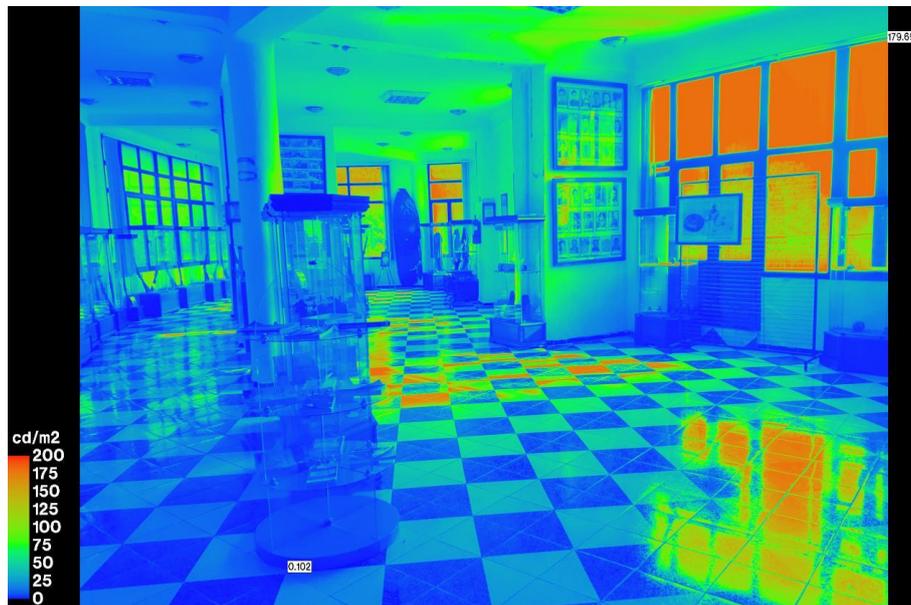
A partir de la figure ci-dessus, on remarque une luminance très élevée comprise entre 175 cd/m<sup>2</sup> et 200 cd/m<sup>2</sup> sur les ouvertures cela dû à l'orientation sud-est, sur une partie du sol reflétant la lumière directe qui est pénétré par les ouvertures, et sur quelques objets exposés ; qui peut créer un inconfort visuel dû à l'éblouissement présent sur les objets exposés.

On remarque aussi une luminance de valeur comprise entre 75 cd/m<sup>2</sup> et 100 cd/m<sup>2</sup> sur les objets exposés sur les murs aux ouvertures, donc une absence partielle d'éblouissement et cela dû à la distance entre les ouvertures et le mur et les objets exposés au milieu de la salle qui joue un rôle d'obstacle pour la lumière direct provenant des ouvertures sud-est.

Par contre on trouve une échelle de luminance différente au sol ; 200 cd/m<sup>2</sup>, 125 cd/m<sup>2</sup>, 75 cd/m<sup>2</sup> et 25 cd/m<sup>2</sup>, et cela sous l'influence de texture de carrelage et sa couleur. La présence d'une répartition de lumière non homogène sur une surface peut créer une variation trop rapide de l'intensité d'éclairage, donc une source de fatigue et d'une gêne visuelle.

## 5.2 Résultat de prise de mesure pour le 15 décembre 2021 à 12H

### ❖ Face aux ouvertures



$L_{\max}$ : 200  $\text{cd/m}^2$

$L_{\text{moy}}$ : 100  $\text{cd/m}^2$

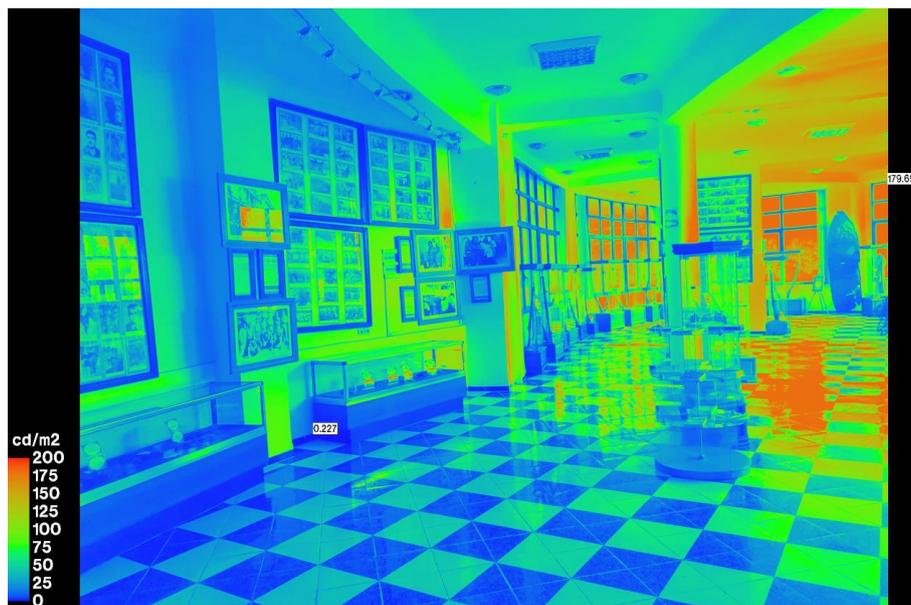
$L_{\min}$ : 0  $\text{cd/m}^2$

Figure 3.14 : Résultats de prise de mesures à 12H (source : Auteur, 2022)

A partir de la figure ci-dessus, on remarque une valeur de luminance de 200  $\text{cd/m}^2$  sur les ouvertures orientées sud-est et cela dû à la position du soleil à midi et 175  $\text{cd/m}^2$  près des ouvertures, plus en s'éloigne des ouvertures plus la luminance diminue jusqu'à atteindre un niveau inférieur.

On remarque une valeur de luminance moyenne de 100  $\text{cd/m}^2$  près des ouvertures orientées nord-est et cela dû à l'orientation de ces dernières et l'absence des rayons solaires directes et la présence de végétations et des arbres de grande hauteur, ce qui fait qu'il n'existe pas d'éblouissement dans cette direction. Mais on constate une luminance de faible valeur dans cette dernière.

❖ Face aux objets exposés :



$L_{\max}$ : 200  $\text{cd/m}^2$

$L_{\text{moy}}$ : 100  $\text{cd/m}^2$

$L_{\min}$ : 0  $\text{cd/m}^2$

Figure 3.15 : Résultats de prise de mesures à 12H (source : Auteur, 2022)

A partir de la figure ci-dessus, on remarque une valeur de luminance de 200  $\text{cd/m}^2$  près des ouvertures par la présence d'une source lumineuse qui est le soleil, plus on s'éloigne des ouvertures plus la valeur diminue.

On remarque une valeur moyenne de luminance de 100  $\text{cd/m}^2$  sur les objets exposés loin des ouvertures.

On remarque deux valeurs de luminance au sol, la première est de 200  $\text{cd/m}^2$  près des ouvertures orientées sud-est, la deuxième est de 100  $\text{cd/m}^2$  près des ouvertures orientées nord-est, ces valeurs sont influencées par l'orientation ; l'orientation sud-est reçoit une quantité de lumière importante à midi, tandis que l'orientation nord-est reçoit une quantité de lumière faible.

### 5.3 Résultat de prise de mesure pour le 15 décembre 2021 à 15H :

#### ❖ Face aux ouvertures :



$L_{\max}$ : 200 cd/m<sup>2</sup>

$L_{\text{moy}}$ : 100 cd/m<sup>2</sup>

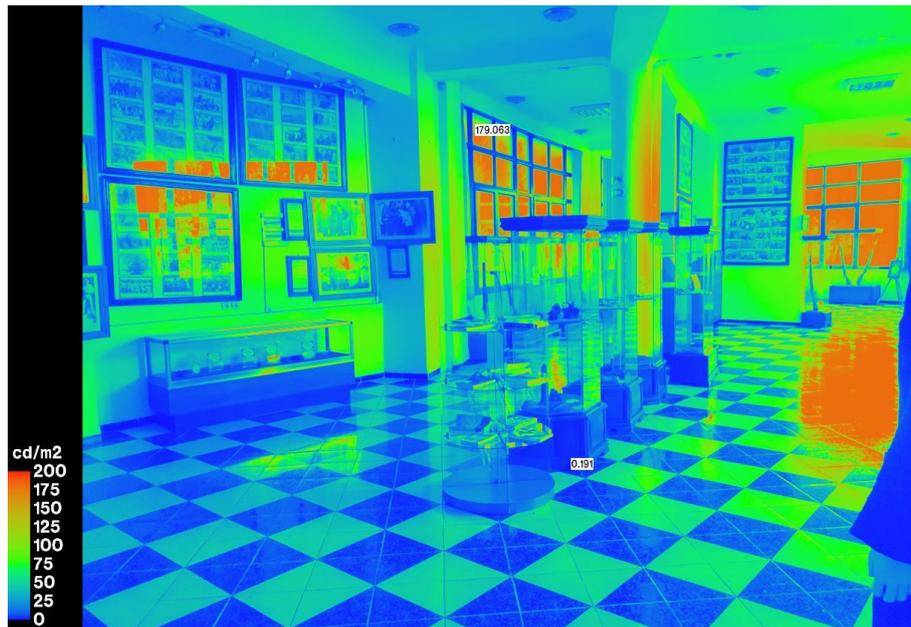
$L_{\min}$ : 0 cd/m<sup>2</sup>

Figure 3.16 : Résultats de prise de mesures à 15H (source : Auteur, 2022)

A partir de la figure ci-dessus, on remarque toujours une valeur de luminance de 200 cd/m<sup>2</sup> et quelques taches solaires au sol résultantes de la réflexion de la lumière naturelle provenant des ouvertures.

On remarque aussi, une luminance de faible valeur située entre 0 cd/m<sup>2</sup> et 25 cd/m<sup>2</sup> sur la partie gauche de la salle d'exposition, le premier facteur qui a influencé ce paramètre est la distance par rapport aux ouvertures sud-est qui a empêché la lumière d'atteindre cette espace, le deuxième facteur est la forme d'espace d'exposition ; la lumière reçue par les fenêtres orientées nord-est n'atteint pas cet espace par la forme arrondie de l'espace d'exposition. Le troisième facteur est la dominance de la couleur noire du sol.

❖ Face aux objets exposés :



$L_{\max}$ : 200 cd/m<sup>2</sup>

$L_{\text{moy}}$ : 100 cd/m<sup>2</sup>

$L_{\min}$ : 0 cd/m<sup>2</sup>

Figure 3.17 : Résultats de prise de mesures à 15H (source : Auteur, 2022)

A partir de la figure ci-dessus, on remarque quelques taches solaires de valeur de luminance de 175 cd/m<sup>2</sup> sur les tableaux exposés en face des ouvertures sud-est, ce qui va créer un éblouissement et une fatigue pour les visiteurs.

Par contre les objets exposés au milieu de l'espace d'exposition ont une valeur de luminance de 75 cd/m<sup>2</sup> à 100 cd/m<sup>2</sup> et cela sous l'influence de l'espacement entre ces objets et les ouvertures.

L'interprétation des résultats de prise de mesure permet d'avoir une réflexion complète sur la répartition de la luminance dans cet espace d'exposition et d'étudier l'éblouissement dans ce dernier, le concept de luminance dans une étude de luminance fait référence à la quantité de lumière émise par une surface éclairée. Il s'agit d'un concept qui mesure la lumière telle que perçue par l'œil humain à partir d'un point de vue particulier. Les valeurs de luminance diffèrent d'un espace à un autre et dépend de source de lumière et la réflexion de chaque matériau.

