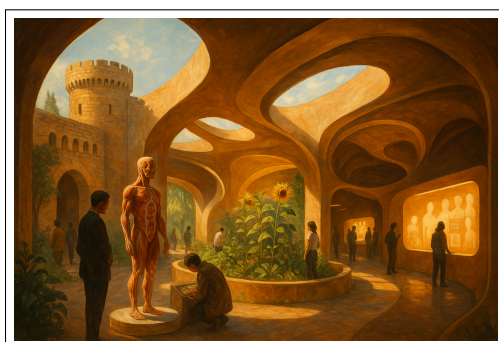


Mémoire de fin de cycle

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master en Architecture

Coloration : Architecture, environnement et technologie



Thème

Conception des Espaces d'Exposition et Confort Visuel : Impact de l'Éclairage et de l'Architecture sur l'Expérience des Visiteurs dans un Musée

Réalisé par :

GUENDOUZEN Celina

Soutenu le :

15-06-2025

Devant les membres du jury :

Dr. BADIS Abderrahmane	Département architecture de Bejaia	Président de jury
Dr. AMIR Amar	Département architecture de Bejaia	Rapporteur
Dr. TALANTIKIT Soundouss Ismahane	Département architecture de Bejaia	Examinatrice

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : GUENDOUZEN
Prénom : Celina
Matricule : 33010095
Spécialité et/ou Option : Architecture
Département: d'Architecture
Faculté: Technologie
Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : master

Intitulé: Conception des Espaces d'Exposition et Confort Visuel : Impact de l'Éclairage
et de l'Architecture sur l'Expérience des Visiteurs dans un Musée

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
09/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bajaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Résumé

Dans le présent mémoire, nous nous intéressons à l'impact de l'enveloppe architecturale et du choix de l'éclairage sur le confort visuel dans les espaces d'exposition muséographiques. Ce n'est pas uniquement une réflexion sur la lumière naturelle, mais bien une recherche expérimentale d'évaluation, qualitative et quantitative, des ambiances lumineuses, par l'analyse d'un cas réel : le musée Bordj Moussa à Béjaïa.

La recherche s'appuie sur double approches, conceptuelle et expérimentale : la première elle examine le lien entre lumière, enveloppe architecturale et perception dans les musées scientifiques, on faisant appel à des références théoriques. La seconde, expérimentale, a recours à des outils méthodologiques multiples (prise de mesures in situ, simulation numérique par le logiciel Dialux Evo et enquête par questionnaire auprès des visiteurs du musée). Ces investigations ont permis de faire émerger plusieurs problématiques autour de l'inconfort visuel, telle que l'éblouissement, mauvaise appréciation des œuvres, souvent du fait d'orientations défavorables, d'une gestion des ouvertures mal adaptée.

Dans une dernière partie, les résultats de cette recherche sont appliquées à notre projet architectural qui est l'Experimentarium, en tant qu'espace d'exposition et de médiation scientifique, Cela a permis de donner des préconisations concrètes d'éclairage et de conception d'enveloppe, en apportant un confort visuel adapté et permettant la mise en valeur du contenu scientifique exposé.

Mots-clés :

Confort visuel, lumière naturelle, les espaces d'exposition, Musée, enveloppe architecturale, perception, Dialux, Experimentarium.

Abstract

In this dissertation, we focus on the impact of the architectural envelope and the choice of lighting on visual comfort in museographic exhibition spaces. This is not merely a reflection on natural light, but rather an experimental investigation — both qualitative and quantitative — of luminous atmospheres, through the analysis of a real case : the Bordj Moussa Museum in Béjaïa.

The research is based on a dual approach, both conceptual and experimental : the first examines the relationship between light, architectural envelope, and perception in scientific museums, drawing on theoretical references. The second, experimental, relies on multiple methodological tools (in-situ measurements, digital simulation using Dialux Evo software, and a questionnaire survey conducted with museum visitors). These investigations revealed several issues related to visual discomfort, such as glare and poor appreciation of exhibits, often due to unfavorable orientations or poorly managed openings.

In the final section, the results of this research are applied to our architectural project, the Experimentarium, as a space for exhibition and scientific mediation. This allowed for the formulation of concrete lighting and envelope design recommendations, aimed at providing adequate visual comfort while enhancing the value of the scientific content on display.

Keywords :

Visual comfort, natural light, exhibition spaces, museum, architectural envelope, perception, Dialux, Experimentarium.

الملخص

في هذا البحث، نولي اهتماماً لتأثير الغلاف المعماري واختيار الإضاءة على الراحة البصرية في فضاءات العرض المتحفي. لا يقتصر الأمر على تأملات نظرية حول الإضاءة الطبيعية، بل يتعلق الأمر ببحث تجريبي يهدف إلى تقييم نوعي وكمي للأجواء الضوئية، من خلال تحليل حالة واقعية: متحف برج موسى بمدينة بجاية.

تعتمد هذه الدراسة على مقاربتين متكاملتين، مفاهيمية وتجريبية: الأولى تتناول العلاقة بين الضوء والغلاف المعماري والإدراك داخل المتاحف العلمية، مستندة إلى مراجع نظرية. أما الثانية، فهي تجريبية، وتستعين بأدوات منهجية متعددة، مثل القياسات الميدانية، والمحاكاة الرقمية عبر برنامج لاس ز، والاستبيان الموجه لزوار المتحف. وقد مكنت هذه التحقيقات من إبراز عدة إشكاليات تتعلق بعدم الراحة البصرية، مثل الانبهار، وسوء إدراك المعروضات، وغالباً ما يكون ذلك نتيجة اتجاهات غير مناسبة أو سوء إدارة الفتحات. وفي الجزء الأخير من البحث، تم تطبيق نتائج هذه الدراسة على مشروعنا المعماري، وهو الإكسبريمنتاريوم، باعتباره فضاءً للعرض والتواصل العلمي. وقد سمح ذلك باقتراح توصيات عملية تتعلق بالإضاءة وتصميم الغلاف المعماري، بما يحقق راحة بصرية مناسبة ويبرز المحتوى العلمي المعروض.

الكلمات المفتاحية:

الراحة البصرية، الضوء الطبيعي، فضاءات العرض، المتحف، الغلاف المعماري، الإدراك، دايلوكس، الإكسبريمنتاريوم.

Remerciements

Je tiens à la fin de ce travail à remercier ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la santé et de m'avoir permis de mener à terme ce projet.

En premier lieu, je tiens à remercier Mon encadrant, M. AMIR Amar, pour sa disponibilité, sa patience et ses précieux suivi tout au long de la réalisation de ce travail.

je tiens, également, à remercier les membres du jury d'avoir consacré une partie de leur temps à examiner ce mémoire, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail et pour leurs contributions à l'enrichir.

Enfin, je tiens à exprimer mes sentiments de reconnaissances à toutes les personnes qui ont participé à ce projet, qui nous ont appris une infinité de choses et qui nous ont aidé, conseillé et soutenu à tout moment afin de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

Dédicaces

À Mes Chers Parents

À Mes soeurs et Ma famille

À Mon cher Mari

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien-être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous nous avez portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse ALLAH, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais on ne vous déçoivent.

GUENDOUZEN Celina

Table des matières

Résumé	
Abstract	
	4
Table des matières	7
Table des figures	10
Liste des tableaux	1
Introduction générale	1
Problématique	1
Hypothèse	2
Objectifs de recherche	2
Méthodologie	2
Structure du mémoire	4
1 Généralité sur l'Experimentarium	7
1.1 Les Musées scientifiques	8
1.1.1 La Définition	8
1.1.2 L'évolution des musées scientifiques	8
1.1.3 Les types de musées scientifiques	9
1.1.4 Les missions, objectifs et fonctions des musées scientifiques	11
1.1.5 Les caractéristiques des musées scientifiques	12
1.2 L'Experimentarium	12
1.2.1 La Définition de L'Experimentarium	13
1.2.2 Les missions et objectifs de L'Experimentarium	13
1.3 Analyse d'exemple «Experimentarium de Danemark»	14
1.3.1 La Dimension fonctionnel	14
1.3.2 La Dimension conceptuelle	17
2 Les Ambiances Lumineuses Dans Les Espaces D'exposition	19
2.1 Les Sources lumineuses	19
2.1.1 La lumière	20
2.1.2 L'éclairage	20
2.2 Les Caractéristiques d'une source lumineuse	21
2.2.1 La Composition spectrale	21
2.2.2 L'Efficacité lumineuse	21

2.2.3	Le Rendu des couleurs	22
2.2.4	La Durée de vie	22
2.3	La lumière naturelle dans les espaces d'exposition	23
2.3.1	Les Types d'ouvertures	23
2.4	Les dispositifs du contrôle	26
2.5	L'enveloppe architecturale	28
2.5.1	La Définition	28
2.5.2	Les Types d'enveloppe architecturale	28
2.5.3	La Classification d'enveloppe architecturale	29
2.6	Le confort visuel	30
2.6.1	La Définition	30
2.6.2	Les Paramètres du confort visuel	31
2.6.3	Les critères du confort visuel	31
3	Analyse contextuelle et méthodologique du confort visuel au musée Bordj Moussa	33
3.1	Présentation de l'aire d'étude « Bejaia »	33
3.1.1	La situation de la ville de Bejaia	33
3.1.2	Les données climatiques de la ville de Bejaia	34
3.1.3	L'Héritage patrimonial de la ville de Bejaia	36
3.2	Présentation du cas d'étude "Bordj Moussa"	38
3.2.1	La situation du Musée Bordj Moussa	38
3.2.2	Un aperçu historique du musée Bordj Moussa	39
3.2.3	Présentation du site d'intervention	40
3.2.4	Analyse architecturale du musée Bordj Moussa	41
3.3	Approche méthodologique de l'évaluation du confort visuel dans un espace muséographique	47
3.3.1	La méthodologie expérimentale	47
3.3.2	Prise de mesure in situ	47
3.3.3	La simulation	50
3.3.4	L'enquête par questionnaire	56
3.4	Résultats de prises de mesures in situ	58
3.4.1	Synthèse	60
3.5	Résultats de la simulations	60
3.5.1	Interprétation générale des résultats simulés	64
3.6	Présentation et interprétation des résultats du questionnaire	65
3.6.1	Tableau comparatif des résultats obtenus	73
3.7	Recommandations générales	74
3.7.1	Recommandations en matière d'éclairage naturel	74
3.7.2	Recommandations architecturales pour le confort visuel	75
4	Application de la recherche sur le projet fin d'étude	77
4.1	Présentation du projet de fin d'étude (L'Experimentarium)	77
4.1.1	La relation du thème avec le projet	78
4.1.2	Les raisons du choix du projet	79
4.2	Analyse du site	79
4.2.1	Motivation du choix du site	79
4.2.2	Présentation du site d'intervention	79
4.2.3	Le cadre bâti	80
4.2.4	Les voiries et accessibilité	80
4.2.5	Microclimat	82
4.2.6	La synthèse de l'analyse	84
4.2.7	Le schéma de structure	84
4.3	Le programme	86
4.4	Idéation et morphogénèses	87
4.4.1	La démarche conceptuelle de L'Experimentarium	87
4.4.2	La genèse de la forme	87
4.5	Analyse des résultats de la simulation d'éclairage naturel de L'Experimentarium	90
4.5.1	Analyse des résultats de la simulation de 9h	90
4.5.2	Analyse des résultats de la simulation de 13h	91
4.5.3	Analyse des résultats de la simulation de 16h	92
4.5.4	Synthèse générale des résultats de la simulation de lumière naturelle	93

Conclusion générale	95
Bibliographie	96
Annexes	99

Table des figures

0.1	Schéma illustratif de la méthodologie analytique	4
1.1	Musée d'Histoire Naturelle de Londres	8
1.2	Évolution des musées scientifiques	9
1.3	Teylers Museum (Haarlem, 1779)	10
1.4	Deutsches Museum (Munich, 1903)	10
1.5	Musée d'Histoire des Sciences d'Oxford et Musée Whipple (Cambridge)	11
1.6	Le Vaisseau – Centre de Culture Scientifique Interactif	11
1.7	Expositions interactives – Musée des sciences de Londres	12
1.8	Experimentarium de Danemark	14
1.9	Plan RDC	15
1.10	Plan 1er étage	15
1.11	Plan 2ème étage	15
1.12	La Façade	17
2.1	La lumière	20
2.2	Éclairage artificiel	20
2.3	Le spectre électromagnétique	21
2.4	L'Efficacité lumineuse	21
2.5	Indice de rendu des couleurs IRC	22
2.6	Durée de vie LED à 70% du flux lumineux initial à 3 températures — 40 000 heures à 55°C	22
2.7	Les ouvertures zénithales	24
2.8	Exemple d'Enveloppe porteuse	28
2.9	Exemple d'Enveloppe non porteuse	29
2.10	Paramètres du confort visuel	31
3.1	Graphique des variations mensuelles de la température de la ville de Béjaïa	35
3.2	Graphique des variations saisonnières de l'ensoleillement à Béjaïa (1991–2020)	35
3.3	Graphique de la répartition mensuelle des précipitations et des jours de pluie à Béjaïa (1991–2020)	36
3.4	Plan des fortifications de Béjaïa, 1847.	38
3.5	La situation du musée Bordj Moussa.	39
3.6	Frise chronologique des grandes périodes historiques de Bordj Moussa.	40
3.7	Environnement immédiat et accessibilité de Bordj Moussa.	41
3.8	Musée Bordj Moussa	41
3.9	Plan rez-de-chaussée.	42
3.10	Espace d'exposition.	42
3.11	Plan de l'étage	43
3.12	Plan du sous-sol	44
3.13	Le tunnel	44
3.14	L'escalier balancé	44
3.15	Façade sud	45
3.16	Façade sud	45
3.17	Façade ouest	46

3.18	Façade nord	46
3.19	Façade Est	46
3.20	Application Luxmètre	48
3.21	La grille de mesure	49
3.22	Interface DIALux evo	51
3.23	Importer le plan DWG	52
3.24	Dessiner l'origine de l'axe du projet	52
3.25	Détermination de l'échelle	52
3.26	Orientation du projet	53
3.27	Modélisation du projet	54
3.28	Modélisation du projet	54
3.29	Vérification préliminaire	55
3.30	Le choix du type de ciel	55
3.31	Lancement des calculs	56
3.32	Résultats de la simulation	56
3.33	Résultats de la prise des mesures à 13h	59
3.34	Résultats de la simulation à 9h	60
3.35	La distribution de la lumière à 9h	61
3.36	Résultats de la simulation à 13h	62
3.37	La distribution de la lumière à 13h	63
3.38	Résultats de la simulation à 16h	63
3.39	La distribution de la lumière à 16h	64
3.40	Graphe de la fréquence des usagers	66
3.41	Graphe de l'état visuel des usagers	67
3.42	Graphe de la perception des usagers	68
3.43	Graphe de l'uniformité de la lumière dans l'espace d'exposition	68
3.44	Graphe de la lisibilité des panneaux	69
3.45	Graphe de l'impact des textures sur la perception	70
3.46	Graphe de l'impact du volume sur la perception	70
3.47	Graphe de l'acoustique sur le confort visuel	71
3.48	Graphe du confort visuel global	72
3.49	Schéma récapitulatif des recommandations	75
4.1	La relation du thème avec le projet	78
4.2	Le cadre bâti	80
4.3	Voiries et accessibilité	81
4.4	Coupe sur le Boulevard de liberté	81
4.5	Coupe sur la rue Harfi Taous	81
4.6	Ensoleillement en hiver	82
4.7	Ensoleillement en été	82
4.8	Ensoleillement au printemps	83
4.9	Les vents du sud et sud-ouest	83
4.10	Les vents du nord	84
4.11	Schéma de la synthèse de l'analyse du site	84
4.12	Schéma de structure	85
4.13	La coquille de nautile	88
4.14	La volumétrie	88
4.15	La modélisation de mon projet	90
4.16	Résultats de la simulation à 9h	91
4.17	Résultats de la simulation à 13h	92
4.18	Résultats de la simulation à 16h	93

Liste des tableaux

1.1	Liste des expositions et leurs objectifs	16
2.1	Types d'ouvertures zénithales	25
2.2	Comparaison entre la lumière naturelle et artificielle	26
2.3	Typologie des protections solaires architecturales	27
2.4	Comparaison entre enveloppes simple et double peau	30
3.1	Forts historiques de Béjaïa : situation, valeur patrimoniale et état de conservation	37
3.2	Types d'ouvertures du Bordj Moussa	47
3.3	Tableau comparatif entre les résultats obtenus par les trois méthodes d'analyse	74
4.1	Programme surfacique du projet	86

Introduction générale

Depuis la plus ancienne cavité habitée jusqu'à aux constructions les plus contemporaines, la lumière naturelle n'a cessé de jouer un rôle essentiel dans la relation entre l'homme et l'espace. Elle révèle les formes, module les volumes, sculpte les ambiances, organise les déplacements, agit sur notre esprit. Elle n'est pas qu'un accompagnement visuel, elle donne vie à l'architecture, fait vibrer les matériaux, fait surgir les intentions.

La fenêtre, interface entre intérieur et extérieur, n'est pas qu'une ouverture sur le monde, elle est une véritable interface sensorielle et symbolique. Elle rend compte du temps, laisse entrer la lumière, encadre des points de vue, fait circuler l'air et propager les sons. Elle relie le bâti au milieu extérieur, le rythme de l'habitat au rythme du soleil. Par elle, l'architecture respire.

De l'Antiquité à l'avant-garde moderne, les architectes n'ont cessé d'appivoiser la lumière du jour : en l'orientant, en la tamisant, en la diffractant, en jouant de ses reflets, de ses ombres. Louis Kahn cite que « *Même l'obscurité n'existe que par la lumière* » (Eugene, 1998). Cette citation poétique évoque une vérité fondamentale : c'est la lumière qui rend les choses visibles, l'espace lisible, l'architecture perceptible.

Dans les espaces d'exposition, la lumière devient un langage : elle révèle ce que l'on expose et accompagne ce que l'on découvre et guide le regard là où l'on contemple. Elle participe à la mise en scène, au récit, à l'émotion. Elle conditionne le confort visuel, le rythme de la visite, la perception des œuvres, la façon même dont le visiteur s'approprie l'espace.

En conséquence, la lumière ne se résume jamais à une exigence technique ou esthétique. Elle suscite une expérience de la sensibilité, une interaction renouvelée entre l'individu, le lieu, et le temps. Elle est matière, mouvement, perception. Elle modifie notre rapport au monde construit, en le rendant à la fois visible et habité.

1. Problématique

Les Experimentariums sont des espaces consacrés à la vulgarisation du savoir et à l'échange pédagogique. Ils découlent du mouvement des centres scientifiques qui ont vu le jour au milieu du 20^{ème} siècle. Ces lieux, fréquemment influencés par des institutions pionnières comme l'Exploratorium de San Francisco ou la Cité des Sciences et de l'Industrie à Paris, ont pour objectif d'offrir une compréhension universelle de la science grâce à des méthodes divertissantes et captivantes.

Dans l'architecture contemporaine, la lumière est un composant vital qui va au-delà de sa simple utilité. Selon Le Corbusier dans son ouvrage *Vers une architecture* (1923), il déclare « *L'architecture est la combinaison intelligente, correcte et splendide de volumes assemblés sous la lumière* ». Cette citation met en exergue le rôle crucial de la lumière dans la définition et la manière dont ils sont exprimés les espaces architecturaux. Dans les lieux dédiés à la culture et

à l'exposition, comme l' Experimentarium, la lumière se transforme non seulement en un outil esthétique, mais aussi en un moyen d'interaction et de compréhension.

L'enveloppe architecturale de l'Experimentarium, en tant que premier filtre entre le milieu interne et le milieu externe, est essentielle pour la gestion de la lumière. Elle détermine la quantité, l'intensité et l'orientation des apports de lumière naturelle, tout en générant des espaces appropriés pour des exposés interactifs ou sensibles aux changements de lumière. Une gestion inadéquate de l'éclairage, qu'elle soit due à l'architecture ou à des décisions techniques inappropriées, peut engendrer des conséquences néfastes comme la surexposition, les contrastes visuels perturbateurs ou les zones sombres non exploitables. Non seulement ces imperfections entravent la compréhension des contenus exposés mais aussi au confort et à la satisfaction des visiteurs.

Notre travail est conçu dans le but d'apporter des éléments de réponse à la problématique suivante :

- **Dans quelle mesure l'usage de l'éclairage naturel, combiné à une enveloppe architecturale optimisée (orientation, ouvertures, dispositifs de contrôle), influence-t-il le confort visuel des visiteurs d'un Experimentarium et leur perception des œuvres et expériences proposées ?**

2. Hypothèse

Pour répondre à la question avancée dans cette problématique, nous formulons l'hypothèse suivante :

-Un équilibre entre un éclairage naturel, associé à une enveloppe architecturale optimisée (orientation, ouvertures, dispositifs de contrôle), améliore le confort visuel des visiteurs d'un Experimentarium.

3. Objectifs de recherche

Ce travail de recherche vise une diversité d'objectifs à savoir :

- Chercher à créer une interaction harmonieuse entre l'enveloppe architecturale et les espaces intérieurs, afin de créer des environnements lumineux favorables à la découverte et au développement.
- Examiner l'impact des choix d'architecturaux, comme l'orientation et les ouvertures, sur la qualité de l'éclairage naturel dans les espaces d'exposition scientifique.
- Garantir des environnements lumineux appropriés pour les diverses zones de l'Experimentarium, que ce soit pour les espaces d'expérimentation, les ateliers pédagogiques ou les expositions interactives.

4. Méthodologie

•La partie théorique

- Approche théorique :

Cette partie porte sur la recherche théorique visant à définir les concepts dégagés pour déterminer le cadre logique de notre recherche, notamment : la lumière naturel et artificiel et leurs paramètres et typologies, l'enveloppe architecturale et la conception des espaces d'exposition. Elle est menée en se basant sur une recherche bibliographique. Plusieurs sources ont servi pendant cette phase à savoir ; les ouvrages et les recherches traitant de fond notre thème et qui ont servi du support à la compréhension du sujet dans sa globalité (ouvrages, articles, thèses magistère et doctorat, sites internet, textes législatifs, revues. . .etc.).

•La partie analytique

Cette partie englobe deux types d'approches :

- Une approche quantitative :

Cette partie inclut la prise de mesures in situ à l'aide d'un instrument de mesure (luxmètre), ainsi qu'une simulation numérique avec le logiciel Dialux. La simulation a pour but de déterminer les solutions permettant d'obtenir un bon confort visuel au sein des espaces d'exposition. Elle intègre aussi un "questionnaire quantitatif", réalisé avec Google Forms, visant à recueillir l'avis des visiteurs à travers des questions fermées pour évaluer leur perception du confort visuel. Le questionnaire a été diffusé en ligne et sur site, auprès des visiteurs du musée.

- Une approche qualitative :

Elle est représentée par une analyse complémentaire basée sur des remarques libres récoltées à travers une ou deux questions ouvertes, permettant d'enrichir les résultats par des éléments plus subjectifs.

Afin de mieux illustrer la démarche empruntée dans cette partie, le schéma suivant présente de manière synthétique les deux types d'approches méthodologiques mises en œuvre. Il met en évidence la complémentarité entre les volets quantitatif et qualitatif dans l'analyse du confort visuel des espaces d'exposition.

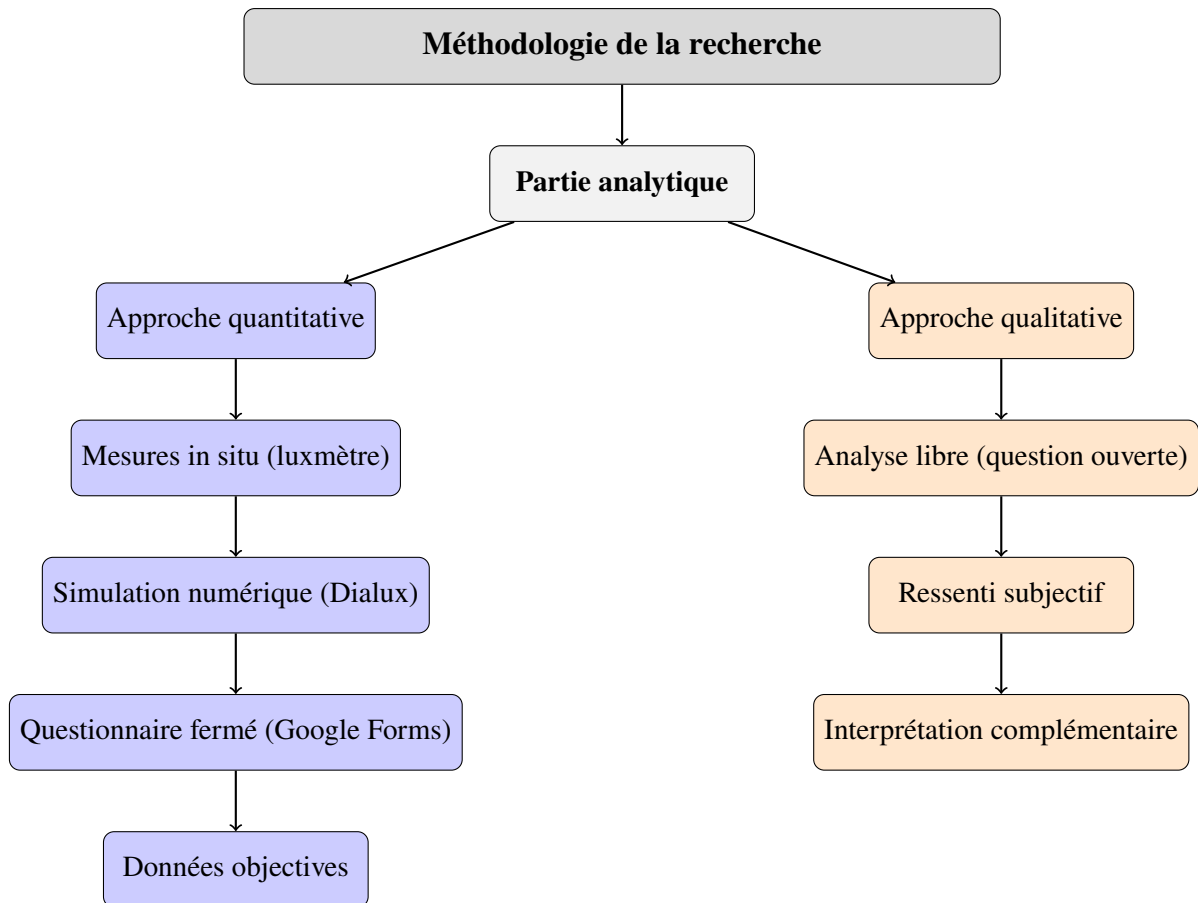


FIGURE 0.1 – Schéma illustratif de la méthodologie analytique

5. Structure du mémoire

Le présent mémoire se divisera en deux grandes parties : **une partie théorique**, consacrée aux fondements conceptuels et scientifiques nécessaires à la compréhension du sujet, et **une partie pratique**, qui présentera une étude de cas ainsi que l’application des résultats à notre projet architectural.

Première partie : Approche théorique

Cette partie établira les bases conceptuelles essentielles à la compréhension du sujet de recherche. Elle comportera deux chapitres :

Chapitre 1 : Les musées scientifiques et l’Experimentarium

Dans ce chapitre, nous retracerons l’histoire et l’évolution des musées scientifiques, en mettant l’accent sur leurs fonctions éducatives, culturelles et sociales. Nous aborderons également les différentes typologies muséales, les modes d’exposition, ainsi que les spécificités de l’Experimentarium.

Chapitre 2 : Lumière, enveloppe architecturale et confort visuel dans les espaces d'exposition

Ce chapitre traitera du rôle fondamental de la lumière dans les espaces d'exposition. Une distinction sera faite entre lumière naturelle et lumière artificielle. Nous y analyserons l'impact de l'enveloppe architecturale sur la qualité de la lumière et définirons les critères du confort visuel.

Deuxième partie : Approche pratique

Dans cette partie, nous mettrons en œuvre les concepts développés précédemment dans une démarche d'analyse, d'expérimentation et de conception architecturale. Elle sera structurée en deux chapitres :

chapitre 1 : Étude de cas et recommandations – Le musée Bordj Moussa à Béjaïa

Dans le premier chapitre, on présentera un cas d'étude, qui est le musée Bordj Moussa, situé à Béjaïa. On fera d'abord état de son histoire, de son environnement urbain ainsi que des caractéristiques climatiques de la région. Ensuite, on analysera en détail l'architecture du musée, en portant une attention particulière sur son enveloppe et à son espace d'exposition. On s'intéressera plus précisément à la manière dont la lumière naturelle pénétrera et se répartira dans l'espace d'exposition. Afin d'évaluer le confort visuel apporté par cet éclairage naturel, on mettra en œuvre une méthodologie triangulée : on effectuera des mesures in situ pour relever les niveaux d'éclairement, on réalisera des simulations numériques à l'aide du logiciel Dialux pour modéliser l'apport de lumière naturelle à l'intérieur des différents espaces, et on mènera une enquête par questionnaire auprès des visiteurs pour recueillir leur ressenti. À l'issue de cette analyse, on proposera des recommandations portant notamment sur l'orientation et la conception des ouvertures, sur le rôle de l'enveloppe architecturale dans le contrôle de la lumière naturelle, ainsi que sur les moyens d'optimiser la lumière naturelle afin d'améliorer le confort visuel dans les espaces d'exposition.

Chapitre 2 : Application au projet de fin d'études – Conception d'un Experimentarium à Béjaïa

Dans ce chapitre on va appliquer les résultats de la recherche dans le cadre du projet de fin d'étude : la conception d'un Experimentarium à Béjaïa. On présentera d'abord le projet, son lien avec la thématique de la lumière naturelle et du confort visuel, ainsi que les raisons qui ont motivé ce choix. Ensuite, on analysera le site retenu : ses caractéristiques urbaines, son accessibilité, son cadre bâti, ainsi que son microclimat. Cette analyse qui posera les bases d'une implantation cohérente. On définira ensuite le programme architectural en lien avec les objectifs pédagogiques et scientifiques du projet. On développera ensuite la démarche conceptuelle : en

quoi la lumière guidera la façon de concevoir de la forme architecturale. On conclura par la modélisation de l'espace d'exposition avec le logiciel Dialux, dans le but d'évaluer l'apport en lumière naturelle et le confort visuel.

Généralité sur l'Experimentarium

Introduction

Les institutions muséales consacrées aux sciences constituent aujourd'hui des lieux incontournables pour la vulgarisation des connaissances. Elles jouent également un rôle essentiel dans la démocratisation de la science. Ce n'est que le fruit d'un long développement historique. Leurs origines remontent au XVI^e siècle, avec les cabinets de curiosités. Au fil des progrès industriels et technologiques, leur mission a évolué. Initialement destinés aux savants et aux intellectuels, ces institutions ont progressivement élargi leur public. Elles ne se contentent plus d'un rôle d'enseignement public. Elles offrent également des espaces de découverte et, surtout, d'expérimentation.

Les musées scientifiques contemporains ne se limitent pas à exposer des objets ou à présenter des collections mais revêtent une dimension plus interactive et dynamique en concrétisant un projet d'accès et de compréhension de la science. En intégrant des dispositifs numériques, des expériences immersives, des activités participatives, ils favorisent la prise de possession des savoirs scientifiques par des publics divers. Ces institutions participent ainsi à la mission de l'éducation scientifique et technique qu'ils complètent par l'enseignement formel pour susciter la curiosité des publics, quels que soient leur âge et leurs niveaux de formation.

Dans ce premier chapitre, nous allons étudier l'évolution et la diversité des musées scientifiques en passant par leur définition, leurs enjeux, leurs missions et leurs singularités, de façon à aborder ensuite L'Experimentarium. Ce dernier est un centre scientifique interactif qui est emblématique de l'application des tendances contemporaines de la muséologie scientifique. À travers l'analyse de ses ambitions, de son architecture ou encore de son fonctionnement, nous comprendrons comment il s'inscrit dans la continuité et l'innovation du rôle des musées scientifiques dans notre société moderne.

1.1 Les Musées scientifiques

1.1.1 La Définition

Les musées scientifiques sont des institutions éducatives nées à l'issue de la révolution industrielle et modernisées au fil du temps. Ils étaient qualifiés de musées d'histoire naturelle ou d'industrie dans un passé proche. Dans le contexte actuel, ces musées assurent un rôle pilotable de communication des sciences et des techniques vers un public varié, d'âge et d'intérêt différents face aux différents domaines des sciences techniques ou de la technologie. Ils s'opposent à un environnement d'expositions traditionnelles en jouant sur l'interaction et des activités appliquées et expérimentales, ne viseraient pas plus à exposer des concepts et règles de science auxquelles personne n'a accès, mais à devenir des lieux où des expériences enseignent la science. En complément d'un enseignement scolaire plus académique, ces lieux seraient définitivement des lieux d'éducation populaire, confortant un apaisement des craintes face aux sciences à l'horizon d'une science à la fois accessible et attractive. (Kirci, Kaya Dilmen, 2022)



FIGURE 1.1 – Musée d'Histoire Naturelle de Londres

Source : Thibaut, 2023.

1.1.2 L'évolution des musées scientifiques

Bernard Schiele (2015) a tenté de retracer l'histoire et l'évolution des musées scientifiques et des centres de science, depuis leurs origines au XIX^e siècle jusqu'à leurs formes contemporaines, interactives et engagées. En effet, les transformations muséales majeures sont influencées par le progrès technologique, les attentes du public et la place de la science dans la société (Bernard, 2015).

Les musées scientifiques trouvent leurs origines dans trois grandes traditions. D'abord, l'essor des sciences naturelles au XIX^e siècle a conduit à la création de musées destinés à exposer au public les découvertes scientifiques. Ensuite, les cabinets de physique et de chimie permettaient d'exposer une variété d'instruments scientifiques tout en offrant l'occasion de réaliser des expériences en public. Enfin, les expositions universelles du XIX^e siècle, en pleine Révolution industrielle, ont joué un rôle clé en valorisant les progrès techniques, et de nombreux objets exposés ont ensuite été conservés dans des musées.

Au fil du temps, ces institutions ont cherché à allier éducation et divertissement. Un tournant majeur a lieu en 1937 avec l'ouverture du Palais de la Découverte à Paris, qui commence à présenter des expositions interactives afin d'initier le public à la pensée scientifique. Dans les années 1970, les centres de science, comme l'Exploratorium de San Francisco, placent l'interactivité et la médiation scientifique au cœur de leur mission. À partir des années 1980, les enjeux sociétaux liés à l'impact des sciences et des technologies sont davantage pris en compte, tandis que des institutions comme la Cité des sciences et de l'industrie de Paris ou le Centre des sciences de Montréal voient le jour.

Aujourd'hui, les musées scientifiques s'adaptent de plus en plus aux préoccupations environnementales et technologiques, car le public est devenu plus conscient des enjeux liés à l'évolution scientifique (Friedman, 2010).

Le schéma suivant résume l'évolution des musées scientifiques, depuis leurs origines jusqu'à leur rôle actuel, en mettant en avant les grandes étapes de leur transformation

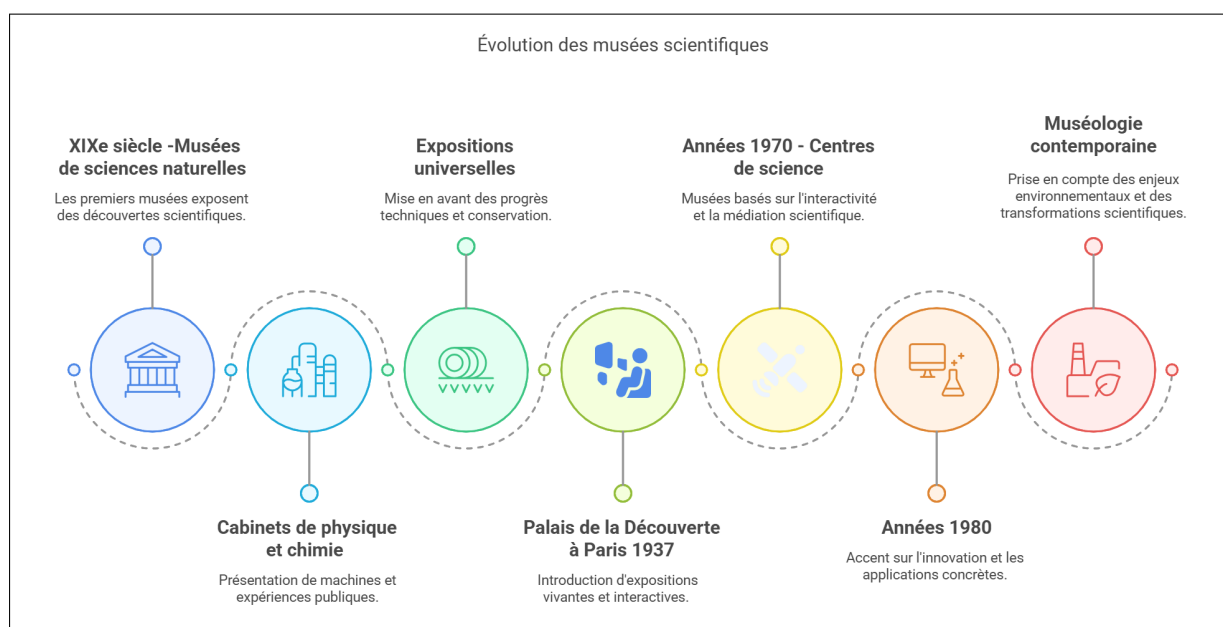


FIGURE 1.2 – Évolution des musées scientifiques

Source : Auteur, 2025

1.1.3 Les types de musées scientifiques

on distingue Quatre grandes catégories de musées scientifiques en fonction de leur origine historique. (Bergers, van Trijp, 2017)

A. Les collections figées : de l'époque des cabinets de curiosités aux musées modernes.

La genèse de ces musées réside dans des collections historiques d'instruments scientifiques, généralement constituées entre le XVIe et le XVIIIe siècles. Pendant cette époque, ces espaces

ne sont pas ouvertes au grand public, mais aux élites scientifiques, nobles et étudiants. Parmi ses caractéristiques principales :

- Collections restées largement intactes depuis leur création.
- Mise en valeur de l’histoire des sciences et des techniques anciennes.
- Accès initialement restreint aux cercles intellectuels et scientifiques.