## 6. Etude qualitative

La technique que nous avons utilisée pour recueillir les données des utilisateurs de notre cas d'étude est celle du questionnaire qui va nous permettre d'évaluer qualitativement la satisfaction des utilisateurs vis-à-vis de la lumière naturelle dans l'espace d'exposition du musée Al Moudjahid.

### 6.1 Définition du questionnaire

« Ensemble de questions écrites portant sur un sujet particulier et obéissant à des règles précises de préparation, de construction et de passation. Il existe une grande variété de questionnaires que l'on classe selon le but visé : d'opinions, d'intérêts, de connaissances, de motivation... » (Aktouf, 1987).

### 6.2 La population du questionnaire

La population de l'enquête est l'ensemble des individus sur lesquels on souhaite collecter des informations et qui possèdent tous des caractéristiques en commun. (M. HAP,1990). Dans notre cas la population de la recherche est l'ensemble des visiteurs de musée almoudjahid de Bejaia.

### 6.3 Description du questionnaire

Nous avons utilisé la technique de l'enquête par questionnaire auprès des visiteurs de la salle d'exposition du musée almoudjahid de Bejaia dans le but de savoir leur niveau de confort visuel et de bien évaluer la lumière naturelle dans cet espace.

Le questionnaire comporte globalement 17 questions (voir le questionnaire en annexe), la majorité des questions sont fermées soit à choix binaire ou multiple, avec quelques questions ouvertes (pour donner aux gens la possibilité d'exprimer leurs idées). Il est composé essentiellement de deux parties :

- **Une première partie** : comporte des questions qui concerne l'âge, sexe, date et heure de la visite, le type du ciel, etc.
- **Une deuxième partie** : comporte des questions sur le niveau du confort visuel, l'uniformité de la lumière naturelle, les problèmes d'éblouissement, les ombres gênantes, etc.

## 7. Présentation et interprétation des résultats du questionnaire

Nous présentons dans cette partie l'interprétation des réponses des visiteurs de l'espace d'exposition du musée Al moudjahid. Le questionnaire a été distribué sur 20 personnes, du sexe différent, dont 45% femme et 55 hommes, d'une tranche d'âge qui diffère d'une personne à une autre.

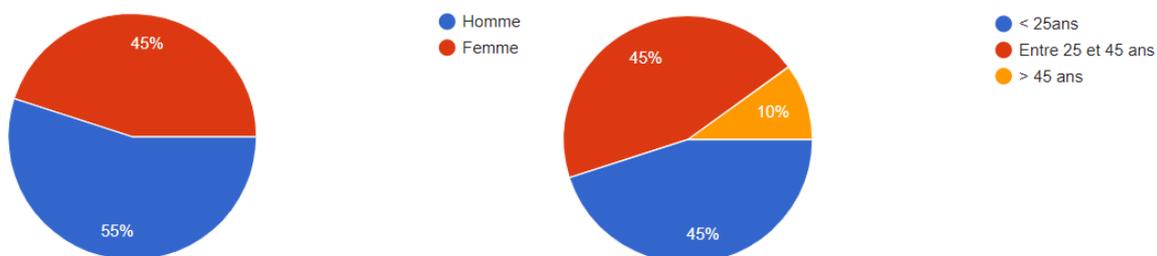


Figure 3.18 : Représentation du sexe et de l'âge (source : <https://docs.google.com/forms>)

- **La satisfaction du niveau de confort visuel dans l'espace d'exposition**

Ce graphe montre la satisfaction de l'usagers sur le confort visuel :

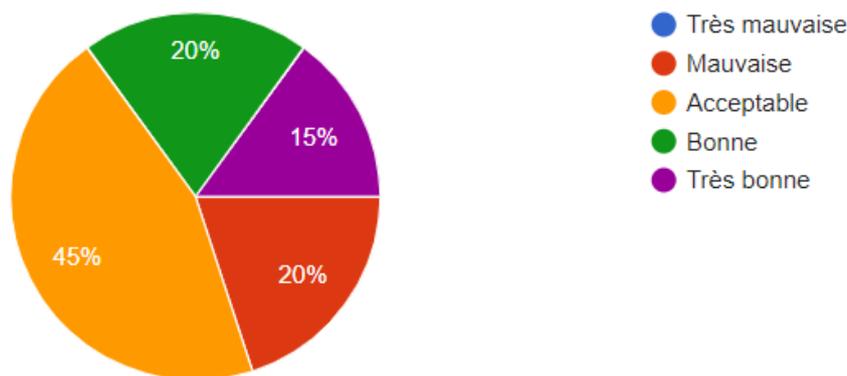


Figure 3.19 : Le niveau du confort visuel (source : <https://docs.google.com/forms>)

La satisfaction de l'utilisateur vis-à-vis du confort visuel diffère d'une personne à une autre, la majorité des visiteurs (45%) voit que le confort visuel est acceptable, 20% leur évaluation est mauvaise, 20% disent que c'est une bonne satisfaction tandis que 15% leur satisfaction au niveau du confort visuel est très bonne.

On voit que l'évaluation du confort visuel varie d'une personne à une autre, et cela sous l'influence de la subjectivité du confort visuel, il dépend de plusieurs paramètres liés à l'âge et l'ambiance voulue par le visiteur.

- **L'uniformité de la lumière naturelle**

Le graphe suivant étudie l'uniformité de la lumière naturelle dans l'espace d'exposition :

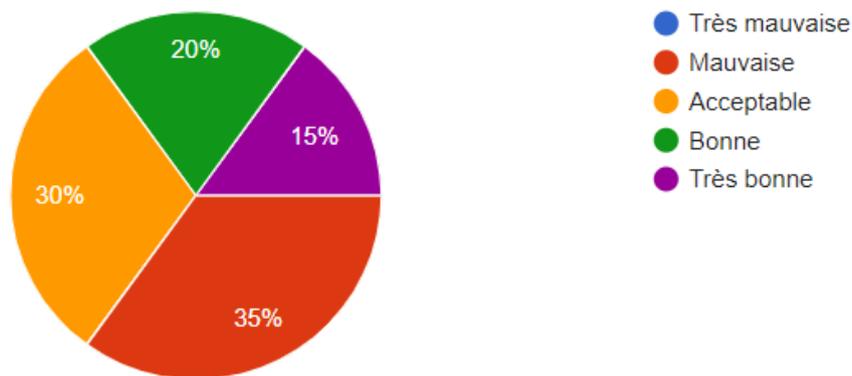


Figure 3.20 : L'uniformité de la lumière naturelle (source : <https://docs.google.com/forms>)

On voit que 35% des visiteurs évalue l'uniformité de la lumière naturelle comme mauvaise, 30% comme acceptable, 20% la considérée comme bonne et 15% très bonne. L'uniformité de la lumière varie dans le champ de vision, chaque personne à évaluer cette dernière sur un point précis et particulier.

- **La présence de la lumière naturelle dans l'espaces d'exposition**

Ce graphe montre la présence de la lumière naturelle dans l'espace d'exposition du musée :

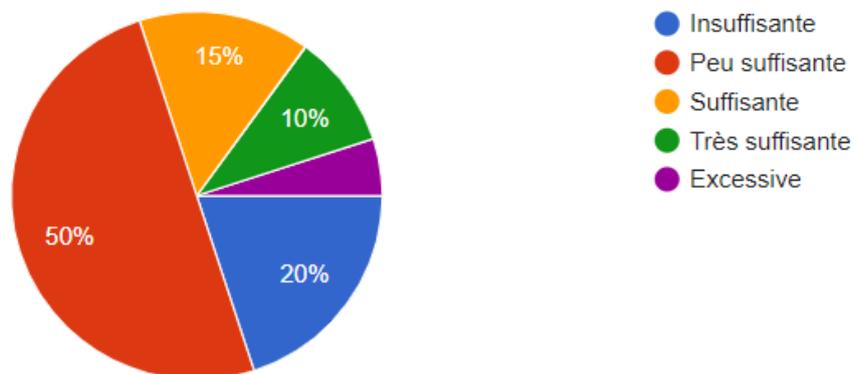


Figure 3.21 : La présence de la lumière naturelle dans l'espace d'exposition (Source : <https://docs.google.com/forms>)

Le graphe montre que la moitié des usagers (50%) voit que la présence de la lumière naturelle est peu suffisante et cela par l'influence de la quantité de la lumière présente dans cet espace, l'espace d'exposition se retrouve au sous-sol avec une façade vitrés au sud avec une protection solaire intérieur, les baies vitrées orientées nord capte moins de lumière à cause de la présence de la végétation et des arbres d'une hauteur importante.

- **La présence des rayons solaires directs**

Le graphe suivant montre si le visiteur est gêné par la présence des rayons solaires directs lors de sa visite de l'espace d'exposition du musée almoudjahid :

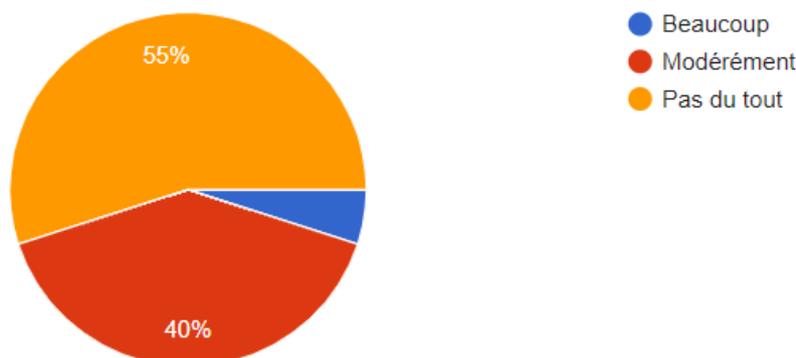


Figure 3.22 : La présence des rayons solaires directs (source : <https://docs.google.com/forms>)

Le graphe montre que 55% des visiteurs ont été pas gênés par la présence des rayons solaires directs lors de leurs visites de l'espace d'exposition, par contre 40% ont évalués la présence des rayons solaire comme modérément. Cela dépend de l'heur de la visite et la position du soleil.

- **Les sources d'éblouissement**

Le graphe suivant montre les sources d'éblouissement qui gêne le visiteur lors de sa visite de l'espace d'exposition :

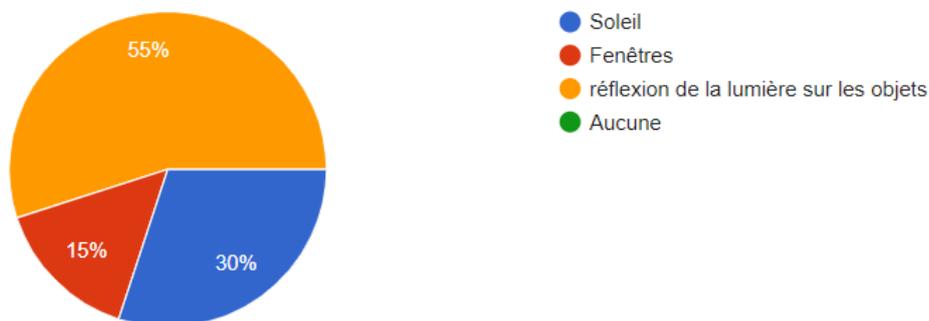


Figure 3.23 : Les sources d'éblouissement (source : <https://docs.google.com/forms>)

Le graphe montre que 55% des visiteurs reçoivent une source d'éblouissement dû à la réflexion de la lumière sur les objets exposés, cela dû à la disposition des objets face à une façade vitrée orienté sur.

- **Les taches solaires et ombres gênantes**

75% des visiteurs ont évalués la présence des taches solaires comme acceptable et 80% des usagers ne remarque pas la présence des ombres gênantes dans l'espaces d'exposition. Cela en fonction de l'heur de la visite et la trajectoire solaire, la façade sud avec une protection solaire intérieur empêche la pénétration directe des rayons solaire, et les arbres au nord comme un obstacles aussi pour les rayons solaires direct.