FIGURE 1.3 – Teylers Museum (Haarlem, 1779)

Source : Teylers Museum, 2025

B. Les musées créés pour la diffusion de la science (XIXe - début XXe siècle)

Ces musées ont été explicitement créés pour vulgariser la science et la rendre accessible à tous. Ils sont issus de l’essor industriel, de l’essor technologique, et d’une volonté nationale de démontrer la puissance scientifique d’un pays. Parmi ses caractéristiques principales :

- Musées conçus pour éduquer et impressionner le public.
- Souvent liés à des grandes expositions internationales et aux progrès industriels.
- Expositions interactives et démonstrations expérimentales pour attirer un large public.

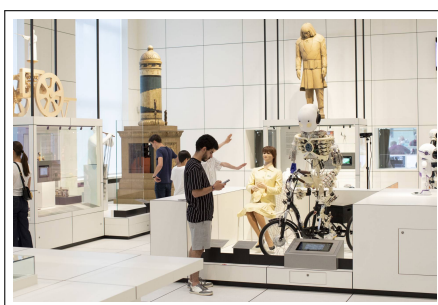


FIGURE 1.4 – Deutsches Museum (Munich, 1903)

Source : Deutsches Museum, 2025

C. Les musées dédiés à la préservation du patrimoine scientifique (XXe siècle)

Face au risque encouru de voir disparaître ou de dénaturer les instruments et documents scientifiques anciens, plusieurs musées ont été fondés pour assurer la sauvegarde et la restauration

de ces objets précieux. Ces musées se distinguent de ceux qui les avaient précédés d'abord par leurs priorités, la conservation devant la vulgarisation. Parmi ses caractéristiques principales :

- Collections souvent issues d'universités ou d'institutions scientifiques.
- Objectif premier : préserver et documenter l'histoire des instruments scientifiques.
- Forte relation avec la recherche académique.



FIGURE 1.5 – Musée d'Histoire des Sciences d'Oxford et Musée Whipple (Cambridge)

Source : Musée Whipple d'Histoire des Sciences de Cambridge, 1944.

D. Les centres de culture scientifique et technique (CCST)

Les centres de culture scientifique et technique sont des lieux plus interactifs que les musées traditionnels. Ils Privilégient l'interactivité par la manipulation et l'expérimentation directe. L'intention est moins de transmettre un savoir déterminé que de susciter curiosité et esprit critique.(Schmitt, 2012)

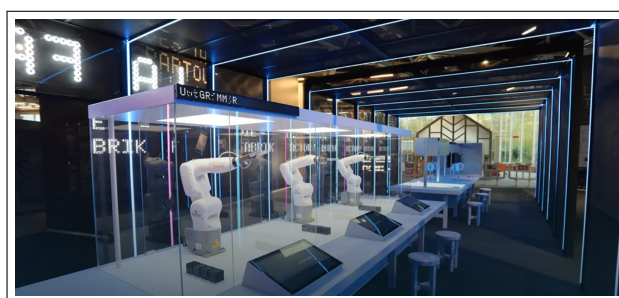


FIGURE 1.6 – Le Vaisseau – Centre de Culture Scientifique Interactif

Source : Le Vaisseau, 2005

1.1.4 Les missions, objectifs et fonctions des musées scientifiques

Bernard Schiele souligne que « *les musées de sciences sont, par excellence, le lieu d'une perpétuelle inventivité* »(Audrey, 2018). Ces musées ont pour mission et objectif de :

- Apporter leur contribution à l’enseignement des sciences, tant par les sujets traités que par la formation de leur personnel.
- Préserver le patrimoine scientifique pour les générations futures.
- Diffusez et vulgarisez la science à travers des expositions interactives et éducatives.
- Divertir et susciter la curiosité et l’enthousiasme des visiteurs pour la science.(Kaya Dilmen, Kırıcı, 2022)
- Rendre la science accessible et inspirante pour le grand public et favoriser la culture scientifique.
- Devenir des lieux incontournables de réflexion et d’apprentissage, capables de rapprocher la science de la société.

1.1.5 Les caractéristiques des musées scientifiques

Les musées scientifiques jouent un rôle majeur dans la transmission des connaissances en mettant en place des expositions interactive et participative qui intéressent les visiteurs tout en les incitant à s’engager avec la science. Pour rendre cette dernière plus facilement accessible et comprise, ils font participer les scientifiques qui font connaître leur recherche et échangent avec les publics, C’est ainsi qu’on humanise le monde de la science. Parallèlement, ils donnent la possibilité aux visiteurs de s’exprimer, de poser des questions, de réfléchir autour des enjeux contemporains grâce à la création de nouveaux lieux d’expression et de débat, tout en favorisant une forme d’apprentissage de type bidirectionnel. Enfin, ces musées s’attachent à élargir sensiblement leur public, en faisant évoluer leur communication en simplifiant le domaine scientifique et en diversifiant leurs pratiques d’interprétation pour accueillir à la fois ceux qui sont toujours passionnés et ceux qui sont moins familiarisés avec la connaissance scientifique.(Martinez, 2016)



FIGURE 1.7 – Expositions interactives – Musée des sciences de Londres

Source : Musée des Sciences, 2025

1.2 L’Experimentarium

Vers la fin du XXe siècle, des Experimentariums ont commencé à être ouverts avec l’utilisation de méthodes expérimentales dans les musées scientifiques. Contrairement à la structure des

musées qui surveillent à distance les objets d'exposition, les experimentariums ont assumé le rôle d'enseignement des visiteurs en menant des expériences et des activités pratiques. De plus, ils incluent davantage de fonctions publiques, contrairement aux programmes architecturaux des musées. Il dispose d'une configuration qui comprend divers programmes tels que des ateliers et des conférences ainsi que des espaces d'exposition.(Kaya Dilmen, Kırıcı, 2022)

Dans cette partie, nous présentons L'Experimentarium, son concept, son architecture et ses ambitions, en mettant en lumière la manière dont il applique les tendances actuelles des musées scientifiques pour offrir une expérience unique aux visiteurs.

1.2.1 La Définition de L'Experimentarium

L'Experimentarium est un centre scientifique interactif, ouvert au public en 1991. Ils fonctionnant comme une organisation à but non lucratif. Dédié aux sciences, à la technologie, à l'environnement et à la santé. Il constitue un point de rencontre entre la science, la technologie et la culture.(Iversen, 2013)

Il est considéré ainsi, comme un lieu de rencontres pour la mise en œuvre de divers programmes en matière de promotion des sciences en rapport avec l'éducation, la culture et l'économie, un support pour les programmes « do it yourself » (expériences interactives) et ceux du domaine des arts créatifs, un lieu de présentation pour différentes découvertes et différentes réalisations scientifiques.(Ministry of Education,2018)

1.2.2 Les missions et objectifs de L'Experimentarium

L'Experimentarium ne saurait se définir seulement comme un espace d'exposition scientifique. C'est aussi un acteur essentiel de la diffusion des savoirs, de la science au sens large au cœur de la vie sociale. Son but est d'offrir une expérience immersive et éducative, adaptée aux technologies avancées et aux besoins du public. Pour remplir cette mission, il s'engage à : (Ministry of Education,2018)

- Adapter ses expositions aux nouveaux outils et aux attentes du public.
- Élargir le public usuel à l'univers des adultes et adolescents.
- Traiter des sujets jugés complexes et d'actualité plutôt que de rester dans le registre du ludique.
- Trouver des modèles économiques et d'expérimentation durables (Mintz, 2005)

Au-delà de ces missions, L'Experimentarium poursuit des objectifs fondamentaux qui renforcent son impact en tant qu'espace d'apprentissage incontournable. Il vise à :(Iversen, 2013)

- Éveiller le goût de la recherche et de l'apprentissage en jouant sur la curiosité, la créativité, l'initiative personnelle.
- Permettre une expérience immersive au public en vue de mieux faire comprendre des concepts complexes.

- Rendre l'apprentissage accessible à tous, en modifiant les origines ou les niveaux de connaissance.
- Exploiter une infrastructure innovante comme objet de démonstration technique et technologique. (Ministère de l'Éducation nationale, 2018)

1.3 Analyse d'exemple «Experimentarium de Danemark»

L'Experimentarium est un centre de sciences interactif, inauguré en 1991 à Copenhague au Danemark. Il a pour vocation de favoriser les sciences et d'inciter à apprendre par l'expérience à travers des expositions immersives et interactives afin de générer la curiosité et l'intérêt du public pour les phénomènes scientifiques.

En 2017, une rénovation de grande ampleur menée par le cabinet d'architecture CEBRA a permis de repenser totalement les espaces d'exposition, d'implanter une vaste terrasse sur le toit, d'intégrer de nouveaux équipements destinés aux ateliers et aux conférences.

L'objectif principal de ce centre est d'amener le public à une interaction active avec les sciences, en faisant une large place à des méthodes d'apprentissages qui soient constructivistes et expérimentales. (Kaya Dilmen, Kırıcı, 2022)



FIGURE 1.8 – Experimentarium de Danemark

Source : Experimentarium / Cebra, 2017.

1.3.1 La Dimension fonctionnel

A. Présentation des plans

L'Experimentarium adopte un plan rectangulaire, organisé autour d'un espace central substantiel où prend place l'escalier emblématique, de structure hélicoïdale, inspirée de l'ADN, et recouvert de cuivre. L'entrée principale se fait dans un grand hall qui dessert les différentes rotations d'accès : les expositions interactives, les zones administratives, les espaces de service. Les niveaux adoptent une spatialité flexible, favorisant une circulation fluide pour les visiteurs, et la possibilité de parcours immersifs. Les galeries ouvertes facilitent la circulation et la lisibilité des expériences. (Kaya Dilmen, Kırıcı, 2022)

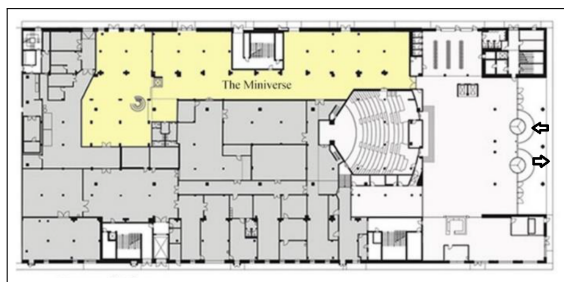


FIGURE 1.9 – Plan RDC

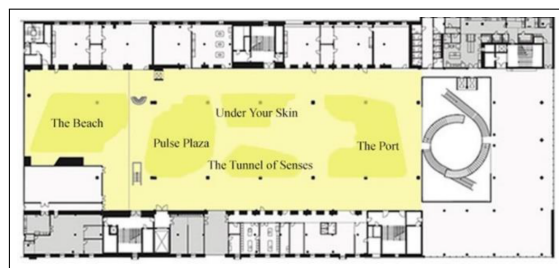


FIGURE 1.10 – Plan 1er étage

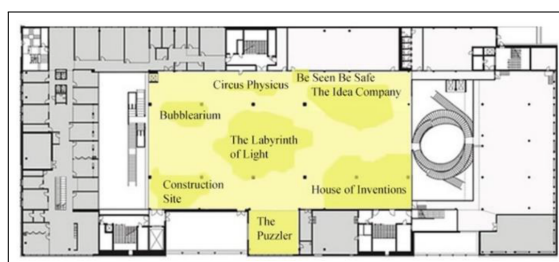


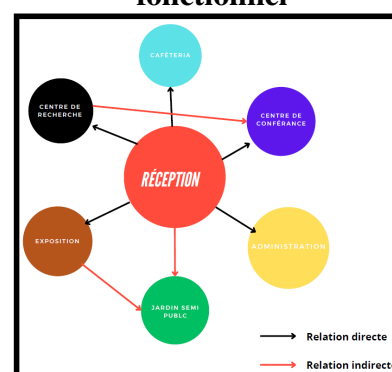
FIGURE 1.11 – Plan 2ème étage

Source : Experimentarium / Cebra, 2017.

B. L'Organisation fonctionnelle

Un Experimentarium est un espace interactif au service de la découverte scientifique et des visiteurs, qu'elle soit exploratoire, expérimentale ou éducative. Différentes entités, caractéristiques de L'Experimentarium, interagissent et dialoguent pour fournir à l'utilisateur une expérience optimale des sciences et technologies, dans un cadre immersif et stimulant, propice à la découverte et en faveur d'une meilleure connaissance scientifique et technologique, tout en aiguissant sa curiosité. (Dansk, 2014) L'organigramme ci-après présente l'ensemble des entités et leur relation au sein de l'Experimentarium :

Figure 1 : Organigramme fonctionnel



Source : Auteur, 2025

C. Les espaces d'exposition

L'Experimentarium offre un large choix d'expositions interactives répertoriant des thèmes variés des sciences de la vie, telles que la biologie, la physique, les mathématiques, la mécanique...etc, parmi les espaces les plus significatifs, on trouve :

Exposition	Description	Objectifs
Under Your Skin 	Exploration interactive du corps humain grâce à la technologie moderne et aux capteurs.	<ul style="list-style-type: none"> — Sensibiliser à la biologie humaine. — Expérimenter le corps de manière sensorielle. — Visualiser l'anatomie du cerveau en 3D. — Comprendre le système immunitaire de manière ludique. — Éveiller l'intérêt pour les sciences et la médecine.
Bubblearium 	Espace interactif dédié à la science des bulles de savon, permettant de jouer avec des bulles de toutes tailles.	<ul style="list-style-type: none"> — Comprendre la science des bulles. — Stimuler la curiosité et l'expérimentation. — Favoriser l'émerveillement et le plaisir d'apprendre. — Encourager la coopération et la créativité.
The Puzzler 	Espace interactif centré sur la logique et les mathématiques à travers des jeux et énigmes.	<ul style="list-style-type: none"> — Développer la pensée logique et mathématique. — Encourager l'apprentissage par le jeu. — Stimuler la persévérance et la créativité. — Promouvoir le travail d'équipe et la collaboration.
Construction Site 	Découverte des principes de la mécanique via des installations permettant de manipuler des éléments mécaniques.	<ul style="list-style-type: none"> — Comprendre les principes fondamentaux de la mécanique. — Encourager l'apprentissage par l'expérimentation. — Démontrer l'application des sciences à la vie réelle. — Stimuler la créativité et la résolution de problèmes.
Le Port 	Simulation interactive de navigation maritime avec défis tels que tempêtes et courants marins.	<ul style="list-style-type: none"> — Comprendre les principes de la navigation maritime. — Sensibiliser aux dangers de la mer et à la sécurité maritime. — Favoriser une approche interactive et immersive de l'apprentissage.
The Tunnel of Senses 	Expérience interactive explorant l'évolution des perceptions sensorielles à travers diverses simulations.	<ul style="list-style-type: none"> — Comprendre l'évolution des perceptions sensorielles. — Explorer les interactions entre les sens et le cerveau. — Stimuler la curiosité et l'émerveillement. — Sensibiliser à la diversité des expériences sensorielles.

TABLE 1.1 – Liste des expositions et leurs objectifs

Source : Kaya Dilmen, Kırıcı, 2022

Ces espaces sont conçus pour favoriser l'interaction, exciter les sens et favoriser la compréhension active des concepts scientifiques par l'expérimentation directe. L' Experimentarium, par son approche immersive et interactive, se distingue comme un modèle de centre scientifique innovant où l'apprentissage devient une expérience authentique, engageante et ludique. (Kaya Dilmen, Kırıcı, 2022)

1.3.2 La Dimension conceptuelle

Les façades, ornées de tôles d'aluminium perforées, deviennent autant de tableaux vivants, révélant l'âme du bâtiment. Ces interfaces vivantes, rythmées par de grandes surfaces vitrées, produisent un dialogue entre lumière et transparence, incitant le regard à flâner entre l'intérieur et l'extérieur. (Dansk, 2014)

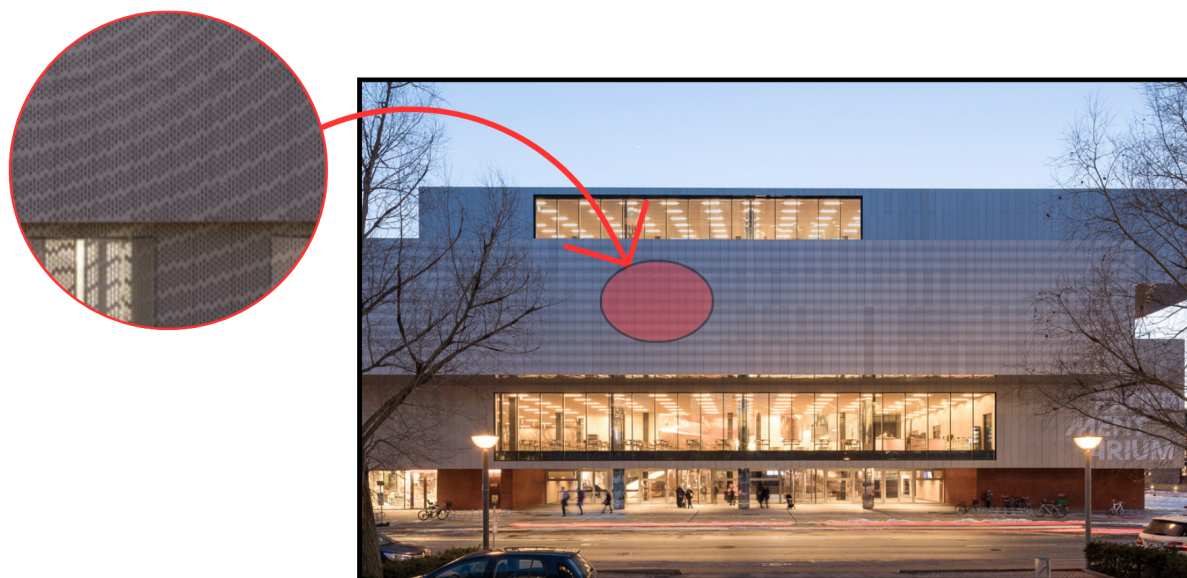


FIGURE 1.12 – La Façade

Source : Experimentarium / Cebra, 2017, traité par l'auteur.

Conclusion

L'apprentissage actif dans les musées a changé la façon dont les espaces d'exposition sont conçus. Alors que la muséologie traditionnelle supposait une approche compartimentée, les musées modernes adoptent une perspective plus ouverte et holistique. L'exemple étudiée révèle une volonté croissante de concevoir des espaces flexibles qui encouragent l'apprentissage pratique et construisent des zones interactives. Ce type de planification permet aux visiteurs d'avoir une image dégagée des différentes zones et de choisir de se déplacer en fonction de leurs intérêts, améliorant ainsi l'autonomie et la participation au processus d'apprentissage.

De plus, une visibilité accrue entre les différentes sections du musée grâce à des espaces perméables et interconnectés rend la visite encore plus intéressante. Ces ont conduit les musées scientifiques à évoluer vers des centres d'expérimentation puis vers des centres scientifiques à part entière. Ce changement de paradigme s'accompagne d'une profonde réflexion concernant la mission du musée, la nature des objets exposés et la relation avec le visiteur.

Ainsi, le musée ne se contente plus d'enseigner ; il devient un espace de découverte et d'exploration où l'apprentissage est une démarche active. Il se libère de son rôle traditionnel de conservateur et de présentateur d'artefacts et met davantage l'accent sur la communication

directe avec le public. Le visiteur passe d'observateur passif à participant actif, ayant la capacité de toucher, manipuler, expérimenter et même créer. Cette approche illustre le concept d'un nouvel utilisateur dans le cadre de l'expérience muséale, accordant moins d'importance aux objets et davantage aux personnes et à leurs interactions avec le savoir. Dans cette perspective, les espaces d'exposition tendent à se transformer en véritables laboratoires d'expérimentation et de présentation de systèmes audiovisuels et thermiques avancés. Une planification dynamique et adaptable, soutenue par des innovations technologiques, devient essentielle pour garantir des expériences renouvelées et engageantes. Grâce à ces outils, les musées offrent un accès sécurisé à des phénomènes souvent inaccessibles dans la vie quotidienne, renforçant ainsi leur rôle éducatif et expérientiel.

Dans cette dynamique de transformation, l'éclairage incarne un acte fondamental dans la valorisation des espaces d'exposition. Ce n'est plus un simple instrument fonctionnel, mais un véritable outil de narration et d'interaction, qui participe à la perception des visiteurs et apporte son influence dans la sensation d'immersion pendant le moment d'expérience muséale. Ainsi, cette manière d'utiliser la lumière dans les musées contemporains mérite une attention singulière, dans la mesure où elle participe à la construction de ces espaces nouveaux d'apprentissage et d'expérimentation.

Les Ambiances Lumineuses Dans Les Espaces D'exposition

Introduction

Pour un musée, lieu public de plaisir, de savoir, d'interrogation, l'éclairage est un élément important tout autant comme facteur d'interprétation, que du confort et du bien être des visiteurs, sans oublier son action de dégradation sur un grand nombre de matériaux. De la non prise en compte au bon moment de l'éclairage comme élément intrinsèque de la muséographie, résultent de graves déconvenues sur la compréhension du contenu, le confort visuel et la satisfaction des visiteurs ainsi que sur la conservation des collections. Il faut donc considérer le traitement de la lumière en muséographie comme :

- Un moyen d'expression.
- Un élément d'ergonomie.
- Un facteur de dégradation.(Davallon, 1996)

Pourtant, cette réalité n'intéresse encore que peu les chercheurs qui étudient le musée. Bien que certains experts aient pointé assez tôt l'intérêt de l'éclairage comme facteur d'expérience pour les visiteurs (Gilman, 1918, p. 163 ; Cellerier, 1931 ; Nakamura et al., 1936) André Gob et Noémie Drouguet considèrent l'éclairage comme « *un moyen de mise en valeur* » (Gob Drouguet, 2014, p. 202), ainsi qu'un élément de « *communication important* »(Gob Drouguet, 2021, p.186). La conception d'un éclairage mérite donc une réflexion conjointe, pratique et théorique, pour satisfaire la notion d'un éclairage « juste ».

2.1 Les Sources lumineuses

Nous devrions définir deux termes : lumière et éclairage :

2.1.1 La lumière

La lumière est considérée comme un matériau, bien qu'elle soit en réalité de l'énergie. Comme le souligne Jean-Jacques Ezrati, expert en éclairage muséographique : « *la lumière, bien qu'intangible, est un matériau à part entière dans les musées ; elle révèle les œuvres, guide les regards et magnifie les espaces.* » (Ezrati, 2017). Ce matériau peut se présenter de manière naturelle, comme la lumière solaire, mais il peut aussi être généré par des méthodes artificielles, telle que la lumière électrique. Toute lumière, qu'elle soit naturelle ou artificielle, est caractérisée par sa composition spectrale et par son flux lumineux. Au fil du temps, ces performances ont progressé en adéquation avec les avancées technologiques.



FIGURE 2.1 – La lumière

Source : Choeur, 2020

2.1.2 L'éclairage

L'éclairage est la méthode de régulation lumineuse qui répond à un besoin spécifique. Elle se base non seulement sur les connaissances acquises des sources lumineuses et de la technologie de contrôle, mais aussi sur des propriétés plus spécifiques (historiques, sociologiques, artistiques...etc.) des objets à éclairés (Ezrati, 2017).



FIGURE 2.2 – Éclairage artificiel

Source : Batiweb, 2019

2.2 Les Caractéristiques d'une source lumineuse

Les sources lumineuses se caractérisent par plusieurs caractéristiques dont les principales :

2.2.1 La Composition spectrale

La composition spectrale représente la répartition des diverses couleurs (ou longueurs d'onde) qui constituent la lumière produite par une source.

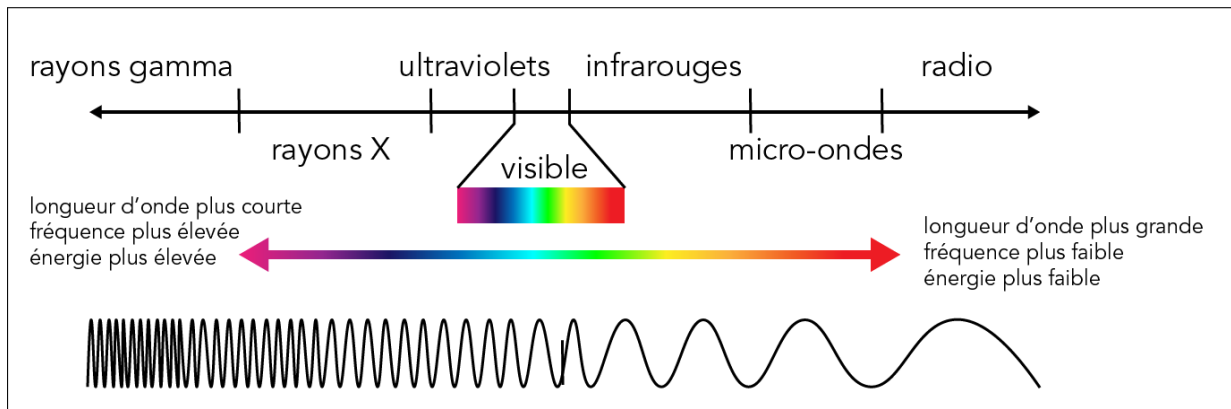


FIGURE 2.3 – Le spectre électromagnétique

Source : La lumière et ses propriétés, s. d.

2.2.2 L'Efficacité lumineuse

L'efficacité lumineuse c'est le rapport entre la quantité de lumière visible émise par une source et la quantité d'énergie électrique qu'elle consomme. (Metz, 2015)

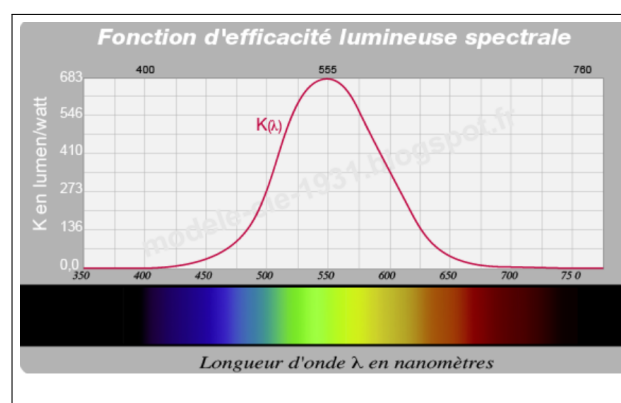


FIGURE 2.4 – L'Efficacité lumineuse

Source : Metz, 2015

2.2.3 Le Rendu des couleurs

Le rendu des couleurs est une caractéristique essentielle d'une source lumineuse qui mesure sa capacité à restituer fidèlement les couleurs des objets par rapport à une source de référence idéale, comme la lumière naturelle du jour. Cet aspect est souvent quantifié par l'Indice de Rendu des Couleurs (IRC), une échelle de 0 à 100 où une valeur élevée indique une meilleure précision dans la reproduction des couleurs.

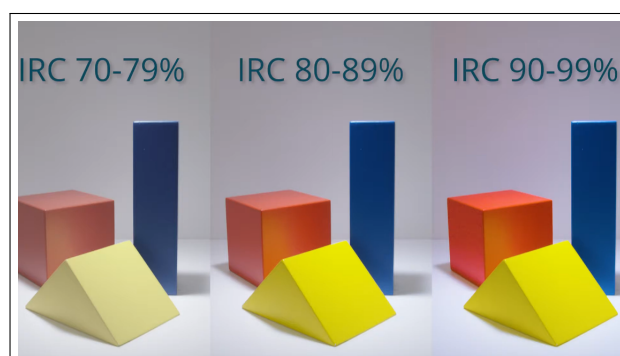


FIGURE 2.5 – Indice de rendu des couleurs IRC
Source : Waveform Lighting, 2024

2.2.4 La Durée de vie

La durée de vie exprime la durée pendant laquelle une source lumineuse conserve un niveau de luminosité satisfaisante. (Chris, 2022)

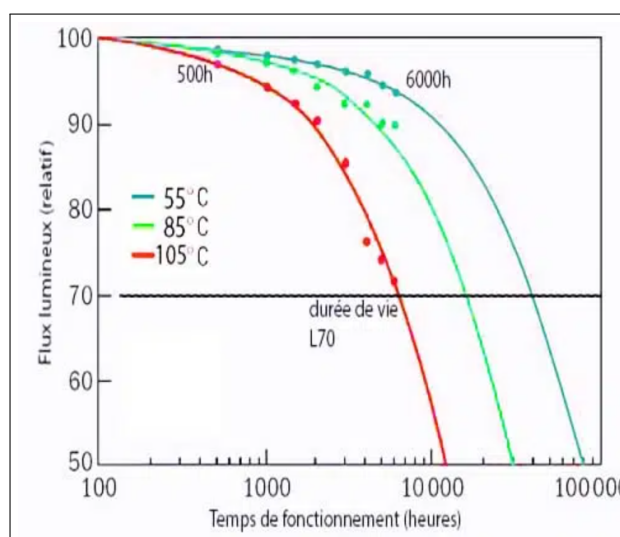


FIGURE 2.6 – Durée de vie LED à 70% du flux lumineux initial à 3 températures — 40 000 heures à 55°C

Source : Chris, 2022

La connaissance de ces caractéristiques déterminera le choix d'une source lumineuse dans n'importe quelle situation donnée.

2.3 La lumière naturelle dans les espaces d'exposition

L'éclairage naturel est apprécié pour ses qualités uniques et présente des défis complexes. Jean Nouvel, architecte renommé, a affirmé que « *la lumière naturelle donne une âme aux espaces, mais elle doit être apprivoisée pour éviter qu'elle ne devienne destructrice* ». (Nouvel, 2010).

L'éclairage naturel illumine les espaces d'exposition, sublime les teintes des créations et diminue la consommation d'énergie. Toutefois, il est crucial de gérer de manière rigoureuse de l'exposition à la lumière afin de sauvegarder les créations artistiques. Pour l'architecte Emmanuel Nebout : « *C'est un sujet essentiel car la lumière révèle les œuvres et l'architecture. Mais avec un impératif : le contrôle de ladite lumière. Car certaines œuvres, comme les tissus, les peintures ou les dessins ne la supportent pas* ». (Miller, 2010)

Jean-Jacques Ezrati, éclairagiste conseil au Centre de recherche et de restauration des musées de France, confirme que : « *Les musées peuvent recevoir de la lumière naturelle et l'utiliser, mais il faut la prendre en compte dans sa variabilité et dans son orientation. Il est impératif de travailler l'entrée de la lumière, tout en se protégeant du soleil* ». (« Lumière naturelle : comment la valoriser et la contrôler au mieux », 2010)

2.3.1 Les Types d'ouvertures

L'éclairage naturel est introduit dans les bâtiments par deux types d'ouvertures : latérales et zénithale. Leur forme, orientation et dimensionnement influencent directement la qualité et la quantité de lumière reçue à l'intérieur de l'espace d'exposition. (Tejashree, 2023)

A. Les Ouvertures zénithale

Les ouvertures zénithales, placées sur le toit ou au plafond, offrent une lumière douce et uniformisée qui réduit les risques d'éblouissement. Elles permettent aussi une grande indépendance dans l'aménagement intérieur, en libérant les murs de toute contrainte liée à la lumière naturelle. (Tejashree, 2023)

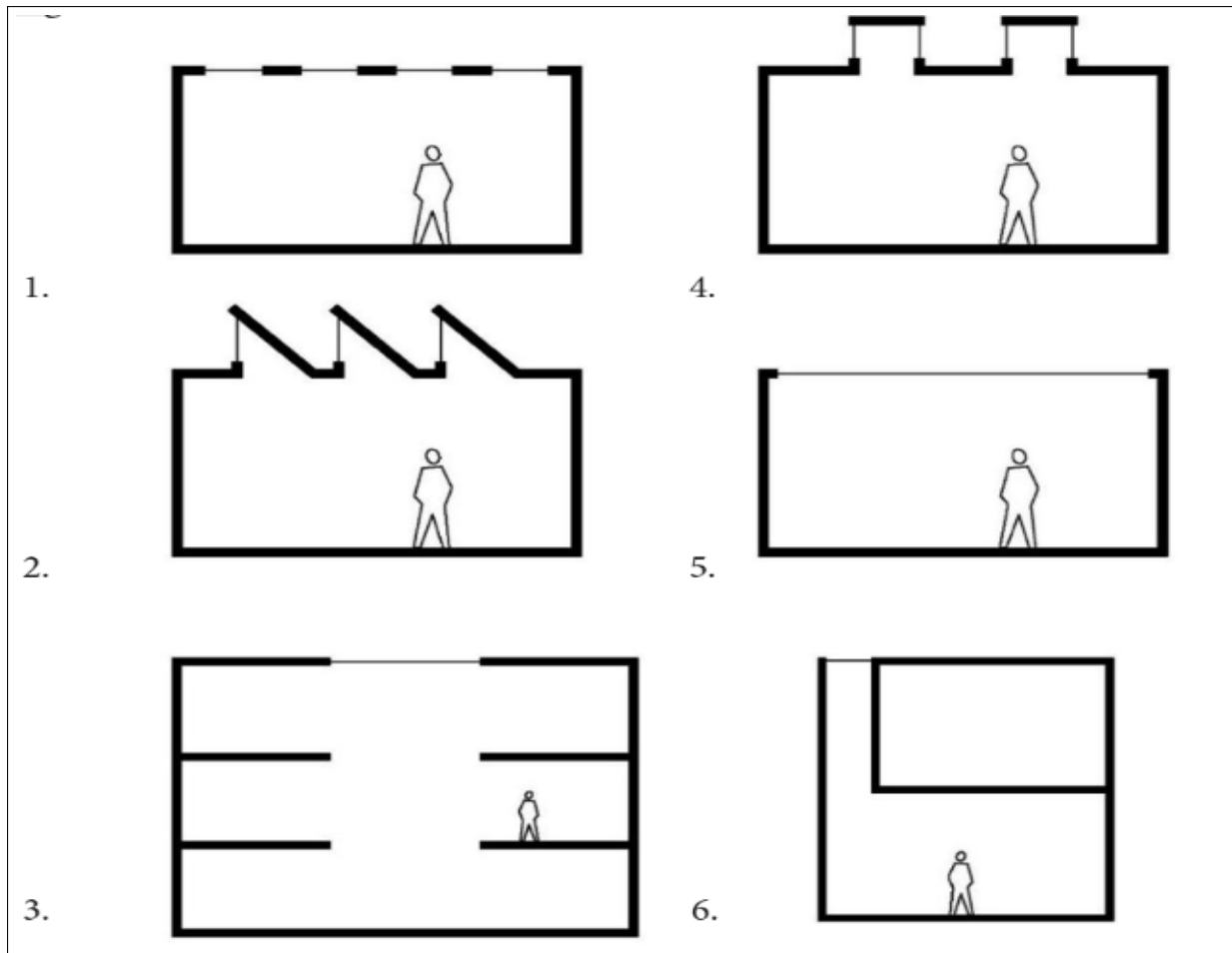


FIGURE 2.7 – Les ouvertures zénithales
Source : Tejashree, 2023

1. Les types d'ouverture zénithale

Dans la recherche d'un éclairage naturel optimisant l'ambiance des espaces d'exposition, les ouvertures zénithales sont des solutions architecturales variées et ingénieuses. Ces dispositifs de captation lumineuse au sommet des constructions, offre un potentiel d'éclairages unique, de nature à transformer l'atmosphère intense et la fonctionnalité des espaces intérieurs, certes parmi ces formes variées, l'atrium, le puits de lumière et les moniteurs de toit sont des types de conceptions dotés de caractéristiques et d'applications spécifiques, mais qui apportent chacun une réponse essentielle face à la problématique de l'éclairage naturel.