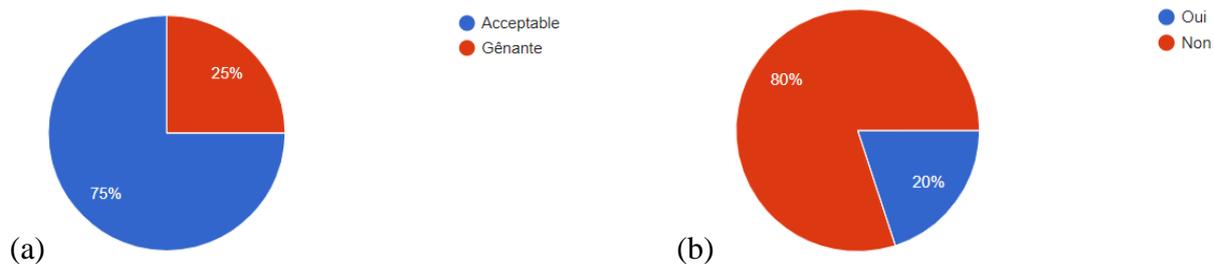


Figure 3.24 : Les taches solaires et ombres gênantes (source : <https://docs.google.com/forms>)

(a) Les taches solaires

(b) Ombres gênantes

La majorité des gens qui ont répondu par oui sur la présence des ombres gênantes disent que la source de ce dernier est les ombres des objets exposés, et cela dû à la réflexion de la lumière venue de la façade sud sur les objets.

- **Le besoin en protection solaire et la fatigue visuelle**

Les graphes suivants montrent le besoin en protection solaires et la fatigue visuelle :

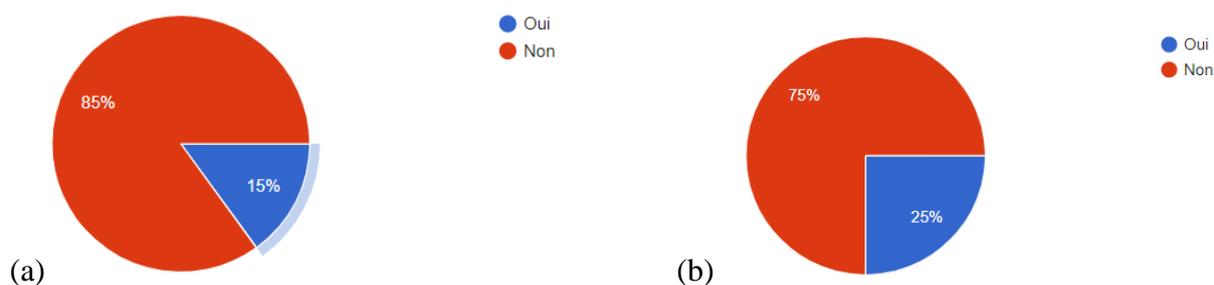


Figure 3.25 : Le besoin en protection solaire et la fatigue visuel

(Source : <https://docs.google.com/forms>)

(a) Le besoin en protection solaire

(b) La fatigue visuelle

Les graphes montrent que 85% des visiteurs n'ont pas besoin d'une protection solaire et 15% ont besoin de cette dernière, et cela sous l'influence de l'orientation sud et nord et la présence d'une protection solaire intérieur qui est les stores vénitiens verticales. Et 75% des usagers ne ressentent pas une fatigue visuelle, tandis que 25% ressent une fatigue visuelle, et la cause d la fatigue est la quantité et la qualité de la lumière naturelle dans cet espace, et cela dû à la tranche d'âge de la personne, l'heure de la visite et la position du soleil.

- **La présence d'un objet qui gêne la pénétration de la lumière naturelle**

Le graphes suivant montre que 70% des visiteurs ne ressentent pas un objet qui gêne la pénétration de la lumière naturelle et 30% ressentent cet dernière.

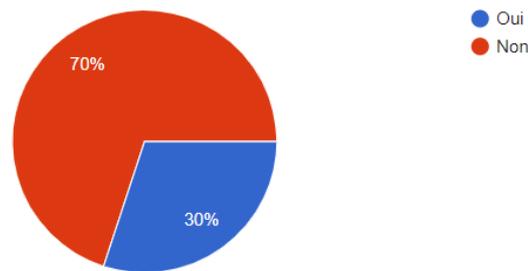


Figure 3.26 : Un objet qui gêne la pénétration de la lumière naturelle  
(Source : <https://docs.google.com/forms>)

Les usagers qui ont répondu par oui pour la présence d'un objet qui gêne la pénétration de la lumière naturelle précise que ce dernier est dû à la qualité du verre des fenêtres, les rideaux et les fenêtres fermées.

### **Le choix de la couleur de carrelage et la texture**

Le graphe suivant montre que 60% des visiteurs ont évalués la couleur comme bonne et 40% voit que cette couleur est mauvaise.

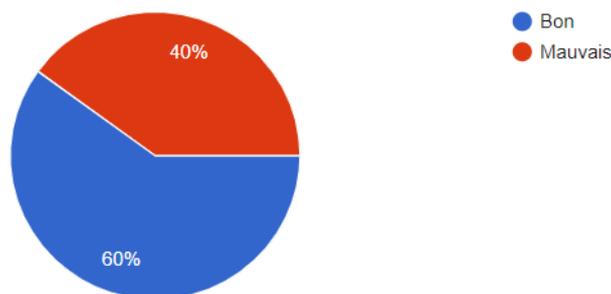


Figure 3.27 : Le choix de la couleur de carrelage et la texture  
(Source : <https://docs.google.com/forms>)

Les 60% des usagers trouve la couleur noir et blanc du carrelage donne une certaine lumière qui permet une bonne visualisation des objets, une parfaite correspondance avec les objets exposés et parce que le noir et blanc est une couleur préférée pour tout le monde et qui donne une simplicité au musée. Les 40% voit que le noir donne une obscurité pour l'espace d'exposition et reflète les rayons du soleil, une couleur qui empêche de voir clairement les objets exposés et réduit la qualité de la lumière.

### **Le choix de la couleur des murs**

Le graphe suivant montre que la totalité des visiteurs apprécient la couleur blanche des murs

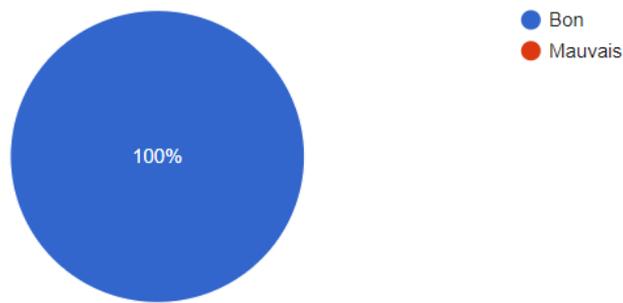


Figure 3.28 : Le choix de la couleur des murs (Source : <https://docs.google.com/forms>)

La totalité des visiteurs voit que la couleur blanche des murs donne plus de lumière pour l'espace d'exposition, elle donne un effet naturel qui permet une bonne visualisation des objets exposés, elle permet aux objets exposés d'être clair et bien exposé aux visiteurs et elle met en valeur les objets exposés.

A travers la présentation et l'interprétation du questionnaire et à travers la réponse des visiteurs, on peut déduire que l'espace d'exposition du musée almoudjahid reçoit une lumière non homogène et peu suffisante avec des taches solaires acceptables, mais les usagers ressentent un confort visuel ; c'est une impression subjective qui dépend de chaque personne et les ambiances lumineuse d'un lieu qui sont liées à la manière dont un individu sera affecté par l'ensemble des aspects de son environnement lumineux.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre de la partie pratique de notre recherche, nous avons présenté tous les résultats et l'interprétation des prises de mesures et du questionnaire, afin de vérifier les hypothèses mentionnées précédemment. La prise de mesure nous montre que la lumière naturelle dépend de différents paramètres liés au moment de la visite, à l'orientation, aux obstacles extérieurs et aux surfaces vitrées qui doivent être bien étudiés pour éviter l'éblouissement, les taches solaires, les rayons solaires directes et les ombres gênantes pour assurer un confort visuel optimal. Le questionnaire nous révèle ensuite, que le confort visuel dépend de l'uniformité de la lumière, la bonne répartition de cette dernière dans l'espace et la qualité et la quantité de la lumière, mais surtout de la perception de chaque individu.

## **Chapitre IV :**

**La simulation numérique de L'éclairage**

**Latéral et zénithal**

## Introduction :

Le confort visuel est un concept essentiel dans la conception architecturale pour obtenir des espaces idéaux. Il est lié à la lumière naturelle. Afin d'obtenir un bon confort visuel les chercheurs du domaine s'orientent vers les logiciels de simulations de la lumière pour assurer une bonne optimisation de la gestion et de l'orientation de la lumière naturelle dans un espace architectural. L'objectif de ce chapitre est de rechercher un degré de lumière naturelle optimal, afin de faire rentrer dans notre espace architectural une quantité suffisante de lumière naturelle, qui permettra aux usagers d'apprécier ce dernier sans fatigue visuelle, et cela par l'utilisation d'un outil informatique ; logiciel DIAL+ avec une licence student, cette technique est pour but de compléter l'évaluation quantitative par prise de mesures in situ, vu que la durée de recherche ne nous permette pas de les faire pour toutes les périodes de l'année.

### 1. Présentation du logiciel utilisé « DIAL+ » :

« Ce logiciel est le fruit d'une collaboration étroite avec l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Laboratoires LAURE et LESO-BP). Il a été cofinancé par la Confédération Helvétique (Commission pour la Technologie et l'Innovation CTI-KTI / Projet : "*Advanced Fenestration Design Tool*"). DIAL+ constitue un prolongement du logiciel LESO-DIAL et du projet DIAL-Europe, il permet de soit lancer des simulations d'éclairage (RADIANCE) ou de calculer les charges de chauffage et de refroidissement à l'échelle d'un local.



Figure 4.1 : logo du logiciel de simulation DIAL+ (source : <https://www.dialplus.ch/>)

Le module permet de produire des rapports qui incluent les résultats suivants :

- Facteurs de lumière du jour ;
- Autonomie dynamique diffuse (% et heures) ;

- Autonomie pour Minergie-Éco (Suisse) ;
- Valeurs d'éclairement en éclairage électrique ;
- Consommation annuelle d'électricité d'éclairage (SIA 380/4, Minergie) ;
- Diagramme solaire incluant les obstructions extérieures ;
- Etudes d'ombrage (facteur d'ensoleillement, fraction de ciel vu) ;
- Le module de refroidissement donne accès aux modules suivants : Charges de refroidissement et de chauffage (EN 15251 EN 15255, EN 15265 and ISO 13791, SIA 382/1 SIA 382/2) ;
- Débits d'air dus à la ventilation naturelle (Modèle de Cockroft).

Grâce à sa rapidité de simulation et sa simplicité, DIAL+ est particulièrement adapté à la réalisation d'études paramétriques, ce qui est très intéressant au stade de l'avant-projet. DIAL+ permet de prendre des décisions précoces à l'échelle du local et de les appliquer au reste du bâtiment. DIAL+ est une interface très intuitive qui traite de l'optimisation des charges énergétiques, à l'échelle du local.

L'interface a été conçue de manière à permettre à un utilisateur non expert de décrire facilement les paramètres des locaux. Il peut donc être utilisé par des architectes et des ingénieurs. Il est aussi bien adapté à des objectifs pédagogiques. Cependant, l'utilisation de toutes ses caractéristiques (éclairage et thermique) suppose que l'utilisateur a une connaissance minimale du comportement d'un bâtiment.

DIAL+ contient un modeler 3D simplifié qui permet de modéliser des locaux rectangulaires, en forme de L ou de trapèzes, ayant un toit plat, à simple ou double versant. Des objets opaques ou transparents peuvent être ajoutés à l'intérieur des locaux traités. Le temps moyen requis pour décrire tous les paramètres d'un local classique est de moins de 10 minutes.

Les résultats de simulation sont affichés sous forme de plans 2D et de graphes (FLJ, autonomie, éclairement, etc.) sur le plan de travail ou sur les murs » (<https://energieplus-lesite.be/>).

## **2. Les étapes principales de travail**

Nous allons voir ici les différentes étapes nécessaires à la réalisation de la simulation, pour aboutir au rapport. Ci-dessous dans la figure la première étape.

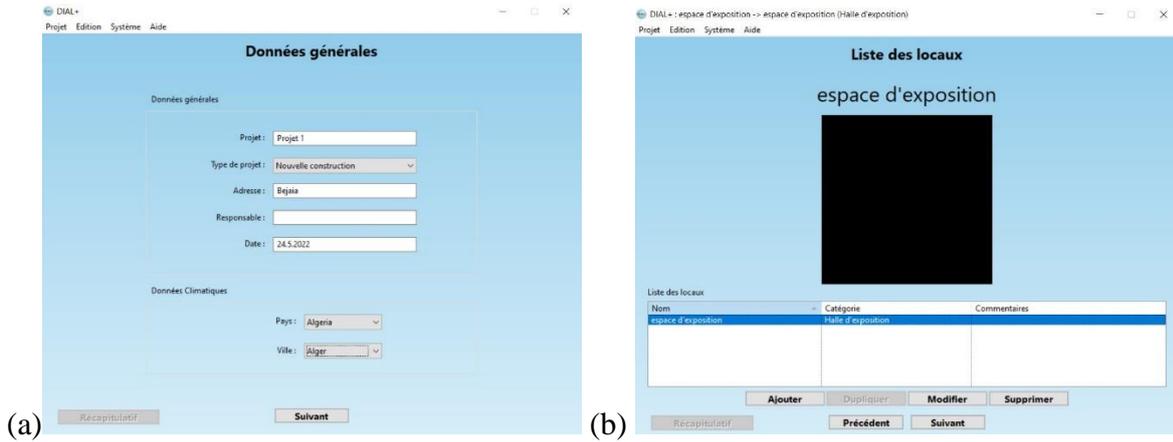


Figure 4.2 : étape 01 de la simulation numérique (source : Auteur, 2022)

Cette étape consiste à préciser les données générales et les données climatique de la ville sélectionné et de mentionner le nom et la catégorie de l'espace à étudier.

La figure suivante illustre la deuxième étape de la simulation numérique :

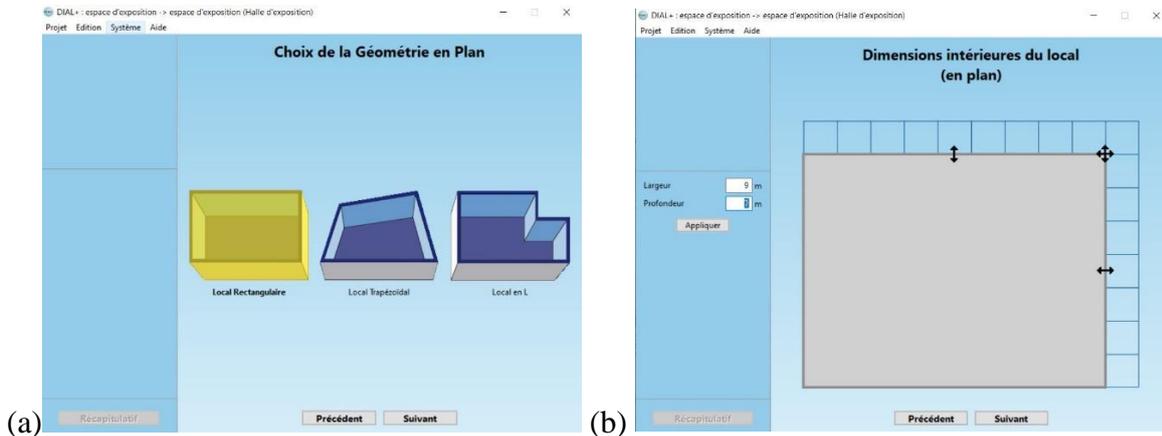


Figure 4.3 : étape 02 de la simulation numérique (source : Auteur, 2022)

Cette deuxième étape revient à spécifier le choix de la géométrie en plan, la forme et les dimensions intérieures de l'espace étudié

La figure suivante montre la troisième étape de la simulation numérique :

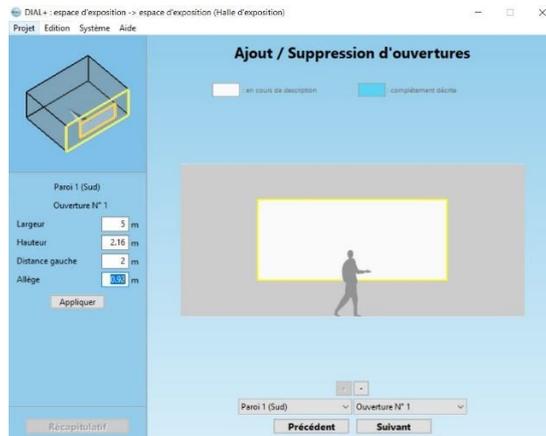


Figure 4.4 : étape 03 de la simulation numérique (source : Auteur, 2022)

Dans cette étape de la simulation numérique, on doit ajouter des ouvertures avec ses caractéristiques en précisant la largeur, la hauteur, la distance à gauche et l'allège. Et aussi la précision de l'épaisseur du mur, les propriétés du vitrage, les propriétés du cadre et le type d'ouvrant.

La figure suivante montre la dernière étape de la simulation numérique :

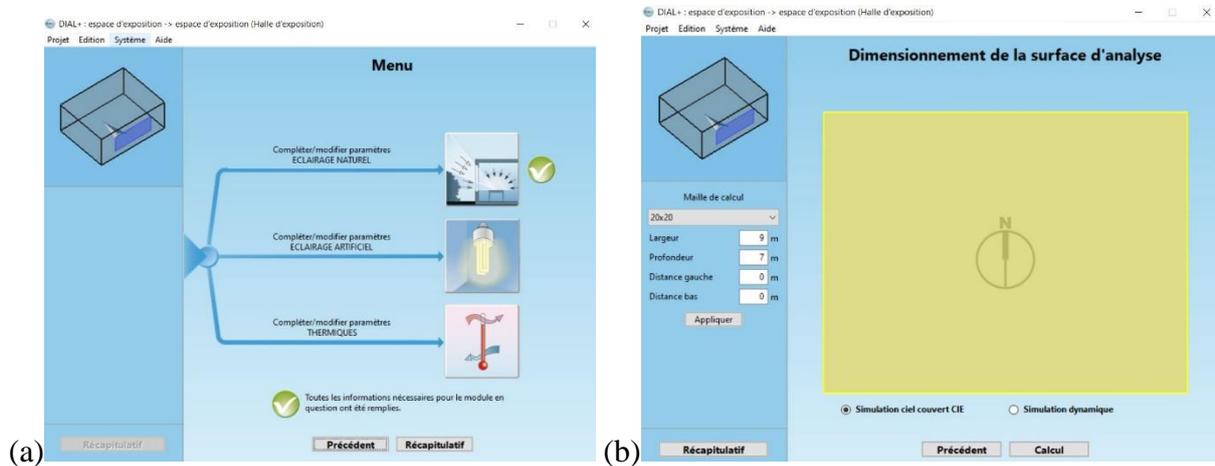


Figure 4.5 : étape 04 de la simulation numérique (Auteur, 2022)

Dans cette étape nous devons compléter et modifier tous les paramètres liés à l'éclairage naturel et remplir toutes les informations nécessaires pour le module en question, et enfin le dimensionnement de la surface d'analyse et la précision de la simulation ciel couvert CIE pour ensuite lancer le calcul de la simulation numérique, ensuite exporter les valeurs et générer le rapport de la simulation en fichier PDF.

### 3. La simulation du cas d'étude

L'éclairage naturel d'une pièce ne peut s'apprécier judicieusement qu'en mobilisant beaucoup de ressources et de temps en termes de variations au cours de la journée et de l'année. Nos mesures n'ont pas pu être réalisées dans des conditions précises (décembre/mars/juin).

De plus, afin de consolider les résultats de nos travaux, nous pensons qu'il est nécessaire de compléter nos recherches par une simulation numérique. A l'utilisé pour la comparaison avec nos mesures.

#### 3.1 les scénarios

Pour étudier l'impact de la lumière naturelle sur le confort visuel des usagers, on a proposé deux scénarios ;

### 3.1.1 Scénario 01 : l'éclairage latérale

Le premier scénario consiste à étudier l'éclairage latéral avec trois modèles numériques ; le premier modèle avec un ratio de 30%, le second pour un ratio de 60% et le troisième ayant un ratio de 90%.

- **Facteur de lumière du jour**

Les figures suivantes représentent le facteur de lumière du jour pour le premier scénario :