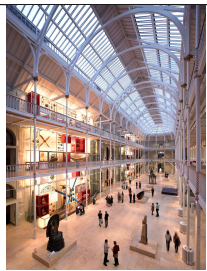

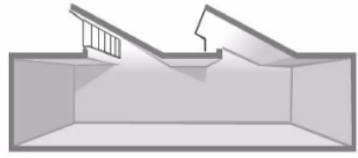
Type	Description	Illustration
Atrium	Un atrium est généralement revêtu d'une toiture vitrée. Il représente un composant architectural important, conférant une lumière naturelle et une dimension spatiale unique aux constructions.	 Atria
Puits de lumière	Dispositif destiné à capter et diffuser la lumière naturelle du toit ou d'une surface zénithale vers des zones internes généralement éloignées des fenêtres. Très performant pour éclairer les espaces obscurs.	
Moniteurs de toit surélevés	Fenêtres zénithales situées au sommet d'un toit, offrant une lumière naturelle abondante et souvent une ventilation naturelle.	
Moniteurs en dents de scie	Type de moniteur de toit avec une forme en dents de scie, souvent utilisée dans les espaces d'exposition pour un éclairage homogène sans éblouissement.	

TABLE 2.1 – Types d'ouvertures zénithales

Source : Auteur, 2025

2. Les Avantages et Inconvénients d'ouverture zénithale

L'éclairage zénithale est caractérisé par plusieurs caractéristiques. Parmi ses principales avantages et inconvénients on peut citer :

- Il offre une lumière continue qui est la moins susceptible d'être perturbée par les barrières latérales.
- L'espace mural est donc libéré pour l'exposition et les expositions. Cependant, l'entretien est un problème.
- Ce type est également difficile à inculquer dans plusieurs étages.

B. Les Ouvertures latérale

Les fenêtres latérales constituent des composants architecturaux importants qui facilitent la communication entre l'intérieur et l'extérieur d'un espace. Ces dernières sont essentielles pour l'apport de lumière naturelle, la ventilation et l'esthétique d'un espace.

1. Les Types d'ouverture latérale

Parmi les type des ouvertures latérale on trouve :(Shakya, 2018)

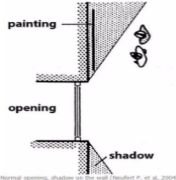
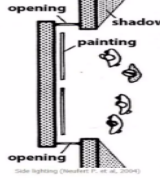
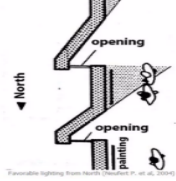
Type de fenêtre	Illustration
Fenêtres verticales	
Fenêtres horizontales	
Fenêtres de clerestory	

TABLE 2.2 – Comparaison entre la lumière naturelle et artificielle

Source : Neufert, 10^e Édition-Fr, 2009

2. Les Avantages et Inconvénients d'ouverture latérale

Parmi les avantages et les inconvénients des ouvertures latérale on trouve :(Shakya, 2018)

- Ils fournissent une méthode pratique et économique pour contrôler la ventilation et la température.
- Il sert de soulagement efficace en procurant une vue agréable sur le milieu naturel externe.
« Cependant, cela engendre aussi des reflets qui limitent la visibilité et diminuent la flexibilité de l'aménagement intérieur».

2.4 Les dispositifs du contrôle

Les dispositifs d'ombrage sont appelés à jouer un rôle de premier ordre dans la protection des ouvertures des fenêtres et des surfaces vitrées des bâtiments contre la lumière du soleil, particulièrement l'éblouissement et le gain de chaleur solaire, étant ainsi de précieux outils pour améliorer le confort thermique et visuel des usagers des bâtiments dans les périodes estivales où les rayonnements solaires sont les plus importants. Leur efficacité dépend de plusieurs variables, notamment leur forme, leur inclinaison, leur matériau, leur orientation par rapport aux caractéristiques de la trajectoire solaire qui varie selon l'heure de la journée et la saison.

Ainsi, un brise-soleil horizontal sera bénéfique sur une façade orientée plein sud où il va occulter intégralement les rayons solaires en été et autoriser leur pénétration dans la pièce intérieure en hiver alors que les lames verticales peuvent être plus appropriées pour protéger des façades est et ouest où la lumière du soleil est rase et difficile à dominer.

Du point de vue technique, on peut dire que les dispositifs d'ombrillage extérieurs ont de bien meilleures performances que ceux situés à l'intérieur de l'enveloppe ou qu'ils sont intégrés dans celle-ci. En interceptant les rayons avant qu'ils n'atteignent les surfaces vitrées, ils rendront le premier appel de la chaleur intérieure beaucoup plus faible, donc permettant la climatisation, et augmentant l'efficacité énergétique dans son ensemble. Par exemple, on peut penser à des brise-soleil orientables en aluminium, sur des façades de bureaux, de musées ...etc. selon les besoins, en augmentant ou en diminuant la quantité du réflecteur de chaleur et de lumière. (D.K. Ching, 2008)

Les illustrations suivantes montrent les principaux types de dispositifs d'ombrage solaire.

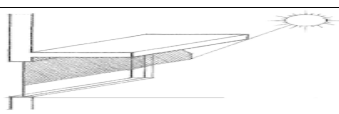
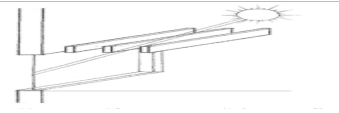
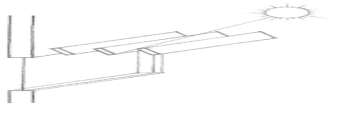
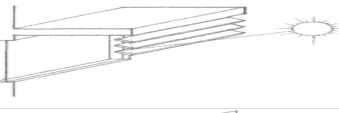
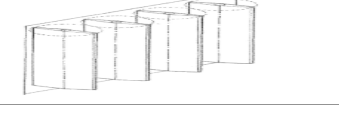
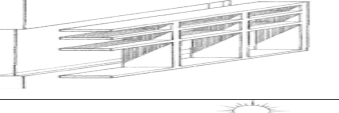
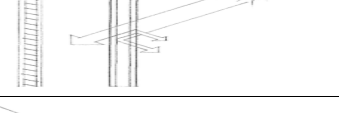
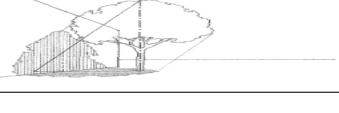
N°	Type	Description	Illustration
1	Surplombs horizontaux	Protègent du soleil haut d'été, laissent passer la lumière en hiver. Améliorent le confort visuel.	
2	Persiennes horizontales	Favorisent la circulation de l'air, limitent la chaleur. Peuvent être réglables automatiquement.	
3	Persiennes inclinées	Meilleure protection grâce à leur inclinaison variable selon l'angle du soleil.	
4	Persiennes suspendues	Efficaces contre le soleil haut, mais peuvent bloquer la vue extérieure selon l'angle.	
5	Persiennes verticales	Adaptées aux façades est/ouest, limitent les transferts de chaleur.	
6	Volets en œufs allient	Combinent les bénéfices des systèmes horizontaux et verticaux. Idéals en climat chaud.	
7	Stores et rideaux	Réduisent jusqu'à 50% du rayonnement solaire. Meilleur confort visuel intérieur.	
8	Arbres et structures adjacentes	Ombres naturelles variables selon hauteur, distance et orientation.	

TABLE 2.3 – Typologie des protections solaires architecturales

Source : D.K. Ching, 2008

2.5 L'enveloppe architecturale

2.5.1 La Définition

L'enveloppe d'un édifice désigne la partie visible de tout édifice, que l'on se situe à l'intérieur ou à l'extérieur de l'édifice. En ce sens, l'enveloppe joue un rôle d'interface avec l'extérieur. Mais c'est avant tout une protection, une « matière » permettant de se protéger».

L'enveloppe architecturale est bien plus qu'une simple peau. Il s'agit d'un élément architectural complexe qui joue un rôle essentiel dans le confort, la performance énergétique et l'esthétique de l'édifice. Sa conception nécessite une approche globale, en considérant les relations entre les différents éléments d'enveloppe et leur impact sur l'ensemble de la construction (Emilie, 2009). Comme le souligne Emmanuel Nebout : « *une architecture bien pensée dialogue avec la lumière pour créer des ambiances qui respectent autant les œuvres que les visiteurs* » (Nebout, 2015).

2.5.2 Les Types d'enveloppe architecturale

Sur le plan structurel, on peut classer les enveloppes de bâtiment en deux catégories principales : les enveloppes porteuses, et les enveloppes non porteuses. (Khadraoui M, 2019)

1. Enveloppes porteuses

Les enveloppes porteuses, qui sont de véritables piliers de l'édifice, assurent sa stabilité en soutenant les contraintes verticales (toitures, planchers) et en résistantes aux forces horizontales (vent, tremblements de terre). Généralement, elles se composent de matériaux importants comme la maçonnerie (brique, pierre) ou le béton.



FIGURE 2.8 – Exemple d'Enveloppe porteuse

Source : Khadraoui M, 2019

2. Enveloppes non porteuses

Les enveloppes non porteuses, également appelées construction légère, sont des composants architecturaux qui ne participent pas à la solidité du bâtiment. On les classe principalement en deux types : les façades légères, généralement fabriquées à partir de matériaux minces et légers, et les façades en maçonnerie de faible épaisseur qui assurent une isolation thermique et sonore tout en offrant un aspect esthétique.



FIGURE 2.9 – Exemple d’Enveloppe non porteuse

Source : Khadraoui M, 2019

2.5.3 La Classification d’enveloppe architecturale

Dans la conception architecturale, le choix de l’enveloppe du bâtiment intervient de manière déterminante dans la gestion de l’apport de lumière naturelle. En fonction de sa typologie, simple peau ou double peau, il n’influence pas la manière dont la lumière pénètre dans les espaces intérieurs. Or, ce contrôle est essentiel pour favoriser le confort visuel des usagers, diminuer les besoins d’éclairage artificiel et valoriser les ambiances architecturales. La typologie des enveloppes classerait alors les différentes stratégies mises en œuvre pour optimiser l’apport de lumière naturelle dans le bâtiment. Le tableau suivant illustre la distinction entre enveloppe simple et enveloppe double peau, avec une attention particulière portée à leur impact lumineux.



Type d'enveloppe	Description	Illustration
Enveloppe simple peau	Une seule enveloppe étanche sépare un espace intérieur d'un espace extérieur.	
Enveloppe double peau	L'enveloppe double peau, une véritable barrière protectrice née en Europe, associe performance thermique, sonore et esthétique. Elle répond ainsi aux demandes contemporaines de construction durable.	

TABLE 2.4 – Comparaison entre enveloppes simple et double peau

Source : Auteur, 2025

2.6 Le confort visuel

La qualité d'une visite de musée dépend de la mise en lumière, mais aussi du confort visuel qu'assure l'éclairage.

2.6.1 La Définition

Le confort visuel est une impression subjective liée à la quantité de lumière disponible ainsi qu'à sa répartition et sa qualité. Cette sensation dépend de divers facteurs physiques tels que **l'intensité lumineuse** associée à la **luminosité** et au **contraste visuels** et à **l'éblouissement** provoqué par le **spectre lumineux** spécifique. En outre s'ajoutent des éléments propres à l'environnement et aux exigences de la tâche visuelle en cours comme la dimension des objets observés et le temps imparti pour les observer. Le confort visuel dépend également de facteurs physiologiques et psychologiques propres à chaque individu tels que l'âge et la qualité de sa vision ou la capacité à contempler l'environnement extérieur. (Agence Qualité Construction (AQC), 2023)

Le confort visuel est un équilibre précis entre les caractéristiques de la lumière, les exigences de la tâche visuelle et les spécificités de chaque individu. Un éclairage bien conçu contribue à améliorer notre bien-être, notre santé et nos performances.

2.6.2 Les Paramètres du confort visuel

Les paramètres du confort visuel pour lesquels l'architecte joue un rôle prépondérant sont :

- Le niveau d'éclairement de la tâche visuelle .
- Un rendu des couleurs correct.
- 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 modelé des objets.
- Une vue vers l'extérieur et une teinte de lumière agréable.
- L'absence d'éblouissement.



FIGURE 2.10 – Paramètres du confort visuel

Source : UCLouvain, 2025

2.6.3 Les critères du confort visuel

Le confort visuel peut néanmoins se mesurer à travers des critères objectifs qui doivent être bien étudiés pour atteindre le seuil du confort, comme l'a souligné Gilman : « un musée bien éclairé est celui où l'œil n'est pas conscient de l'effort, mais où l'esprit est pleinement captivé » (Ives Gilman, 1918). Ces critères incluent :

- Le site, avec toutes ses contraintes dont l'ensoleillement, les masques et les reliefs, la

nature des surfaces et l'éclairage artificiel extérieur.

- Le nombre d'ouvertures, leur taille, leur orientation.
- La quantité de lumière naturelle.
- La qualité de l'éclairage naturel qui est mesurée par le facteur de lumière du jour (FLJ).
- La qualité de l'éclairage électrique en termes de confort et de dépenses énergétiques est caractérisée par l'indice de rendu des couleurs et la température des couleurs.
- La relation visuelle avec l'extérieur.

Conclusion

A travers ce deuxième chapitre, on a pu mettre en avant la place centrale que tient l'éclairage dans la conception des espaces muséaux. La lumière ne peut pas être considérée comme un simple outil technique, elle est bien au contraire partie prenante dans la mise en scène des œuvres, dans la création d'ambiances sensibles et dans l'orientation que l'on donne au visiteur dans l'espace.

Nous avons vu que la lumière agit sur la perception visuelle, les émotions, le confort, ou encore la lecture des œuvres. Elle est alors un véritable langage spatial capable de sublimer ou d'altérer une exposition selon l'angle dans lequel elle est conçue. L'éclairage directif, les jeux d'ombre et de contraste, ou encore la modulation de température de couleur sont autant d'outils que le concepteur est amené à appréhender pour répondre aux enjeux muséographiques. L'étude des spécificités de la lumière naturelle met en lumière ses qualités mais aussi ses points de difficulté en termes de contrôle de ses apports et de sa régularité.

L'analyse de l'enveloppe architecturale a également démontré comment cette interface structurale entre intérieur et extérieur permet d'orienter l'entrée de la lumière, mais aussi le dialogue entre les bâtiments, les œuvres et les visiteurs. L'enveloppe devient ainsi un tout partie active de la construction de la scénographie lumineuse.

La qualité de l'ambiance lumineuse dépasse la seule question esthétique : elle constitue un véritable enjeu fonctionnel, perceptif et symbolique central dans le cadre des enjeux contemporains de l'exposition.

Analyse contextuelle et méthodologique du confort visuel au musée Bordj Moussa

Introduction

Pour aborder la question du confort visuel dans les espaces muséographiques, il est nécessaire de considérer le lieu étudié dans sa globalité, d'inclure son environnement, ses spécificités architecturales et d'appliquer un protocole d'analyse de la lumière prenant en compte ses dimensions objectives et subjectives. Ce chapitre propose une lecture croisée du territoire de la ville de Béjaïa, du musée Bordj Moussa en tant que site patrimonial, et des réponses qu'on peut apporter aux différentes approches mises en œuvre pour évaluer les conditions lumineuses dans les espaces d'exposition. A travers une analyse qui croise données géographiques, historiques, architecturales et expérimentations, il convient d'identifier les caractéristiques réelles du bâtiment et la manière dont ces caractéristiques impactent l'expérience visuelle des usagers. Cette démarche pluridisciplinaire permet de poser un diagnostic précis fondé sur les relevés de mesures effectués sur site, des simulations numérique, des retours utilisateurs et recommandations adaptées au lieu.

3.1 Présentation de l'aire d'étude « Bejaia »

3.1.1 La situation de la ville de Bejaia

La ville de Béjaïa connue sous le nom de Bgayet en Tamazight et anciennement connue sous le nom de Bougie, est une ville côtière située dans le nord-est de l'Algérie et au centre de la façade méditerranéenne de l'Afrique du Nord. Elle se trouve à environ de 230 km à l'est d'Alger, au pied du mont Gouraya et au nord de l'embouchure de la Soummam. Capitale de la wilaya du même nom, elle est l'une des principales villes kabyles, elle s'étend sur 3 261 km². Sa position géographique à la fois défendable et sécurisée par une zone de mouillage, en fait un lieu convoité par de nombreuses civilisations tout au long de l'histoire méditerranéenne, comme en témoignent les riches traces culturelles et historiques qu'elle abrite.



Figure 1 : Situation de Béjaïa

Source : Google Earth, traité par l'auteur, 2025.

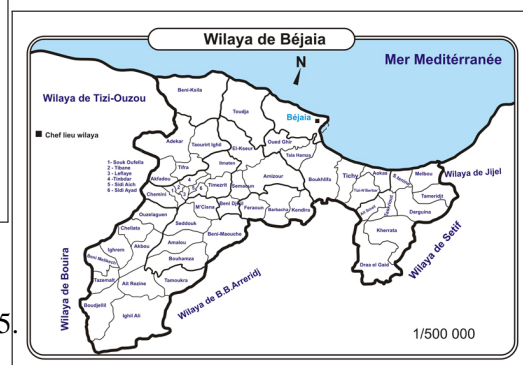


Figure 2 : Situation de la commune de Béjaïa

Source : Bertho, 2010.

3.1.2 Les données climatiques de la ville de Bejaia

Béjaïa, ville située sur le littoral nord-est de l'Algérie, bénéficie d'un climat méditerranéen typique, influencé par la mer Méditerranée et le relief environnant. Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat est Csa, c'est-à-dire tempéré avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides.

Ce cadre climatique est un facteur important dans la conception architecturale en matière de gestion de l'éclairage naturel, de confort thermique et de l'intégration paysagère. Ainsi, l'analyse des principaux facteurs climatiques de la région (température, précipitations, ensoleillement, vents...etc). Qui suit, aidera à comprendre leur impact sur les choix conceptuels du projet.

1. La Température

La température, en tant que composante essentielle du climat, influence les ambiances intérieures, aide à optimiser la gestion de la lumière naturelle. Le degré de compréhension de la température permet d'adapter les choix architecturaux en fonction des conditions climatiques. Dans le graphique ci-dessous (figure 3.1), sont présentées les variations mensuelles des températures minimales, maximales et médianes, collectées à Béjaïa, entre 1991 et 2020.

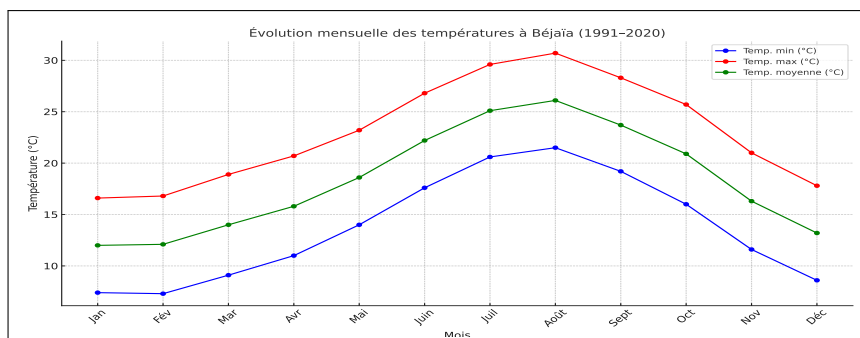


FIGURE 3.1 – Graphique des variations mensuelles de la température de la ville de Béjaïa

Source : Climats et Voyages, 2025

Les variations mensuelles des températures permettent de distinguer deux saisons :

- **Saison froide** : Elle s'étend du mois de novembre au mois de mai, avec une température moyenne minimale de 7,3°C.
- **Saison chaude** : Elle couvre la période de juin à octobre, avec une température moyenne maximale de 30,7°C.

2. L'ensoleillement

L'un des principaux facteurs pris en compte dans l'étude du climat est la mesure des ensoleillements, notamment en relation avec la lumière naturelle et ses apports quotidiens, conditionnant à la fois l'intensité lumineuse, la durée d'éclairement. Le graphique suivant (figure 3.2) présente l'évolution mensuelle de l'ensoleillement à Béjaïa sur la période allant de 1991 à 2020.

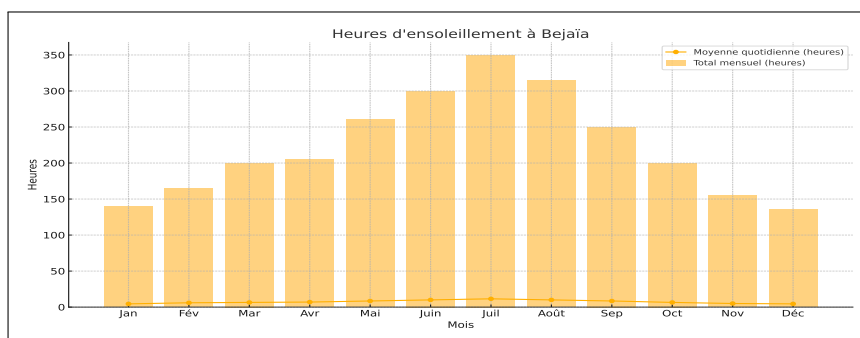


FIGURE 3.2 – Graphique des variations saisonnières de l'ensoleillement à Béjaïa (1991-2020)

Source : Climats et Voyages, 2025

Le graphique représente la répartition mensuelle des heures d'ensoleillement à Béjaïa, en distinguant la moyenne quotidienne et les totaux mensuels.

On y voit des heures d'ensoleillement plus importantes à partir du printemps, avec l'été comme la saison la plus ensoleillée : juillet est le mois le plus ensoleillé avec une moyenne de **11,5h par jour**, ce qui correspond à 350h au total pour le mois. Les mois d'hiver (décembre et janvier) sont les moins ensoleillés, avec environ **4,5h par jour**.

Cela traduit également un climat méditerranéen considéré comme typique, avec des jours d'été longues et très ensoleillées et des jours d'hiver courtes et plus nuageuses. Ces données ont des implications liées aux activités touristiques, énergétiques...etc, avec un intérêt pour l'énergie solaire en proposant une éventuelle exploitation.

3. Les Précipitations

Au rang des éléments climatiques si déterminants d'un territoire, les précipitations, jouent un rôle fondamental dans l'ambiance atmosphérique en influençant la luminosité naturelle et les dynamiques saisonnières. Le graphique ci-dessous (figure 3.3) représente la répartition mensuelle des précipitations moyennes observées à Béjaïa entre 1991 et 2020.

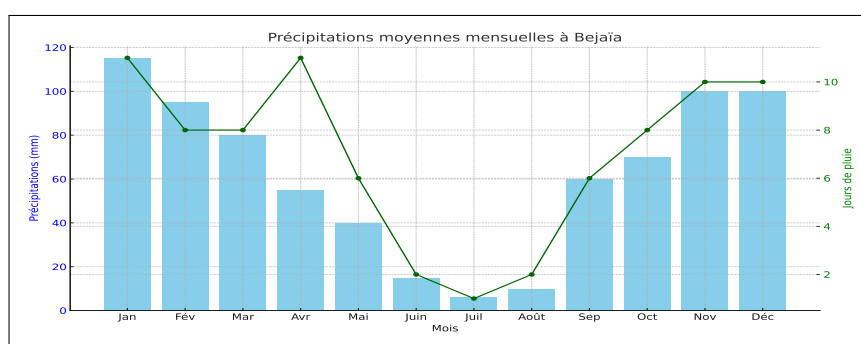


FIGURE 3.3 – Graphique de la répartition mensuelle des précipitations et des jours de pluie à Béjaïa (1991–2020)

Source : Climats et Voyages, 2025

.Analyse saisonnière des précipitations à Béjaïa

Hiver (novembre à février) : C'est la période de l'année la plus pluvieuse. Les précipitations atteignent leur maximum : plus de 100 mm au mois de janvier, avec 9 à 10 jours de pluie en moyenne par mois.

Printemps (mars à mai) : Réduction progressive des précipitations (60 à 80 mm en mars, 30 mm en mai), du même ordre que la diminution du nombre de jours de pluie passé de 7 à 4 jours par mois.

Été (juin à août) : En été, le climat est très sec. Surtout en juillet ou en août, il pleut quasiment pas (de l'ordre de 5 mm) avec en moyenne 0 ou 1 jour de pluie.

Automne (septembre à octobre) : Le retour des pluies se fait progressivement. En octobre, avec environ 80 mm ou 6 jours de pluie, les précipitations reprennent de façon significative, même s'il reste dans l'air des ardeurs de l'été, en attendant l'hiver.

3.1.3 L'Héritage patrimonial de la ville de Bejaia

Le système défensif de Bejaia comprend un certain nombre d'éléments architecturaux : enceinte, portes, batteries, blockhaus, forts...etc. En ce qui concerne ces derniers, Bejaia en

possède un nombre assez important, ces forts sont issus de périodes historiques différentes et sont repartis aussi bien à l'intérieur du rempart que sur l'ensemble du territoire et de l'aire de l'influence que compte la ville. Leur état de conservation et d'intégration dans la vie contemporaine diffère d'un monument à un autre.

Nom du fort	Localisation	Description historique et état actuel	Image
Fort de la Casbah	Sud-est de Béjaïa, vieux port	Monument classé depuis 1930. En cours de restauration. Malgré le classement, il présente des pathologies (infiltrations d'eau de pluie, dégradation des murs extérieurs et intérieurs).	
Fort Abd El Kader	Pointe sud-est sur la pointe du contrefort de Bridja	Ancien fort hammadite, classé Monument historique depuis 1930, en cours de restauration. Dévalorisé par des bâtiments militaires récents, il est inaccessible au public.	
Fort Moussa	Partie haute de la ville	Construit par les Espagnols. Monument historique (1930). Transformé en musée en 1989, peu propice aux visites. Souffre d'infiltrations et manque d'animation culturelle.	
Fort de Gouraya	Pic Gouraya (672 m)	Non classé, potentiel symbolique et touristique important mais malheureusement en ruine avancée.	
Fort Clauzel	Ouest de la ville Béjaïa	Construit en 1835. Non classé, en ruine avancée. Subit des atteintes dues à des interventions anarchiques et à un désintérêt total. Il est squatté.	
Fort Lemerrier	Parc National de Gouraya	Fort colonial. Dégradation très avancée. Totalement abandonné, sans projet de conservation, malgré sa position stratégique.	

TABLE 3.1 – Forts historiques de Béjaïa : situation, valeur patrimoniale et état de conservation

Source : Élaboré à partir de l'article (Korichi, Guenadez & Faucherre, 2019) et des données historiques sur les forts de Béjaïa.

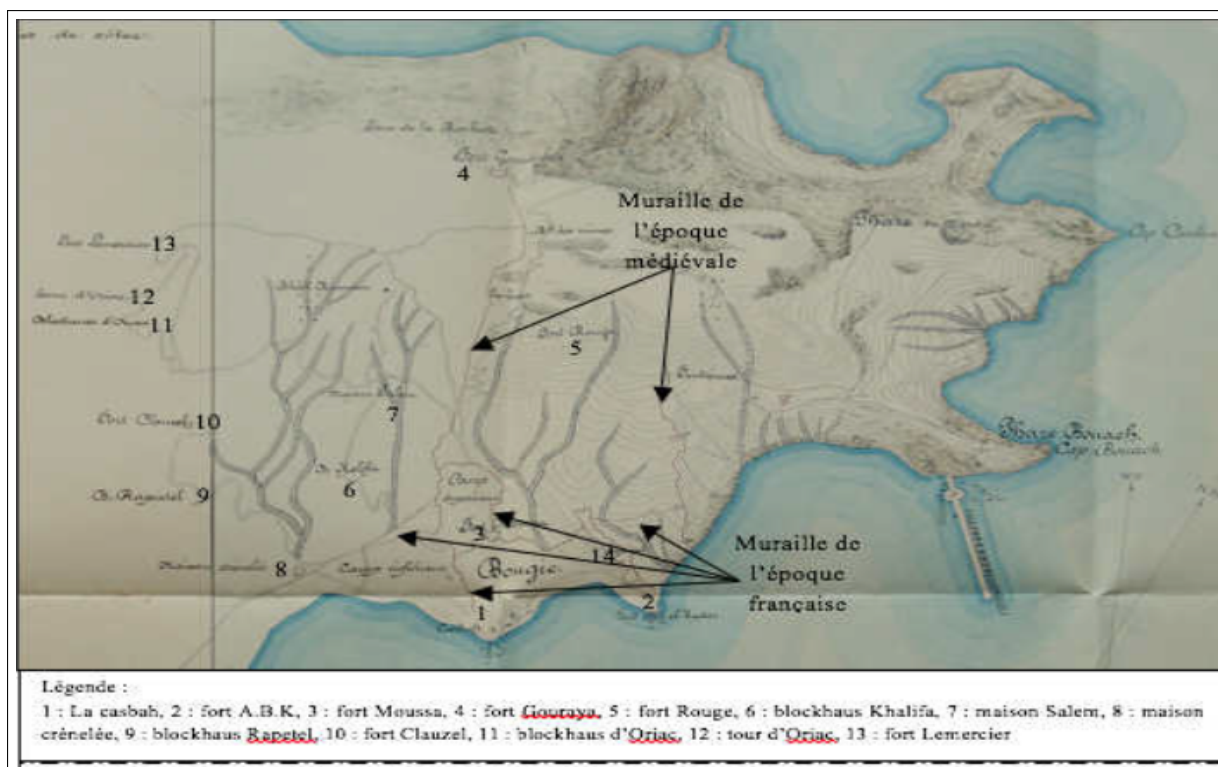


FIGURE 3.4 – Plan des fortifications de Béjaïa, 1847.

Source : Korichi, Guenadez & Faucherre, 2019

3.2 Présentation du cas d'étude "Bordj Moussa"

Le Bordj Moussa, ce monument emblématique de Bejaia, fut à l'époque espagnole, le grand château, château impérial puis fort Barral à l'époque coloniale. Ce nom vient d'un épisode héroïque, dans lequel sept guerriers kabyles (les R'djel Essabaâ) se sacrifièrent, pour entrer dans les murs de ce fort occupé par les Espagnols, l'un des héros se nommait Moussa. C'était un hommage repris par les Ottomans, qui, à leur tour donnèrent ce nom au site. Le Bordj fonctionne depuis 1989 en musée, où sont exposées des collections d'objets archéologiques romains, ainsi que certaines œuvres picturales qui étaient présentées antérieurement à la radio Soummam. Réhabilité par nécessité du relogement des collections, le musée s'avère être un impressionnant fort plus que des objets exposés, selon ses responsables. (Korichi, 2015)

3.2.1 La situation du Musée Bordj Moussa

Bordj Moussa est situé sur la hauteur de l'ancienne ville de Béjaïa, lui permettant de surplomber la ville basse ainsi que le port. Ce site stratégique, qui lui permet d'assurer une très bonne surveillance des secteurs urbains principaux, ainsi que des autres systèmes défensifs tels que la Casbah ou le fort Abd El Kader, et se trouve à sa proximité, les anciens quartiers de Bâb Elouz et Karramane. Toutefois, le ravin de Bridja échappe partiellement à son champ de vision.



FIGURE 3.5 – La situation du musée Bordj Moussa.

Source : Autodesk Forma, traité par l’auteur, 2025

3.2.2 Un aperçu historique du musée Bordj Moussa

D’un passé riche en histoire, le Bordj Moussa, emblématique de la ville de Béjaïa, a connu au fil du temps, comme toutes les villes méditerranéennes, des transformations et des bouleversements significatifs au cours de son histoire, façonnée par les civilisations qui s’y sont succédé. À l’époque hammadite (XIe-XIIe siècles) où il a été édifié sur le site du somptueux **Palais de l’Étoile (Kasr El Kawkeb)**, l’un des plus beaux palais de son temps, véritable bijou architectural incarnant le rayonnement de la dynastie hammadite, modèle de luxe et de connaissance de la ville mésohistorique. (Beylié, 1909)

Après la conquête espagnole (1510-1555), Béjaïa devient un bastion défensif. Les Espagnols détruisent les anciens palais pour rebâtir un réseau militaire, à la tête duquel figure **le Fort Impérial**, édifié sur les ruines du Palais de l’Étoile. Ce fort, flanqué de bastions massifs, entré dans une logique défensive correspondait à un impératif stratégique pour contrôler la Méditerranée du temps du roi Charles Quint. (Beylié, 1909)

La prise de la ville par les Ottomans (1555-1833), des alliés des musulmans contre les Espagnols, constitue une autre étape de la réécriture de l’histoire locale, car ce fort devient **le Bordj Moussa**, nom d’un héros local, Moussa, abattu lors d’un assaut contre les Espagnols, mais ayant fait l’objet à juste titre d’une légende. Ce lieu devient à la fois une forteresse militaire ottomane et un symbole patriote de bravoure officielle célébré par la population. Sous le régime colonial de la France, durant la période de 1833 et jusqu’à la période d’indépendance de l’Algérie en 1962, le fort a pris le nom de **Fort Barral** du nom d’un général de l’armée française enterré sur place. Il a été utilisé comme caserne militaire, et a subi plusieurs réaménagements qui l’ont éloigné de son caractère originel. (Hammouche, 2019)

Après 1962, le fort a perdu ce nom pour redevenir **Bordj Moussa**. Utilisé pendant une très courte période par l’ALN, il a été progressivement laissé à la dégradation jusqu’à une réhabilitation en fin de années 1980. En 1989, il a été inauguré et aménagé pour devenir musée, avec des collections à visée scientifique et patrimoniale. À l’heure actuelle, bien qu’attendant

une opération de restauration, Bordj Moussa reste un haut lieu de mémoire ouvert au public et porteur d'une valeur historique et symbolique certaine. (Hammouche, 2019)

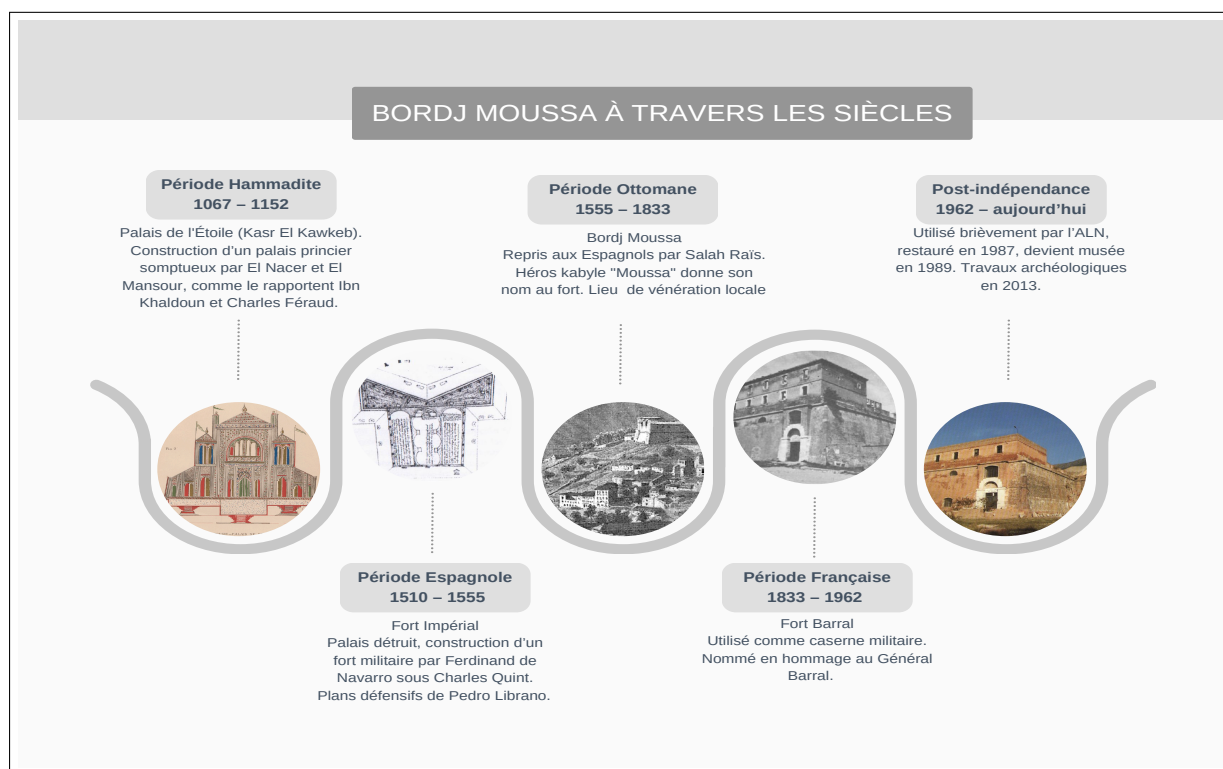


FIGURE 3.6 – Frise chronologique des grandes périodes historiques de Bordj Moussa.