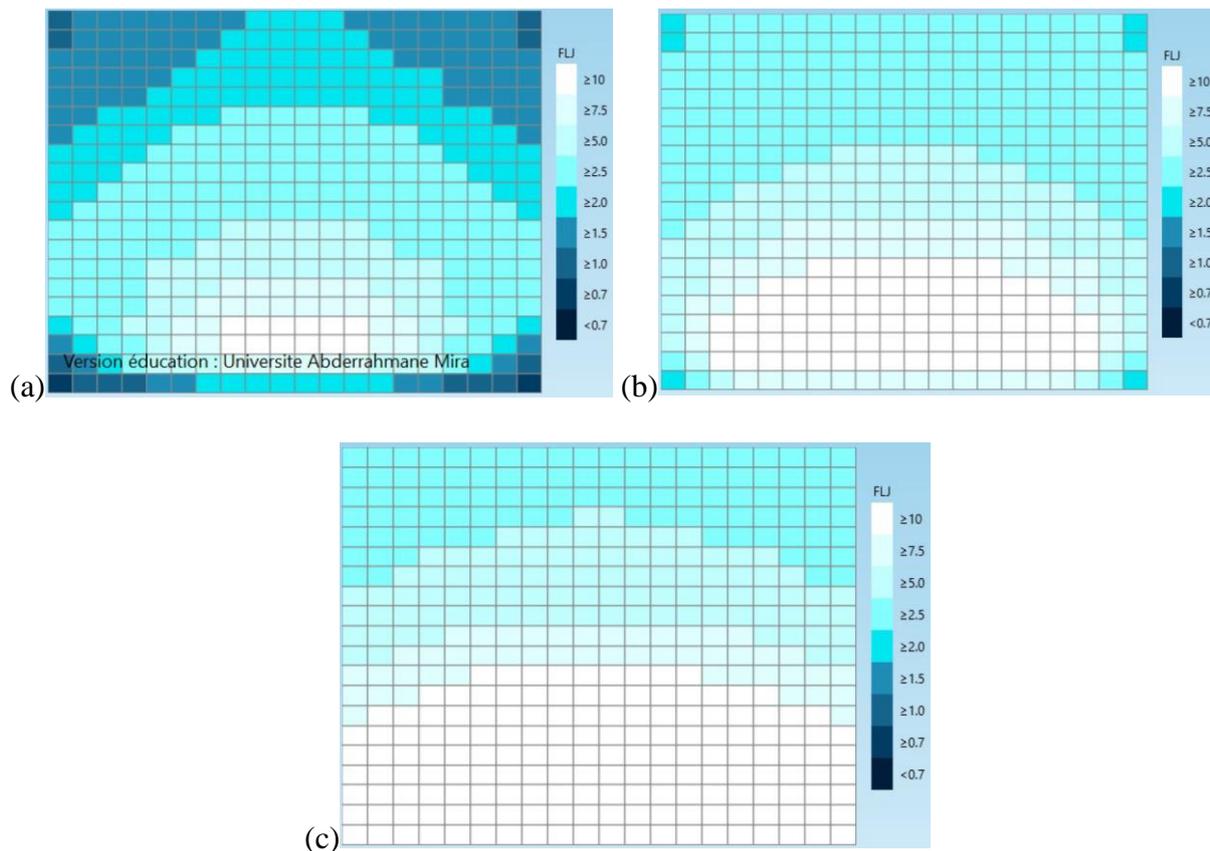


Figure 4.6 : facteur de lumière du jour

(a) Facteur de lumière du jour pour un ratio de 30%

(b) Facteur de lumière du jour pour un ratio de 60%

(c) Facteur de lumière du jour pour un ratio de 90%

Pour le ratio de 30%, le facteur de lumière de jour est très élevé au côté de la fenêtre voir plus de 7% qui vas amener également de l'inconfort visuel par l'éblouissement, plus on s'éloigne de la fenêtre cette valeur diminue jusqu'à atteindre le FLJ minimum de 1% et cela sous l'influence de la profondeur de l'espace et que la lumière naturelle ne peut pas atteindre ses endroits. Pour le ratio de 60%, on remarque que les valeurs de FLJ se divisent en trois parties, la première partie est la surface près de la fenêtre là où on remarque un FLJ de plus de 7,5%, la partie intermédiaire d'une valeur de 5% à 7% et la partie extrême loin de la fenêtre

d'une valeur de FLJ de 2,5%. Ces valeurs varient en fonction de la position de la source lumineuse qui est la fenêtre, le pourcentage de vitrage et la capacité de la source lumineuse à atteindre l'espace en profondeur. Pour le ratio de 90%, la surface à proximité de la fenêtre reçoit une valeur de FLJ de plus de 10% et cela sous l'influence de la quantité importante de la lumière qui pénètre cet espace par le pourcentage de vitrage élevé, plus on s'éloigne de l'ouverture le facteur de lumière du jour décline jusqu'à 2,5% à 5%.

- **L'autonomie lumineuse**

Les figures suivantes représentent l'autonomie lumineuse pour le premier scénario :

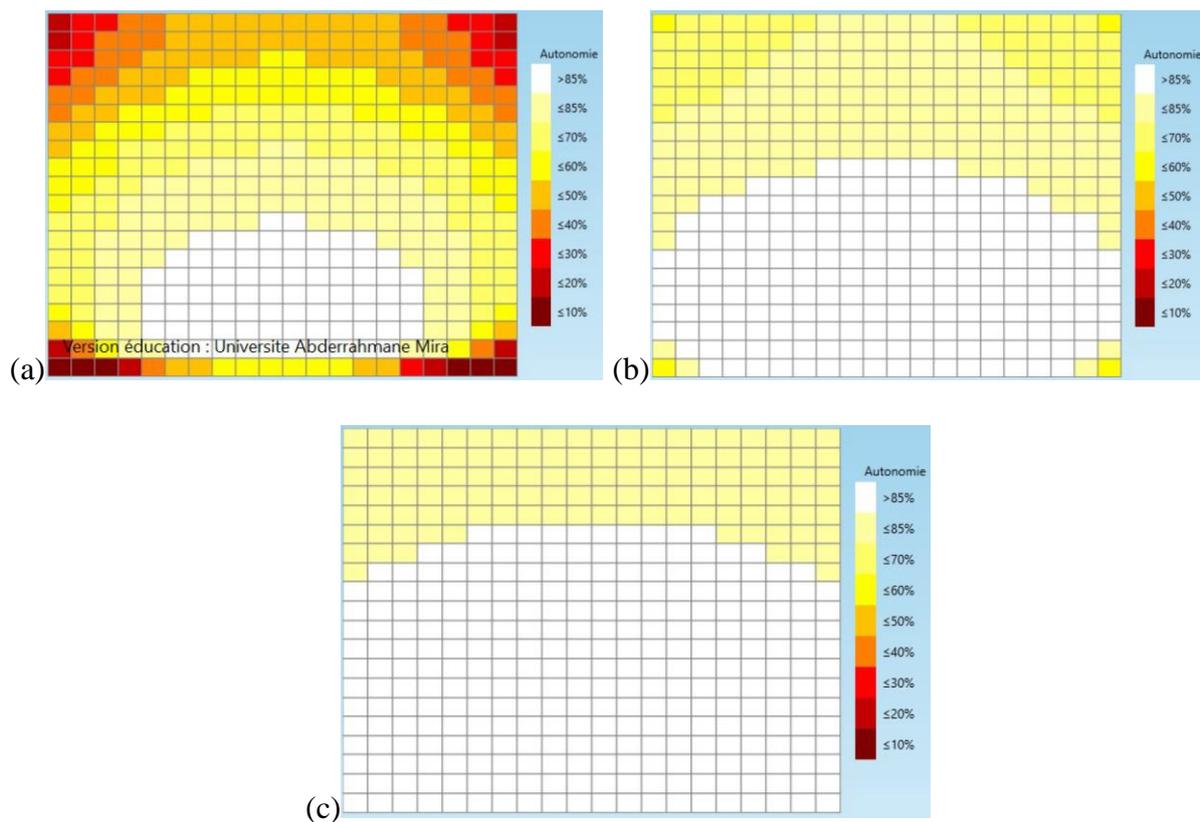


Figure 4.7 : l'autonomie lumineuse

- (a) L'autonomie lumineuse pour un ratio de 30%
- (b) L'autonomie lumineuse pour un ratio de 60%
- (c) L'autonomie lumineuse pour un ratio de 90%

Pour le ratio de 60% on remarque une autonomie lumineuse d'une valeur de plus de 85% à proximité de l'ouverture, et cela par la présence d'une source lumineuse, plus on s'éloigne de cette dernière l'autonomie diminue. Pour le ratio de 60%, une surface qui atteint la moitié de l'espace reçoit une autonomie lumineuse d'une valeur de plus de 85% et cela sous l'influence du pourcentage de vitrage et la quantité importante de la lumière qui pénètre cet espace. Pour le ratio de 90%, on remarque une surface très importante d'une valeur d'autonomie de plus de

85% qui atteint plus de la moitié de l'espace, et cela sous l'influence de la quantité importante qui pénètre l'espace d'un pourcentage de vitrage très élevé, plus on s'éloigne de l'ouverture l'autonomie atteint une valeur de 70%.

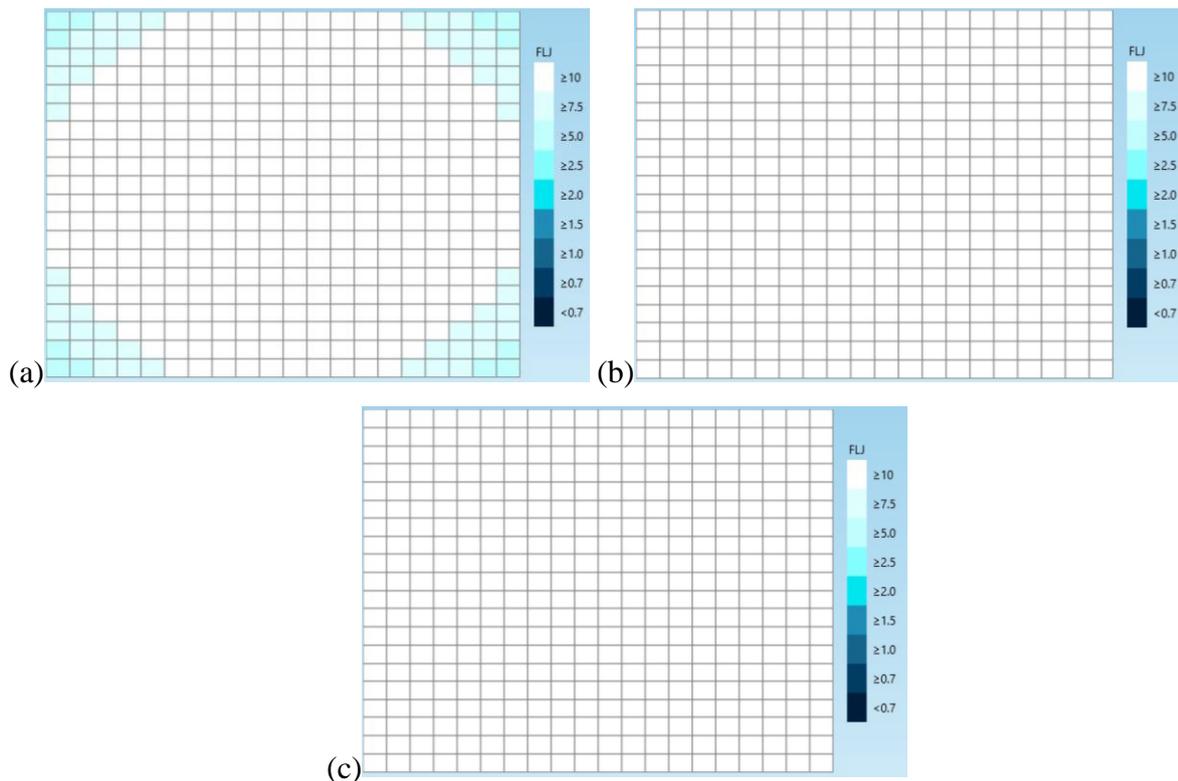
On constate que le pourcentage de facteur de lumière de jour et l'autonomie lumineuse dans cet espace d'exposition se diffère d'une partie à une autre, et montre que la distribution de la lumière dans cet espace n'est pas uniforme, les valeurs de FLG et l'autonomie sont excessifs dans la partie à proximité de l'ouverture qui vas provoquer un inconfort visuel par la présence d'éblouissement. Par ailleurs ces valeurs diminuent progressivement en s'éloignant de l'ouverture.

### 3.1.2 Scénario 02 : l'éclairage zénithale

Le deuxième scénario concerne l'étude de l'éclairage zénithale avec trois modèles numériques ; le premier modèle avec un ratio de 30%, le second pour un ratio de 60% et le troisième ayant un ratio de 90%.

- **Facteur de lumière du jour**

Les figures suivantes représentent le facteur de lumière du jour pour le deuxième scénario :



- (a) Facteur de lumière du jour pour le ratio de 30%
- (b) Facteur de lumière du jour pour le ratio de 60%
- (c) Facteur de lumière du jour pour le ratio de 90%

Pour le ratio de 30% on remarque des valeurs de FLJ de plus de 10% dans les surfaces près de la fenêtre et au centre de l'espace, et une valeur de FLJ de 7,5% aux coins de cet espace d'exposition, et cela sous l'influence du pourcentage de vitrage. Pour le ratio de 60% et 90% la totalité de la surface de l'espace reçoit un pourcentage de FLJ de plus de 10%, et cela parce que le pourcentage de l'ouverture zénithale est important et l'espace reçoit une quantité élevée de la lumière et donne un espace clair à très clair, et ce qui va engendrer des problèmes d'éblouissement et d'inconfort visuel.