Source : Auteur, 2025

3.2.3 Présentation du site d'intervention

Le site s'étend sur une superficie de 8 904 mètres carrés, situé dans la ville ancienne de Béjaïa, proche du quartier Karaman. Il se trouve au Nord-Ouest du quartier Bâb El-Lûz et délimité : au nord par l'hôpital Franz Fanon, à l'ouest par le lycée El Houria, au sud par le quartier résidentiel Karaman, à l'est par les habitations de Bâb El-Lûz, le CEM El Hadi Zerouki, la place Sidi Soufi et la place Philippe.

Le fort Moussa est accessible par l'ouest via une rue secondaire, la rue Touati Mourad, qui relie la vieille ville au reste de Béjaïa. Cette entrée mène à un espace vert qui entoure le fort. Il peut également être atteint depuis la rue Fatima, la plus ancienne voie de la vieille ville et l'un des deux axes structurants de la cité. Bien que Bordj Moussa ne donne pas directement sur cette rue, une impasse composée d'escaliers assure la liaison entre les deux. Au sud, l'accès s'opère par une rue tertiaire : la rue Maheiddin Belhoucine. L'accès à l'intérieur du fort se fait par le côté droit du mur sud. Deux autres portes murées, sur les ailes est et ouest, permettent aussi d'entrer dans le fort.

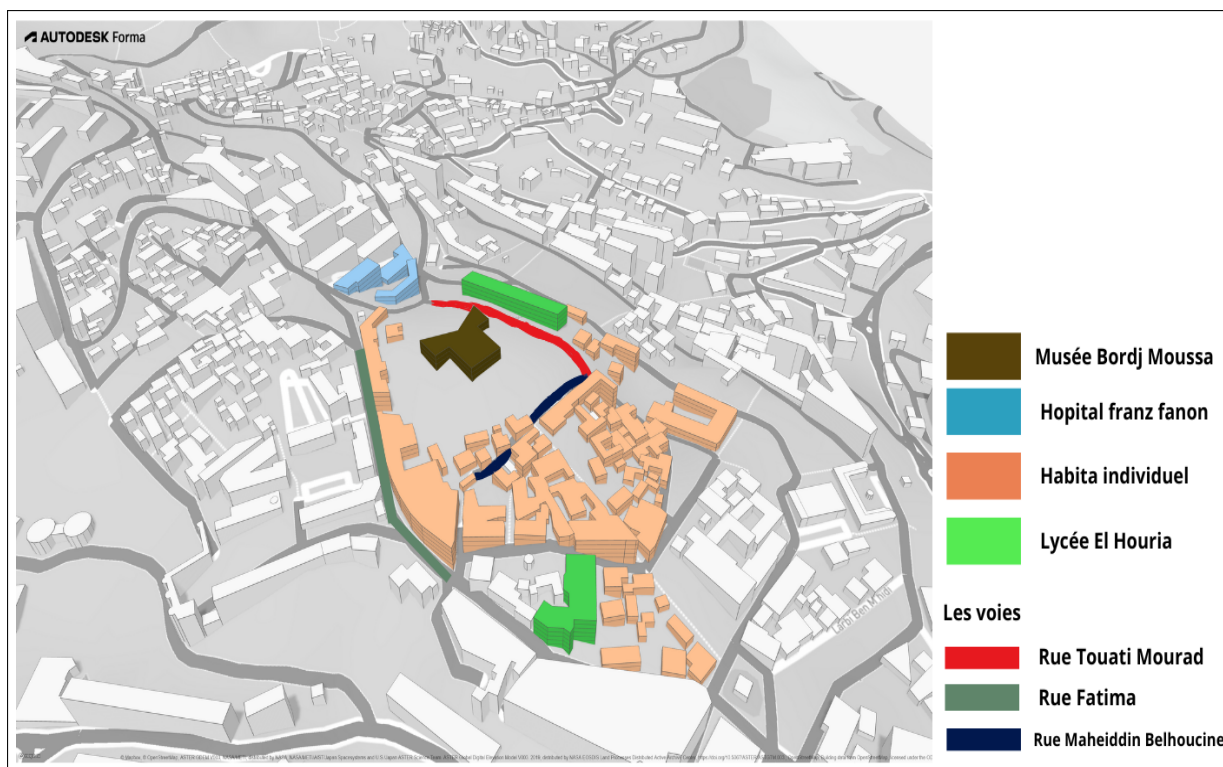


FIGURE 3.7 – Environnement immédiat et accessibilité de Bordj Moussa.

Source : Autodesk Forma, traité par l'auteur, 2025

3.2.4 Analyse architecturale du musée Bordj Moussa

Le plan du fort dessiné par LIBRANO est un plan rectangulaire qui comporte le corps du fort, avec des bastions latéraux, il occupe une surface de 1340.88m² et au niveau Bâb El Lûz au R+2 avec un sous-sol. « Le fort a de gros murs à talus dont la hauteur est de 100 pieds et l'épaisseur de 35 pieds, avec douze ouvertures pour les batteries » (Vilar Jean, 1988). Ces murs inclinés étaient la réponse à la nécessité de la défense contre l'artillerie moderne, dont le canon et la bombarde constituaient les outils principaux, puisque leur pente déviait les projectiles et amortissait également le choc des impacts directs.



FIGURE 3.8 – Musée Bordj Moussa

Source : Auteur, 2025.

1. Les Plans

a. Le rez de chaussée

Le rez-de-chaussée est le seul niveau construit par les Ottomans. Il est constitué de trois nefs voûtées, dont la centrale est plus haute que les deux latérales, soutenues par de puissants piliers

adossés aux murs inclinés dans un but défensif. L'ensemble a une hauteur de 9,44 mètres. À l'entrée, un grand hall rectangulaire de 94,85 m². À droite, une salle triangulaire de 66,2 m², à gauche, deux petites salles sont ajoutées à l'époque coloniale française. Ces derniers ont aussi construit un étage, un escalier en tunnel, un demi-plancher au-dessus de l'entrée principale, un escalier qui mène à l'étage supérieur, puis un autre côté ouest qui descend vers le sous-sol aujourd'hui affecté aux expositions.

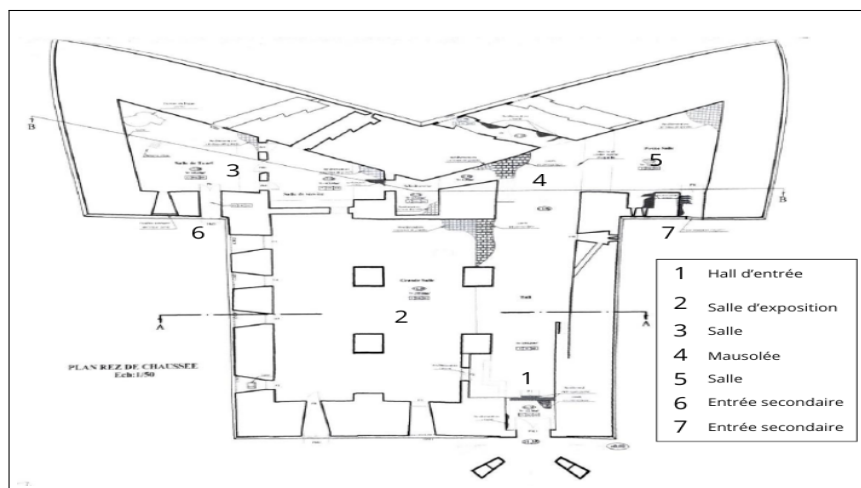


FIGURE 3.9 – Plan rez-de-chaussée.

Source : Bureau d'étude Mahindad, traité par l'auteur, 2025.

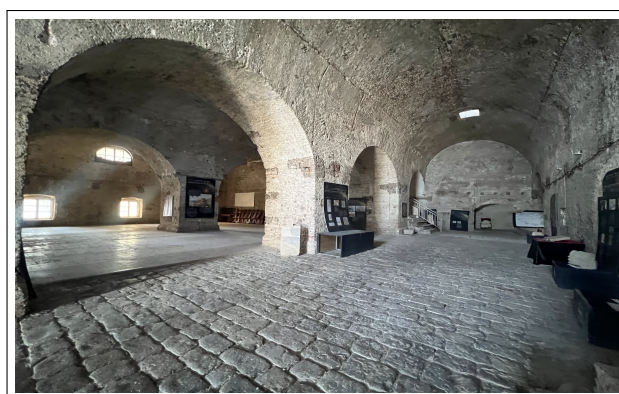


FIGURE 3.10 – Espace d'exposition.

Source : Auteur, 2025

b. L'étage

Le premier étage, ajouté par les Français, à une hauteur de 3,4 m, et des murs extérieurs verticaux, en opposition aux murs d'angle inclinés du rez-de-chaussée ottoman. L'accès se fait par un escalier situé au rez-de-chaussée, qui mène vers une terrasse puis vers cinq espaces intérieurs : un bureau de direction, un secrétariat, un bureau administratif, une salle de réserve pour le musée et enfin une salle centrale dédiée à la bibliothèque.

Un second escalier aboutit sur la terrasse supérieure, offrant à ses occupants une vue sur l'ensemble de la ville de Béjaïa, sur les monts Babor, le mont Gouraya et la mer.

Sur son côté sud, dit côté mer, se trouvent quatre bureaux administratifs de forme rectangulaire et une bibliothèque : Bureau 1 : 13,55 m². Bureau 2 : 17,03 m². Bureau 3 : 15,5 m². Bureau 5 : 17 m². Bibliothèque : 41,5 m².

Le tout complété par une grande terrasse de 381,8 m², un sanitaire de 16,29 m² sous l'escalier, ainsi que plusieurs terrasses secondaires de différents niveaux, percées de petites ouvertures de surveillance : aménagements qui témoignent de l'usage administratif du fort à cette époque, mais qui laissent aussi supposer la volonté d'en faire un poste d'observation.

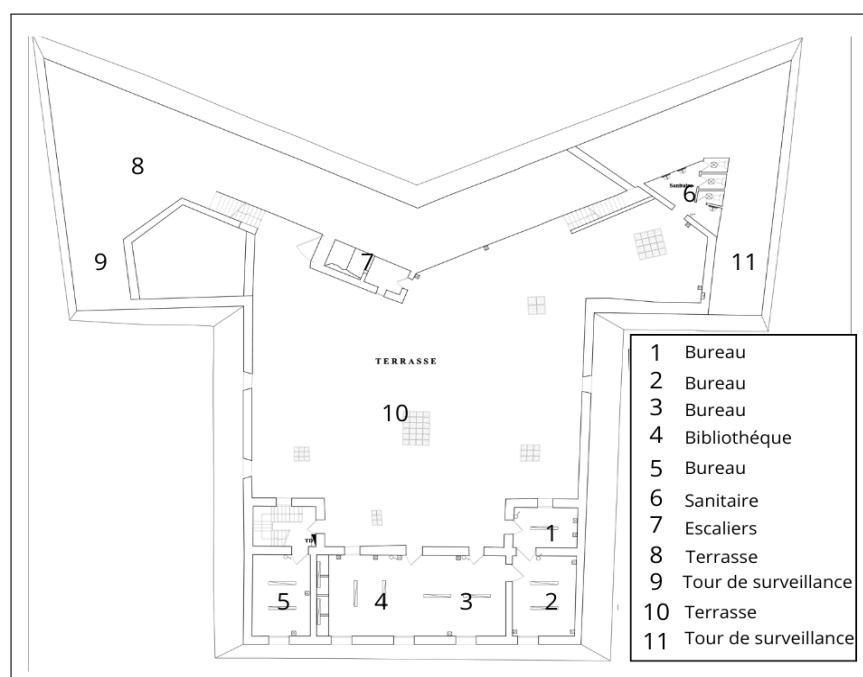


FIGURE 3.11 – Plan de l'étage

Source : Bureau d'étude Mahindad, traité par l'auteur, 2025

c. Le Sous-sol

On accède à ce niveau, par un escalier balancé situé côté ouest au rez-de-chaussée, à l'endroit où un tunnel s'étire sous les parois extérieures et fait le tour complet du fort. Le sous-sol comporte un canal de 1 mètre de large et 1,5 mètres de profondeur, et qui fait le tour de l'ensemble du bâtiment. Ce canal est un système récupérateur des eaux de pluie, qui s'inspire des anciennes citernes romaines, et qui alimente des réservoirs placés à l'extérieur du fort.

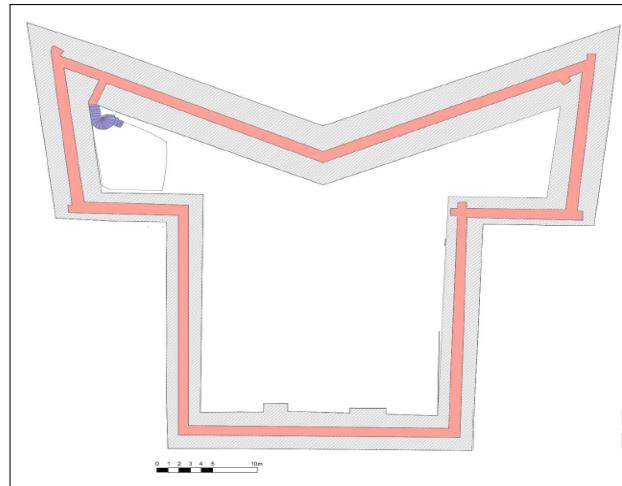


FIGURE 3.12 – Plan du sous-sol

Source : Bureau d'étude Mahindad, 2025



FIGURE 3.13 – Le tunnel

Source : Auteur, 2025

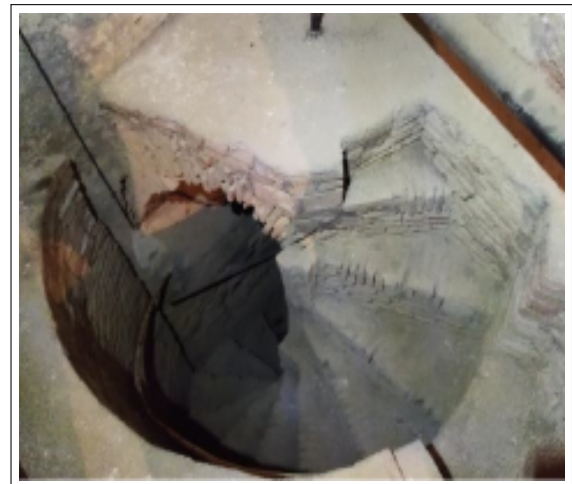


FIGURE 3.14 – L'escalier balancé

Source : Auteur, 2025

2. Les Façades

Le Bordj Moussa est un édifice dont les caractéristiques architecturales ont un fort impact sur l'apport en lumière naturelle au sein de ses espaces intérieurs. En étudiant les façades, nous comprenons comment sa conception d'origine, élaborée dans un contexte de préoccupations défensives, impacte le confort visuel des usagers dans son nouvel usage en tant qu'espace d'exposition.

. La façade sud

La façade sud, principale, est la plus animée. Sa composition mixte – héritage de l'époque ottomane au rez-de-chaussée, de l'époque coloniale à l'étage – comporte plusieurs ouvertures significatives. La grande porte principale (surmontée d'un arc en plein cintre) et flanquée de fenêtres de type ottoman puis colonial, sans oublier l'ajout français d'un plancher et de fenêtres rectangulaires, laisse entrer une certaine quantité de lumière naturelle, bien que très limitée en taille et en disposition limitant leur effet lumineux à des zones précises de l'espace intérieur.



FIGURE 3.15 – Façade sud

Source : Auteur, 2025.

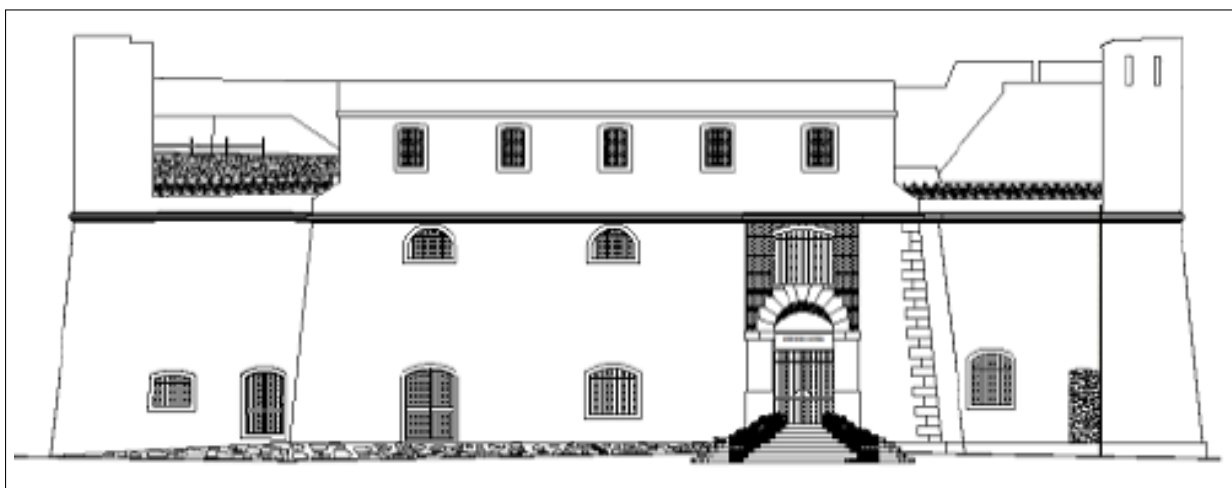


FIGURE 3.16 – Façade sud

Source : Auteur, 2025

. La façade ouest

La façade ouest présente également une superposition de styles. Bien que des fenêtres à arc en plein cintre et quelques petites ouvertures demi-circulaires soient présentes, l'absence de régularité et de symétrie dans leur répartition réduisent leur efficacité en termes d'éclairage naturel. Ces ouvertures contribuent plutôt à des jeux de lumière ponctuels qu'à un éclairage uniforme de l'espace.

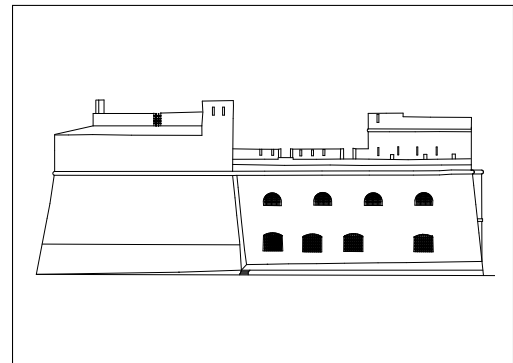


FIGURE 3.17 – Façade ouest

Source : Auteur, 2025.

. La façade nord

La façade nord, le côté gauche est occupé par cinq fenêtres, permettrait donc à la lumière de mieux pénétrer dans certains espaces de l'intérieur sans influencer l'aspect très compartimenté du bâtiment, la majorité des éléments de cette façade étant aveugles, accentuant l'effet de clarté localisée plutôt que diffuse.

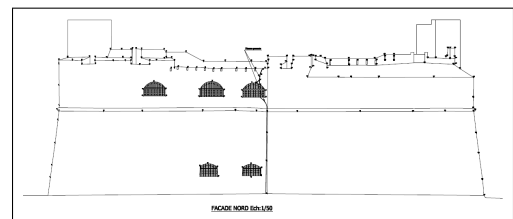


FIGURE 3.18 – Façade nord

Source : Auteur, 2025.

. La façade est

La façade est est la moins perméable à la lumière, ne comportant qu'une ouverture de type ottoman (aujourd'hui murée) et de petites meurtrières rectangulaires destinées à surveiller l'extérieur mais qu'on pourrait réellement qualifier d'éclairage utile.

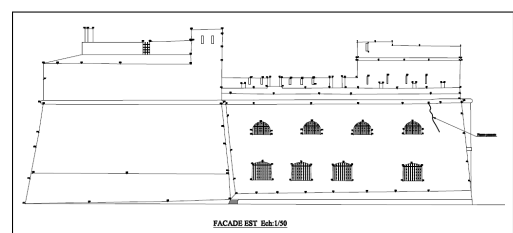


FIGURE 3.19 – Façade Est

Source : Auteur, 2025.

3. Les types d'ouvertures




Type	Illustration	Description
Arcs surbaissés		Ouverture aplatie pour passages larges, architecture militaire.
Arcs en plein cintre		Demi-cercle parfait, stabilité structurelle renforcée.
Meurtrières rectangulaires		Petites ouvertures défensives laissant passer peu de lumière.

TABLE 3.2 – Types d'ouvertures du Bordj Moussa

Source : Auteur, 2025

3.3 Approche méthodologique de l'évaluation du confort visuel dans un espace muséographique

3.3.1 La méthodologie expérimentale

La partie pratique de ce travail repose sur deux méthodes complémentaires : d'une part, une méthode quantitative fondée sur des relevés in situ, à partir d'une application mobile luxmètre et de simulations de calculs numériques avec un logiciel (Dialux) permettant de mesurer, d'analyser les niveaux d'éclairement de l'espace d'exposition étudiés, à comparer avec les valeurs de référence des normes internationales du confort visuel.

D'autre part, une méthode qualitative et subjective avec une enquête par questionnaire, pour recueillir les impressions et ressentis d'un échantillon représentatif de visiteurs, afin de confronter ces données aux résultats techniques obtenus et évaluer plus largement la perception du confort visuel dans les espaces analysés.

3.3.2 Prise de mesure in situ

Dans le but de mieux appréhender le comportement visuel des usagers et d'évaluer quantitativement le confort visuel au sein de l'espace d'exposition, des mesures in situ d'éclairement ont été menées à partir d'une application luxmètre selon un protocole détaillé ultérieurement.

A. Instrument de mesure

L'éclairement lumineux a été mesuré à l'aide d'une application mobile « Luxmètre » utilisée en alternative au luxmètre classique. En effet, il s'agit d'un outil qui permet d'estimer l'éclairement reçu par une surface, en lux. Ce choix a été fait en raison de la difficulté à se procurer l'appareil de mesure correspondant.

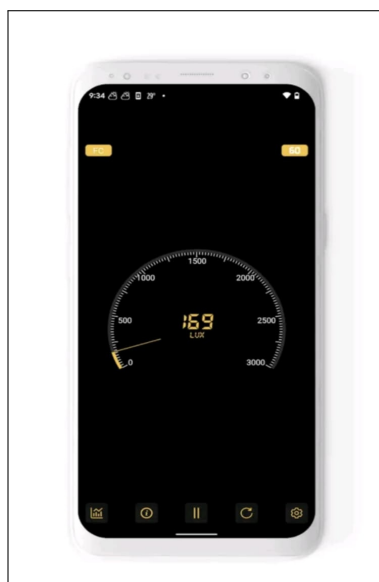


FIGURE 3.20 – Application Luxmètre

Source : Play Store, 2025.

B. Conditions climatiques lors des mesures

Les prises de mesures ont été réalisées sous un ciel clair, car il s'agit du type de condition le plus commun dans les villes de région méditerranéenne comme Béjaïa.

C. Protocole de mesure

- Les mesures de l'éclairement lumineux ont été réalisées in situ au rez-de-chaussée du musée Bordj Moussa à Béjaïa en date du 30 avril 2025 à 13h, sous ciel clair, pendant la saison de printemps. Le choix de prendre les mesures à 13h est en fait fondé sur les observations que l'ensoleillement est particulièrement fort à ce moment de la journée et c'est là où l'on peut espérer estimer l'éclairement optimal qu'un espace peut fournir en conditions favorables ; il s'agit bien d'une valeur de référence pertinente pour évaluer l'efficacité de l'éclairage naturel de l'espace muséographique.
- La prise de mesures s'est faite sur un quadrillage formé par une trame de 6 m × 6 m appliquée sur le plan du rez-de-chaussée du musée. Le choix de cette grande trame découle des recommandations pédagogiques, selon lesquelles un maillage plus fin serait peu adapté à un espace peu ouvert sur l'extérieur, tel que c'est le cas pour le musée avec un nombre très restreint d'ouvertures. En effet, un quadrillage trop dense n'aurait pas

permis de tirer des conclusions plus significatives mais aurait seulement engendré une collecte de données superflues. Ce quadrillage assure la répartition homogène des points de mesure dans le bâtiment en tenant compte des spécificités de manière à prendre en compte ses ouvertures.

- Tout au long de la période de mesure, l'éclairage artificiel a été éteint afin d'éviter toute interférence avec le flux lumineux de l'environnement, précisant ainsi la valeur et la bonne qualité des résultats. Cela permet bien de savoir uniquement le rôle de l'éclairage naturel apporté par les fenêtres et autres ouvertures, sans aucune emprise d'éclairage artificiel.
- Les relevés d'éclairage ont été réalisés à hauteur de mon téléphone, correspondant à environ 1,60 m par rapport au sol. À chaque point de mesure, on occupe le centre de chaque carré de la grille, ce qui garantit une bonne répartition des points de mesure et permet de bien représenter l'éclairage naturel, dans l'ensemble de l'espace, selon la spécificité architecturale du musée et de ses emplacements ouverts.

D. Traitement des données recueillies lors des mesures

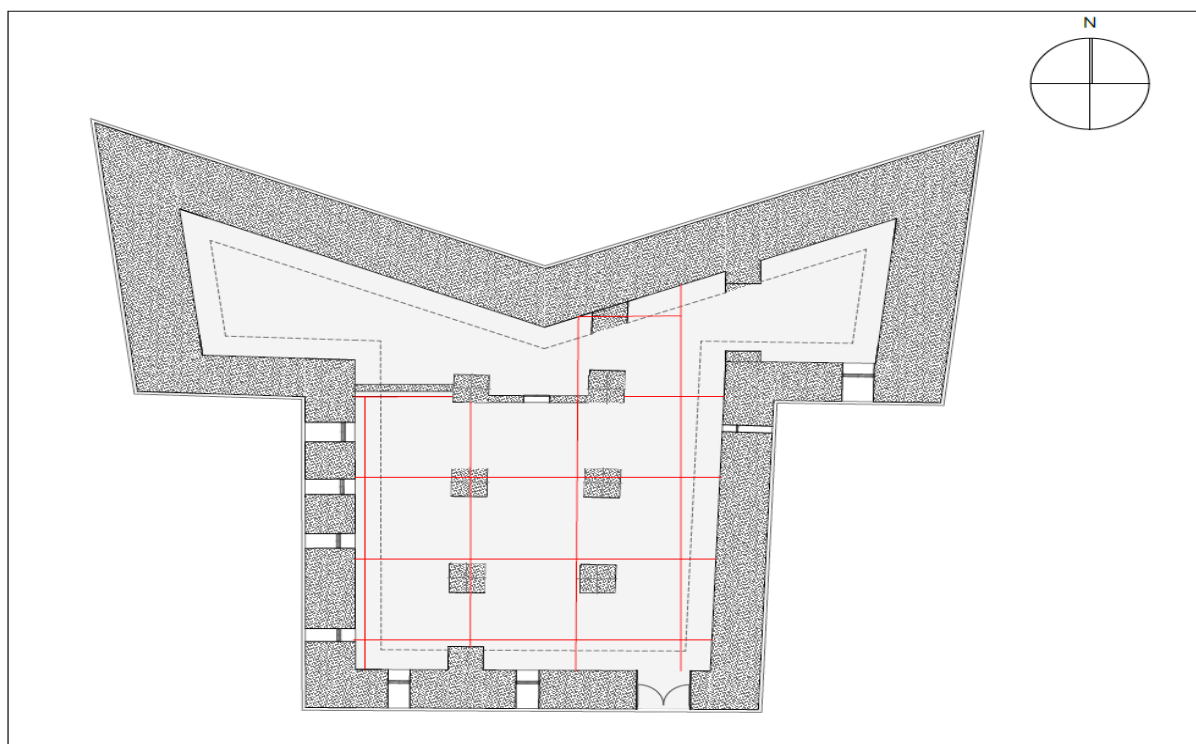


FIGURE 3.21 – La grille de mesure

Source : Auteur, 2025.

3.3.3 La simulation

La simulation numérique se positionne comme un outil incontournable d'analyse et d'évaluation des conditions d'éclairage à l'intérieur du musée Bordj Moussa, tout comme elle se trouve au cœur de la recherche sur le confort visuel, dans le cadre de cette recherche. La lumière contribue en effet à la valorisation des objets exposés, à la perception et au bien-être des visiteurs.

La simulation va permettre de reproduire de manière numérique, grâce à un logiciel dédié, la distribution de la lumière naturelle et/ou artificielle à l'intérieur des différents espaces du musée. Ce moyen de recherche autorise d'évaluer la qualité des ambiances lumineuses sans se soucier des conditions climatiques ou temporelles du moment, atout pour une recherche sur une période courte.

1. Présentation du logiciel DIALux Evo

Dans le cadre de cette étude, le logiciel DIALux Evo 12.0 (64 bits) a été choisi pour réaliser la simulation numérique de l'éclairage du musée Bordj Moussa de Béjaïa. DIALux a été développé par DIAL GmbH, entreprise allemande spécialisée dans les technologies du bâtiment et de l'éclairage, fondée en 1989. DIALux est un logiciel gratuit connu en conception lumineuse. L'édition de DIALux a vu le jour en 1994, DIALux Evo a été lancée en 2012, plus aboutie.

À la différence de la version classique, DIALux Evo permet un rendu plus élaboré des espaces intérieurs et extérieurs. Il fournit un large éventail de fonctionnalités, parmi lesquelles :

- Le calcul de l'éclairage naturel et artificiel, du point de vue de l'éclairement, de la luminance et du facteur de lumière du jour .
- La modélisation complète du bâtiment, incluant la possibilité de plusieurs étages et son contexte extérieur.
- La prise en compte de différents types de ciel (clair, moyen, couvert).
- La visualisation 3D réaliste des espaces modélisés, avec rendus lumineux.
- L'étude d'ombrage et l'analyse de la répartition de la lumière par le biais de graphiques de valeurs et de fausses couleurs.
- L'import de modèles 3D depuis Revit et également aux formats DXF, DWG et d'images.
- La bibliothèque d'objets et de textures pour un paramétrage fin du mobilier, des matériaux, des ouvertures et des parois.

2. Les étapes de la simulation

A. Description de l'interface de démarrage de DIALux evo

L' interface d' accueil de DIALux evo est structurée en trois colonnes majeures :

a.Définir un nouveau projet (colonne de gauche) : Cette partie laisse à l' utilisateur le choix de créer un nouveau projet selon différents types de planification :

- Planification extérieure et de l'édifice.
- Plan d'importation (format DWG).
- Importer l'IFC (fonctionnalité Pro).
- Planification de la pièce.
- Éclairage des rues.
- Planification intérieure simple

b. Éditer projet déjà existant (au centre) : Elle permet d'ouvrir un projet qui a été préalablement enregistré. Un moteur de recherche permet de trouver les projets enregistrés .

c. Autres sujets (colonne de droite) : Cette colonne offre un accès à des ressources utiles telles que :

- Sélectionner vos marques (bibliothèques de luminaires).
- Academy (formations).
- Knowledge base (base de connaissances).
- YouTube et Youku (tutoriels vidéo).

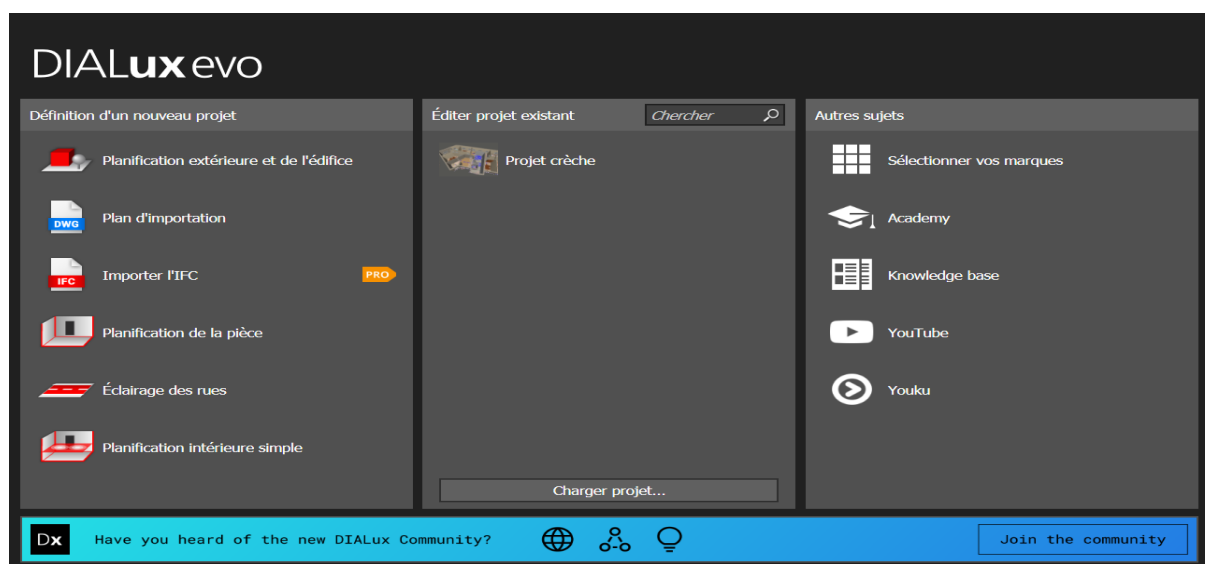


FIGURE 3.22 – Interface DIALux evo

Source : Dialux Evo, auteur, 2025

B.Importation d'un plan DWG

Dans notre cas, nous allons modéliser le bâtiment en nous appuyant sur l'importation d'un plan DWG, en suivant les étapes ci-dessous :

Étape 01 : Cliquer sur importer du plan.

Étape 02 : Sélectionne le plan qui nous convient.

Étape 03 : Une fois le fichier s'ouvre on dessine l'origine de l'axe du projet.

Étape 04 : On détermine l'échelle de dessin.

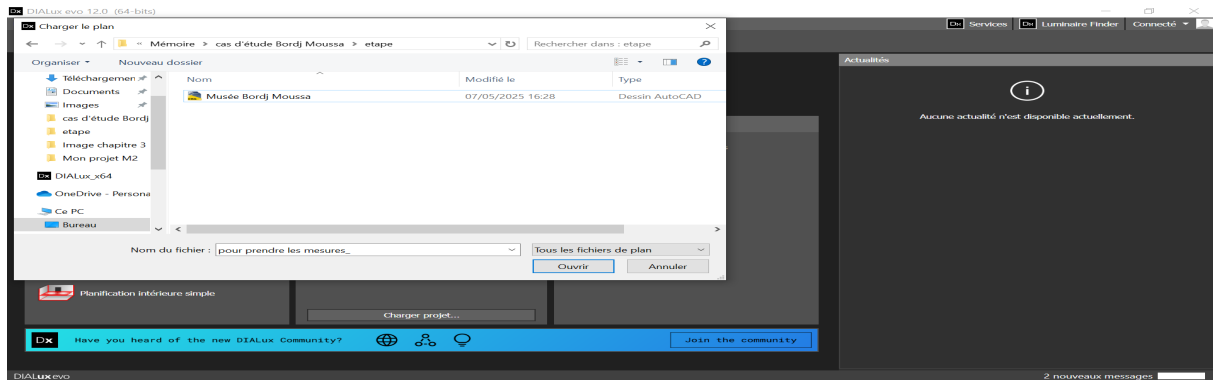


FIGURE 3.23 – Importer le plan DWG

Source : Dialux Evo, auteur, 2025

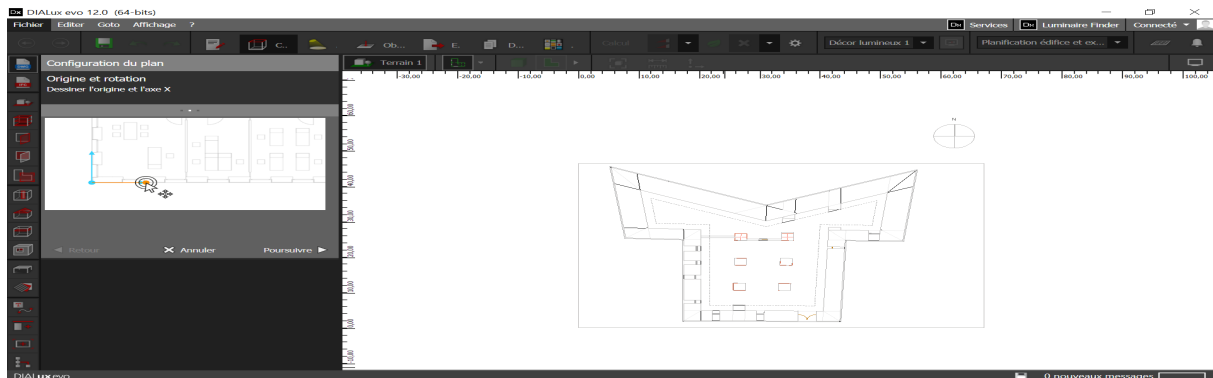


FIGURE 3.24 – Dessiner l'origine de l'axe du projet

Source : Dialux Evo, auteur, 2025

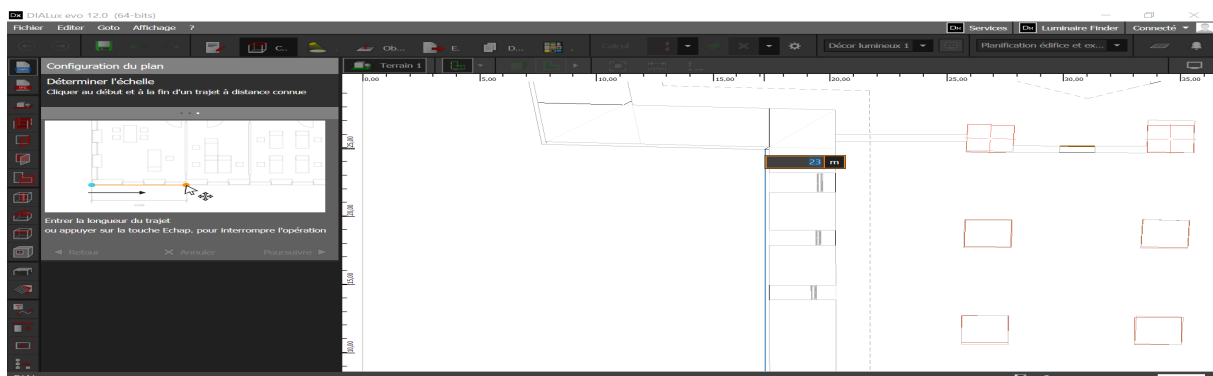


FIGURE 3.25 – Détermination de l'échelle

Source : Dialux Evo, auteur, 2025

C.L'orientation du projet

Étape 01 : Passe en mode construction.