- **L'autonomie lumineuse**

Les figures suivantes représentent l'autonomie lumineuse pour le premier scénario :

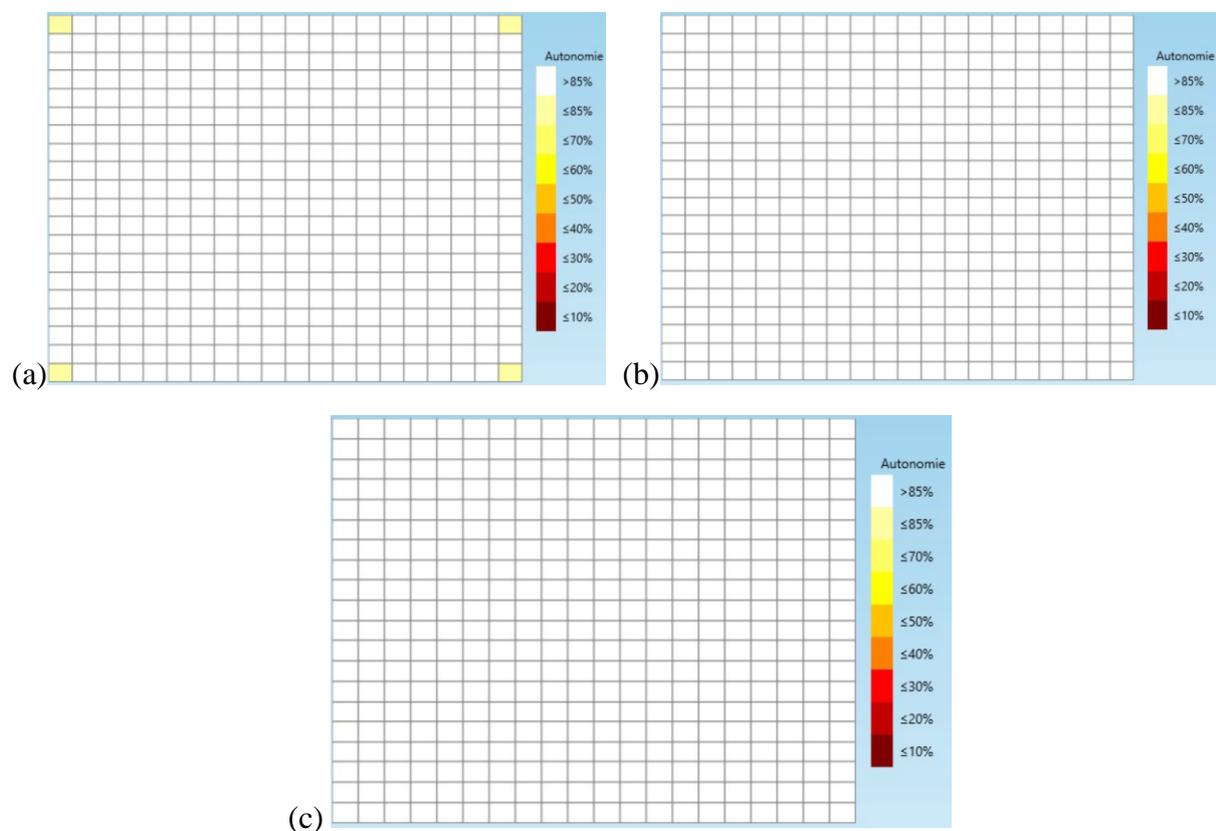


Figure 4.9 : l'autonomie lumineuse

- (a) L'autonomie lumineuse pour le ratio de 30%
- (b) L'autonomie lumineuse pour le ratio de 60%
- (c) L'autonomie lumineuse pour le ratio de 90%

Pour les trois ratios de 30%, 60%, 90% on remarque que l'autonomie lumineuse atteint des valeurs maximums de plus de 85%, et cela sous l'influence de pourcentage du vitrage, et Les ouvertures zénithales horizontales couvre une partie de ciel plus importante que les ouvertures latérales, et apporte donc une plus grande part de lumière naturelle dans l'espace qu'elle éclaire.

On constate que le pourcentage de facteur de lumière de jour et l'autonomie lumineuse dans cet espace d'exposition est presque la même valeur dans les trois modèles de ratios différents, et montre que la distribution de la lumière dans cet espace est uniforme, mais les valeurs de FLJ dépassent le niveau moyen de 5% et atteignent un pourcentage de 10% qui va entraîner des problèmes d'éblouissement et d'inconfort visuel pour les usagers et les objets exposés.

La dimension des ouvertures d'un local est un facteur déterminant de la quantité de lumière extérieure qui atteint l'intérieur des locaux. Plus la largeur de la fenêtre augmente, plus la distribution devient uniforme, et le niveau de FLJ du fond de la pièce augmente avec la hauteur de la fenêtre. Pour une même surface vitrée, une fenêtre haute fournit plus de lumière en profondeur.

### **Conclusion**

Dans ce dernier chapitre de la partie pratique, nous avons présenté l'ensemble des résultats de la simulation numérique réalisées par le logiciel Dial+ et son interprétation, dans le but de valider ou non nos hypothèses fixées auparavant. Les résultats obtenus et leur comparaison avec les normes nous ont permis de déduire que l'espace étudié est bien éclairé tout au long de l'année mais nous avons constaté que la distribution de la lumière naturelle dans tout l'espace dépend de plusieurs paramètres liés aux types d'éclairage (latéral ou zénithal), le pourcentage du vitrage, les dimensions de l'ouverture et la profondeur de l'espace. Les ouvertures latérales et les ouvertures zénithales se comportent très différemment dans le choix de la pénétration solaire. Les ouvertures latérales ne voient qu'une partie du ciel, et lorsque le ciel est couvert, les performances lumineuses de ces ouvertures verticales sont nettement inférieures à celles des ouvertures zénithales. De plus, la lumière pénètre latéralement dans l'espace, ce qui peut provoquer un inconfort visuel dû à l'éblouissement près des fenêtres. Cependant, les fenêtres latérales en façade sud permettent de transmettre un maximum de rayonnement solaire en hiver, ce qui favorise l'utilisation des gains solaires, tout en évitant les pénétrations estivales et les surchauffes qu'elles entraînent. Les ouvertures zénithales s'ouvrent sur la globalité de la voûte céleste ; elles assurent une large pénétration de la lumière diffuse. La distribution lumineuse procurée par une ouverture zénithale est également beaucoup plus homogène que celle obtenue par une ouverture verticale. De plus, la lumière pénètre dans l'espace par le plafond, ce qui limite les phénomènes d'éblouissement.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Notre travail de recherche s'intéresse à l'étude de l'éclairage naturel dans l'espace d'exposition du musée almoudjahid de Bejaia dans le but d'évaluer la qualité et la quantité de l'éclairage naturel et le confort visuel des usagers.

Cette recherche est devisée en trois parties, une approche théoriques afin de mieux comprendre les concepts liés au sujet de la recherche, ensuite nous avons entrepris d'évaluer l'environnement lumineux intérieur de notre cas d'étude à l'aide de deux méthode de recherche ; une méthode empirique basée sur deux outils ; des mesures qualitatives sur terrain, accompagné d'une enquête par questionnaire pour connaitre l'évaluation personnelle des utilisateurs de cet espace, et une simulation numérique en dernier lieux avec l'utilisation d'un outil informatique ; logiciel Dial+ pour évaluer la lumière naturelle durant toutes les périodes de l'année. L'expérience de cette étude a mis en évidence certaines difficultés pour obtenir des conclusion précise sur le contrôle de la lumière du jour. Mais l'expérience s'est avérée être un outil puissant et utile pour comprendre la qualité et la quantité de la lumière du jour et ses éléments de contrôle afin d'atteindre le niveau requis pour les espaces d'exposition, intégrer le confort visuel et la durabilité. Il est possible d'éclairer les espaces d'exposition en tirant parti de notre source de lumière naturelle avec une planification et un contrôle. Apres les années 50, les nouveaux musées ont été construits sans fenêtres en raison des dommages causés par la lumière du jour. Mais aujourd'hui, nos connaissances et notre technologie de contrôle et de régulation modernes ont permis de diriger la lumière naturelle avec précision sans nuire aux œuvres exposés. Dans les espaces d'exposition, le niveau d'éclairement et la luminance doivent être déterminés en premier lieu, par la sensibilité de l'exposition, Le deuxième critère est l'intention de conception et le troisième critère est la lumière nécessaire pour assurer le confort visuel.

L'étude empirique effectuée dans l'espace d'exposition du musée almoudjahid de Bejaia a permis d'étudier le comportement de la lumière dans cet espace, les résultats obtenus de cette étude à démontrer que l'éclairage naturel dépend de plusieurs paramètres liés aux dimensions de l'ouverture, l'orientation de l'espace et le moment de la journée. Concernant l'avis personnels des visiteurs montre que le confort visuel dépend de la perception de chaque individu.

La simulation numérique effectuée sur les ouvertures de façade latérales et zénithales et leurs pourcentages de ratio utilisé, démontre que l'éclairage zénithal est mieux approprié pour

les besoins des espaces d'exposition, il favorise la bonne concentration de la lumière dans l'ensemble de l'espace et limite les phénomènes d'éblouissements et assure le confort visuel. L'éclairage latéral quant à lui est le mieux placé pour capter les rayonnements solaires en hiver.

L'expérience des œuvres exposées est inséparable de l'expérience lumineuse et spatiale des galeries où elles sont exposées. Cette interaction entre l'ambiance lumineuse de l'espace et les objets exposés confère à chaque musée, voire à chacune de ses galeries, son caractère propre et la conception des ouvertures à la lumière du jour fait partie intégrante de cette expérience. L'utilisation de la lumière du jour dans les galeries de musées a été un défi pour les architectes, principalement en raison du risque de détérioration des objets exposés par la lumière. Cependant, en contrôlant la pénétration de la lumière naturelle, celle-ci peut améliorer la visualisation des objets et contribuer à l'expérience visuelle des visiteurs.

### **Recommandations**

Il est recommandé de tenir compte des points suivant pour l'amélioration de l'utilisation de l'éclairage naturel dans les espaces d'exposition et pour assurer le confort visuel des usagers de l'espace :

- La lumière naturelle assure un environnement lumineux mais peut facilement provoquer des éblouissements, il est donc indispensable de la maîtriser et de la contrôler par l'utilisation de brises soleil, un type de vitrage approprié, surplombs, ...
- L'utilisation d'un pourcentage de vitrage de 60% dans les ouvertures latérales pour une distribution lumineuse homogène dans tous l'espace d'exposition.
- L'utilisation des protections solaires horizontales dans toutes les façades orientées sud pour limiter le niveau d'éclairement reçu à proximité des ouvertures et pour minimiser l'éblouissement engendré par ce dernier.
- L'utilisation des grandes fenêtres horizontales et larges avec une hauteur d'allège importante pour assurer une bonne répartition de la lumière en profondeur de l'espace.
- Pour éviter les problèmes d'éblouissement et d'inconfort visuel et pour une bonne répartition de la lumière dans les espaces d'exposition, il est préférable d'utiliser l'éclairage zénithal que l'éclairage latéral.
- Les types de matériaux de finition intérieure utilisés dans les espaces d'exposition doivent être pris en compte dans la conception architecturale car elle influence la qualité et la quantité de la lumière dans cet espace, le confort visuel des usagers et la présentation des objets. Une couleur claire est fortement recommandée.

- En optant pour la lumière zénithale, qui s'appuie sur la lumière naturelle du soleil dans un espace tout au long de la journée, nous réduisons la consommation d'énergie du bâtiment et minimisons l'impact du bâtiment sur l'environnement.

Ces recommandations permettront aux architectes de garantir un environnement lumineux tout en limitant l'éblouissement et l'inconfort visuel et en minimisant la consommation d'énergie liée au bâtiment.

### **Les limites de la recherche**

Parmi les contraintes rencontrées lors de notre recherche, on cite :

- La durée de la recherche.
- Le manque de matériels de recherche, car un appareil photo spécial n'était pas accessible ce qui a conduit à l'utilisation d'un smartphone pour les prises de mesures.
- Les contraintes liées à l'étude qualitative et la réaction des visiteurs ; on a déposé 30 questionnaires et on a récupéré que 20 exemplaires.

### **Perspectives de recherche**

Notre recherche qui traite l'influence de l'éclairage naturel sur le confort visuel dans les espaces d'exposition est un champ de recherche très vaste, à la fin de ce travail que nous avons effectué, on a dégagé un ensemble de perspectives qui peuvent être des recherches futures ;

- L'étude de l'éclairage naturel et artificiel pour les besoins muséographiques et la préservation des œuvres exposées.
- L'influence des couleurs et les textures sur le confort visuel et l'état psychologique des usagers d'un espace architectural.
- L'étude de l'éclairage naturel dans les espaces d'exposition pour assurer le confort thermique.
- L'influence du type de vitrage sur le confort visuel et le confort acoustique dans les espaces d'expositions.

## **Bibliographie**

## Bibliographie

**Andrikopoulos. (2016).** "democratising museums : a brief history of museum lighting," disponible sur : <https://heritagescienceresearch.com/2016/06/06/democratising-museums/>.

**Belakehal, A, Tabet Aoul, K. (2003).** L'Eclairage Naturel dans le Bâtiment. Reference aux Milieux Arides a Climat Chaud et Sec. *Courrier du Savoir*.

**Cuttle,2007.** Light for Art's Sake. Lighting for Artworks and Museum Displays, Butterworth-Heinemann.

**CIBSE. (1999).** Daylighting and window design. Lighting Guide LG10 :1999, London : The Chartered Institution of Building Services Engineers.

**Cannon-Brookes. (2000).** "Daylighting museum galleries: a review of performance criteria," Lighting Restoration Technology, vol. 32, pp. 161-168.

**Bertin, S. (2008).** *Recherche qualitative des enjeux de la mise en lumière urbaine : Création d'un modèle opératoire pour la conception des projets d'éclairage* (maitre en sciences appliquées, Université de Montréal).

**Biron, K. (2008).** *Dynamique Forme/Lumière Exploration du processus de création de l'espace architectural par modèles maquettes/images* (mémoire de maitrise, université Laval, Québec).

**De Herde et S. Reiter, (2002).** *Eclairage naturel des bâtiments*, Ed presses universitaires de Louvain, Louvain la neuve, Belgique.

**Derek, P. (2004).** *Daylighting Natural Light in Architecture*.

**Diach, S. (2018).** *Modélisation du système anidolique pour un environnement lumineux intérieur intégré* (thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra).

**Emrah, B. (2001).** *Casting a New Light on Museums and Galleries towards modern industry guidelines for lighting in museums and galleries* (thèse de doctorat, University of Technology Sydney).

ERCO. (2012). l'éclairage des musées concepts applications technique guide.

**Feilo, S. (2016).** Guide l'éclairage pour musées et galleries.

"Fridericianum,"<http://www.kassel.de/kultur/sehenswuerdigkeiten/Innenstadt/11674/index.html>.

**Gallas, M. (2013).** *Proposition d'une méthode d'assistance à la prise en compte de le lumière naturelle durant les phases amont de conception* (thèse de doctorat, université de Lorraine).

**Guimarães M, Y. (2019).** *Natural lighting for sustainable design of art exhibition spaces* (mémoire avancé, université Politècnica de catalunya barcelontech).

**Iordanidou, C. (2017).** *Daylight openings in art museum galleries a link between art and the outdoor environment* (Degree of Master of Science - Architectural Lighting Design, Kth Royal Institute of Technology Sweden).

- Kaya, S.M, Afacan, Y. (2017).** Effects of daylight design features on visitors' satisfaction of museums. *Indoor and Built Environment*. 10.1177/1420326X17704028.
- Liebard et A. De Herde, (2005),** *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*, Ed Le moniteur, Paris.
- Liberman, J. (1991).** Light: medicine of the future, Bear and Company, Vermont, Canada, 1991, p. 5.
- Lewis, JM. (2000).** *Build a Museum and They Will Come : The Creation of the Central High Museum and Visitor Center*.
- Le Corbusier. (1923).** *Vers une architecture*. gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France.
- Magali, B, De Herde, A. (2002).** *Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting*. Energy and buildings.
- Matallah, Z. (2015).** *Étude des effets de l'orientation sur le confort visuel dans les salles de cours avec éclairage naturel latéral. Cas des salles de classe de l'université de Laghouat* (mémoire de magistère, Université Mohamed Kheider – Biskra).
- Moscoso, C. (2016).** *Daylighting and Architectural Quality Aesthetic Perception of Daylit Indoor Environments* (thèse de doctorat, Norwegian University of Science and Technology).
- MUDRI, L. (2002).** *De l'hygiène au bien-être, du développement sans frein au développement durable : ambiances lumineuses*. Paris : Ecole d'architecture de Paris- Belleville.
- Narboni, R. (2006).** *Lumière et ambiances Concevoir des éclairages pour l'architecture et la ville* (Edition, volume). Le Moniteur.
- Roditi, D. (2011).** *Ventilation et Lumière Naturelles*. Groupe Eyrolles.
- Rémy, N, Chatelut, A, Huygen, J, Narboni, R, Teyseyre, M. (2008).** *Lumières en projets initiation d'un réseau de recherche et d'enseignement*.
- Roulet, Claude-Alain. 2004.** Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments, 22. PPUR presses polytechniques.
- Steane, M. (2011).** *The Architecture of Light Recent approaches to designing with natural light*.
- Schiler, M. (1992).** Simplified Design of Building Lighting, John Wiley & Sons, New York, pp.86-93.
- Tawfik, W. (2005).** *Natural lighting as a Factor in Providing a Healthy Environment in Buildings* (thèse de doctorat, Faculty of Engineering, Cairo University Giza, Egypt).
- Togora, A. (2017).** *Optimisation Energétique des Bâtiments : l'éclairage de la maison de soins à Esch-sur-Alzette* (mémoire de maîtrise, université de Liège, Université de Luxembourg). Disponible sur : <http://hdl.handle.net/2268.2/3247>.
- Tourre, V. (2007).** *Simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural* (thèse de doctorat, Université de Nantes).

**Thévenet, JP. (2012).** *Lumière ensemble valorisons la lumière naturelle.*

**Trouve, M. (1991).** *Daylighting for Sustainable Design.*

**Tregenza, P, Loe, D, 1998.** *The Design of Lighting* (1st Edition, Volume). Taylor & Francis.  
<https://doi.org/10.4324/9780203223635>.

**Terrier, C et Vandevyver, B. (1999).** "L'éclairage naturel", fiche pratique de sécurité ED 82, parue dans "Travail et Sécurité".

**Zumtobel,** Manuel pratique de l'éclairage, disponible sur : <http://www.zumtobel.com>.

**Zemmouri, M. (2017).** *Caractérisation et Optimisation de la Lumière Naturelle en Milieu Urbain* (thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas-Sétif).

# **Annexes**

## Annexe A : Etape de travail avec logiciel falsecolor

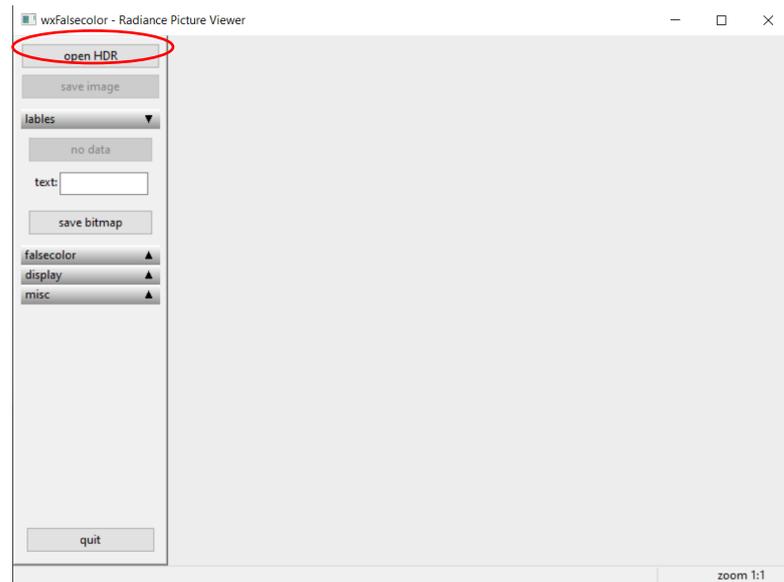


Figure A.1 : insertion de photo format HDR (source : Auteur, 2022)

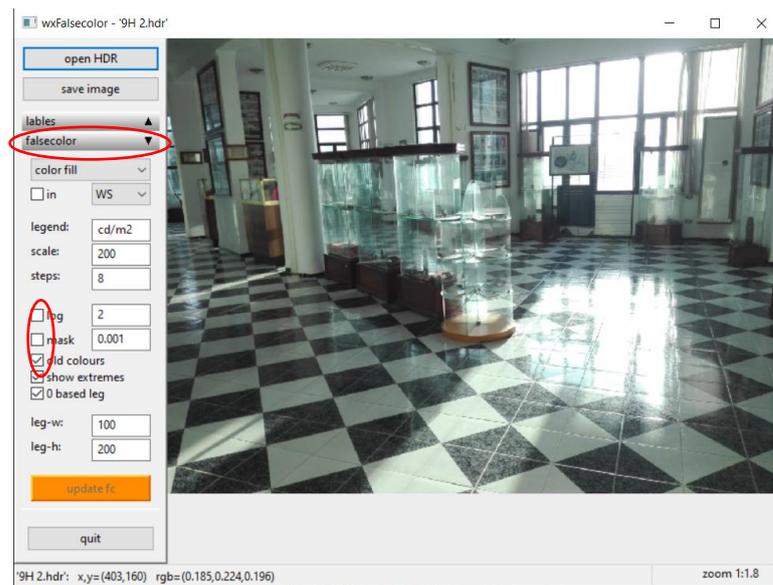


Figure A.2 : traitement d'image (source : Auteur, 2022)

## Annexe B : Les étapes de la simulation numérique

DIAL+  
Projet Edition Système Aide

### Données générales

Données générales

Projet : Proj 1

Type de projet : Nouvelle construction

Adresse : Bejaia

Responsable :

Date : 24.5.2022

Données Climatiques

Pays : Algeria

Ville : Alger

Recapitulatif Suivant

Figure B.1 : les données générales du projet (source : Auteur, 2022)

DIAL+ : espace d'exposition -> espace d'exposition (Halle d'exposition)  
Projet Edition Système Aide

### Dimensions intérieures du local (en plan)

Largeur : 9 m

Profondeur : 11 m

Appliquer

Recapitulatif Précédent Suivant

Figure B.2 : les dimensions intérieures du local (source : Auteur, 2022)

DIAL+ : espace d'exposition -> espace d'exposition (Halle d'exposition)  
Projet Edition Système Aide

### Hauteur du local

Hauteur : 6 m

Appliquer

Recapitulatif Précédent Suivant

Figure B.3 : la hauteur du local (source : Auteur, 2022)