Étape 02 : Passe au sous mode terrain.

Étape 03 : Régle l'orientation du terrain.

Étape 04 : Sélectionne l'outil dessiner pointeur nord.

Étape 05 : Positionne l'orientation nord sur le dessin.

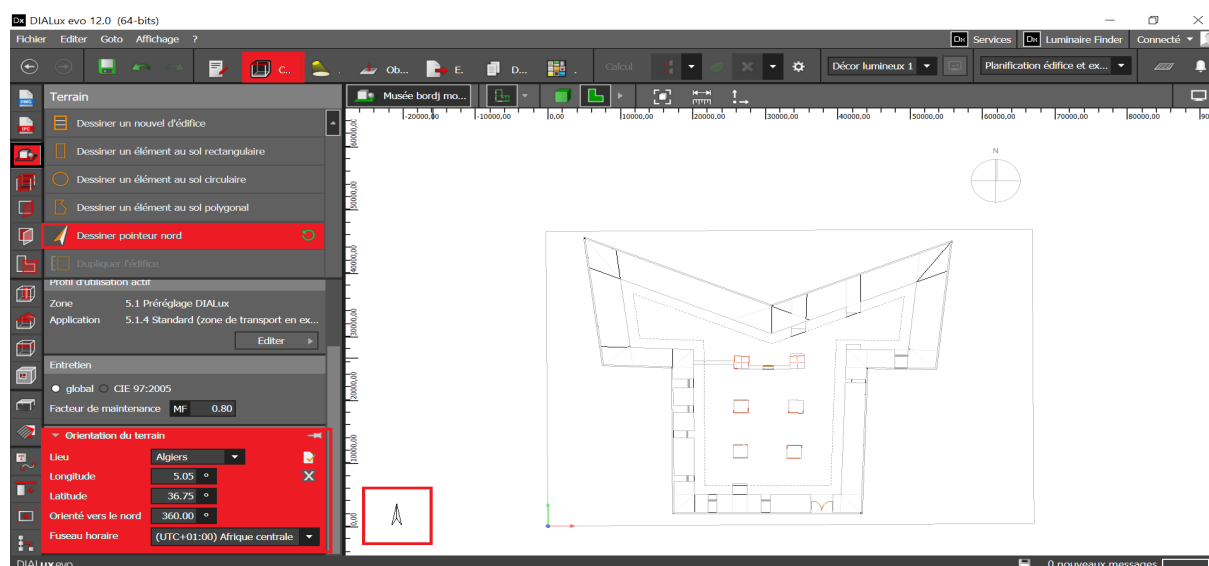


FIGURE 3.26 – Orientation du projet

Source : Dialux Evo, auteur, 2025

D. Modélisation du projet

Étape 01 : Passer en mode construction .

Étape 02 : Passe au sous mode terrain ;

Étape 03 : Sélectionne l'outil vue du plan d'ensemble

Étape 04 : sélectionne l'outil dessiner un nouvel édifice.

Étape 05 : dessine le contour extérieur du bâtiment en déterminant la hauteur de l'étage.

Étape 06 : Passe au sous mode construction d'étage et édifice.

Étape 07 : Sélectionne dessiner une nouvelle pièce.

Étape 08 : dessine les pièces intérieures du bâtiment.

Étape 09 : rajoute les autres étages en cliquant sur l'outil « nouvel étage vide ».

Étape 10 : Suivre les mêmes étapes pour modéliser les autres étages .

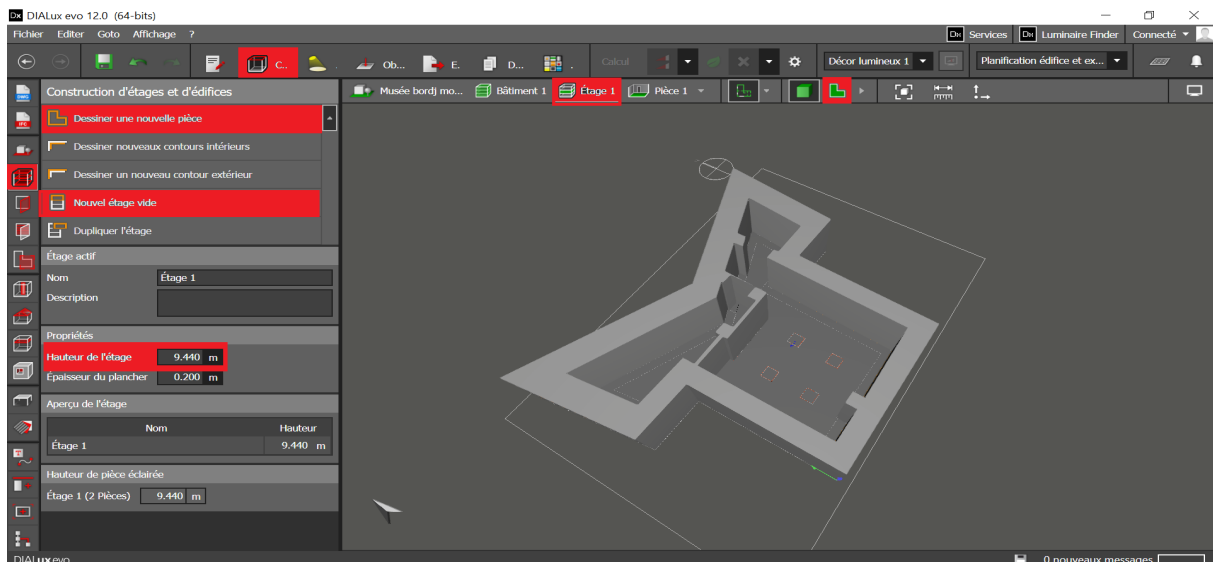


FIGURE 3.27 – Modélisation du projet

Source : Dialux Evo, auteur, 2025

Étape 11 : Positionner les ouvertures.



FIGURE 3.28 – Modélisation du projet

Source : Dialux Evo, auteur, 2025

E. Vérification préliminaire

Avant de lancer un calcul de la lumière naturelle, il faut activer l'option "Important pour la lumière du jour"

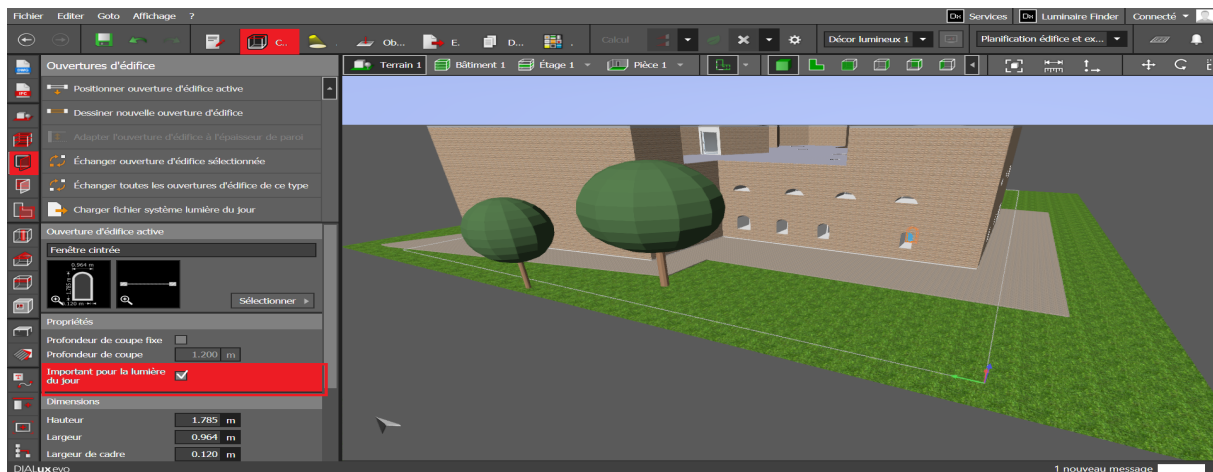


FIGURE 3.29 – Vérification préliminaire

Source : Dialux Evo, auteur, 2025

F. Choisir le type de ciel, la journée et l'heure

Étape 01 : Passer en mode lumière.

Étape 02 : Passer au sous-mode scènes d'éclairage.

Étape 03 : Sélectionner le type de ciel ainsi que la date et l'heure.

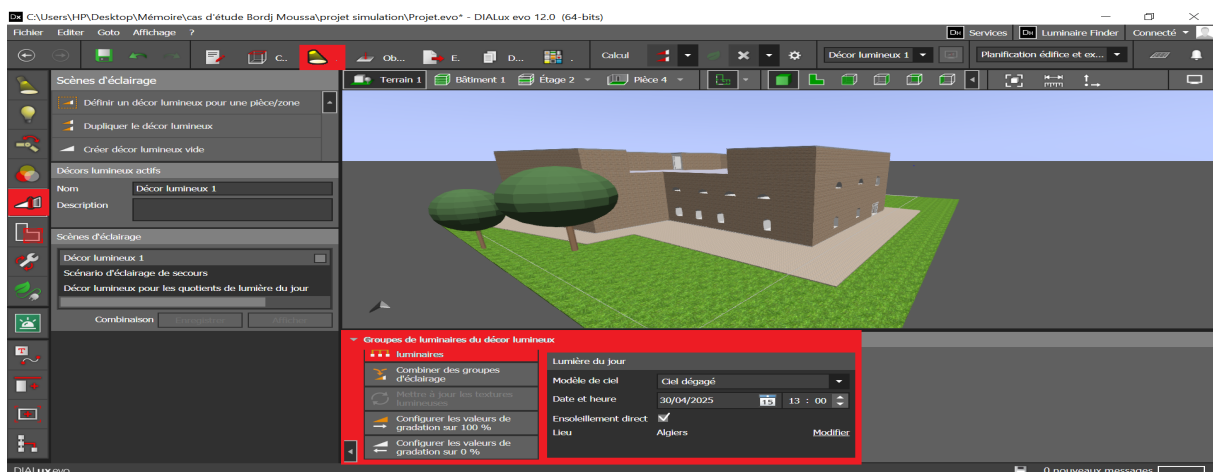


FIGURE 3.30 – Le choix du type de ciel

Source : Dialux Evo, auteur, 2025

G. Lancement des calculs

Étape 01 : Cliquer sur l'angle « démarrer le calcul »



FIGURE 3.31 – Lancement des calculs

Source : Dialux Evo, auteur, 2025

Étape 02 : Une fois le calcul est terminé, on passe au mode objets de calcul

Étape 03 : On passe au sous mode plans utiles.

Étape 04 : On choisit la hauteur du plan utile

Étape 05 : Puis On choisit le mode d'apparition des résultats (courbes isophotes, fausses couleurs ou numérique).

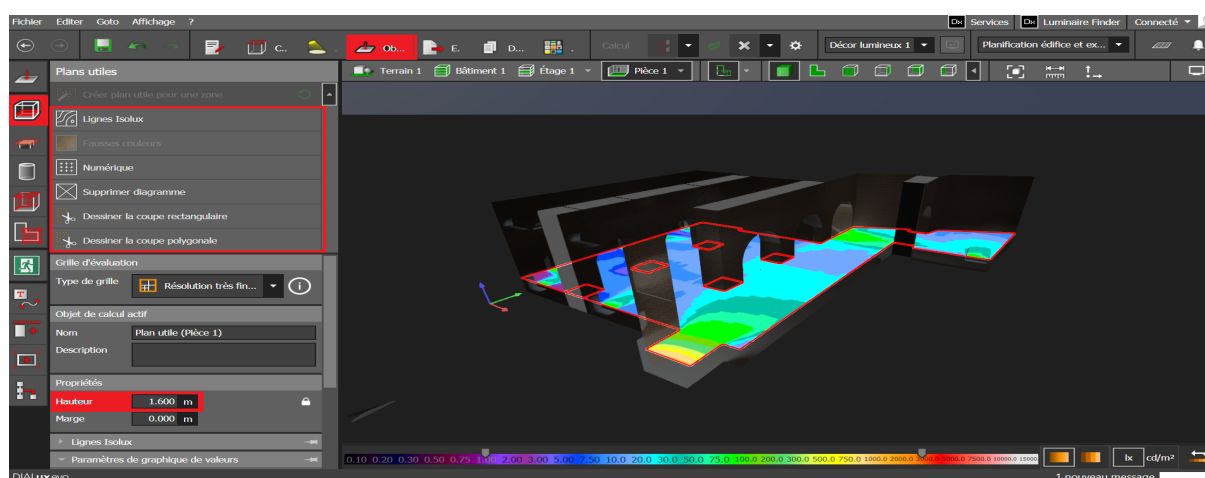


FIGURE 3.32 – Résultats de la simulation

Source : Dialux Evo, auteur, 2025

3.3.4 L'enquête par questionnaire

Dans le cadre de cette étude sur le confort visuel dans les espaces d'exposition du musée Bordj Moussa à Béjaïa, une enquête par questionnaire a été réalisée auprès des usagers afin de récolter des données qualitatives sur leur perception de l'éclairage. Cet outil permet de mesurer leur satisfaction, leur ressenti, leurs préférences en matière d'ambiance lumineuse dans les différentes salles d'exposition.

1. Définition du questionnaire

Le questionnaire est un instrument de collecte de données caractérisé par la constitution d'un ensemble de questions, structurées, posées à un échantillon d'individus. C'est une méthode de compréhension des comportements, des perceptions, des attentes des usagers. Bien construit, il permet d'obtenir des résultats exploitables et de réduire la subjectivité de l'analyse. (Vilatte, 2007)

2. La population ciblée

Les personnes ciblées par cette enquête sont des visiteurs du musée Bordj Moussa, qu'ils soient habitués ou occasionnels. Les usagers ayant déjà une expérience vécue de l'espace muséal sont particulièrement légitimes pour donner des avis sur la qualité de l'éclairage dans un cadre réel d'exposition.

L'enquête a été réalisée auprès d'un échantillon de 30 personnes, sélectionnées parmi les visiteurs du musée. Cet échantillon permet d'obtenir des avis variés et représentatifs des différentes perceptions liées à l'ambiance lumineuse.

3. Structure du questionnaire

Dans le cadre de cette étude l'outil de recueil de données est un questionnaire organisé autour de quatre volets principaux qui visent à étudier chacun une facette de l'expérience de la visite du musée Bordj Moussa sous l'angle des perceptions visuelles des visiteurs.

A. Informations générales

Le premier volet a pour but de collecter des données générales sur le profil des répondants afin de permettre d'inscrire les réponses dans un contexte à la fois personnel et comportemental. Il vise à contextualiser les perceptions en fonction des caractéristiques démographiques et sensorielles des visiteurs.

B. Perception de l'éclairage dans les espaces d'exposition

Ce volet évalue la qualité et l'efficacité de l'éclairage (surtout naturel et artificiel) dans les salles d'exposition. Les questions portent sur :

- L'intensité lumineuse perçue.
- L'uniformité de la lumière dans l'espace.
- La lisibilité des informations (cartels, panneaux, etc.).
- L'éventuelle gêne visuelle provoquée par l'éclairage

Il vise à analyser l'adéquation de l'éclairage aux exigences de confort visuel.

C. Perception de l'architecture intérieure

Ce volet concerne la manière dont l'aménagement spatial et architectural influence la perception visuelle et le confort des visiteurs. On interroge :

- Les matériaux, couleurs et textures des murs.
- Les volumes, hauteur sous plafond.
- L'organisation spatiale et la circulation.
- L'impact de l'acoustique sur le confort général.

Il vise à comprendre comment l'environnement bâti contribue à la qualité visuelle perçue.

D. Confort visuel général et propositions

Ce dernier volet propose une évaluation globale du confort visuel ressenti et favorise l'échange avec l'ensemble des visiteurs. Il comporte :

- Une échelle d'évaluation du confort visuel général.
- Les éléments les plus appréciés.
- Les sources de gêne éventuelles et des propositions d'amélioration de l'éclairage ou de l'ambiance spatiale

Afin de capitaliser des retours d'ordre qualitatif et personnel sur l'expérience muséale.

3.4 Résultats de prises des mesures in situ

Les résultats de la prise de mesures in situ du 30 avril 2025 à 13 h ont permis d'évaluer objectivement la qualité de l'éclairage naturel dans l'espace d'exposition du musée Bordj Moussa. Ce choix d'horaire correspond à la période de la journée où l'apport lumineux est en général le plus important par la position haute du soleil et donc par l'arrivée directe de la lumière zénithale. Cette approche vise à représenter une situation d'éclairement maximal, afin d'évaluer le potentiel lumineux réel de l'espace.

- **E_{max}** : 1985 lux.
- **E_{min}** : 35 lux
- **E_{moy}** : 420 lux (valeur moyenne issue des mesures relevées sur la grille 6x6)

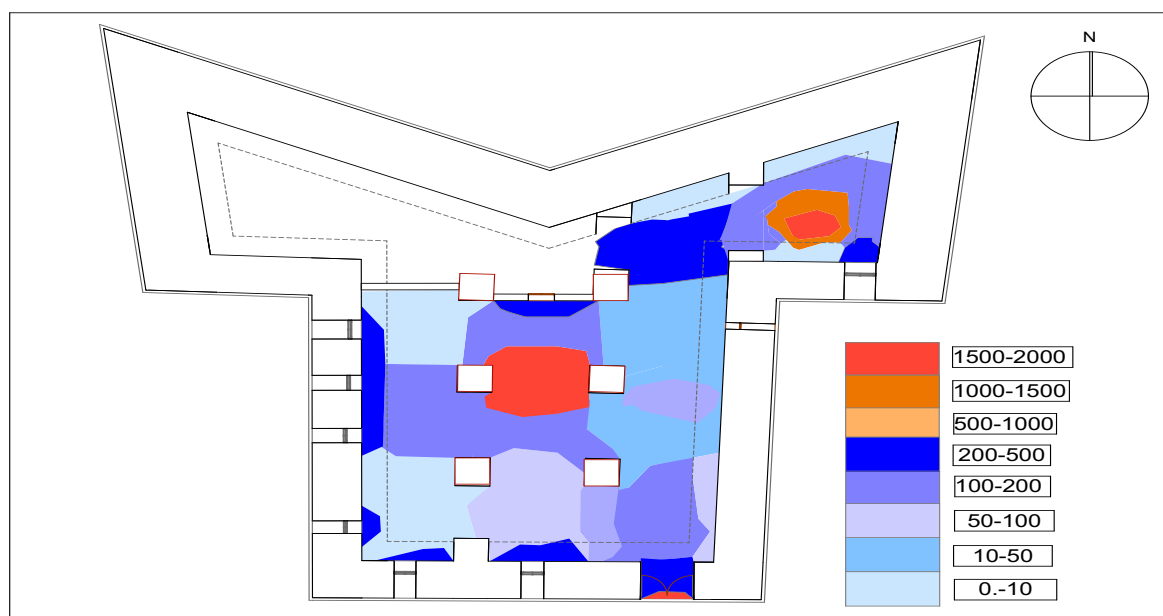


FIGURE 3.33 – Résultats de la prise des mesures à 13h

Source : Auteur, 2025.

La figure ci-dessus, qui traduit une très forte concentration de la lumière naturelle sous certaines ouvertures en toiture, surtout celle du milieu, signalée en rouge sur la trame, qui semble la plus efficace d'un point de vue apport lumineux, atteignant localement des valeurs de près de 2000 lux, soit un ensoleillement direct.

Les autres ouvertures en toiture, qui s'avèrent au nombre de trois au total, sont, en revanche, peu efficaces, peut-être en raison de l'orientation ou de la forme de celles-ci ou parce qu'y règne un ombrage intérieur trop important, ne permettant d'apporter qu'un éclairage diffus ou indirect, donc bien trop faible pour éclairer en profondeur.

Le bilan spatial indique également une nette diminution de l'éclairement au fur et à mesure qu'on s'éloigne des ouvertures et que l'on atteint des secteurs retirés, notamment les coins ou les zones mal desservies en lumière zénithale. On relève alors bon nombre de points à très faible éclairement, c'est-à-dire en-deçà de 100 lux, qui pourrait alors impacter la lisibilité et la mise en valeur des objets exposés.

À 13h, la valeur du niveau d'éclairement moyen atteint 420 lux et satisfait aux exigences d'une situation muséale. Elle correspond aux recommandations (valeurs entre 200 et 500 lux) pour les types d'espaces d'exposition généralistes, tout en préservant les œuvres sensibles. Le recours à ce type de lumière zénithale y est favorable mais mériterait éventuellement des dispositifs de contrôle ou de diffusion (verre dépoli, brise-soleil, filtres) afin d'éliminer les taches solaires localisées et d'assurer une uniformité lumineuse.

3.4.1 Synthèse

Selon les recommandations de la norme EN 12464-1 et les directives de la CIE pour les espaces d'exposition, un éclairage compris entre 200 et 500 lux est considéré comme optimal pour assurer une visibilité correcte des œuvres sans risques de dégradation. La valeur moyenne mesurée dans l'espace d'exposition (420 lux) est donc conforme aux exigences fonctionnelles d'un musée, notamment pour des objets peu sensibles à la lumière.

Cependant, l'hétérogénéité de la répartition lumineuse met en avant la nécessité d'un contrôle ou filtrage de la lumière naturelle, éventuellement via des dispositifs architecturaux ou techniques (verre diffusant, filtres solaires, rideaux motorisés. . .etc) pour garantir un confort visuel homogène et maîtrisé dans tout l'espace de l'exposition.

3.5 Résultats de la simulations

1. Résultats de la simulation de 30 avril à 9h

Selon les résultats de la simulation du 30 avril 2025, à 09h, le logiciel de simulation Dialux indique que l'éclairement de l'espace d'exposition est :

- **E_{moy}** = 250 lux.
- **E_{min}** = 18 lux.

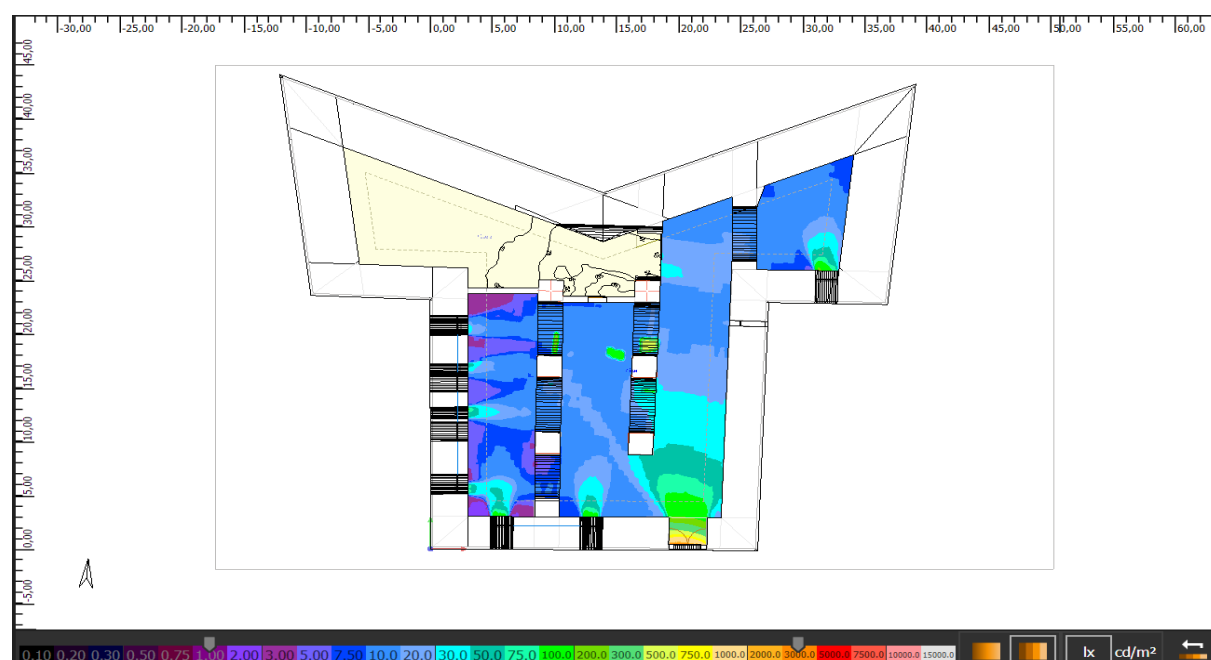


FIGURE 3.34 – Résultats de la simulation à 9h
Source : Dialux Evo, Auteur, 2025.

L'évaluation par fausses couleurs met en évidence une distribution de la lumière naturelle

non homogène au sein de l'espace d'exposition. Les zones les mieux éclairées, qui apparaissent en vert clair, jaune, orange clair se situent entre **200 et 300 lux**, et se trouvent juste à proximité des ouvertures vitrées. Dans celles-ci, des taches solaires bien visibles sont mises en évidence, surtout sur la partie sud-est de la salle, où le soleil du matin entre sans obstacle. A partir de ces ouvertures, les valeurs d'éclairement décroissent au fur et à mesure que l'extrémité de la salle est atteinte, marquées par le passage au bleu clair (**50-100 lux**), au bleu foncé (**20-50 lux**) et au violet (<20 lux) dans les modules centraux. Cette transition nette entre les zones très éclairées et les zones faiblement éclairées illustre un contraste net dans la distribution lumineuse : ce contraste est évalué par le ratio Emin / Emoy, qui dans ce cas est de 0,07, correspondant ainsi à une mauvaise uniformité et à une lumière très variable d'un endroit à l'autre de l'espace. Ainsi au plan de la visibilité, des ambiances très différentes apparaissent même dans la salle, où certains objets connaissent un éclairage très abondant, d'autres sont presque dans une obscurité totale. La lisibilité des informations et la perception des œuvres peuvent ainsi être affectées selon leur emplacement.

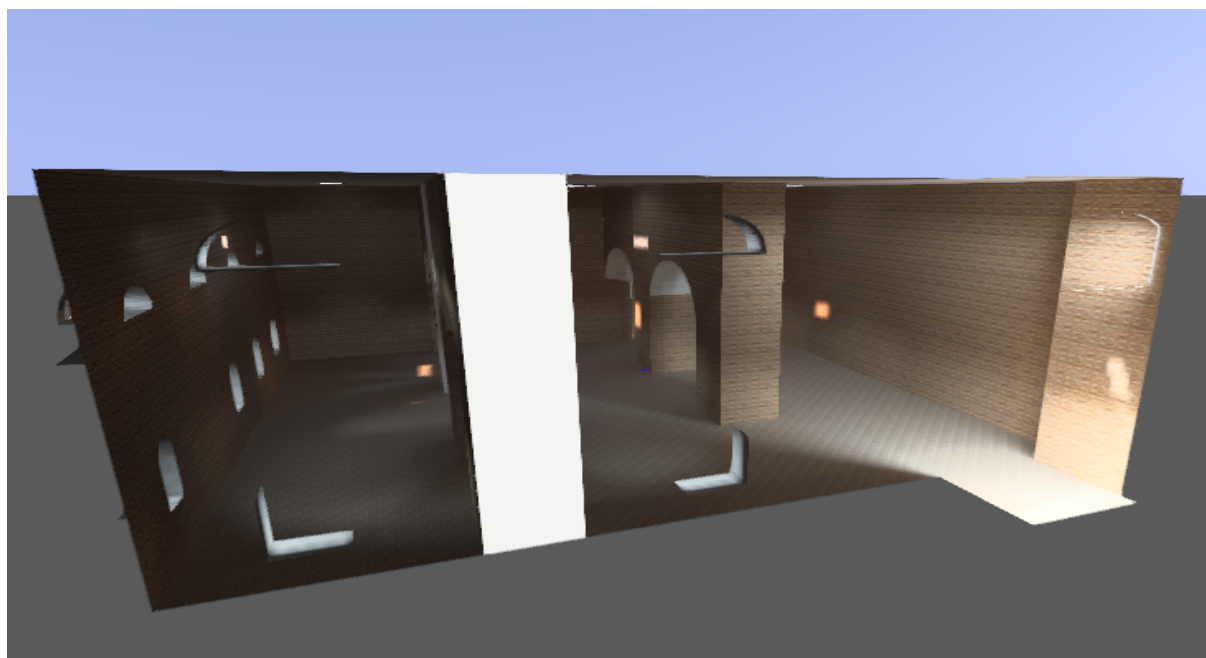


FIGURE 3.35 – La distribution de la lumière à 9h

Source : Dialux Evo, Auteur, 2025

L'analyse de la simulation révèle une tendance : l'éclairage naturel à cette heure-là est très dépendant de la proximité des baies vitrées, ce qui entraîne des zones d'intensité très variable dans l'espace d'exposition. Ce phénomène influencera directement le confort visuel du visiteur, sa perception des objets exposés et l'atmosphère de la salle.

2. Résultats de la simulation de 30 avril à 13h

Les résultats de la simulation du 30 avril 2025, à 13h, le logiciel de simulation Dialux indique que l'éclairement de l'espace d'exposition est :

- **Emoy** = 420 lux.
- **Emin** 30 lux.

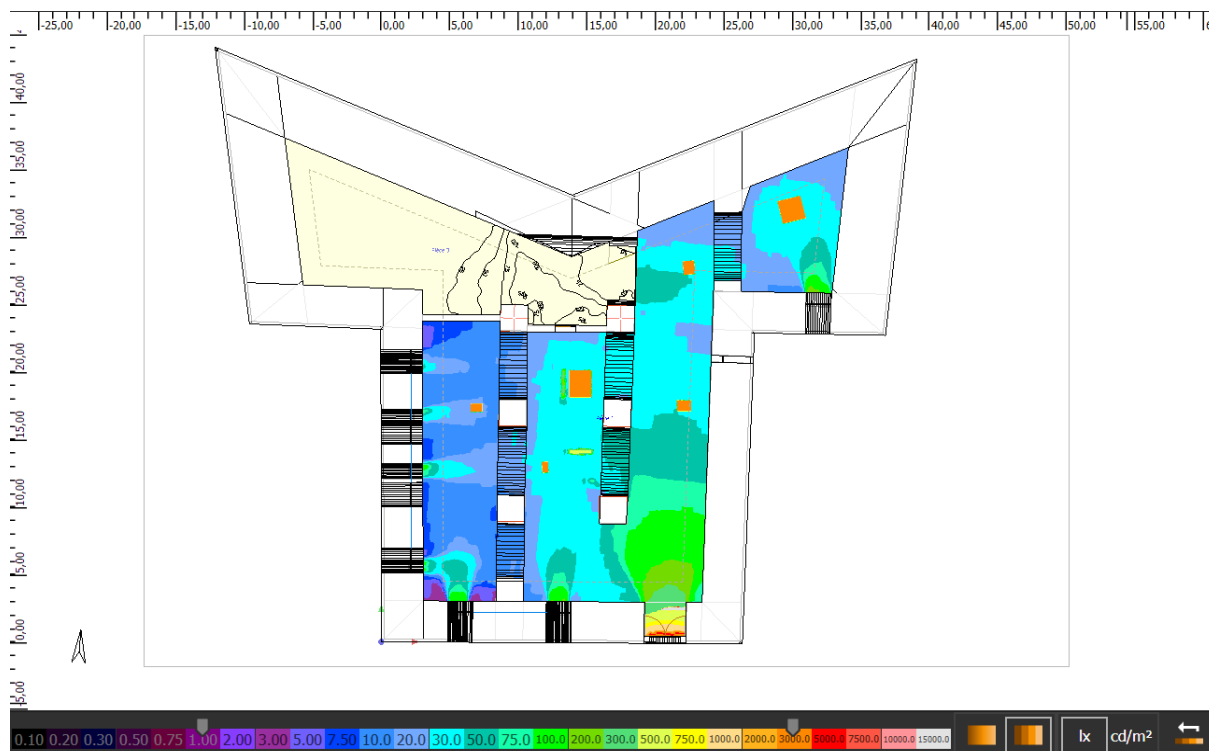


FIGURE 3.36 – Résultats de la simulation à 13h

Source : Dialux Evo, Auteur, 2025

L'analyse de la carte d'éclairement en fausses couleurs (figure ci-dessus) met en évidence une dynamique d'éclairage marquée par un apport zénithal, générant des zones surexposées et d'autres sous-éclairées

L'ouverture centrale en toiture se distingue par son efficacité lumineuse : une concentration très forte de lumière naturelle atteignant même à certains endroits 2000 lux. Cette zone est mise en évidence en orange vif à rouge en représentation des valeurs maximales à 13h. Ce pic engendrera un éblouissement pour les visiteurs et un risque de photodégradation pour les œuvres sensibles placées juste en dessous. À l'inverse, les deux ouvertures zénithales (à gauche et à droite sur le plan) induisent un éclairage beaucoup plus diffus. Les zones qui en dépendent ne dépassent pas les **300–500 lux**, assez pour être acceptables mais révélateurs d'une faible efficacité lumineuse, due à une mauvaise orientation, à la faveur du jaune jusqu'au vert clair, qui montrent un éclairage naturel mais moins intense.

En retrait, plus on s'éloigne de ces sources lumineuses directes, plus l'éclairage décroît. On passe vite à des zones bleues, violettes, soit des niveaux compris plutôt entre **50 et 100 lx**, voire moins de 30 lx dans les angles de la salle. Ces très faibles valeurs semblent remettre en cause la lisibilité des cartels ou la perception des détails des objets exposés.

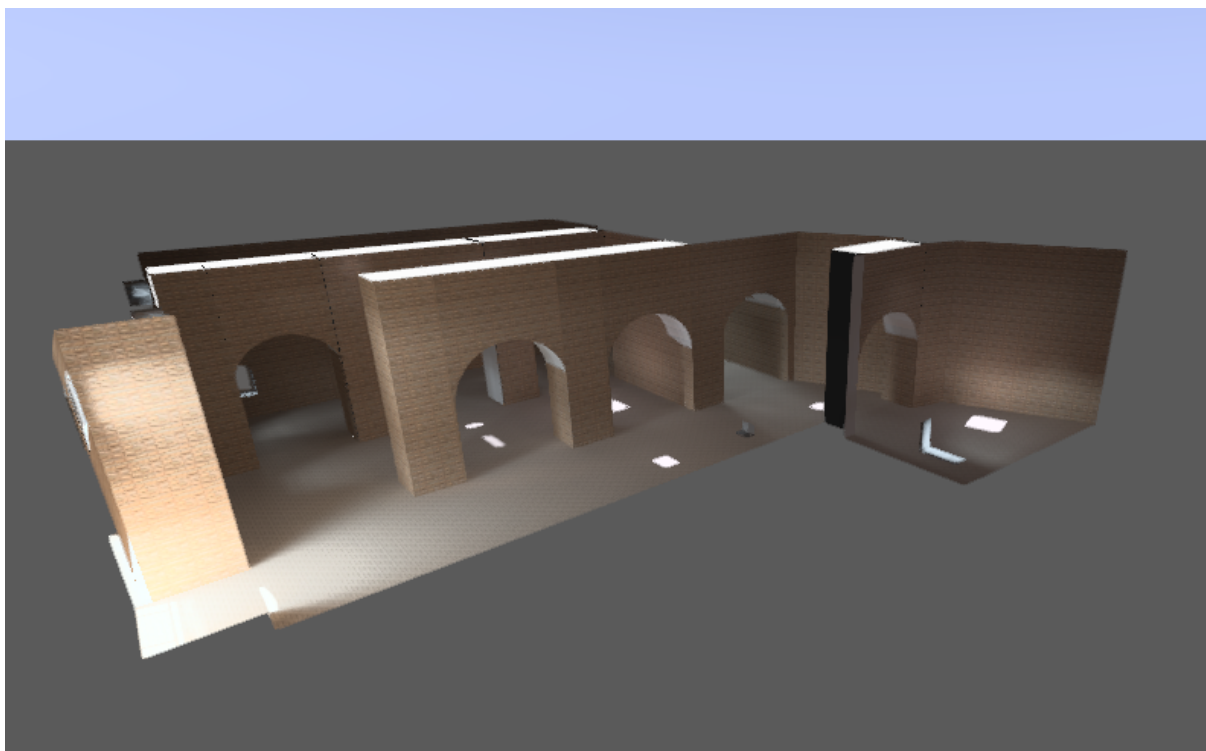


FIGURE 3.37 – La distribution de la lumière à 13h

Source : Dialux Evo, Auteur, 2025

3. Résultats de la simulation de 30 avril à 16h

Selon les résultats de la simulation du 30 avril 2025, à 16h, le logiciel de simulation Dialux indique que l'éclairement de l'espace d'exposition est :

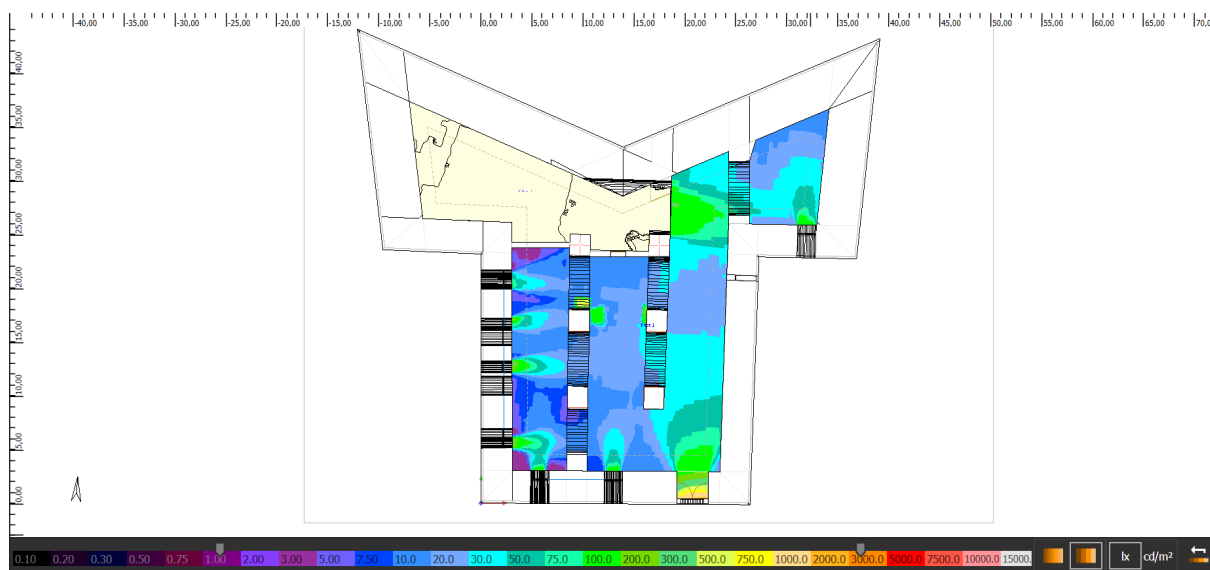


FIGURE 3.38 – Résultats de la simulation à 16h

Source : Dialux Evo, Auteur, 2025

L'analyse de la carte en fausses couleurs présente comme attendu une atténuation générale de la lumière naturelle dans l'espace à 16h, comme on pouvait s'y attendre au regard de la position trop basse du soleil au regard à l'heure.

- Dans la zone sud-est (en bas à droite), il reste quelques apports directs qui, traduits en jaune à vert clair, sont représentés localement autour de **500 à 1000 lux**, Cela suggère une exposition en partie ouest encore active, notamment via des ouvertures verticales.
- L'ouverture centrale en toiture ayant des capacités performantes à 13h00 est, à l'inverse, ici très peu mise à contribution, elle produit encore une tache en vert (**± 300 lux**) mais, cette fois-ci, la concentration lumineuse qu'on y perçoit est nettement amoindrie.
- La zone nord-ouest, (en haut à gauche) figure quant à elle totalement effacée en termes de lumière visible, ayant des niveaux de lumière entre **5 et 50 lux**, traduits en bleu foncé, voire en violet pour les zones extrêmes. Ces niveaux sont insuffisants pour un usage muséal.

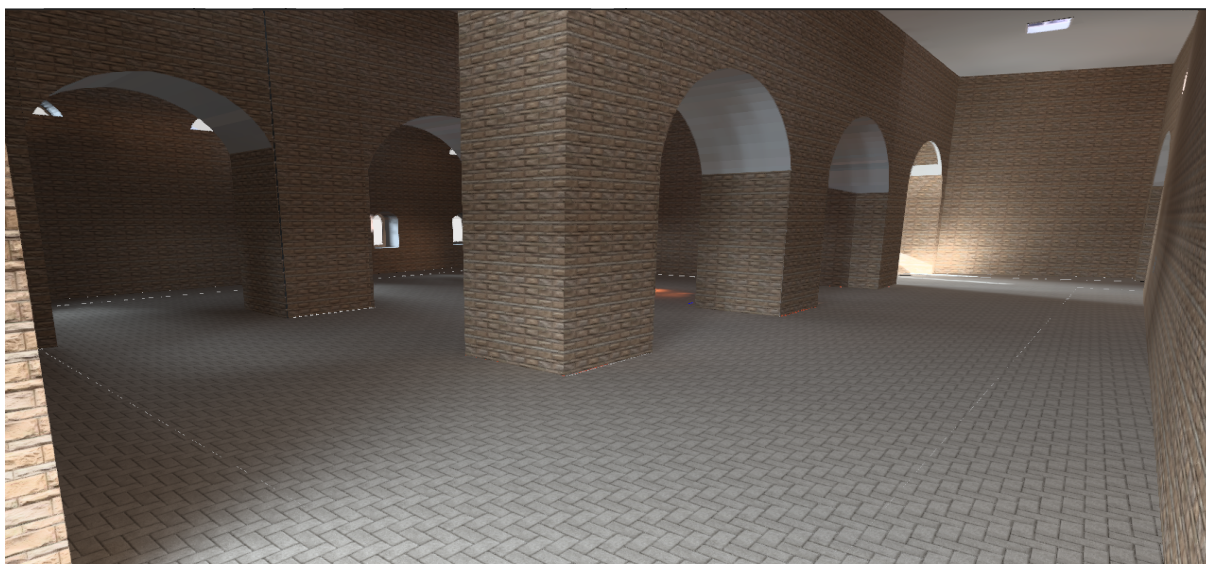


FIGURE 3.39 – La distribution de la lumière à 16h

Source : Dialux Evo, Auteur.

3.5.1 Interprétation générale des résultats simulés

On constate que l'éclairage naturel varie selon l'heure, et révèle une répartition de la lumière sur l'espace d'exposition fortement dépendante de l'orientation des fenêtres, de leur type et de la course du soleil.

Les simulations effectuées le 30 avril à 9h, 13h et 16h ne permettent pas de révéler une homogénéité de l'éclairage dans l'espace d'exposition. Les valeurs d'éclairage sont très disparates, allant de zones bien éclairées à plus de 2000 lux à d'autres secteurs presque dans la pénombre avec des niveaux parfois inférieurs à 100 lux, ne permettant pas d'assurer le confort visuel et la bonne mise en valeur des œuvres.

- À 9h, la lumière naturelle pénètre principalement par les fenêtres orientées côté est, donnant lieu à des risques d'éblouissement localisés. C'est toutefois la quasi-totalité des surfaces qui sont éclairées à des niveaux modérés autour de 300 lux, ce qui reste acceptable.
- À 13h, l'ensoleillement est maximal : la lumière directe est très concentrée sous l'ouverture zénithale centrale (jusqu'à 2000 lux), avec des taches lumineuses gênantes. Mais en moyenne (420 lux), le taux d'ensoleillement est conforme à la recommandation muséale. La salle est alors la plus éclairée, mais ne bénéficie pas forcément de la mieux répartie.
- À 16h, l'éclairage devient plus latéral (sud-ouest), menant à une baisse d'éclairement général de la pièce, même si certaines zones, en façade sud-est, sont encore bien exposées. La majorité de la salle descend alors entre 100 et 300 lux, mais dénote des recoins bien plus sombres.

De manière générale :

- Les zones proches des ouvertures (en toiture ou en façade) subissent un éclairage excessif et ponctuel, avec un risque accru d'éblouissement et de dégradation des œuvres sensibles.
- À l'inverse, celles qui ne sont pas bénéficiant des proximités de baies ou qui seraient masquées structurellement se trouvent en grande souffrance de lumière naturelle.
- Les ouvertures zénithales jouent beaucoup, celle du centre en particulier, mais leur fonctionnement est aléatoire selon l'heure, un contrôle via brise-soleil ou filtres diffusant étant préférable.

3.6 Présentation et interprétation des résultats du questionnaire

Le questionnaire élaboré dans le cadre de ce mémoire est essentiellement quantitative, visant à évaluer le ressenti des visiteurs concernant le confort visuel dans l'espace d'exposition du musée Bordj Moussa. Sa mise en œuvre s'est faite à l'aide de l'outil Google Forms créant ainsi un formulaire structuré, comportant principalement des questions fermées à choix multiples ou à échelle d'évaluation.

Concernant les modalités d'administration, le questionnaire a été diffusé en ligne, à travers les réseaux sociaux et des groupes cibles, notamment dans le cadre de la ville de Béjaïa afin de toucher un public le plus diversifié possible. De plus, une partie des réponses a été recueillie sur place auprès des visiteurs réels du musée invités à répondre au questionnaire sur leur smartphone ou sur une tablette mise à leur disposition. Le public ciblé comprenait principalement des visiteurs du musée, avec cependant quelques étudiants en architecture, dans le but de diversifier le retour. L'administration du questionnaire s'est déroulée sur la durée, d'environ [10 jours] et a permis de recueillir un échantillon de [27] réponses.

L'objectif spécifique de cette enquête était bien de disposer des données précises et mesurables, concernant la qualité de la lumière, la présence éventuelle d'éblouissement, la compré-

hension des œuvres, ainsi que le niveau de confort visuel ressenti par les visiteurs. À la fin du questionnaire, une question ouverte a également été proposée pour permettre aux participants d'exprimer librement leurs remarques ou suggestions, offrant ainsi un complément qualitatif à l'analyse globale.

Nous allons présenter dans cette partie l'interprétation des réponses recueillies auprès des usagers de la salle d'exposition de Bordj Moussa.

1. Informations générales

a. Aspects généraux : caractéristiques des usagers

L'enquête a recueilli l'avis de 30 personnes ayant visité le musée Bordj Moussa à Béjaïa. La plus grande partie des participants (87,5 %) a une tranche d'âge entre 18 à 30 ans, tandis que 12,5 % se trouve dans la tranche d'âge des 30 à 60 ans, traduisant donc une population jeune. Sur le critère du sexe, les femmes sont largement majoritaires, avec 83,3% des répondants, contre 16,7% d'hommes. De plus, la quasi-totalité des visiteurs interrogés (91,7%) sont des résidents de la wilaya de Béjaïa, confirmant l'aspect local du public fréquentant ce musée, et une petite proportion de visiteurs hors wilaya (8,3%).

b. La fréquence du musée

En ce qui concerne de la familiarité avec les espaces muséaux, l'échantillon se révèle équilibré puisque 50% des répondants venaient visiter un musée pour la première fois, tandis que l'autre moitié déclare s'y rendre de façon occasionnelle, soit une ou deux fois par an. Seule une minorité très faible (4,2%) affirme qu'elle fréquente les musées de façon habituelle c'est-à-dire trois fois et plus par an. Ces données indiquent que pour la majorité des visiteurs à qui nous avons posé la question, l'expérience au musée Bordj Moussa constitue un événement relativement rare, voire une découverte inédite, ce qui peut influencer leur perception du confort visuel selon leur niveau d'habitude ou d'exigence dans ce type d'espace.

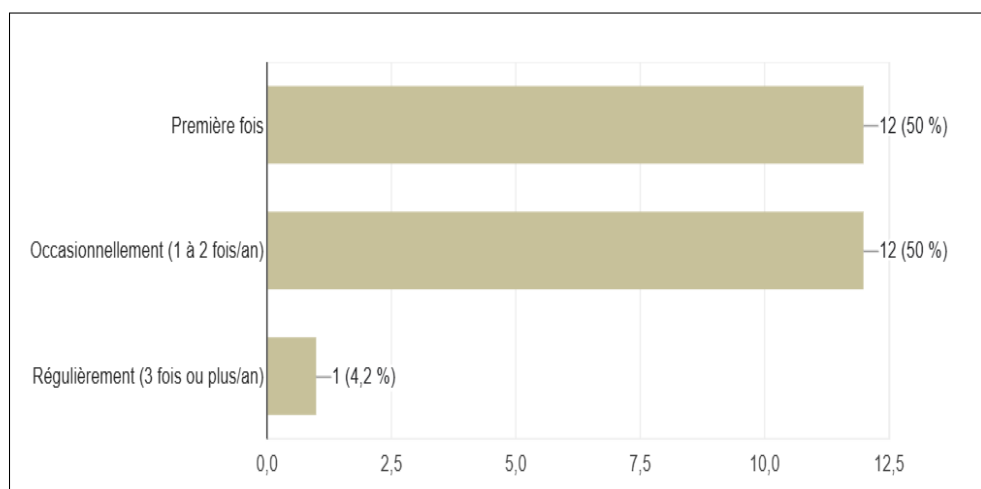


FIGURE 3.40 – Graphe de la fréquence des usagers

Source : Auteur, 2025

c. Les troubles de vision

En ce qui concerne l'état visuel des participants, 65,2% déclarent ne pas souffrir de trouble visuel ; en d'autres termes, les facteurs d'ordre personnel ne semblent pas affecter leur perception du confort visuel. À l'inverse, 13% des répondants affirment corriger au moyen des lunettes ou lentilles leur vision, alors que 21,7% des personnes ressentent des troubles non corrigés, tels que la sensibilité à la lumière ou une vision floue. Ce chiffre, non négligeable, met en avant l'importance d'un aménagement des espaces d'exposition accessible et visuellement confortable pour tous, et donc y compris pour des personnes atteintes de déficiences sensorielles.

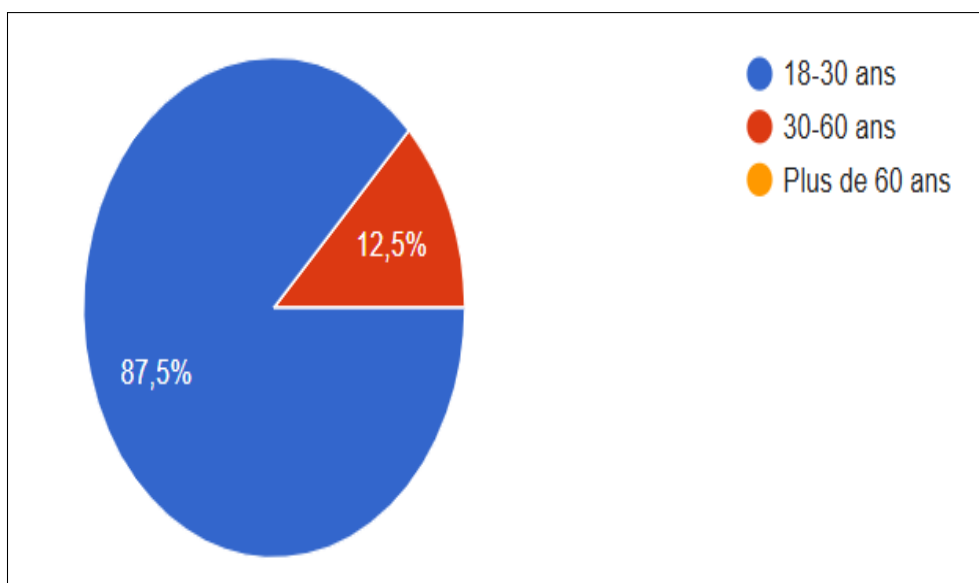


FIGURE 3.41 – Graphe de l'état visuel des usagers

Source : Auteur, 2025

2. Perception de l'éclairage

a. Perception de la luminosité des objets exposés

Lorsqu'il est demandé aux visiteurs si l'éclairage est suffisamment lumineux pour voir clairement les objets exposés, les réponses révèlent une perception globalement négative. En effet, 60,8% d'entre eux estiment que la lumière n'est pas suffisante, manifestation d'un rapport insatisfait à la lisibilité des objets exposés. Seuls 21,7% se déclarent positifs et 17,4% ne disent rien (neutre). Ces résultats confirment une faiblesse perçue en termes d'éclairage global et rejoignent les constats tirés des mesures in situ et des simulations, notamment dans les zones éloignées des apports zénithaux.

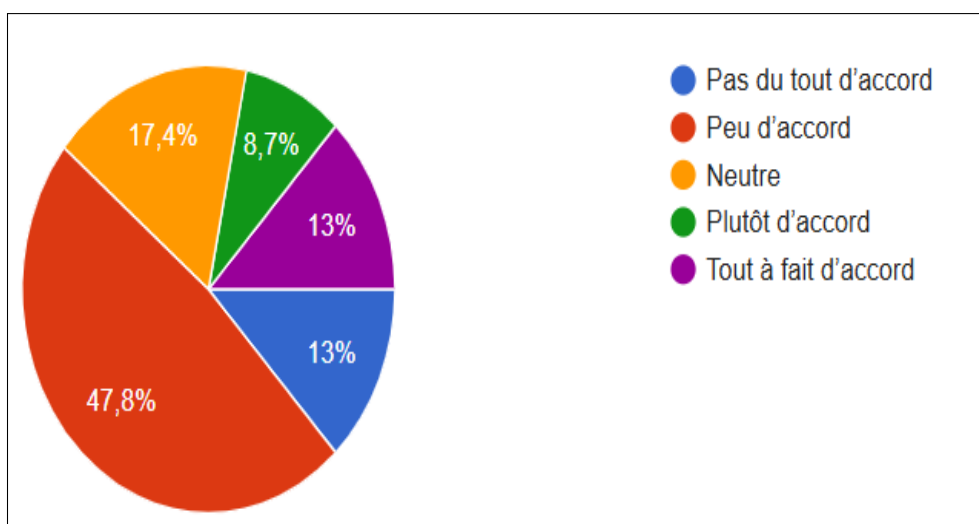


FIGURE 3.42 – Graphe de la perception des usagers

Source : Auteur, 2025

b. Perception de l'uniformité de l'éclairage dans l'espace d'exposition

En ce qui concerne la répartition de la lumière au sein de l'espace d'exposition, les réponses révèlent un jugement globalement critique à l'égard de son degré d'uniformité. En tout, plus de 54 % des visiteurs jugent cette lumière «peu» ou «pas du tout uniforme», ce qui souligne l'existence d'un déséquilibre entre des zones à forte illumination et d'autres dans l'ombre. 29,2% se prononcent de manière plus intermédiaire en la déclarant «moyennement uniforme», et une minorité (12,5%) «assez uniforme», tandis qu'aucun ne la juge «tout à fait uniforme». Ces retours accentuent les résultats des simulations Dialux dont les trames ont révélé des contrastes très marqués entre des zones éclairées et sous-éclairées, suivant notamment l'heure.

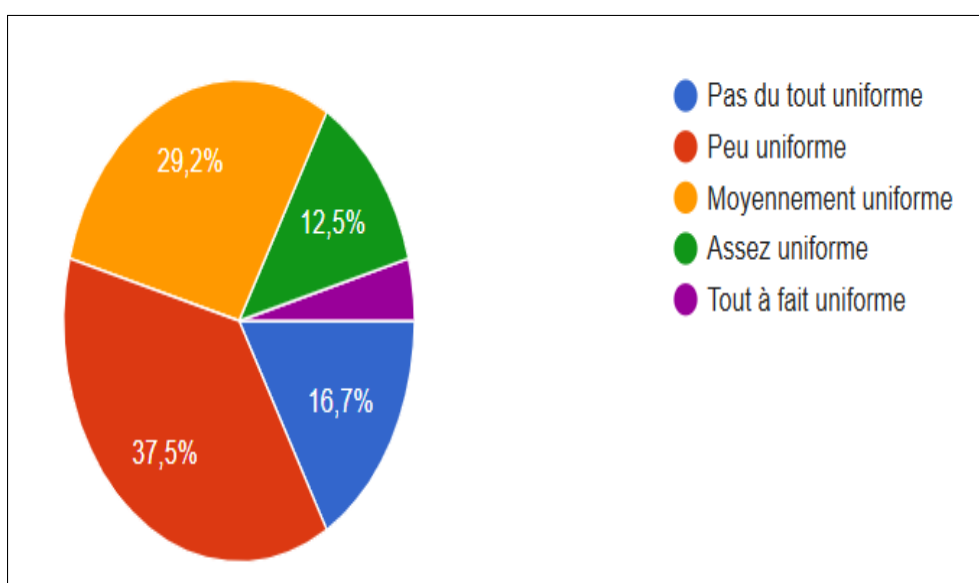


FIGURE 3.43 – Graphe de l'uniformité de la lumière dans l'espace d'exposition

Source : Auteur, 2025

c. Lisibilité perçue des panneaux et cartels explicatifs

En ce qui concerne la lisibilité des supports d'informations, il apparaît que de nombreux visiteurs (environ 70,8%) estiment pouvoir lire sans difficulté l'ensemble des panneaux et cartels explicatifs sans souffrir de fatigues oculaires. Ce résultat montre que malgré des lacunes rapportées de perception sur l'éclairage généralisé produit ou sa continuité, les éléments de la signalétique et de l'interprétation demeurent suffisamment lisibles. Néanmoins, environ 30% des répondants déclarent une gêne pour la lecture, ce qui mériterait d'être pris en compte, notamment pour améliorer le contraste, les types de traitement de la typographie, ou encore les placements des sources lumineuses en proximité avec les cartels.

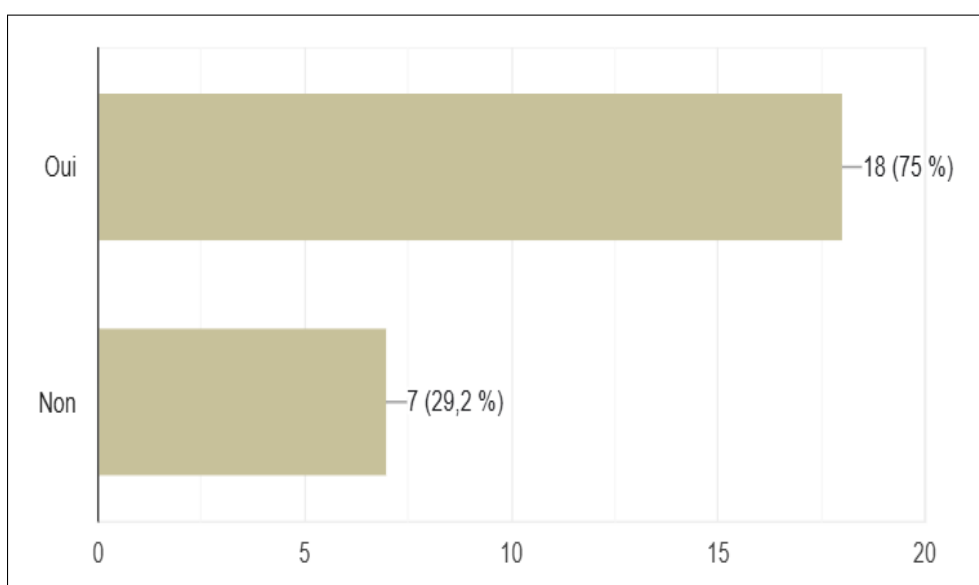


FIGURE 3.44 – Graphe de la lisibilité des panneaux

Source : Auteur, 2025

3. Perception de l'architecture intérieure

a. Impact visuel perçu des textures et couleurs murales

Les résultats obtenus en réponse à la question qui interroge la perception portée sur l'impact visuel relevé des textures et couleurs des murs (voir pierres, voûtes, etc.) pour les sculptures exposées, montrent des positions partagées : 52,2 % des répondants estiment que ces éléments ne posent pas de problème d'attention visuelle alors que 47,8 % d'entre eux estiment au contraire qu'ils peuvent perturber l'attention accordée aux œuvres exposées. Ce résultat montre une ambivalence dans les appréciations des matériaux architecturaux et laisse entrevoir que les visiteurs peuvent voir dans ces matériaux soit un décor valorisant sinon un décor neutre alors que certains d'entre eux semblent en être distraits, ce qui peut poser en sous-texte la question du maintien d'un équilibre précaire entre la préservation du caractère patrimonial du lieu et son efficacité muséographique.

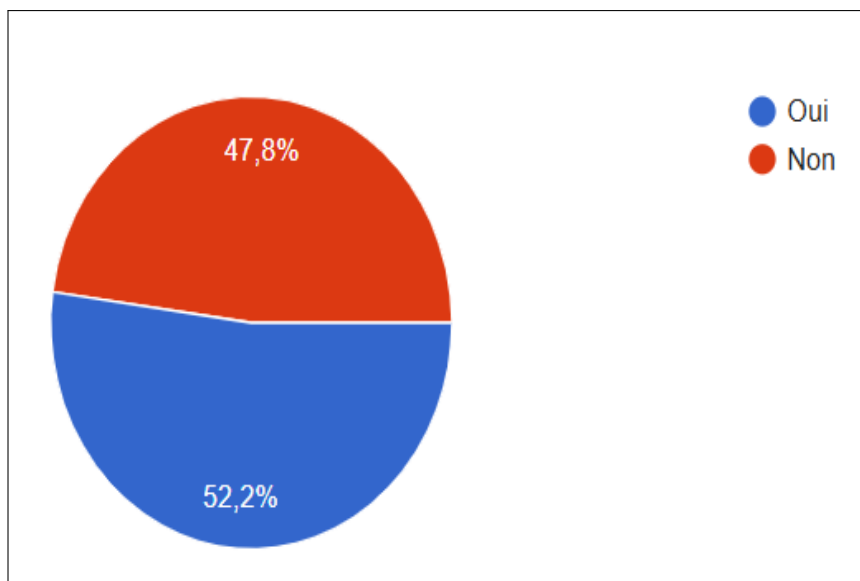


FIGURE 3.45 – Graphe de l'impact des textures sur la perception

Source : Auteur, 2025

b.Sensation d'espace : perception du volume et de la hauteur sous plafond

Sur le plan de la perception du volume et de la hauteur sous plafond, les retours sont très positifs puisque 87,5% des répondants trouvent que la hauteur sous plafond et le volume de l'espace favorisent une bonne sensation d'ouverture et d'espace, alors qu'un petit niveau de 12,5% se montre moins satisfait sur cet aspect. Ces retours laissent supposer que l'architecture de l'espace d'exposition, avec sa hauteur généreuse, contribue effectivement à faire de cet espace un lieu plaisant et aéré, ce qui est un enjeu primordial pour un environnement muséal car un environnement qui ne soit pas oppressant privilégie la circulation fluide des visiteurs et la contemplation appréciative des œuvres exposées.

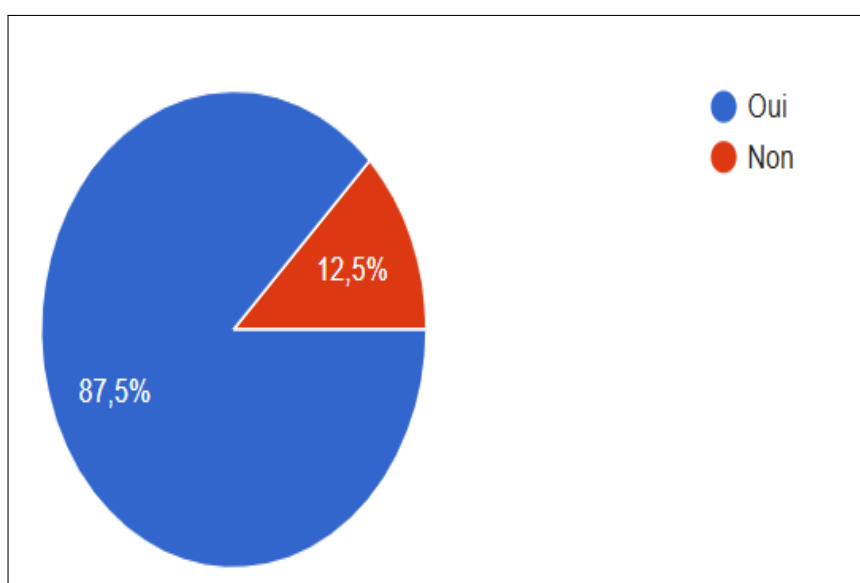


FIGURE 3.46 – Graphe de l'impact du volume sur la perception

Source : Auteur, 2025

c. Perception de la disposition des expositions et de la circulation

La plupart des personnes qui s'y sont rendues (83,3%) estiment que la manière dont sont placées les tables et objets favorise une circulation aisée au sein de l'espace d'exposition. Cependant 16,7% trouvent que la disposition pourrait nuire au bon déroulé du parcours. Ceci peut laisser penser que l'agencement est en général bien conçu mais qu'il est tout de même perfectible pour fluidifier la circulation.

d. Perception de l'impact de l'acoustique sur le confort visuel

S'agissant de l'effet de l'acoustique sur le confort visuel tout d'abord, les réponses sont assez variées, la majorité des visiteurs (41,7%) indiquant que l'acoustique ne génère pas de perturbation de leur confort visuel. 25% des répondants pensent toutefois que l'acoustique a une légère incidence sur leur confort, 16,7% sont d'avis qu'elle est moyennement perturbatrice, un chiffre qui descend à 8,3% en cas de malaise important engendré par la réverbération, ou l'ambiance sonore. Ces résultats laissent à penser que l'acoustique, même si elle est généralement acceptable, peut dans certains cas être un facteur de distraction pour certains visiteurs.

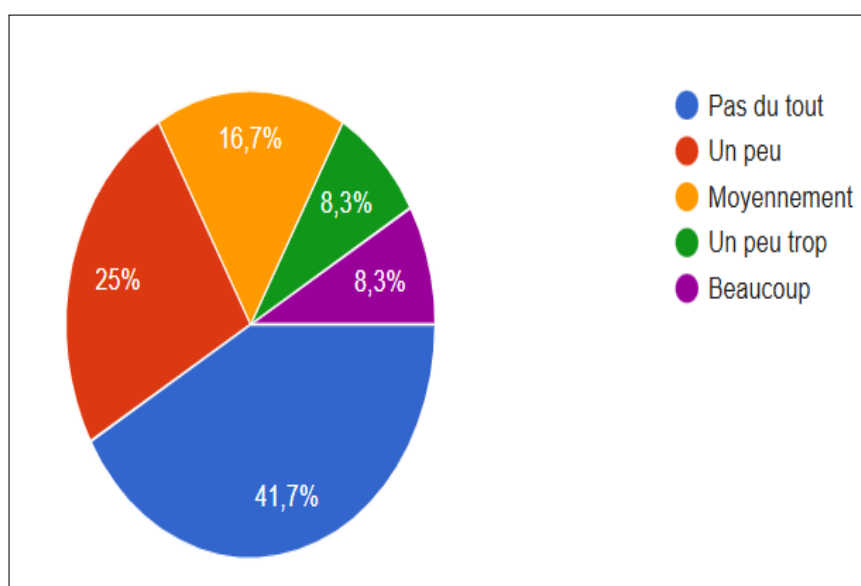


FIGURE 3.47 – Graphe de l'acoustique sur le confort visuel

Source : Auteur, 2025

4. Confort global et retours libres

a. Niveau de confort visuel global perçu pendant la visite

Concernant le confort visuel global, les résultats montrent une majorité de visiteurs relativement satisfaits mais susceptibles d'être mieux. Il y a 41,7 % de répondants qui se sentent « moyennement confortables » (soit une note de 3 sur 5), et 37,5 % d'« assez satisfaits » (ce qui reste une note de 4 sur 5). En revanche, 16,7 % des participants ressentent un inconfort visuel notable (soit une note de « peu confortable ») et 4,2 % des visiteurs signalent « pas du tout confortables ». Cela indique que si la majorité des visiteurs trouvent un confort visuel d'un

certain niveau, une proportion non négligeable ressent une malaise sensitif potentiel, peu être lié à la distribution lumineuse, mais peut-être aussi davantage à des éléments environnementaux.

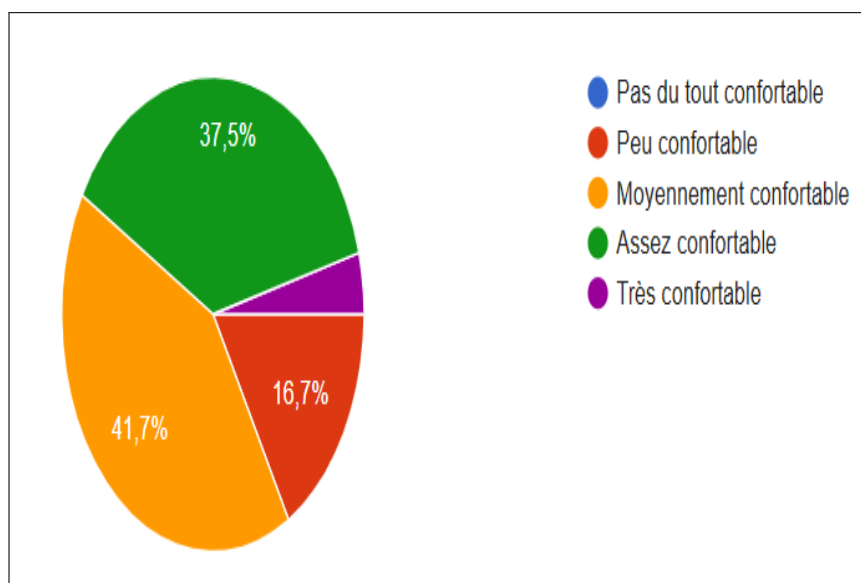


FIGURE 3.48 – Graphe du confort visuel global

Source : Auteur, 2025

b.Éléments ayant gêné visuellement les visiteurs

Les réponses aux interrogations portant sur la gêne visuelle ressentie dans cet espace révèlent plusieurs difficultés. Le manque d'organisation des objets dans l'espace est principalement évoqué, ce qui rend leur signification peu perceptible. Le caractère hétérogène de l'éclairage est également souligné : certaines parties sont très bien éclairées quand d'autres sont sombres, induisant ainsi une gêne dans la perception des objets.

La dimension de l'espace inoccupé, la hauteur du plafond et le non-correspondance de l'ambiance intérieure avec les éléments architecturaux créent également une forme d'inconfort visuel. Le manque de lumière artificielle est évoqué régulièrement tout comme la mauvaise répartition des sources lumineuses, jugées inadaptées pour mettre en valeur les objets exposés. Parmi les avis recueillis, l'absence d'ambiance lumineuse réfléchie est relevée, et l'éclairage n'est pas utilisé comme un levier de mise en valeur d'un bâtiment à fort potentiel historique, tandis que l'idée de l'inscrire dans une démarche touristique plus forte au niveau de la wilaya, avec des atmosphères porteuses de sens, est suggérée.

Enfin, des motifs plus anecdotiques mais récurrents comme les taches solaires sur les surfaces ou encore les pigeons sont aussi des facteurs gênant le confort visuel.

c.Appréciations visuelles des visiteurs

Les réponses données par les participants à la question ouverte sur ce qu'ils ont le plus apprécié sur le plan visuel témoignent d'un regard globalement favorable sur l'ambiance et sur

ce qui constitue les éléments architecturaux du musée : plusieurs visiteurs évoquent l'atmosphère particulière produite par la texture des murs et la hauteur des espaces qui produisent une sensation d'histoire et de patrimoine en lien avec l'esprit de l'édifice. L'harmonie entre les textures et les matériaux a également été soulignée au même titre que la qualité de l'aération et le détail des éléments architecturaux tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du musée.

Le hall d'exposition a plus particulièrement été retenu pour son caractère visuel, même si des personnes ont souligné une faiblesse d'expositions qui n'aide pas les œuvres à se révéler davantage, en faisant apparaître une opportunité de mise en valeur des expositions bien plus marquée. Enfin, si l'ambiance et le style architectural ont globalement convaincu les visiteurs, certains ont exprimé une certaine inquiétude sur le peu de lumière naturelle présente peu trop sombre pour certains espaces.

d.Suggestions d'amélioration du confort visuel

Les visiteurs ont proposé plusieurs pistes d'amélioration de l'éclairage et de l'architecture du musée pour optimiser la visibilité. Parmi ces suggestions apparaissent le choix d'une source lumineuse moderne d'un côté pour un bon éclairage général, et de l'autre, l'adoption de sources anciennes afin de mettre en valeur l'aspect historique du bâtiment tout en assurant une visibilité suffisante. Ce travail hybride pourrait permettre de concilier à la fois fonction et édifice.