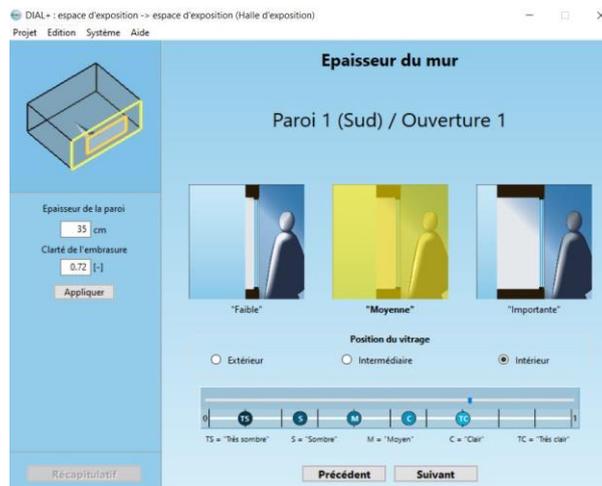


Figure B.4 : le réglage d'épaisseur du mur (source : Auteur, 2022)

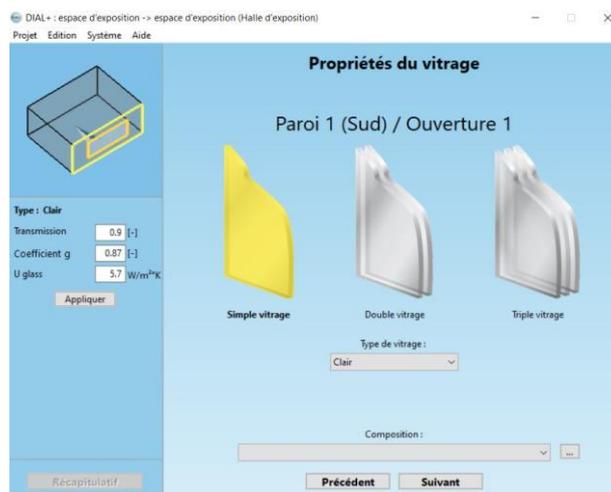


Figure B.5 : propriétés du vitrage (source : Auteur, 2022)

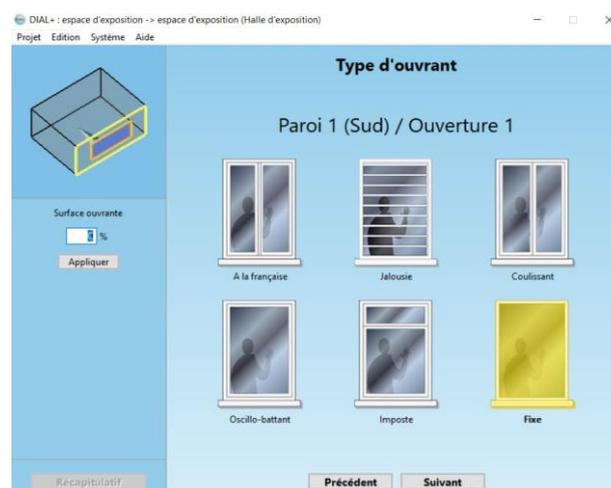


Figure B.6 : Type d'ouvrant (source : Auteur, 2022)

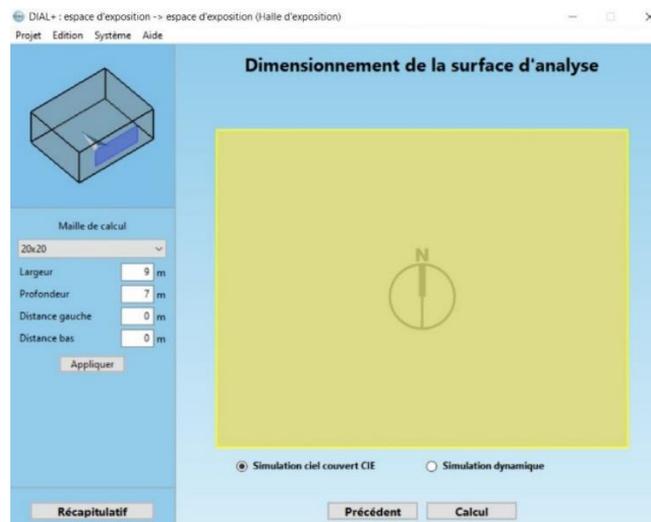


Figure B.7 : dimensionnement de la surface d'analyse (source : Auteur, 2022)

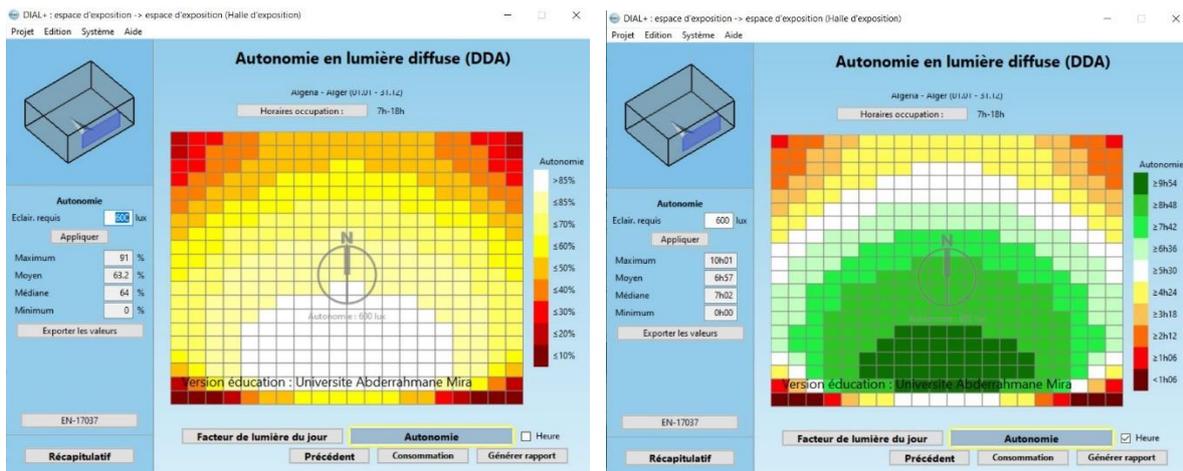


Figure B.8 : les résultats de la simulation et la l'exportation des valeurs (source : Auteur, 2022)

## Annexe C : Questionnaire

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université ABDERRAHMANE Mira de Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département d'architecture

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة عبد الرحمان ميرة  
كلية التكنولوجيا

### Questionnaire

#### استبيان

Dans le cadre de la préparation du mémoire du master en Architecture consacré à « l'étude de l'éclairage naturel dans les espaces d'expositions », Nous avons l'honneur de vous adresser ce questionnaire afin d'évaluer votre satisfaction quant aux conditions de confort visuel des espaces d'exposition du Musée Almoudjahid.

Votre contribution est sans aucun doute une aide importante à notre recherche.  
Nos remerciements d'avance.

Veillez mettre une croix (X) dans la case correspondante.

كجزء من التحضير لمذكرة الماستر في الهندسة المعمارية المخصصة لـ "دراسة الإضاءة الطبيعية في مساحات المعرض"، نتشرف بتقديم هذا الاستبيان إليكم من أجل تقييم مدى رضاكم عن ظروف الراحة البصرية لمساحات العرض في متحف المجاهد

مساهمته هي بلا شك مساعدة مهمة لأبحاثنا.  
شكرنا مقدما.

يرجى وضع علامة (X) في المربع المقابل.

**Renseignements personnels**

معلومات شخصية

Sexe : Femme  Homme   
الجنس امرأة  رجل Age :  < 25ans  Entre 25 et 45 ans  > 45 ans  
السن < 25 سنة  سنة 25 إلى 45 سنة  > 45 سنةPortez-vous des verres correcteurs ?  Oui  Non  
نعم  لا **Informations générales**

معلومات عامة

Date et heure : / / commencé à :  
التاريخ و الساعة / / بدأType du ciel :  Couvert  Partiellement  Clair  
غائم  غائم جزئي  صافي**Confort visuel**

الراحة البصرية

1- Dans l'ensemble, à quel point êtes-vous satisfaits du niveau de confort visuel dans cet espace d'exposition ?

بشكل عام، ما مدى رضاك عن مستوى الراحة البصرية في مساحة المعرض هذه؟

 Très mauvaise  Mauvaise  Acceptable  Bonne  Très bonne  
سيئة جدا  سيء  مقبول  جيد  جيدة جدا

2- Que pensez-vous de l'uniformité de la lumière naturelle dans cet espace ?

ما رأيك في توحيد الضوء الطبيعي في هذه المساحة

 Très mauvaise  Mauvaise  Acceptable  Bonne  Très bonne  
سيئة جدا  سيء  مقبول  جيد  جيدة جدا

3- Comment trouvez-vous la lumière naturelle présente dans l'espace d'exposition ?

كيف تجد الضوء الطبيعي الموجود في مساحة المعرض؟

 Insuffisante  Peu suffisante  Suffisante  Très suffisante  Excessive  
غير كاف  كاف  كافية جدا  مفرط

4- Etes-vous gêné dans votre visite par la présence des rayons solaires directs ?

هل تشعر بانزعاج في زيارتك من خلال وجود أشعة شمسية مباشرة؟

 Beaucoup  Modérément  Pas du tout  
كثير  معتدلة  لا على الإطلاق

5- Quelles sont les sources d'éblouissement qui vous gênent ?

ما هي مصادر الوهج الذي يعيقك؟

 Soleil  Fenêtres  réflexion de la lumière sur les objets  
الشمس  النوافذ  انعكاس للضوء على الأشياء

6- Comment évaluez-vous les taches solaires dans l'espace d'exposition ?

كيف تقيم البقع الشمسية في مساحة المعرض؟

- Très mauvaise     Mauvaise     Acceptable     Gênante     Très gênante  
سيئة جدا    سيء    مقبول    مزعج    مزعج جدا

7- Est-ce que vous remarquez la présence des ombres gênantes dans cet espace?

هل تلاحظ وجود ظلال مزعجة في هذا الفضاء؟

- Oui     Non  
نعم    لا

8- Si oui, quelle est la source de l'ombre?

إذا كان الأمر كذلك، فما هو مصدر الظل؟

- Votre propre ombre     Ombre d'un objet, spécifiez  
الظل الخاص بك    ظل جسم، حدد

.....  
.....

9- Ressentez vous le besoin en protection solaire?

هل تشعر بالحاجة إلى الحماية الشمسية؟

- Oui     Non  
نعم    لا

10- Ressentez vous une fatigue visuelle?

هل تشعر بتعب مرئي؟

- Oui     Non  
نعم    لا

11- Si oui, précisez la cause de la fatigue?

إذا كان الأمر كذلك، حدد سبب التعب؟

- La quantité de lumière     La qualité de lumière     Autre, spécifiez  
كمية الضوء    جودة الضوء    أخرى، حدد

.....

12 - Sentiez vous la présence d'un objet qui gêne la pénétration de la lumière naturelle?

هل تشعر بوجود جسم يعرقل دخول الضوء الطبيعي؟

- Oui     Non  
نعم    لا

13- Si oui, précisez ?

إذا كان الأمر كذلك، فحدد؟

.....  
.....

14- Que pensez vous sur le choix de la couleur de carrelage et la texture?

ما رأيك في اختيار لون البلاط؟

Bon  
جيد

Mauvais  
سيئ

15- Pourquoi?

لماذا

.....  
.....

16- Que pensez vous sur le choix de la couleur des murs?

ما رأيك في اختيار لون الجدران؟

Bon  
جيد

Mauvais  
سيئ

17- Pourquoi?

لماذا

.....  
.....

Merci pour votre collaboration et le temps que vous avez consacré à ce questionnaire.

شكرا لتعاونكم وعلى الوقت الذي كرستموه لهذا الاستبيان