D'autres ont aussi suggéré de mieux mettre en valeur les objets exposés à l'aide d'un éclairage spécifique pour chaque objet. Il s'agit de combiner des lampes ou objets lumineux dédiés pour chaque œuvre afin d'assurer à la fois leur bonne visibilité et la nécessité de respecter l'esthétique générale de l'espace. Concernant l'éclairage public, plusieurs suggestions ont été formulées en faveur de sources lumineuses plus discrètes et mieux intégrées au style architectural local, pour préserver l'harmonie visuelle de l'espace extérieur. D'autres participants ont proposé d'optimiser l'éclairage naturel en multipliant les ouvertures ou les puits de lumière pour renforcer l'ambiance intérieure, sans nuire à l'aspect historique du bâtiment, ou encore d'augmenter les sources lumineuses naturelles tout en proposant un éclairage artificiel plus approprié pour compléter l'ambiance.

3.6.1 Tableau comparatif des résultats obtenus

Ce tableau comparatif présente, de manière parallèle, les résultats des trois types d'analyses utilisées dans ce mémoire : la mesure in situ, la simulation numérique par Dialux, et l'enquête par questionnaire. Il permet de constater, sans croisement, les résultats collectés selon des critères communs liés au confort visuel dans l'espace d'exposition du musée Bordj Moussa.

Critères	Mesures in situ	Simulation Dialux	Questionnaire
Éclairement moyen	420 lux	250 à 420 lux selon l'heure	60,8% jugent la lumière insuffisante
Éclairement minimum	35 lux	18 à 30 lux	Zones sombres signalées par 30% des usagers
Éblouissement	Pics localisés jusqu'à 1985 lux	Surexposition ponctuelle jusqu'à 2000 lux	Gêne liée à l'éblouissement mentionnée
Uniformité lumineuse	Faible homogénéité constatée (grandes différences)	Variation importante selon les zones (Emin/Emoy très bas)	54% estiment que la lumière est peu ou pas uniforme
Lisibilité des cartels	Non mesurée	Non évaluée par simulation	71% trouvent les panneaux lisibles
Zones insuffisamment éclairées	Coins éloignés < 100 lux	Angles et recoins < 50 lux	Gêne à la lecture et à la perception signalée

TABLE 3.3 – Tableau comparatif entre les résultats obtenus par les trois méthodes d'analyse

Source : Auteur, 2025

3.7 Recommandations générales

À partir de l'analyse globale de l'espace d'exposition du musée Bordj Moussa – comprenant les relevés d'éclairement in situ, les résultats des simulations (Dialux) et les retours visiteurs exprimés dans le questionnaire, plusieurs insuffisances ont été relevées du point de vue du confort visuel. Ces éléments sont à l'origine des recommandations suivantes, articulées autour de l'éclairage naturel, de la conception architecturale, et de la prise en compte du caractère patrimonial du lieu.

Ces recommandations visent à optimiser la qualité visuelle et le bien-être des visiteurs, tout en "respectant et valorisant l'authenticité du bâti ancien", dans une logique de conservation intégrée. Elles inspirent également les choix d'aménagement lumineux dans le projet architectural personnel à venir.

3.7.1 Recommandations en matière d'éclairage naturel

- **Optimiser les apports zénithaux :** Favoriser l'entrée de lumière naturelle par le haut (puits de lumière, châssis vitrés en toiture), de manière discrète et intégrée, afin d'obtenir un éclairage plus uniforme sans générer d'éblouissements directs.
→ Réduction des ombres portées sans altérer la structure existante.
- **Multiplier les ouvertures latérales stratégiques :** Intégrer des ouvertures verticales (fentes, baies discrètes) aux orientations définies par l'ensoleillement, pour éclairer sans aveugler et ne pas créer de taches solaires gênantes.
- **Utiliser des dispositifs de contrôle réversibles :**
 - Brise-soleil fixes ou orientables.

- Claustres perforés.
- Rideaux lumineux diffusant.
- stores techniques.
- Pour maîtriser la variation de lumière en fonction de l'heure et de la saison.
- **Penser à l'orientation de l'espace** : Privilégier les orientations ou l'éclairage moins éblouissant et plus stable

3.7.2 Recommandations architecturales pour le confort visuel

- **Valoriser les matériaux historiques tout en maîtrisant les reflets** : garder les pierres apparentes, voûtes et enduits traditionnels tout en limitant les effets d'éblouissement par un traitement de surface mat ou diffusant.
- **Conserver des teintes murales claires**, compatibles avec la palette historique du bâtiment, afin de favoriser la diffusion homogène de la lumière.
- **Organiser les volumes sans dénaturer les espaces anciens** : éviter les ajouts de cloisons opaques ou faux plafonds qui compromettraient la perception du volume original. Mieux vaut aménager avec du mobilier bas ou des séparations légères.
- **Hiérarchiser les zones par l'éclairage plutôt que par la construction** : utiliser des intensités ou des températures de lumière différentes pour signaler les fonctions (parcours, contemplation, repos), sans nuire à l'unité architecturale.
- **Assurer l'harmonie entre ambiance lumineuse et identité patrimoniale** : chaque intervention lumineuse (source, spot, rail) doit être intégrée dans une démarche de mise en valeur du lieu (discrète, réversible, non invasive).

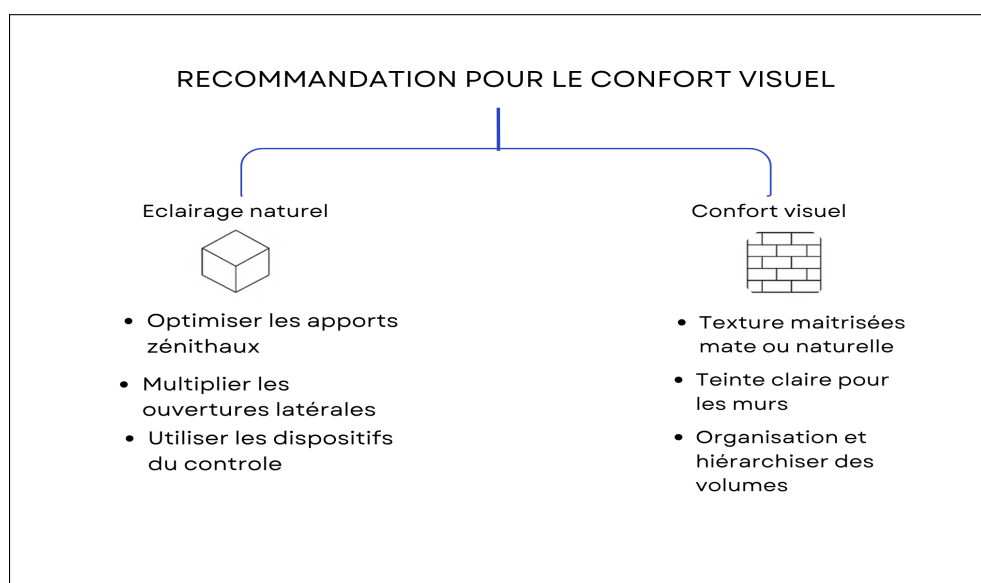


FIGURE 3.49 – Schéma récapitulatif des recommandations

Source : Auteur, 2025.

Conclusion

Cette analyse approfondie de la lumière revenant au musée Bordj Moussa, de manière méthodologique rigoureuse et croisée, a permis de vérifier les convergences et divergences entre les performances en termes de lumière du bâtiment et les exigences d'un confort visuel du musée, pour créer un meilleur cadre d'accueil.

Les résultats obtenus ont contribué à établir des recommandations concrètes réfléchies, en matière d'éclairage naturel et architectures à concevoir, dans une logique d'amélioration de l'expérience muséale tout en prenant soin de ses valeurs patrimoniales.

Dans le prolongement de cette réflexion, nous ferons prochainement application dans une modélisation concrète de ces connaissances en tant qu'intérêts que nous aurons à utiliser dans notre projet architectural pour une mise en œuvre opérationnelle, contextualisée.

Application de la recherche sur le projet fin d'étude

Introduction

Après avoir développé un cadre théorique autour des musées scientifiques, de l'Experimentarium, et mené une analyse contextuelle et méthodologique du confort visuel dans un espace muséographique existant (le musée Bordj Moussa), ce chapitre constitue une mise en pratique concrète des acquis de cette recherche.

Il illustre l'application directe des résultats obtenus dans mon projet de fin d'étude portant sur la conception d'un Experimentarium (un lieu de médiation scientifique) encre dans contexte climatique, architectural et socioculturel.

Ce dernier chapitre se structure en plusieurs partie : présentation du projet, analyse du site, élaboration du programme, développement conceptuel et morphogénétique, ainsi qu'une simulation d'éclairage naturel visant à garantir un confort visuel optimal dans les espaces d'exposition.

4.1 Présentation du projet de fin d'étude (L'Experimentarium)

Le projet de L'Experimentarium est un établissement public ayant pour vocation la vulgarisation de la science et la découverte de manière ludique, interactive et pédagogique.. Avec ses espaces d'exposition, le projet se préoccupe tout particulièrement de la qualité du confort visuel, par un éclairage approprié à l'expérience du visiteur tout en contrôlant les apports lumineux naturels pour favoriser le bien-être et la perception des espaces.

Situé en centre-ville de Béjaïa, dans un environnement urbain dense, le projet exploite le potentiel du site pour développer des solutions architecturales appropriées à son contexte : gestion de la lumière naturelle, maîtrise des éblouissements, portrait des vues extérieures valorisées, réduction des nuisances visuelles.

4.1.1 La relation du thème avec le projet

La notion de confort visuel et de perception des visiteurs ne concerne pas une seule approche, mais représente une question transversale centrale pour toute conception architecturale soucieuse de l'humain ; elle s'affirme d'autant plus dans les espaces d'exposition scientifique où la lumière, l'atmosphère, la lisibilité des contenus agissent sur la qualité de l'expérience vécue par le public. On a choisi de travailler sur L'Experimentarium pour des raisons diverses :

- C'est un projet d'éducation scientifique de découverte, et d'apprentissage interactif, où la perception des visiteurs est au centre de l'architecture.
- Le bâtiment constitue une base riche pour repenser l'organisation des espaces et améliorer l'éclairage naturel et artificiel en vue d'optimiser le confort visuel.
- L'Experimentarium est un espace qui doit s'adapter aux nouvelles attentes des visiteurs concernant la qualité spatiale, le bien-être et l'expérience sensorielle.
- En s'attelant à la question du confort visuel, il s'agit de considérer la lumière comme un matériau architectural à part entière, agissant comme repères pour les circulations, structures d'ambiance et porteurs des messages scientifiques diffusés par l'exposition.
- Un lien entre qualités sensibles de l'espace et réception des contenus doit être assuré du moment que : une lumière mal maîtrisée peut nuire à la compréhension, alors qu'un bon éclairage peut être fort enrichissant pour l'expérience de visite.

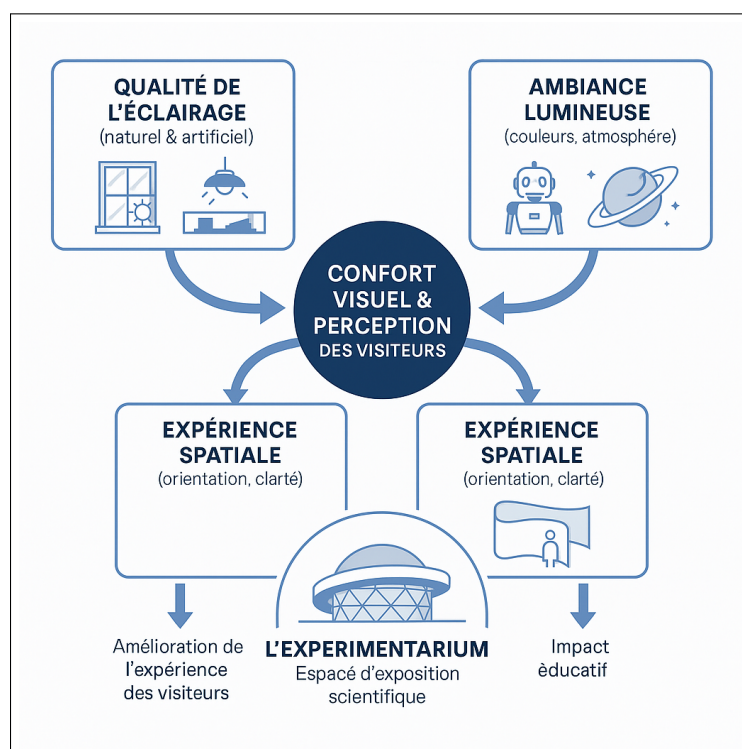


FIGURE 4.1 – La relation du thème avec le projet

Source : Auteur, 2025.

4.1.2 Les raisons du choix du projet

- L'Experimentarium est le projet de fin d'étude choisi parce qu'il incarne un espace emblématique de la vulgarisation scientifique accessible au public, en relation directe avec les avancées scientifiques et les nouveaux modes de médiation.
- D'après plusieurs témoignages et rapports, même si les ressources scientifiques ne manquent pas et sont présentes tant dans le milieu académique que professionnel, il n'existe pas d'espace adapté à une présentation claire, pédagogique et immersive pour le grand public, et qui s'accompagne d'un souci d'esthétique visuelle et sensorielle.
- Le projet s'inscrit dans un objectif d'articulation entre les acteurs scientifiques et les citoyens, notamment via un projet architectural qui valorise la lumière, l'ambiance et la perception, pour mieux comprendre les contenus exposés et susciter l'intérêt pour la science.

4.2 Analyse du site

4.2.1 Motivation du choix du site

Le choix du site d'intervention est fait suivant les critères suivante :

- Situation stratégique (Repères et visible).
- Une bonne accessibilité.
- Sa proximité pour but d'encourager le mouvement touristique dans la région.
- La disponibilité d'un ensoleillement favorable est cruciale.

4.2.2 Présentation du site d'intervention

Le site d'intervention il se situe dans le POS B11 dans le côté sud-ouest de la ville de Bejaïa.

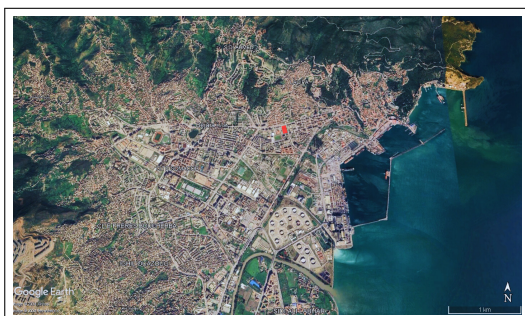


Figure 1 : Situation du site
Source : Google Earth, auteur, 2025



Figure 2 : Situation du site d'intervention
Source : Google Earth, auteur, 2025

4.2.3 Le cadre bâti

- Après avoir effectué l'analyse, nous avons constaté que notre périmètre d'étude abrite une large gamme d'équipements de grande ampleur et aussi la présence importante d'équipement administratifs et éducatifs.
- Le terrain se situe dans un environnement multi fonctionnel qui assure la bonne intégration Urbaine du projet.
- Le manque des espaces verts et les espaces de regroupement dans notre périmètre.

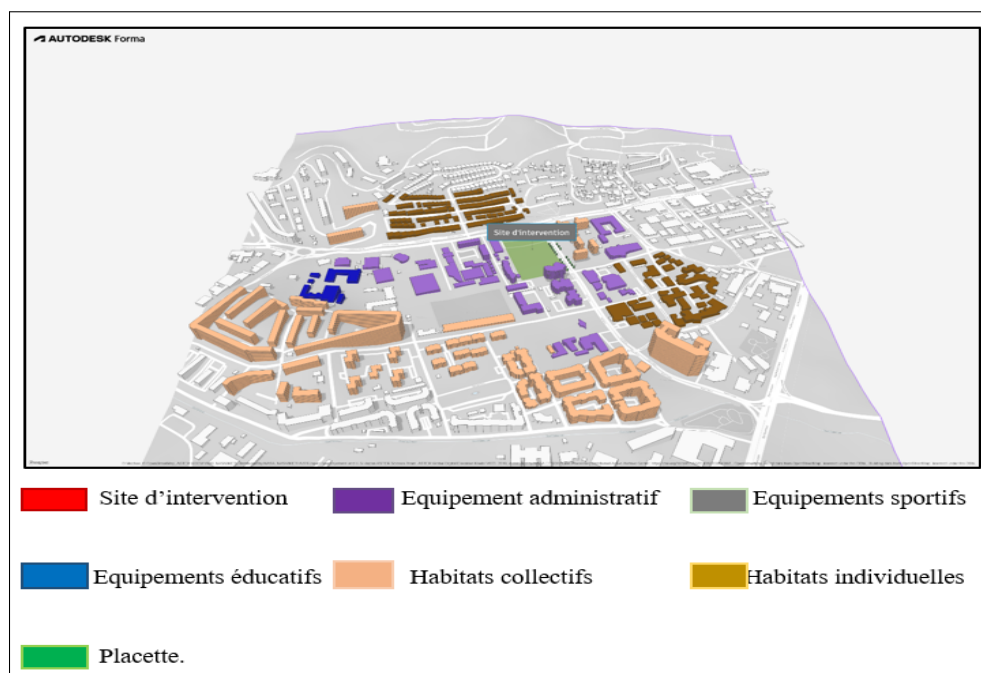


FIGURE 4.2 – Le cadre bâti

Source : Autodesk Forma, traité par l'auteur, 2025

4.2.4 Les voiries et accessibilité

La parcelle elle est structurée par deux voies du côté nord par le boulevard de la liberté qui est un axe important dans la ville de Bejaia à double sens chaque sens à 9m et du côté Est par la voie Harfi Taous à double sens chaque sens à 6m, Ce qui facilite l'accès à notre parcelle et une bonne visibilité.

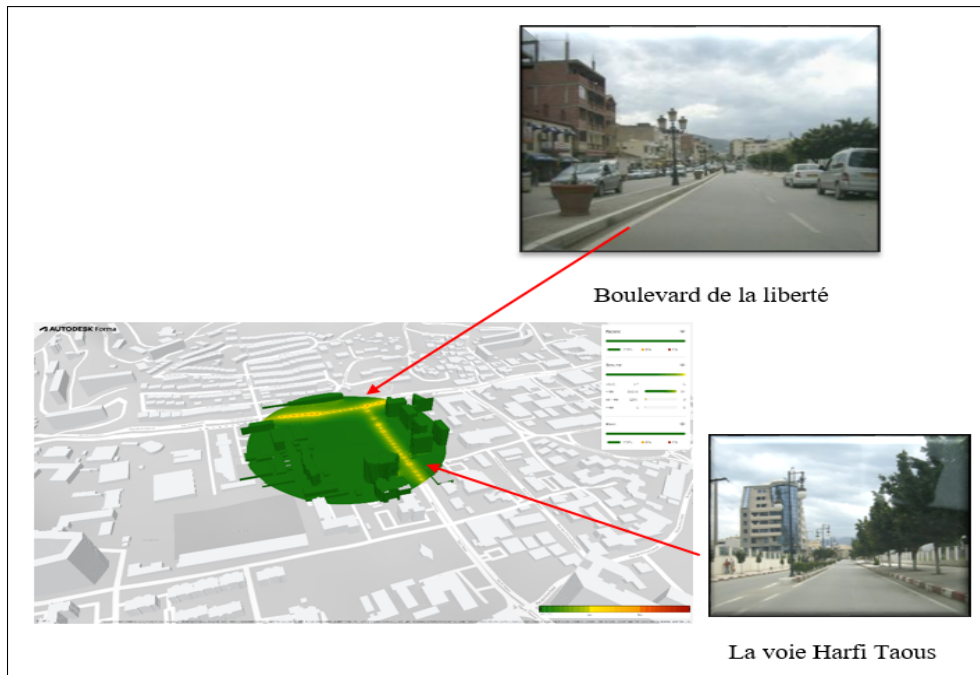


FIGURE 4.3 – Voiries et accessibilité

Source : Autodesk Forma, traité par l’auteur, 2025

La forte activité du boulevard de la liberté, caractérisée par un flux constant de véhicules et de piétons, facilite grandement l’accès à notre parcelle.

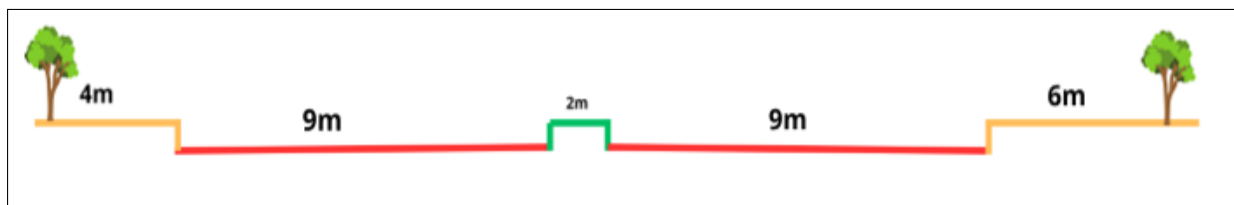


FIGURE 4.4 – Coupe sur le Boulevard de liberté

Source : Auteur, 2025.

Le niveau de circulation automobile et piétonne dans cette rue est moyen, sans congestion excessive.

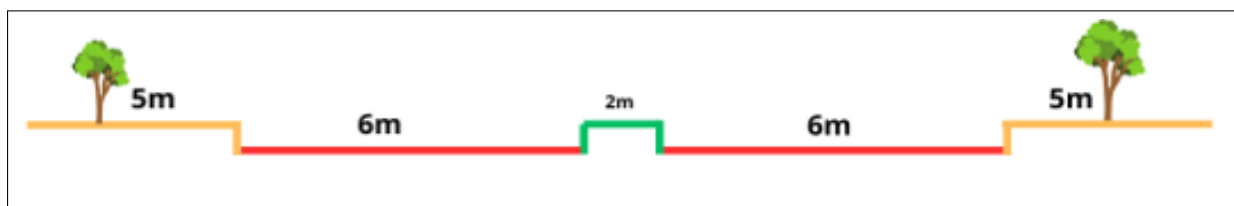


FIGURE 4.5 – Coupe sur la rue Harfi Taous

Source : Auteur, 2025.

4.2.5 Microclimat

1. L'ensoleillement

Les nuances de jaune sur l'échelle de couleurs mettent en évidence un déficit d'ensoleillement sur la partie sud de notre terrain pendant la période hivernale. Ce phénomène s'explique par l'ombrage généré par les bâtiments environnants, ce qui pourrait avoir des conséquences sur le choix des aménagements extérieurs et sur la performance énergétique de futurs bâtiments.

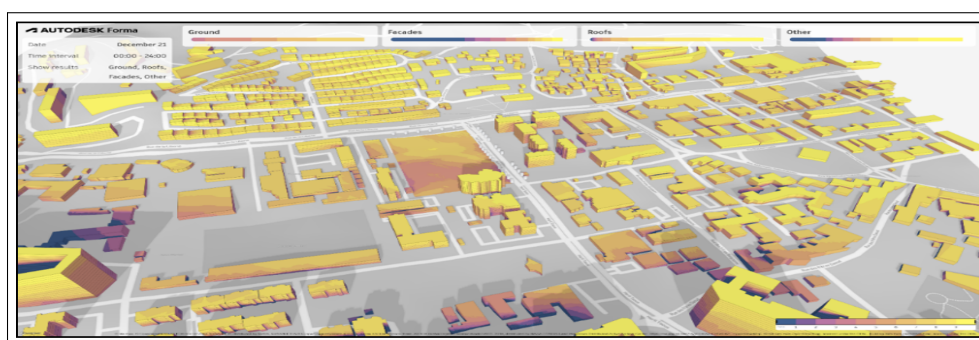


FIGURE 4.6 – Enssoleillement en hiver

Source : Autodesk Forma, traité par l'auteur, 2025.

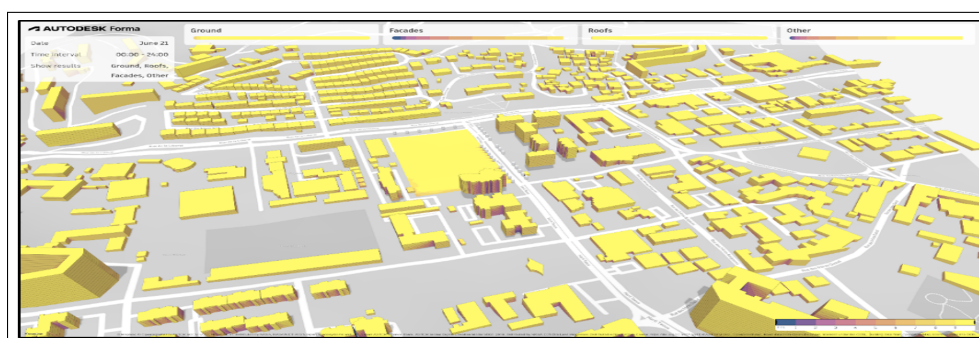


FIGURE 4.7 – Enssoleillement en été

Source : Autodesk Forma, traité par l'auteur, 2025.

La simulation en période estivale révèle une exposition solaire très importante sur l'ensemble du site, comme en témoigne la prédominance de teintes jaunes claires.

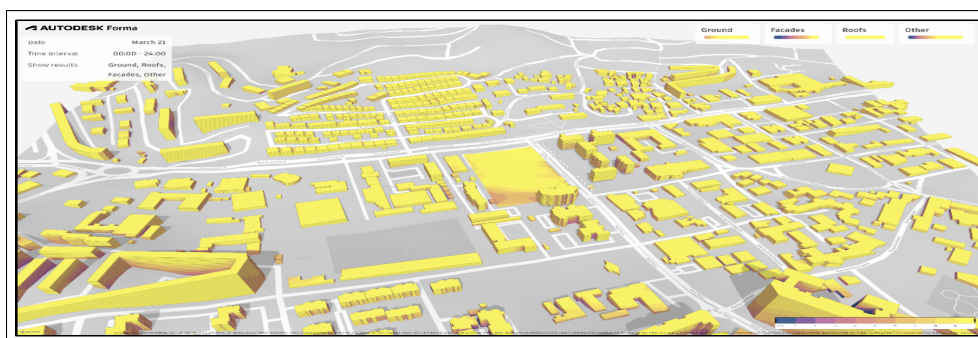


FIGURE 4.8 – Ensoleillement au printemps

Source : Autodesk Forma, traité par l’auteur, 2025.

Pendant la période printanière, la partie sud-ouest de notre site est principalement représentée par des teintes jaunes foncées, indiquant un ensoleillement réduit dû à l’ombrage projeté par les bâtiments adjacents. En revanche, le reste du terrain profite d’une exposition solaire maximale, avec une trajectoire solaire non obstruée allant de l’est à l’ouest.

2. Les vents

Notre étude des flux d’air met en évidence une exposition significative de notre site à des vents forts provenant des quadrants ouest et sud-ouest. Les flèches bleues, de plus en plus denses, matérialisent l’intensité de ces vents. De plus, l’échelle de couleurs associée à ces flèches nous renseigne sur les températures de l’air. On observe ainsi que la façade sud du site est relativement à l’abri de ces vents, grâce à la configuration des bâtiments voisins.

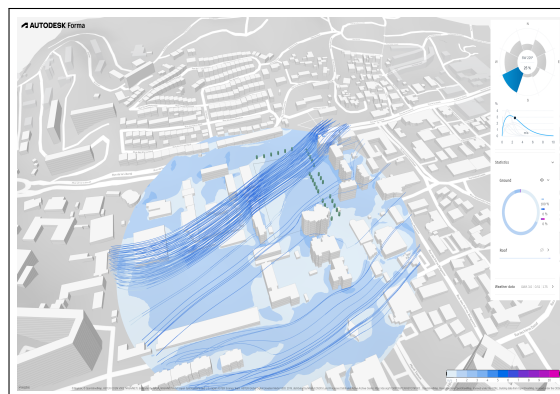
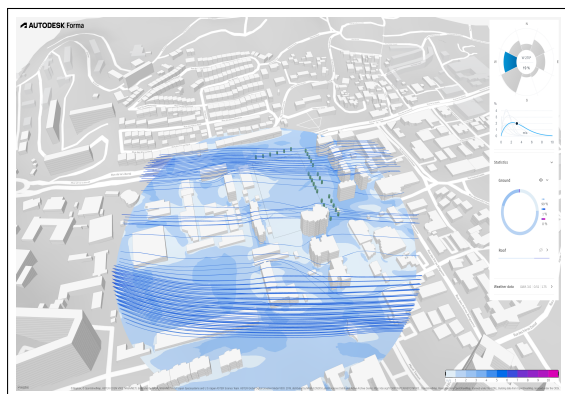


FIGURE 4.9 – Les vents du sud et sud-ouest

Source : Autodesk Forma, traité par l’auteur, 2025.

L’absence de vents du nord sur notre site est due à la barrière naturelle formée par le mont Gouraya.



FIGURE 4.10 – Les vents du nord

Source : Autodesk Forma, traité par l'auteur, 2025.

4.2.6 La synthèse de l'analyse

Le schéma ci-dessous synthétise l'analyse du site d'intervention. Il montre les principaux éléments influant sur le projet : les flux de circulation (fort et moyen), les sources sonores génératrices de nuisances ainsi que la dynamique des vents dominants interrogeant le site. Ce diagnostic graphique permet de comprendre les contraintes et les opportunités du site en termes d'accessibilité, de nuisances sonores et d'interactions climatiques, conditions favorables à la définition des orientations d'aménagement à venir.

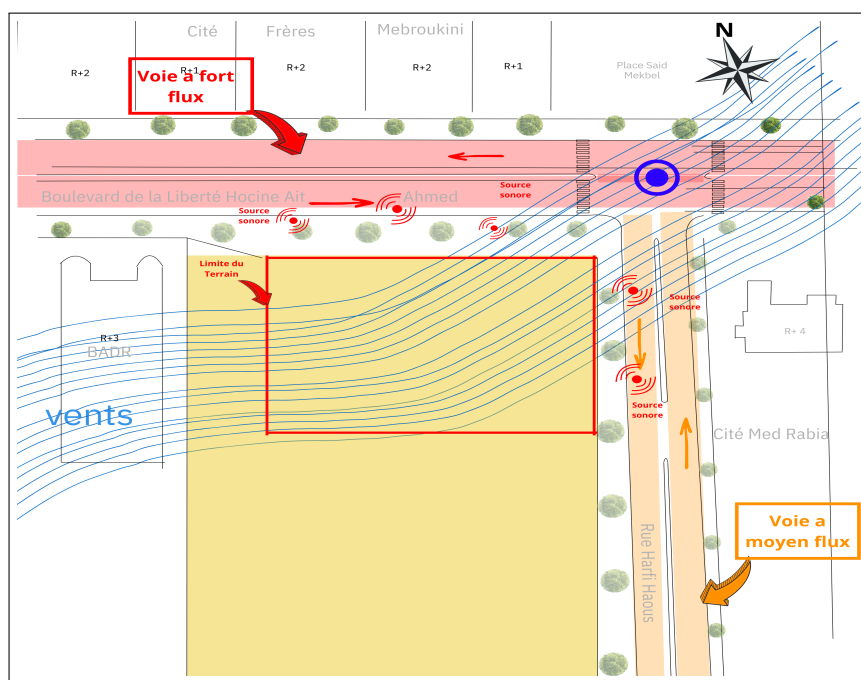


FIGURE 4.11 – Schéma de la synthèse de l'analyse du site

Source : Auteur, 2025.

4.2.7 Le schéma de structure

L'ensemble des analyses précédentes (site, accessibilité, microclimat, environnement bâti) a permis d'identifier les principaux éléments influençant la conception de mon projet.

Le schéma ci-dessous synthétise ces observations en visualisant les contraintes et opportunités du site. Il constitue une base de réflexion pour l'élaboration du projet.

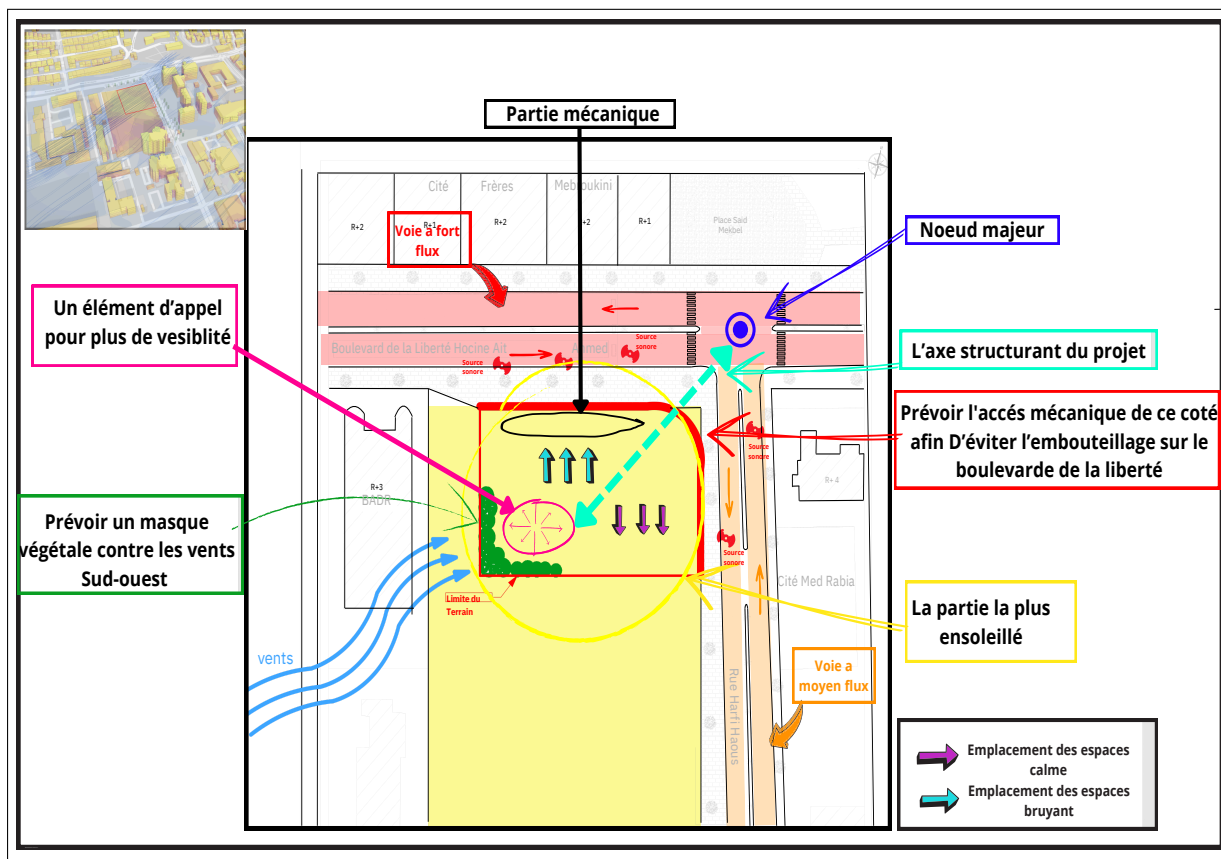


FIGURE 4.12 – Schéma de structure

Source : Auteur, 2025.

4.3 Le programme

Entité	Espace	Fonction	Surface
3*Accueil	Hall	Espace d'accueil et de guidage des visiteurs. Généralement double hauteur.	40–100 m ²
	Salle d'attente		
	Orientation		
4*Administration	Bureau directeur	Lieu de gestion du projet et d'assurance de sa bonne conduite.	75–115 m ²
	Bureau secrétaire		
	Salle de réunion		
	Archives		
3*Centre de recherche	Bibliothèque / Salle de lecture	Évaluer, effectuer des recherches présentant un intérêt pour l'avancement de la science et de la technologie.	100–200 m ²
	Salle d'informatique		
	Archives		
Centre de conférence	Salle polyvalente	Réunir les scientifiques et apprenants pour enrichir leurs connaissances.	100–150 m ² (100 pers.)
5*Exposition	Exposition sur l'astronomie et l'espace	Éveiller la curiosité scientifique, stimuler l'apprentissage interactif et encourager une meilleure compréhension des concepts complexes.	35% de la surface totale
	Corps humain et biologie		
	Expositions scientifiques interactives (électricité, énergie)		
	Robotique		
	Végétation		
5*Ateliers	Exploration spatiale	Enrichir l'exposition et favoriser l'apprentissage par la pratique.	30–60 m ²
	Voyage dans les organes et le mystère de l'ADN		
	Biologie		
	Construis ta lampe		
	Découverte des énergies renouvelables		

TABLE 4.1 – Programme surfacique du projet

4.4 Idéation et morphogenèses

4.4.1 La démarche conceptuelle de L'Experimentarium

La conception de notre expérimentarium repose sur une approche sensible, centrée sur l'humain et ses perceptions. En accord avec notre problématique de recherche relative au confort visuel et à la gestion qualitative de la lumière naturelle dans les espaces d'exposition, nous nous sommes efforcés de traduire cette intention dans une forme architecturale à la fois symbolique et fonctionnelle.

C'est dans cette perspective que nous avons puisé notre inspiration dans la coquille de nautilus, figure emblématique du monde naturel, dont la spirale logarithmique évoque l'harmonie, la croissance évolutive et l'unité géométrique, autant de valeurs en résonance avec un projet culturel vivant, ancré dans son environnement et ouvert à la découverte.

4.4.2 La genèse de la forme

1. L'analyse du site et réponses contextuelles

L'analyse du site a permis de dégager plusieurs éléments déterminants :

- Une orientation favorable à l'exploitation de lumière naturelle latérale.
- Des vues dégagées à valoriser.
- Des sources de nuisances sonores à contourner pour garantir le confort des usagers.

Ces constats orientent notre réflexion sur la position des différentes entités fonctionnelles, mais également sur l'implantation générale, l'une et l'autre ayant été envisagées pour minimiser les zones d'ombre, éviter les éblouissements et maximiser la fluidité des parcours.

2. Le Choix de la forme génératrice : la coquille de nautilus

La spirale du Nautilus s'est imposée comme une forme génératrice cohérente des valeurs du projet, offrant :

- Une distribution progressive et hiérarchisée des espaces.
- Une efficacité spatiale facilitant la prise en compte des apports de lumière naturelle des ouvertures latérales judicieusement percées.
- Une forme dynamique et enveloppante, propice à une expérience sensorielle graduée.



FIGURE 4.13 – La coquille de nautilé

Source : Auteur, 2025.

3.L'Implantation et orientation

Le projet est implanté dans les axes structurants, tout en étant un peu détaché pour créer une placette d'entrée, espace de transition entre la ville et le bâtiment qui participe à la convivialité et à l'identification du lieu. L'orientation a été étudiée selon l'exposition solaire tout en limitant les apports directs trop importants grâce à des dispositifs de contrôle lumineux (brise-soleil...etc).

4.La volumétrie

La volumétrie s'inscrit dans une spirale qui monte, générant des hauteurs croissantes donc du sentiment de cheminement et de progression. Dans cet esprit, le développement favorise aussi l'intégration de systèmes d'éclairages naturels par le haut sur la base des expositions proposées.

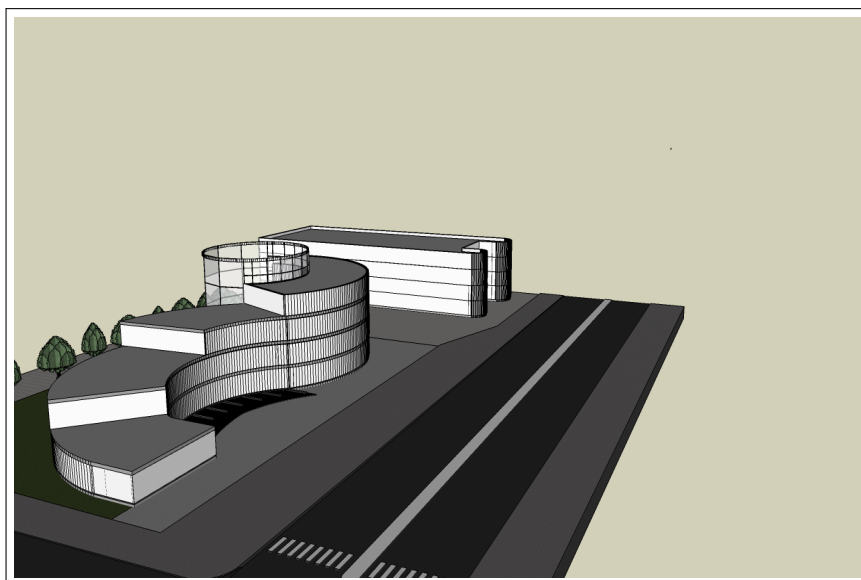


FIGURE 4.14 – La volumétrie

Source : SketchUp 2017.

5.L'aménagement des abords

Les espaces végétalisés et les zones de détente autour du bâtiment prolongent la perception de l'expérience muséale à l'extérieur. Ces abords contribuent au paysage tout en filtrant le soleil et en atténuant les nuisances sonores, apportant ainsi une forme de confort visuel qui se prolonge à l'intérieur ou à l'extérieur.

6.La traduction architecturale

La structure du projet s'appuie sur une organisation par niveaux, chaque niveau comportant des expositions associée à des ateliers d'expérimentation pour favoriser un lien entre le contenu du projet pédagogique et le contenu d'un travail pratique.

a.Le niveau bas (Accueils, fonctions ouvertes)

Situé en rez-de-chaussée, ce niveau comprend les espaces d'accueils, une salle polyvalente modulable accueillant les conférences et les ateliers collectifs, ainsi qu'une exposition sur la végétation dont l'atelier associé prend la forme d'un jardin d'expérimentation extérieur, prolongeant la route de l'expérience muséale vers un environnement naturel contrôlé.

b.Les niveaux intermédiaires

Chacun de ces niveaux comprenant des expositions sur un thème donné chacun avec son atelier correspondant permet une interaction entre la connaissance théorique et son expérimentation. Ces espaces sont dotés d'un éclairage latérales maîtrisé (filtre, brise-soleil) et d'ouvertures orientées en conséquence, permettant d'atteindre une qualité visuelle satisfaisante, sans éblouissement.

c.Le dernier niveau (Administration)

Le niveau administratif, qui occupe la plus haute partie du volume, est éloigné de la circulation des visiteurs. De cette manière, l'espace bénéficie d'un cadre calme, plus aisé pour le travail et pour le fonctionnement de l'établissement.

d.La tour verticale

Ce volume structuré sur plusieurs niveaux abrite la bibliothèque, une salle de lecture et un espace informatique. Son implantation tire parti d'une orientation favorable à la lumière latérale diffuse permettant d'atteindre un confort visuel pour la lecture et le travail sur écran. Des moyens de contrôle de lumière (brise-soleil) favorisent des ambiances lumineuses adéquates à l'usage et à l'heure.

4.5 Analyse des résultats de la simulation d'éclairage naturel de L'Experimentarium

Dans le cadre de l'évaluation de l'éclairage naturel dans deux espaces d'exposition de mon projet l'Experimentarium, une simulation a été menée avec logiciel DIALux evo, sur l'un des étages.

La simulation a été conduite avec le logiciel DIALux à partir d'une modélisation fidèle de l'architecture du projet tel qu'il est qu'en Mai 2025. Des conditions météorologiques standard de la ville de Bejaia ont été prises en compte pour simuler l'éclairage naturel à trois moments de la journée : 9h, 13h, 16h. Ces horaires permettent d'observer les variations de lumière selon l'orientation du bâtiment et la position du soleil.

La modélisation 3D, servant de base au calcul, intègre tous les éléments de façade tels que pensés dans le projet initial. Voici un aperçu du modèle utilisé pour cette simulation :

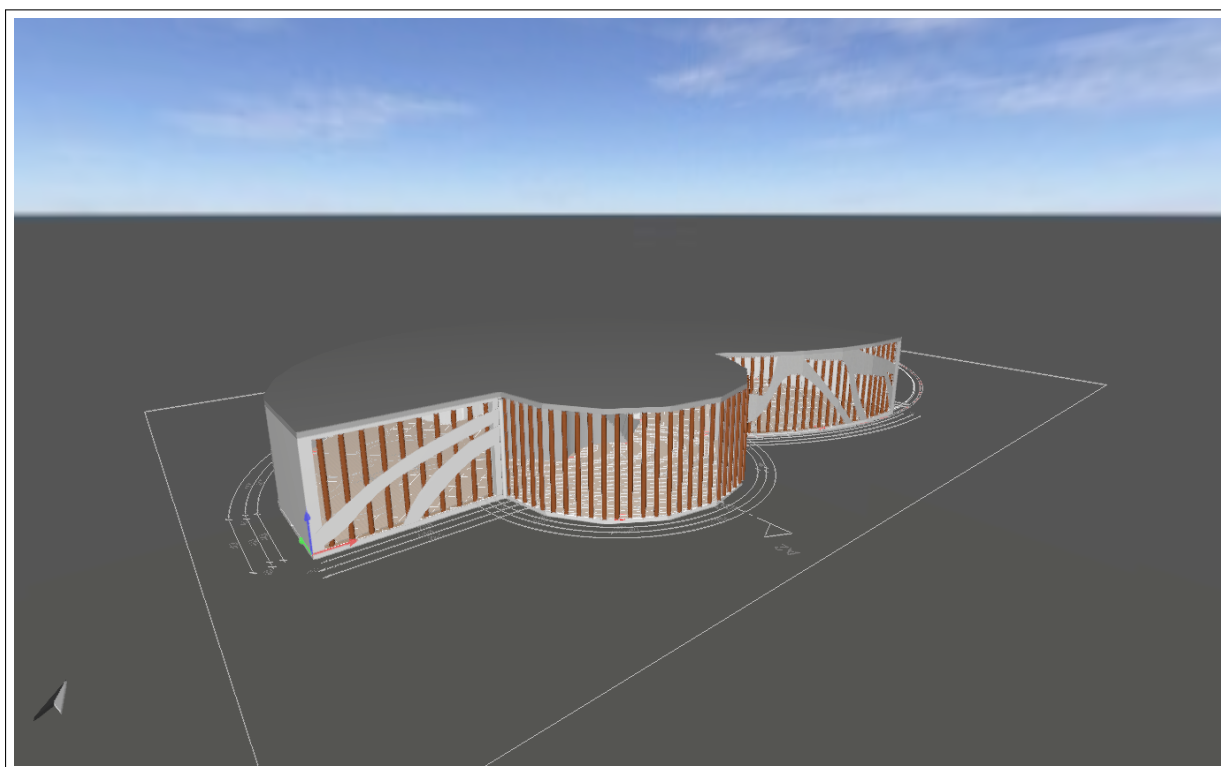


FIGURE 4.15 – La modélisation de mon projet

Source : Dialux Evo, Auteur, 2025.

4.5.1 Analyse des résultats de la simulation de 9h

À 9 heures, la lumière naturelle pénètre dans le bâtiment de manière plus inclinée, produisant ainsi une répartition lumineuse marquée par des contrastes entre zones fortement éclairées et zones plutôt faiblement éclairées.

Dans l'espace d'exposition des énergies renouvelables à gauche, les niveaux d'éclairement

sont généralement modérés **entre 200-400 lux**. Des pics atteignent **500 lux** dans les zones très proches des ouvertures. Cette lumière du matin, plus douce, permet d'installer une ambiance calme et agréable, permettant une mise en valeur des l'objets exposés tout en évitant un éclairage trop fort générant des reflets ou de l'éblouissement.

Dans l'espace consacré à l'exposition des robots, à droite, les niveaux d'éclairement sont en effet beaucoup plus élevés à 9h. On y observe des valeurs **de 1000 à plus de 2000 lux**, notamment dans les zones situées à proximité des ouvertures. Une telle luminosité peut dynamiser l'espace et valoriser les formes et matériaux des objets exposés. Néanmoins, cette lumière intense demande des protections pour les objets les plus sensibles.

En résumé, la lumière naturelle à 9h offre une ambiance contrastée entre les deux espaces d'exposition : tamisée et douce dans côté énergies renouvelables, plus vive et marquée en zone robots. Cette diversité peut être utilisée comme un atout scénographique.

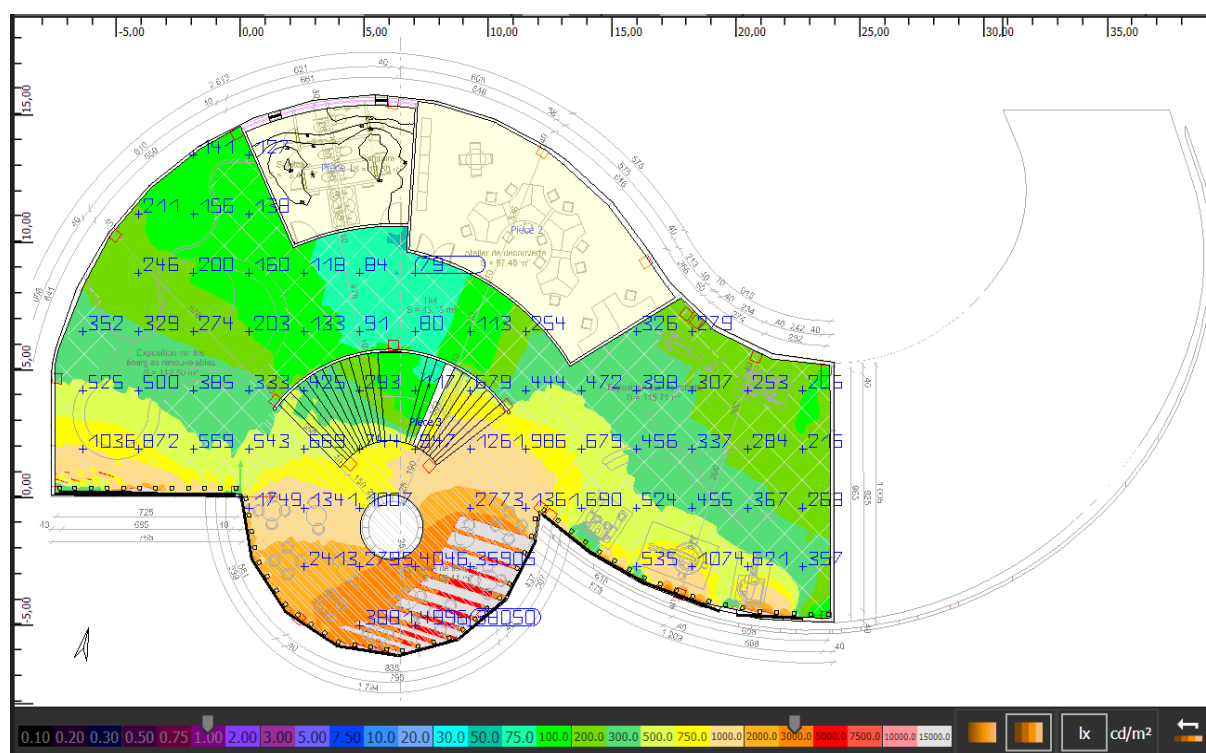


FIGURE 4.16 – Résultats de la simulation à 9h

Source : Dialux Evo, Auteur, 2025.

4.5.2 Analyse des résultats de la simulation de 13h

L'analyse des résultats de la simulation de lumière naturelle à 13h met bien en avant une distribution lumineuse dans son ensemble homogène et appropriée pour une exposition.

L'espace d'exposition des énergies renouvelables à gauche montre des niveaux d'éclairement variant principalement **entre 300 et 500 lux**. Cette distribution progressive de la lumière assure des zones plus éclairées à proximité des ouvertures, mais déclinant vers l'intérieur, créant

plusieurs niveaux d'intensité et s'assurant de mieux exposer certains objets qui nécessitant un niveau de lumière plus modéré dans les zones légèrement plus sombres.

En ce qui concerne le côté droit, là où se trouve l'espace d'exposition des robots, la lumière est un peu plus forte, avec des valeurs atteignant **parfois 700 lux** au plus près des ouvertures. Ce pic lumineux apporte un dynamisme certes, mais il nécessite la protection des objets les plus sensibles à une forte lumière. Ces zones les plus lumineuses sont compensées par des zones moins lumineuses en dessous de 500 lux visant ainsi à satisfaire différents besoins d'exposition. La dégradation progressive de la lumière dans cette espace crée une variété d'ambiances lumineuses et offre une grande flexibilité pour disposer les objets selon leur sensibilité à la lumière.

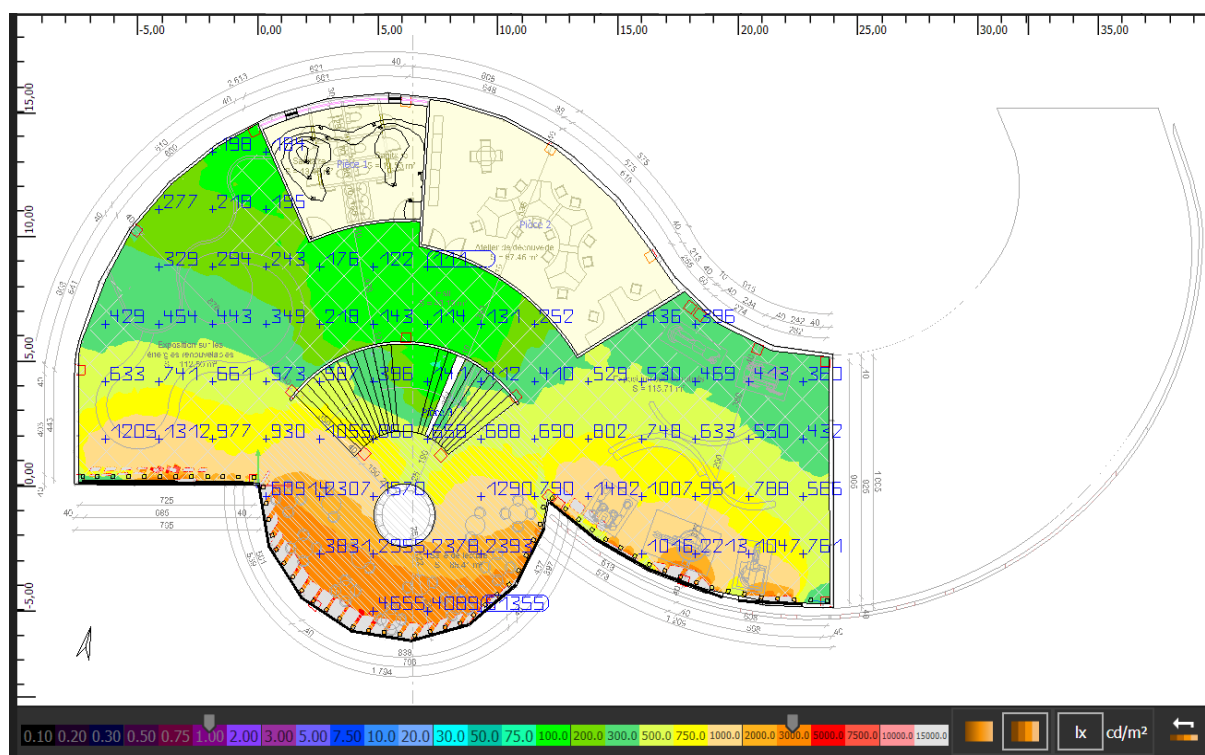


FIGURE 4.17 – Résultats de la simulation à 13h

Source : Dialux Evo, Auteur, 2025.

4.5.3 Analyse des résultats de la simulation de 16h

L'analyse du niveau d'éclairage naturel à 16h indique que la lumière dans les espaces d'exposition baisse progressivement, comparée aux pics plus marqués en milieu de journée. Cet abaissement découle de la position du soleil à cette heure.

Espace d'exposition des énergies renouvelables (à gauche)

L'éclairage dans cet espace reste modéré et mieux réparti, des valeurs **entre 200 à 450 lux**, ce qui reste confortable pour une exposition sans provoquer d'éblouissement. On note :

- Une lumière plus douce et homogène qu'à 13h ou 9h.
- Des espaces proches des ouvertures avec des niveaux d'éclairement légèrement plus élevés (supérieurs à 600 lux), mais sans excès.
- Une ambiance lumineuse qui s'adapte bien à la présentation de maquettes, de panneaux ou d'objets nécessitant un éclairage constant mais non agressif.

Espace d'exposition des robots (à droite)

L'éclairement est ici plus contrasté :

- Dans la majorité de l'espace, les niveaux de lumière se situent **entre 200 et 500 lux**.
- Quelques zones qui atteignent des niveaux de lumière plus importants, **entre 600 et 680 lux**.

Dans l'ensemble, la lumière naturelle en cette fin de journée, donne une atmosphère plus calme, plus tamisée, propice à une visite.

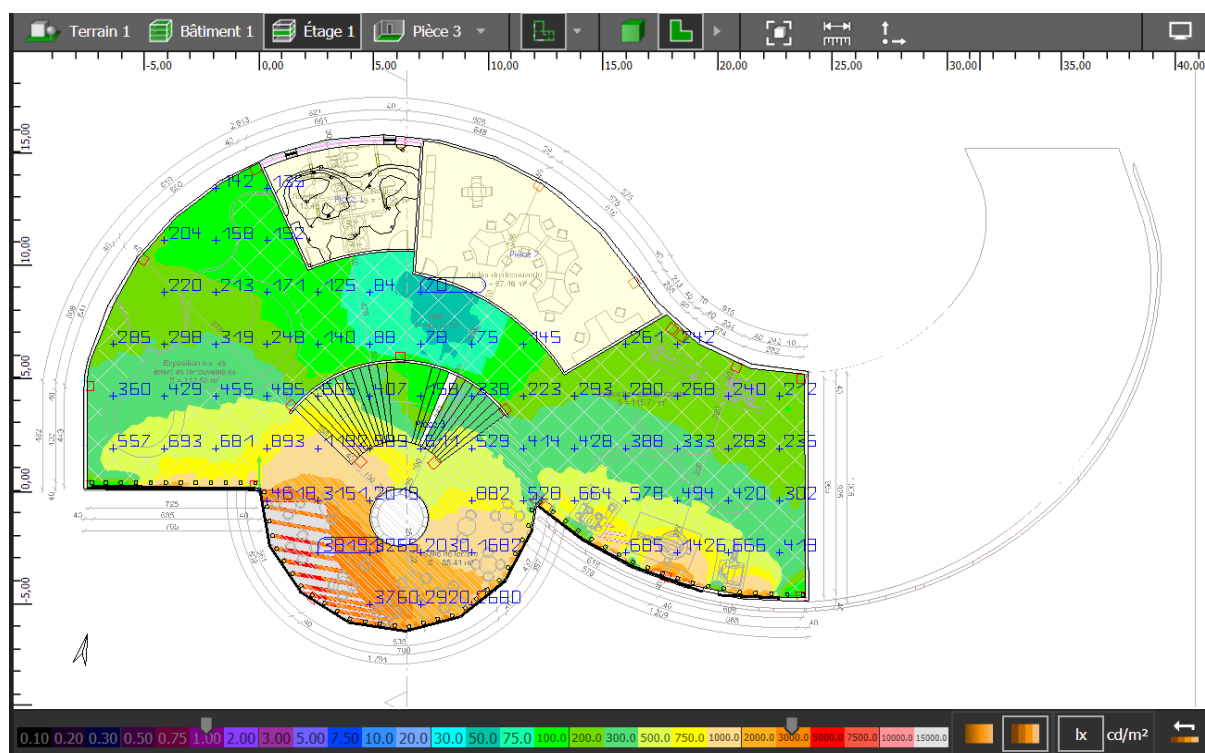


FIGURE 4.18 – Résultats de la simulation à 16h

Source : Dialux Evo, Auteur, 2025.

4.5.4 Synthèse générale des résultats de la simulation de lumière naturelle

L'ensemble des résultats de ces simulations réalisées à 9h, 13h, et 16h a permis d'avoir une vision d'ensemble de la dynamique de la lumière naturelle au fil de la journée dans les espaces d'exposition, mais également d'identifier des déséquilibres qui nécessitant une correction.

Les résultats révèlent que la lumière naturelle est bien captée dans l'ensemble des espaces grâce à l'orientation et à la morphologie architecturale du bâtiment.

- La lumière est plus douce à 9h, mais parfois insuffisante dans les espaces éloignés des ouvertures, si bien qu'à certains endroits.
- L'éclairage est optimal à 13h, bien réparti, avec des niveaux lumineux variant de 300 à 700 lux, ce qui est propice à une exposition.
- La lumière baisse naturellement à 16h mais reste stable dans la plupart des espaces, avec un confort visuel généralement suffisant, bien que des compléments ponctuels puissent être nécessaires.

Ces résultats sont globalement positifs, mais l'analyse permet d'identifier aussi des zones parfois surexposées ou sous-exposées, selon l'heure et la position des ouvertures. Cela montre que même avec une conception initiale bien pensée, l'éclairage naturel ne se régule pas toujours de façon homogène tout au long de la journée.

Ces constats viennent renforcer la cohérence du projet en lui apportant une approche plus fine et réaliste, capable de s'adapter aux conditions naturelles et aux besoins des usagers. L'éclairage naturel devient ainsi un outil de mise en valeur maîtrisé au service de l'architecture et des expositions.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons confronté les intentions de notre projet l'Experimentarium avec la réalité de la lumière naturelle simulée. La modélisation de L'Experimentarium et les tests effectués à 9h, 13h et 16h montrent à la fois des qualités et des défauts de la gestion de la lumière naturelle dans les espaces d'exposition.

Ces résultats, loin de remettre en cause l'intention initiale de projet, constituent une base solide de réflexion. Ils révèlent la nécessité d'ajustements fins : protection contre les sur-éclairages, apport complémentaire dans les zones de moindre éclairage, optimisation de l'usage spatial selon les variations lumineuses.

Cette mise en application de la recherche confirme que l'éclairage naturel, même s'il repose sur des paramètres multiples (orientation, climat, profondeur spatiale, usages. . .), peut être pensé comme un véritable outil de conception architecturale, capable d'influer sur les ambiances, de mettre en valeur les contenus, et impact le confort des usagers.

Conclusion générale

Ce mémoire est consacré à l'étude de la question du confort visuel dans les espaces d'exposition scientifiques, en cherchant à déterminer, notamment, les effets de la lumière naturelle sur la qualité spatiale et perceptive des espaces de visite. Pour ce faire, nous avons pris comme cas d'étude l'espace d'exposition de Bordj Moussa à Béjaïa pour tenter de comprendre comment la lumière naturelle, élément architectural essentiel, permet de favoriser une expérience de visite enrichissante, confortable et durable.

Après avoir mis en lumière les caractéristiques des espaces d'exposition consacrés à la science au travers d'une approche typologique et fonctionnelle, l'analyse s'est portée sur les potentialités de la lumière naturelle, sa variabilité, sa fonction révélatrice des volumes, sa capacité à mettre en valeur les objets exposés et sa contribution au ressenti sensoriel des usagers.

L'étude a révélé que la lumière naturelle maîtrisée comporte d'importants enjeux dans un espace d'exposition, car elle permet d'instaurer une ambiance apaisante, et surtout d'améliorer le confort visuel, en assurant une lumière douce, homogène et dynamique. Cependant, elle devient une source d'inconfort lorsqu'elle est mal orientée, trop intense ou mal filtrée. C'est ce que nous avons observé dans notre étude dans l'espace d'exposition de Bordj Moussa, fondée sur une analyse contextuelle, des mesures sur site, des simulations numériques et une enquête auprès des visiteurs.

Les résultats ont montré qu'il existe plusieurs types de déséquilibre dans l'apport de lumière naturelle, en raison notamment d'orientations des ouvertures, d'absence de dispositifs de contrôle, ou tout simplement d'une enveloppe architecturale peu adaptée aux exigences muséographique. Les constats réalisés ont permis d'aboutir à des propositions plus précises concernant la conception et le traitement architecturaux, en faveur d'un apport plus régulé de la lumière naturelle : orientation maîtrisée, dispositifs de filtrage, modulation, intégration du paysage lumineux de l'extérieur dans le parcours de visite...etc.

Cette recherche souligne l'importance de la lumière sur la considération de la lumière naturelle plus comme une source d'éclairement qu'un vecteur de confort, de sens et de narration dans les espaces d'exposition. Le confort visuel peut lui-même être au service d'une architecture plus sensible, plus appropriée et respectueuse du contexte.

Ces acquis méthodologiques et théoriques nous ont été utiles, en effet, de base pour l'application concrète sur le projet de fin d'étude, celui de la conception d'un Experimentarium à Béjaïa, où la lumière naturelle est déterminante pour définir les ambiances et l'expérience muséographique.

Bibliographie

1. Livres

- Bernard, S. (2015). *Sciences, technologies et sociétés de A à Z* (F. Bouchard, P. Doray, & J. Prud'homme, Éd.). Presses de l'Université de Montréal.
- Beylié, L. (1909). *La Kalaa des Beni-Hammad : Une capitale berbère de l'Afrique du Nord au XIe siècle*. Gallica, BnF.
- Boudenot, J.-C. (2003). *Dictionnaire de physique*.
- Ching, F. D. K. (2008). *Building construction illustrated* (4^e éd.). <https://drive.google.com/drive/folders/1-0m1yfqr1BrHh0537ioF9k5gUFaB7EjC>
- CRDP de Montpellier. (2011). *Architecture et lumière*. http://www.crdp-montpellier.fr/themadoc/Architecture/Architecture_et_lumiere.pdf
- ERCO. (2012). *L'éclairage des musées : Concepts, applications, technique*.
- Eugene, J. J. (1998). *Louis Kahn : Conversations with students*.
- Ezrati, J.-J. (1999). *Manuel d'éclairage muséographique* (2^e éd.). <https://ezrati-eclairage.weebly.com/eclairage-museographique.html>
- Gilman, B. Ives. (1918). *Museum ideals of purpose and method*. <https://archive.org/details/museumidealsofpu00gilmuoft>
- Gob, A., & Drouguet, N. (2014). *La muséologie. Histoire, développements, enjeux actuels* (4^e éd.).
- Le Corbusier. (1923). *Vers une architecture*. Consulté le 1 février 2025, sur <https://www.fondationlecorbusier.fr/oeuvre-livre/vers-une-architecture-le-corbusier-1923/>
- Neufert. (2009). *Neufert* (10^e éd.). <https://fr.scribd.com/document/360877804/Neufert-10-Edition-Fr-1>

2. Articles scientifiques

- Bergers, L., & Van Trijp, D. (2017). Musées des sciences : Une vue panoramique, pp. 366–370.
- Davallon, J. (1996). La muséologie scientifique : État des lieux et perspectives. *n° 44*,

4–11.

- Friedman, A. (2010). The evolution of the science museum. 63.
- Gobbato, V. (2023). Reconsidérer l'éclairage muséographique. *ICOFOM Study Series*, 50(2), 123–135. <https://doi.org/10.4000/iss.4806>
- Kirci, K., Dilmen, N. K., & Hilal. (2022). Transformation of science museums into science centers as a reflection of active learning in museum education on architecture. 4.
- Korichi, A., Guenadez, Z., & Faucherre, N. (2019). Le système défensif de la ville de Bejaia : Essai de restitution à travers les sources historiques, archivistiques et archéologiques.
- Martinez, P. (2016). Current science in museums and science centers.
- Mintz, A. (2005). Science, society and science centers. 12(supplément), 267–280.
- Nebout, E. (2015). Lumière naturelle : Comment la valoriser et la contrôler au mieux. *Cahiers Techniques du Bâtiment*, 296. <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/3-lumiere-naturelle-comment-la-valoriser-et-la-controler-au-mieux.27262>

3. Chapitres d'ouvrages collectifs

- Ezrati, J.-J. (2017). Museum and exhibition lighting. In *Handbook of Advanced Lighting Technology*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00176-0_56
- Korichi, A. (2015). Identification and valuing the Spanish fortification in Algeria : Case of the town of Bejaia. In *Defensive Architecture of the Mediterranean : XV to XVIII centuries* (Vol. II, pp. 175–182). Editorial Universitat Politècnica de València. <http://dx.doi.org/10.4995/FORTMED2015.2015.1737>

4. Thèses et mémoires

- Audrey. (2018). *Les mutations de la médiation culturelle et des pratiques de la visite* [Thèse de doctorat].
- Khadraoui, M. (2019). *Étude et optimisation de la façade pour un confort thermique et une efficacité énergétique (Cas des bâtiments tertiaires dans un climat chaud et aride)* [Thèse de doctorat].
- Kumar, C. (2021). *Museum for culture* [Mémoire de licence, Sathyabama Institute of Science and Technology].
- Mette, K. (2013). *Transformational experiences at the Experimentarium*.
- Schmitt, D. (2012a). *Expérience de visite et construction des centres de culture scientifique*.
- Schmitt, D. (2012b). *Expérience de visite et construction des connaissances : Le cas des musées de sciences et des centres de culture scientifique* [Thèse de doctorat, Université de Strasbourg].

- Tejashree. (2023). *The study of light and material*. https://issuu.com/tejashreekusuma/docs/issue_ver_-_study_part_1

5. Articles de journaux et magazines

- Hammouche, A. (2019). Vers la restauration du fort Bordj Moussa. *La Dépêche de la Kabylie*.
- Nouvel, J. (2017). Le Louvre Abu Dhabi : Un musée miroir, la lumière est une matière. <https://www.darchitectures.com/le-louvre-abu-dhabi-un-musee-miroir-la-lumiere-est-une-matiere-entretien-avec-jean-nouvel-a3834.html>

6. Billets de blog et rapports

- Agence Qualité Construction (AQC). (2023). *Ambiances lumineuses & confort visuel*.
- Bouvier, C. (2022, mars). Durée de vie LED - explications et mesures. *Lumeninside*. <https://lumeninside.fr/duree-de-vie-led/>
- Dansk, S. (2014). *Experimentarium*.
- Emilie. (2009, mars). Enveloppe. Blog. <http://lespacedelentredeux.blogspot.com/>
- Lakhyani, K. (2020). *Lighting Design in Museum*. https://issuu.com/komallakhyani/docs/komal_dissertation_report
- Metz, D. (2015, juillet). La luminance V() selon la CIE. <https://modele-cie-1931.blogspot.com/2015/07/7-la-luminance-v-selon-la-cie.html>
- Ministry of Education. (2018). *Science Centre—International Architectural Design Competition*.
- Shakya, S. (2018). *Lighting in museum and art gallery*. <https://www.slideshare.net/SHRISTISHAKYA7/lighting-in-museum-and-art-gallery-98865209>
- UCLouvain. (2025). *Le confort visuel*. https://sites.uclouvain.be/eclairage-naturel/guide_confort.htm
- Vilatte, J.-C. (2007). *Méthodologie de l'enquête par questionnaire*. https://www.unige.ch/dife/index.php/download_file/view/12793/

7. Pages web

- Experimentarium/CEBRA. (2017). <https://www.archdaily.com/804130/experimentarium-cebra/5888cfd3e58ece908f000179-experimentarium-cebra-photo>

Annexes

Questionnaire



Évaluation du Confort Visuel au Musée Bordj Moussa à Béjaïa

Dans le cadre d'un travail de recherche sur l'impact de l'éclairage et de l'architecture sur le confort visuel dans les espaces d'exposition, ce questionnaire vise à recueillir votre ressenti en tant que visiteur du musée Bordj Moussa (Béjaïa).

Vos réponses sont anonymes, confidentielles, et serviront uniquement à des fins académiques.

1. Informations générales

Description (facultative)

Quel âge avez-vous ?

- ☐ 18-30 ans
- ☐ 30-60 ans
- ☐ Plus de 60 ans

D'où venez-vous ?

- ☐ De Béjaïa
- ☐ D'une autre wilaya

Genre

- ☐ Femme
- ☐ Homme

Fréquence de visite de musées ?

- ☐ Première fois
- ☐ Occasionnellement (1 à 2 fois/an)
- ☐ Régulièrement (3 fois ou plus/an)

Avez-vous un trouble de la vision ?

- ☐ Non, je n'ai aucun trouble visuel
- ☐ Oui, je porte des lunettes ou des lentilles de correction
- ☐ Oui, je souffre d'un trouble visuel non corrigé (ex. : sensibilité à la lumière, vision floue, etc.)

2. Perception de l'éclairage

Description (facultative)

L'éclairage est suffisamment **lumineux** pour voir clairement les objets exposés.



- ☐ Pas du tout d'accord
- ☐ Peu d'accord
- ☐ Neutre
- ☐ Plutôt d'accord
- ☐ Tout à fait d'accord

La répartition de la lumière est-elle uniforme dans l'espace d'exposition?

- ☐ Pas du tout uniforme
- ☐ Peu uniforme
- ☐ Moyennement uniforme
- ☐ Assez uniforme
- ☐ Tout à fait uniforme

Pouvez vous lire facilement les panneaux et cartels explicatifs sans fatigue visuelle.

- ☐ Oui
- ☐ Non

3. Perception de l'architecture intérieure

Description (facultative)

La texture et la couleur des murs (pierres, voûtes) ne distraient pas visuellement.

- ☐ Oui
- ☐ Non

Le volume et la hauteur sous plafond donnent une bonne sensation d'espace.

- ☐ Oui
- ☐ Non

La disposition des expositions (tables, objets) est aisée à parcourir.

- ☐ Oui
- ☐ Non

L'acoustique (réverbération, bruit ambiant) ne perturbe pas votre confort visuel.

- ☐ Pas du tout
- ☐ Un peu
- ☐ Moyennement
- ☐ Un peu trop
- ☐ Beaucoup

4. Confort global et retours libres

Description (facultative)

Globalement, vous vous senti confortable visuellement pendant votre visite ?

- ☐ Pas du tout confortable
- ☐ Peu confortable
- ☐ Moyennement confortable
- ☐ Assez confortable
- ☐ Très confortable

Qu'est-ce qui vous a le plus gêné (visuellement) dans cet espace ?

Réponse longue

Qu'avez-vous le plus apprécié sur le plan visuel ?

Réponse longue

Avez-vous des suggestions pour améliorer le confort visuel (éclairage ou architecture) ?

Réponse longue